UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

ANA LUCIA CHRISTOVAM DE SOUZA

CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA DAS BOLHAS IONOSFÉRICAS A PARTIR DE OBSERVAÇÕES GNSS



PRESIDENTE PRUDENTE

2019

ANA LUCIA CHRISTOVAM DE SOUZA

CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA DAS BOLHAS IONOSFÉRICAS A PARTIR DE OBSERVAÇÕES GNSS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Tadeu de Assis Horonato Muella (UNIVAP)

PRESIDENTE PRUDENTE

2019

S729c

Souza, Ana Lucia Christovam de

Cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS / Ana Lucia Christovam de Souza. -- Presidente Prudente, 2019

97 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo Camargo

Coorientador: Marcio Tadeu de Assis Horonato Muella

1. GNSS. 2. Irregularidades Ionosféricas. 3. Bolhas de Plasma. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CÁLCULO DA VELOCIDADE DE DERIVA DAS BOLHAS IONOSFÉRICAS A PARTIR DE OBSERVAÇÕES GNSS

AUTORA: ANA LUCIA CHRISTOVAM DE SOUZA
ORIENTADOR: PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciencias e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciencias e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. VALDIR GIL PILLAT
Geofisica IP&D / Universidade do Vale do Paraíba

Presidente Prudente, 21 de fevereiro de 2019

DADOS CURRICULARES

Ana Lucia Christovam de Souza

Nascimento	30/11/1992 – Presidente Prudente – SP
Filiação	Luiz Antonio de Souza
	Rosemarie Christovam de Souza
2012 – 2016	Graduação
	Bacharelado em Engenharia Cartográfica
	Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2017 – 2019	Pós – Graduação
	Mestrado em Ciências Cartográficas
	Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que conquistei até agora, mas também peço a Ele para me dar sabedoria para conquistar muito mais.

Agradeço a minha família: meus pais, Luiz e Rose, por sempre me apoiarem; meu irmão, Luiz Eduardo, que está presente no convívio diário da pós e por sempre me ajudar nos momentos aflitivos; a minha vó Cecilia, que também foi uma grande apoiadora nos meus estudos; e a todos os meus familiares que sempre torceram por mim.

Ao meu orientador Prof. Paulo de Oliveira Camargo, por ser o principal motivador desta pesquisa. Também sou grata ao meu coorientador Prof. Marcio Muella, pelas contribuições e por ter sempre me recebido em São José dos Campos de maneira muito atenciosa e solicita.

Ao Prof. Galera pelas diversas contribuições como membro da banca da defesa. Ao Prof. Valdir, pelas contribuições na defesa, e pelo auxílio no fornecimento dos dados dos imageadores pertencentes à UNIVAP e pelos ensinamentos sobre o *software* UASDA.

Agradeço a todos do PPGCC pela convivênica diária, em especial Caio, Fran, Alemão, Samara, Loram, Vivi, Renatinho, Mari Campos, Pacheco, Tiago, Paulo Setti, Victor, Cida e Zilda. À grande amiga Juliane, que se tornou uma companheira desde o início da graduação até aqui, presente nos bons e maus momentos. E ao meu amigo e "supervisor" Gabriel pelo seu companheirismo e por estar sempre a disposição para ouvir, tirar duvidas e dar sugestões.

Às amigas da minha "terra" Luiza, Gabi, Lara R., Lara B., Laise, Sofia, Bê e Lais que mostraram que amizade não é uma questão de presença física. E aos respectivos namorados que também se tornaram grandes amigos.

Agradeço muito ao Prol que foi de fundamental importância na colaboração e desenvolvimento desta pesquisa. E também à Flávia Ceolho da UNIVAP, que esteve prontamente disponível para me ensinar a utilizar o *software* UASDA.

Agradeço a UNESP, pela formação e estrutura oferecida. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq , pela concessão da bolsa. À UNIVAP por conceder dados dos imageadores localizados em São José dos Campos.

E por fim, a todos que de forma direta ou indiretamente partiparam no desenvolvimento do meu conhecimento e deste trabalho.

RESUMO

O uso das tecnologias GNSS (Global Navigation Satellite System), principalmente do GBAS (Ground-Based Augumentation System) e SBAS (Satellite-Based Augmentation System), permite melhorar as exigências de desempenho operacionais de navegação aérea. Essas tecnologias são associadas a funções de guiagem e vigilância, uma vez que melhores níveis de segurança, eficiência e capacidade no sistema de transporte aéreo nos aeroportos podem ser alcançados. Com o crescimento da demanda do tráfego aéreo e devido ao GBAS ser considerado uma tecnologia relativamente barata, compacta e autônoma, a organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) propôs a substituição do ILS (Instrument Landing System – Sistema de instrumentos para aproximação e pouso) pelo uso do GBAS. Entretanto, apesar do melhor desempenho do GBAS, as bolhas de plasma, causadas pelas irregularidades na densidade de elétrons presente na ionosfera, degradam a integridade do mesmo. Assim, determinar a velocidade de deriva com que as bolhas de plasma se deslocam é de fundamental importância para aviação civil, uma vez que este constitui parâmetro significativo para avaliar o desempenho do GBAS. Ademais, a pesquisa proposta visa obter uma melhor compreensão da dinâmica e morfologia das bolhas de plasma de forma que auxilie o entendimento do comportamento da ionosfera brasileira, que se encontra na região equatorial, que é fortemente afetada, e contribuir para sua mitigação. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para determinar a velocidade de deriva das bolhas ionosféricas utilizando informações GNSS. Os resultados dos experimentos realizados com o intuito de avaliar se as velocidades obtidas utilizando a metodologia proposta está em concordância com as obtidas com métodos já consolidados. Além disso, foi realizado experimento com o objetivo de analisar a limitação do método em relação as distância entre as estações GNSS, e nos experimentos os resultados diferem de uma dia para outro, chegando a resultados inconclusivos sendo necessário realizar mais experimentos para outros dias, bem como para outras distâncias entre as estações de referência.

ABSTRACT

The GNSS (Global Navigation Satellite System) technologies use mainly GBAS (Ground-Based Augmentation System) and SBAS (Satellite-Based Augmentation System), allows to improve air navigation operational performance requirements. These technologies are associated with guiding and vigilance functions, once that airports air transport system can achieve better levels of safety, efficiency and capacity. Considering the air traffics demand increasing and due to GNSS be considered a relatively inexpensive, compact and stand-alone technology, International Civil Aviation Organization (ICAO) has proposed the replacement of Instrument Landing System (ILS) by GBAS. However, despite GBAS better performance, plasma bubbles, caused by irregularities in the ionosphere electron density, can degrade its integrity. Thus, plasma bubbles drift velocity determination is of fundamental importance for civil aviation, once it is a significant parameter to evaluate GBAS performance. In addition, proposed research aims to obtain a better understanding of plasma bubbles dynamics and morphology, helping to understanding of the Brazilian ionosphere behavior, located in the equatorial region, strongly affected, and furthermore contribute to mitigation. For this, a methodology was developed the drift velocity estimation of ionospheric bubble using GNSS information. The results experiments were performed with the purpose of evaluating if the velocities obtained using the proposed methodology are in agreement with the velocities obtained with already consolidated methods. Furthermore, experiments was carried out with the objective of analyzing the limitation method in relation to the distance between GNSS stations, and in the experiment carried out the results differ from one day to the next, reaching inconclusive results and it is necessary to perform further experiments for other days, as well as for other distances between the reference stations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Perfil de densidade eletrônica diurno e noturno..... 20
Figura 2 – Número de manchas solares do final do ciclo 23 e do atual ciclo 24. 24
Figura 3– Regiões latitudinais da ionosfera. 24
Figura 4 – Exemplo de buraco coronal, que aparece na imagem como região mais escura. 26
Figura 5 – Influência do vento solar no campo geomagnético. 27
Figura 6 – Classificação das irregularidades. 32
Figura 7 – Evolução de uma instabilidade ionosférica causando bolhas de plasma segundo a teoria Rayleigh-Taylor. 33
Figura 8 – Evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas. 33
Figura 9 – Arquitetura do sistema GBAS. 34
Figura 10 – Degradação da disponibilidade e confiabilidade do GBAS. 35
Figura 11 – Bolha de plasma afetando o sinal GNSS. 36
Figura 12 – Esquema padrão de um imageador *all-sky*. 40
Figura 13 **–** Observatório de São João do Cariri/PB, dia 01/03/2013, filtro OI 630,0 nm. 41
Figura 14 – Processo de Linearização das imagens (UASDA). 43
Figura 15 – Obtenção dos coeficientes da função de transferência. 44
Figura 16 – Processo linearização para o cálculo da velocidade de deriva. 45
Figura 17 – Perfil de intensidade para os cortes realizado para o cálculo da velocidade. 46
Figura 18 – Interface gráfica do cálculo da velocidade de deriva da bolha de plasma. 46
Figura 19 – Estações da Rede RBMC. 48
Figura 20 – Estações da Rede CIGALA/CALIBRA. 49
Figura 21 – Fluxograma empregado na estimativa da velocidade de deriva utilizando medidas do conteúdo eletrônico total. 52
Figura 22 – Localização das estações de referência RIOD (22,817844° S 43,306277° O) e ONRJ (22,8957701° S 43,224332° O). 54
Figura 23 **–** Valores de TEC estimado para todos satélites GPS derivados da estação RIOD, onde cada cor representa um satélite distinto, dia 06/01/2014. 55
Figura 24 – Índice de irregularidade ROTI, dia 06/01/2014. 55
Figura 25 – Valores de TEC estimados para as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN32, dia 06/01/2014. 56
Figura 26 – Diferença entre os vaores de TEC para as estaçõesde referência RIOD e ONRJ, para o PRN 32. 57
Figura 27 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, às 03 e 04 horas UT, com taxa de amostragem de 30 segundos. 57

Figura 28 – Valores de TEC estimados para as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN03, dia 06/01/2014. 58
Figura 29 – Diferença entre os valores de TEC entre as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN 03. 59
Figura 30 – Correlação Normalizada, para o PRN 03, das 02 h 30 min às 05 horas TU, com taxa de amostragem de 30 s. 60
Figura 31 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, das 03 às 04 horas TU, com taxa de amostragem de 15 segundos. 61
Figura 32 – Correlação Normalizada, para o PRN 03, das 02 h 30 min às 05 horas TU, com taxa de amostragem de 15 segundos. 61
Figura 33 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, às 06 e 07 horas TU. 62
Figura 34 – Localização das estações de referência SJCU (23,210589° S 45,956592° O) e SJSP (23,207132° S 45,861738° O) e do Imageador *all*-sky (23,21° S 45,86° O). 63
Figura 35 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC (23.21° S 45.86° O), dia 24/10/14. 64
Figura 36 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC(23.21° S 45.86° O), dia 16 e 17/10/2014. 65
Figura 37 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC (23.21° S 45.86° O), dia 18/12/2014. 66
Figura 38 – Velocidade de deriva das bolhas zonal (positivo para leste) e seus respectivos desvios-padrão para imageador de SJC (A: Dia 24/10/14; B: Dia 16 e 17/12/14; C: Dia 18/12/14). 67
Figura 39 – Índice de Irregularidade ROTI (A: Dia 24/10/14; B: Dia 16/12/14; C: Dia 17/12/14; D: Dia 18/12/14) 69
Figura 40 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 24/10/2014. 70
Figura 41 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 17/12/2014. 72
Figura 42 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 18/12/2014. 73
Figura 43 – Localização das estações de referência ROSA (22,523304° S 52,952088° O), PPTE (22,119905° S 51,408534° O), SPTU (21,929118° S 50,492370° O), SPLI (21,665204° S 49,733695° O) e SPJA (21,241073° S 48,286703° O) 76

Figura 44 – Índice de irregularidade ROTI, dia 30/11/2014. (A: ROSA; B:PPTE; C: SPTU; D: SPLI; E: SPJA)..... 77
Figura 45 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPTU, dia 30/11/2014. 78
Figura 46 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência ROSA e PPTE, dia 30/11/2014. 80
Figura 47 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPLI, dia 30/11/2014. 80
Figura 48 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência SPTU e SPJA, dia 30/11/2014. 81
Figura 49 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência ROSA e SPTU, 30/11/2014. 81
Figura 50 – Índice de irregularidade ROTI, dia 01/12/2014 (A: ROSA; B:PPTE; C: SPTU; D: SPLI; E: SPJA)..... 84
Figura 51 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPTU, dia 01/12/2014. 85
Figura 52 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência ROSA e PPTE, dia 01/12/2014. 86
Figura 53 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPLI, dia 01/12/2014. 86
Figura 54 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência SPTU e SPJA, dia 01/12/2014. 87
Figura 55 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência ROSA e SPTU, dia 01/12/2014..... 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais emissões da luminescência atmosférica noturna na camada F. 30
Tabela 2 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 24/10/2014. 71
Tabela 3 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 17/10/2014 73
Tabela 4 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 18/10/2014. 73
Tabela 5 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPTU (96,92 km) 79
Tabela 6 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e PPTE (165,00 km)..... 82
Tabela 7 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, estações de referência PPTE e SPLI (180,63 km). 82
Tabela 8 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência SPTU e SPJA (240,87 km). 82
Tabela 9 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e SPTU (261,92 km). 82
Tabela 10 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPTU (96,92 km). 88
Tabela 11 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e PPTE (165,00km). 88
Tabela 12 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPLI (180,63 km). 88
Tabela 13 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência SPTU e SPJA (240,87 km). 88
Tabela 14 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e SPTU (261,92 km). 89

LISTA DE SIGLAS

AIE	Anomalia de Ionização Equatorial ou Anomalia de Appleton
CCD	*Charge Coupled Device*
DCB	*Differential Code Bias*
EMBRACE	Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
ESF	*Equatorial Spread F*
GBAS	*Ground-Based Augmentation System*
GLONASS	*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
GPS	*Global Positioning System*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSP	Instituto Federal de São Paulo
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional
ILS	*Instrument Landing System*
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
INCT GNSS-NavAer	Tecnologia GNSS no Suporte a Navegação Aérea
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITA	Instituto de Tecnológico de Aeronáutica
LT	*Local Time*
Ntrip	*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
MATLAB	MATrix LABoratory
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	*Receiver Independent Exchange Format*
RMS	*Root Mean Square*
ROT	*Rate of Change of TEC*
SBAS	*Satellite-Based Augmentation System*
STEC	*Slant TEC*
TEC	*Total Electron Content*
TECU	*TEC Unit*
TEQC	*Translation, Edition, and Quality Control*
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UT	Tempo Universal
UASDA	*Univap All sky Data Analysis*
UNIVAP	Universidade do Vale de Paraíba
VTEC	*Vertical TEC*
VDB	VHF *Data Broadcast*
VHF	*Very High Frequency*

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 16
1.1 Objetivos 18
1.2 Justificativa 18

2 **ATMOSFERA IONIZADA** 19
2.1 Ionosfera 19
2.2 Estrutura Ionosférica 20
2.3 Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e suas Variações 21
2.3.1 Variações Temporais 23
2.3.2 Variações Latitudinais 24
2.3.3 Variações Geomagnéticas 25
2.4 Transporte do Plasma Ionosférico 27
2.4.1 Deriva Eletromagnética do Plasma 28
2.5 Luminescência da Atmosfera Terrestre 28

3 **IRREGULARIDADES E BOLHAS IONOSFÉRICAS** 31
3.1 Impacto das Irregularidades e Bolhas Ionosféricas na Tecnologia GNSS 34
3.2 Índices de irregularidades 37
3.2.1 ROT 37
3.2.2 Índice f_P 37
3.2.3 Índice F_P 38
3.2.4 Índice I_{ROT} 38
3.2.5 Índice ROTI 38

4 **INSTRUMENTAÇÃO** 40
4.1 Imageadores 40
4.1.1 UASDA 42
4.2 Redes GNSS Ativas 47

5 **METODOLOGIA** 50

6 **EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES** 53
6.1 Estimativa da velocidade de deriva a partir de dados GNSS, com taxas de 30 e 15 segundos 54
6.2 Validação do Método 62
6.3 Avaliação das velocidades a partir de diferentes distâncias entres as estações GNSS 75

7 **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES** 91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais avançadas que existem atualmente, impulsionou as atividades relacionadas ao posicionamento a partir de observações espaciais e pesquisas relacionadas ao comportamento da atmosfera. Os principais componentes do GNSS são 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, que tem previsão de estar completo até 2020 (GALILEO, 2018). Entre os sistemas globais, há também o sistema chinês BeiDou/Compass que se encontra em implantação. Ainda compõem o GNSS, os sistemas regionais e de aumento, SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground-Based Augumentation System*) (MONICO, 2008; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

A atmosfera tem grande influência na propagação dos sinais GNSS, sendo a ionosfera uma das principais fontes de degradação e erros. No posicionamento GNSS de alta acurácia, a ionosfera é considerada a maior fonte de erro sistemático. O erro causado é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Sendo assim, o TEC é o principal parâmetro que descreve o efeito causado pela ionosfera (CAMARGO,1999).

Devido aos diversos fenômenos que ocorrem na camada ionosférica, a mesma vem sendo muito estudada nas últimas décadas por diversos pesquisadores (KIL et al., 2000; CHU et al., 2005; MUELLA, et al., 2008; ABREU, 2012; COELHO, 2013, PEREIRA e CAMARGO, 2016; PROL, et al., 2018), e por meio de diferentes instrumentos, dos quais ressaltam-se as observações GNSS, os imageadores ópticos e as ionossondas, entre outros (COELHO, 2013).

Dentre os fenômenos que ocorrem, destacam-se, as irregularidades ionosféricas, também chamadas de bolhas de plasma. Segundo Coelho (2013), as bolhas de plasma são irregularidades de larga escala provenientes da região equatorial e normalmente surgem ao anoitecer. São regiões em que a densidade do plasma não se apresenta de forma homogênea, provocando uma interferência nas ondas eletromagnéticas, que por muitas vezes causam a perda do sinal transmitido. A ocorrência das bolhas de plasma se deve a alguns fatores: deriva eletromagnética do plasma equatorial, a altura e a densidade eletrônica de pico da camada ionosférica, ao gradiente de densidade eletrônica na região inferior da ionosfera noturna, ventos neutros e presença de perturbações externas, além da sazonalidade, hora local, declinação

magnética, anomalia equatorial, tempestades geomagnéticas e variações do ciclo solar (JI et al., 2011).

Os sistemas GNSS vem desempenhando um papel muito importante na aviação civil, uma vez que o uso das tecnologias GNSS, principalmente do GBAS e SBAS trazem inúmeras vantagens para o transporte aéreo, que tem crescido de forma surpreendente nos últimos anos. Junto com esse crescimento, as exigências também se tornaram cada vez maiores, para garantir melhor acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade das operações aéreas.

Entretanto, os fenômenos ionosféricos que afetam os sinais dos satélites, consequentemente afetam a confiabilidade e a disponibilidade do GBAS, cujo papel é aumentar o desempenho do sistema GNSS, fornecendo informações diferenciais para a posição de uma aeronave durante pouso e a decolagem, garantindo assim maior segurança (RAGHUNATH; RATNAM, 2015; BUMRUNGKIT; SUPNITHI, 2017). Como exemplo, algumas pesquisas mostraram que uma única bolha de plasma pode causar um erro de posicionamento na vertical superior a 10 metros (RUNGRAENGWAJIAKE et al., 2015). Nesse sentido, conhecer a velocidade de deriva com que as bolhas de plasma se deslocam, torna-se um parâmetro significativo para avaliar o desempenho do GBAS na aviação civil, já que a mesma deve atender às normas e práticas recomendadas pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO).

Entre os instrumentos utilizados para o monitoramento da camada ionosférica, a utilização das redes GNSS ativas para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas de plasma se torna a melhor alternativa, quando comparado com os imageadores ópticos, principalmente devido à densidade e à distribuição geográfica das estações, uma vez que os imageadores dependem das condições metereológicas. Entretanto, os imageadores se tornam uma ferramenta importante para a certificação dos resultados obtidos com as redes ativas, já que se apresentam como uma técnica consolidada para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas.

Ademais, a utilização das estações GNSS ativas para a detecção das bolhas ionosféricas, apresentam uma maior resolução espacial e temporal das bolhas devido à ampla cobertura de observação e alta taxa de coleta (NISHIOKA et al., 2008). Essa informação se torna relevante para a construção de modelos de risco, além de ser mais uma forma de realizar o monitoramento das bolhas de plasma, consequentemente das irregularidades ionosféricas.

Nesse sentido, o projeto de pesquisa tem como intuito definir uma metodologia para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas utilizando observações GNSS e validar os resultados obtidos com metodologia proposta por meio dos imageadores ópticos.

1.1 Objetivos

O projeto de pesquisa tem como objetivo principal realizar um estudo e definir uma metodologia para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas utilizando observações GNSS, de forma a contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica e morfologia das bolhas de plasma. Os objetivos secundários consistem em:

- Determinar o TEC (*Slant TEC*) e o índice de variação do TEC, dado pelo ROTI (*Rate of TEC change index);*
- Determinar a auto-correlação e correlação cruzada dos sinais do TEC para obtenção do tempo de viagem das bolhas ionosféricas e consequentemente a velocidade de deslocamento;
- Validar os resultados obtidos a partir dos dados GNSS com os imageadores;

1.2 Justificativa

Desde os anos 2000 com o desligamento da técnica SA (*Selective Availability*), a ionosfera passou a ser considerada a maior fonte de erro sistemático no posicionamento de alta acurácia, devido as condições ionosféricas serem diretamente influenciadas pelo clima espacial. Nesse sentido, estudos relacionados a ionosfera é de suma importância, uma vez que contribuem significativamente para o entendimento da dinâmica do clima espacial.

Deste modo, o clima espacial tem despertado grande interesse nacional e internacional. No Brasil, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) vem se destacando nas pesquisas relacionadas aos fenômenos espaciais desde 1964, mas em 2008 criou o programa EMBRACE cuja missão é monitoramento, modelagem e disseminação da informação do clima espacial, com investigações dos fenômenos geoespaciais no território brasileiro, incluído impactos tecnológicos espaciais e terrestres.

A modelagem ionosférica também é de grande relevância para a navegação aérea, principalmente para regiões ionosféricas ativas, como é o caso brasileiro, onde alguns fenômenos ionosféricos têm potencial de afetar todos os serviços GNSS, degradando diretamente a confiabilidade e a disponibilidade do GBAS, que auxilia durante a aproximação e aterrissagem das aeronaves nos aeroportos, visando garantir uma maior eficiência no transporte aéreo. Ademais, o uso do GBAS se tornou de extrema importância nos aeroportos devido ao crescimento na demanda do tráfego aéreo, assim investigações dos efeitos sistemáticos, causada pela ionosfera no GBAS tem despertado interesse de vários pesquisadores e instituições aéreas. Nesse sentido, a importância desta dissertação de mestrado está retratada na “Chamada INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs n° 16/2014” (<http://www.

cnpq.br/documents/10157/b91b7566-2110-4a29-9704-88cdd324e072>), dentre os 12 temas estratégicos considerados de alto impacto científico e que preferencialmente seriam apoiados pela chamada, destaca-se o tema 12 – Controle e gerenciamento do tráfego aéreo. Assim, um Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) denominado "Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea" (INCT GNSS-NavAer) foi aprovado e iniciado em janeiro de 2017, com o objetivo realizar pesquisas relacionadas à segurança e operação do controle do tráfego aéreo brasileiro utilizando o GNSS (processo CNPq n° 465648/2014-2 e FAPESP n° 2017/01550-0). O instituto é composto por pesquisadores das seguintes instituições: FCT/UNESP (Coordenado pelo Dr. João Francisco Galera Monico), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus de Presidente Epitácio/SP. Destaca-se que neste projeto pesquisas sobre os efeitos da camada ionosférica no território brasileiro e no GBAS estão sendo realizadas.

2 ATMOSFERA IONIZADA

2.1 Ionosfera

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (SEEBER, 2003). Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera, uma vez que ao se propagarem por essas camadas, os sinais GNSS sofrem diferentes influências (SEEBER, 2003).

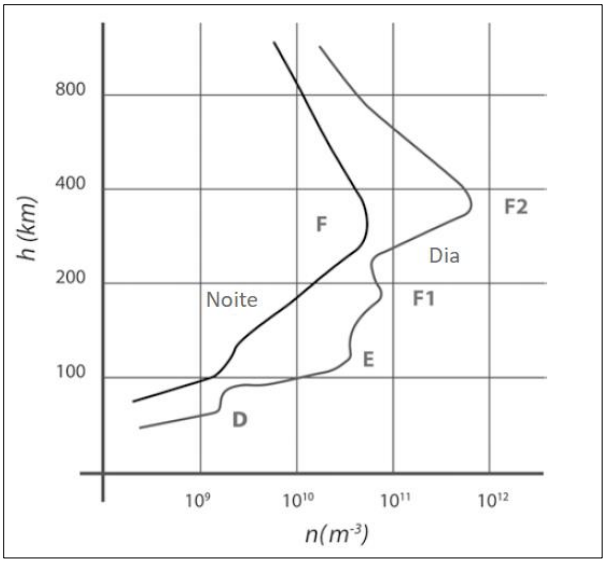
A troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre e até, aproximadamente, 50 km de altura. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura, sendo que a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma seja inferior a 30 GHz (LEICK, 1995). Já a ionosfera, ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, meio em que a propagação de sinais depende da frequência (LIN, 1997). A ionosfera é caracterizada, principalmente, pela formação de íons e elétrons capazes de afetar a propagação das ondas de rádio. É considerada como parte alta da atmosfera, inicia-se por volta de 50 km, estendendo até, aproximadamente, a um de 1000 -1200 km de altura. Os íons e elétrons livres

na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização, onde a principal fonte é a radiação solar (KIRCHHOFF, 1991).

2.2 Estrutura Ionosférica

A estrutura e a dinâmica da ionosfera estão sujeitas a variações espaciais e temporais. Essas mudanças que ocorrem são diferentes para diferentes altitudes devido a variações dos fenômenos relativos a ionização da camada ionosférica. A ionosfera pode ser dividida em regiões regulares e esporádicas de acordo com as suas propriedades (ZOLESI; CANDER, 2014). Nesse sentido, a ionosfera pode ser organizada por um perfil de densidade do plasma ou densidade eletrônica, o qual se torna um parâmetro muito utilizado para descrever diferentes regiões da ionosfera, com os máximos e mínimos relativos para identificar as camadas ionosféricas (Figura 1).

Figura 1– Perfil de densidade eletrônica diurno e noturno



Fonte: Adaptado de Zolesi e Cander (2014)

Logo, a ionosfera pode ser dividida em três camadas ou regiões principais, denominadas de D, E e F, camadas essas caracterizadas pela variação na 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, a qual 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, fazendo com que a mesma desapareça no período noturno (DAVIES, 1990 apud MATSUOKA, 2007; ZOLESI; CANDER, 2014). A camada D é a de menor densidade, apresentando uma densidade média de $10^8 – 10^9$ eltróns/m^3 (ZOLESI; CANDER, 2014). A camada D é importante na propagação de ondas, atuando como uma fonte refletora dos sinais de baixa frequência (DAVIES, 1990 apud MATSUOKA, 2007).

Ainda de acordo com Davies (1990) apud Matsuoka (2007), a camada E vai de 90 a 140 km de altura. O seu comportamento depende do nível de atividade solar e do ângulo zenital do Sol, e uma das suas principais características é que a mesma é livre de distúrbios e somente está presente durante o dia.

A camada F corresponde ao intervalo da ionosfera entre 140 e 1000 km de altura, sendo uma das mais importantes do ponto de vista das comunicações de rádio e dos sistemas de navegação (ZOLESI; CANDER, 2014). Esta camada pode ser subdividida em outras duas camadas, F1 e F2. A camada F1 vai da altura de 140 km até, aproximadamente, 200 km, e essa altura varia em relação a atividade solar, a estação do ano e as atividades geomagnéticas. Apresenta uma típica concentração de elétrons variando com relação à atividade solar de $2{,}3x10^{11}$ eltróns/m^3 a $3{,}3x10^{11}$ eletróns/m^3. Durante a noite essa região completamente desaparece, pois, a densidade de elétrons é controlada principalmente pelo ângulo zenital do Sol.

A camada F2 corresponde ao intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 até 1000 km. Nessa região ocorre o pico de máxima densidade de elétrons/ m^3 (entre 300 e 450 km). Apresenta uma densidade eletrônica de 10^{10} a $8x10^{12}$ eletróns/m^3. 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 apud MATSUOKA, 2007; ZOLESI; CANDER, 2014). É importante destacar que os limites das camadas são valores aproximados, devido aos inúmeros fenômenos que alteram a densidade eletrônica no espaço e tempo.

2.3 Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e suas Variações

Segundo Matsuoka e Camargo (2004), 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. Assim, associando a propriedade dispersiva da ionosfera a duas ou mais frequências distintas, é possível determinar a integral da densidade eletrônica, ou seja, o TEC ou STEC (*Slant* TEC), dado por:

$$TEC = \int_S^R N_e \, ds, \qquad (1)$$

sendo:

N_e – densidade de elétrons (elétrons/metros³); e

ds – distância entre o satélite e o receptor em metros.

Com o propósito de padronização e modelagem, muitos modelos utilizam o TEC na direção (zenital) (VTEC – Vertical TEC), o qual é obtido por meio do TEC e a função de mapeamento geométrico padrão $\left(cos(z')\right)$, o qual representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altitude que varia entre 300 e 450 km (MATSUOKA et al., 2009).

O TEC é dado em elétrons/m², entretanto, devido aos valores apresentarem uma ordem de grandeza elevada, adota-se como unidade o TECU (*TEC Unit*), sendo 1 TECU equivalente a $1x10^{16}$ elétrons/m².

Utilizando as pseudodistâncias advindas dos códigos em L1 e L2 ($\mathrm{PD}_{1r}^{s}, \mathrm{PD}_{2r}^{s}$), a partir da seguinte combinação linear (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40{,}3\left(f_1^2 - f_2^2\right)} \left[\left(PD_{2r}^{\ s} - PD_{1r}^{\ s}\right) - e_{PD21}\right], \qquad (2)$$

sendo:

f_1 – frequência da portadora L1;

f_2 – frequência da portadora L2; e

e_{PD21} – 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 das portadoras L1 e L2 ($\Phi_{1r}^{s}, \Phi_{2r}^{s}$) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40{,}3\left(f_1^2 - f_2^2\right)} \left[\left(\lambda_2 \Phi_{2r}^{\ s} - \lambda_1 \Phi_{1r}^{\ s}\right) - \left(\lambda_1 \mathrm{N}_{1r}^{\ s} - \lambda_2 \mathrm{N}_{2r}^{\ s}\right) - e_{\Phi 21}\right], \qquad (3)$$

sendo:

λ_1 – comprimento de onda da portadora L1;

λ_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

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

Os valores de TEC calculados por meio da pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que os obtidos pela 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 et al., 2008). Existem diversas variáveis que influenciam no comportamento do TEC, tais como: variações temporais diárias, ciclos de longos períodos, variações com a atividade geomagnética, influências da latitude, longitude, dentre outras (MATSUOKA, 2007; LEICK, 1995).

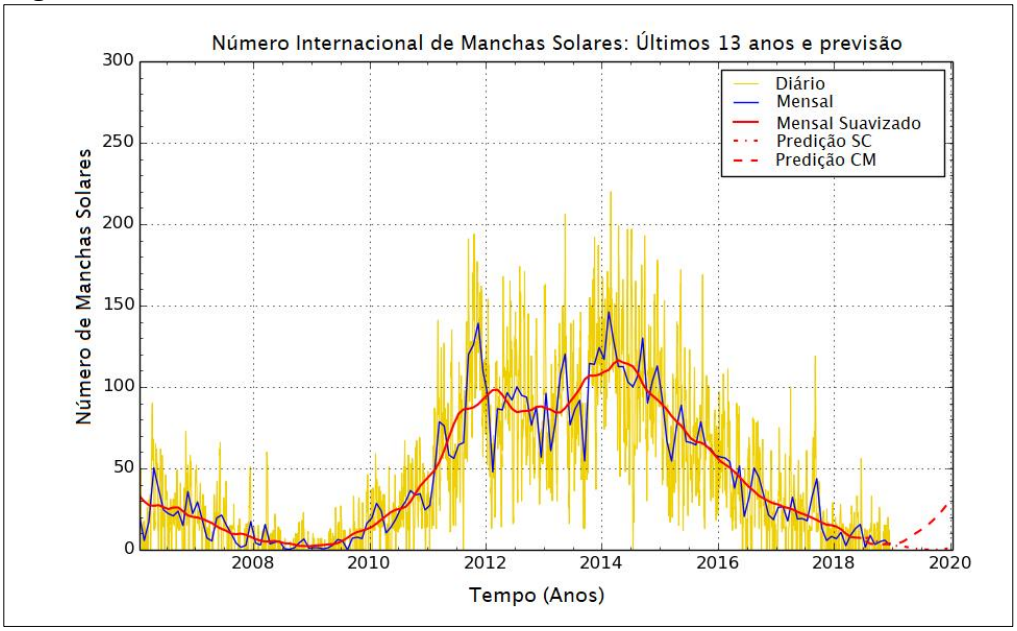
2.3.1 Variações Temporais

As variações temporais, que correspondem às variações diurnas e sazonais (variações diárias) e ciclos de longos períodos, devido aos ciclos solares, estão relacionadas com a variação da densidade de elétrons (MATSUOKA, 2007). O principal motivo da variação diurna é a radiação solar devido ao movimento de rotação da terra, sendo assim ao longo do dia a densidade de elétrons varia de acordo com a hora local, onde o valor máximo ocorre entre às 12 e 16 horas local. Um segundo máximo pode ocorrer em regiões de baixas latitudes, logo após o pôr do Sol, entre 19-22 horas local, podendo ser maior que o primeiro.

A densidade de elétrons também varia durante as estações do ano, devido à variação sazonal do ângulo zenital do Sol e da mudança na intensidade do fluxo de ionização. Dependendo do setor longitudinal, valores máximos da densidade de elétrons, para o hemisfério sul, ocorrem nos meses do solstício de verão (novembro-fevereiro) ou nos meses dos equinócios (março, abril, setembro e outubro), enquanto que valores mínimos tendem a ocorrer nos meses de solstícios de inverno.

As variações de ciclos de longos períodos estão relacionadas a atividade solar, com duração de aproximadamente 11 anos, apresentando períodos de baixa e alta atividade solar. A variação está associada à ocorrência de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. As manchas solares são regiões frias e escuras que ocorrem na superfície do Sol, 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 (MATSUOKA, 2007; ZOLESI; CANDER, 2014). Atualmente o Sol encontra-se no declínio do ciclo 24, onde a máxima deste ciclo ocorreu em 2014, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Número de manchas solares do final do ciclo 23 e do atual ciclo 24.

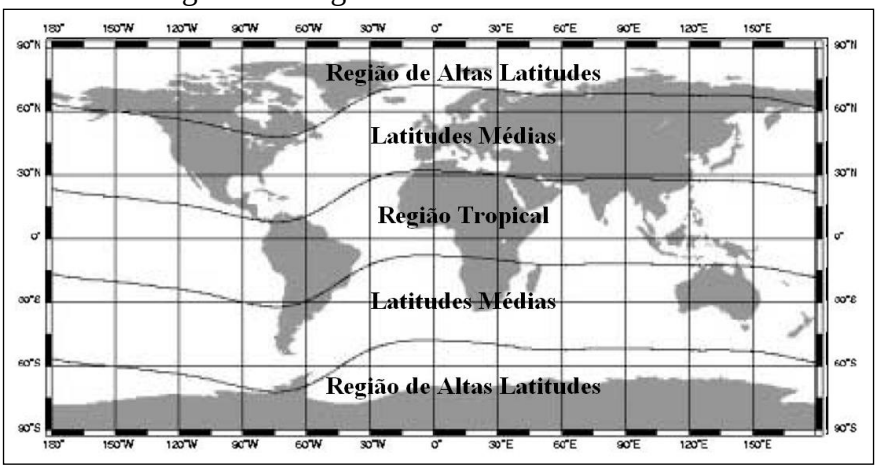


Fonte: Adaptado de <http://sidc.oma.be/html/wolfjmms.html>. Acesso em: 02 jan. 2019.

2.3.2 Variações Latitudinais

A variação latitudinal tem forte influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera, visto que a ionosfera não é homogênea para diferentes latitudes (Figura 3).

Figura 3 – Regiões latitudinais da ionosfera.



Fonte: Adaptado de Fonseca Junior (2002).

A região de altas latitudes está limitada entre ±60° e ±90°, a região de latitudes médias entre ±30° e ±60° e a região tropical limita-se entre as latitudes ±30°. Os limites destas regiões não são definidos arbitrariamente, mas selecionados em função da evidência de regiões com processos ionosféricos relativamente homogêneas. (FONSECA JUNIOR, 2002).

A região de altas latitudes, localizada próxima às regiões polares, é extremamente instável, sendo considerada 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 é caracterizada por ser muito variável espacialmente e temporalmente (McNAMARA, 1991).

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, sendo considerada relativamente livre das anomalias ionosféricas (RODRIGUES, 2003).

A região tropical ou também chamada de região equatorial, é caracterizada pelo alto nível de densidade eletrônica, já que o sol forma os menores ângulos zenitais nestas regiões. Deste modo, 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 local, apresentando os maiores valores de TEC do globo terrestre. Um segundo máximo na atividade pode ocorrer por volta das 19-22 horas local na região de baixas latitudes, com altos gradientes do TEC na direção norte-sul (WANNINGER, 1993).

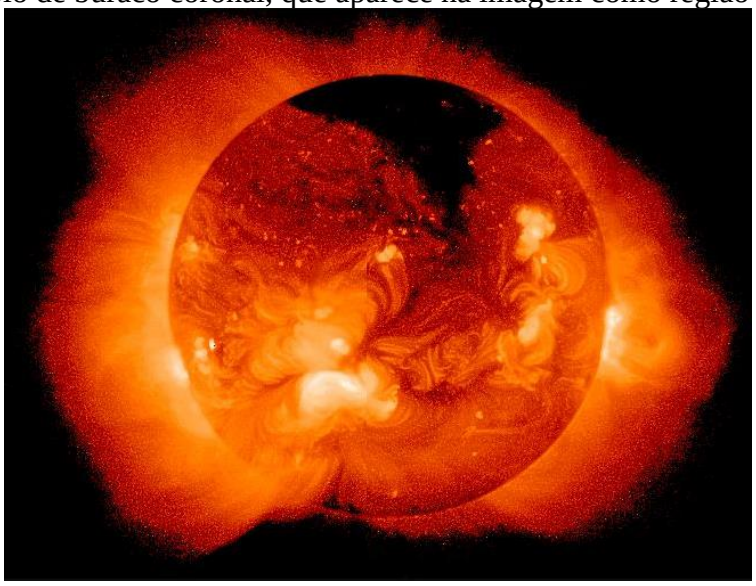
O principal fenômeno da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é a AIE (Anomalia de Ionização Equatorial) provinda do efeito fonte, ou também chamada de Anomalia equatorial ou de Appleton (APPLETON, 1946 apud MATSUOKA, 2007). Para descrever a anomalia equatorial é necessário definir o efeito fonte. Este efeito é causado pelo movimento de elevação do plasma e posterior descida ao longo das linhas do campo geomagnético até baixas latitudes. Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e descida do plasma é que duas regiões de pico 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).

2.3.3 Variações Geomagnéticas

A variação da densidade de elétrons sofre influência do campo magnético da Terra, além de controlar o movimento das partículas ionizadas na ionosfera e na magnetosfera. Então, qualquer perturbação no campo geomagnético proporcionará modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns observadas no campo geomagnético são aquelas produzidas por meio das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991 apud MATSUOKA, 2007; DAL POZ, 2010).

A alteração na quantidade de radiação eletromagnética emitida pelo Sol ocasiona um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que variam de minutos a semanas. Essas variações estão associadas a três tipos de fenômenos: explosões solares, buracos na coroa e manchas solares. As explosões solares (*solar flares*) estão associadas aos eventos solares, e são caracterizadas por um rápido aumento de energia na superfície do Sol, onde uma explosão pode variar de três minutos a algumas horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos. Os buracos na coroa (*coronal holes*) são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais frequentes no período de declínio da atividade solar. Quando ocorre esse fenômeno, as partículas que são emitidas pelo sol pelo vento solar, sofrem uma aceleração, aumentando consideravelmente sua velocidade. Por fim, às manchas solares que já foi descrito na seção anterior (MATSUOKA, 2007; DAL POZ, 2010).

Figura 4 – Exemplo de buraco coronal, que aparece na imagem como região mais escura.

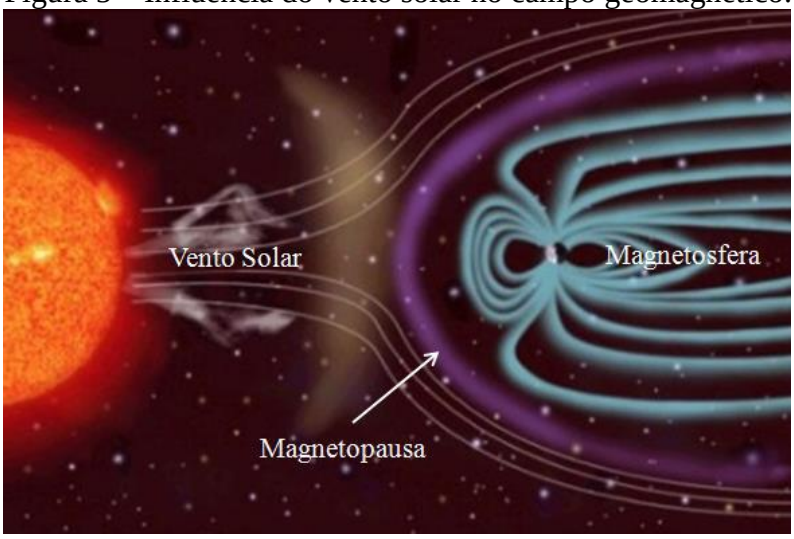


Fonte: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Yohkoh_920508.jpg>. Acesso em 26 jun. 2018.

De acordo com a Figura 4 nota-se uma característica considerável do buraco coronal, normalmente esses buracos ocorrem próximos aos pólos do Sol, onde as linhas de campo magnético são mais abertas. Sendo assim, nessas regiões ocorrem um fluxo de vento solar que é mais intenso do que emitido por outras regiões. Assim, tempestades geomagnéticas podem ocorrer devido ao vento solar que é emanado pelos buracos coronais. 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 ocasionam as tempestades ionosféricas (DAL POZ, 2010). A velocidade dos ventos solares variam em torno de 300 a 400 km/s, porém

durante eventos solares intensificados, os ventos solares passam dos 300 para 1000 km/s (DAL POZ, 2010). A Figura 5 ilustra a influência do vento solar no campo geomagnético.

Figura 5 – Influência do vento solar no campo geomagnético.



Fonte: <http://sci.esa.int/cluster/36645-solar-wind/>. Acesso em 26 jun. 2018.

2.4 Transporte do Plasma Ionosférico

O campo elétrico, campo magnético, os ventos neutros e os gradientes de pressão, influenciam diretamente no comportamento e na dinâmica da ionosfera. Logo, os processos de produção e perda iônicas, as forças externas de origem gravitacional, elétrica, magnética e os ventos neutros são responsáveis pelo o movimento do plasma ionosférico (PIMENTA, 2003; MOOR, 2011; ZOLESI; CANDER, 2014). O movimento causado pelo plasma ionosférico redistribui a densidade do mesmo, levando a variações de densidade ionosférica (KUO; LEE, 2015).

As partículas ionizadas, sob a ação de campo elétrico $\vec{E}$ e magnético $\vec{B}$ passam a realizar movimentos perpendiculares a linhas de campo magnético, originando as derivas eletromagnéticas na ionosfera. Essas partículas ionizadas são transportadas pelos ventos neutros, na direção de duas componentes projetadas ao longo das linhas de campo magnético. Os ventos neutros são gerados pela maré atmosférica e manifestam-se mediante aos gradientes de pressão causado pelo aquecimento solar na atmosfera terrestre, que produzem forças de arraste proporcionais a diferença entre a velocidade do vento e a velocidade das partículas carregadas e suas respectivas frequências de colisão. Os campos elétricos são produzidos pelos ventos e criado pelo dínamo na camada E durante o dia e da camada F durante a noite. Os íons e elétrons são transportados por este campo elétrico, sendo que a deriva eletromagnética

resultante da interação $\vec{E} \times \vec{B}$ transporta o plasma perpendicularmente ao campo magnético (PIMENTA, 2003; MOOR, 2011).

Nas camadas ionosféricas superiores da ionosfera, o campo magnético da Terra é quem controla o movimento das partículas carregadas. O comportamento da camada F2 não se assemelha com o das outras camadas da ionosfera. Nesta camada a distribuição da densidade eletrônica é descrita pelos processos de ionização e recombinação e também com termos de difusão e outros processos de transporte. Os íons e elétrons são movidos por campos elétricos, e os movimentos das partículas e as correntes elétricas dependem do campo magnético e das frequências de colisão (COELHO, 2013).

2.4.1 Deriva Eletromagnética do Plasma

Para destacar o efeito dos campos elétrico $\vec{E}$ e do campo magnético $\vec{B}$ sobre o movimento das partículas carregadas, é adicionado o termo deriva junto a palavra velocidade, sendo velocidade de deriva ou "*drift velocity*". Como dito na seção anterior, o que controla o transporte de plasma na direção perpendicular ao campo geomagnético na camada F é a deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$. Deste modo, durante o dia, o plasma desloca-se para cima e na direção e oeste, e durante a noite move-se para baixo e para leste. Já as derivas leste-oeste são representativas dos ventos neutros de marés presente na camada E da ionosfera durante o dia, e dos ventos termosféricos na região F durante a noite (PIMENTA, 2003).

2.5 Luminescência da Atmosfera Terrestre

A luminescência da atmosfera terrestre é um fenômeno natural que acontece em altitudes superiores a 80 km. Ocorre devido a emissão de fótons liberados por átomos e moléculas excitados acima do nível de energia comum. O processo de geração deste fenômeno é devido a diversos processos físicos e químicos e ocorrem por meio da emissão de linhas ou bandas espectrais (PIMENTA, 2003). Nesse sentido, pode-se dizer que a luminescência é uma ocorrência natural, em que o céu noturno emite luz em vários comprimentos de ondas causados pela radiação solar devido a isso o céu noturno não é totalmente escuro (KUSHIATOR, 2017).

As emissões possuem duas categorias na atmosfera superior, sendo denominadas aurora e de luminescência atmosférica ou aeroluminescência (*airglow*). A aurora é produzida quando partículas elétricas carregadas provenientes do Sol colidem com átomos e moléculas da ionosfera, a uma altitude de 80 a 600 km, levando a emissões a olho nu. Já a luminescência atmosférica é emissão de luz mais fraca causada por reações químicas, ou seja, excitação de

átomos e moléculas acima do seu nível de energia que ao voltar ao estado fundamental emitem fótons. Ambas as emissões ocorrem em qualquer momento, tanto do lado diurno quanto do lado noturno e no crepúsculo. Entretanto, a emissão chamada de luminescência é uma radiação eletromagnética, tênue, amorfa e constante, que se dá proveniente de átomos e moléculas excitadas presentes na atmosfera, podendo ser observada em qualquer latitude e existe em diferentes comprimentos de onda (PIMENTA, 2003).

Ainda de acordo com Pimenta (2003) e Kushiator (2017), a luminescência pode ser denominada de acordo com o ângulo zenital da radiação solar, e dependendo da hora da observação diurna (*dayglow*), noturna (*nightglow*) e crepuscular (*twilight*). As medidas noturnas são mais comuns uma vez que, durante o dia a radiação solar acaba mascarando os efeitos do fenômeno, já as medidas diurnas são mais proeminentes. Através de fotômetros e imageadores pode-se detectar as emissões.

Os meios de detecção da luminescência dependem do propósito de estudo. As observações fornecem técnicas convenientes para medir as densidades de particular excitadas e temperatura cinéticas, sendo possível, também estudar os processos dinâmicos em diferentes alturas da atmosfera superior, e são realizados de três formas: em solo, a bordo de foguetes e com satélites. Com as observações da luminescência atmosférica podemos estudar (PIMENTA, 2003):

- Os processos químicos, iônicos e dinâmicos que regem a distribuição vertical dos vários constituintes atmosféricos;
- Processos de excitação que geram emissões óticas;
- A geração e propagação de irregularidades do plasma na região da ionosfera noturna;
- Os processos ligados a deposição de partículas neutras na alta atmosfera;
- O acoplamento entre a termosfera e ionosfera;
- As ondas atmosféricas.

A unidade para medir intensidade de emissão da luminescência é o Rayleigh, que corresponde a intensidade de uma fonte isotrópica que emite 10^6 fótons por centímetro quadrado de coluna por segundo. As principais emissões de luminescência atmosférica noturna observada em solo para o oxigênio atômico excitado na região F são: OI 557,7 nm, OI 630,0 nm e OI 777,4 nm. As duas primeiras são produzidas por processos de recombinação dissociativa e a última por processo de recombinação radiativa e recombinação íon-íon. A Tabela 1 mostra essas emissões de oxigênio atômico na região F noturna (PIMENTA,2003; ODRIOZOLA, 2017).

Tabela 1 – Principais emissões da luminescência atmosférica noturna na camada F.

Emissão Atmosférica	Intensidade Típica [R]	Comprimento de onda [nm]	Altura média da camada de emissão [km]
OI 557,7 nm	60	557,7	250-300
OI 630,0nm	300	630,0	250-300
OI 777,4 nm	20	777,4	300-400

Fonte: Pimenta (2003)

A emissão de menor comprimento de onda OI 557,7 nm, também chamada de linha verde do oxigênio atômico, apresenta duas fontes de emissão, uma localizadas na camada ionosférica E (90-110 km) e outra na camada F (250 – 300 km), porém nas regiões equatoriais e de baixa latitude a emissão originada na camada F representa uma fração significativa de toda a emissão recebida em solo (PIMENTA, 2003; ODRIZOLA, 2017).

Ainda de acordo com Pimenta (2003) e Odriozola (2017), a emissão mais utilizada para o estudo da dinâmica da camada F é a emissão 630,0 nm, também chamada de linha vermelha do oxigênio atômico, considerada mais intensa, até cinco vezes mais intensa que a linha verde, sua fonte é localizada entre 240 a 300 km de altitude. A luminescência é diretamente proporcional a densidade de elétrons presente na camada, ou seja, quanto maior a densidade de elétrons maior a luminescência. Ademais, a deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ presente na camada F, após o pôr do sol, influencia diretamente a emissão 630,0 mm, a subida do plasma faz com que diminua a intensidade da emissão, já o movimento de deriva vertical para baixo faz com que a aumente a intensidade. Sendo assim, por meio desta emissão que muitos pesquisadores têm estudado a geração, a dinâmica e a morfologia das bolhas de plasma.

A emissão da linha OI 777,4 nm, ocorre entre os 300 e 400 km de altitude. Entre as três principais emissões esta é considera a menos intensa, aproximadamente 20 Rayleigh e não é afetada de modo significativo pelo movimento da deriva vertical do plasma. Esta emissão é representativa dos processos que acontecem no pico da camada F, e ainda pode-se destacar que as bolhas de plasma reveladas por esta emissão são mais nítidas quando comparadas com as imagens geradas com a emissão de 630,0 nm (PIMENTA, 2003; ODRIZOLA, 2017).

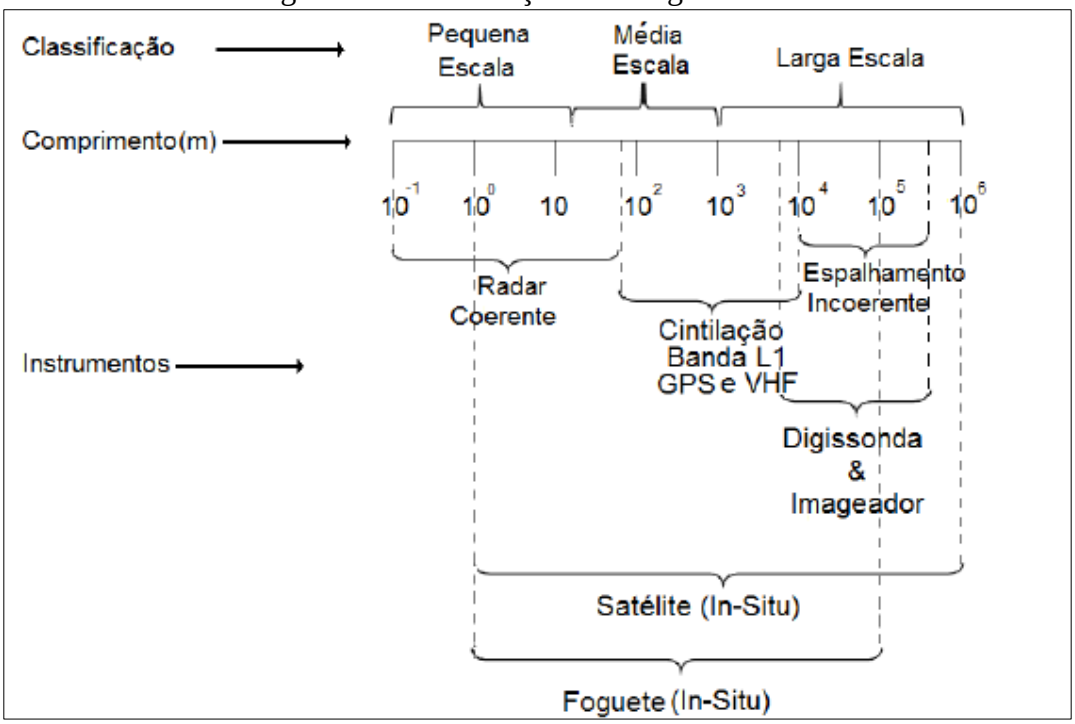
Nesta seção foi apresentado alguns fundamentos teóricos básicos das principais emissões de luminescência atmosférica geradas na camada F da ionosférica. Deste modo, é possível interpretar as observações efetuadas com os imageadores "*all-sky*" que serão utilizadas como forma de validação dos resultados obtidos por meio de técnicas GNSS, uma vez que a técnica de estudo da deriva zonal das bolhas de plasma feita por meio de imageadores já são bem consolidadas.

3 IRREGULARIDADES E BOLHAS IONOSFÉRICAS

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico, que se iniciam por meio de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T) presentes tipicamente na ionosfera equatorial e de baixa latitude (PIMENTA, 2003). Dungey (1956) foi o primeiro pesquisador a propor a instabilidade R-T como processo gerador da ESF conhecida como Camada F espalhada (ESF – *Equatorial Spread F),* nome este devido ao espalhamento causado pelas irregularidades ionosféricas nos traços de ionogramas equatoriais e de baixas latitudes. Todavia, essa teoria foi temporariamente rejeitada pois explicava apenas a geração de estruturas na parte inferior do perfil de densidade de plasma da camada F; porém, a teoria foi aprimorada incluindo parâmetros do ambiente ionosférico, como o campo elétrico e a ação dos ventos neutros, sendo denominada de teoria da instabilidade R-T generalizada, onde muitas características da ESF podem ser explicadas (RODRIGUES, 2003). Desde então diversos pesquisadores (CANDIDO, 2008; ABREU et al. 2008; JESUS et al, 2010; HUANG, et al, 2014; YANG e LIU, 2018, entre outros) realizaram estudos sobre as irregularidades presente na camada F e tais investigações levaram a concluir que essas irregularidades apresentam-se como grandes flutuações na densidade do plasma, atingindo centenas de quilômetros.

Ao anoitecer, a camada F da ionosfera tem uma rápida subida devido à deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ que dá origem a gradientes abruptos de densidade na base da camada F, que por sua vez originam condições favoráveis para a geração da instabilidade do plasma ionosférico. Esta instabilidade causa às irregularidades ionosférica com um amplo espectro de escalas de tamanho, que vão desde alguns centímetros até centenas de quilômetros, onde as irregularidades de grande escala são denominadas de bolhas de plasma (PIMENTA, 2003; HAASE et al., 2011sil). Devido as irregularidades apresentarem diversas escalas de tamanho, acabam afetando uma ampla faixa de frequência das ondas dos sinais de rádio. Deste modo, as comunicações que utilizam essa faixa de frequência, acabam sendo diretamente atingidas, de maneira severa por muitas vezes. No entanto, isso permite que as irregularidades sejam estudadas por diversos instrumento alguns capazes de fazer medições de algumas características dentro de uma grande variedade delas, essa classificação pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Classificação das irregularidades.

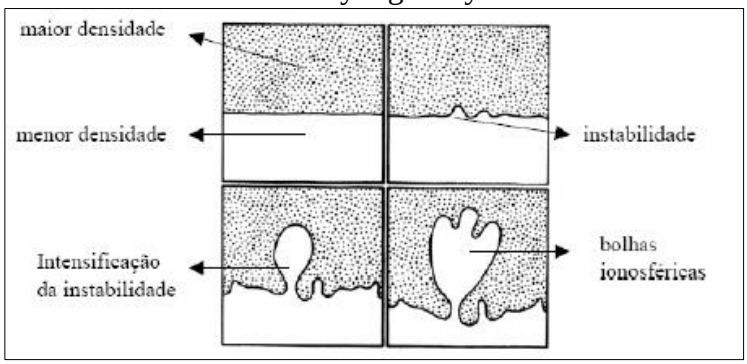


Fonte: Adaptado de Pimenta (2003)

Nesse sentido, destaca-se que as irregularidades ionosféricas possuem nomenclaturas diversas e distintas, sempre relacionadas ao tipo de equipamento utilizado, como por exemplo: quando o equipamento é uma ionossonda recebe o nome *spread F* tipo range (variação em altura); quando o equipamento é uma radar de espalhamento coerente recebe o nome de plumas; quando utiliza receptores GNSS emprega-se o termo cintilação de fase ou amplitude, e ainda quando emprega um imageador óptico utiliza-se o termo depleções ou bolhas de plasma (ABREU, 2012).

A Figura 7 mostra de forma ilustrativa a evolução de uma instabilidade ionosférica causando bolhas de plasma segundo a teoria Rayleigh-Taylor. Nesta situação um meio com maior densidade está sendo sustentado por outro de menor densidade. Nesta situação, sob a ação da gravidade, existe uma região de equilíbrio. Uma perturbação na fronteira entre as duas regiões de densidades distintas pode quebrar esse equilíbrio, introduzindo uma pequena instabilidade que, ao evoluir, gera as irregularidades no plasma ionosférico que em grande escala chama-se de bolhas de plasma. Para que ocorra esta evolução das irregularidades são necessárias algumas condições locais, tais como, uma intensificação dos campos elétricos de dínamo, altitude elevada da ionosfera e a presença de fortes gradientes da densidade eletrônica na base da camada antiparalela à força da gravidade. Um vez formadas as bolhas ionosféricas podem alcançar extensões latitudinais de ~10000 km e cerca de 150 a 300 km na direção perpendicular (SANTOS, 2001).

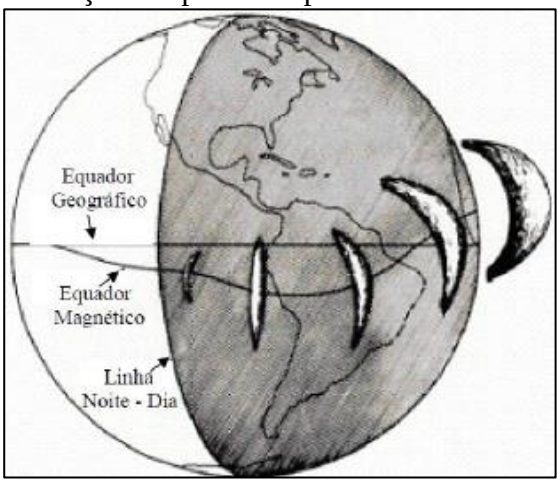
Figura 7 – Evolução de uma instabilidade ionosférica causando bolhas de plasma segundo a teoria Rayleigh-Taylor.



Fonte: Sobral et al. (1999).

As bolhas ionosféricas acontecem com maior frequência após o pôr do sol, quando acontece uma intensificação do campo elétrico zonal, apresentando uma condição física favorável para a geração da instabilidade do plasma ionosférico. Normalmente as bolhas se deslocam no sentido oeste-leste, ascendendo em altitudes e deslocando-se centenas de quilômetros na direção longitudinal, devido à alta condutividade ao longo das linhas de campo magnético. A Figura 8, mostra a evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.

Figura 8 – Evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.



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

O início do ESF também pode ser afetado por perturbações do campo elétrico originados em altas latitudes durante tempestades geomagnéticas (RODRIGUES, 2003). As bolhas ionosféricas ocorrem com maior frequência entre os meses de outubro a março, e variam de característica de acordo com o ciclo solar (SAHAI et al., 2000 apud MATSUOKA, 2007). Destaca-se que as bolhas de plasma afetam a propagação das ondas eletromagnéticas devido a alta variação na densidade do plasma ionosférico das bolhas. No interior das mesmas a densidade de plasma é drasticamente reduzida, resultando em altos gradientes de densidade de

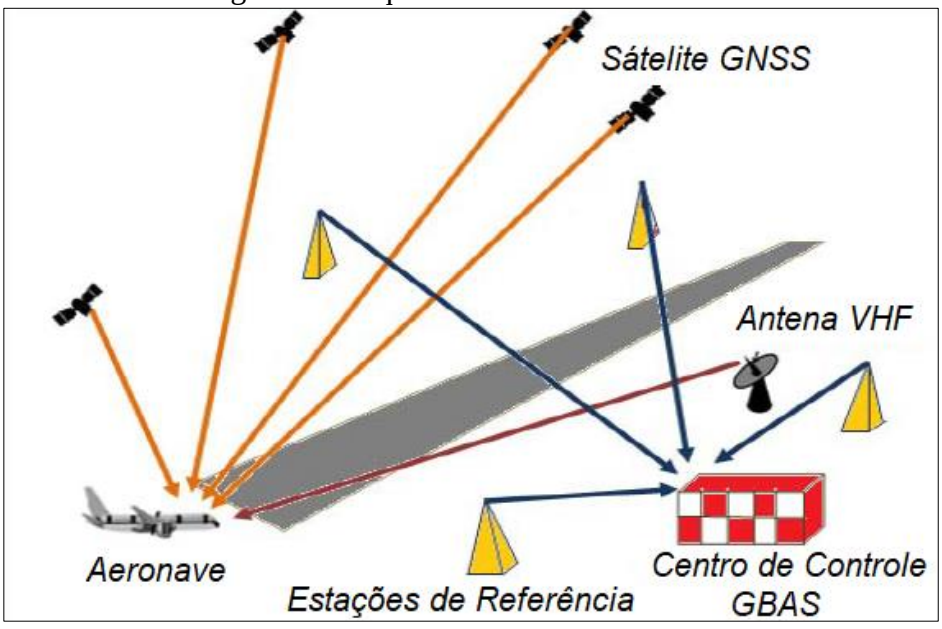
elétrons em suas bordas, causando irregularidades na camada ionosférica, que por consequência afeta a propagação das ondas eletromagnéticas nestes locais.

3.1 Impacto das Irregularidades e Bolhas Ionosféricas na Tecnologia GNSS

A tecnologia GNSS possui inúmeras aplicações: navegação marítima, segurança, meio ambiente, lazer, agricultura de precisão, aviação civil, entre outras. Para cada aplicação existe um nível de precisão requerido. No caso da aviação civil, exigi-se um nível de precisão para pouso e decolagem, além da integridade do sistema.

Com o objetivo de melhorar a precisão e garantir bom funcionamento da navegação aérea emprega-se técnicas diferencias GNSS, com o uso das tecnologias SBAS e GBAS. O papel do GBAS é aumentar o desempenho do sistema GNSS, fornecendo informações diferenciais para a posição de uma aeronave durante pouso e a decolagem, garantindo assim maior segurança (RAGHUNATH; RATNAM, 2015; BUMRUNGKIT; SUPNITHI, 2017). O GBAS fornece correções diferencias e informações de integridade provindas de estações de referência instaladas nas proximidades das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos. As correções são calculadas e executadas por uma central e transmitidas para o usuário (aeronave) por meio de uma antena VDB (VHF *Data Broadcast*) (MURPHY; IMRICH, 2008; RAGHUNATH; RATNAM, 2015). Toda esta arquitetura do sistema GBAS é apresentada na Figura 9.

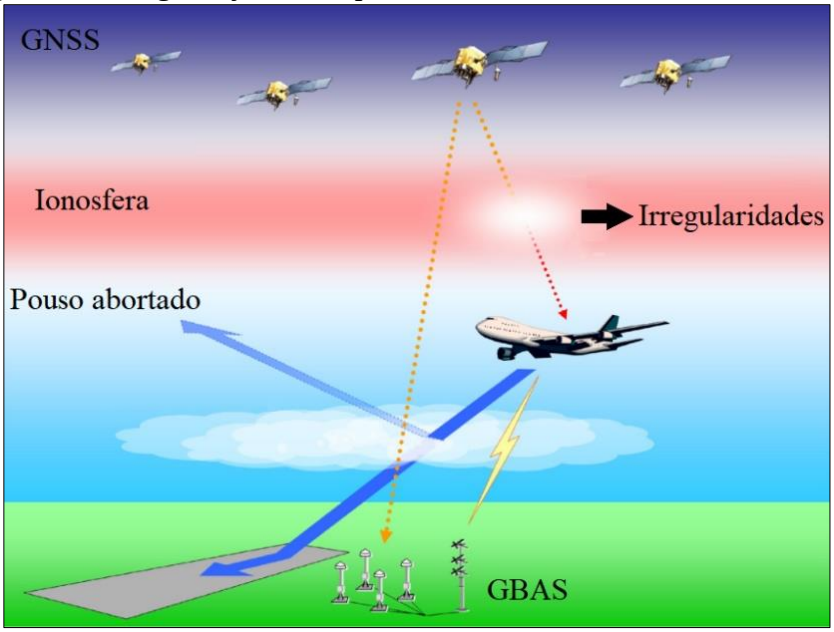
Figura 9 – Arquitetura do sistema GBAS.



Fonte: Fonte: Adaptado de Raghunath; Ratnam (2015)

Desta maneira, o GBAS aumenta o desempenho dos sistemas GNSS para a aviação civil, sendo um componente importante no gerenciamento do tráfego aéreo global, garantindo uma maior segurança no pouso e na decolagem dos aviões. Além de ser uma tecnologia relativamente barata, compacta, autônoma e de fácil implementação. Assim, a ICAO propôs substituir os ILS (*Instrument Landing System*) que são instrumentos para aproximação e pouso pelo GBAS, devido ao seu melhor desempenho (CHUJO; WALTER, 2006; RAGHUNATH; RATNAM, 2015). Entretanto, como os fenômenos ionosféricos afetam os sinais dos satélites consequentemente tem-se afetada a confiabilidade e a disponibilidade do GBAS (Figura 10).

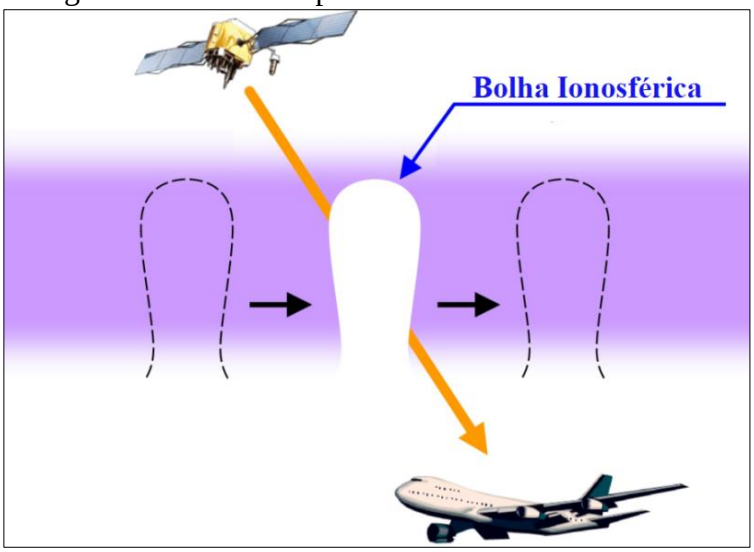
Figura 10 – Degradação da disponibilidade e confiabilidade do GBAS.



Fonte: Adaptado de Fujiwara e Tsujii, (2016).

Como visto anteriormente, devido à alta radiação solar durante o dia o processo de ionização é especialmente ativo nas regiões equatoriais e de baixa latitude em consequência da grande incidência solar nessas regiões, como é o caso brasileiro. Após o pôr do sol, por meio do processo de recombinação, a ionização causada pela radiação solar diminui fazendo com que a densidade de elétrons seja instável, tornando essas regiões extremamente suscetíveis a presença de irregularidades e consequentemente as bolhas ionosféricas, como pode ser visto na Figura 11. A densidade eletrônica presente no interior das bolhas é muito inferior do que o ambiente, quando uma bolha atravessa o caminho que o sinal GNSS, este faz com que o mesmo flutue gerando incertezas no posicionamento (FUJIWARA; TSUJII, 2016).

Figura 11 – Bolha de plasma afetando o sinal GNSS.



Fonte: Adaptado de Fujiwara e Tsujii, (2016)

A bolha de plasma apresenta-se de forma complexa, pode ter múltiplas ocorrências ao mesmo tempo. Como exemplo, algumas pesquisas mostraram que uma única bolha de plasma pode causar um erro de posicionamento na vertical superior a 10 metros, o que estaria próximo ao limite seguro para aproximações e pouso automático na categoria III (CAT III)[1] (RUNGRAENGWAJIAKE et al., 2015). Assim, conhecer a velocidade de deriva com que as bolhas de plasma se deslocam, torna-se um parâmetro significativo para avaliar o desempenho do GBAS na aviação civil.

[1] CAT III : Sistema de aproximação e pouso de precisão que conduz a aeronave até um altura mínima de 15 metros, requerendo uma visibilidade de 200 metros ou até mesmo com visibilidade zero.

3.2 Índices de irregularidades

Os índices de irregularidades da ionosfera possuem a função principal de classificar o comportamento da mesma, de acordo com um padrão estabelecido a partir de informações GNSS. Sendo assim, as estimativas desses índices se baseiam na taxa de variação do TEC (ROT) e há diversos índices de irregularidades da ionosfera, dentre os quais se destacam: I_{ROT}, ROTI, f_P e F_P.

3.2.1 ROT

O ROT consiste na taxa de variação do TEC, ou seja, na diferença entre os TECs (ΔTEC) obtidos consecutivamente entre duas épocas (Δt), dividido pelo intervalo de tempo entre suas determinações:

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (4)$$

3.2.2 Índice f_P

O índice f_P (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROTs para um período de 15 minutos, sendo os ROTs estimados a cada minuto. O índice f_P é calculado para cada satélite de uma determinada estação e é sempre maior ou igual a zero. O uso do valor da mediana efetivamente elimina os picos de ruídos. Assim, para diversos satélites/estações ele representa a resolução espacial das irregularidades (MENDILLO et al., 2000):

$$f_P(n, hr, i) = Mediana\ |ROT|, \quad (5)$$

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.

3.2.3 Índice F_P

O índice F_P é calculado para cada estação, para cada hora. Representa o valor médio de f_P de todos os satélites observados em uma estação dentro de uma hora. F_P destina-se a retratar o nível geral de irregularidades presentes na vizinhança de uma determinada estação (MENDILLO et al., 2000):

$$F_P\,(hr) \;=\; \frac{\sum_n^{nsat}\left[\sum_i^k f_P(n,hr,i)/k\right]}{nsat\;(hr)}.1000, \qquad (6)$$

onde:

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

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

Um valor $F_P \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 < F_P \leq 200$ significa a presença de moderadas irregularidades, e quando $F_P > 200$ representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito forte (MENDILLO et al., 2000).

3.2.4 Índice I_{ROT}

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

$$I_{ROT} \;=\; 10\;RMS\;(ROT), \qquad (7)$$

Valores $I_{ROT} \leq 0{,}5$ representam baixos níveis de irregularidades; $0{,}5 < I_{ROT} \leq 2{,}0$ significa a presença de irregularidades moderadas, e quando os índices são maiores que 2,0 representam a ocorrência de níveis de irregularidades ionosféricas muito fortes (PEREIRA; CAMARGO, 2013).

3.2.5 Índice ROTI

Devido ao fato de que as flutuações em pequena escala não estavam sendo identificadas nos índices já existentes, Pi et al. (2018) sugerem que um índice para a taxa de variação do TEC (ROTI) poderia ser determinado com base no desvio-padrão do TEC/min

(ROT), em um intervalo de 5 minutos. A equação para o cálculo do índice ROTI é apresentado a seguir:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}. \quad (8)$$

onde < > representa a média aritmética.

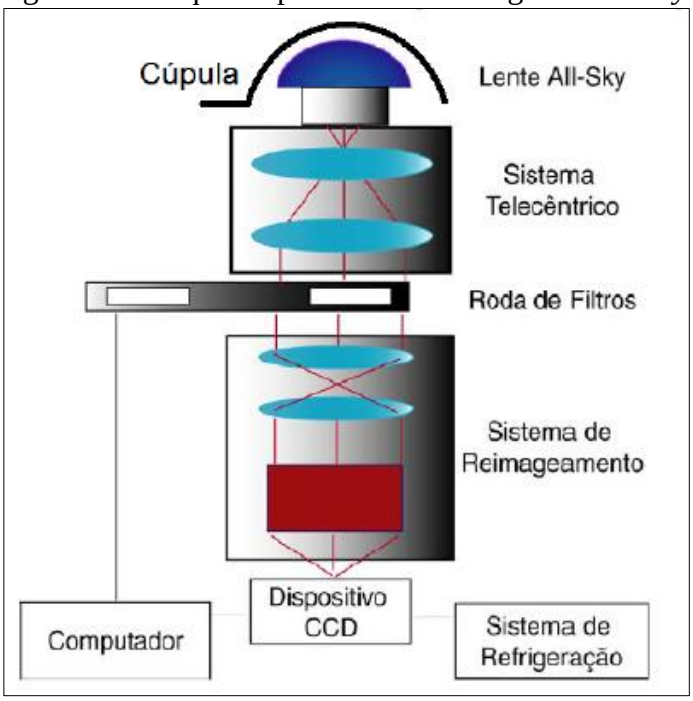
Um valor ROTI ≤ 0,05 representa baixos níveis de irregularidades; 0,05 < ROTI ≤ 0,2 significa a presença de irregularidade moderada, e quando ROTI > 0,2 representa a ocorrência de níveis de irregularidades muito forte (PEREIRA; CAMARGO, 2013).

4 INSTRUMENTAÇÃO

4.1 Imageadores

Os imageadores são considerados uma evolução dos fotômetros, que foi um dos primeiros instrumentos com o objetivo de captar a luminescência atmosférica. Sendo assim, pode-se dizer que os imageadores são fotômetros de alta resolução espacial. É considerado um telescópio que dispõe de uma lente do tipo "olho de peixe", um sistema telecêntrico, uma roda de filtros de interferência, um sistema de reimageamento, uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*), um sistema de refrigeração e um computador de gerenciamento da sua operação. A Figura 12 apresenta o esquema padrão de um imageador *all-sky* (ODRIOZOLA, 2017; COELHO, 2013).

Figura 12 – Esquema padrão de um imageador *all-sky*.



Fonte: Cândido (2008) apud Odriozola (2017)

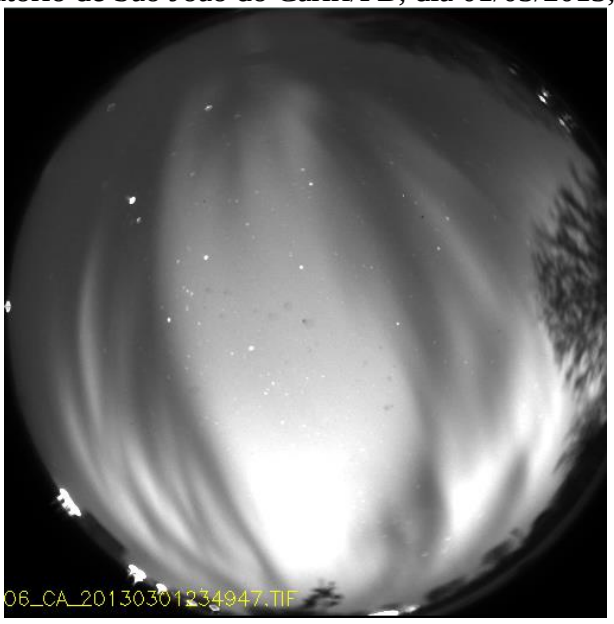
A função da cúpula no imageador é de apenas proteção da lente tipo olho de peixe, da poeira, chuva e outros agentes externos. Caso o instrumento esteja instalado em regiões que possuem alta umidade e mudanças bruscas de temperaturas é necessário instalar um aquecedor na borda da cúpula. Com o objetivo de evitar o processo de condensação e afetar as imagens. A lente tipo olho de peixe permite uma visão de 180°, de horizonte a horizonte na área considerada, permitindo capturar imagens completas do céu. Entretanto apresenta como desvantagem a deformação geométrica e compressão das imagens devido a curvatura da lente. Este problema pode ser resolvido aplicando uma função de linearização das imagens a partir de estrelas fixas em determinadas épocas do ano. O sistema telecêntrico é formado por uma lente

de campo ou também chamada de concentradora e uma lente colimadora. A lente concentradora tem que garantir que toda luz captada pela lente olho de peixe incida sobre a segunda lente, para que esta colime a luz sobre o sistema rotatório, onde o mesmo é formado por uma roda de filtros controlados por um motor, que consequentemente é controlado por um computador. Os filtros utilizados na roda de filtros são elementos ópticos interferométricos que de acordo com a emissão que pretende utilizar é selecionado uma banda centrada na linha ou comprimento de onda da emissão luminescente, esses filtros são de extrema importância devido à baixa intensidade das emissões. Antes da luz incidir no CCD, o feixe atravessa um sistema de reimageamento e intensificado, sendo de grande importância para a latitude equatorial, uma vez que comparada com outras latitudes apresenta baixa concentração eletrônica (ODRIOZOLA, 2017; COELHO, 2013).

O CCD é um conjunto de células fotossensíveis, que mediante a conversão de fótons em elétrons por cada célula e a posterior transferência sequencial dos mesmos permite reconstruir a imagem. Os CCD atualmente são usados nos arranjos de 1024 x 1024 ou 2048 x 2048 pixels. Porém, esse sistema eletrônico que compõem o CDD dissipa calor, fazendo com que produza elétrons de origem térmica gerando ruído. Entretanto esse efeito pode ser minimizado por um sistema de refrigeração. O computador é usado para aquisição dos dados e no controle da roda de filtros (ODRIOZOLA, 2017; COELHO, 2013).

A partir das imagens obtidas por meio dos imageadores em diferentes emissões é possível aprimorar os estudos feitos sobre a morfologia e dinâmica da ionosfera em diferentes altitudes. A Figura 13 mostra a área de cobertura das imagens obtidas a partir do observatório de São João do Cariri/PB, usando o filtro de interferência na emissão de OI 630,0 nm.

Figura 13 – Observatório de São João do Cariri/PB, dia 01/03/2013, filtro OI 630,0 nm.



4.1.1 UASDA

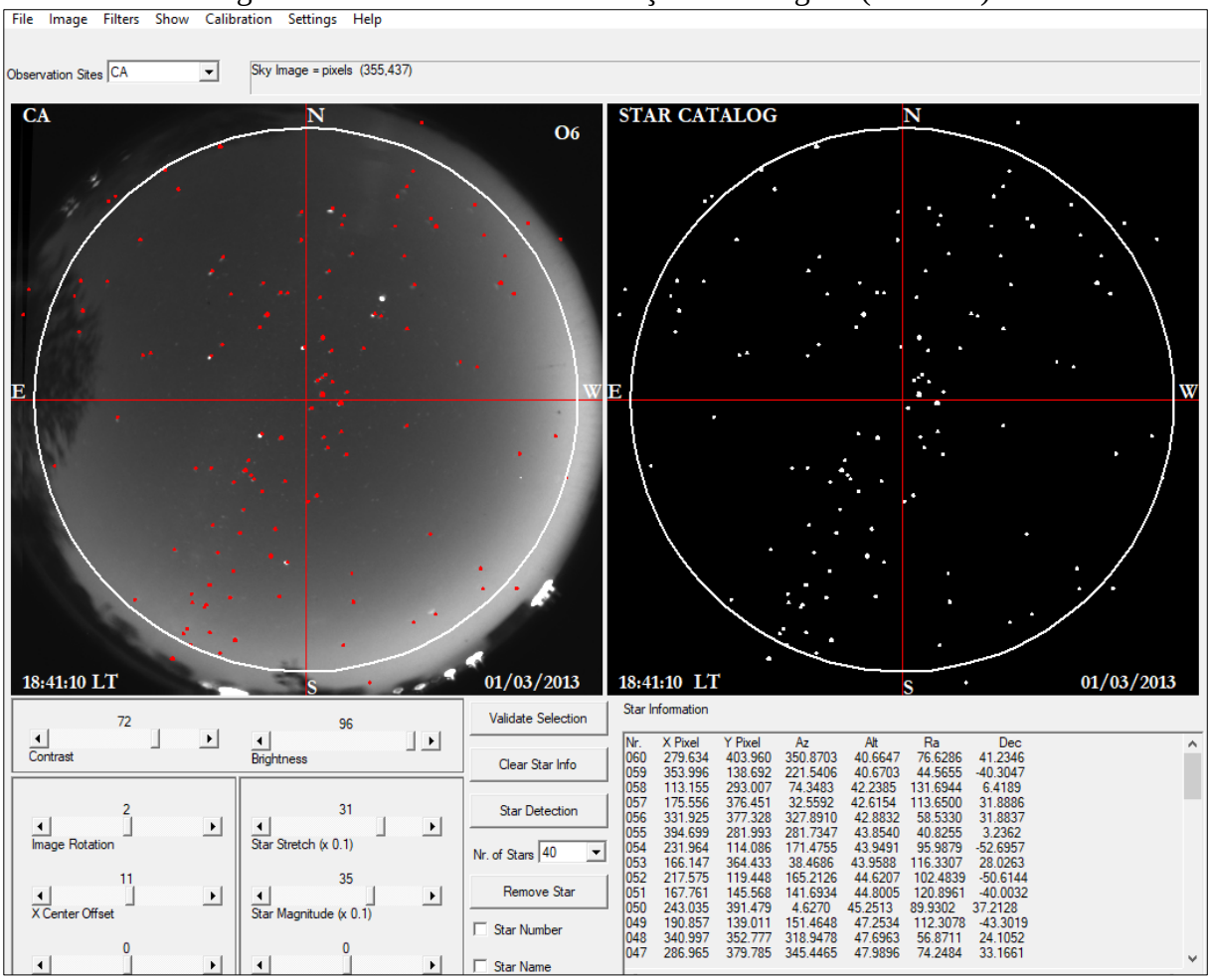
O *software* UASDA - *Univap All sky Data Analysis* foi desenvolvido pelo Laboratório de Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP em São José dos Campos. O programa é uma ferramenta para análise de dados obtidos por meio de imageadores *all-sky* nas diferentes frequências de emissão atmosférica observadas. O programa é capaz de conhecer os fenômenos físicos e químicos presente na região da atmosfera terrestre, e efetuar as seguintes tarefas: cálculo da dimensão das irregularidades do plasma, a velocidade de deriva, a altura da camada F ionosférica, variação espaço temporal da densidade eletrônica e o pico da camada F (PILLAT et al., 2009).

De acordo com Pillat et al. (2009) o programa utiliza o IDL para carregar e visualizar as imagens e o Visual Basic como interface para o usuário. O programa analisa as imagens selecionadas dos imageadores, imagens estas sem nenhum tratamento para a obtenção de valores quantitativos, e com a linearização das imagens é possível obter valores qualitativos dos diferentes parâmetros que caracterizam os fenômenos ionosféricos: bolhas de plasma, onda de gravidade e planetárias, estratificação das camadas ionosféricas. Para a obtenção dos parâmetros ionosféricos é necessário obter as características não lineares da lente olho de peixe, ou seja, deve realizar a calibração da mesma. Este processo pode ser dividido em três etapas:

1. Cálculo do centro real da imagem, ou ponto zenital da observação;
2. Cálculo do ângulo de rotação do eixo da imagem, para ficar orientado com as coordenadas geográficas, posicionando o Norte geográfico na parte superior centrado na tela;
3. Geração da função de transferência (os cincos coeficientes de um polinômio de quarta ordem), para a linearização das imagens. Pelo efeito óptico da lente olho de peixe as imagens guardadas apresentam-se distorcidas.

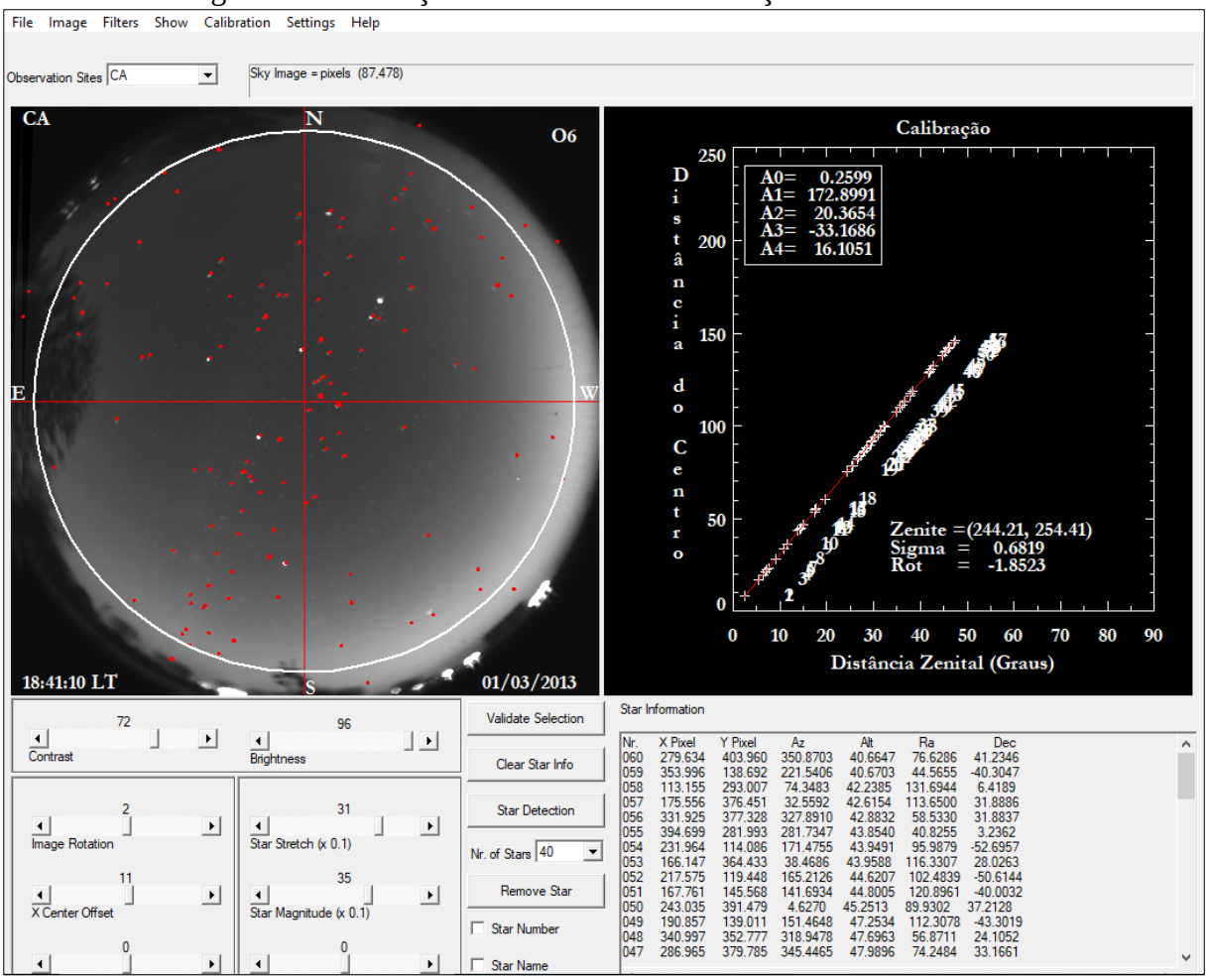
Esse processo de linearização é feito de uma maneira semi -automática, a partir de uma sub-rotina própria do programa que utiliza as imagens sem nenhum tratamento, as coordenadas geográficas do observatório, os horários das imagens e o mapa do céu, por exemplo o SKYMAP (Figura 14).

Figura 14 – Processo de Linearização das imagens (UASDA).



Assim, a partir das informações previamente inseridas no programa, movimenta-se a imagem até conincidir com suas homólogas fornecidas pelo SKYMAP para o horário em que a foto foi tomada pelo imageador. É importante ressaltar que que o programa assume que as imagens estão em horário local (*Local Time* – LT), portanto, faz necessário prestar atenção se as imagens estão em horário universal (*Universal Time* – UT). Após feito todo esse processo, executa-se a função de transferência (*Lenz Function*) para obter o sigma e encontrar os cincos coeficientes de um polinômio de quarta ordem, para a linearização da imagem (Figura 15). O processo de linearização só termina quando o sigma da função for mínimo, com o objetivo de reduzir os resíduos, para melhor linearização das imagens.

Figura 15 – Obtenção dos coeficientes da função de transferência.

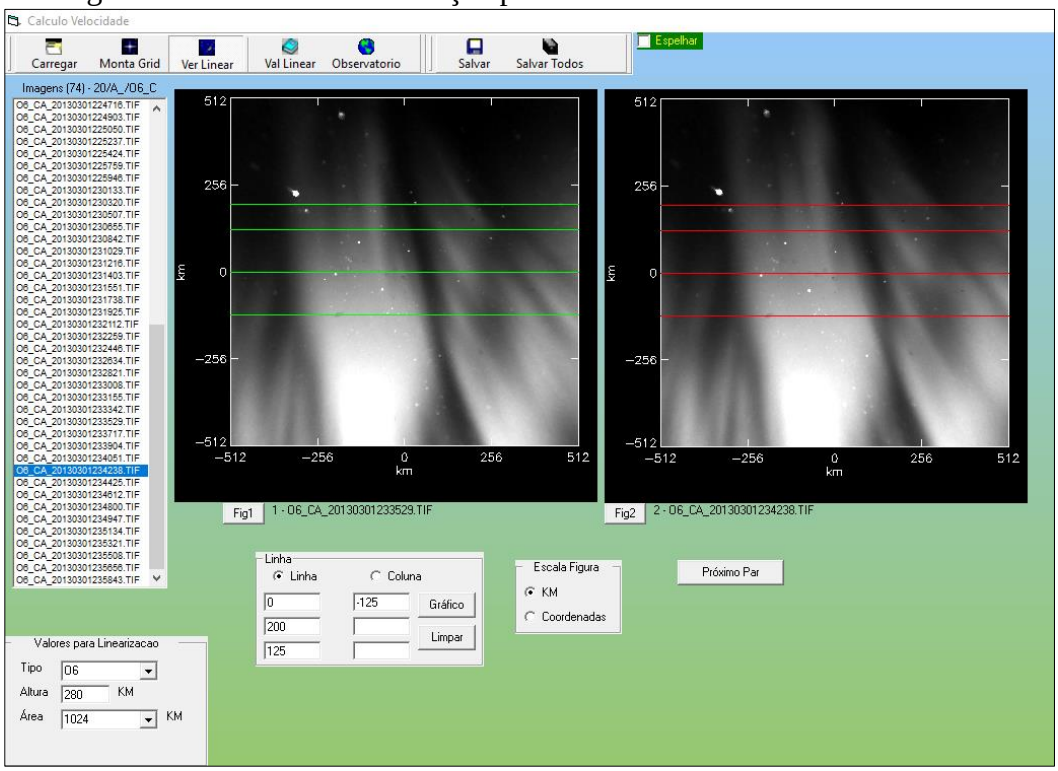


Após a obtenção dos parâmetros de linearização, próprio para cada observatório e período em que o aparelho não foi movimentado, é possível realizar a linearização de qualquer das imagens coletadas para o referido período. Na etapa da linearização das imagens, o programa converte a dimensão dos pixels da imagem original para uma imagem em coordenadas geográficas, parametrizada em graus (coordenadas geográficas) ou quilômetros (distância). É mais simples a conversão em quilômetros, uma vez que se utiliza uma regra de proporção, o que não acontece na conversão em graus que utilizam relações que insere-se as coordenadas do ponto de observação, o raio da Terra e a altitude da camada ionosférica da imagem a linearizar (PILLAT, 2009).

Há outra sub-rotina também importante para este trabalho, na qual o programa permite realizar o cálculo das velocidades de deriva das bolhas ionosféricas, a partir da sequência de imagens linearizadas, onde se seleciona as diferentes alturas dos cortes nos perfis de intensidade, de acordo com o estudo desejado. A Figura 16 mostra um exemplo com imagens obtidas pelo imageador de São João do Cariri/PB, na noite do dia 01 de março de 2013, linearizada para uma altitude de 280 km, emissão utilizada OI 630,0 nm e área de 1024 km.

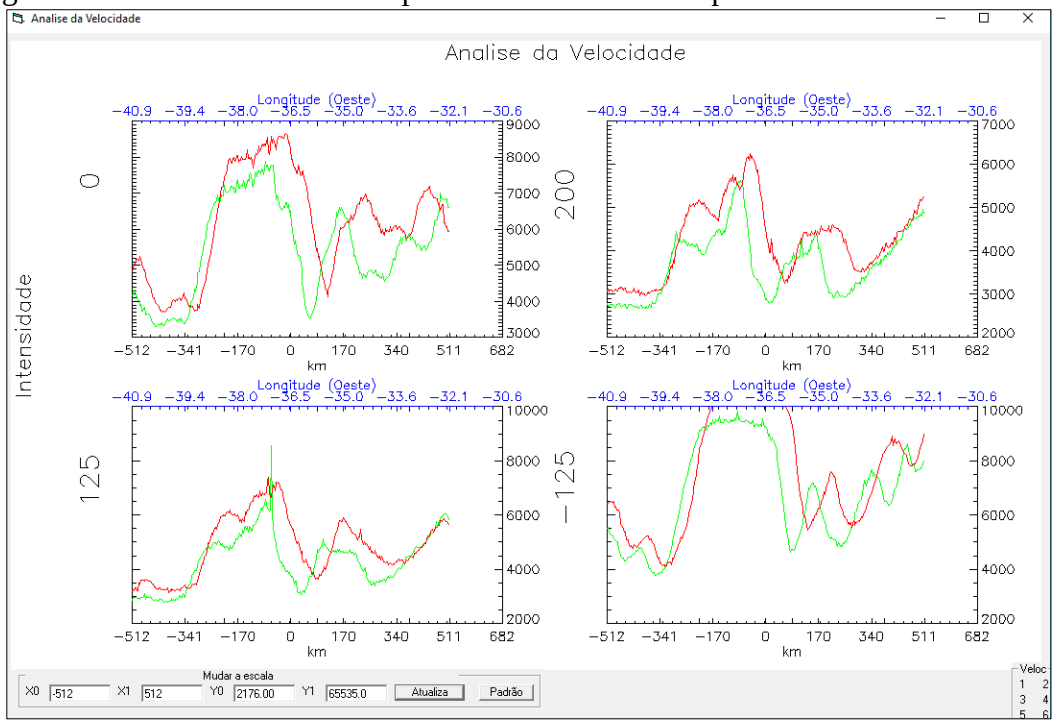
Além disso, pode ser observado 4 cortes no perfil de intensidade em 200 km, 125 km, 0 km e -125 km.

Figura 16 – Processo linearização para o cálculo da velocidade de deriva.



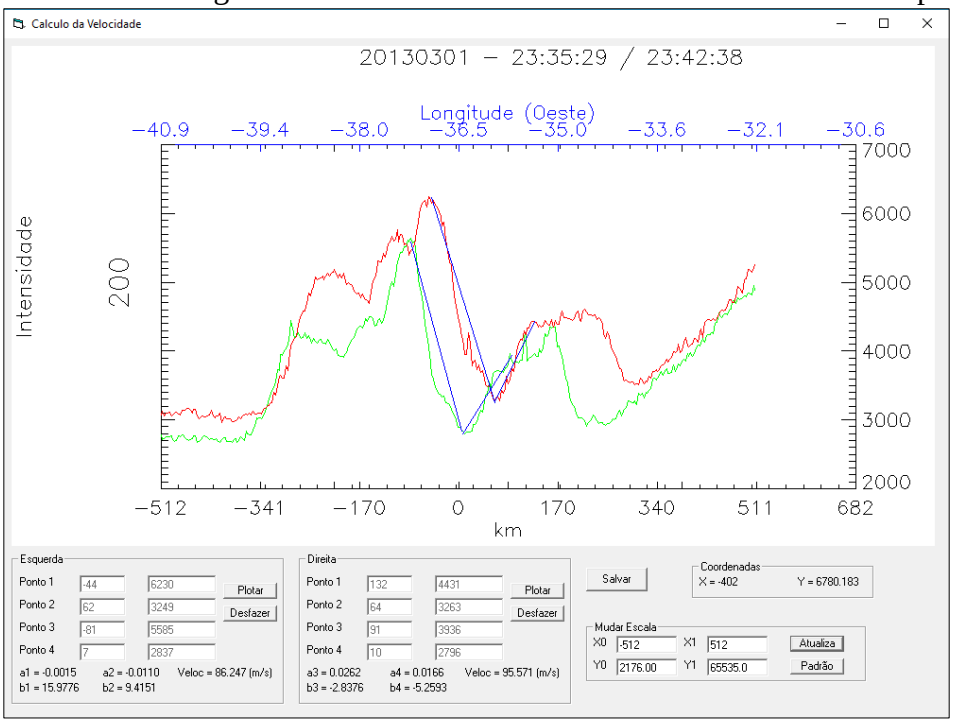
A Figura 17 apresenta os quatro gráficos com os cortes no perfil de intensidade para cada um dos níveis selecionados anteriormente, e mostra a sequência de cortes utilizados para o cálculo da velocidade de deriva da bolha de plasma, que é feito por meio do deslocamento das “paredes” (gradiente na intensidade da emissão) da bolha em análise. Em cada gráfico tem-se dois perfis (vermelho e verde) correspondente às duas imagens selecionadas com horários consecutivos. Selecionam-se dois pontos que definem as retas das duas “paredes” para cada uma das bolhas, e tem-se o horário em as imagens foram observadas (informação contida na imagem e acessada pelo programa). Desta maneira é possível calcular a velocidade a partir do deslocamento apresentado pelas retas. É calculado a velocidade para cada um dos cortes selecionados, bem como a sua média e seu desvio-padrão, onde essas informações são salvas em um arquivo específico. O programa permite realizar até seis cortes.

Figura 17 – Perfil de intensidade para os cortes realizado para o cálculo da velocidade.



A Figura 18 apresenta um exemplo da tela com o cálculo da velocidade de deriva, por meio dos deslocamentos das “paredes” da bolha ionosférica, onde se selecionam os pontos que definem as duas “paredes” da bolha. Esse processo é feito para cada um dos quatros cortes realizados mostrado na Figura 17. E por fim, é possivel realizar o cálculo da velocidade média bem como o seu desvio-padrão.

Figura 18 – Interface gráfica do cálculo da velocidade de deriva da bolha de plasma.



4.2 Redes GNSS Ativas

As redes GNSS ativas são constituídas de um conjunto de receptores de sinais GNSS, instalados em locais com coordenadas conhecidas que operam continuamente, sendo gerenciado por um centro operacional responsável por manter o sistema, bem como a divulgação dos dados (MONICO, 2008). No Brasil, destaca-se três redes ativas: CIGALA/CALIBRA, RBMC, GNSS-SP, sendo os dados das duas últimas redes disponibilizadas pelo RBMC/IBGE. Para este trabalho dará maior destaque para a RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Continuo e a Rede CIGALA/CALIBRA.

A RBMC conta com mais de 130 estações GNSS distribuídas por todo território nacional, gerenciada pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. As estações pertencentes a RBMC são apresentadas na Figura 19. De acordo com o IBGE, dentre as estações 104 também transmite informações em tempo real e 34 somente utilizada para pós-processamento, onde os dados em tempo real são transmitidos via internet por meio do protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).

A rede CIGALA/CALIBRA tem como o objetivo exclusivamente de estudo e monitoramento dos distúrbios ionosféricos no Brasil. Essas estações contam com receptores GNSS PolaRxS-PRO, da Septentrio, os quais coletam dados a uma taxa de até 100 Hz. Atualmente, a rede é composta por 14 estações ativas apresentadas na Figura 20.

Figura 19 – Estações da Rede RBMC.

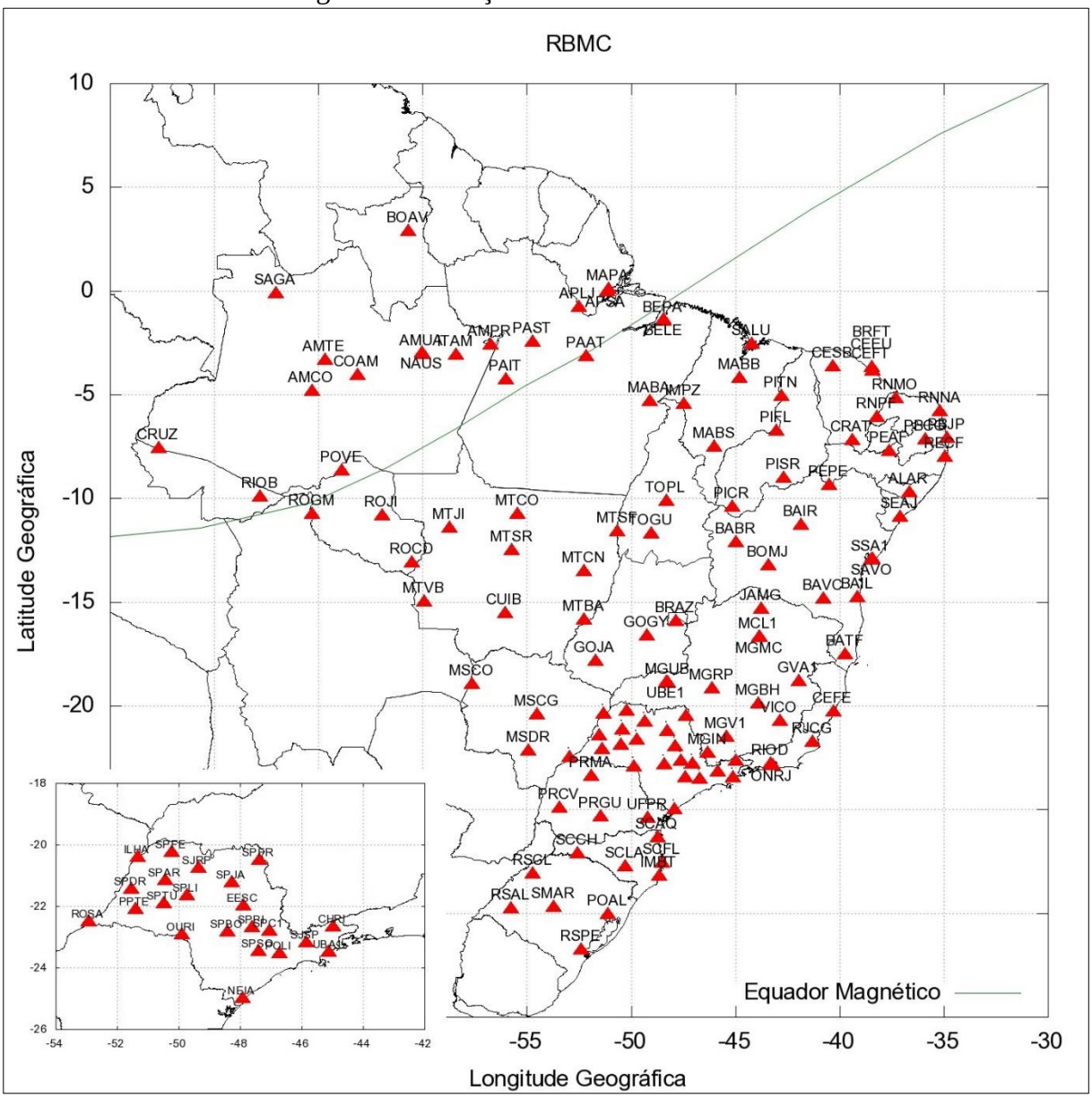
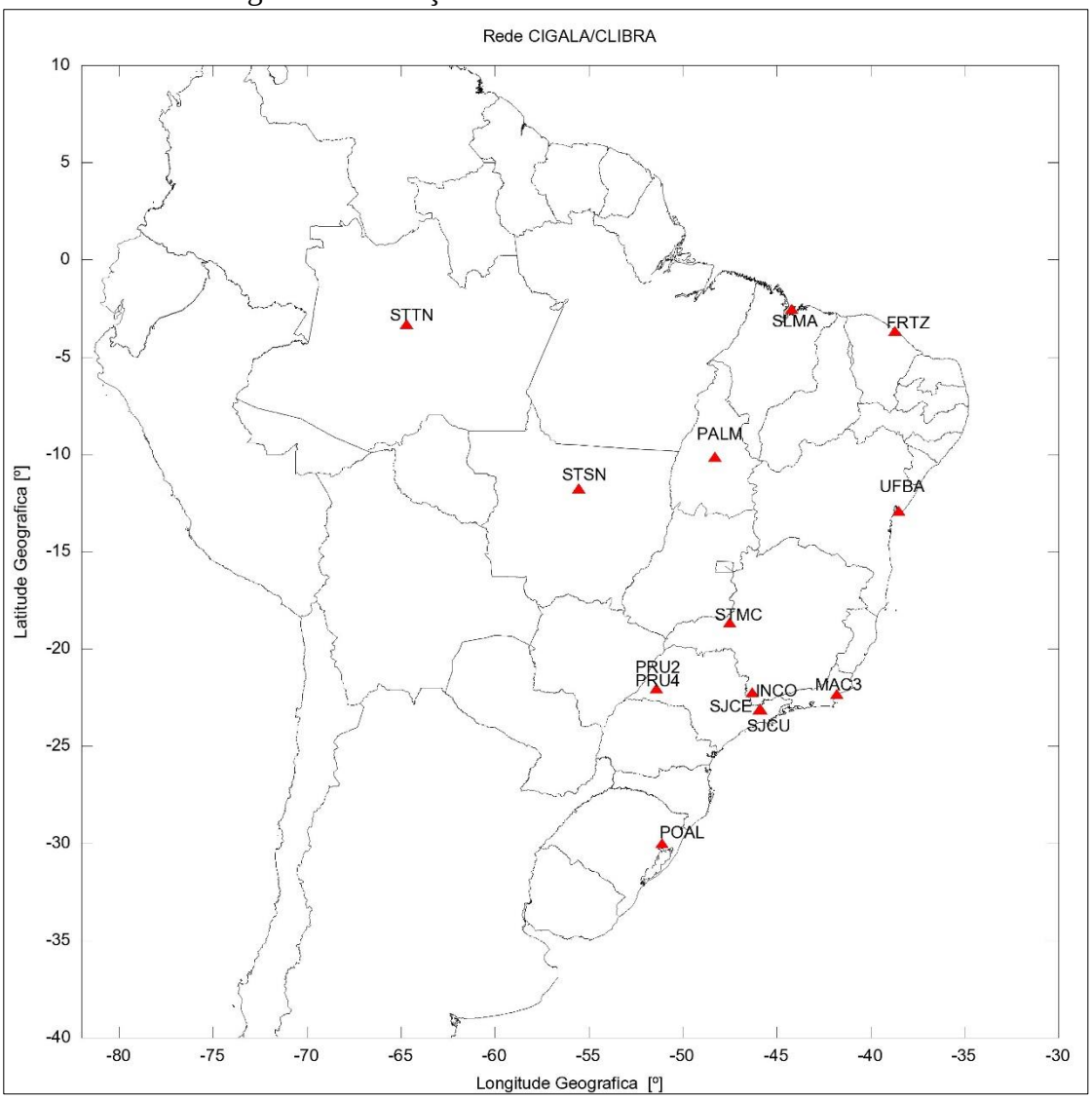


Figura 20 – Estações da Rede CIGALA/CALIBRA.



5 METODOLOGIA

A pesquisa tem como objetivo estimar as velocidades de deriva das bolhas de plasma usando a correlação do conteúdo total de elétrons (TEC) entre duas estações, por meio dados GNSS, bem como assegurar/validar os resultados obtidos por meio dos imageadores ópticos, utilizando o *software* UASDA.

Desta forma tem-se que o cálculo da velocidade de deriva das bolhas de plasma, em metros/segundo é dado por:

$$V = \frac{D_{k1-k2}}{t_{k1-k2}}\,, \tag{9}$$

onde:

D_{k1-k2} – distância horizontal em metros entre duas estações GNSS; e

t_{k1-k2} – tempo de viagem das bolhas de plasma entre as estações de referência.

O tempo de deslocamento das bolhas de plasma pode ser obtido por meio do tempo de atraso entre a auto-correlação e correlação cruzada dos valores de TEC para as estações de referência, que podem ser obtidas por meio das Equações (10) e (11) (BUMRUNGKIT et al., 2014):

$$R_{XX} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})\,(x_{i+1} - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(x_{i+1} - \bar{x})^2}}, \tag{10}$$

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})\,(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}, \tag{11}$$

onde:

R_{XX} – auto-correlação;

R_{XY} – correlação cruzada;

$x_i e\ y_i$ – valores de TEC para as estações de referência $x_i e\ y_i$

$\bar{x}\ e\ \bar{y}$ – média dos valores de TEC para as estações de referência.

Deste modo, para obter o tempo de viagem da bolha ionosférica entre as duas estações de referência, é necessário estimar os valores de TEC para as estações em questão, uma vez que o TEC é o principal parâmetro capaz de descrever o estado da ionosfera. Tem-se que os valores de TEC são dados pelas Equações (2) e (3) apresentadas na subseção 2.3. Rescrevendo as equações de maneira mais simples tem-se o TEC a partir de observações de fase e pseudodistância, respectivamente:

$$TEC_L = K(L_1 - L_2), \quad (12)$$

$$TEC_P = K(P_2 - P_1), \quad (13)$$

onde:

K – constante igual a 9,52 (m^{-1} TECU) para as frequências nas portadoras L1 e L2;

L_1 – fase da onda da portadora L1;

L_2 - fase da onda portadora L2;

P_1 – Pseudodistância na portadora L1;

P_2 – Pseudodistância na portadora L2.

O TEC obtido pela pseudodistância é mais ruidoso que o obtido por meio da fase da onda portadora; porém, a fase apresenta uma ambiguidade inicial. E essa ambiguidade pode ser estimada utilizando a técnica que chamada de nivelamento da fase, que é obtido por meio da diferença média do atraso ionosférico obtido por meio da fase da onda portadora e do código, em um arco de dados sem perda de ciclo. Desta maneira, o TEC obtido pela fase nivelada pode ser obtida por meio da seguinte aproximação:

$$TEC_{L_niv} = TEC_L + (\overline{TEC_P - TEC_L}), \quad (14)$$

onde $(\overline{TEC_P - TEC_L})$ representa a média da diferença entre os valores de TEC;

Ainda, deve-se corrigir TEC devido aos erros sistemáticos do receptor e do satélite, erro este chamado de DCB (*Differential Code Bias).* Essa correção pode ser realizada por meio da expressão:

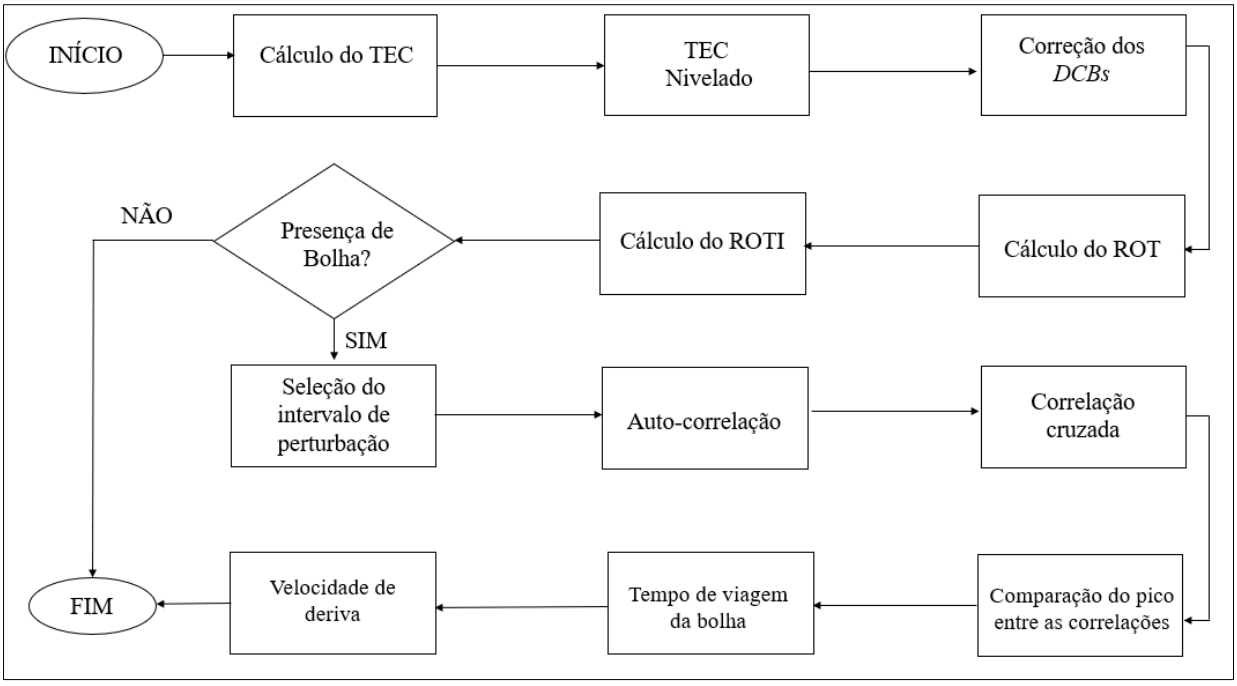
$$TEC = TEC_{L_niv} + b_r + b^s, \quad (15)$$

onde b_r e b^s são os DCBs receptor e do satélite, respectivamente.

Estimado os valores de TEC (Equação (15)), é possivel inferir a velocidade de deriva das bolhas ionosféricas por meio da auto-correlação e correlação cruzada. É importante ressaltar que todo este procedimento é feito para cada satélite de forma individualmente. Para cálculo do tempo de viagem da bolha ionosférica é necessário verificar se houve a ocorrência da mesma, a partir da estimativa do índice de irregularidade ROTI (Equação (8)), a fim de verificar se houve irregularidades ionosféricas suficientemente capazes de gerar as bolhas de plasma, ou seja, as irregularidades serem classificadas de moderadas a forte. Detectada a indicação da presença da bolha, seleciona-se o intervalo de tempo em que ocorre tal variação do TEC. Para isto, verifica se a diferença de TEC entre as duas estações de referência foi superior ao limiar de 1 TECU, para o mesmo satélite, de acordo com BUMRUNGKIT et al., 2014.

A diferença sendo superior ao limiar estabelecido é possivel estimar a velocidade com que a bolha de descola. Assim a estimativa da velocidade de deriva da bolha ionosférica é feita por meio do cálculo da auto-correlação e correlação cruzada entre os valores de TEC para as duas estações de referência. A diferença entre o tempo em que ocorre a máxima auto-correlação e na qual ocorre máxima correlação cruzada, denota o tempo de deslocamento da bolha ionosférica. Por fim, com o objetivo da validação da metodologia apresentada, realiza-se uma estimativa das velocidades de deriva obtidas por meio do *software* UASDA. O fluxograma apresentado na Figura 21, mostra toda a metodologia desenvolvida para a estimativa da velocidade de deriva por meio do TEC.

Figura 21 – Fluxograma empregado na estimativa da velocidade de deriva utilizando medidas do conteúdo eletrônico total.



6 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

O projeto de pesquisa concentra-se em estimar as velocidades de deriva das bolhas de plasma, utilizando informações GNSS, a partir da correlação normalizada do conteúdo total de elétrons (TEC) entre duas estações de referência.

A metodologia proposta neste projeto de pesquisa foi implementada utilizando o software MATLAB (MATrix LABoratory), realizada em duas etapas. A primeira etapa consiste na determinação do TEC, utilizando o algoritmo apresentado em PROL et al. (2018). Já a segunda etapa foi implementada de forma independente, na qual consistiu no cálculo da auto-correlação e correlação cruzada entre os valores do TEC para estimativa do tempo de deslocamento da bolha.

É importante ressaltar que todos os experimentos propostos foram realizados para o ano de 2014, devido a este ano ter sido caracterizado pelo ápice do ciclo solar 24, como pode ser visto na Figura 2, favorável à presença de bolhas ionosféricas. Considerando este ano, é uma maneira de garantir que as irregularidades ionosféricas presentes sejam suficientemente capaz de gerar as bolhas ionosféricas, que é o principal objeto de estudo deste projeto de pesquisa.

Para a avaliação da estimativa da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas, a partir do método proposto, foi utilizado dados GNSS das estações pertencentes à RBMC, empregando diferentes amostragens dos dados. Inicialmente, a estimativa TEC foi feita para uma taxa de amostragem de 30 segundos, e posteriormente para uma taxa de 15 segundos, com o objetivo de comparar os resultados e realizar uma análise do método proposto.

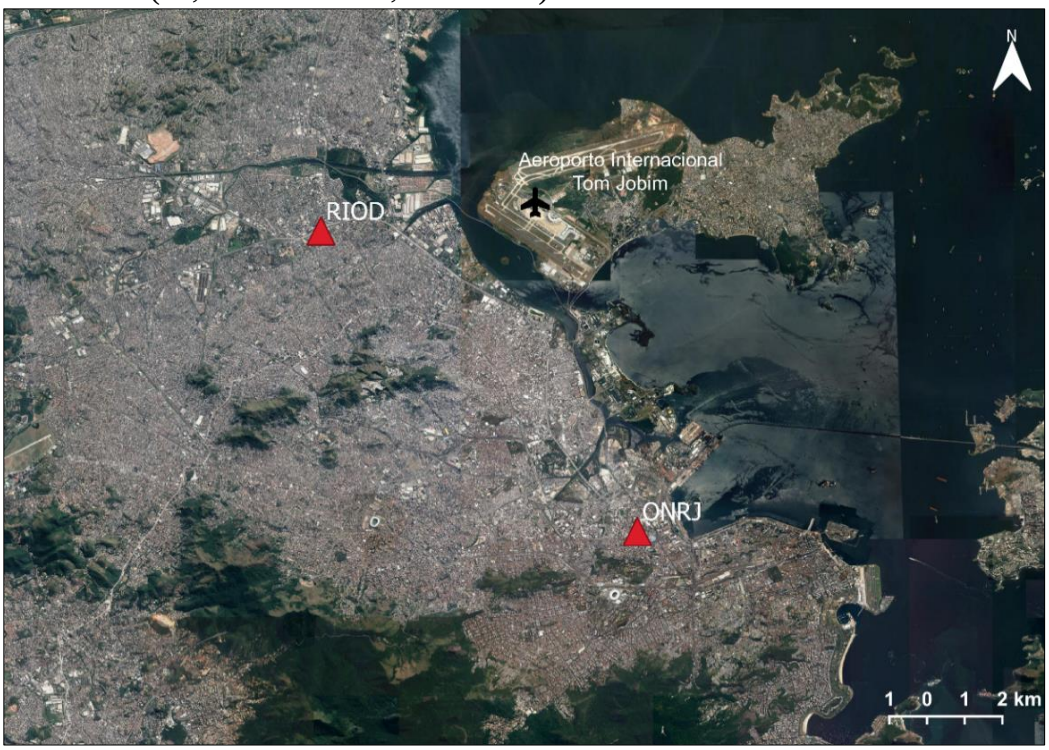
Na sequência foi feita a validação da metodologia apresentada, onde foram comparadas as velocidades obtidas utilizando informações GNSS, com dados a cada 15 segundos, com as velocidades estimadas por meio do *software* UASDA. Realizada a diferença entre as velocidades, foi possível analisar se houve correspondência entre as mesmas e analisar se a metodologia proposta no projeto de pesquisa é adequada para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas.

O último experimento consistiu em analisar a limitação do método em relação as distância entre as estações de referência. Para isto, selecionou-se 5 estações pertencentes a RBMC com diferente distâncias entre si e analisou-se as velocidades de deriva da bolha ionosférica para diferentes dias devido à dinâmica espacial e temporal das bolhas ionosfericas.

6.1 Estimativa da velocidade de deriva a partir de dados GNSS, com taxas de 30 e 15 segundos

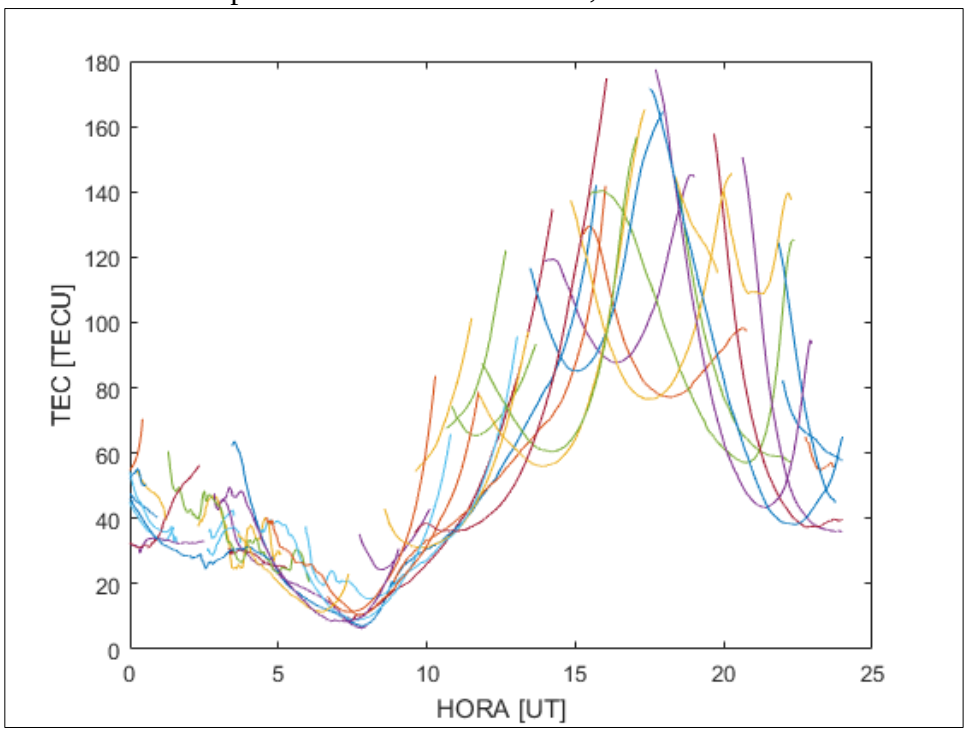
Inicialmente, neste experimento foi realizado uma avaliação do método proposto para estimar a velocidade de deriva das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS, utilizando diferentes taxas de amostragens dos dados. Para isto, foram selecionadas duas estações pertencentes a RBMC, a estação RIOD (22,817844° S 43,306277° O) e a estação ONRJ (22,8957701° S 43,224332° O), localizadas próximo ao Aeroporto Internacional Tom Jobim (Figura 22). É importante ressaltar que a escolha das estações de referência foi feita de modo em que as distância entre elas não fosse superior a 15 km, onde considera-se que o comportamento da camada ionosférica é o mesmo para ambas as estações .

Figura 22 – Localização das estações de referência RIOD (22,817844° S 43,306277° O) e ONRJ (22,8957701° S 43,224332° O).



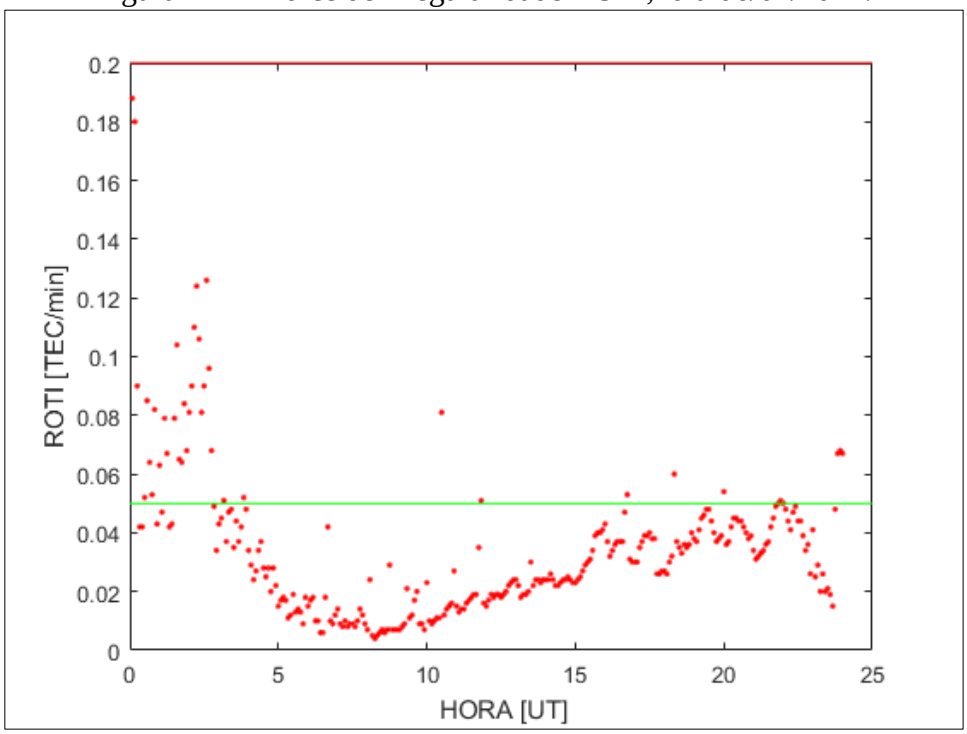
Os valores de TEC foram estimados para o dia 06 de janeiro de 2014, assim contemplando um dia que faz parte do pico do ciclo solar 24. A Figura 23 mostra os valores de TEC nivelado estimado para todos os satélites GPS derivados da estação de referência RIOD. E a partir da mesma, é possível notar que para todos os satélites visíveis para as primeiras horas do dia, entre as 00 horas e 05 horas UT, há uma maior instabilidade nos valores de TEC, apresentando indícios da ocorrência de alguma irregularidade ionosférica.

Figura 23 – Valores de TEC estimado para todos satélites GPS derivados da estação RIOD, onde cada cor representa um satélite distinto, dia 06/01/2014.



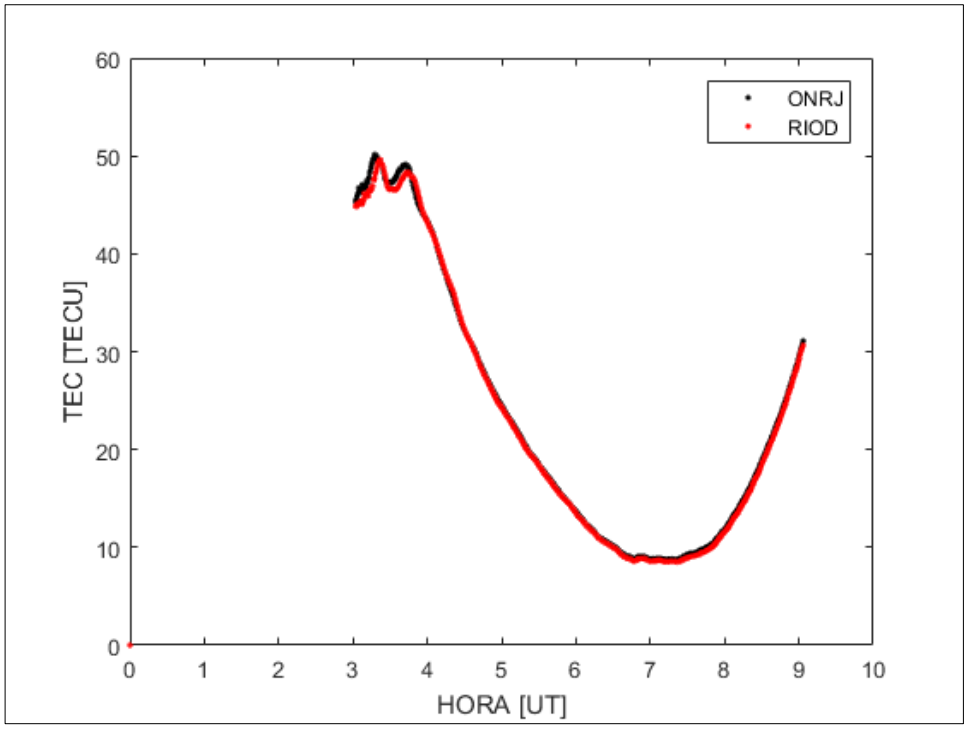
Para cálculo do tempo de viagem da bolha ionosférica é necessário verificar se houve a presença de irregularidades de elétrons suficiente para iniciar o processo de formação da bolha de plasma. Para isto, estima-se o índice de irregularidade ROTI (Figura 24).

Figura 24 – Índice de irregularidade ROTI, dia 06/01/2014.



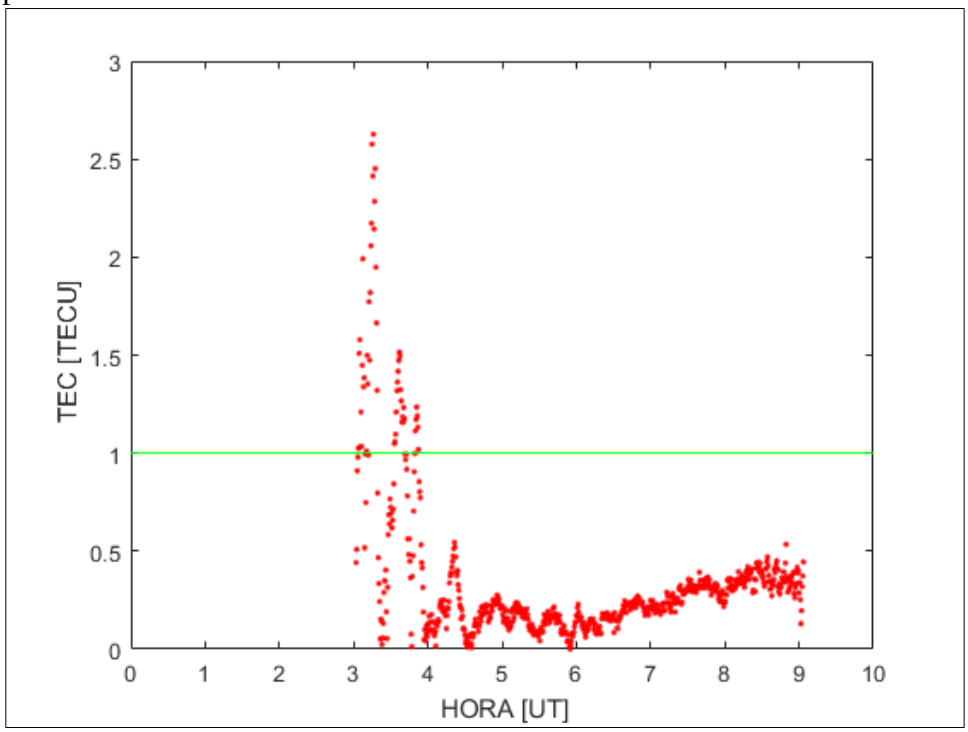
A partir da Figura 24, nota-se que para as primeiras horas do dia, entre as 00 horas e 05 horas UT, as irregularidades podem ser classificadas como moderadas, apresentando indícios da presença da bolha ionosférica para esse período do dia. Esse comportamento já era esperado, uma vez que os valores de TEC representados na Figura 23 apresentaram comportamento semelhante. Para o restante do dia, os valores permaneceram inferiores ao limite classificatório de baixos níveis de irregularidades (linha verde), apresentando alguns *outliers*. Diante das evidências da ocorrência das bolhas ionosféricas, foi selecionado o satélite GPS que estivesse visível em ambas as estações no momento para o período em que as irregularidades foram classificadas como moderadas. Deste modo, foi escolhido o PRN 32 para determinar os valores de TEC nivelado e dos DCBs, para as estações RIOD e ONRJ (Figura 25).

Figura 25 – Valores de TEC estimados para as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN32, dia 06/01/2014.



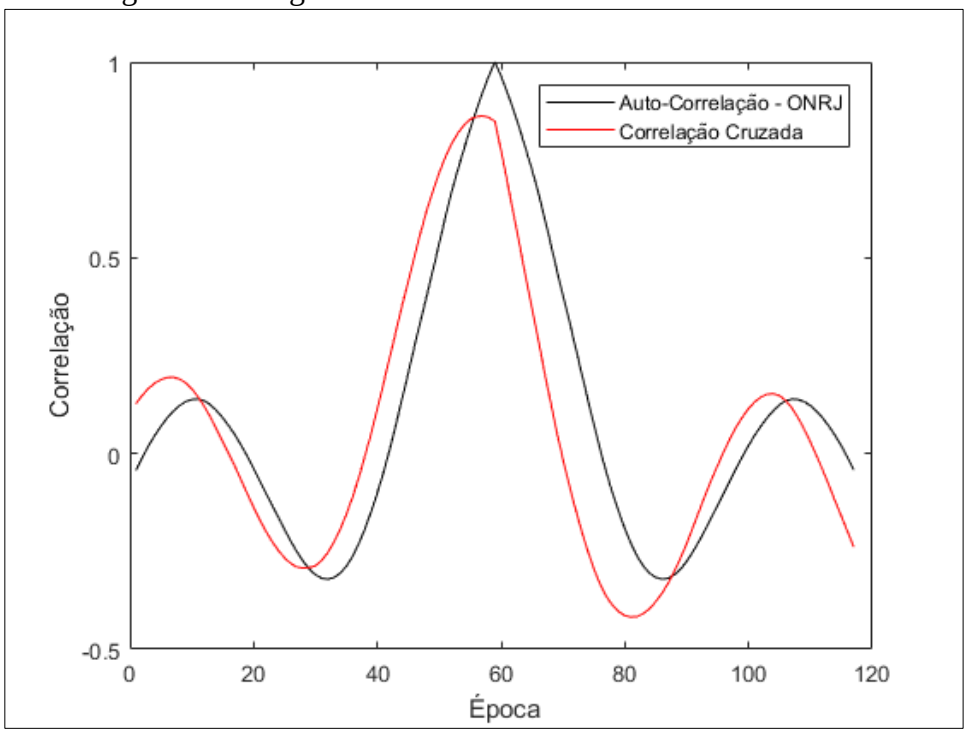
Na Figura 25 fica evidente a presença da bolha ionosférica para o período entre as 03 e 04 horas UT, uma vez que a mesma é caracterizada como uma depleção abrupta na densidade de elétrons e consequentemente os valores de TEC apresentaram comportamento semelhante, evidenciando a presença da bolha de plasma. Sendo assim, detectada a presença da mesma, seleciona-se o período em que ocorreu tal perturbação do TEC. Para isto é verificado se a diferença de TEC entre as duas estações foram superiores ao limiar de 1 TECU (Figura 26). Assim, foi possível notar que o período de perturbação foi coerente, entre as 03 e 04 horas UT.

Figura 26 – Diferença entre os vaores de TEC para as estaçõesde referência RIOD e ONRJ, para o PRN 32.



Em seguida, usa-se o período de perturbação para estimar a velocidade de deriva da bolha ionosférica por meio da correlação entre os valores de TEC (Figura 27).

Figura 27 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, às 03 e 04 horas UT, com taxa de amostragem de 30 segundos.



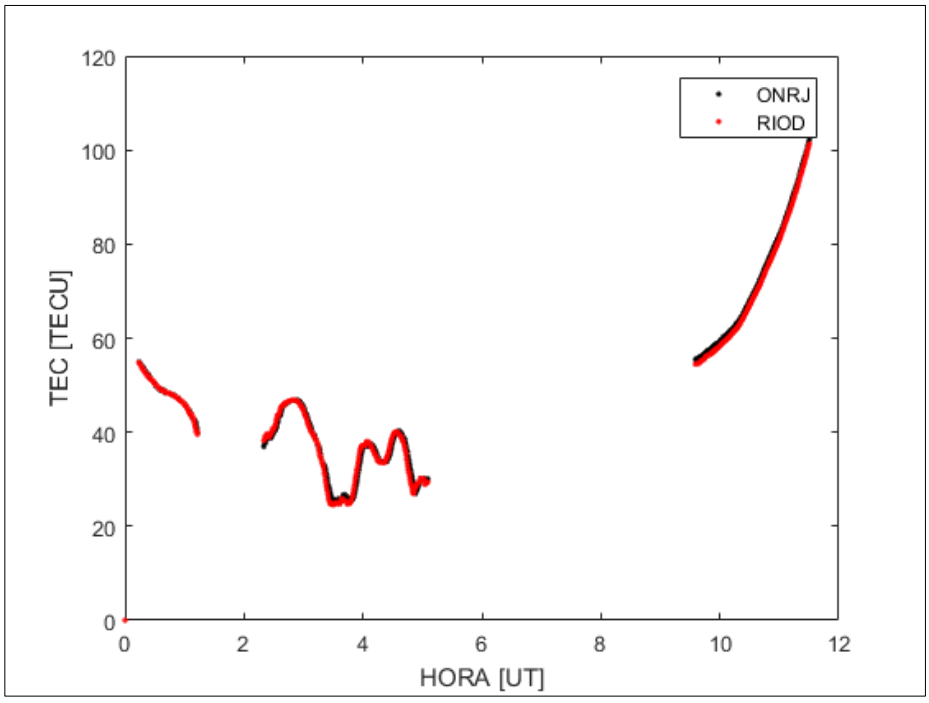
A linha preta representa a auto-correlação entre os valores de TEC para a estação ONRJ e a linha vermelha representa a correlação cruzada entre os valores de TEC entre as

estações ONRJ e RIOD. Estima-se o tempo de deslocamento da bolha ionosférica pelo tempo de atraso entre a auto-correlação e correlação cruzada, ou seja, verifica-se a época em que ocorreu a máxima auto-correlação e a época em que ocorreu máxima correlação cruzada, e determina-se a diferença de tempo. O valor encontrado representa o tempo de deslocamento da bolha ionosférica entre as duas estações. A partir da Figura 27, nota-se que a máxima auto-correlação ocorreu na época 59 e a máxima correlação cruzada ocorreu na época 57, apresentando uma diferença de duas épocas. No primeiro momento, a leitura do arquivo RINEX foi feita a cada 30 segundos. Deste modo, o tempo de deslocamento da bolha ionosférica foi de 60 segundos.

Assim, uma vez estimado o tempo de deslocamento da bolha, é possível inferir a velocidade de deriva da bolha ionosférica. Sabe-se que a distância horizontal entre as estações ONRJ e RIOD, na direção de deslocamento da bolha, é de aproximadamente 9000 m, então para este caso a velocidade de deriva da bolha ionosférica é de aproximadamente 150 m/s.

A metodologia proposta para o cálculo da velocidade de deriva da bolha ionosférica foi realizada novamente para o PRN 03. Deste modo, os valores de TEC foram estimados para ambas as estações (Figura 28), onde foi possível detectar a presença de bolhas ionosféricas para o intervalo das 02 as 05 horas UT.

Figura 28 – Valores de TEC estimados para as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN03, dia 06/01/2014.



Uma vez detectada a presença de bolha seleciona-se o período em que ocorreu tal perturbação do TEC. Para isto verifica-se a diferença de TEC entre as duas estações e se as mesmas foram superiores ao limiar de 1 TECU (

Figura **29**). A partir dos resultados foi possível notar que o período de perturbação foi coerente, onde a diferença de TEC foi de até 3 TECU entre as 02 e 05 horas UT. A ocorrência de uma bolha ionosférica é caracterizada como uma depleção abrupta na densidade de elétrons, e consequentemente os valores de TEC apresentaram comportamento semelhante, conforme evidenciado na Figura 28. Entretanto, não se pode afirmar ao certo se esse comportamento apresentado é ocorrência de mais de uma bolha ou se trata apenas de suas ramificações, mesmo assim, estimou-se a velocidade de deriva para todas as depleções apresentadas, ou seja, para o intervalo entre as 02 h e 30 min e 05 horas UT. Para isto, determina-se a auto-correlação e a correlação cruzada entre as estações RIOD e ONRJ (Figura 30).

Figura 29 – Diferença entre os valores de TEC entre as estações de referência RIOD e ONRJ, para o PRN 03.

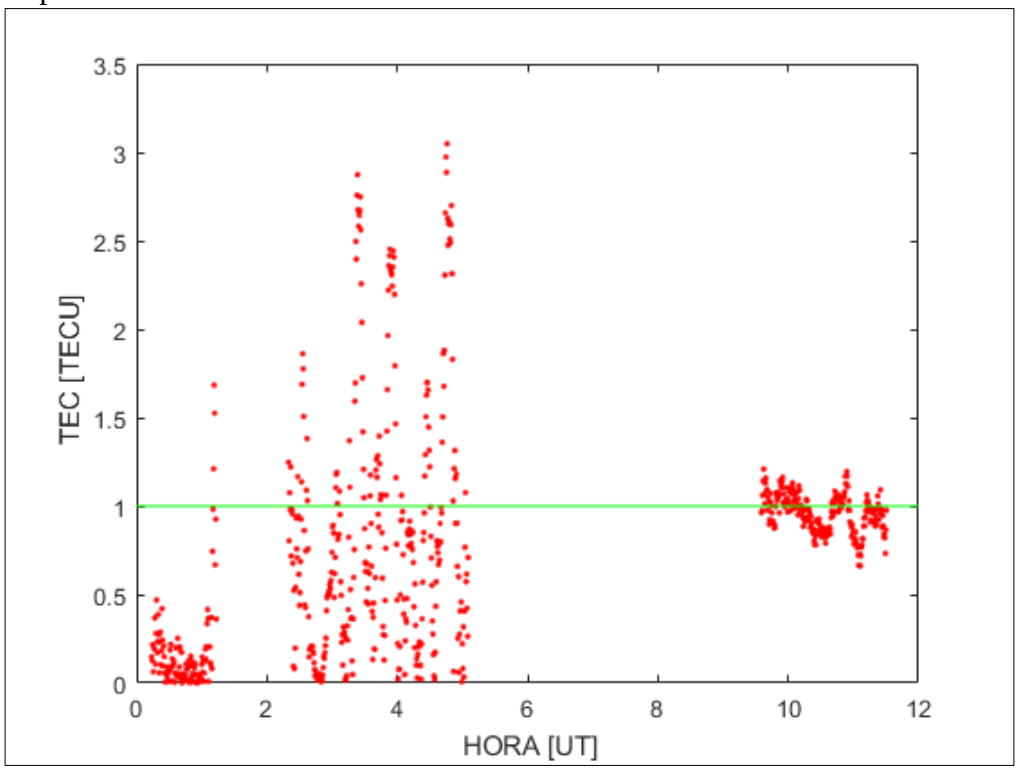
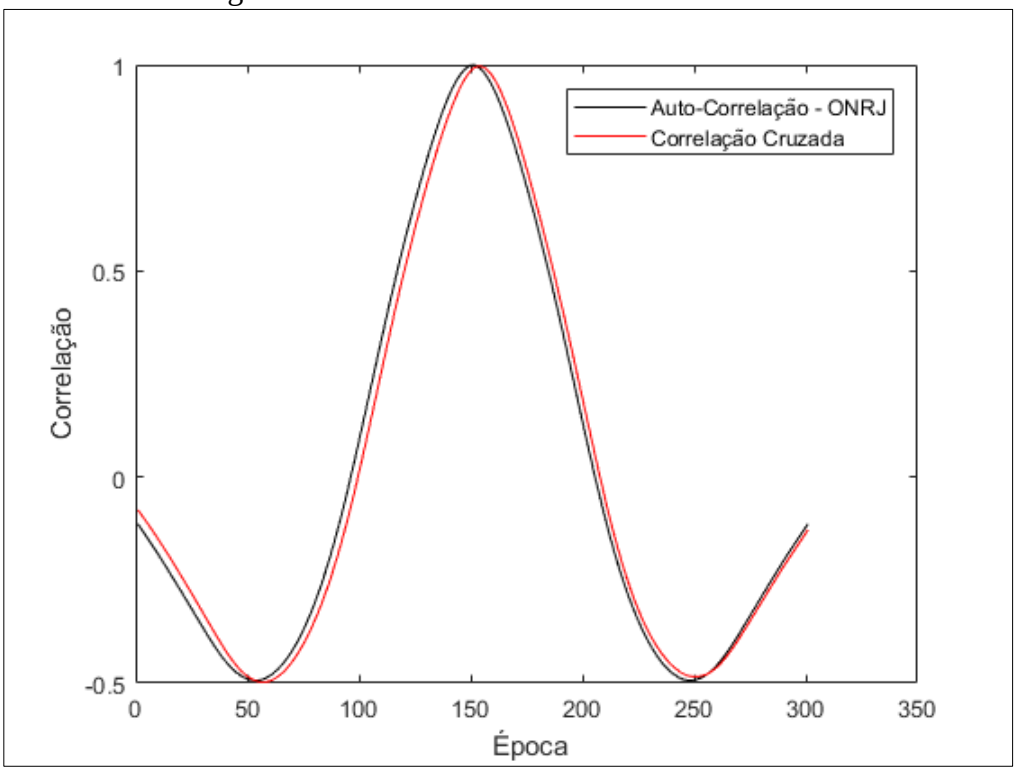


Figura 30 – Correlação Normalizada, para o PRN 03, das 02 h 30 min às 05 horas TU, com taxa de amostragem de 30 s.



A partir da Figura 30 nota-se que a máxima auto-correlação ocorreu na época 151 e a máxima correlação-cruzada ocorreu na época 154 sendo o tempo de viagem da bolha ionosférica de 90 segundos. Lembrando que a distância horizontal entre as estações de referência é de 9000 m a velocidade de deriva da bolha foi de aproximadamente 100 m/s.

É possível verificar uma diferença notória entre as velocidades encontradas para os diferentes satélites. Para o PRN 32 encontrou-se uma velocidade de aproximadamente 150 m/s, já para o PRN 03 a velocidade foi de aproximadamente 100 m/s. Esse fato provavelmente está associado a taxa de amostragem dos dados, uma vez que a leitura do arquivo RINEX para a estimativa do TEC foi feita a cada 30 segundos.

Desta maneira, com o objetivo de fazer uma análise mais precisa das velocidades, empregou-se a taxa de amostragem do arquivo RINEX de 15 segundos. Assim, determinou-se novamente a auto-correlação e a correlação cruzada entre as estações de referência (RIOD e ONRJ) para o PRN32 (Figura 31) e para o PRN03 (Figura 32).

Figura 31 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, das 03 às 04 horas TU, com taxa de amostragem de 15 segundos.

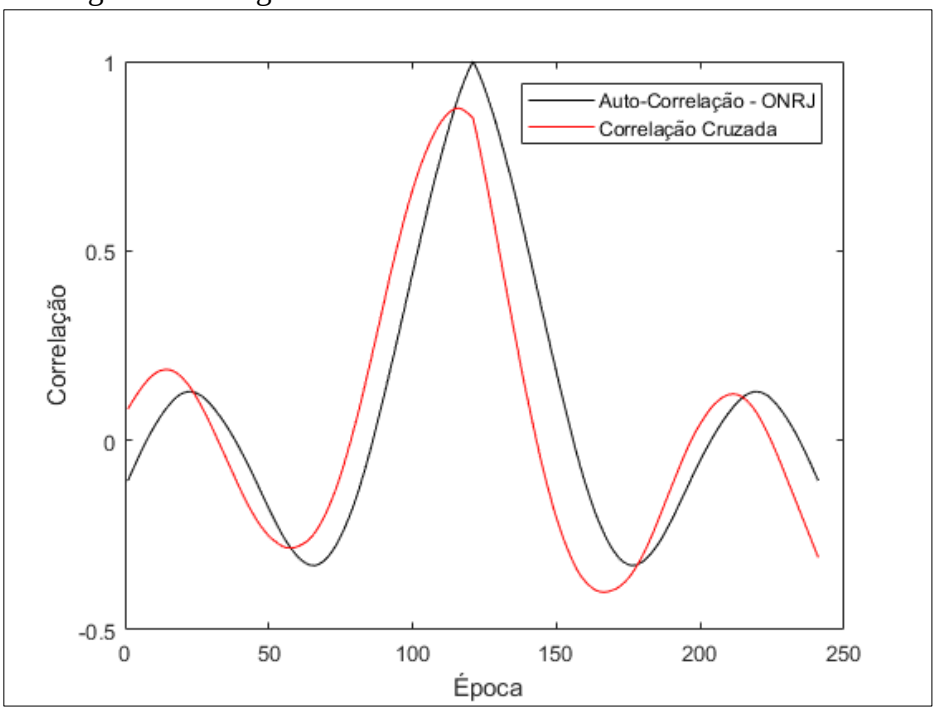
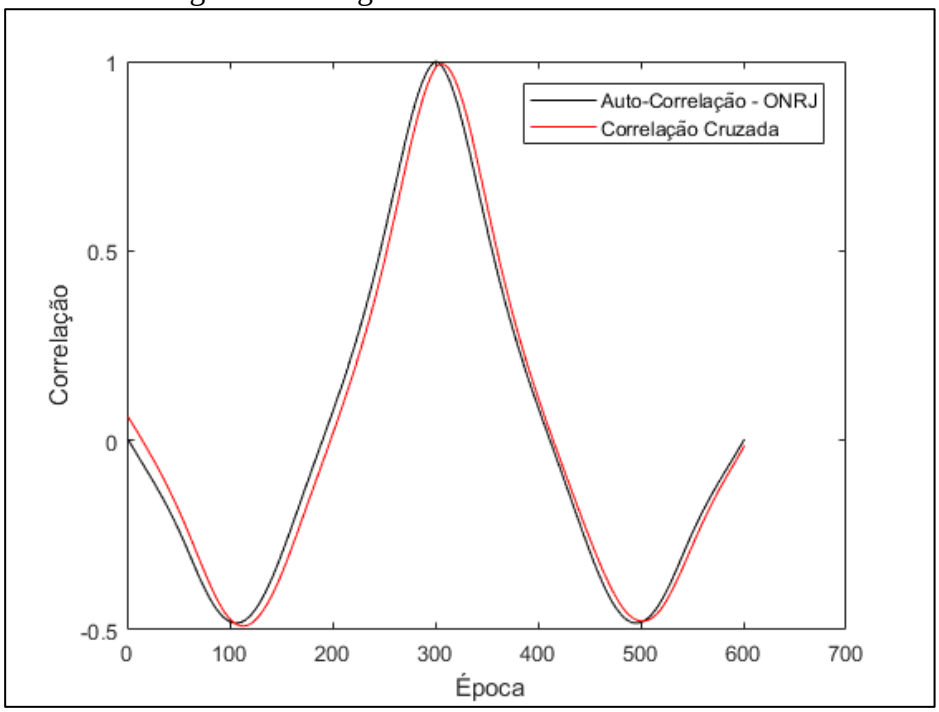


Figura 32 – Correlação Normalizada, para o PRN 03, das 02 h 30 min às 05 horas TU, com taxa de amostragem de 15 segundos.



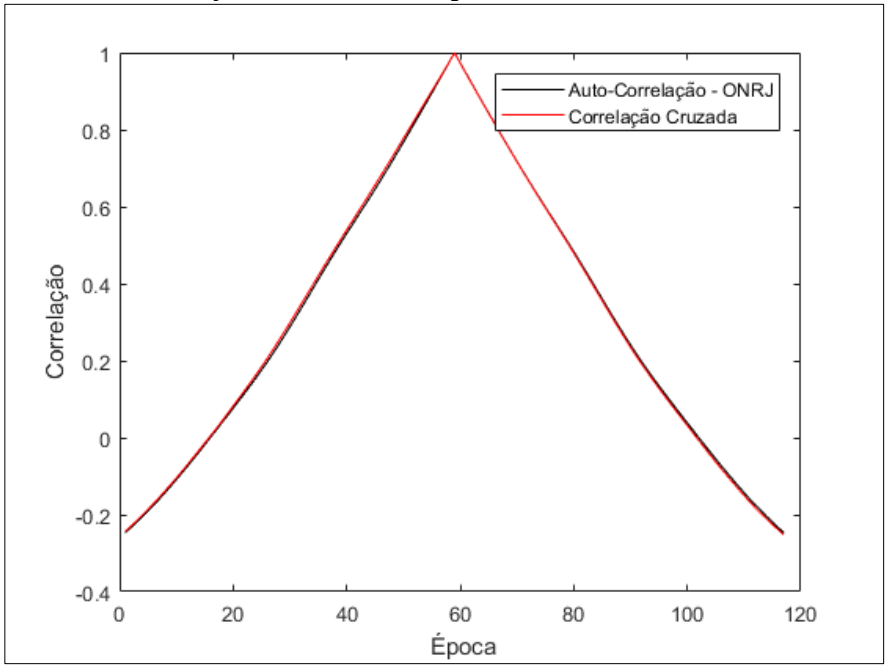
Para o PRN 32 (Figura31) nota-se que a máxima auto-correlação ocorreu na época 116 e a máxima correlação-cruzada ocorreu na época 121 sendo o tempo de deslocamento da bolha

ionosférica de 75 segundos. Assim, a velocidade de deriva da bolha foi de aproximadamente 120 m/s. De maneira análoga, para o PRN 03 (Figura 32) a máxima auto-correlação ocorreu na época 306 e a máxima correlação-cruzada ocorreu na época 301 sendo o tempo de deslocamento da bolha ionosférica de 75 segundos. Assim, a velocidade de deriva da bolha foi de aproximadamente 120 m/s. Diante da velocidades encontradas, com a taxa de amostragem dos dados de 15 segundos, nota-se que os resultados se mostraram mais coerentes quando comparado com amostragem dos dados de 30 segundos.

6.2 Validação do Método

Inicialmente, foi feita uma primeira validação do método proposto, para verificar se o algoritmo foi implementado de forma correta. Uma maneira de realizar essa validação é por meio da estimativa do tempo de deslocamento da bolha para um período em que não há ocorrência da mesma. Desta maneira, a máxima auto-correlação e a máxima correlação cruzada aconteceriam na mesma época, ou seja, o tempo de deslocamento da bolha ionosférica seria igual a zero. Para isto, as informações utilizadas foram a do primeiro experimento, onde foi estimado os valores de TEC para o PRN 32 (Figura 25). Entretanto selecionou-se um período do dia em que não houve ocorrência de bolha ionosférica, foi escolhido o intervalo entre as 06 e 07 horas UT, onde a diferença de TEC entre as estações não foi superior a 0,5 TECU.

Figura 33 – Correlação Normalizada, para o PRN 32, às 06 e 07 horas TU.



Por meio da Figura 33 é possivel notar que o resultado apresentou-se coerente com o esperado, ou seja, a máxima auto-correlação ocorreu na mesma época em ocorreu a máxima

correlação cruzada, não apresentando velocidade de deslocamento, garatindo assim que a metodologia proposta para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas está de acordo com o esperado.

Uma outra alternativa de realizar a validação da metodologia desenvolvida é comparar as velocidades obtidas com método empregado com as velocidades obtidas com imageadores "*all-sky",* que se tornam uma ferramenta importante para a certificação dos resultados a partir das informações GNSS, já que se apresentam como uma técnica consolidada para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas.

O *software* UASDA foi empregado para obtenção das velocidades de deriva das bolhas ionosféricas. Neste experimento foi utilizado o imageador localizado em São José dos Campos/SP, Campus da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP (23,21° S 45,86° O). Logo, foram selecionado duas estações de referências que também estivessem próximas ao imageador. Assim, foram selecionadas as estações SJSP (23,207132° S 45,861738° O) e SJCU (23,210589° S 45,956592° O) pertencentes à RBMC e à rede CIGALA/CALIBRA, respectivamente (Figura 34) de modo que a distância entre as estações é de aproximadamente 9700 m.

Figura 34 – Localização das estações de referência SJCU (23,210589° S 45,956592° O) e SJSP (23,207132° S 45,861738° O) e do Imageador *all*-sky (23,21° S 45,86° O).



Nos experimentos foram selecionadas as imagens coletadas em 2014, ano este caracterizado por ser o ápice do ciclo solar 24. Devido ao grande impacto dos fatores metereológicos e físicos nos imageadores, somente as imagens para os dias 24 de outubro

(Figura 35), 16 e 17 de dezembro (Figura 36) e 18 de dezembro (Figura 37) puderam ser utilizadas, pois somente nestas imagens foram possíveis identificar a ocorrência das bolhas ionosféricas.

Figura 35 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC (23.21° S 45.86° O), dia 24/10/14.

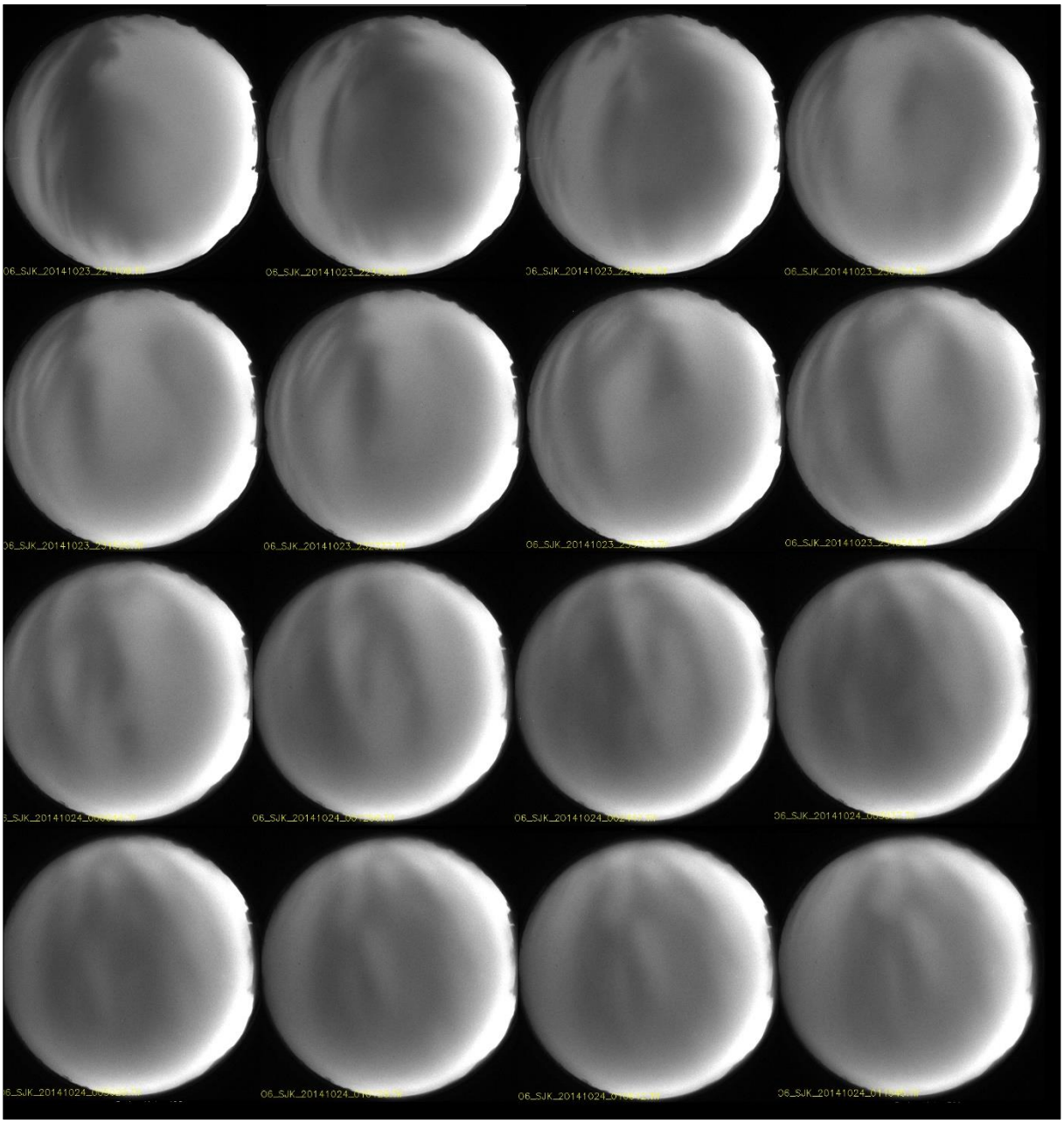


Figura 36 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC(23.21° S 45.86° O), dia 16 e 17/10/2014.

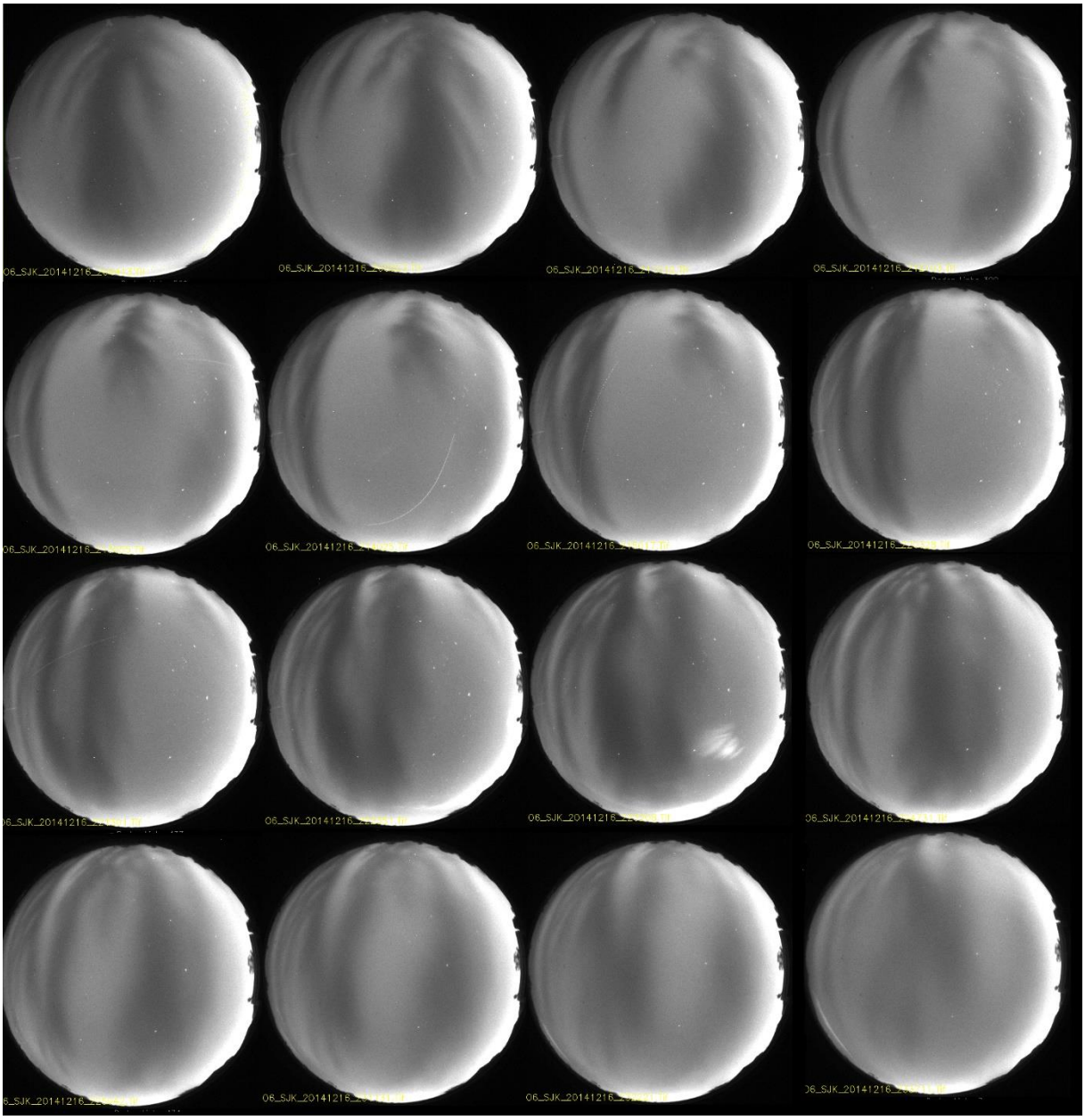
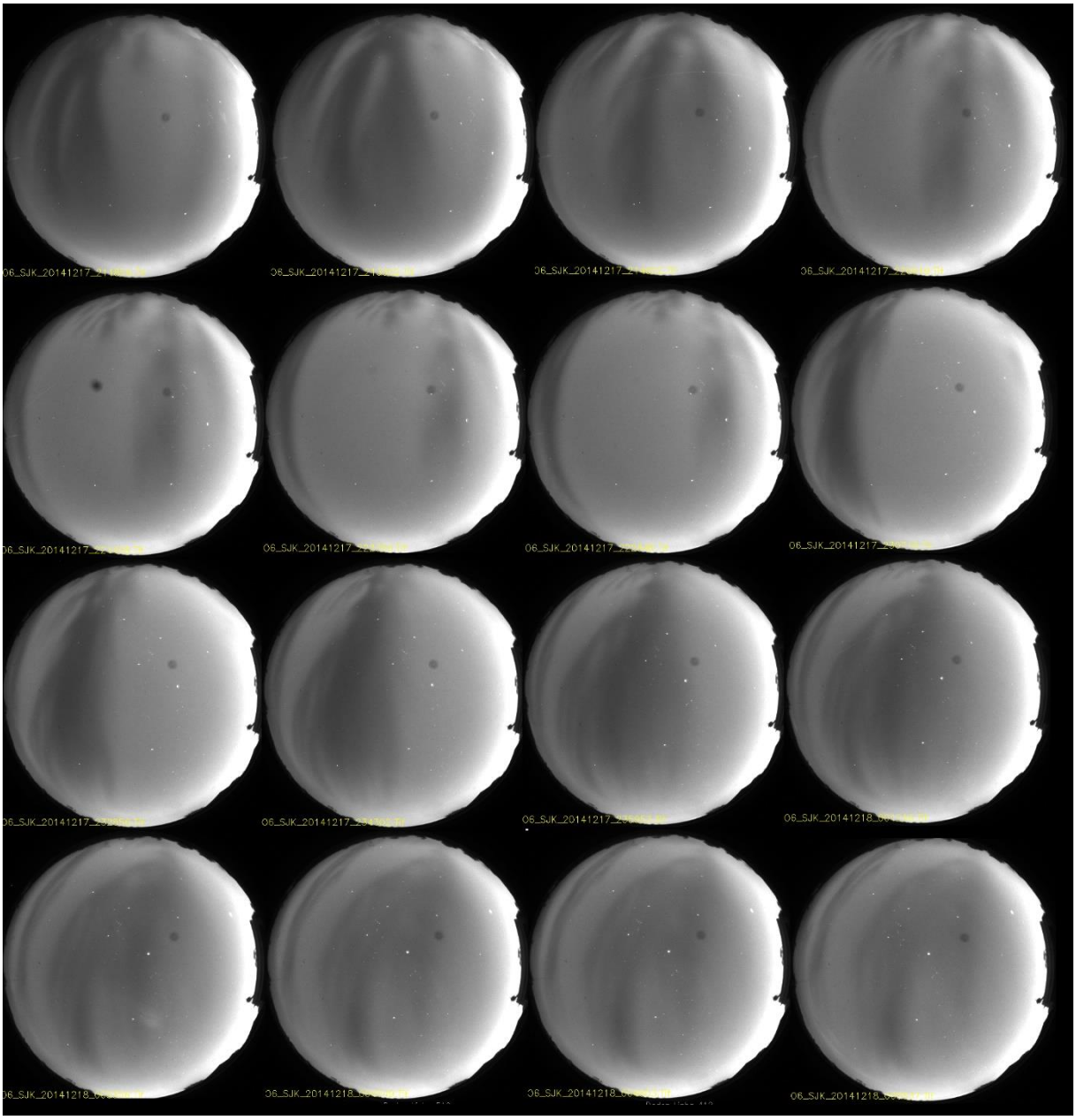


Figura 37 – Imagens em OI 630,0 nm obtidas com imageador de SJC (23.21° S 45.86° O), dia 18/12/2014.



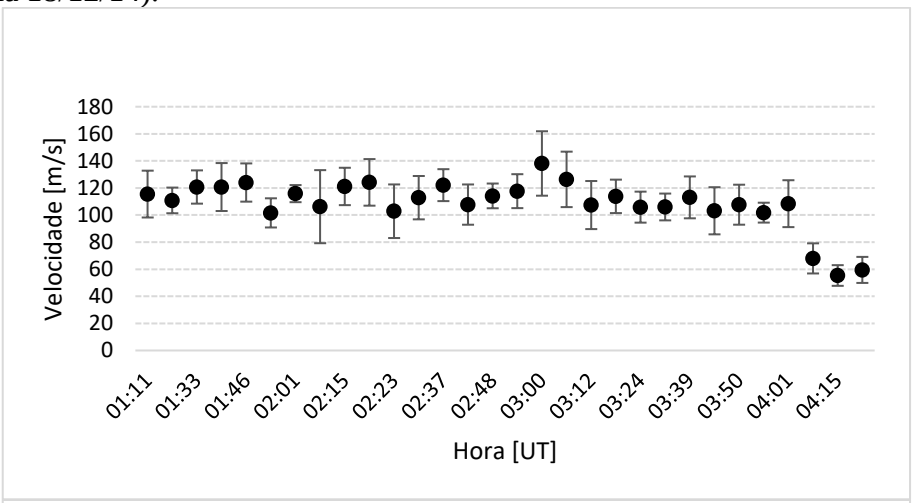
Para calcular os valores das velocidades de deriva das bolhas ionosféricas nas diferentes noites selecionadas em função do horário, teve-se que definir uma altitude onde a emissão e as bolhas de plasma ocorrem. A escolha desta altitude de emissão é importante, pois ela define o tamanho e a posição das irregularidades. Deste modo, a emissão escolhida foi a de OI 630,00 nm com o pico de emissão à uma altitude de 300 km. Antes de efetivamente calcular as velocidades de deriva das bolhas se faz necessário realizar a linearização das imagens, todo esse processo foi descrito na Seção 4.1.1.

Após a obtenção dos parâmetros de linearização de uma imagem, para imageador de São José dos Campos, é possível utilizar os parâmetros obtidos para qualquer imagem coletada pelo mesmo, desde que o imageador não seja movimentado. A partir disso, foi possível obter as

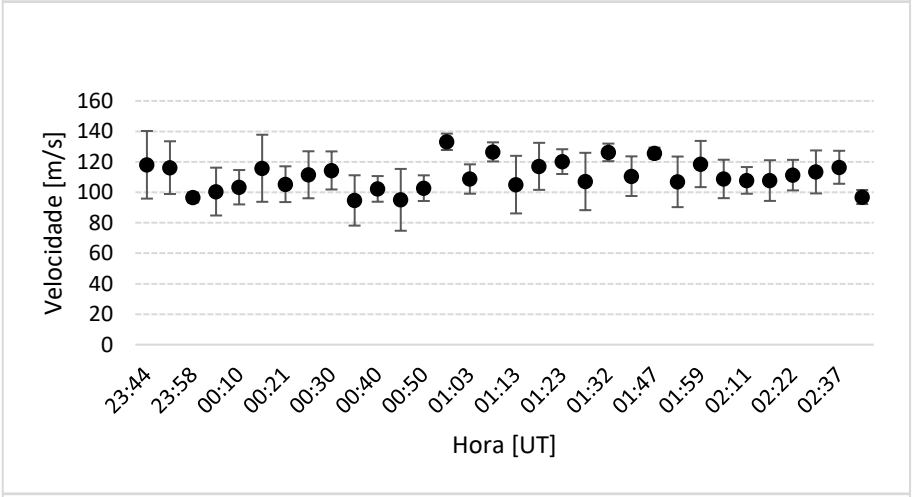
velocidades de deriva das bolhas ionosféricas utilizando o UASDA. Assim, a Figura 38 apresenta os gráficos gerados com as velocidades de deriva zonal das bolhas ionosféricas obtidas e seus desvios-padrão, para os dias 24 de outubro, 16 e 17, e 18 de dezembro de 2014, respectivamente.

Figura 38 – Velocidade de deriva das bolhas zonal (positivo para leste) e seus respectivos desvios-padrão para imageador de SJC (A: Dia 24/10/14; B: Dia 16 e 17/12/14; C: Dia 18/12/14).

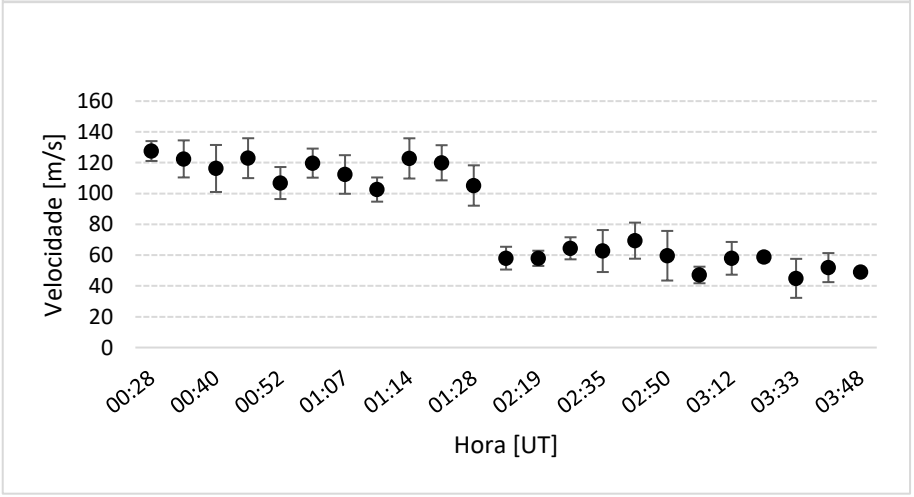
A)



B)



C)



Para os dias selecionados, com a presença de bolhas ionosféricas pode-se criar uma série de dados com as velocidades bem como com seus respectivos desvios-padrão. Ainda, verifica-se que em todos os dias, as ocorrências das bolhas ionosféricas iniciam após o por do Sol, por volta das 23 horas UT, e chega a um máximo por volta da 01 hora UT, e após esse horário as velocidades decrescem para valores inferiores ao registrado no início da noite.

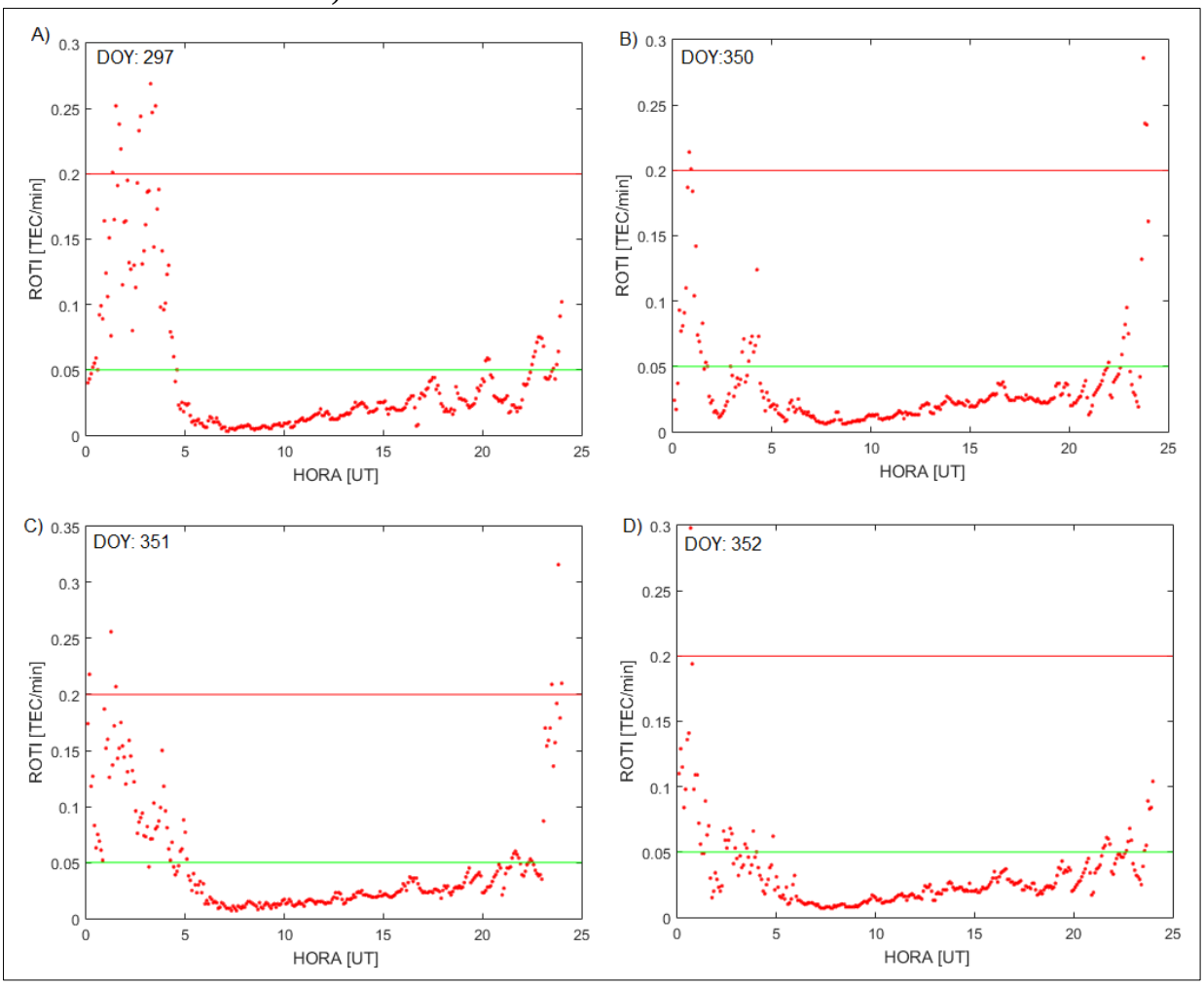
Para o dia 24 de outubro nota-se que as bolhas de plasma ionosférica apresentaram uma velocidade média ponderada de 103,2 ± 2,5 m/s, e a velocidade foi gradualmente decaindo com o decorrer do horário. Próximo às 04 horas UT a velocidade reduziu de forma considerável para aproximadamente 50 m/s. A velocidade máxima de deriva zonal das bolhas foi de aproximadamente 138 m/s ocorreu em torno das 03 horas UT.

Para o dia 16 e 17 de dezembro, as bolhas também apresentaram uma velocidade média de 112,9 ± 2,4 m/s, e próximo as 02:30 horas UT houve um decaimento da velocidade para aproximadamente 90 m/s. A velocidade máxima de deriva das bolhas foi de 133 m/s e ocorreu em torno das 01 hora UT.

Para o dia 18 de dezembro, próximo às 01:28 UT houve um *gap* nos dados, devido a presença de nuvens e impossibilitando a estimativa da velocidade das bolhas, sendo assim considerado duas bolhas distintas. Para este dia, a primeira ocorrência da bolha ionosférica apresentou uma velocidade média de 116,8, ± 2,7 m/s e a segunda, após o *gap* dos dados, apresentou foi de 60,5 ± 1,5 m/s conforme o esperado. A velocidade máxima de deriva das bolhas foi de 127 m/s ocorrido próximo as 01 hora UT.

Estimado as velocidades a partir dos imageadores, a próxima etapa consistiu em estimar as velocidades a partir da metodologia proposta no projeto de pesquisa com o objetivo de analisar se houve correspondência entre as mesmas, e validar o método empregado. Para isto, foram estimados os valores de TEC para as estações SJCU e SJSP para os mesmos dias em que houve a presença das bolhas ionosféricas detectadas pelos imageadores *all-sky*. O índice de irregularidade ROTI também foi estimado para os dias em que houve a presença das bolhas ionosféricas, com o objetivo de confirmar que as irregularidades presentes foram capazes de gerar as bolhas (Figuras 35 a 37). O índice de irregularidade ionosférica a para estação de referência SJSP pode ser visto na Figura 39.

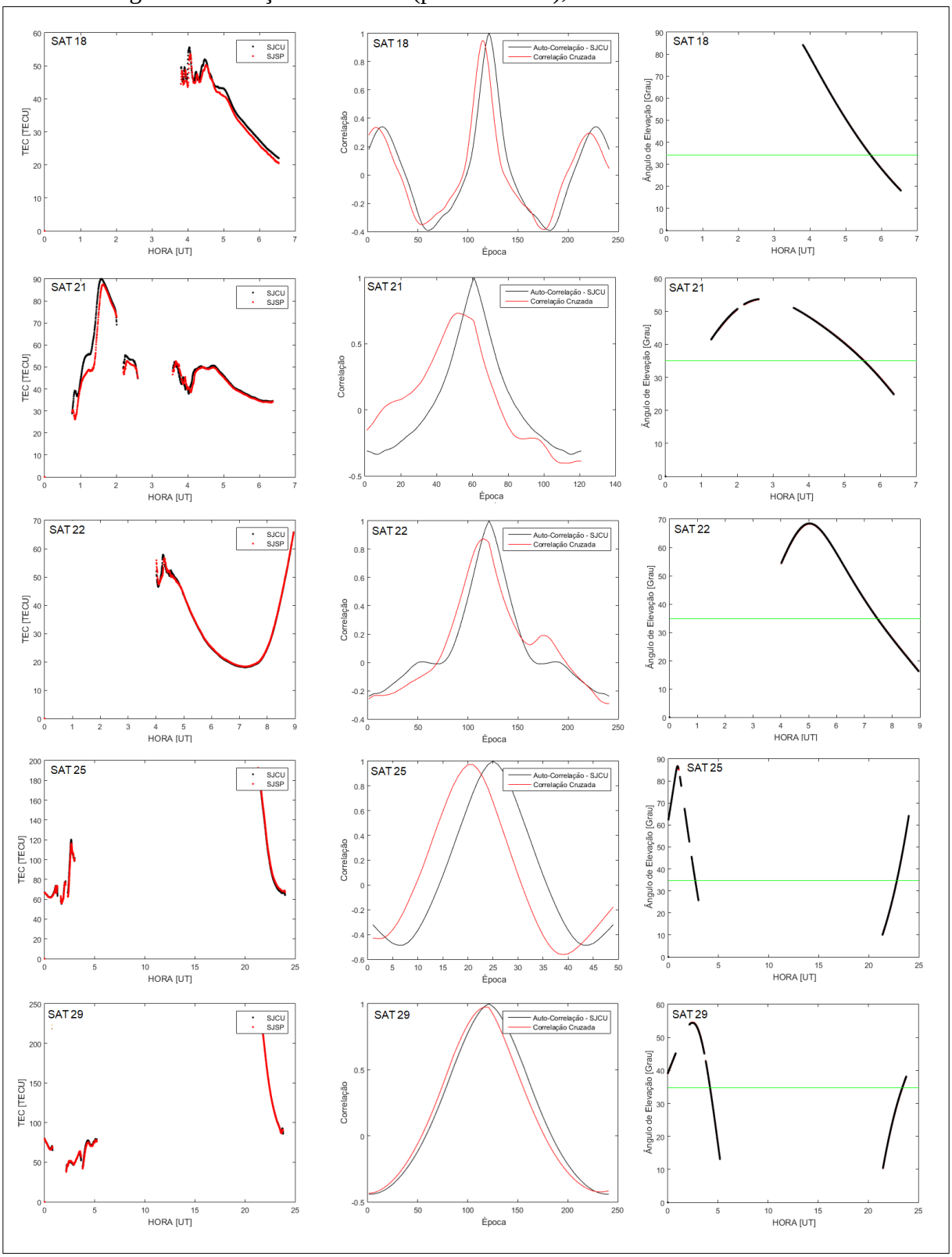
Figura 39 – Índice de Irregularidade ROTI (A: Dia 24/10/14; B: Dia 16/12/14; C: Dia 17/12/14; D: Dia 18/12/14)



A partir da Figura 39 nota-se que para todos os dias em que houve a presença de bolhas ionosféricas, pois as irregularidades para as primeiras horas do dia (00-05h TU) e também para o fim do dia (23-24h TU) foram classificadas como moderadas à forte. Assim, os resultados confirmaram que as irregularidades ionosféricas presente nos dias em questão foram capazes de gerar as bolhas.

Para o dia 24 de outubro, somente para os satélites com PRN 18, 21, 22, 25 e 29 foi possível detectar a presença das bolhas ionosféricas a partir da estimativa dos valores de TEC. Identificada as bolhas ionosféricas, cálcula-se a auto-correlação e correlação cruzada entre os valores de TEC para determinar o tempo de viagem da bolha e, consequentemente, estimar a velocidade de deslocamentoda mesma. A correlação normalizada para os PRNs, bem como as bolhas ionoféricas, e o ângulo de elevação do satélite para as estações podem ser vistas na Figura 40.

Figura 40 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 24/10/2014.



A Tabela 2 apresenta as velocidades de deriva das bolhas estimadas dos casos apresentados na Figura 40. Na tabela são listadas de forma detalhada o PRN do satélite, o

horário de início e fim da ocorrência da bolha ionosférica, além do tempo de deslocamento, e a velocidade de deriva obtida para cada satélite.

Tabela 2 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 24/10/2014.

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
18	03:48:00	04:48:00	> 60°	90	108,00
21	03:42:00	04:12:00	> 40°	135	71,85
22	04:00:00	05:00:00	> 50°	90	108,00
25	01:00:00	01:12:00	> 60°	60	162,00
29	03:30:00	04:30:00	< 35°	45	216,00

É possível notar que para o dia 24 de outubro as bolhas ionosféricas, a partir da Tabela 2, apresentaram uma velocidade média de 133,2 ± 56,4 m/s. Para os satélites PRN 18 e 22 as velocidades estimadas foram iguais em 108 m/s, e enquanto que para o satélite PRN 21 a velocidade obtida foi de 71,85 m/s, ou seja, inferior as demais. O satélite PRN 29 foi o único que apresentou uma velocidade acima do esperado de cerca 216 m/s. Com relação ao ângulo de elevação dos satélites, nota-se que a maioria deles apresentaram um ângulo superior aos 35°, com execção do satélite PRN 29. Adotou-se um limiar de 35° para diferenciar o ângulo de elevação alto ou baixo. Como a distância percorrida pelo sinal tem que ser similar para as duas estações, para que isso ocorra o ângulo de elevação do satélite tem que estar próximo ao zênite. Desta forma, pode-se justificar a exclusão deste satélite PRN 29, em função do seu ângulo de elevação. Desta forma, essa informação foi tratada como um *outlier*. Assim a velocidade média de deriva das bolhas ionosféricas, para este dia, foi de 112,5 ± 37,0 m/s, apresentando uma concordância com a velocidade obtida com os imageadores que foi de 103,2 ± 2,5 m/s.

O mesmo experimento foi realizado novamente para os dias 17 e 18 de dezembro, e os resultados são apresentados nas Figuras 41 e 42, respectivamente

Figura 41 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 17/12/2014.

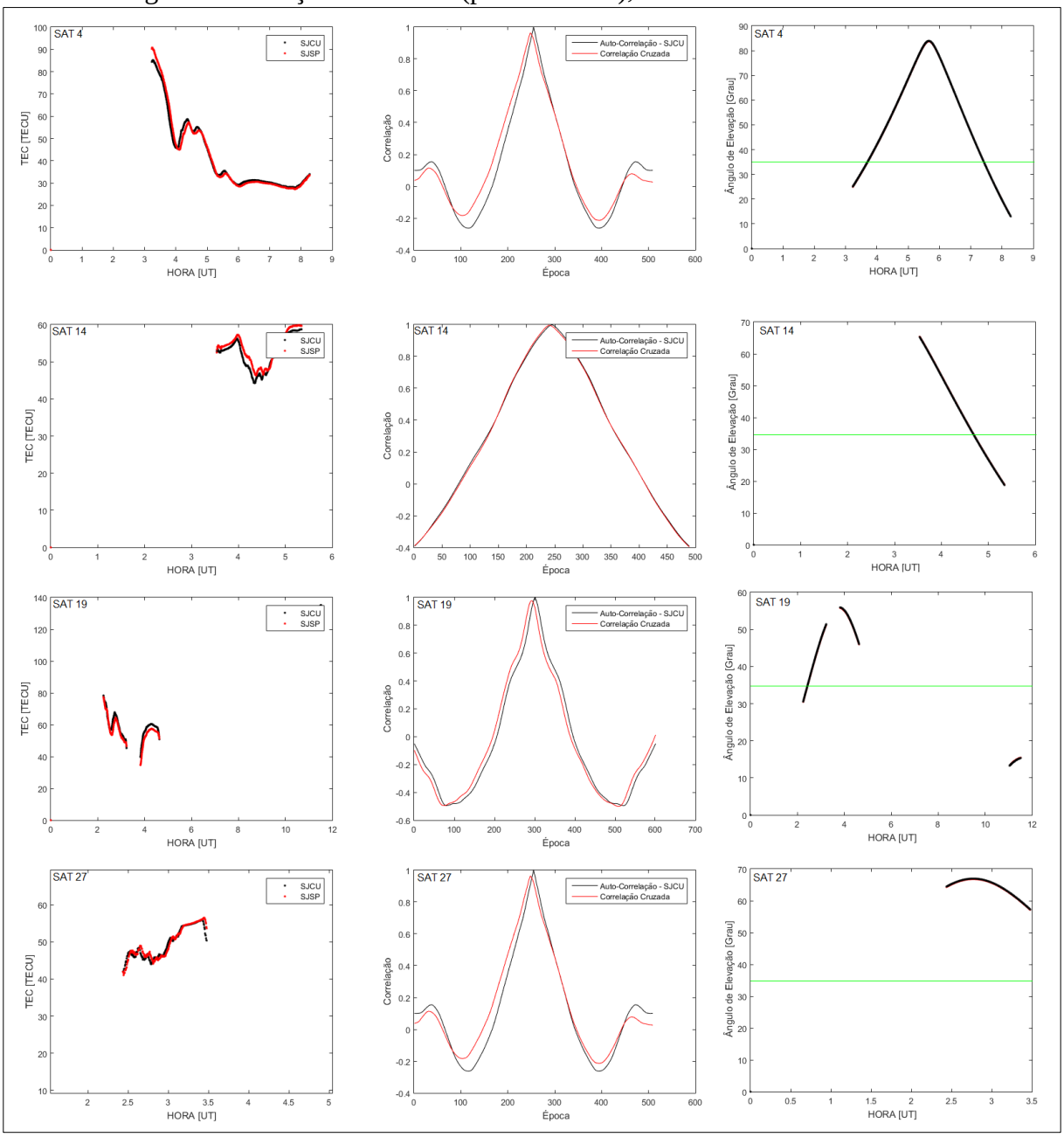
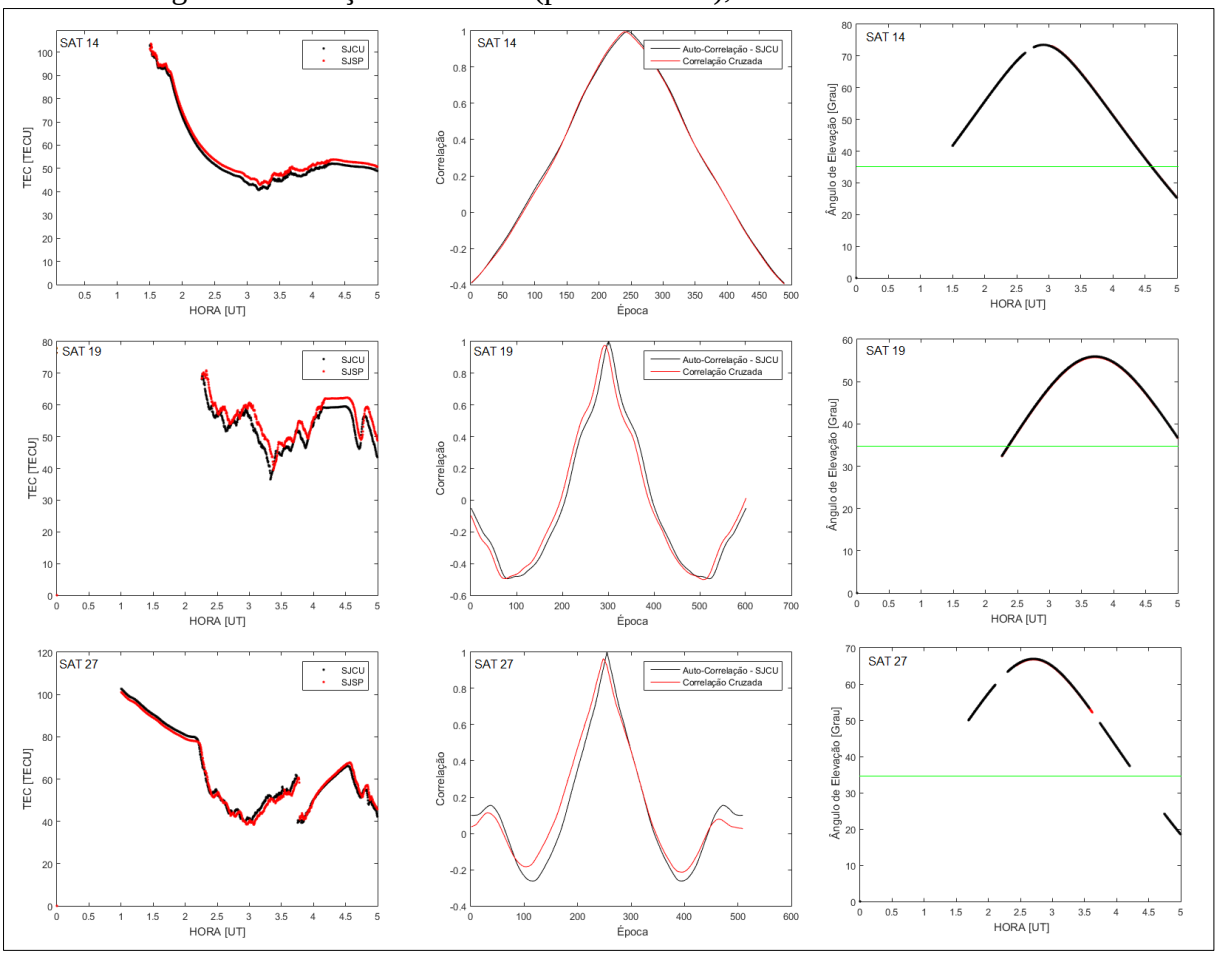


Figura 42 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central) e Ângulo de elevação do satélite (painel direito), dia 18/12/2014.



As Tabelas 3 e 4 apresentam as velocidades de deriva das bolhas apresentadas na Figura 41 e na Figura 42, respectivamente.

Tabela 3 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 17/10/2014

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
4	03:30	05:00	> 35°	105	92,57
14	03:30	05:00	< 35°	60	162,00
19	02:30	04:30	> 40°	60	162,00
27	02:30	03:00	> 60°	90	108,00

Tabela 4 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, dia 18/10/2014.

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
14	02:48:00	05:00:00	< 35°	75	129,60
19	02:30:00	05:00:00	> 40°	135	72,00
27	02:18:00	04:00:00	> 40°	105	92,57

Para o dia 17 de dezembro somente para os satélites com PRN 4, 14, 19, 27 foi possível detectar a presença das bolhas ionosféricas a partir da estimativa dos valores de TEC. Já para o dia 18 de dezembro o satélite PRN 4, não detectou a presença da bolha ionosférica.

Nota-se que para o dia 17 de dezembro, a velocidade média de deriva das bolhas ionosféricas foi de 131,1 ± 36,1 m/s. A velocidade estimada do PRN 14 apresentou um valor acima a do esperado 162 m/s para o horário próximo às 5 horas UT, onde normalmente as velocidades decrescem para valores inferiores ao registrado no início da noite. Porém, o ângulo de elevação do satélite PRN 14 apresentou um ângulo de elevação inferior ao limiar adotado. Desta forma, essa informação será tratada como um *outlier,* sendo justificado pelo ângulo de elevação. Assim, a média da velocidade passa a ser de 120,8 m/s ± 36,5 m/s.

Para o dia 18 de dezembro a velocidade média de deriva das bolhas foi de 98,1 ± 29,2 m/s. Assim, como todas as observações foram realizadas após às 2 horas UT pode ser observado o decaimento das velocidades. A velocidade do sátelite PRN 14, que foi de aproximadamente 129,6 m/s não está em concordância com o horário de ocorrência da bolha e considerando ainda o seu ângulos de elevação também será tratada como um *outlier*. Desta maneira, a velocidade média de deriva das bolhas ionosféricas passa a ser de 80,2 ± 14,5 m/s.

É importante ressaltar que para os dias em que houve a ocorrência das bolhas ionosféricas, pelo menos a velocidade de um satélite foi considerada como um *outlier,* sempre justificada em razão do ângulo de elevação do satélite. Ainda, nota-se que para esses casos, as depleções geradas nos valores de TEC foram sutis, dificultando a estimativa da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas. Além disso, também é importante destacar que o desvios-padrão estimados foram altos, mas isso ocorre em função dos diferentes horários de detecção das bolhas pelos sinais GNSS em funão do seu ângulo de elevação e direção.

Diante dos resultados obtidos, pode ser observada uma boa concordância entre os métodos empregados, uma vez que as velocidades calculadas a partir das imagens de luminescência apresentaram similares com as obtidas a partir da metodologia proposta. Tem-se que para o dia 24 de outubro a velocidade média de deriva das bolhas obtida com os imageadores foi de 103,2 ± 2,5 m/s, enquanto que a mesma obtida com a metodologia empregada foi de 112,5 ± 37,0 m/s. Para o dia 17 de dezembro a velocidade obtida com os imageadores foi de aproximadamente 112,9 ± 2,4 m/s enquanto com a metodologia desenvolvida foi de 120,8 ± 36,5 m/s. Já para o dia 18, a velocidade da média ponderada, segunda ocorrência de bolha, a partir dos imageadores foi de 60,5 ± 1,5 m/s, e com dados GNSS foi de aproximadamente 80,2 ± 14,5 m/s. Assim, nota-se que as velocidades de deriva das bolhas ionosféricas para as metodologias utilizadas foram similares. Desta forma, pode-se

considerar que a metodologia proposta neste projeto de pesquisa é adequada para realizar a estimativa da velocidade das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS.

Além disso, é possível notar que as diferenças encontradas nos valores das velocidades obtidas entre ambas as técnicas foram pequenas. Um dos motivos que pode explicar esse fato é a altura da camada ionosférica empregada para a determinação das velocidades de deriva em ambos os métodos. Tanto as velocidades estimadas por meio da luminescência, como as estimadas pela metodologia prosposta calculam as velocidades para uma altura que representa a camada F2, onde ocorre o pico máximo de densidade de elétrons.

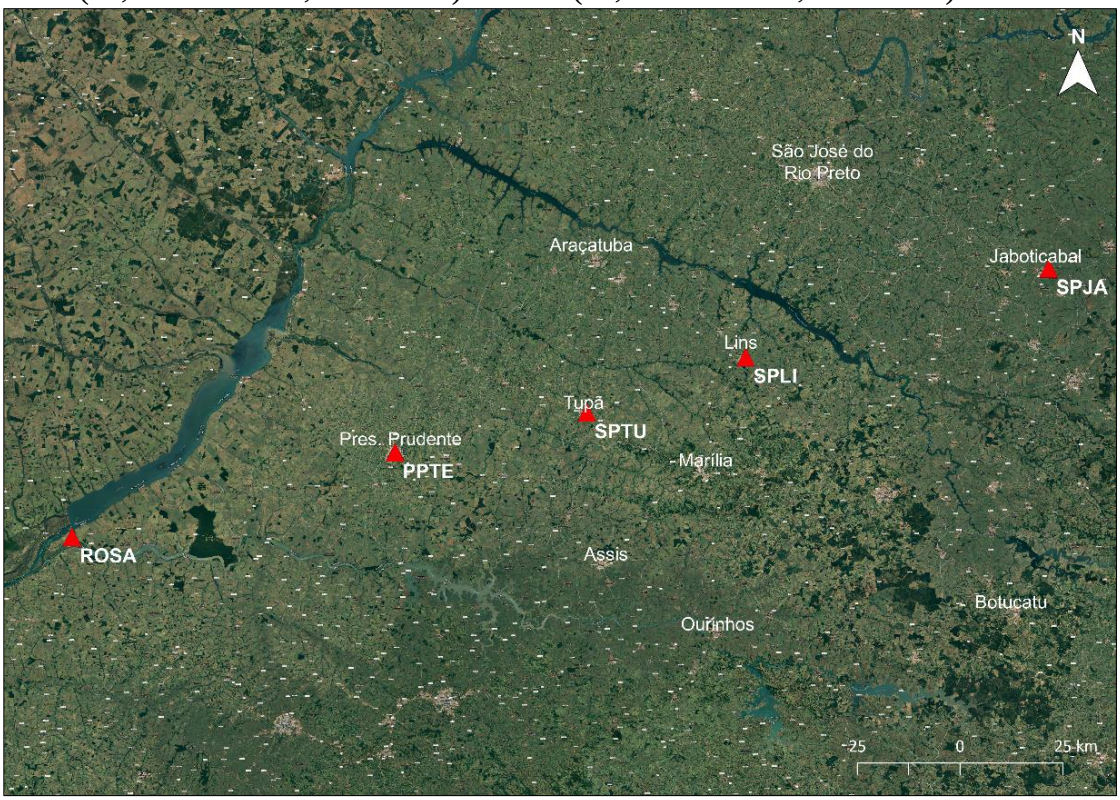
Confrontando os resultados desta pesquisa com a realizada por Coelho (2013), tem-se que o resultados de ambos os trabalhos foram compatíveis. Coelho (2013), analisou a velocidade de deriva zonal das irregularidades de plasma ionosférico de grande escala, por meio técnicas de ópticas de emissão OI 630,0 nm obtidas junto a imageadores instalados em São José dos Campos/ SP e Palmas/TO, em um período de extrema baixa solar. Tem-se que as velocidades obtidas para a estação de São José dos Campos comum aos dois trabalhos foram similares. Em ambos casos a velocidade de deriva apresenta uma velocidade considerada alta para o início da noite, e um comportamento decresencte no decorrer da mesma, congruentes com os apresentados na literatura. As velocidades, mínima, máxima e média, obtidas por Coelho (2013), para São José dos Campos são 57,0 ± 15,0 m/s, 116,0± 7,0 m/s e 84,0 ± 18,0 m/s , respectivamente. As velocidades mínima, máxima e média aproximadas obtidas nesta pesquisa são 72,0 m/s, 162,0 m/s, 105,0 m/s. Nota-se que as velocidades obtidas por Coelho (2013), foram inferiores a este projeto de pesquisa, mas isso se deve ao período considerado por Coelho ser o período de extrema baixa solar, enquanto nessa pesquisa foi considerado o período de máxima atividade solar.

6.3 Avaliação das velocidades a partir de diferentes distâncias entres as estações GNSS

No decorrer dos experimentos realizados teve-se a dificuldade de encontrar estações GNSS com distâncias inferiores a 30 km. Nesse sentido, decidiu-se analisar a limitação do método em relação as distâncias entre as estações de referência. Deste modo, selecionou-se 5 estações aproximadamente alinhadas, pertencentes à RBMC e com diferentes distâncias entre si para analisar as velocidades de deriva da bolha ionosférica. Assim, foram selecionadas as estações ROSA (22,523304° S 52,952088° O), PPTE (22,119905° S 51,408534° O), SPTU (21,929118° S 50,492370° O), SPLI (21,665204° S 49,733695° O) e SPJA (21,241073° S 48,286703° O) (Figura 43).

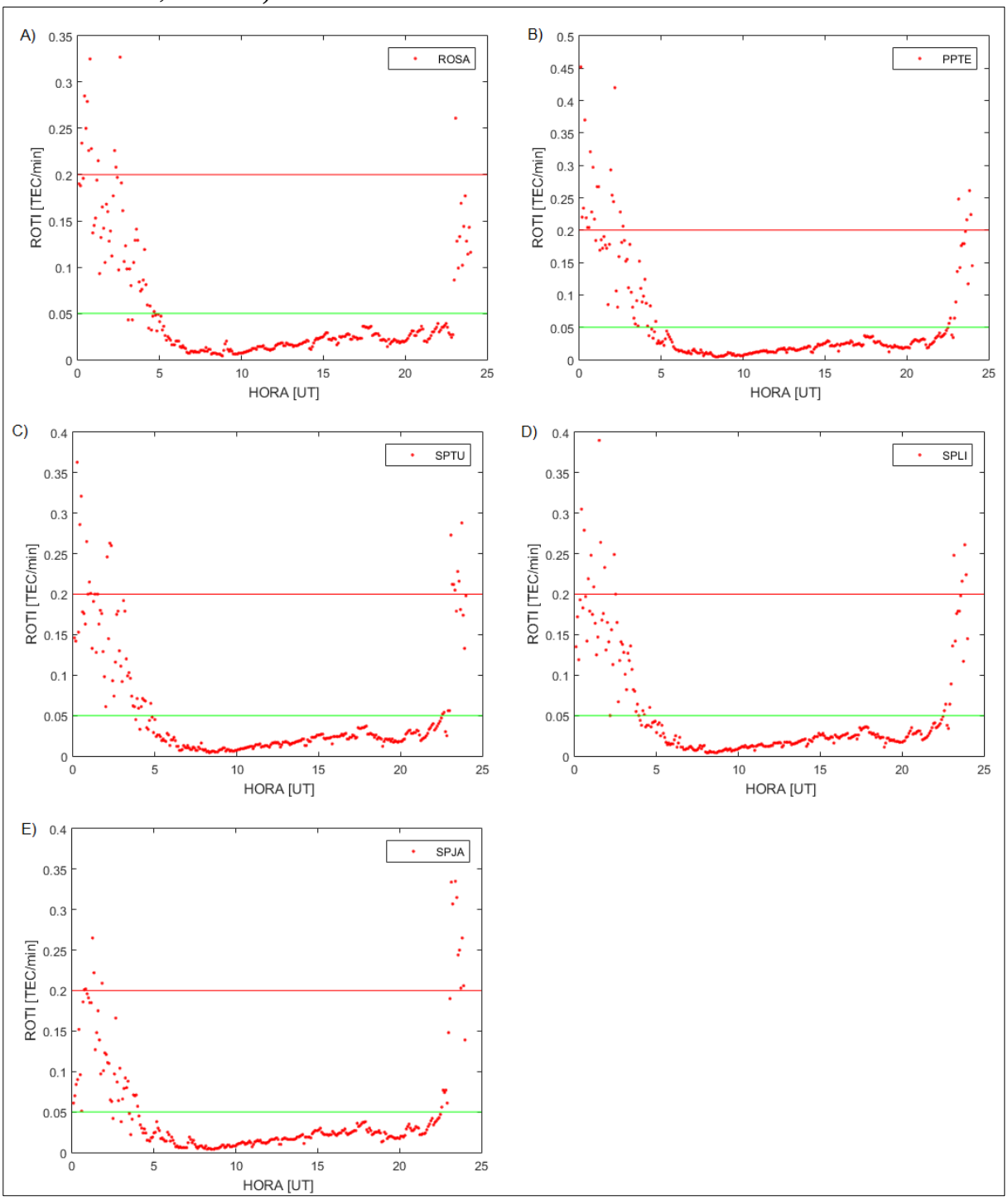
Para esta análise foram feitas diferentes configurações entre as estações para se obter diferentes distâncias. Deste modo, as combinações foram: PPTE e SPTU apresentando uma distância de aproximadamente 96,92 km, ROSA e PPTE com 165,00 km, PPTE e SPLI com 180,63 km, SPTU e SPJA com 240,87 km e por fim ROSA e SPTU com uma distância de 261,92 km.

Figura 43 – Localização das estações de referência ROSA (22,523304° S 52,952088° O), PPTE (22,119905° S 51,408534° O), SPTU (21,929118° S 50,492370° O), SPLI (21,665204° S 49,733695° O) e SPJA (21,241073° S 48,286703° O)



Os valores de TEC foram estimados para o dia 30 de novembro de 2014. Para cálculo do tempo de deslocamento da bolha ionosférica necessário verificar se houve a presença de irregularidades de elétrons suficiente para iniciar o processo de formação das bolhas de plasma. Para isto, realiza-se a estimativa do índice de irregularidade ROTI para todas as estações de referência (Figura 44).

Figura 44 – Índice de irregularidade ROTI, dia 30/11/2014. (A: ROSA; B:PPTE; C: SPTU; D: SPLI; E: SPJA)

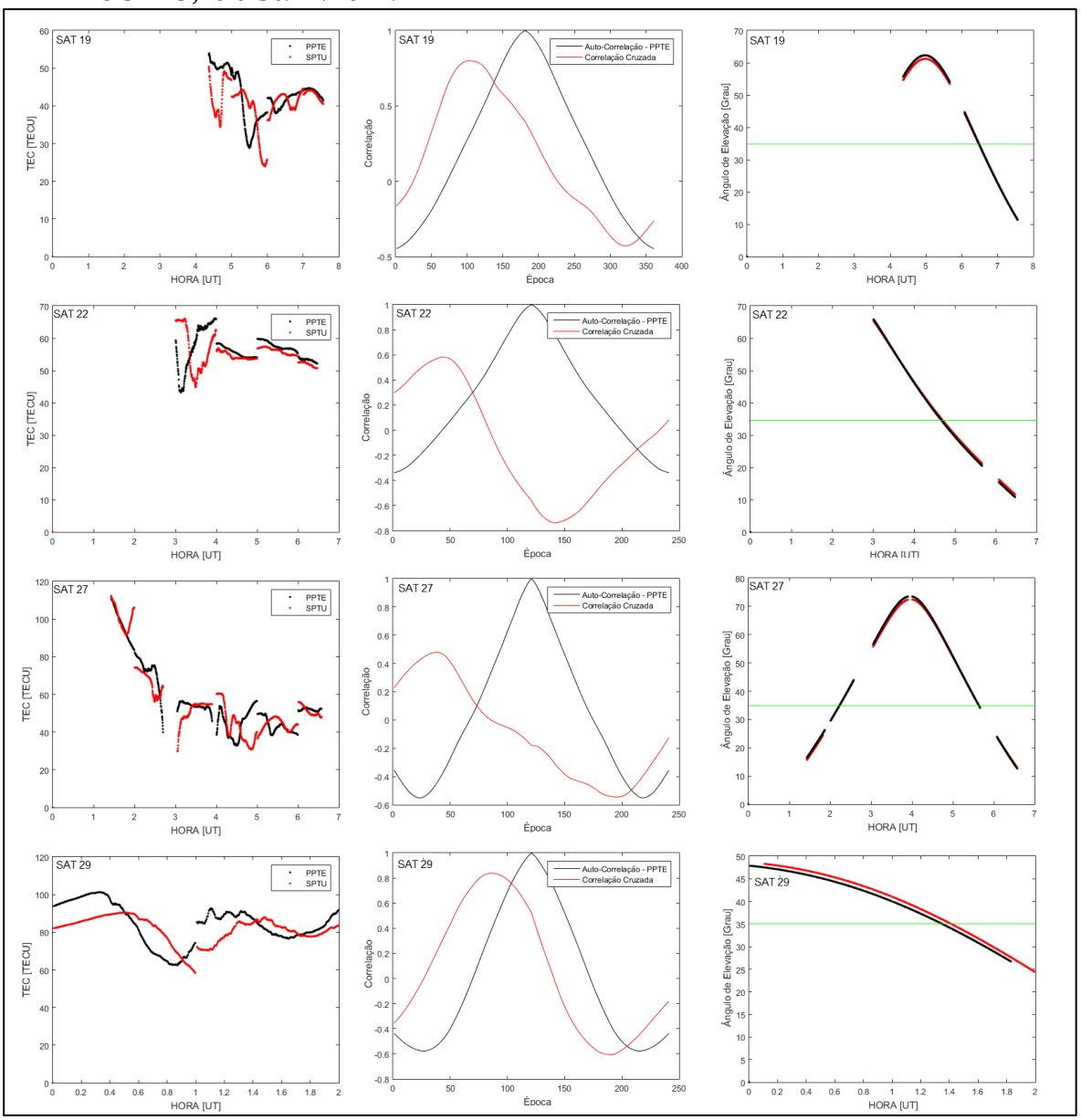


Nos gráficos apresentados na Figura 44, a linha verde indica o limite entre baixos e moderados níveis de irregularidades da ionosfera, ao passo que a linha vermelha indica o limite entre os níveis moderados e fortes. Assim, nota-se que tanto para o início do dia, entre às 00 horas e 05 horas UT, quanto para o fim do dia, entre às 23 e 24 horas UT, o índice ROTI pode ser classificado como forte, e para o restante do dia os valores permaneceram inferiores aos limiares classificatórios de baixos níveis de irregularidades da ionosfera. Fato esse ocorrido para

todas as estações de referência. Diante desses resultados, há grande evidência da presença de bolhas ionosféricas para esses períodos do dia.

Assim, para as estações de referência PPTE e SPTU foram estimados os valores de TEC para todos os satélites e somente aqueles obtidos com o PRN 19, 22, 27 e 29 apresentaram características de ocorrência das bolhas ionosféricas. A Figura 45 apresenta os valores de TEC para os satélites, a auto-correlação e a correlação cruzada, usados para estimar o tempo de deslocamento da bolha, e o ângulo de elevação dos satélites ao longo do período de rastreio.

Figura 45 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPTU, dia 30/11/2014.



A Tabela 5 apresenta as velocidades de deriva das bolhas apresentadas na Figura 45 de forma detalhada como: o PRN do satélite, o horário de início e fim da ocorrência da bolha ionosférica, o ângulo de elevação do satélite, além do tempo de deslocamento e a velocidade estimada para cada satélite.

Tabela 5 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPTU (96,92 km)

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:30	06:00	> 40°	1170	82,83
22	03:00	04:00	> 50°	1155	83,91
27	04:00	05:00	> 35°	1245	77,99
29	00:18	01:18	< 35°	525	184,60

Nota-se que para as estações de referência PPTE e SPTU as velocidades se encontram dentro do esperado, exceto para as velocidades de deriva estimadas a partir de observações com o satélite PRN 29, que apresentou um valor superior as demais de aproximadamente 185 m/s; porém coerente, uma vez que foi detectada no horário em que a velocidades tem a ser superiores. Esse alto valor, também pode ser explicado pelo ângulo de elevação do satélite, que ficou inferior aos 35° para o horário final da ocorrência da bolha. Para os demais satélites as velocidades estimadas não foram superiores a 90 m/s, isso também pode ser explicado pelo horário em que as bolhas foram detectadas (fim da noite), uma vez que a velocidade de deriva das irregularidades tendem a diminuir a medida que a noite avança. As velocidades são maiores para o início da noite devido à presença de irregularidades na base da camada ionosférica e diminuem conforme a bolha se eleva em altitude e se espalha ao longo das linhas do campo magnético. Nesse sentido, os resultados indicam que a metodologia proposta funciona de maneira adequada quando a distância entre as estações GNSS é de até aproximadamente 100 km.

Dando continuidade no experimento, para analisar a limitação do método em relação as distâncias entre as estações de referência, outros experimentos foram realizados.

As Figuras 46 a 49 apresentam os valores de TEC para os mesmos satélites que a da combinação anterior (PPTE e SPTU), com exceção do satélite 22 que não foi possível detectar a presença de bolhas ionosférica, a auto-correlação e correlação cruzada correlação, bem como o ângulo de elevação do satélite para as respectivas combinações das estações referência: ROSA e PPTE; PPTE e SPLI; SPTU e SPJA; e ROSA e SPTU.

Figura 46 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência ROSA e PPTE, dia 30/11/2014.

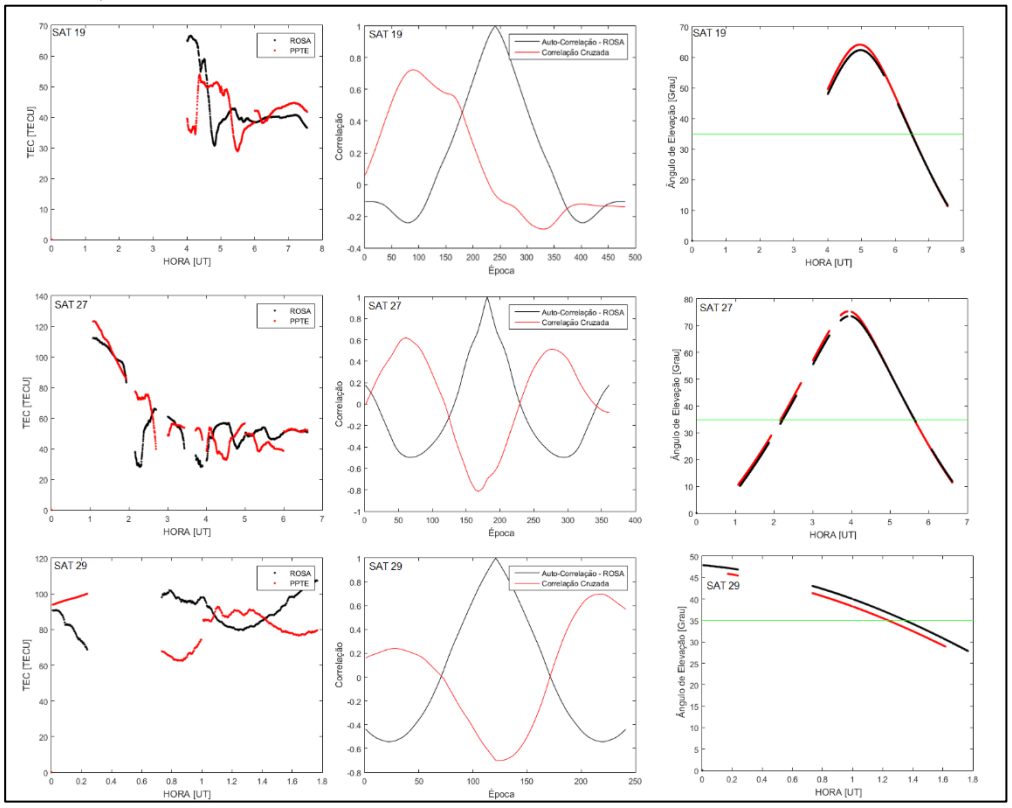


Figura 47 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPLI, dia 30/11/2014.

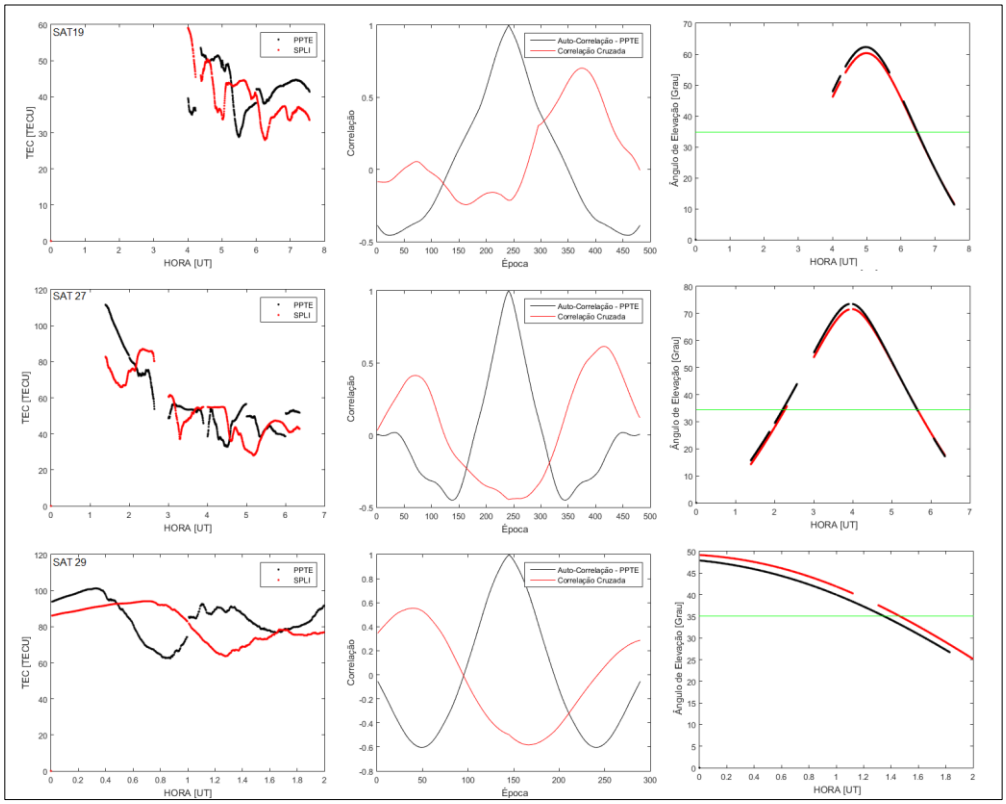


Figura 48 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência SPTU e SPJA, dia 30/11/2014.

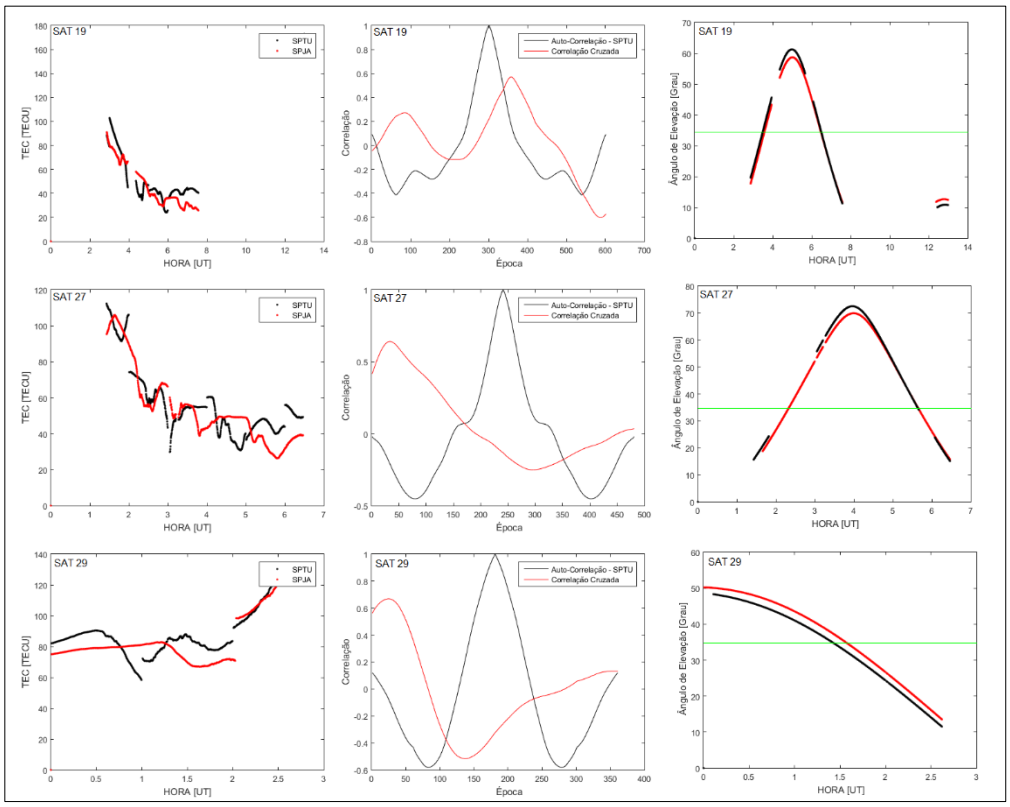
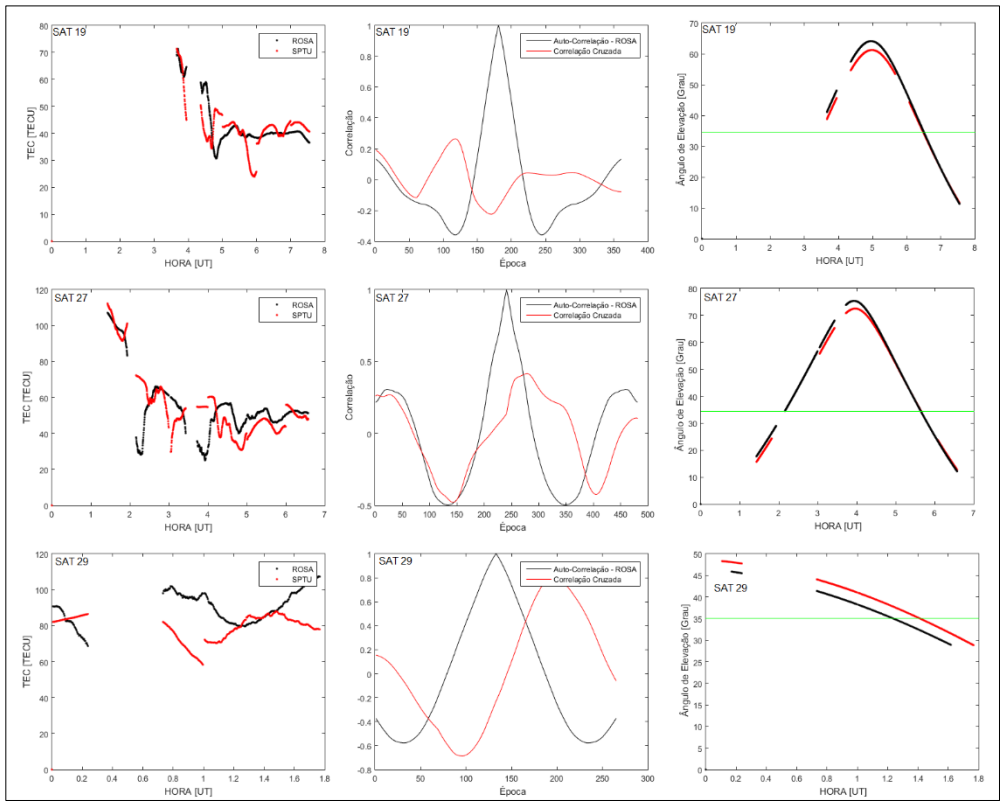


Figura 49 – Valores de TEC (painel esquerdo), Bolha Ionosférica detectada (painel central) e Correlação Normalizada (painel direito), para es estações de referência ROSA e SPTU, 30/11/2014.



As Tabelas 6 a 9 apresentam as velocidades de deriva das bolhas apresentadas nas respectivas Figuras de 46 a 49, o PRN do satélite, o horário de início e fim da ocorrência da bolha ionosférica, o ângulo de elevação do satélite, além do tempo de deslocamento das bolhas, e a velocidade estimada para cada satélite.

Tabela 6 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e PPTE (165,00 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	06:00	> 40°	2280	72,36
27	04:00	05:30	> 60°	1800	91,66
29	00:48	01:48	< 35°	1455	113,40

Tabela 7 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, estações de referência PPTE e SPLI (180,63 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	06:00	> 40°	2010	89,86
27	04:00	06:00	> 60°	2610	69,21
29	00:24	01:36	< 35°	1575	114,69

Tabela 8 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência SPTU e SPJA (240,87 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	07:00	> 40°	855	281,71
27	04:00	06:00	> 35°	3105	77,57
29	00:30	02:00	< 35°	2340	102,93

Tabela 9 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e SPTU (261,92 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:30	06:00	> 50°	960	272,83
27	04:00	06:00	> 35°	570	459,50
29	00:42	01:48	< 35°	945	277,16

A partir das Tabelas 6 e 7 verifica-se que para as estações de referência ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI os resultados das velocidades apresentaram valores semelhantes, onde

aquelas estimadas a partir dos satélites PRN 19 e 27 apresentaram valores inferiores a 100 m/s, isso pode ser justificado pelo horário de ocorrência das bolhas ionosféricas, uma vez que as velocidades das mesmas decrescem a medida que a noite avança. Para o satélite com o PRN 29, em ambas as configurações das estações de referência, as velocidades estimadas apresentaram valores superiores aos 100 m/s, justificado também pelo horário de ocorrência, próximo as 02 horas UT, onde nesse o horário a velocidades das bolhas chegam ao seu máximo. Nota-se que o ângulo de elevação do satélite não influenciou nas velocidades de derivas estimadas. Nesta situação, pode-se concluir que a metodologia proposta também funciona de maneria adequada, quando a distância entre as estações de referência é de até aproximadamente 180 km.

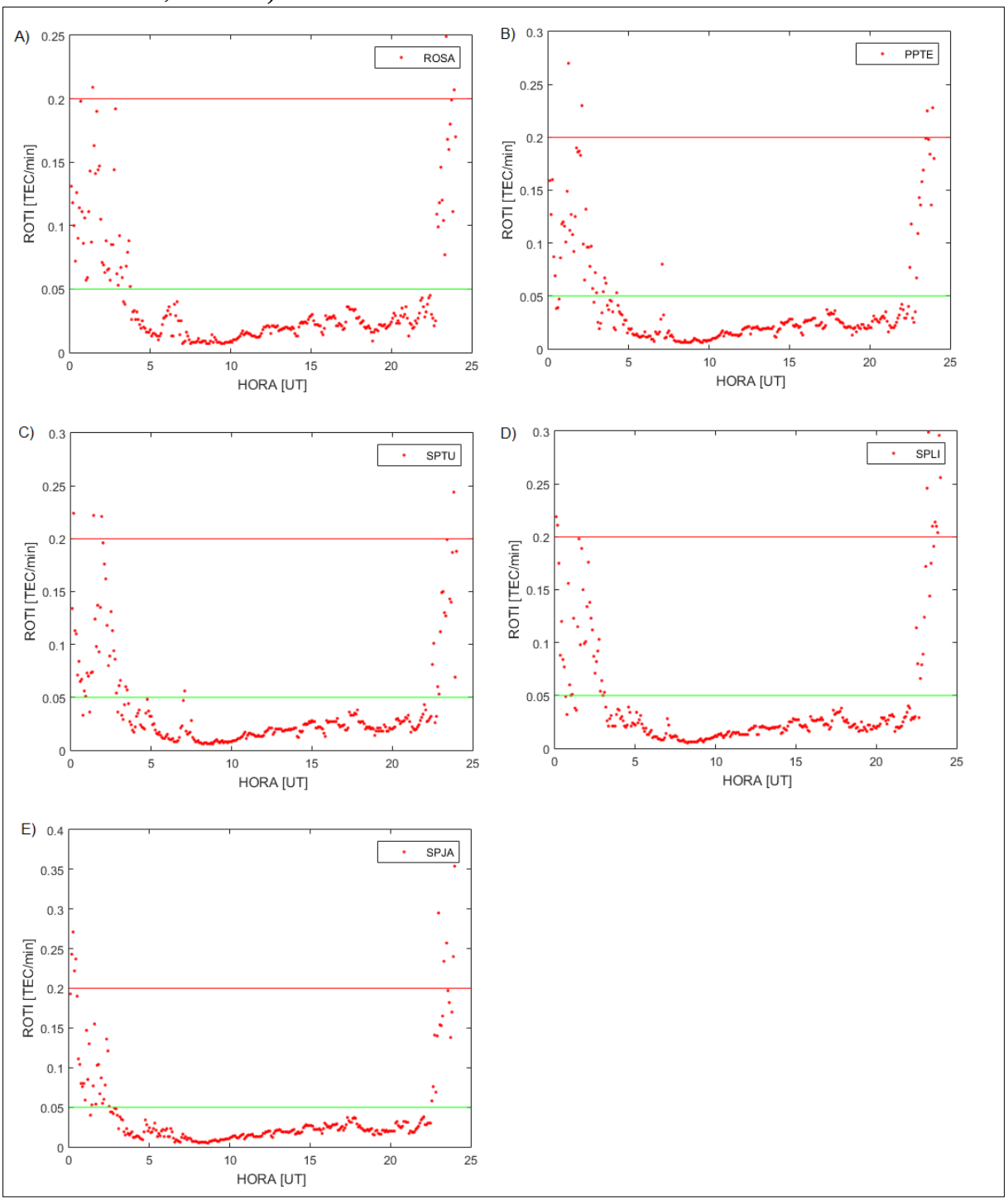
A Tabela 8 apresenta as velocidades para estações de referência SPTU e SPJA, que distam aproximadamente 240 km. Nota-se que as velocidades de deriva inferidas a partir dos PRNs 27 e 29 foram similares as velocidades encontradas para as demais configurações de estações, com exceção para a velocidade estimada do PRN 19 que apresentou uma magnitude superior ao esperado para o horário. Porém, esse fato pode ser explicado pelo horário final em que a bolha foi detectada, próximo às 07 horas UT, horário este próximo ao terminadouro solar, apresentando grande influência na camada ionosférica. Também nota-se que os ângulos de elevação do satélite não influenciou nas velocidades de deriva encontrado. Logo, pode-se concluir que o método proposto também funciona satisfatoriamente para uma distância aproximada entre as estações de até 240 km.

A Tabela 9 apresenta as velocidades estimadas para estações de referência ROSA e SPTU, que distam 260 km. Observa-se que os valores das velocidades de deriva das bolhas calculadas para todos os satélites, apresentaram-se superiores ao esperado. Nos horários em que a magnitude da velocidade de deriva eram para ser inferiores a 100 m/s, estas chegaram assumir valores de até aproximadamente 450m/s, não sendo justificada por motivo algum. Logo, os resultados sugerem que o método proposto, neste experimento, não funciona de maneira adequada para uma distância de 260 km.

É importante ressaltar que as bolhas de plasma possuem uma dinâmica temporal e espacial interna que conduz a mudanças em sua forma e dimensão, sendo que essas mudanças podem induzir erros no cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas.

Nesse sentido, foi feita novamente o processo de análise das velocidades obtidas para as diferentes distências entre as estações de referência. O dia selecionado para esta nova análise foi o dia 01 de dezembro de 2014. Desta maneira, estimou-se o índice de irregularidade ROTI para verificar se irregularidades suficiente capaz de iniciar o processo de formação das bolhas de plasma (Figura 50).

Figura 50 – Índice de irregularidade ROTI, dia 01/12/2014 (A: ROSA; B:PPTE; C: SPTU; D: SPLI; E: SPJA)



Nos gráficos apresentados na Figura 50, nota-se que para todas as estações utilizadas, para o início do dia, entre as 00 horas e 05 horas UT, e para o fim do dia, entre as 23 e 24 horas UT, o índice de irregularidade ROTI pode ser classificado de moderado à forte. Para o restante do dia os valores permaneceram inferior ao limiar classificatório para baixo nível de irregularidade. Esses resultados apresentam fortes evidências da ocorrência de bolhas ionosféricas para esses períodos do dia.

Para todas as configurações entre as estações referência PPTE e SPTU; ROSA e PPTE; PPTE e SPLI; SPTU e SPJA; ROSA e SPTU foram estimados os valores de TEC para todos os satélites e somente aqueles obtidos com o PRN 19, 22 e 27 apresentaram características de ocorrência das bolhas ionosféricas. As Figuras 51 a 55 apresentam os valores de TEC, a auto-correlação e a correlação cruzada entre os valores de TEC usados para estimar o tempo de deslocamento da bolha, bem como o ângulo de elevação do satélite para as respectivas estações de referência.

Figura 51 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPTU, dia 01/12/2014.

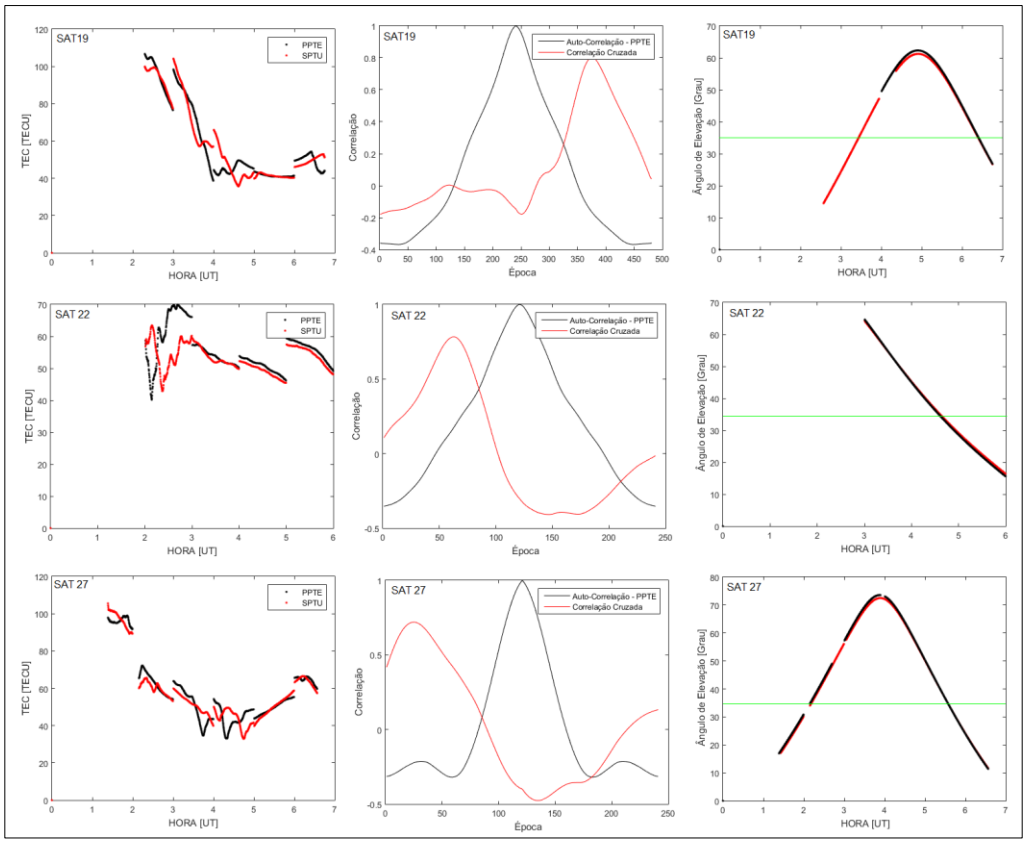


Figura 52 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência ROSA e PPTE, dia 01/12/2014.

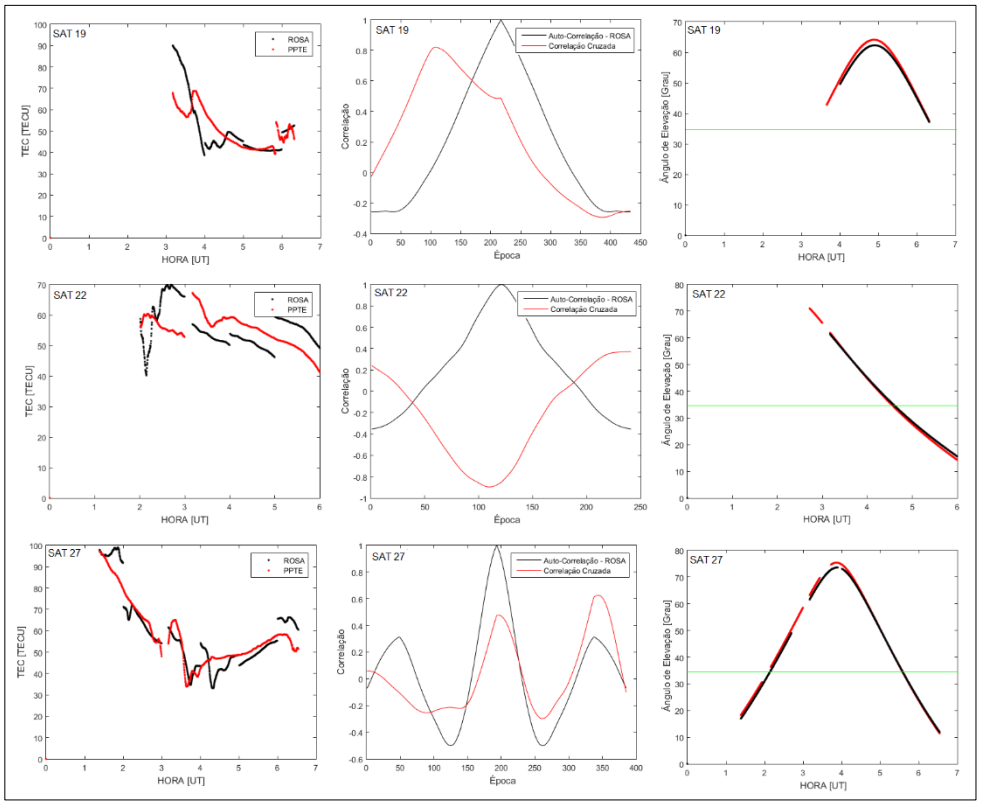


Figura 53 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência PPTE e SPLI, dia 01/12/2014.

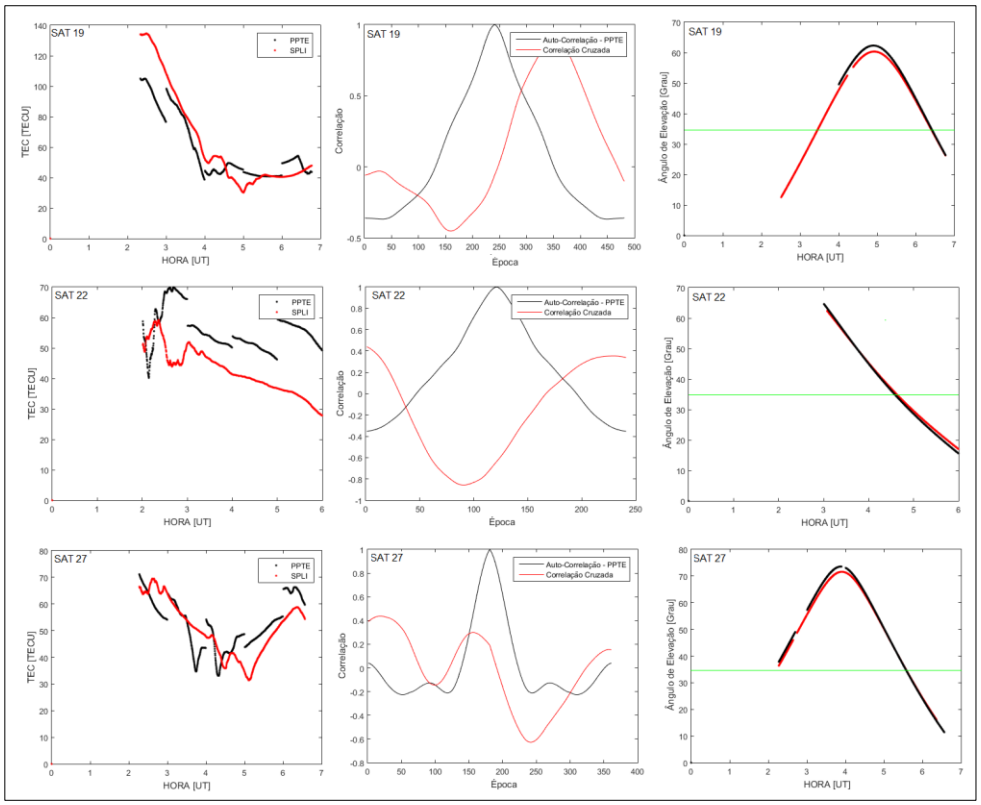


Figura 54 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência SPTU e SPJA, dia 01/12/2014.

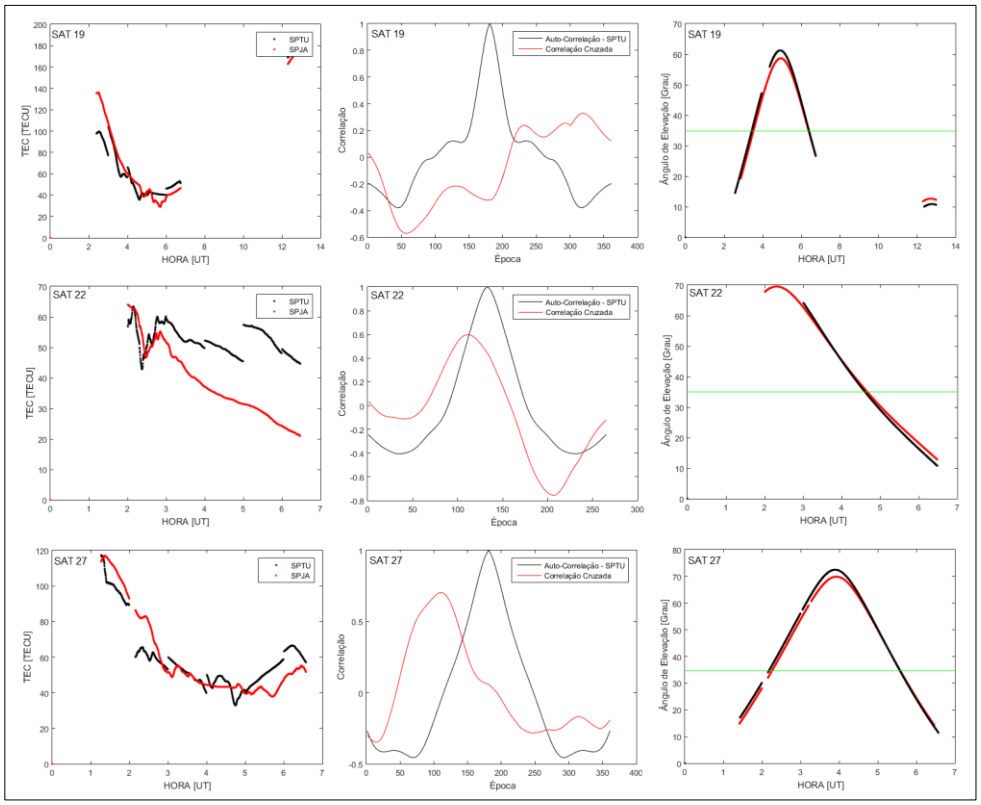
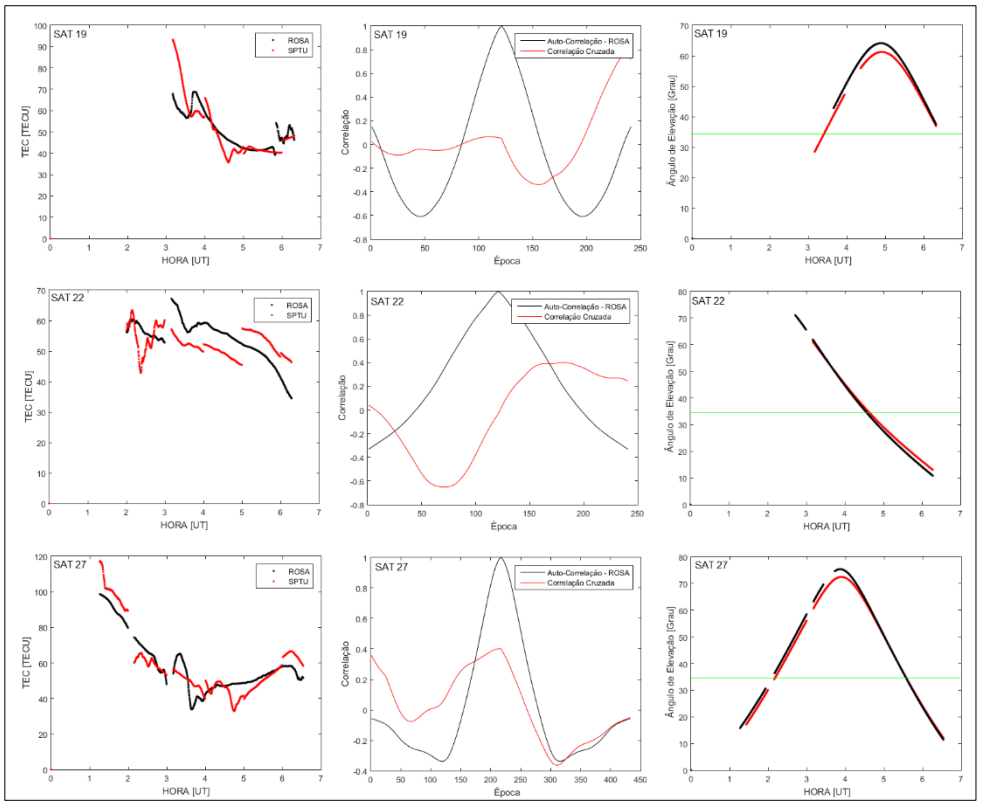


Figura 55 – Valores de TEC (painel esquerdo), Correlação Normalizada (painel central), Ângulo de elevação do satélite (painel direito), para es estações de referência ROSA e SPTU, dia 01/12/2014.



As Tabelas 10 a 14 apresentam as velocidades de deriva das bolhas, apresentadas respectivamente nas Figuras de 51 a 55.

Tabela 10 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPTU (96,92 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	06:00	> 40°	2025	47,88
22	02:00	03:00	> 35°	870	111,40
27	04:00	05:00	> 50°	1140	67,31

Tabela 11 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e PPTE (165,00km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	03:12	05:00	> 50°	1635	100,92
22	02:00	03:00	> 50°	1800	91,66
27	03:24	05:00	> 50°	2250	73,33

Tabela 12 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência PPTE e SPLI (180,63 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	06:00	> 50°	1650	109,47
22	02:00	03:00	> 40°	1800	100,35
27	04:00	05:00	> 60°	2430	74,33

Tabela 13 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência SPTU e SPJA (240,87 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	04:00	06:00	> 40°	2070	115,94
22	02:00	03:06	> 50°	345	695,65
27	04:00	05:30	> 40°	1050	228,57

Tabela 14 – Velocidade de deriva das bolhas ionosféricas para os satélites em que as bolhas foram detectadas, para estações de referência ROSA e SPTU (261,92 km).

PRN	Horário Início	Horário Fim	Ângulo de elevação	Tempo [s]	Velocidade [m/s]
19	03:12	04:12	> 40°	1710	152,63
22	02:00	03:00	> 50°	900	290,00
27	03:12	05:00	> 50°	30	7200,00

A partir das Tabelas 10, 11 e 12 verifica-se que para as estações de referência PPTE e SPTU; ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI os resultados das velocidades apresentaram valores semelhantes, sendo essas velocidades encontradas coerentes com a literatura. Para o satélite com o PRN 19 para as estações ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI as velocidades ficaram em torno dos 100 m/s, para as estações de referência PPTE e SPTU a velocidade da bolha encontrada para este satélite não ultrapassou os 50 m/s. Para os satélite com os PRN 22 e 27 as velocidades estimadas ficaram similares entre as estações de referência, onde para o PRN 22 as velocidades foram próximo aos 100 m/s e para o PRN 27 as velocidades estimadas ficaram em torno dos 70 m/s. Ademais, nota-se que o ângulo de elevação do satélite não influenciou nas velocidades estimadas. Portanto, para este experimento, pode-se concluir que a metodologia proposta também funciona de maneira adequada para a distância entre as estações de referência de até aproximadamente 180 km, a qual é a maior distância entre as estações de referência PPTE e SPLI.

Para as estações de referência SPTU e SPJA; e ROSA e SPTU que apresentam uma distância aproximada de 240 e 260 km, respectivamente, as velocidades não se apresentaram de acordo com a literatura. A partir das Tabela 13 e 14, nota-se que os satélites com o PRN 22 e 27 apresentaram valores exorbitantes, muito acima do esperado, não sendo justificado por nenhum motivo. Assim, para este experimento, os resultados sugerem que o método proposto, não estima as velocidades de deriva das bolhas ionosféricas de maneira adequada para uma distância igual ou superior a 240 km.

Verifica-se que os resultados diferem de um dia para outro. Para o dia 30 de novembro, os experimentos, indicaram que para até distância de 240 km o método estimou as velocidades de maneira adequada; porém, o mesmo não acontece para uma distância de 260 km. Já para o dia 01 de dezembro, os experimentos, indicaram que para até distância de 180 km o método calculou as velocidades de maneira correta. Portanto, os resultados dos experimentos se mostraram inconclusivos em relação a uma distância limite adequada para a metodologia proposta. Isso se deve as condições das bolhas de plasma ionosféricas possuírem uma dinâmica temporal e espacial interna provocando mudanças em sua forma e dimensão induzindo erros

nos cálculos da velocidade de deriva. Desta forma, é necessário realizar mais experimentos para outros dias, bem como para outras distâncias entre as estações de referência.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com a realização da presente pesquisa foi discutida a importância de realizar estudos sobre a dinâmica da camada ionosférica, que afeta no posicionamento GNSS, e consequentemente o sistema GBAS, em especial no Brasil. Nesse sentido, foi apresentada a importância de se estimar a velocidade de deriva das bolhas ionosféricas, uma vez que esta pode ser considerada um parâmetro significativo para avaliar o desempenho do GBAS na aviação civil.

Tem-se que a utilização das redes GNSS ativas para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas de plasma se torna uma melhor alternativa, quando comparado com os imageadores ópticos, principalmente devido à densidade e à distribuição geográfica das estações, uma vez que os imageadores dependem das condições meteorelógicas. Entretanto, os imageadores se tornam uma ferramenta importante para a certificação dos resultados obtidos com as redes GNSS ativas, uma vez que se apresenta como uma técnica consolidada para o cálculo da velocidade de deriva das bolhas.

Assim, o trabalho consistiu em propor uma metodologia que realiza a estimativa da velocidade de deriva das bolhas de plasma utilizando informações GNSS, e para a sua validação foi proposto a utilização dos imageadores ópticos *all sky* de luminescência atmosférica.

Para uma avaliação inicial das velocidades de deriva das bolhas ionosféricas obtidas por meio da metodologia apresentada, foi realizado a estimativa das velocidades de deriva das bolhas ionosféricas, empregando diferentes amostragem dos dados. No primeiro momento a leitura dos arquivos RINEX, para a determinação do TEC, foi feita a cada 30 segundos, e posteriormente a cada 15 segundos. Nos experimentos realizados, tem-se que para o dia 06 de janeiro de 2014 houve irregularidades ionosféricas moderadas capazes de gerar bolhas ionosféricas, sendo estas comprovadas por meio do índice ROTI. Desta maneira, foi possível estimar a velocidade de deriva zonal das bolhas, utilizando as estações de referência RIOD e ONRJ, que apresentam uma distância horizontal de aproximadamente 9000 m. Sendo assim, com a amostragem dos dados de 30 segundos, para PRN 32 encontrou-se uma velocidade de deriva estimada de aproximadamente 150 m/s, enquanto que a partir de observações com satélite PRN 03 obteve-se uma velocidade de aproximadamente 100 m/s. Entretanto quando utilizou-se uma amostragem dos dados de 15 segundos, os dois satélites analisadas apresentaram uma velocidade aproximada de 120 m/s. Então, conclui-se que os resultados se mostraram mais coerentes quando utilizando uma amostragem de 15 segundos.

Na sequência foi feita a validação do método proposto, com amostragem dos dados de 15 segundos, comparando as velocidades estimadas das imagens de luminescência atmosféricas

e empregando o *software* UASDA. Para o processo de validação da metodologia, foi comparado as velocidades obtidas por meio do método empregado, com as velocidades obtidas com imageadores *all-sky*. Utilizou-se o imageador localizado na UNIVAP, São José dos Campos e os dados das estações de referência SJCU e SJSP, localizadas próximo ao imageador. Os dias selecionados foram 24 de outubro, 16, 17 e 18 de dezembro. Como resultado para o dia 24 de outubro a velocidade média de deriva das bolhas obtida a partir dos imageadores foi de 103,2 ± 2,5 m/s, enquanto que a velocidade obtida com a metodologia desenvolvida foi de 112,5 ± 37,0 m/s. Para o dia 16 e 17 de dezembro a velocidade obtida com os imageadores foi de aproximadamente 112,9 ± 2,4 m/s, enquanto com a metodologia desenvolvida foi de 120 ± 36 m/s. E no caso analisado para o dia 18, a velocidade obtida a partir das imagens de luminescência foi de 60,5 ± 1,5 m/s, enquanto que com a obtida a partir dos dados GNSS foi de aproximadamente 80,2 ± 14,5 m/s. É importante ressaltar que os desvios-padrão obtidos com a metodologia empregada são considerados altos, mas isso pode ser justificado devido à ocorrência das bolhas ionosféricas serem em horários diferentes, uma vez que as velocidades são maiores para o início da noite e no decorrer da mesma as velocidades tendem a diminuir. Assim, diante dos resultados, pode-se observar uma boa concordância entre os métodos. Logo, os resultados mostraram que a metodologia proposta neste projeto de pesquisa é adequada para realizar a estimativa da velocidade das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS.

O último experimento consistiu em analisar a limitação do método em relação as distâncias entre as estações de referência. Desta maneira, selecionou-se 5 estações com diferentes distâncias entre si e analisou-se as velocidades de deriva das bolhas ionosféricas para diferentes dias. Foram analisadas as seguinte configurações entre as estações de referência: PPTE e SPTU; ROSA e PPTE; PPTE e SPLI; SPTU e SPJA e por fim ROSA e SPTU. Para o dia 30 de novembro de 2014, as estações de referência PPTE e SPTU, ROSA e PPTE e PPTE e SPLI as magnitudes das velocidades de deriva zonal se encontraram dentro do esperado, com valores de velocidades inferiores a 100 m/s para os horários após as 02 horas UT, e velocidades acima dos 100 m/s em horários antes das 02 horas UT quando a deriva tende a ser máxima. Para as estações de referência SPTU e SPJA, que distam aproximadamente 240 km, as velocidades encontradas para os PRNs 27 e 29 foram similares as velocidades encontradas para as demais configurações de estações, com exceção para o PRN 19 que apresentou uma velocidade superior ao esperado para o horário, fato este explicado pelo terminadouro solar. E por fim, para as estações de referência ROSA e SPTU, que distam aproximadamente 260 km, as velocidades para todos os satélites, apresentaram-se muito superiores ao esperado não podendo ser justificada por motivo algum. Para o dia 01 de dezembro de 2014, estações de

referência PPTE e SPTU; ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI os resultados das velocidades apresentaram valores semelhantes e de acordo com a literatura. Para as estações ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI o satélite com o PRN 19 as velocidades foram de aproximadamente 100 m/s, para as estações de referência PPTE e SPTU a velocidade da bolha encontrada para este satélite não ultrapassou os 50 m/s. Para os satélite com os PRN 22 e 27 as velocidades estimadas ficaram similares entre as estações de referência PPTE e SPTU; ROSA e PPTE; e PPTE e SPLI, onde para o PRN 22 as velocidades foram próximo aos 100 m/s e para o PRN 27 as velocidades estimadas ficaram em torno dos 70 m/s. Já para as estações de referência SPTU e SPJA; e ROSA e SPTU que apresentam uma distância aproximada de 240 e 260 km respectivamente as velocidades estimadas não se apresentaram de acordo com a literatura. Para os PRN 22 e 27 as velocidades se encontram muito acima do esperado, não sendo justificado por nenhum motivo. Observa-se que em relação as distâncias entre as estações de referência os resultados diferem de uma dia para outro. Tem-se que os resultados dos experimentos foram inconclusivos em relação a uma distância limite adequada para a metodologia proposta. Isso se deve as condições das bolhas de plasma ionosféricas possuírem uma dinâmica temporal e espacial interna provocando mudanças em sua forma. Desta forma, é necessário realizar mais experimentos para outros dias, bem como para outras distâncias entre as estações de referência.

Com a experiência adquirida durante o desenvolvimento da pesquisa, a partir da análise dos resultados e das dificuldades encontradas, e tendo o entendimento de que ainda há muito que se desenvolver em termos computacionais e estudos, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros: realizar a inclusão das demais constelações dos sistemas GNSS, que se encontram operacionais; realizar implementações no que concerne a taxa de amostragem de no mínimo um segundo; realizar estudos sobre o impacto que a explosões solares e tempestades geomagnéticas pode provocar nas velocidades de derviva das bolhas ionosféricas, bem como realizar estudos sobre as velocidades em relação as variáveis que influenciam o comportamento da ionosfera como: variações diárias, sazonais e em ciclos de longos períodos, influência da latitude e longitude, entre outras.

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.

BUMRUNGKIT, A.; RUNGRAENGWAJIAKE, S.; SUPNITHI, P.; SIANSAWADI, N. Drift Velocity Estimantion of Ionospheric Disturbance using GPS Observations. In: *The 4th Joint Internacional Conference on Informtion and Communication Techonogy, Eletronic and Electrial Engineering*, 2014.

BUMRUNGKIT, A.; SUPNITHI, P. Statistical analysis of separation distance between equatorial plasma bubbles. In: *13th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*. p. 212 – 215, 2017.

CANDIDO, C. M. N. *Estudos de irregularidades no plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor longitudinal brasileiro*. 2008. 258f f. Tese (Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

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.

CHU, F. D.; LIU, J. Y.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; TAYLOR MJ & MEDEIROS AF. 2005. The climatology of ionospheric plasma bubbles and irregularities over Brazil. *Annales Geophysica*, European Geosciences Union, p. 379-384, 2005.

CHUJO, A. M.; WALTER, F. Operação de vôo seguras e eficientes usando o conceito de GBAS/SBAS. In: *Anais do XVII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA*, Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 16-19 out. 2006.

COELHO, F. E. *Deriva zonal do plasma ionosférico no setor brasileiro durante um período de extrema baixa atividade solar*. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos.

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

DAL POZ, W. R. *Investigações Preliminares Sobre a Influência do Clima Espacial no Posicionamento Relativo com GNSS***.** 2010. 159p. Tese (Doutorado Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente.

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.

FUJIWARA, T.; TSUJI, T. GBAS Availability Assessment and modeling of Ionospheric Scintillation Effects. GBAS Availability Assessment and Modeling of Ionospheric Scintillation Effects. *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, v. 63, n. 4, p. 405-413, 2016.

GALILEO. *Galileo implementation plan*. 2015. Disponível em: <http://www.galileoic.org/node/149?language=en>. Acesso em: 22 jan. 2018.

HAASE, J. S.; DAUTERMANN, T.; TAYLOR, M. J.; CHAPAGAIN, N.; CALAIS, E.; PAUTET, D. Propagation of plasma bubbles observed in Brazil from GPS and airglow data. *Advances in Space Research*, v. 47, n. 10, p. 1758-1776, 2011.

HUANG, C.S.; LA BEAUJARDIERE, O.; RODDY, P. A.; HUNTON, D. E.; LIU, J. Y.; CHEN, S. P. Occurrence probability and amplitude of equatorial ionospheric irregularities associated with plasma bubbles during low and moderate solar activities (2008–2012). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 119, n. 2, p. 1186-1199, 2014.

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.

JESUS, R.; Sahai, Y., Guarnieri, F. L.; Fagundes, P. R.; de Abreu, A. J.; Becker-Guedes, F.; Pillat, V. G. Effects observed in the ionospheric F-region in the South American sector during the intense geomagnetic storm of 14 December 2006. *Advances in Space Research*, v. 46, n. 7, p. 909-920, 2010.

JI, S.; CHEN, W.; DING, X.; ZHAO, C. Equatorial ionospheric zonal drift by monitoring local GPS reference networks, *Journal of Geophysical Research*, v. 116, 2011

KIL, H.; KINTER, P.M. Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil, *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 5317-5327, mar. 2000.

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

KUSHIATOR, B. A. N. *Observação da mare lunar nas medidas de luminescência atmosférica equatorial por fotômetro multicanal*. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado Ciências e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estatual da Paraíba, Campina Grande.

KUO, C. L.; LEE, L. C. Ionospheric plasma dynamics and instability caused by upward currents above thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 120, n. 4, p. 3240-3253, 2015.

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.

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

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. 263f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. *Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas.* Revista Brasileira de Geofísica, 568p, set. 2009.

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, 2000.

MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo GNSS*: descrição, fundamentos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008

MOOR, L. P. *Estudo das Irregularidades ionosféricas da região F durante em período de atividade solar minima.* 2011. 158 f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do vale do Paraíba, São José dos Campos.

MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. Scintillations and ionospheric irregularity zonal grifts inferred at equatorial and low-latitude regions, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics***,** p. 1261-1272, 2008.

MURPHY, T.; IMRICH, T. Implementation and Operation Use of Ground-Based Augumentation System (GBASs) – A Component of the Future Air Traffic Management System. *Proceedings of the IEEE*, v. 96, n. 12, p. 1936-1957, 2008.

NISHIOKA, M.; SAITO, A.; TSUGAWA, T. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks, *Journal of Geophysical Research*, v. 113, 2008

ODRIOZOLA, S. S. *Estudo de irregularidades do plasma ionosférico na região entre as camadas E e F no setor brasileiro a partir de medidas de foguete*. 2017. 253 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

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, 1997.

PILLAT, V. G.; GUEDES, J. R. A.; FAGUNDES, P. R. Programa para análise de imagens dos fotômetros imageadores: UASDA- Univap All sky data Analysis. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 1691 – 1698, abr. 2009.

PIMENTA, A. A. *Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical*. 2003. 194 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

PEREIRA, V. A. S. *Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado*. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente.

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.19, p. 374-390, jul-set 2013.

_____. Brazilian active GNSS networks systems for monitoring the ionosphere, *GPS Solutions***,** v. 21, p. 1013-1025, 2016.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; MUELLA, M. T. D. A. H. Assessment of a TEC calibration procedure by single-frequency PPP. *GPS Solutions*, v. 22, n. 2, p. 35, 2018.

RAGHUNATH, S.; RATNAM, D. V.; Ionospheric Gradient Detection Methods for Ground Based Augumentation System. *In: 2nd International Conference on Electronics and Communications System*, p. 894-898, ago. 2015.

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.

RUNGRAENGWAJIAKE, S.P.; SUPNITHI, S.; SAITO, S.; SIANSAWASDI, N.; SAEKOW, A. Ionospheric delay gradiente monitoring for GBAS by GPS stations near Suvarnabhumi airport, Tailand. *Radio Science*. v. 50, p. 1076-1085, out. 2015.

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.

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

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; SAWANT, H.; ZAMLUTTI, C. J.; BORDA, G. L. Solar geomagnetic activity effects on nocturnal zonal velocities of ionospheric plasma depletions. *Advances in Space Research*, 1999. p. 1507-1510

ZOLESI, B.; CANDER, L. R. *Ionospheric prediction and forecasting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

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