



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.20.20.09-TDI

ESTUDO DAS DERIVAS ZONAIS DE BOLHAS DE PLASMA UTILIZANDO O MODELO LTIAM

Regia Pereira da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 22 de dezembro de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QJJCHL>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)
Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)
Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)
Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.20.20.09-TDI

ESTUDO DAS DERIVAS ZONAIS DE BOLHAS DE PLASMA UTILIZANDO O MODELO LTIAM

Regia Pereira da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 22 de dezembro de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QJJCHL>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Regia Pereira da.
Si38e Estudo das derivas zonais de bolhas de plasma utilizando o modelo LTIAM / Regia Pereira da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2017.
 xxiv + 91 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/02.20.20.09-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral.

1. Ionosfera. 2. Bolha de plasma. 3. GNSS. 4. Deriva zonal.
I.Título.

CDU 533.9:550.388



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

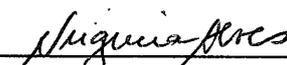
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Regia Pereira da Silva*

Título: "ESTUDO DAS DERIVAS ZONAIS DE BOLHAS DE PLASMA UTILIZANDO O MODELO LTIAM".

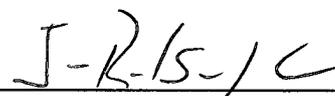
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de *Doutor(a)* em
*Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre*

Dra. *Maria Virginia Alves*



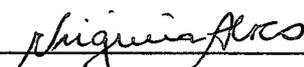
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. *Jonas Rodrigues de Souza*



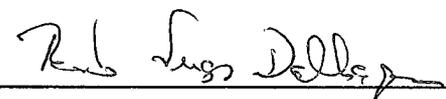
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. *José Humberto Andrade Sobral*



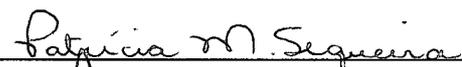
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. *Renato Sergio Dallaqua*



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. *Patrícia Mara de Siqueira Negreti*



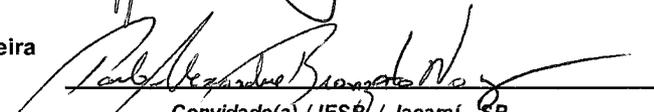
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. *Gilvan Luiz Borba*



Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Dr. *Paulo Alexandre Bronzato Nogueira*



Convidado(a) / IFSB / Jacaré - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 22 de dezembro de 2017

“Se te apetece esforçar, esforça-te; se te apetece repousar, repousa; se te apetece fugir, fuja; se te apetece resistir, resista; mas saiba bem o que te apetece, e não recue ante nenhum pretexto, porque o universo se organizará para te dissuadir.”

NIETZSCHE

A. Maniló Soares Marques

AGRADECIMENTOS

Aos Drs. José Humberto Andrade Sobral e Jonas Rodrigues de Souza pela orientação, paciência e discussões durante todo o período de doutorado, mas principalmente pelo incentivo nos momentos de desânimo. Aos professores das disciplinas as quais cursei, pelos ensinamentos e disponibilidade. Aos membros do Conselho pela oportunidade de presenciar a realidade da pós-graduação sob um novo ângulo durante o período em que exerci a representação discente. Ao Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais – INPE, pela estrutura, pelo ambiente de trabalho e por me fazer sentir parte desta comunidade. Ao CNPq (processo nº 140788/2015-8) pelo suporte financeiro. Aos amigos de turma e de trabalho quero agradecer pelo companheirismo, pelos diversos ensinamentos e conselhos, mas principalmente pelos momentos de amizade, alegria e confiança. Durante estes últimos anos eu amadureci como pessoa e como profissional, e todos vocês fizeram/fazem parte do meu crescimento. Obrigada!

Por fim quero agradecer a minha família. À minha mãe a qual em nenhum dia desde que embarquei nesta jornada permitiu que eu me sentisse sozinha, ao meu pai que sempre acreditou mais em mim do que eu mesma, e a Manilo pelo amor, paciência e cumplicidade.

RESUMO

As bolhas de plasma são irregularidades que ocorrem na região F da ionosfera equatorial, caracterizadas por rarefação na densidade do plasma. Entender o seu comportamento é importante devido aos seus impactos em sinais de rádio e GPS e, conseqüentemente, em suas respectivas aplicações tecnológicas. Neste sentido, foi desenvolvido neste trabalho uma metodologia de reconhecimento de padrões e implementada no modelo LTIAM (Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring) para monitorar de forma automática as irregularidades ionosféricas, e a partir dele inferir as velocidades das derivas zonais das bolhas de plasma percebidas, simultaneamente, por duas estações receptoras de dados GNSS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, próximas uma da outra, localizadas em Salvador (BA) em períodos geomagneticamente calmos. O estudo realizado envolveu os anos de 2012, 2013 e 2014 para os meses de setembro até janeiro do ano subsequente, escolhendo dez dias representativos para cada mês. Os resultados médios fornecidos pelo modelo se apresentaram em concordância com os valores registrados na literatura. Porém, análises individuais de alguns meses mostraram um comportamento anticorrelacionado com o esperado para alto fluxo solar. Investigações utilizando o modelo SUPIM-INPE creditam tais comportamentos às ações dos ventos neutros.

Palavras-chave: Ionosfera. Bolha de plasma. GNSS. Deriva zonal.

STUDY OF PLASMA BUBBLE ZONAL DRIFTS USING THE LTIAM MODEL

ABSTRACT

Equatorial plasma bubbles consist of field-aligned large-scale depletions, or irregularities, characterized by drastic ion density rarefactions of the nocturnal low latitude/equatorial ionosphere. Understanding their behavior is important because of their degrading effects on radio wave signals and, consequently, their respective technological applications such as for example GPS applications. In this sense, a methodology of pattern recognition was developed and implemented here using the LTIAM (Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring) model in order to infer the plasma bubbles zonal drifts velocities, using two receiving stations of GNSS data from the Brazilian Continuous Monitoring Network, located near to each other, located in Salvador (BA) during geomagnetically calm periods. The study covered the years of 2012, 2013 and 2014 for the months from September to January of the following year, choosing ten representative days for each month. The average results for the plasma bubble zonal velocities provided by the model calculations were in agreement with the well-known values. However, monthly individual analyzes showed a behavior anticorrelated with that expected for high solar flux. Investigations using the SUPIM-INPE model attribute the such behavior to the neutral winds actions.

Keywords: Ionosphere. Plasma Bubble. GNSS. Zonal drifts.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1: Sequência de bolhas de plasma observadas por imageador	3
Figura 2.1: Variação sazonal da deriva zonal do plasma para períodos de baixo e alto fluxo solar.	10
Figura 2.2: Deriva zonal média durante o equinócio para diferentes níveis de fluxo solar.	11
Figura 2.3: Comportamento da deriva vertical (a) durante dínamo perturbado e (b) durante penetração de campo elétrico.	12
Figura 2.4: Deriva zonal sob Jicamarca para dois níveis de atividade magnética, mensurados pelo índice Kp.....	12
Figura 2.5: Sazonalidade e dependência com o ciclo solar para as derivas zonais em período calmo e perturbado, para dois níveis de fluxo solar.	14
Figura 2.6: Comparações do modelo de deriva zonal de Jicamarca em período calmo para condições de fluxo solar baixo e alto.....	15
Figura 2.7: Dependência sazonal e longitudinal das derivas zonais durante período calmo.	16
Figura 2.8: Primeiro registro do movimento das bolhas de plasma para o Leste.....	18
Figura 3.1: Ilustração de um usuário da rede LAAS sendo impactado por uma frente de onda ionosférica.....	24
Figura 3.2: Aumento do atraso ionosférico durante a tempestade ionosférica de 20 de novembro de 2003.	24
Figura 3.3: Rede fixa de estações receptoras de dados GNSS/GPS dos EUA.	26
Figura 3.4: Fluxograma de funcionamento do LTIAM.....	26
Figura 3.5: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).	28
Figura 3.6: Exemplo de saída do LTIAM.....	29
Figura 3.7: Exemplos de saída do LTIAM	31
Figura 3.8: Exemplo de saída do LTIAM.....	32
Figura 4.1: Localização das estações receptoras de dados GNSS utilizadas neste estudo.	33
Figura 4.2: Base de dados para o ano de 2012	35

Figura 4.3: Base de dados para o ano de 2013	35
Figura 4.4: Base de dados para o ano de 2014	36
Figura 4.5: Ilustração do posicionamento do banco de dados no ciclo solar 24.	36
Figura 4.6: Ilustração da metodologia Station Pair Method.....	38
Figura 4.7: Saída do LTIAM para a passagem de irregularidade nas estações SAVO e SSA1.....	39
Figura 4.8: Processamento do k-means.	40
Figura 4.9: Modelo ionosférico de casca fina.	41
Figura 4.10: Representação geométrica do cálculo para a velocidade do IPP (V_{IPP}) para o Two station method.	44
Figura 5.1: Resultados utilizando o LTIAM para 40° de elevação para o dia 292 do ano 2012 (18/outubro).....	48
Figura 5.2: Representação das velocidades obtidas por cada PRN para o dia 292 de 2012	49
Figura 5.3: Resultados utilizando o LTIAM para 50° de elevação para o dia 292 do ano 2012 (18/outubro).....	49
Figura 5.4: Representação das velocidades obtidas por cada PRN para o dia 292 de 2012	50
Figura 5.5: Distribuição dos dados relativa aos meses de setembro	52
Figura 5.6: Distribuição dos dados relativa aos meses de outubro.....	52
Figura 5.7: Distribuição dos dados relativa aos meses de novembro.....	53
Figura 5.8: Distribuição dos dados relativa aos meses de dezembro	53
Figura 5.9: Distribuição dos dados relativa aos meses de janeiro	54
Figura 5.10: Distribuição dos dados relativa a todo o banco de dados	54
Figura 5.11: Média móvel e fit para o mês de setembro	56
Figura 5.12: Média móvel e fit para o mês de outubro.....	56
Figura 5.13: Média móvel e fit para o mês de novembro.....	57
Figura 5.14: Média móvel e fit para o mês de dezembro	57
Figura 5.15: Média móvel e fit para o mês de janeiro.....	58
Figura 5.16: Média móvel e fit para todo o banco de dados	58
Figura 5.17: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2012.....	60
Figura 5.18: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2013.....	60
Figura 5.19: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2014.....	61
Figura 5.20: Ajustes polinomiais agrupados mês a mês.....	63

Figura 5.21: Ionograma da região de Fortaleza (CE) para 15 de novembro de 2012	66
Figura 5.22: Ionograma da região de Fortaleza (CE) para 15 de novembro de 2014	66
Figura 5.23: Resultado do modelo SUPIM-INPE para novembro de 2012 e 2014.....	67
Figura 5.24: Imagem de bolha de plasma com a lente all-sky.	68
Figura 5.25: Imagem linearizada de bolha de plasma	69
Figura 5.26: Corte Leste-Oeste em imagem all-sky linearizada	70
Figura 5.27: Exemplo de keograma.....	71
Figura 5.28: Estimativa das velocidades de bolhas utilizando a técnica de keogramas. 71	
Figura 5.29: Keograma da noite de 11 de novembro de 2012.....	72
Figura 5.30: Keograma da noite de 12 de novembro de 2012.....	72
Figura 5.31: Keograma da noite de 15 de novembro de 2012.....	73
Figura 5.32: Comparação das velocidades obtidas por keogramas e pelo LTIAM.....	73
Figura A1: Exemplos de processamento do k-means em 2D e 3D	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 5.1: Coeficientes do ajuste polinomial de 9º ordem	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CORS	Continuously Operating Reference Stations
EPBs	Equatorial Plasma Bubbles
GBAS	Ground-Based Augmentation Systems
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LAAS	Local Area Augmentation System
LTIAM	Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring
PRN	Pseudo Random Noise
RMBC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
s.f.u	Solar Flux Units
SAVO	Estação da RBMC situada em Salvador (BA), na sede do INCRA.
SSA1	Estação da RBMC situada em Salvador (BA)
TID's	Travelling Ionospheric Disturbances

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
2	DERIVA ZONAL DO PLASMA IONOSFÉRICO NA REGIÃO F	7
2.1	CLIMATOLOGIA DAS DERIVAS ZONAIS	13
3	O MODELO LTIAM.....	21
4	METODOLOGIA	33
4.1	SOBRE OS DADOS	33
4.2	SOBRE A METODOLOGIA	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1	ESCOLHA DA MÁSCARA DE ELEVAÇÃO E DO GRADIENTE IONOSFÉRICO	47
5.2	VELOCIDADES MÉDIAS DAS BOLHAS OBTIDAS USANDO O LTIAM.....	50
5.3	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA POR MEIO DE COMPARAÇÃO COM A METODOLOGIA ÓPTICA	67
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÊNDICE A – ALGORITMO K-MEANS	89

1 INTRODUÇÃO

A ionosfera terrestre é uma região eletricamente condutora da atmosfera, que por estar acoplada à magnetosfera, sofre interferência tanto do Sol e meio interplanetário, quanto da termosfera. Esta interferência afeta a ionosfera moldando as suas características principalmente devido a processos radiativos, químicos, dinâmicos e eletrodinâmicos.

Em relação aos processos eletrodinâmicos, a ionosfera é dominada principalmente por campos elétricos, derivas de plasma e ventos neutros. Nas regiões equatoriais e de baixas latitudes as derivas de plasma da ionosfera, em período de pouca atividade magnética, são conduzidas pelos campos elétricos do dínamo da região E, formados pelos ventos neutros, e pelos campos elétricos de polarização da região F (RISHBETH, 1971a, 1971b; HELLIS et al., 1974, FEJER et al., 1981, ABDU et al. 2005). Durante a noite e com o quase desaparecimento da região E, surgem campos elétricos verticais capazes de conduzir o plasma ionosférico na mesma direção dos ventos neutros zonais (FARLEY et al., 1986; HAERENDEL et al., 1992, HELLIS et al., 2004). Nesse mesmo horário algum tipo de irregularidade, como bolha de plasma, pode ocorrer.

As velocidades das derivas zonais já foram bastante estudadas tanto teórica quanto experimentalmente, sendo este por diversas técnicas como radar de espalhamento incoerente (BASU et al., 1977; FEJER et al., 1985, 1989, 1990, 1991; KUDEKI; BHATTACHARYYA, 1999), fotômetros e imageadores (SOBRAL; ABDU, 1990, 1991; SOBRAL et al., 1985, 1999, 2002; MARTINIS et al., 2003), polarímetros VHF e digissonda (ABDU et al., 1987, 1998), instrumentos a bordo de satélites (AGGSON et al., 1987; COLEY; HEELIS, 1989), entre outros. Desde a última década estudos feitos por meio de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) tem se tornado uma importante ferramenta no estudo de bolhas de plasma (KIL et al., 2000, 2002; DE PAULA et al., 2002; NISHIOCA et al., 2008; HAASE et al., 2010).

As bolhas de plasma (*EPBs – Equatorial Plasma Bubbles*) são rarefações na densidade do plasma equatorial. O campo elétrico para Leste gerado na região E da ionosfera durante o dia causa a deriva vertical $E \times B$ da região F. Após o por do Sol, a ionização devido à radiação solar decresce na região E, fazendo com que haja o domínio do dínamo da região F. Devido ao dínamo da região F há o aumento do campo elétrico logo após o por do Sol, e como consequência a deriva vertical do plasma movimenta as camadas da ionosfera para altitudes mais altas, onde a frequência de colisões de íons

com moléculas neutras é menor, cujo fato favorece o desenvolvimento das bolhas ionosféricas por meio da instabilidade Rayleigh Taylor devido à taxa de crescimento ser inversamente proporcional à frequência de colisões de íons com átomos e moléculas neutras. Nesse mesmo período, após o por do sol, uma perturbação da densidade eletrônica ao longo da direção Leste-Oeste, e localizada próximo à base da região F, possivelmente causada por ondas de gravidade, ou causadas pelo próprio movimento de subida da ionosfera, pode resultar na instabilidade Rayleigh-Taylor, e consequente formação de bolhas de plasma (HUANG; KELLEY, 1996; ABDU, 2001; ABDU et al., 2009; KELLEY, 2009; SOUSASANTOS et al., 2017).

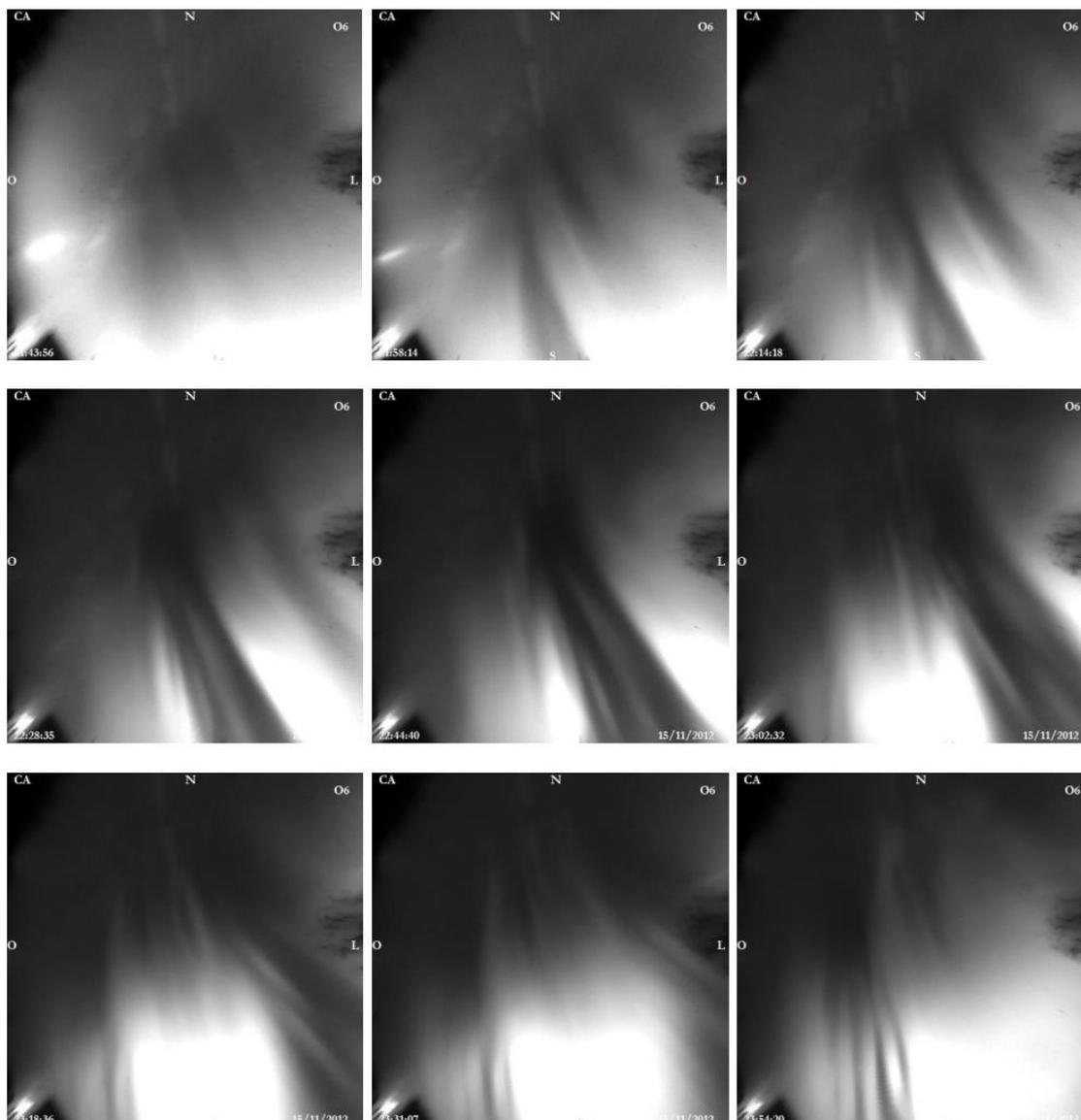
A Figura 1.1 apresenta uma sequência temporal com o surgimento e desenvolvimento de bolhas de plasma observadas por imageador óptico operando na raia de 630 nm do oxigênio atômico.

As EPBs apresentam algumas características já bastante conhecidas. Elas estão alinhadas ao campo geomagnético e possuem dimensão na ordem de dezenas ou poucas centenas de quilômetros na direção meridional. Apresentam forte dependência com a hora local, longitude e sazonalidade. Outra forte característica das EPBs é a presença de múltiplas estruturas ou bifurcações.

A Figura 1.1 apresenta uma forte estrutura de bolha, e logo em seguida surge outra. Ambas apresentam grandes bifurcações. Os processos responsáveis por este tipo de comportamento ainda não estão bem esclarecidos. Mendillo e Tyler (1983) anunciaram que as bifurcações foram verificadas em torno da altura média de 740 km. Posteriormente, Aggson et al. (1996) anunciaram uma faixa de altura onde as bifurcações geralmente ocorrem, a qual seria entre 400 e 750 km. Sendo assim, as bifurcações poderiam ocorrer em qualquer horário local, mesmo no início da noite (em baixas alturas ionosféricas) ou até durante o processo de geração do fenômeno.

As EPBs também apresentam pequenas estruturas internas na ordem entre centímetros a dezenas de quilômetros. Sendo assim, as EPBs podem interferir nos sinais de rádio, GPS e telecomunicações, além de aplicações tecnológicas advindas destas. Por este motivo vem crescendo o número de trabalhos no sentido de aumentar a previsibilidade de ocorrência, modelagem/simulação de comportamento e cálculo da velocidade de propagação.

Figura 1.1: Sequência de bolhas de plasma observadas por imageador



Sequência de imagens de imageador em 630 nm obtidas em São João do Cariri (PB), durante a noite de 15 de novembro de 2012, a partir das 21:43:66 até 23:54:20 UT. A bolha é vista se formando desde o primeiro painel superior à esquerda, evoluindo para Leste e desenvolvendo múltiplas estruturas e bifurcações. As imagens foram tratadas e as estrelas removidas.

Fonte: Imagens tratadas e cedidas gentilmente por Cristiano Wrasse.

Nesta perspectiva, o LTIAM (*Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring*) é um modelo que foi desenvolvido para se estudar as anomalias ionosféricas, visto que ele identifica e calcula os gradientes ionosféricos decorrentes da passagem dessas irregularidades na ionosfera. Inicialmente o modelo teve um propósito bem mais técnico e voltado para a comunidade aeronauta de usuários de GPS (*Global Positioning System*) para estudar os efeitos da ionosfera no controle de tráfego aéreo e, principalmente, na

prevenção de acidentes na decolagem e aterrissagem de aeronaves nos aeroportos. Porém, diante de tamanho potencial vários trabalhos científicos começaram a ser publicados no sentido de investigar irregularidades ionosféricas e o impacto de tais perturbações nos posicionamentos obtidos por GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (LUO et al., 2002; PULLEN et al., 2009; DATTA-BARUA, 2002; 2010; LEE et al., 2011, 2012, BANG; LEE, 2013).

O Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) refere-se de forma geral à constelação de satélites que fornecem serviços de posicionamento, navegação e tempo normalmente em uma base global. Enquanto que a rede americana NAVSTAR GPS (*Navigation Satellite with Time And Ranging*) é uma das mais conhecidas, outras bases foram lançadas por outros países, como por exemplo, a GLONASS (*Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*) operada pela Rússia, a BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*) e a Galileu, ambas em fase de implementação operadas respectivamente pela China e União Europeia. Dentre as observáveis básicas do GPS, a pseudodistância e a fase da portadora são utilizadas para o cálculo do conteúdo eletrônico total - TEC (*Total Electron Content*). No Brasil, a rede utilizada para o estudo realizado nesta Tese foi a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

O LTIAM foi utilizado para monitorar de forma automática as irregularidades ionosféricas, e a partir dele inferir as velocidades das derivas zonais das irregularidades percebidas, simultaneamente, por duas estações receptoras de dados GNSS próximas uma da outra. Desse modo, a utilização deste modelo para estudos de bolhas de plasma se faz pioneiro. O modelo foi adaptado para o cálculo de velocidade de bolhas de plasma a partir da análise de monitoramento contínuo da ionosfera por dados de GNSS, obtidos pela rede RBMC.

Para tal propósito usamos como metodologia um procedimento chamado *Station Pair Method* ou *Two Station Method*, onde cada estação escolhida para o estudo registra a passagem da irregularidade, e a partir desse registro o algoritmo de reconhecimento de padrão, o *k means*, é utilizado. Mais detalhes sobre a metodologia estão no capítulo 4.

Sendo assim, este trabalho foi dividido em seis capítulos. O capítulo 1 trata desta breve introdução sobre o trabalho desenvolvido aqui e como está disposto o texto da Tese, além dos objetivos que nos levaram a idealizar este trabalho. O capítulo 2 refere-se à

revisão teórica sobre derivas zonais, levando em consideração suas características climatológicas. O capítulo 3 discorre sobre o modelo LTIAM, como mencionado anteriormente. O capítulo 4 descreve sobre os dados utilizados neste trabalho, bem como sobre a metodologia que empregamos para alcançar os objetivos do nosso plano de estudo. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e a discussão dos mesmos, além da validação do modelo através da técnica de keogramas. No capítulo 6 apresentamos as conclusões finais do trabalho e algumas perspectivas de estudos futuros. E por fim, terminamos com as referências bibliográficas que usamos para escrever este trabalho.

1.1 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi calcular de forma automatizada as velocidades das derivas zonais das bolhas de plasma, em períodos geomagneticamente calmos, utilizando dados de GNSS fornecidos pela rede RBMC e processados pelo modelo LTIAM.

Objetivos específicos

- i) Alterar o modelo LTIAM de modo que tornasse possível obter automaticamente o Δt (diferença de tempo entre a passagem de uma irregularidade entre uma estação receptora e outra) e assim calcular a velocidade das derivas das bolhas de plasma. Como consequência, o LTIAM poderá ser usado para potencializar estudos de irregularidades sob a perspectiva do TEC;
- ii) Fazer um estudo estatístico dos resultados fornecidos pelo LTIAM;
- iii) Posteriormente elaborar um modelo empírico do comportamento das velocidades das bolhas de plasma, e validá-lo em testes de efetividade com dados de velocidades obtidas por airglow. O modelo empírico poderá ser

utilizado para análise do comportamento das bolhas de plasma sob a região brasileira em diversos estudos futuros;

iv) Interpretação física dos resultados obtidos.

É importante ressaltar que em termos de contribuição, a metodologia desenvolvida nesta Tese é totalmente automatizada, identifica os picos nos registros do conteúdo eletrônico total da ionosfera obtidos por satélite devido às irregularidades durante a noite por um algoritmo de reconhecimento de padrão. Além de ser a primeira vez que este tipo de metodologia é utilizado para o estudo de bolhas na região brasileira, a técnica possui grande potencial para uso em programas para monitoramento contínuo de clima espacial.

2 DERIVA ZONAL DO PLASMA IONOSFÉRICO NA REGIÃO F

Neste capítulo faremos uma breve descrição do estado da arte dos estudos sobre deriva zonal do plasma ionosférico, levando em consideração as suas características em termos de comportamento sazonal, longitude, latitude, entre outros.

A ionosfera equatorial e de baixa latitude apresenta características próprias em relação aos processos físicos dominantes em comparação com outras latitudes. Essas características se baseiam principalmente devido a baixa inclinação das linhas de campo geomagnético e a grande incidência de radiação solar que ocorre majoritariamente neste setor. Estes fatores atuam diretamente na ionização do plasma da região e nos processos de transporte resultantes em derivas (RATCLIFFE, 1960; RISHBETH; GARRIOT, 1969).

O conhecimento da ação dos campos elétricos e das derivas do plasma é fundamental para o entendimento da ionosfera terrestre. A ação dos ventos ao arrastar as partículas ionizadas na ionosfera causa como movimento principal a deriva dos íons ao longo das linhas de campo, havendo também um movimento perpendicular às linhas de campo, resultante da ação de $\vec{U} \times \vec{B}$, onde \vec{U} é a componente zonal do vento neutro da região F. Alguns dos mais importantes fenômenos da ionosfera equatorial e de baixa latitude acontecem devido ao transporte vertical do plasma gerado pelo campo elétrico zonal. Já o transporte horizontal do plasma, gerado pelo campo elétrico vertical, apresenta efeito limitado quando comparado com o transporte vertical, porém não menos abrangente, principalmente se tratando no âmbito sazonal e no estudo de algumas irregularidades que afetam a região. Sendo assim, as derivas do plasma desenvolvem um papel importante na eletrodinâmica e distribuição do plasma no sistema ionosfera equatorial-termosfera (ABDU, 2005; SCHUNK; NAGY, 2009; KELLEY, 2009).

Haerendel et al. (1992) desenvolveram uma teoria para modelar a eletrodinâmica da ionosfera equatorial com foco no período do entardecer. A abordagem deles consistia em dividir a ionosfera equatorial em duas camadas finas, as regiões E e F, ambas acopladas bidimensionalmente podendo interagir entre si através de campo eletrostático, com o potencial constante ao longo das linhas do campo magnético. Adotando-se a equação bidimensional do potencial anunciada em Haerendel et al. (1992) e a condição $\nabla \times E = 0$, Eccles (1998) produziu aproximações mais simples para os campos

elétricos vertical e zonal no plano do equador magnético. Estas formulações mais simplificadas fornecem aproximações razoáveis entre 150 e 1500 km de altitude quando comparadas com modelos numéricos rigorosos. Considerando as linhas do campo geomagnético equipotenciais, reduz o problema do campo tridimensional para bidimensional em um plano perpendicular ao campo magnético da Terra. Por simplicidade o plano escolhido é o plano equatorial magnético. Sendo assim, as coordenadas são L , como o raio, e φ como a distância Leste - Oeste. Diante deste cenário, segundo Haerendel et al. (1992) e Eccles (1998), a continuidade de corrente integrada (J) é dada por:

$$\nabla \cdot J = \frac{1}{R_{EL}} \left(\frac{\partial J_L}{\partial L} + \frac{\partial J_\varphi}{\partial \varphi} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Onde J_φ é a densidade de corrente zonal integrada ao longo do campo, enquanto que J_L é a densidade de corrente vertical integrada também ao longo do campo. Considerando as direções zonal e meridional no sistema de referência do dipolo magnético ao invés do sistema de referência geográfico, as densidades de corrente podem ser dadas por:

$$J_L = \sum P [E_L + B(L)U_\varphi^P] - \sum H [E_\varphi - B(L)U_L^H] \quad (2.2)$$

$$J_\varphi = \sum P [E_\varphi + B(L)U_L^P] + \sum H [E_L - B(L)U_\varphi^H] \quad (2.3)$$

Onde $\sum H$ é a condutividade Hall integrada, $\sum P$ é a condutividade integrada Pedersen, U_L^H e U_φ^H ventos ponderados pelas condutividades Hall e U_L^P e U_φ^P são ventos ponderados pelas condutividades Pedersen, todas calculadas ao longo das linhas de campo e integradas, sendo que U_φ^H e U_φ^P resultam dos ventos neutros zonais enquanto que U_L^H e U_L^P resultam dos ventos no plano meridional e perpendicular a B . As definições dessas quantidades também foram dadas em Haerendel et al. (1992). A equação do potencial pode ser obtida combinando as equações (2.1) a (2.3):

$$E_L = - \frac{\partial \Phi}{\partial L} \quad (2.4)$$

$$E_\varphi = - \frac{1}{L} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \quad (2.5)$$

Resultando em uma equação bidimensional do potencial, que pode ser resolvida numericamente. É importante mencionar que a validade destas equações é limitada a

baixas e médias latitudes, visto que a suposição das linhas do campo serem equipotenciais não é válida para altas latitudes. Em altas latitudes as linhas de campo não são equipotenciais por consequência de se tratar de uma região de aceleração auroral. As linhas de campo são abertas, e devido à precipitação de partículas, ocorre o deslocamento de cargas (KELLEY, 2009; KHAZANOV, 2016).

Na intenção de modelar de maneira simples o campo elétrico vertical, Eccles (1998) partiu do conceito de que o eletrojato equatorial (EEJ) domina o fluxo de corrente zonal na ionosfera de baixa latitude. Haerendel e Eccles (1992) já tinham aproximado a física do EEJ integrando a equação (2.1) ao longo de linhas do campo geomagnético cuja altitude de ápice esteja entre 80 e 150 km:

$$L^{150} J_L^{150} = - \frac{\partial I_\varphi}{\partial \varphi} \quad (2.6)$$

Onde J_L^{150} é a corrente vertical na altura do ápice da linha de campo ($Z_{eq} = 150$ km), e I_φ é a corrente zonal total contida no EEJ. Uma relação simples para a corrente vertical acima de 150 km pode ser obtida continuando a integração vertical da equação (2.1). Usando o topo do EEJ como início da integração e supondo que a derivada zonal da corrente zonal é pequena, tem-se:

$$J_L (Z_{eq} > 150) = \frac{L_{150}}{L} J_L^{150} \quad (2.7)$$

Usando as equações (2.2) e (2.7) obtém-se uma equação para o campo vertical similar a apresentada em Haerendel et al. (1992):

$$E_L = - B U_\varphi^P + \frac{\Sigma^H}{\Sigma^P} (B V_L - B U_L^H) + \frac{L^{150}}{L} \frac{J_L^{150}}{\Sigma^P} \quad (2.8)$$

A equação (2.8) ainda pode ser simplificada. A razão entre as condutividades Hall e Pedersen é aproximadamente 0,5 em altitudes acima do EEJ e praticamente nula após o desaparecimento da região E noturna. V_L e U_L^H geralmente são de mesma magnitude e sinal. Então, o segundo termo da equação torna-se muito pequeno quando comparado com o primeiro termo, além de que o último termo é pequeno para todas as regiões, com exceção da região próxima ao terminadouro solar, podendo ser ignorado. Sendo assim, a equação para a deriva zonal do plasma pode ser aproximada por:

$$V_{\varphi} = U_{\varphi}^P \quad (2.9)$$

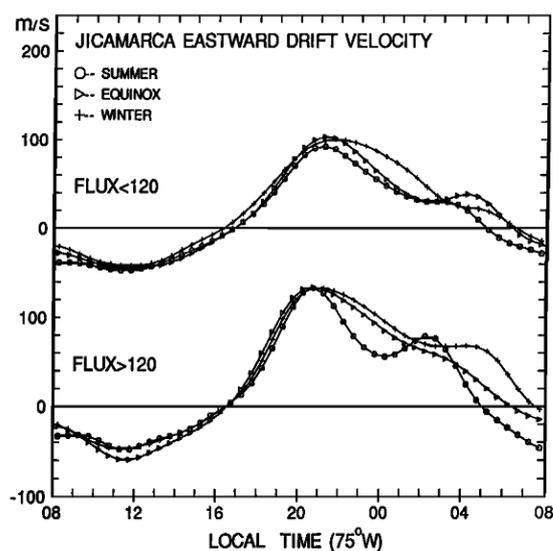
A equação (2.9) é válida para a faixa de altitude equatorial entre 150 e 1500 km.

Woodman (1972) verificou que as derivas zonais durante o dia são para Oeste com velocidades da ordem de 50 m/s, enquanto que as derivas zonais noturnas são para Leste com velocidades em torno de 130 m/s. Essa diferença de velocidade se deve ao acoplamento das regiões E e F, fazendo que as velocidades diurnas para Oeste sejam representativas do efeito dos ventos apenas da região E (FEJER et al. 1981, 1985, 1993).

Em um estudo de derivas equatoriais sobre Jicamarca, Fejer et al. (1991) mostraram que as derivas zonais do plasma não se alteram significativamente com o fluxo solar, porém, as velocidades para Leste, ou seja, durante a noite, aumentam com a atividade solar.

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram o comportamento da deriva zonal de Jicamarca em função da sazonalidade e do fluxo solar, respectivamente. Na Figura 2.1 vemos que a deriva para Oeste (negativa) durante o dia não varia muito nem com a sazonalidade e nem com o fluxo solar, e é significativamente menor do que a deriva noturna para Leste (positiva). Nota-se também que o pico antes do amanhecer acontece mais cedo (~ 0300 LT) no verão com o aumento do fluxo solar, aliás, todos os picos definidos são mais intensos para fluxo solar alto.

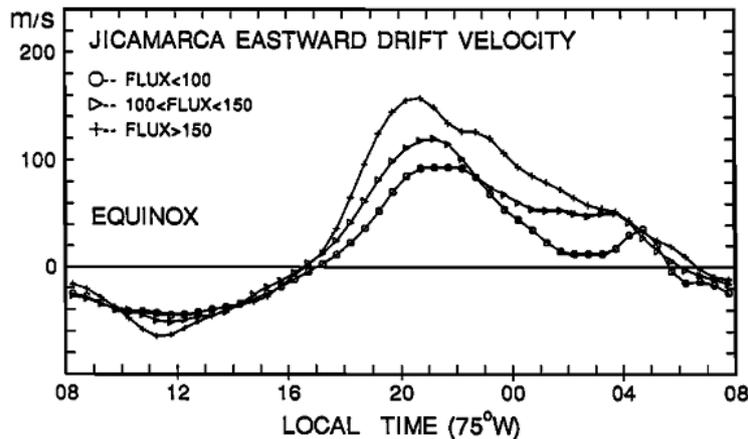
Figura 2.1: Variação sazonal da deriva zonal do plasma para períodos de baixo e alto fluxo solar.



Fonte: Fejer et al. (1991).

A Figura 2.2 apresenta a deriva zonal durante o equinócio para diferentes níveis de fluxo solar. Observa-se claramente o aumento da velocidade da deriva para Leste com o aumento de F10.7, e que durante o máximo solar a velocidade para Leste atinge valores em torno de 160 m/s.

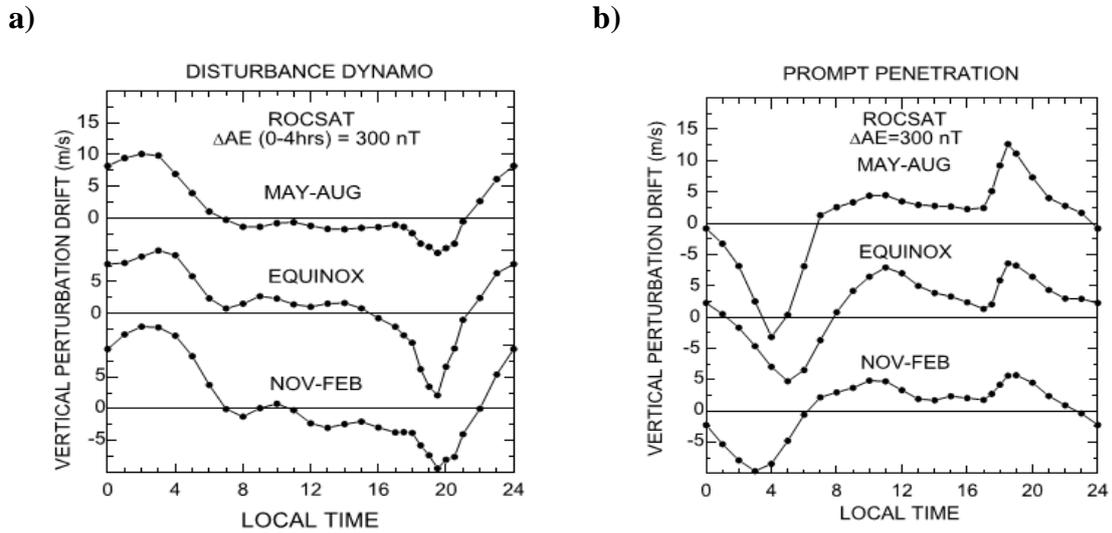
Figura 2.2: Deriva zonal média durante o equinócio para diferentes níveis de fluxo solar.



Fonte: Fejer et al. (1991).

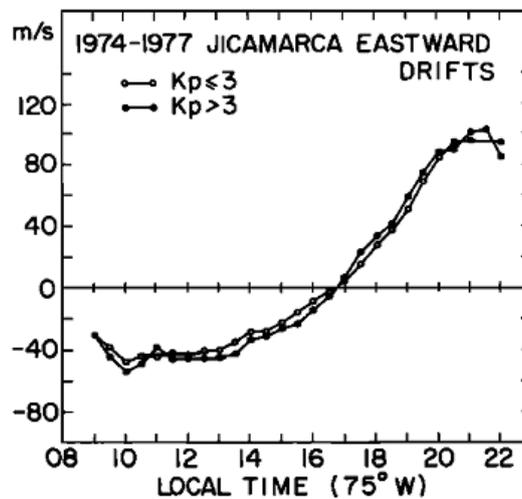
Quanto a períodos perturbados, as derivas zonais e verticais respondem diferentemente a atividade geomagnética. Os campos elétricos durante períodos perturbados produzem grandes alterações nas derivas verticais, porém pouco efeito significativo nas derivas zonais (FEJER et al., 1991b, FEJER, 1993; 1981b). Para efeitos de comparação, a Figura 2.3 mostra o comportamento da deriva vertical tanto para dínamo perturbado quanto para penetração de campo elétrico, enquanto que a Figura 2.4 mostra o comportamento da deriva zonal para dois níveis de atividade magnética. Podemos perceber que a deriva zonal praticamente não é afetada durante períodos perturbados. Porém, recentemente em um estudo de caso realizado por Santos et al. (2016) mostrou que os campos elétricos verticais podem sofrer perturbação significativa.

Figura 2.3: Comportamento da deriva vertical (a) durante dínamo perturbado e (b) durante penetração de campo elétrico.



Fonte: Fejer et al. (2008).

Figura 2.4: Deriva zonal sob Jicamarca para dois níveis de atividade magnética, mensurados pelo índice K_p .



Fonte: Fejer et al. (1981).

2.1 Climatologia das Derivas Zonais

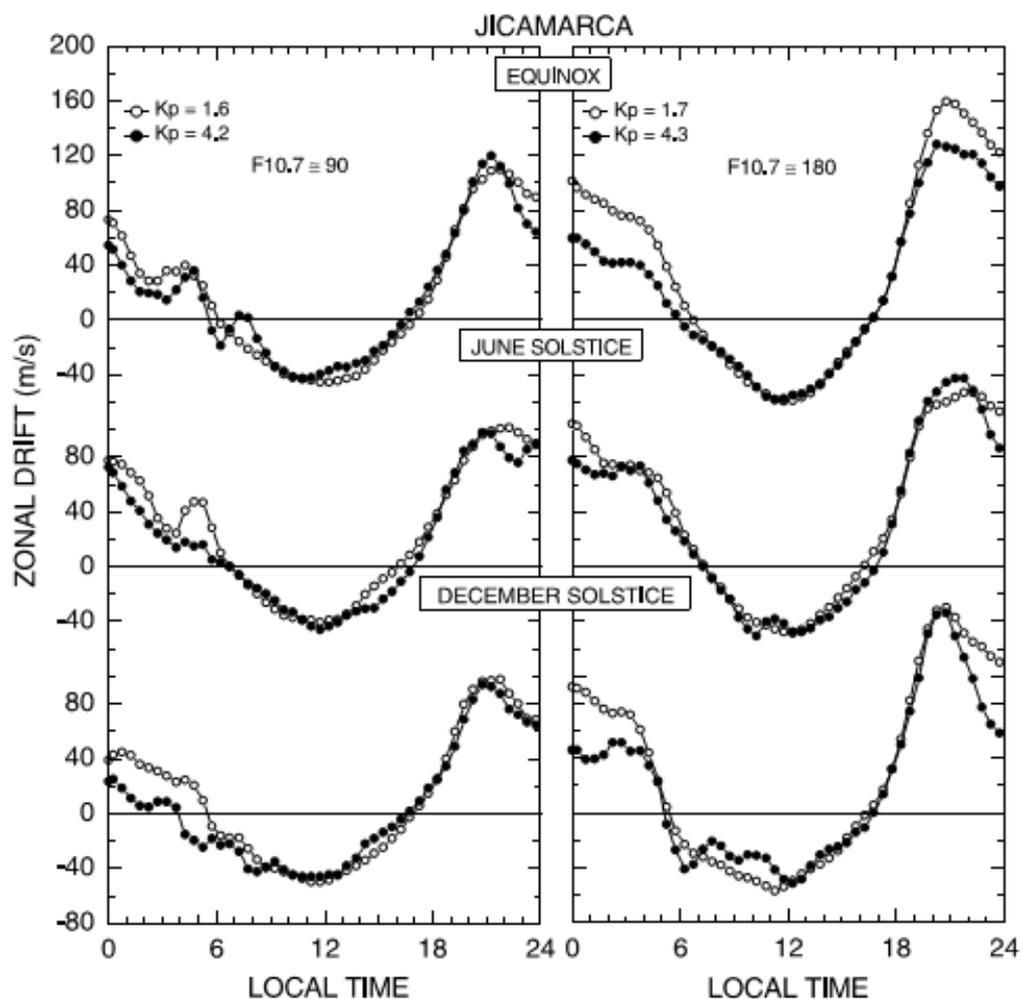
Nesta sessão trataremos de uma forma mais completa, como as derivas zonais se comportam sazonalmente, com o ciclo solar, em função da longitude, latitude, altura, entre outros.

Fejer et al. (2005) fizeram um extensivo estudo climatológico usando observações do radar de espalhamento incoerente de Jicamarca desde 1970 até 2003, além de um modelo empírico desenvolvido por eles, usando justamente esses dados. Segundo seus resultados, em períodos calmos as derivas são para Oeste durante o dia, com valores médios de 40 m/s, e apresentam pequena alteração com a estação do ano e ciclo solar. As derivas noturnas são para Leste e apresentam variabilidade diária, sazonal e com o ciclo solar.

A Figura 2.5 mostra a dependência sazonal e de ciclo solar das derivas zonais para dois níveis de fluxo solar durante período calmo e perturbado. Podemos observar que as características apresentadas são consistentes com os resultados de trabalhos científicos anteriores, tais como Fejer et al. (1985; 1991). Isso quer dizer que praticamente não há variabilidade na deriva diurna. As derivas noturnas apresentam picos de maiores velocidades para alta atividade solar, e com exceção do equinócio, as demais velocidades dos picos das derivas para Leste são praticamente coincidentes em período calmo e perturbado.

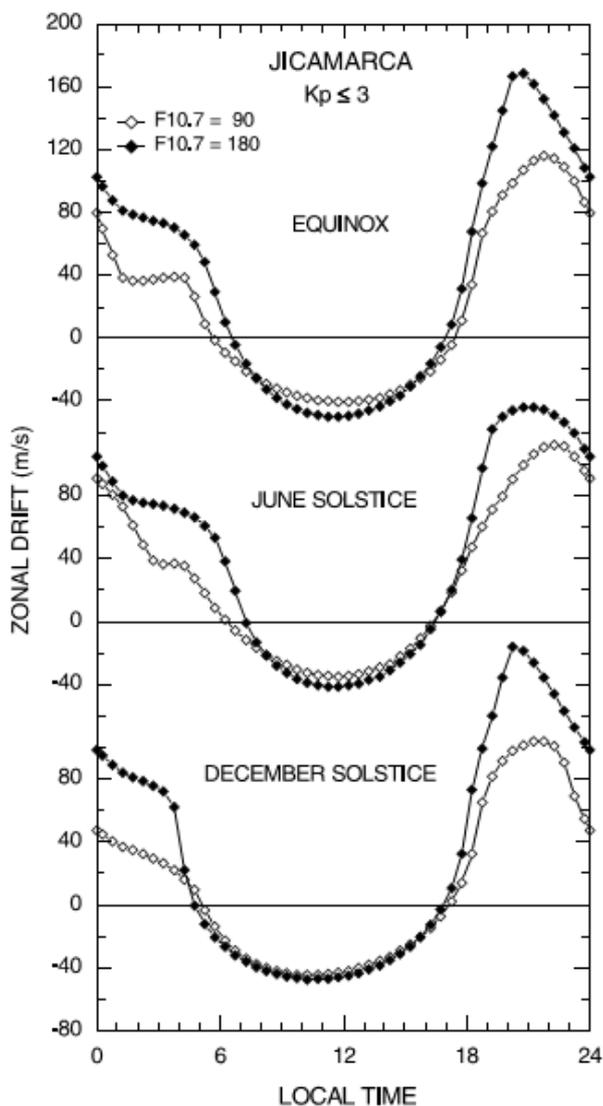
A Figura 2.6 mostra o resultado de modelo para condições de fluxo solar alto e baixo em períodos calmos. Podemos perceber que quase não há variabilidade diurna, mas que o pico da deriva noturna ocorre mais cedo na atividade solar máxima.

Figura 2.5: Sazonalidade e dependência com o ciclo solar para as derivas zonais em período calmo e perturbado, para dois níveis de fluxo solar.



Fonte: Fejer et al. (2005).

Figura 2.6: Comparações do modelo de deriva zonal de Jicamarca em período calmo para condições de fluxo solar baixo e alto.

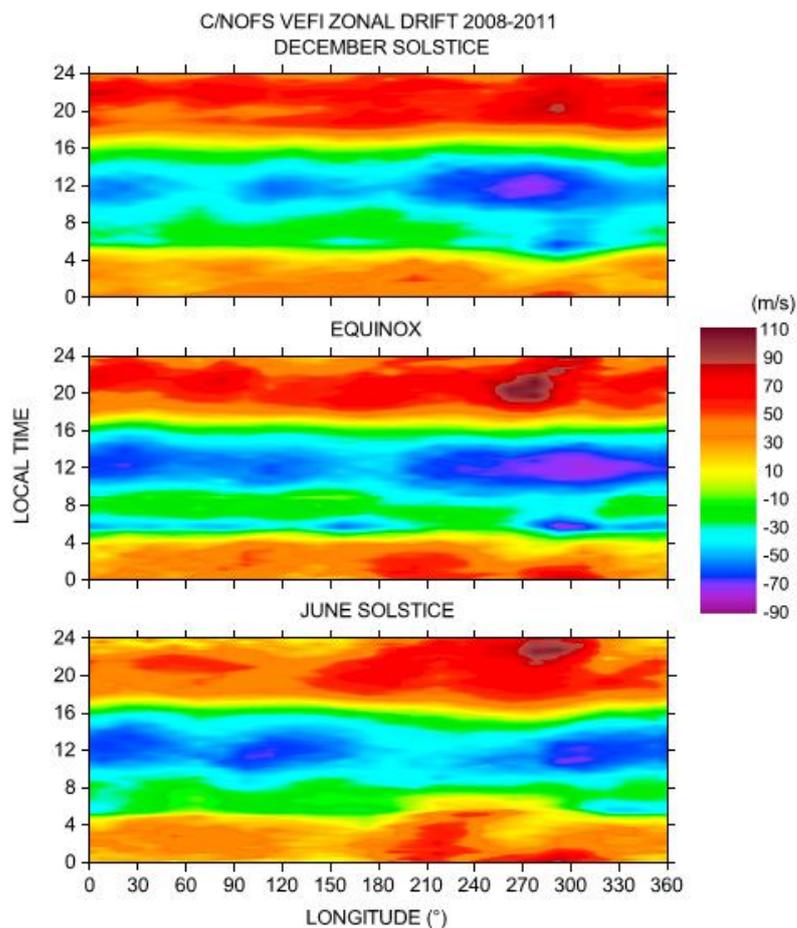


Fonte: Fejer et al.(2005).

Em relação à dependência de hora local e longitudinal, Fejer et al. (2013) utilizaram dados do satélite C/NOFS (*Communication/Navigation Outage Forecasting System*) para estudar as derivas zonais durante 2008 a 2011(mínimo solar). A Figura 2.7 mostra o comportamento das derivas no equinócio e nos solstícios de dezembro e junho em função da hora local e longitude. Podemos perceber que, durante o equinócio, há oscilações de velocidade para Oeste em quase toda extensão longitudinal. Também é notável que às 1200 LT e início da tarde as velocidades para Oeste atingem seus maiores valores no setor em torno de 210° - 360° de longitude, e menores valores entre

180° - 210°, para todas as estações. Evidenciando, portanto, sua dependência longitudinal.

Figura 2.7: Dependência sazonal e longitudinal das derivas zonais durante período calmo.



Fonte: Fejer et al. (2013).

No que se refere à altitude, Coley e Heelis (1989) estudaram as derivas zonais a partir de dados obtidos do satélite DE 2 (*Dynamics Explorer 2*) durante período de alta atividade solar ($F_{10.7}$ em torno de $190 \times 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), entre 1981 e 1983. Com dados entre janelas de 400 km, puderam estipular um perfil de altitude para $\pm 26^\circ$ de latitude. Com esse estudo, eles perceberam que para todas as altitudes a reversão da deriva de Oeste para Leste ocorre em torno das 1800 LT, e que o pico da velocidade para Leste se dá entre 2100 e 2200 LT. Também foi evidenciado que durante a noite há uma clara tendência de o fluxo ser fortemente para Leste em altitudes mais baixas.

Martinis et al. (2003) estudaram a dependência latitudinal das derivas zonais utilizando observações de airglow. Eles observaram que as derivas noturnas (Leste) são menores em Arequipa (Peru) do que em Tucumán (Argentina) após o por do sol. Porém, depois da meia-noite ocorre o oposto. Os dados foram tomados em dias que ocorreram depleções, i.e., *Spread-F*, para condições de mínimo solar, entre 1996 e 1997. A diferença das velocidades nas duas latitudes das derivas zonais decorre da diferença dos parâmetros ionosféricos distribuídos ao longo do tubo de fluxo nas duas latitudes consideradas (ventos neutros, condutividades e campos elétricos). Em um estudo anterior, Martinis et al. (2001) verificaram a dependência dos ventos neutros zonais com a latitude. O entendimento é que a dependência das derivas de plasma pode ser explicada pelo surgimento do dínamo da região F devido à dependência dos ventos neutros, a partir das 2200 até as 2300 LT.

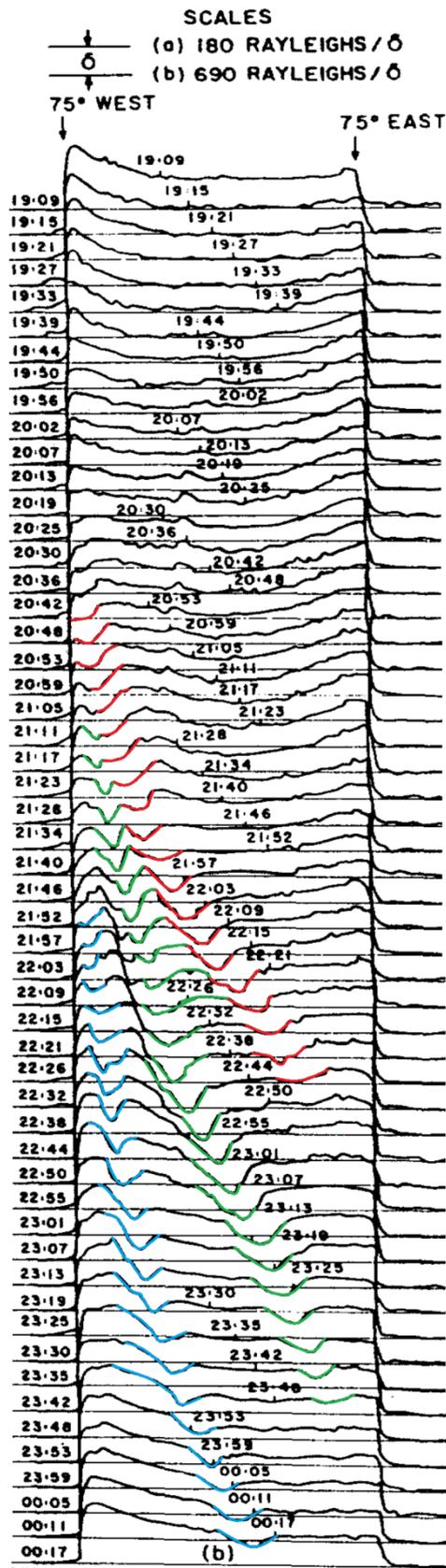
É importante ressaltar que neste trabalho, tanto a deriva zonal do plasma ionosférico quanto a deriva das bolhas de plasma são consideradas equivalentes, visto que as análises foram feitas levando em consideração comportamentos médios.

No que se refere a bolhas de plasma, as primeiras observações na região brasileira foram feitas por Sobral et al. (1980a, b) e Sahai et al. (1981) utilizando airglow. Sobral et al. (1985) realizaram um estudo pioneiro posicionando fotômetros orientados nas direções meridional e zonal. A Figura 2.8 mostra o registro de bolhas de plasma no experimento citado. De acordo com os vales nos sinais de fotômetro (realçado na figura nas cores vermelha, verde e azul) pode-se perceber o sentido de propagação das bolhas de Oeste para Leste. A importância deste trabalho deve-se à primeira verificação do movimento para Leste das bolhas de plasma.

Abdu et al. (1985a, 1985b) utilizaram polarímetros em VHF nas localidades de Cachoeira Paulista e São José dos Campos para calcular as velocidades das bolhas de plasma através de perturbação no Conteúdo Eletrônico Total (TEC).

Sobral et al. (1999) realizaram um estudo climatológico das velocidades zonais das bolhas de plasma sobre a região brasileira usando, aproximadamente, 650 noites de dados de airglow, em OI630 nm, obtidos entre o período de 1980-1992. O estudo conclui a tendência de a velocidade zonal decrescer com a hora local para o período noturno.

Figura 2.8: Primeiro registro do movimento das bolhas de plasma para o Leste.



Fonte: Adaptado de Sobral et al. (1985).

Os autores também verificaram uma clara tendência da velocidade zonal diminuir mais rápido durante o período de mínimo solar do que no máximo solar.

Terra et al. (2004) verificaram que a diferença no comportamento da velocidade zonal durante o mínimo e durante o máximo solar se deve ao fato das derivas zonais dependerem essencialmente da velocidade do vento zonal, e esta diminui de intensidade durante a fase de mínimo solar.

Pimenta et al. (2001) levaram em consideração as mudanças espaço-temporais interna das bolhas de plasma a fim de calcular as velocidades das derivas zonais usando emissão de nightglow em OI 630nm. As mudanças de velocidade das bordas das bolhas foram o parâmetro utilizado para inferir a velocidade da deriva zonal. Eles verificaram que na maioria dos casos, a borda Oeste é muito mais estável no gradiente de intensidade do OI 630 nm que a borda Leste.

A fim de investigar o comportamento latitudinal das velocidades das derivas zonais das bolhas de plasma, Pimenta et al. (2003) analisaram imagens de All-sky da estação de São João do Cariri (7.4°S, 36.5°W) e de Cachoeira Paulista (22.7° S, 45.0°W). Os resultados médios revelaram dois picos nas velocidades das derivas zonais das bolhas. Um pico próximo ao equador magnético e outro aproximadamente a 19° S de latitude. A região do vale estava localizada aproximadamente em 10°S. A redução na velocidade da deriva é atribuída à redução dos ventos neutros zonais, conforme foi confirmado a partir do modelo HWM-90.

Abalde et al. (2009) estudaram as velocidades das derivas zonais noturnas, obtidas por bolhas de plasma a partir de observações de imageadores, tanto na emissão OI 630.0 nm (220-300 km de altitude) quanto na emissão OI 777.4 nm (pico de emissão em 350 km de altura) simultaneamente. Nesse estudo foram constatadas que as velocidades zonais são maiores em OI 777.4 nm do que em OI 630.0 nm, mostrando que mesmo em regiões próximas na camada F, as velocidades não apresentam variações similares dependendo da hora local.

Durante a campanha COPEX (*Conjugate Point Equatorial Experiment*), Sobral et al. (2009) estudaram as velocidades zonais em pontos conjugados próximos ao equador geomagnético, em $\pm 12^\circ$ de latitude geomagnética, utilizando medidas de airglow e GPS. A técnica de GPS usada baseou-se em dois monitores de cintilação,

distantes 100 m um do outro, utilizados para calcular a velocidade zonal. Verificou-se que a estação ao sul (Campo Grande) do equador geomagnético apresentava maiores velocidades em comparação ao ponto conjugado ao norte (Boa Vista), devido estar mais próximo da Anomalia do Atlântico Sul, onde a intensidade do campo magnético se apresenta mais fraca. Utilizando dados medidos por VHF e GPS, De Paula et al. (2010) também verificaram que as velocidades sobre Campo Grande se apresentavam maiores que em Boa Vista, aproximadamente 12% maiores em dados de VHF e 6,5% maiores em dados de GPS, usando também cintilação.

Paulino et al. (2011) calcularam a deriva zonal das bolhas de plasma utilizando imagens de aeroluminescência em São João do Cariri para noventa e sete noites geomagneticamente calmas, considerando tanto baixa atividade solar ($F_{10.7} < 80 \times 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) quanto alta ($F_{10.7} > 140 \times 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Concluíram que as bolhas apresentam maiores velocidades no verão e em alta atividade solar.

Para o trabalho desenvolvido nesta Tese também foram considerados dias calmos, onde o $\sum Kp \leq 24$, porém apenas para atividade solar de moderada a alta, onde $F_{10.7} \geq 130$ s. f. u (*solar flux units*). Cada s.f.u equivale a $10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

Além do cálculo das derivas zonais das bolhas de plasma a partir de dados obtidos de instrumentos, vários trabalhos abordaram o tema em estudos teóricos e de modelagem (ANDERSON; HAERENDEL, 1979; HAERENDEL et al., 1992; ÇAKIR et al., 1992; HAERENDEL; ECCLES, 1992; ECCLES, 1998; ARRUDA et al., 2006, SANTOS et al., 2016). Para o caso do trabalho desenvolvido nesta Tese foi utilizado o modelo LTIAM (*Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring*) para monitorar as irregularidades ionosféricas, e a partir dele inferir as velocidades das derivas zonais das irregularidades percebidas, simultaneamente, por duas estações receptoras de dados GNSS próximas uma da outra. O capítulo seguinte aborda maiores detalhes sobre o LTIAM.

3 O MODELO LTIAM

Neste capítulo falaremos sobre o LTIAM, porém uma breve introdução acerca da necessidade de elaboração deste dispositivo é necessária.

O LTIAM (*Long-Term Ionospheric Anomaly Monitoring*) é uma ferramenta usada para monitorar anomalias ionosféricas. Este modelo foi desenvolvido pelo Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia – KAIST (*Korean Advanced Institute of Science and Technology*) em parceria com a empresa de consultoria e engenharia Tetra Tech AMT, para ser usado pelo departamento de defesa aérea norte-americano, nos EUA. Ele foi concebido para estudar as características ionosféricas anômalas para o desenvolvimento do sistema GBAS (*Ground-Based Augmentation Systems*), considerando principalmente a questão da segurança aeroviária nacional. O sistema GBAS é um sistema destinado à melhoria da acurácia e integridade da informação para a navegação por satélites do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Tanto o sistema GBAS quanto o LAAS (*Local Area Augmentation System*) fornecem suporte a aeronaves em voos e durante a aterrissagem com o monitoramento de possíveis falhas ou ameaças que possam apresentar um potencial risco ao sistema. A integridade da informação permite que os usuários do GBAS possam eliminar os satélites que foram afetados por falhas de sistema com base no cálculo da posição e computação dos limites de erro com alta confiabilidade, o que conduz a segurança nas operações de aproximação e aterrissagem em tempo real (JUNG; LEE, 2012).

Falhas ou ameaças ao sistema podem representar riscos à integridade dos usuários. Dentre estas ameaças, a mais prejudicial ao sistema é causada pela ionosfera durante tempestades ionosféricas (ENGE, 1994; MONICO, 2000; DATTA-BARUA, 2002; 2010; LUO et al., 2002). Devido aos íons e elétrons livres presentes na região, os sinais eletromagnéticos, como os transmitidos por GPS, são refratados enquanto atravessam a ionosfera. O principal efeito desta refração é o atraso na chegada do sinal em relação a um sinal idêntico cuja trajetória atravessasse o vácuo. O atraso ocorre em virtude do meio variar sensivelmente o seu próprio índice de refração. A esse parâmetro damos o nome de gradiente espacial ionosférico. Dado que o sistema de posicionamento por satélite usa o tempo de propagação das ondas de rádio para estimar as distâncias, quaisquer mudanças na velocidade de

propagação são diretamente relacionadas a erros de posicionamento. O índice de refração do sinal n e o índice de refração do grupo n' podem ser expressos por:

$$n = 1 - \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (3.1)$$

$$n' = 1 + \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (3.2)$$

Onde e é a carga do elétron, n_e a densidade eletrônica, m_e a massa do elétron, ϵ_0 a constante elétrica e f a frequência. A velocidade de fase v e a velocidade de grupo das ondas de rádio v' são definidas por:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.3)$$

$$v' = \frac{c}{n'} \quad (3.4)$$

Dada a relação $n < 1$ e $n' > 1$, a propagação da fase de uma onda de rádio no plasma ionosférico sofre um avanço enquanto que a propagação do grupo sofre um atraso em relação a propagação no vácuo. Como o tempo de propagação está relacionado com o inverso da velocidade de propagação integrada entre o satélite e o receptor, o atraso de grupo τ causado pela ionosfera é:

$$\tau = \int_{sat}^{rec} \frac{n' - 1}{c} dl \quad (3.5)$$

Tal atraso causa um erro no cálculo da distância entre o satélite e o receptor, o qual pode ser dado por:

$$d = \frac{40,3}{f^2} \int_{sat}^{rec} n_e dl \quad (3.6)$$

Sendo assim, o erro na distância obtida ao usar a fase fica:

$$\phi = \int_{sat}^{rec} (n - 1) dl = -\frac{40,3}{f^2} \int_{sat}^{rec} n_e dl \quad (3.7)$$

Onde, por definição, $\int_{sat}^{rec} n_e dl$ representa o TEC.

Podemos perceber que tanto o atraso de grupo quanto o avanço de fase são proporcionais ao TEC entre o satélite e o receptor e que possuem valores idênticos, porém com sinais trocados. Como o TEC e a frequência são valores positivos, o atraso de fase é sempre negativo. Isto significa que a fase da portadora medida pelo GPS se encurta, enquanto que a pseudodistância se alonga (TAKEYASU et al., 2009). Deste modo, os atrasos causados pela ionosfera presentes na pseudodistância e fase da portadora podem ser causados por altos valores de gradientes espaciais ionosféricos, principalmente durante tempestades geomagnéticas. Para o setor equatorial e de baixas latitudes os gradientes ionosféricos também são causados pelas bolhas de plasma ionosféricas.

O gradiente espacial ionosférico (dI/dx) normalmente é expresso como a variação da distância entre o satélite e o receptor devido ao atraso ionosférico por cada quilômetro horizontal, e é indicado em unidades de mm/km (TAKEYASU et al., 2009). Assumindo que o gradiente ionosférico espacial não varia com o tempo, a faixa de erro máximo δI na linha entre o satélite e a rede de receptores pode ser expresso por:

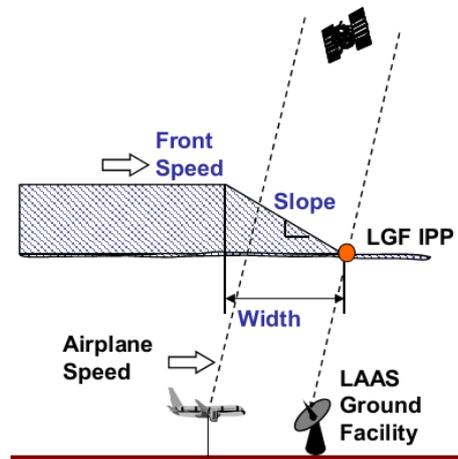
$$\delta I \cong \frac{dI}{dx} (x + 2\tau) \quad (3.8)$$

Onde x representa a separação entre a estação receptora de referência e a aeronave, e 2τ representa os efeitos da suavização do código de pseudodistâncias, o que normalmente é usado para reduzir o ruído e os erros de multicaminhos nas medidas de pseudodistâncias.

O gradiente espacial ionosférico anômalo (também conhecido por frente ionosférica, ou *slope*) ocorrido durante tempestades magnéticas é representado como uma inclinação linear espacialmente semi-infinita ou “frente” se movendo com velocidade constante, como mostrado na Figura 3.1, representado por *slope*. No que diz respeito aos usuários, o sistema precisa oferecer o erro máximo no posicionamento causado pelos mais severos gradientes. Desta forma, por exemplo, um piloto de aeronave poderia, previamente, estar ciente de que a sua localização possui um determinado valor de desvio. Nos casos em que as variações atinjam valores superiores ao desvio, o piloto poderia tomar a decisão de desativar o sistema e fazer aterrissagem em modo manual.

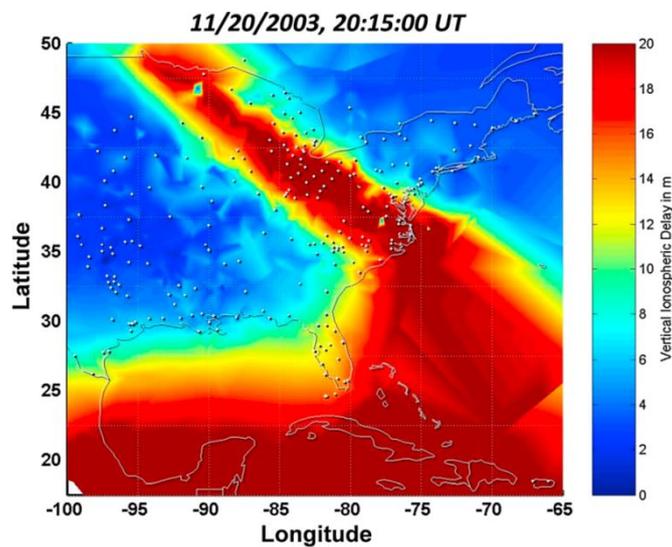
A Figura 3.1 mostra o gradiente espacial ionosférico anômalo em um corte lateral. Porém a designação de frente ionosférica é melhor percebida na Figura 3.2, a qual mostra o aumento do atraso ionosférico se propagando como se fosse uma onda.

Figura 3.1: Ilustração de um usuário da rede LAAS sendo impactado por uma frente de onda ionosférica.



Fonte: Jung; Lee (2012).

Figura 3.2: Aumento do atraso ionosférico durante a tempestade ionosférica de 20 de novembro de 2003.



Fonte: Pullen et al., 2009.

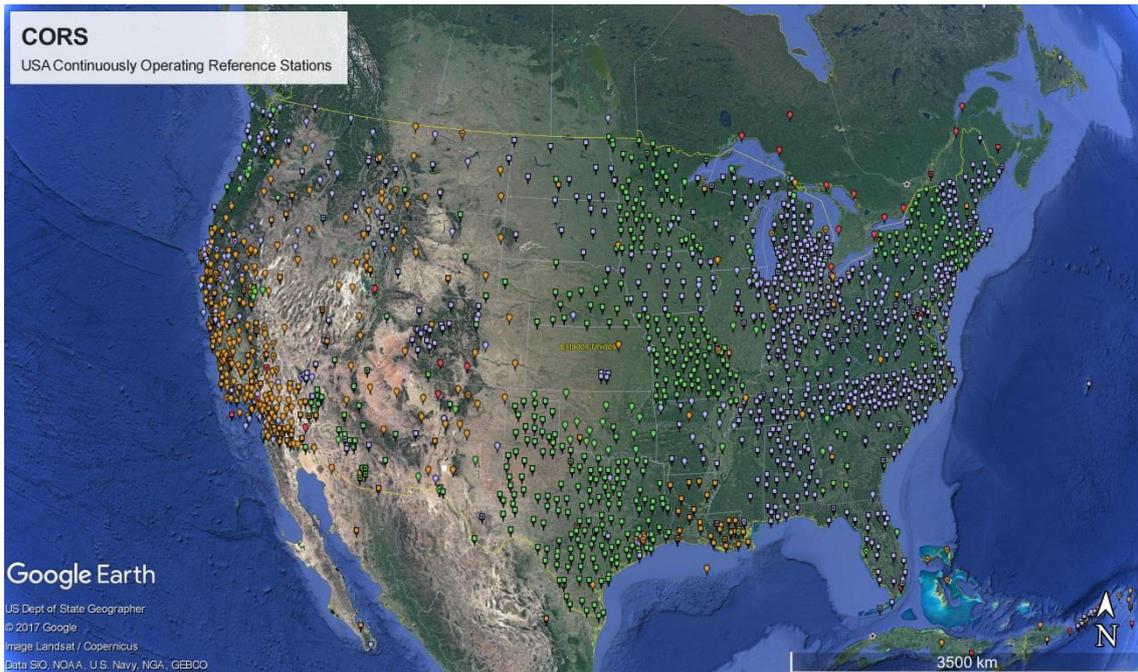
Durante tempestades geomagnéticas o comportamento da ionosfera é bastante afetado por penetração de campos elétricos, alterações nos ventos neutros e na composição termosférica, o que resulta em mudanças nas taxas de produção e

perda. Os ventos neutros perturbados alteram os campos elétricos da região F através do mecanismo de dínamo perturbado. Estes campos elétricos perturbados, após o entardecer, podem desestabilizar o plasma produzindo irregularidades, que por sua vez causam fortes variações no TEC (BLANC; RICHMOND, 1980; BUOSANTO, 1999).

Quando os sinais de GPS atravessam regiões de pequena escala onde a densidade do plasma muda rapidamente, o sinal é espalhado e difratado. O que conduz a rápidas flutuações aleatórias na amplitude ou fase dos sinais, conhecido como cintilação ionosférica. Fortes cintilações podem causar perdas ou até o desaparecimento completo do sinal (YOON; LEE, 2014). Por este motivo, encontrar meios para prever grandes gradientes espaciais ionosféricos e mitigar os erros nos dados fornecidos pelo GNSS tornou-se uma das prioridades para a comunidade aeronauta tanto em nível técnico quanto acadêmico. Neste sentido o LTIAM foi desenvolvido como ferramenta para dar suporte ao modelo de ameaça ionosférica da rede americana CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) (DATTA-BARUA, 2010; JUNG; LEE, 2012). A Figura 3.3 mostra a distribuição espacial da rede CORS, vista pelo Google Earth.

O LTIAM é composto basicamente de três etapas principais: a coleta de dados externos, o processamento interno e a validação manual. As duas primeiras etapas são procedimentos completamente automatizados, enquanto que o último necessita da intervenção do usuário. Os detalhes de cada etapa estão descritos na Figura 3.4.

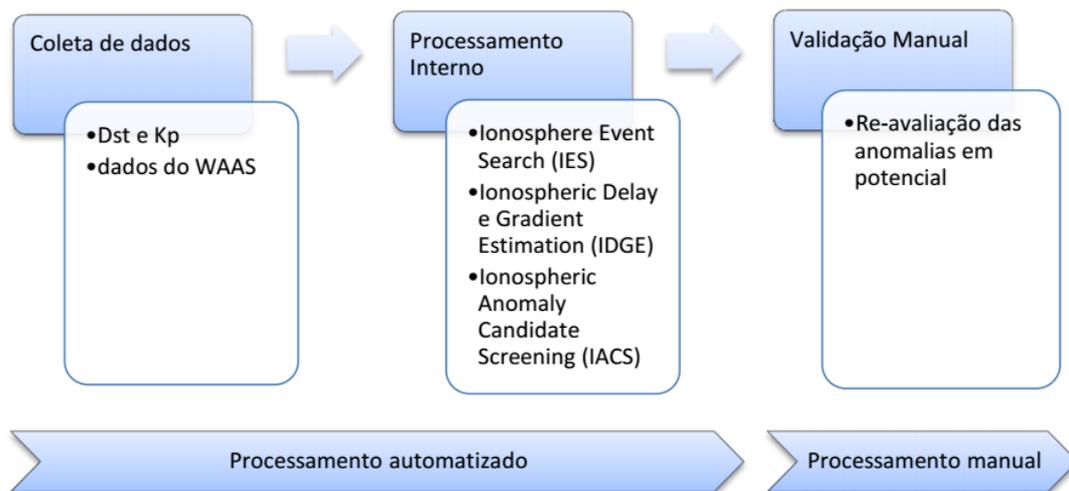
Figura 3.3: Rede fixa de estações receptoras de dados GNSS/GPS dos EUA.



As cores laranja, verde e lilás representam os receptores que operam com a resolução temporal de 1, 5 e 15 segundos, respectivamente.

Fonte: Google Earth e NOAA (<https://www.ngs.noaa.gov/CORS/>), acessado em 13/07/2017.

Figura 3.4: Fluxograma de funcionamento do LTIAM.



Fonte: Produção própria.

O LTIAM inicialmente reúne informações de dois índices de atividade geomagnética global: o Kp e o Dst a partir dos sites do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e do World Data Center for Geomagnetism da universidade de Kyoto. Além desses dados, a ferramenta também acessa os relatórios do WAAS (*Wide Area Augmentation System*) desenvolvido pela FAA (*Federal Aviation Administration*) com o objetivo de melhorar a precisão, integridade e disponibilidade de dados para os usuários da aviação. Os relatórios do WAAS fornecem os atrasos ionosféricos e respectivos erros em intervalos de cada três minutos, no caso da rede CORS (LEE et al, 2010). O segundo passo é um processamento interno de três rotinas chamadas de Ionosphere Event Search (IES); Ionospheric Delay and Gradient Estimation (IDGE) e Ionospheric Anomaly Candidate Screening (IACS).

O IES processa os dados coletados em uma base diária e sinaliza os períodos potenciais de condições ionosféricas severas para posterior análise automatizada. O IDGE fornece estimativas precisas dos atrasos ionosféricos a partir dos dados de frequência dual de GPS da rede de estações receptoras do sinal, no caso do estudo realizado neste trabalho, os dados são obtidos a partir de arquivos Rinex fornecidos pela rede RMBC (Ver Figura 3.5). O IACS por sua vez, busca por gradientes severos que excedam o limite padrão, geralmente 300 mm/km (DATTA-BARUA, 2002) realizando uma triagem de possíveis candidatos à “anomalia ionosférica”. Anomalias ou ameaças ionosféricas são o que a comunidade aeronauta considera como fatores ionosféricos que podem afetar os sinais de GPS e assim prejudicar o sistema de navegação, ou seja, são tempestades ionosféricas. O candidato à anomalia é classificado por comparação com dados de tempestades ionosféricas pré-existentes na ferramenta, devidamente organizados levando em consideração a fase do ciclo solar (LEE et al., 2012).

Figura 3.5: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

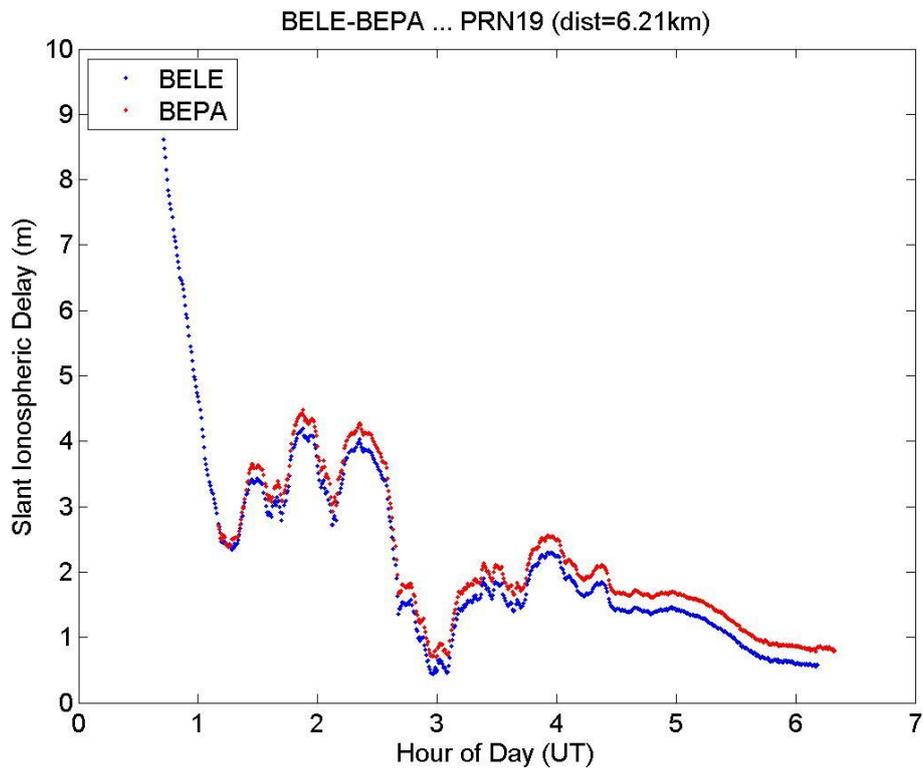


Fonte: Google Earth e RBMC, acessado em 13/07/2017.

Uma vez que a ferramenta automaticamente isola um conjunto de dados aparentemente anômalo é necessária uma inspeção manual para validar se os eventos observados são de fato devido à ionosfera ou não, pois em alguns casos ocorrem falhas de receptores ou erros de dados. Posto que o evento anômalo venha a ser validado por análise manual, ele é reportado periodicamente junto com as estatísticas de gradiente. No caso dos valores de gradientes espaciais ionosféricos ultrapassarem os limites de segurança previamente definidos, passa-se a considerar uma mudança no modelo de risco (JUNG; LEE, 2012).

A Figura 3.6 apresenta um exemplo de saída do LTIAM para o dia 08/01/2015. As estações BELE e BEPA ficam em Belém (PA) e distam 6,21 km entre si. O eixo da abscissa significa a hora em tempo universal, enquanto que a ordenada significa o atraso ionosférico em metros. As cores azul e vermelho indicam o registro do satélite em cada uma das estações.

Figura 3.6: Exemplo de saída do LTIAM



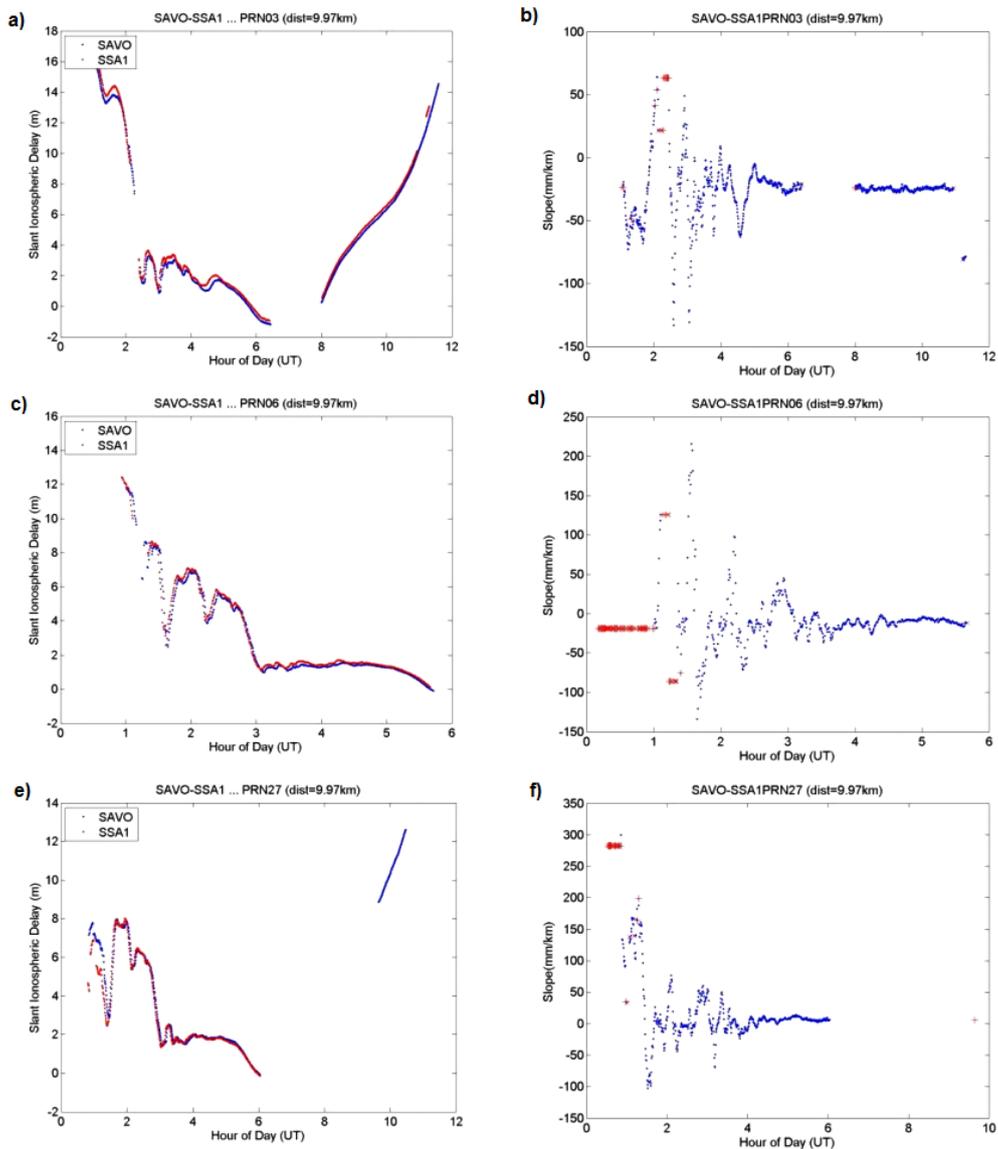
Fonte: Produção própria

Além do registro percebido em cada estação, o LTIAM também fornece em forma gráfica outras informações, como o gradiente espacial ionosférico, o ângulo de elevação do PRN (sigla para *Pseudo-Random Noise*) em graus, e o ângulo de azimute do PRN. Cada satélite da constelação de GNSS é identificado pelo seu PRN, que significa a sequência em que cada satélite transmite de forma a diferenciá-lo dos demais satélites da constelação.

A Figura 3.7 mostra alguns exemplos da saída do modelo LTIAM para as estações SAVO e SSA1, da rede RBMC, para o dia 01 de janeiro de 2014. Podemos ver a passagem da irregularidade nas estações a partir de três satélites diferentes, o PRN03, o PRN06 e o PRN27. Os painéis do lado esquerdo mostram os sinais de GNSS percebidos nas estações SAVO e SSA1, semelhante ao gráfico visto na Figura 3.6. Os painéis do lado direito mostram o gradiente espacial ionosférico anômalo. Podemos perceber que no momento da passagem da irregularidade o gradiente se mostra bastante irregular.

A necessidade de se encontrar valores que demonstrassem a partir de quanto o atraso ionosférico poderia ser considerado anômalo motivou diversos trabalhos. Lee et al. (2007) anunciaram que valores abaixo de 5 mm/km poderiam ser considerados residuais e, portanto negligenciáveis. Posteriormente, um estudo realizado por Datta-Barua et al. (2010) baseou-se em dados de GNSS disponíveis em vários locais, e como resultado, constataram que o atraso do sinal até a portadora L1, em termos de gradiente ionosférico, pode ser de poucos mm até 50 mm por quilômetro. O modelo usado pelo LAAS, por exemplo, já considera esse erro em seus cálculos. Porém, em períodos de alta atividade solar, com ocorrência de ejeções de massa coronal ou *flares* já foram encontrados gradientes de até 412 mm/km para satélites em alta elevação e 360 mm/km para baixa elevação, como foram registrados durante a tempestade ionosférica de novembro de 2003 (PULLEN et al., 2009; LEE et al., 2011). Neste trabalho foram consideradas apenas estruturas provocadas por gradientes acima de 100 mm/km.

Figura 3.7: Exemplos de saída do LTIAM



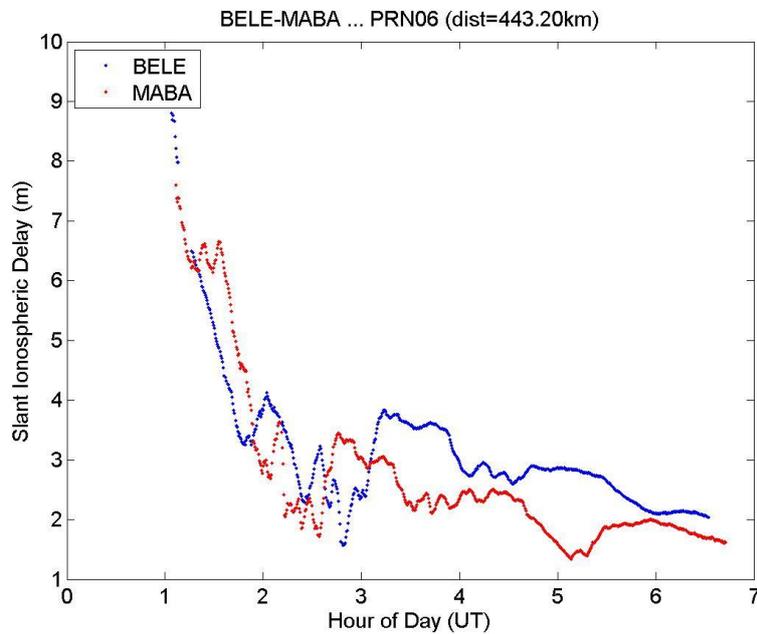
Nos painéis da esquerda estão representados os sinais de GNSS percebidos nas estações SAVO e SSA1 para o dia 01 de janeiro de 2014. Os painéis do lado direito mostram as perturbações causadas devido a presença de bolhas.

Fonte: Produção própria

Para detectar comportamento anômalo utilizando o LTIAM é imprescindível que a distância entre o receptor e a aeronave ou entre um receptor e outro não ultrapasse a margem de 50 km, visto que este perímetro se configura como condição limítrofe sob a qual a confiabilidade do método é observada. Por este motivo, esta distância foi considerada neste trabalho como um fator limitante para a escolha do par de

estações receptoras de dados GNSS da rede RBMC. A Figura 3.8 mostra a passagem de irregularidade registrada em duas estações distintas.

Figura 3.8: Exemplo de saída do LTIAM



Fonte: Produção própria

As estações BELE (Belém) e MABA (Marabá) situam-se no Pará, mas distam entre si em mais de 400 km. Estações muito distantes entre si podem registrar a mesma irregularidade, mas apresentar comportamentos diferentes em seu registro de satélite por haver a possibilidade da estrutura da irregularidade mudar durante o percurso entre uma estação e outra. Sendo assim, uma análise utilizando estações muito distantes não seria proveitosa pelo fato de dificultar algum reconhecimento de padrão necessário para assegurar que as estações estejam registrando a mesma irregularidade.

No capítulo que segue, os critérios de seleção de dados são apresentados juntamente com o método que foi elaborado e incorporado ao LTIAM a fim de reconhecer tais padrões de irregularidades e efetuar de forma automatizada cálculos de velocidade destas estruturas.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo descreveremos sobre os dados utilizados neste trabalho, bem como apresentaremos a metodologia implementada no modelo, respeitando as suas limitações e definindo a sua cobertura para o caso de irregularidade do tipo bolha de plasma.

4.1 Sobre os dados

Neste trabalho foram utilizados dados em formato RINEX obtidos das estações receptoras de GNSS escolhidas para o estudo. E nesta etapa algumas dificuldades foram encontradas, seja por não haver estações nas regiões anteriormente desejadas, seja por haver falhas de dados em grande parte de outros pares encontrados. Testes foram feitos com diversos pares de estações, sempre respeitando o limite de 50 km de distância entre elas, no Brasil e no Peru. O par que mostrou uma maior cobertura de dados para os dias escolhidos para o estudo, respeitando os critérios de F10.7 e Kp foi o par SAVO – SSA1, da rede RBMC. Estas estações se encontram em Salvador (BA) e distam 9,97 km entre si. A Figura 4.1 mostra as localizações destas estações em coordenadas geográficas e magnéticas. As coordenadas magnéticas foram obtidas a partir do IGRF, levando em consideração o caráter mutável das coordenadas, foi tomado como base o ano de 2013.

Figura 4.1: Localização das estações receptoras de dados GNSS utilizadas neste estudo.



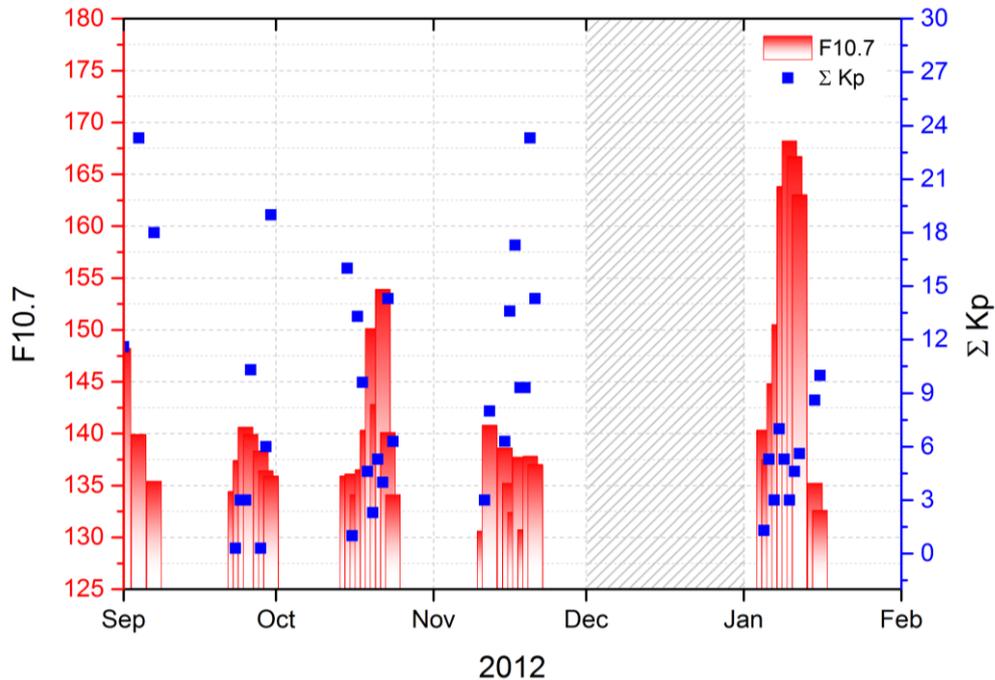
Fonte: Google Earth e RBMC, acessado em 13/07/2017.

Como o objetivo deste estudo é calcular de forma automatizada a velocidade das irregularidades do tipo bolha de plasma, alguns critérios foram estabelecidos. Em relação à atividade solar, visto que a maior ocorrência de bolhas acontece em níveis altos e médios de fluxo solar (TERRA et al., 2004), definimos a seleção dos dados para dias com valor de $F10.7 \geq 130$ s.f.u. A fim de minimizar os efeitos de perturbações devido a alguma tempestade magnética, também foi estabelecido que os dias de estudo devessem obedecer ao critério do $\Sigma Kp \leq 24$. As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 representam o banco de dados utilizados neste estudo: 2012, 2013, e 2014 respectivamente, com os seus respectivos valores diários de F10.7 e ΣKp . Os dados representados em barras referem-se aos valores de F10.7 na ordenada da esquerda, enquanto que os dados representados em scatter representam os valores do ΣKp na ordenada da direita. As áreas hachuradas nas Figuras 4.2 e 4.3 representam uma lacuna no banco de dados. Não significa que não houve registros de bolhas de plasma nesses meses, mas sim que os dias dos eventos não cumpriram os requisitos estabelecidos neste estudo para valores mínimos de F10.7 e máximos do ΣKp . Como pode ser visto nas Figuras citadas, o banco de dados de cada ano estende-se de setembro de referido ano até janeiro do ano seguinte.

Sobral et al. (2002) verificaram que a maior taxa de ocorrência de bolhas de plasma durante alta atividade solar dá-se entre os meses de setembro a abril. Para garantir uma cobertura de dados representativos dos equinócios e solstícios de verão, este estudo abrangeu os anos de 2012, 2013 e 2014 partindo do mês de setembro até janeiro de ano seguinte. Utilizando 10 dias como representativos de cada mês, todos com ocorrência de bolhas de plasma devidamente verificados por imageador.

A Figura 4.5 mostra que os anos escolhidos para este estudo representam o máximo solar, que para o ciclo 24 apresentou dois picos. O banco de dados está representado pela área hachurada em amarelo.

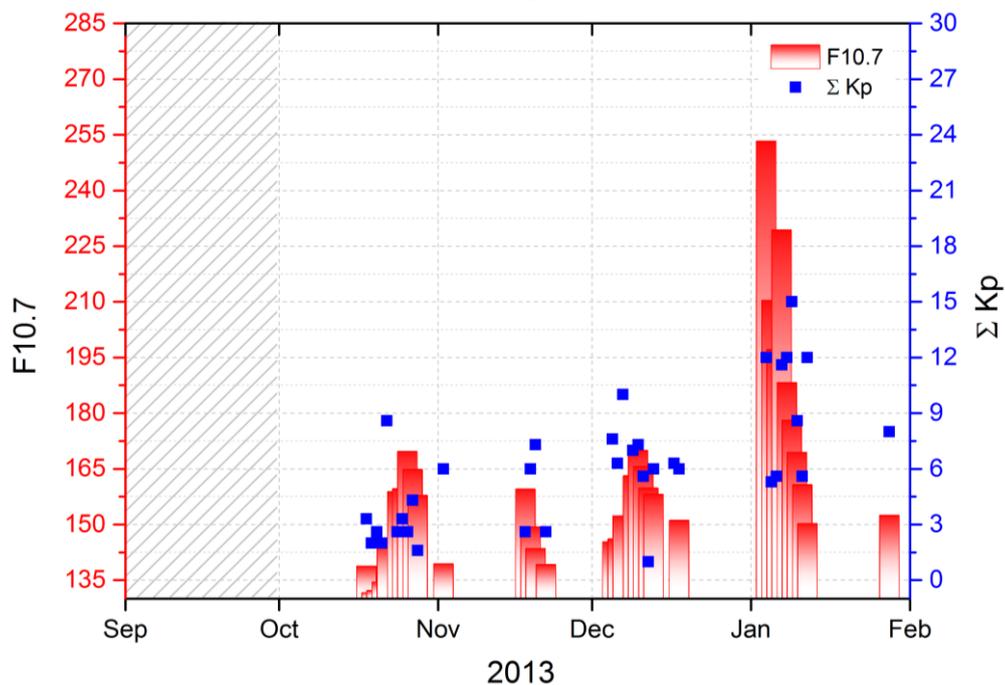
Figura 4.2: Base de dados para o ano de 2012



Banco de dados referente ao ano de 2012, sendo que o mês de janeiro refere-se a 2013. O gráfico de barras representa os valores de F10.7 na ordenada da esquerda, enquanto que os dados em scatter representam os valores do ΣKp na ordenada da direita.

Fonte: Produção própria.

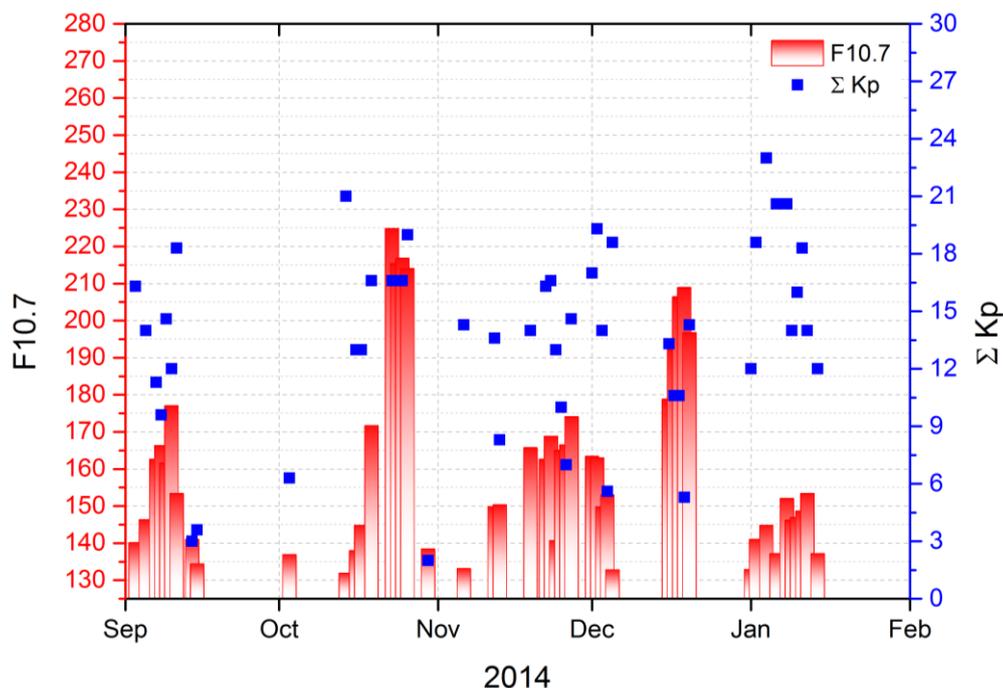
Figura 4.3: Base de dados para o ano de 2013



Banco de dados referente ao ano de 2013, sendo que o mês de janeiro refere-se a 2014. O gráfico de barras representa os valores de F10.7 na ordenada da esquerda, enquanto que os dados em scatter representam os valores do ΣKp na ordenada da direita.

Fonte: Produção própria.

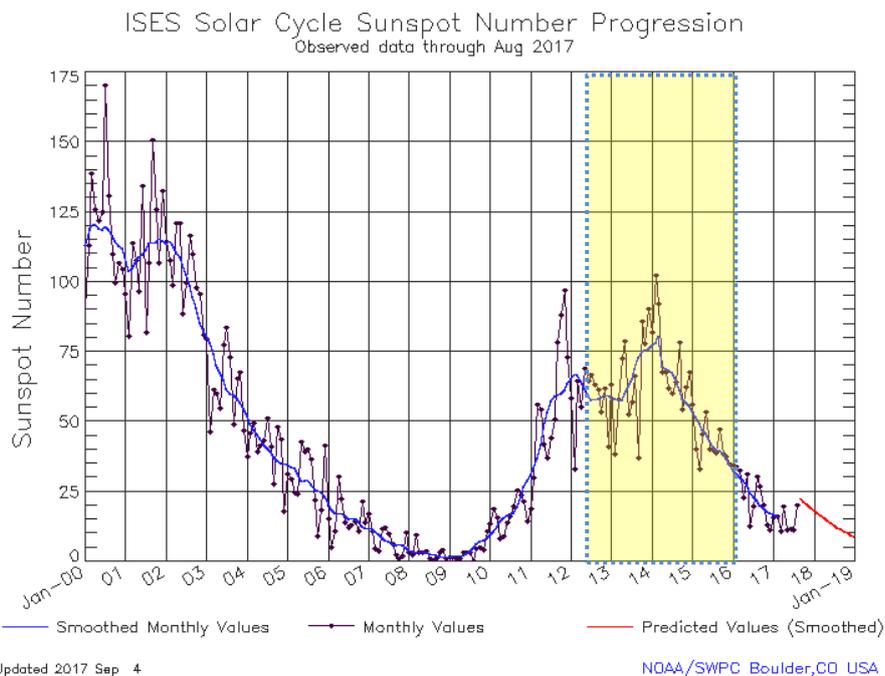
Figura 4.4: Base de dados para o ano de 2014



Banco de dados referente ao ano de 2014, sendo que o mês de janeiro refere-se a 2015. O gráfico de barras representa os valores de F10.7 na ordenada da esquerda, enquanto que os dados em scatter representam os valores do ΣKp na ordenada da direita.

Fonte: Produção própria.

Figura 4.5: Ilustração do posicionamento do banco de dados no ciclo solar 24.



Os anos escolhidos para o estudo estão destacados pela área hachurada em amarelo.

Fonte: Adaptado do NOAA, acessado em 20/09/2017.

4.2 Sobre a Metodologia

Um número considerável de modelos tanto regionais quanto globais baseados na densidade eletrônica já foi desenvolvido tanto no âmbito teórico (ROBLE; RIDLEY, 1994; BAILEY; BALAN, 1996; HUBA et al., 2000; CROWLEY, 2006; HUBA et al., 2008, SOUZA et al., 2013) quanto no empírico (BILITZA, 2001; PI et al., 2003; SCHUNK, 2004; BUST et al., 2007; BILITZA et al., 2012). Porém, esses modelos não conseguem assinalar os impactos das anomalias ionosféricas no erro ionosférico δI para os usuários da aviação com altos níveis de confiabilidade necessários para manter a integridade. Nesta perspectiva, o modelo utilizado neste trabalho, o LTIAM, é o mais eficiente e, diante do acesso ao seu código fonte, ele foi adaptado para o cálculo de velocidade de bolhas de plasma a partir da análise de monitoramento contínuo da ionosfera via dados de GNSS.

Sendo assim, a metodologia desenvolvida neste trabalho é baseada em medir a velocidade das estruturas usando um par de estações receptoras de GNSS. Quando ocorrer bolha de plasma, ambas as estações registram a irregularidade. Com o LTIAM, através do algoritmo *k-means* (o qual será exposto mais adiante), é possível verificar o tempo registrado durante a passagem da irregularidade em cada uma das estações. Sendo assim, ao estimarmos a variação de tempo em que a mesma estrutura passa por entre as estações, poderemos calcular a velocidade da estrutura.

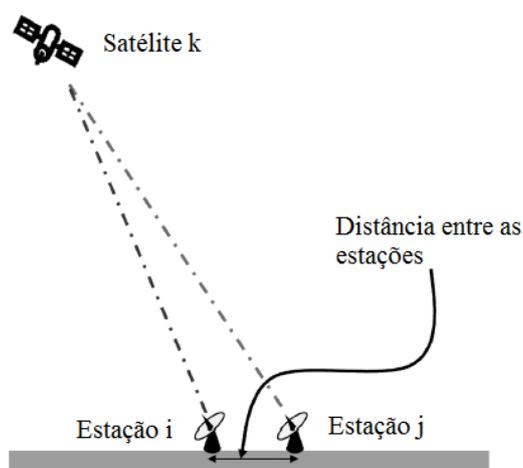
No LTIAM foi inserida uma metodologia chamada *Station Pair Method* ou *Two Station Method*, a qual já foi validada em diversos outros trabalhos (DATTA-BARUA, 2010; LEE et al., 2012, BANG; LEE, 2013), e está ilustrada na Figura 4.6. Nesta técnica, para cada tempo t o atraso em cada uma das duas estações i e j , vista pelo mesmo satélite, é diferente. O gradiente ionosférico, ∇I , entre os pares de estação é estimado dividindo a diferença entre os atrasos do sinal entre cada receptor (I) e o satélite (k) e a distância entre os receptores:

$$\nabla I = \frac{|I_i^k(t) - I_j^k(t)|}{\|x_i - x_j\|} \quad (4.1)$$

Onde x_i e x_j são as localizações das estações i e j , respectivamente. No entanto, uma alteração entre a metodologia original e a que foi realizada neste estudo foi necessária. A metodologia original seleciona os dados em cinco janelas de ângulos de elevação

diferentes (entre 0-12, 12-20, 20-30, 30-45 e 45-90). O que é totalmente viável devido a quantidade de estações receptoras fixas da rede americana, a rede CORS (ver Figura 3.3) e, conseqüentemente, grande quantidade de dados. Já a rede RBMC, apesar de vir crescendo nos últimos anos, é bastante modesta em números de estações, além de um número significativo delas estarem inoperantes. Ademais, a distribuição espacial das estações desta rede constitui outro fator limitador, visto que a maioria das estações está concentrada nas regiões sudeste e sul (Ver Figura 3.5).

Figura 4.6: Ilustração da metodologia *Station Pair Method*.



Fonte: Adaptado de Datta-Barua, 2010.

A metodologia usada neste trabalho também considerou janelas, porém em passos temporais. Esta modificação foi feita para otimizar e empregar todo o dado disponível para as estações escolhidas para os dias de estudo.

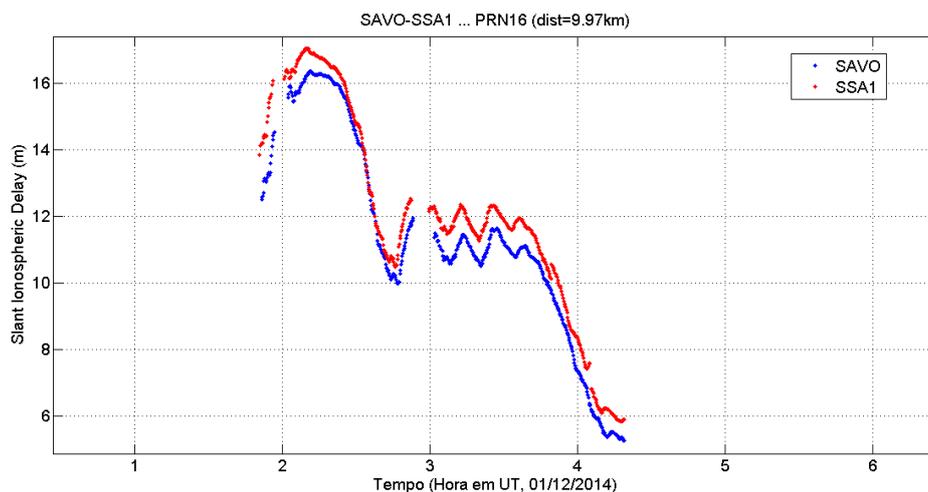
O número de janelas, ou de passos temporais, é diretamente proporcional ao tamanho da série temporal de cada dia de estudo e do número de estruturas de bolhas contidas na série registrada para cada PRN. É relevante destacar que o surgimento das bolhas não ocorre em horários fixos. Ou seja, a cada dia e cada satélite pode registrar a passagem de uma estrutura iniciando e terminando em horários diferentes. A determinação da largura de cada janela é feita pela razão entre o período de observação de cada PRN pelo tempo mínimo o qual cada estrutura leva para ser registrada em uma estação e depois na outra.

O tempo mínimo é estipulado a partir das velocidades mínima e máxima das derivas de bolha registradas na literatura (as quais variam entre 30 e 300 m/s, em média) sob a distância que separa as estações. Dessa forma os dados ruins são automaticamente filtrados.

A Figura 4.7 mostra um exemplo de variação temporal do atraso ionosférico processado pelo LTIAM para as estações SAVO e SSA1, vistas pelo PRN 16 registrado para o dia 336 de 2014 (01/12/2014). Como ambas as estações perceberam a passagem da mesma irregularidade e estão muito próximas uma da outra, elas tendem a apresentar comportamentos semelhantes dos atrasos ionosféricos. Cada pico (ou vale) representa uma estrutura da irregularidade.

Analisando as saídas do LTIAM com dados de imageador para correspondentes dias e horários, é possível inferir que irregularidade do tipo bolha de plasma se apresenta quase que predominantemente como um vale bem pronunciado seguido ou não de outros vales (como pode ser visto na Figura 4.8), enquanto que irregularidade do tipo TID's (*Travelling Ionospheric Disturbances*) se apresenta como uma assinatura ondulatória, geralmente, mas não necessariamente, com pequena amplitude (como pode ser visto na Figura 4.7).

Figura 4.7: Saída do LTIAM para a passagem de irregularidade nas estações SAVO e SSA1.



Registro da variação temporal do atraso ionosférico durante a passagem de uma TID's.

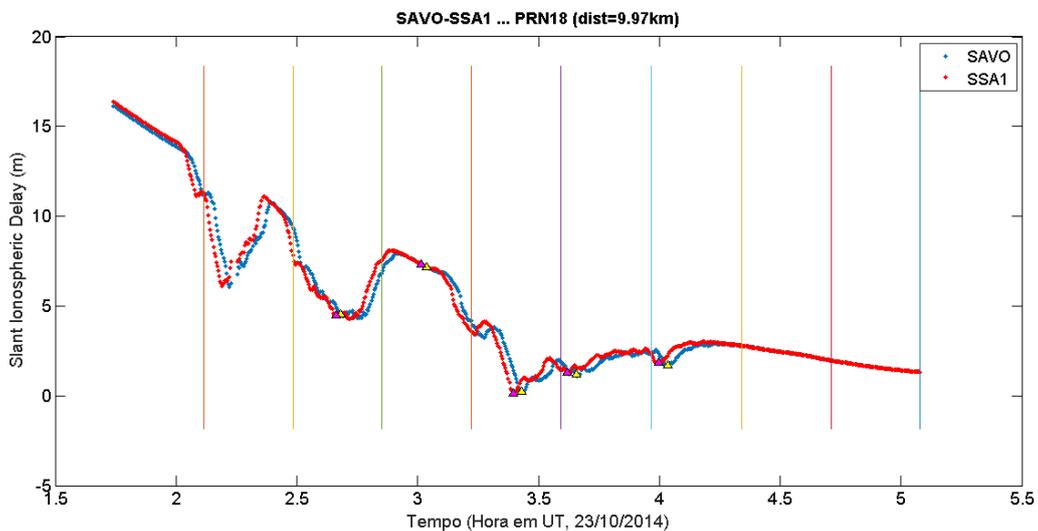
Fonte: Produção própria.

Para assegurar que cada estrutura registrada em uma estação seja a mesma registrada na estação adjacente, foi inserido no código o algoritmo *k-means*, bastante conhecido por se tratar de reconhecimento de padrões (FABER, 1994; KANNUNGO et al., 2002; BANG; LEE, 2013).

O *k-means* é um método de agrupamento de dados, do inglês *Clustering*, usando um esquema iterativo simples. Este algoritmo objetiva particionar n observações dentro de k grupos, ou no nosso caso: k janelas. Cada observação pertence ao grupo mais próximo da média. Em outras palavras, o *k-means* quebra os dados em janelas onde cada janela tem uma parcela das duas curvas de dados que apresentam comportamento semelhante. Logo, é possível assegurar que as estruturas correspondentes registradas em ambas as estações estejam dentro da mesma janela de análise. Com os picos correspondentes assinalados em uma mesma janela, o *k-means* salva o valor da abscissa correspondente a cada pico e a partir deles, calcula o Δt .

A Figura 4.8 mostra um exemplo do processamento do algoritmo *k-means* para o PRN 18 para o dia 296 de 2014.

Figura 4.8: Processamento do *k-means*.



Exemplo gráfico do processamento do *k-means* para o dia 23/10/2014, tomando apenas o registro do PRN 18.

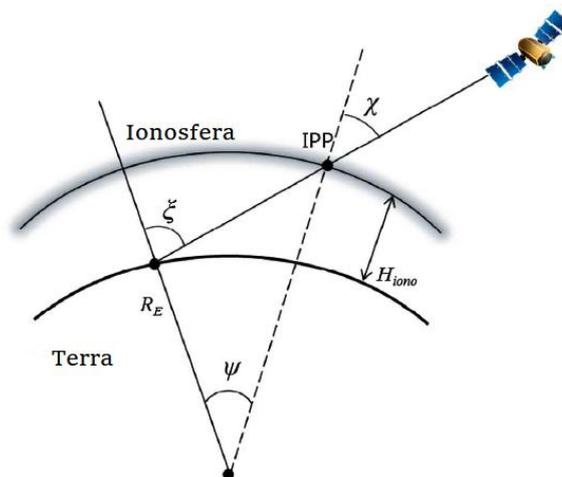
Fonte: Produção própria.

Além disso, durante a coleta ou processamento de dados de GNSS frequentemente é utilizada uma máscara de elevação, abaixo da qual as observações são descartadas (MONICO, 2000). O objetivo desta máscara é minimizar problemas com dados que apresentem alto nível de ruído. A máscara de elevação utilizada neste trabalho é 40° (detalhes na sessão 5.1).

Além de garantir que os picos/vales correspondentes registrados em ambas as estações estejam dentro da mesma janela de análise, é preciso considerar também a velocidade do IPP (*Ionospheric Pierce Point*), visto que ele também se move.

Em condições calmas, a ionosfera pode ser aproximada a uma casca fina esférica circundando a Terra com altura ionosférica média, H_{iono} , onde a maior concentração de plasma é localizada na camada F2. O IPP é definido como o ponto de intersecção na casca esférica pela linha de visada entre o satélite e o receptor, ilustrado na Figura 4.9. O ângulo entre a linha de visada do satélite e a linha de origem no centro da Terra e que passa pelo IPP é denotado por χ e o ângulo, centrado na Terra, entre a estação e o IPP está denotado por ψ . Além disso, assumimos o vetor posição da estação de referência como $\vec{r}_{LLA} = [\text{Lat}_{\text{ref}}, \text{Long}_{\text{ref}}, \text{Alt}_{\text{ref}}]$, dado em coordenadas geodésicas.

Figura 4.9: Modelo ionosférico de casca fina.



Fonte: Adaptado de Bang; Lee, 2013.

Os ângulos χ e ψ foram calculados de acordo com Misra; Enge, 2006. Primeiramente o raio da Terra, R_E , na estação de referência é dado por:

$$R_E = A_E [0,99832 + 0,00168 \cos(2Lat_{ref})] \quad (4.2)$$

Onde A_E é a média do raio terrestre ajustado para o valor de 6378.137 km. Pela lei dos senos, temos:

$$\frac{\text{sen } \xi}{(R_E + H_{iono})} = \frac{\text{sen } \chi}{R_E} \quad (4.3)$$

Onde foi estipulado 350 km para H_{iono} . O ângulo entre o zênite da estação e a linha de visada do satélite, ξ , ou o complemento do ângulo de elevação, El , é expresso por:

$$\xi = \frac{\pi}{2} - El \quad (4.4)$$

Das equações (4.2), (4.3) e (4.4) o ângulo χ é dado por:

$$\chi = \text{sen}^{-1} \left(\frac{R_E \cos(El)}{R_E + H_{iono}} \right) \quad (4.5)$$

Enquanto que o ângulo centrado na Terra entre a estação e o IPP é dado por:

$$\psi = \xi - \chi = \frac{\pi}{2} - El - \chi \quad (4.6)$$

A latitude e a longitude do IPP podem ser calculadas de acordo com as seguintes expressões:

$$Lat_{IPP} = \text{sen}^{-1} (\text{sen}(Lat_{ref}) \cos \psi + \cos(Lat_{ref}) \text{sen} \psi \cos A_z);$$

$$Lon_{IPP} = Lon_{ref} + dLon_{IPP}, \text{ se } A_z < \pi;$$

$$Lon_{IPP} = Lon_{ref} - dLon_{IPP}, \text{ se } A_z > \pi; \text{ onde:}$$

$$dLong_{IPP} = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \psi - \text{sen} Lat_{IPP} \text{sen}(Lat_{ref})}{\cos Lat_{IPP} \cos(lat_{ref})} \right) \quad (4.7)$$

A_z é o ângulo de azimute do satélite na estação, e Lat_{ref} e Lon_{ref} são a latitude e a longitude da estação de referência, respectivamente.

Usando o vetor posição do IPP em diferentes tempos, é possível calcular a sua velocidade. Considerando a posição do IPP no tempo t_1 de \vec{y}_1 e no tempo t_2 de \vec{y}_2 em coordenadas geodésicas LLA (Latitude-Longitude-Altitude), temos:

$$\vec{y}_1 = \begin{bmatrix} Lat_{IPP} \\ Lon_{IPP} \\ H_{iono} \end{bmatrix} \quad e \quad \vec{y}_2 = \begin{bmatrix} Lat_{IPP} \\ Lon_{IPP} \\ H_{iono} \end{bmatrix}$$

Para os tempos t_1 e t_2 , respectivamente. O vetor que aponta para a direção do movimento do IPP pode ser definido pela diferença:

$$\vec{dy}_{LLA} = \vec{y}_2 - \vec{y}_1 \quad (4.8)$$

O vetor diferença \vec{dy}_{LLA} pode ser transformado de coordenadas LLA para coordenadas locais NED (North-East-Down) tomando a coordenada LLA do IPP no tempo t_1 como origem do sistema de coordenadas NED (VALLADO, 2007). Sendo assim, a velocidade do IPP, V_{IPP} , e a sua direção, α , podem ser calculados pelas seguintes expressões:

$$V_{IPP} = \frac{\sqrt{(\vec{dy}_{NED}(1))^2 + (\vec{dy}_{NED}(2))^2}}{t_2 - t_1} \quad (4.9)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{dy}_{NED}(2)}{\sqrt{(\vec{dy}_{NED}(1))^2 + (\vec{dy}_{NED}(2))^2}} \right) \quad (4.10)$$

A Figura 4.10 apresenta uma representação geométrica da estimativa para o cálculo da velocidade do IPP. Nesta representação o gradiente ionosférico (ou frente ionosférica) está inclinado e se movimenta para o sudoeste. Para este exemplo o satélite GNSS se move para nordeste, então o IPP também se move nesta mesma direção, representada pela flecha laranja pontilhada. A orientação do gradiente, i , é o ângulo entre o eixo y e a frente ionosférica (medido no sentido anti-horário, partindo de y). A direção do IPP, α , é o ângulo entre o eixo x e o vetor que descreve a direção do movimento do IPP (medido no sentido anti-horário, partindo de x). Podemos perceber que o V_n contém a componente da velocidade resultante do movimento do satélite, além do movimento atual da frente ionosférica. Sendo assim, a velocidade e a direção do IPP devem ser calculadas e inseridas no cálculo da velocidade da irregularidade.

velocidade é feito usando as equações apresentadas abaixo, adotando-se apenas duas estações.

A localização das estações em coordenadas cartesianas é dada por $\vec{r} = [x,y]$. Sendo assim, a distância entre as estações 2 e 3, medidas a partir da estação 1 é dada por:

$$\vec{d}_{rj} = \begin{bmatrix} d_{xj} \\ d_{yj} \end{bmatrix} = \vec{r}_1 - \vec{r}_{j+1} \quad j = 1, 2 \quad (4.11)$$

O tempo medido quando o pico percorre da estação 1 à estação $j + 1$ é dado por:

$$dt_{pico-j} = t_{pico_{j+1}} - t_{pico1} \quad j = 1, 2 \quad (4.12)$$

A distância entre as estações e o tempo percorrido pela irregularidade entre uma estação e outra são usados para calcular a orientação, i , da velocidade da direção normal a frente, V_n , mostrado abaixo:

$$[\cos(i) \quad \text{sen}(i)] \begin{bmatrix} \vec{d}_{r1} \\ \vec{d}_{r2} \end{bmatrix} = V_n [dt_{pico1} \quad dt_{pico2}] \quad (4.13)$$

No caso da frente ionosférica ser detectada por várias estações, ou seja, um número n de estações, a equação (4.13) pode ser modificada para calcular a velocidade na direção normal, V_n , para vários pares de estações $(1, j + 1)$:

$$V_{n-j} = \frac{1}{dt_{pico-j}} [\cos(i) \quad \text{sen}(i)] \vec{d}_{rj}; \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.14)$$

Baseado na hipótese de que a velocidade de propagação é constante, o valor médio da velocidade resultante foi obtido usando a equação (4.14). Porém, como já foi discutido anteriormente, esta velocidade contém a componente da velocidade referente ao movimento do satélite. Então, após remover a componente da velocidade do IPP, torna-se possível calcular a velocidade da irregularidade, V_{iono} , em relação a um ponto fixo em solo:

$$V_{iono} = V_n + V_{IPP} \cos(i - \alpha) \quad (4.15)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal desta tese de doutorado é encontrar as velocidades zonais das irregularidades ionosféricas do tipo bolha de plasma, de forma automatizada. Para este propósito foram usados dados RINEX de duas estações específicas da RBMC, SAVO e SSA1.

Inicialmente apresentaremos o motivo da escolha do ângulo de elevação, bem como do gradiente ionosférico utilizados em todas as análises feitas neste capítulo. Em seguida são apresentados os resultados das velocidades zonais das irregularidades gerados pelo LTIAM e processados usando o *two station method*, e ao final do capítulo será apresentada a validação da metodologia através da técnica de keogramas utilizada em dados de imageador.

5.1 Escolha da máscara de elevação e do gradiente ionosférico

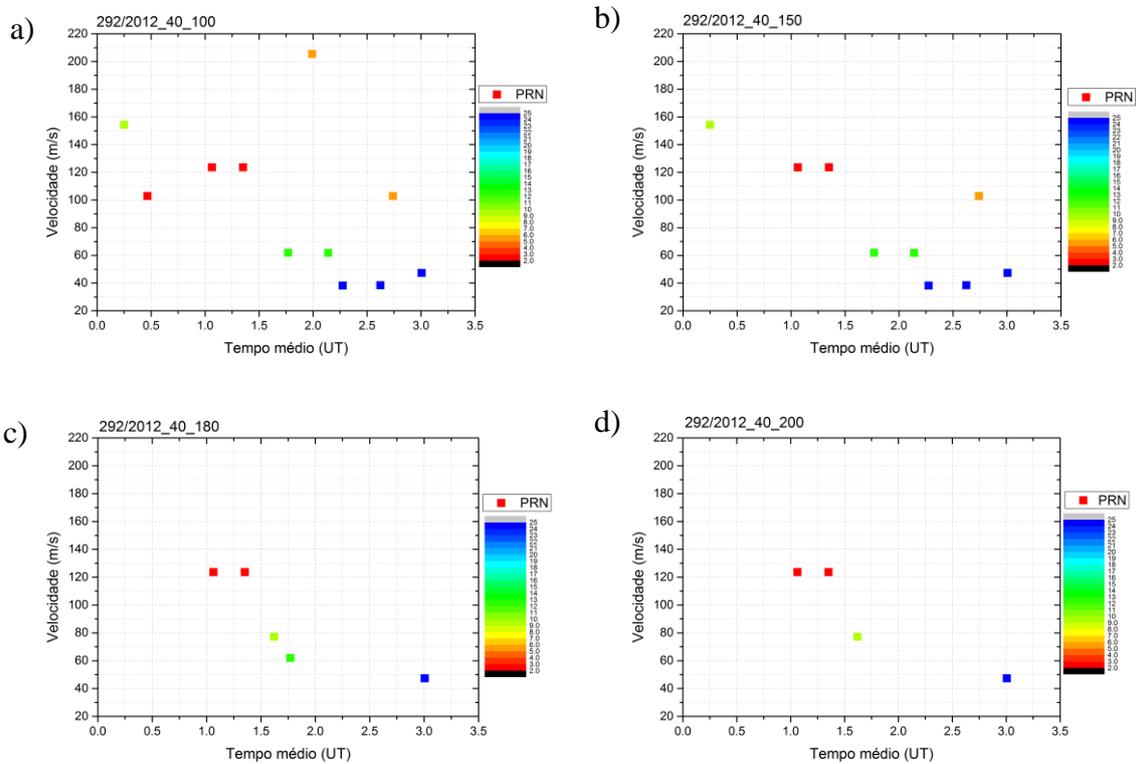
Levando em consideração que valores de ângulo de elevação abaixo de 40° pode incidir ruído nos dados, o LTIAM foi rodado para ângulos de 40° e 50° a fim de definirmos qual máscara de elevação seria usada neste trabalho. Também foram escolhidos valores de gradientes (100, 150, 180 e 200 mm/km) de forma a verificar qual forneceria maior cobertura de PRN observados. A Figura 5.1 apresenta os resultados utilizando o valor fixo de 40° de elevação para o dia 292 do ano 2012 (18/outubro), sendo a letra a) 100 mm/km; b) 150 mm/km; c) 180 mm/km e d) 200 mm/km. Onde a abscissa representa o tempo (em UT) e a ordenada representa a velocidade das bolhas (pelo *two station method*) registrada por cada PRN. A escala de cores à direita de cada gráfico refere-se ao número do PRN representado no gráfico.

A Figura 5.2 apresenta a junção dos quatro painéis da Figura 5.1 fazendo a conexão entre a velocidade obtida pelo seu respectivo PRN. Ou seja, a abscissa representa o tempo (em UT), enquanto que a ordenada representa duas variáveis as quais são separadas pela quebra de continuidade na ordenada: a numeração do PRN (símbolo vermelho) e a velocidade das bolhas de plasma (símbolo preto). Neste gráfico alguns resultados são sobrescritos, principalmente para os PRNs que são sempre observados independentemente do gradiente escolhido. A Figura 5.3 é semelhante à Figura 5.1,

porém para ângulo de elevação de 50°, bem como a Figura 5.4 é semelhante à Figura 5.2 no que diz respeito à junção de todos os valores para o dia 292 de 2012.

Fazendo uma comparação entre os quatro cenários de gradiente ionosférico empregados para finalidade de teste vistos nas Figuras 5.1 e 5.3, percebe-se que gradientes de 100 mm/km oferecem uma maior abrangência de PRNs observados, independente do ângulo de elevação escolhido.

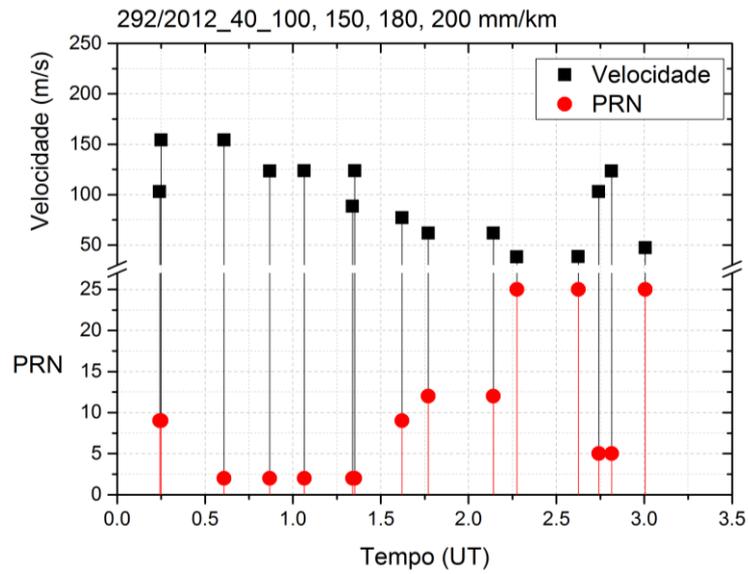
Figura 5.1: Resultados utilizando o LTIAM para 40° de elevação para o dia 292 do ano 2012 (18/outubro).



As letras **a**, **b**, **c** e **d** nos painéis representam 100, 150, 180 e 200 mm/km de gradiente ionosférico, respectivamente.

Fonte: Produção própria.

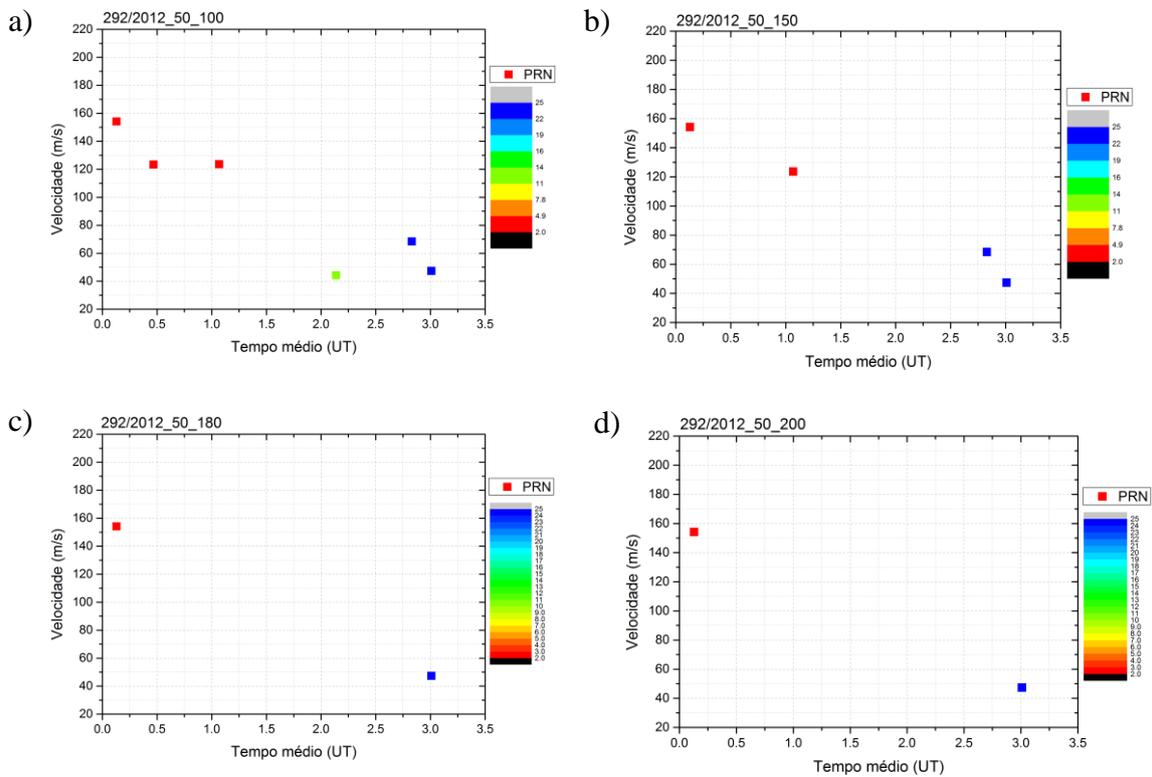
Figura 5.2: Representação das velocidades obtidas por cada PRN para o dia 292 de 2012



Nesta representação foram considerados todos os quatro cenários de gradientes ionosféricos para 40° de elevação.

Fonte: Produção própria

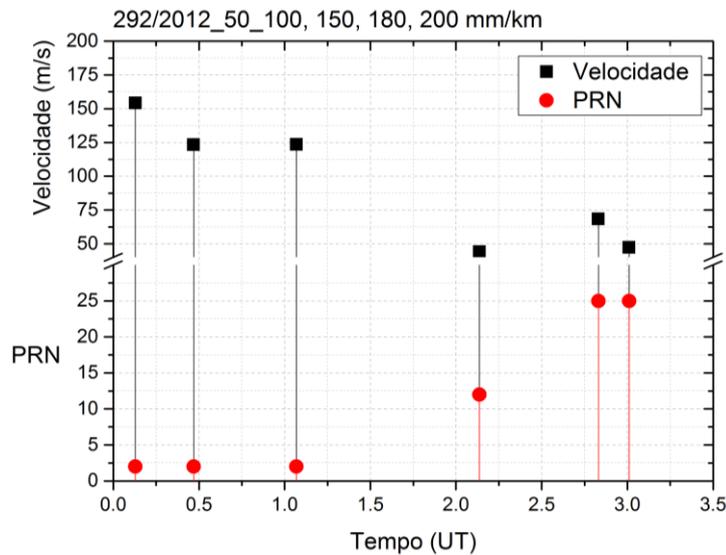
Figura 5.3: Resultados utilizando o LTIAM para 50° de elevação para o dia 292 do ano 2012 (18/outubro).



As letras **a**, **b**, **c** e **d** nos painéis representam 100, 150, 180 e 200 mm/km de gradiente ionosférico, respectivamente.

Fonte: Produção própria

Figura 5.4: Representação das velocidades obtidas por cada PRN para o dia 292 de 2012



Nesta representação foram considerados todos os quatro cenários de gradientes ionosféricos para 50° de elevação.

Fonte: Produção própria

O motivo pelo qual gradientes maiores apresentam menos dados é devido à exclusão de pequenas estruturas, visto que o LTIAM atua como se fosse um filtro passa alta, ou seja, apenas serão registrados dados a partir daquele valor estipulado. Em relação à máscara de elevação, o ângulo de 40° mostrou uma maior cobertura de PRNs, o que pode ser observado comparando as Figuras 5.1 e 5.3 ou comparando as Figuras 5.2 e 5.4. Este resultado era o esperado, visto que, como o ângulo de elevação é medido desde a linha do horizonte até o zênite, quanto menor o ângulo de elevação maior a cobertura de visão dos satélites da constelação.

Esse teste foi feito para dez dias do banco de dados escolhido para este trabalho, e todos mostraram a mesma tendência nos resultados. Devido a isso, todas as análises realizadas neste trabalho levaram em consideração 40° de elevação e gradientes de 100 mm/km.

5.2 Velocidades médias das bolhas obtidas usando o LTIAM

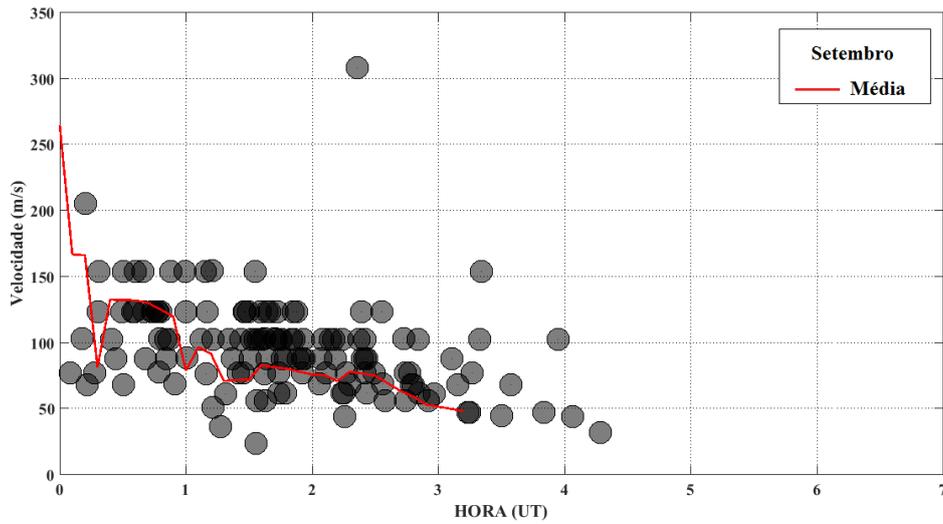
Como foi mencionado no capítulo 4, este estudo abrangeu os anos de 2012, 2013 e 2014 para os meses de setembro a janeiro do ano subsequente, escolhendo dez dias representativos para cada mês. Dias com ocorrência de bolha de plasma e que obedecessem aos critérios de valor mínimo de $F10.7 \geq 130$ s.f.u e de $\Sigma Kp \leq 24$.

Devido à limitação da metodologia implementada, os horários de observação do comportamento das irregularidades registradas pela constelação de satélites e receptores da RBMC parte de 0000UT. Ou seja, as análises começam sempre às 2100LT e vão até o final do registro de ocorrência da irregularidade.

As Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, e 5.10 representam a distribuição dos dados de velocidade média obtidas neste trabalho. Cada uma das Figuras desde 5.5 até 5.9 representa o conjunto de todos os valores para cada mês específico. Isto é, cada Figura representa a junção dos dados de velocidade calculada neste trabalho para o mês específico de estudo dos anos 2012, 2013 e 2014. Sendo assim, a Figura 5.5 refere-se à junção de todas as velocidades obtidas neste estudo para os meses de setembro, a Figura 5.6 para os meses de outubro, e assim sucessivamente. A Figura 5.10 mostra a distribuição de todas as velocidades calculadas neste trabalho. Mediante a considerável variabilidade dia-a-dia apresentada nas figuras citadas, foi realizada uma média móvel a fim de se verificar o comportamento médio das velocidades. Desta maneira, a linha vermelha representa a média móvel utilizada nos dados, suavizando pontos extremos e identificando a tendência dos valores. É importante ressaltar que os resultados de todos os PRNs disponíveis para os dias utilizados em cada mês de estudo foram processados pelo LTIAM e conseqüentemente, os resultados estão agrupados nas figuras acima mencionadas.

Várias são as causas que remetem à alta variabilidade diária, desde instabilidade Rayleigh-Taylor, surgimento de camada E esporádica, Es, competição entre campos elétricos e ventos zonais, e desenvolvimento de estruturas de onda em larga escala (*LSWS – Large Scale Wave Structure*) (ABDU, 1997, 2001; SOBRAL et al., 1999; ABALDE et al., 2009; TSUNODA, 2005, 2006; KELLEY, 2009). Estes motivos, entretanto, não são objetos do estudo corrente. O objetivo principal deste trabalho foi calcular automatizadamente as velocidades das derivas zonais das bolhas de plasma para períodos geomagneticamente calmos, utilizando o modelo LTIAM. De forma que fosse possível saber de maneira mais rápida e eficiente os valores de velocidade, e assim possibilitar a previsão de impactos em telecomunicações e em diversos instrumentos para uso científico e comercial os quais utilizam como princípios básicos propagação de ondas eletromagnéticas.

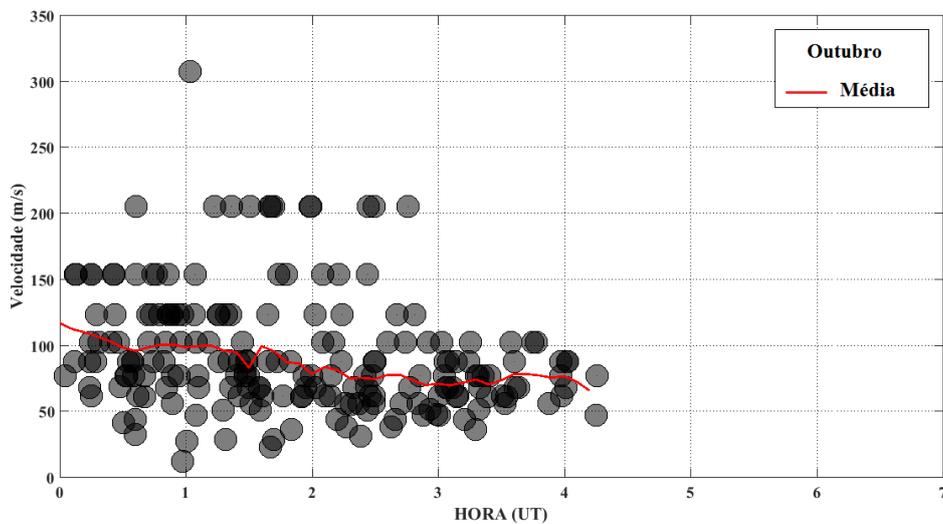
Figura 5.5: Distribuição dos dados relativa aos meses de setembro



Dados referentes a todos os meses de setembro utilizado neste estudo. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

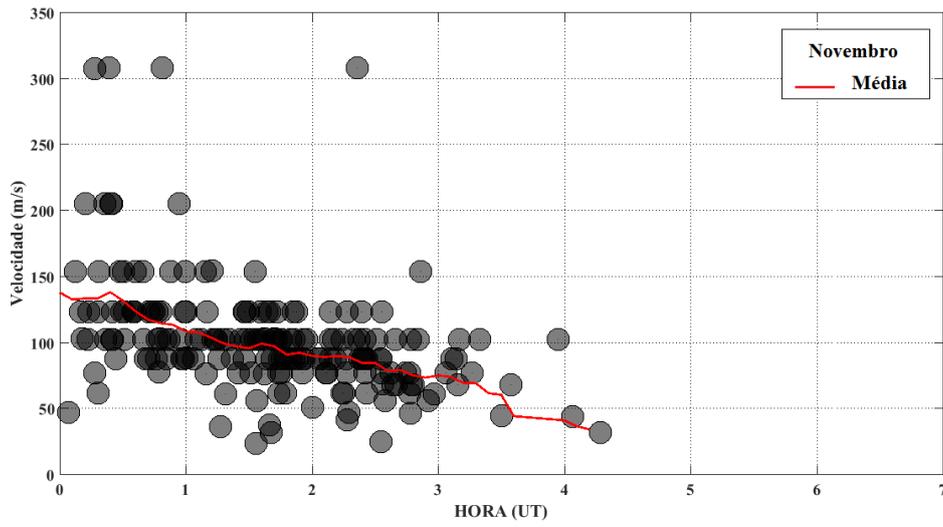
Figura 5.6: Distribuição dos dados relativa aos meses de outubro



Dados referentes a todos os meses de outubro utilizado neste estudo. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

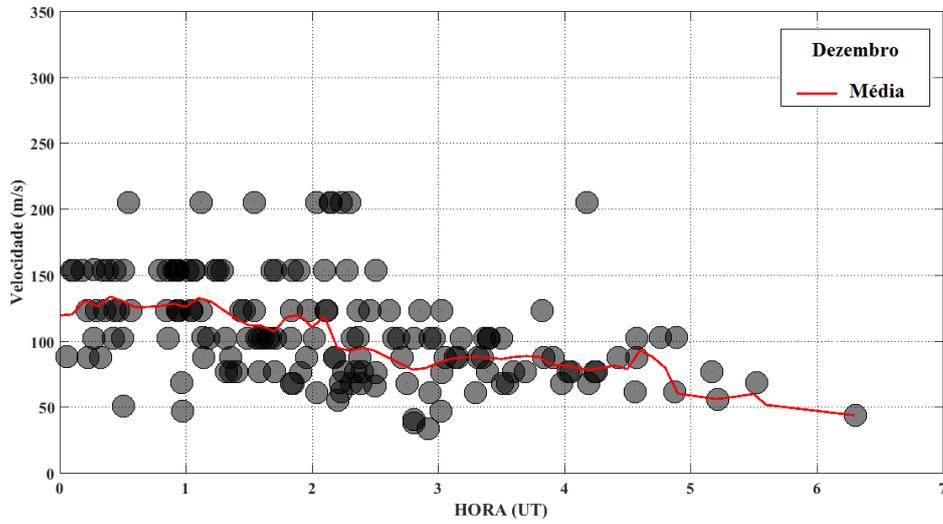
Figura 5.7: Distribuição dos dados relativa aos meses de novembro



Dados referentes a todos os meses de novembro utilizado neste estudo. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

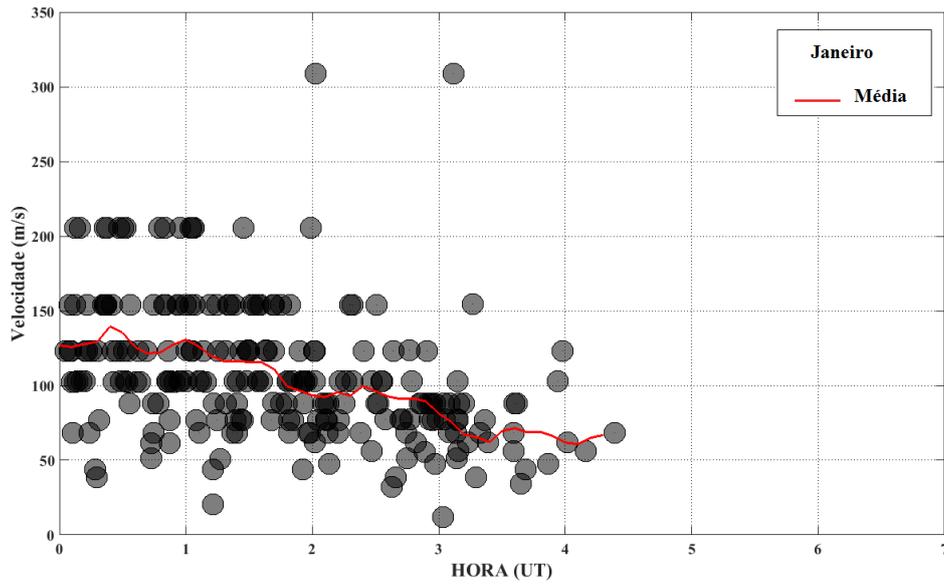
Figura 5.8: Distribuição dos dados relativa aos meses de dezembro



Dados referentes a todos os meses de dezembro utilizado neste estudo. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

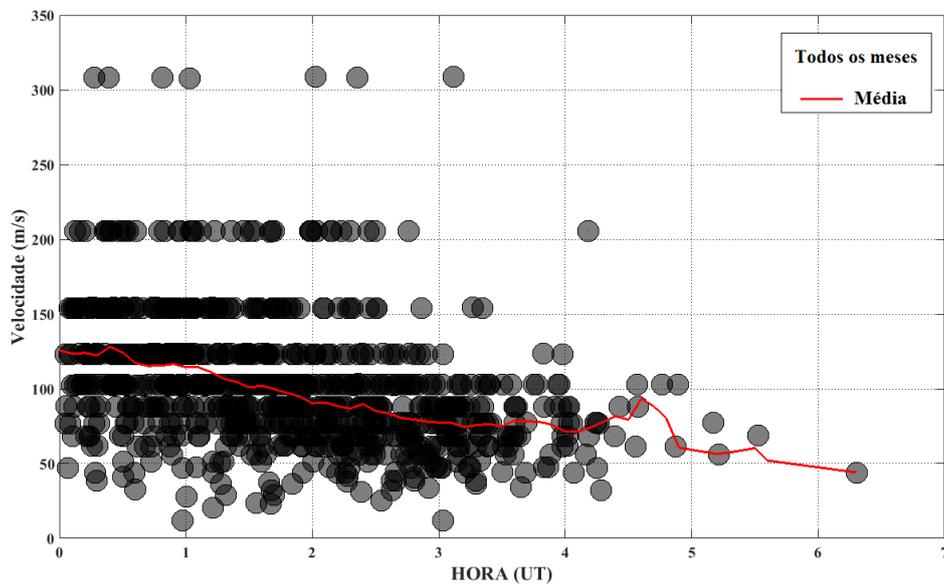
Figura 5.9: Distribuição dos dados relativa aos meses de janeiro



Dados referentes a todos os meses de janeiro utilizado neste estudo. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

Figura 5.10: Distribuição dos dados relativa a todo o banco de dados



Dados referentes a todos os meses utilizados neste estudos para os anos de 2012, 2013, 2014 e janeiro de 2015. A linha vermelha representa a média móvel dos dados.

Fonte: Produção própria

A partir da média móvel de cada grupo de meses foi realizado um ajuste que melhor moldasse esses valores, conforme mostram as Figuras 5.11 a 5.16, onde a média móvel está representada por estrelas, enquanto que o ajuste está representado pela curva azul. Sendo assim, a Figura 5.11 representa a média móvel retratada na Figura 5.5, a Figura 5.12 representa a média móvel da Figura 5.6 e assim sucessivamente.

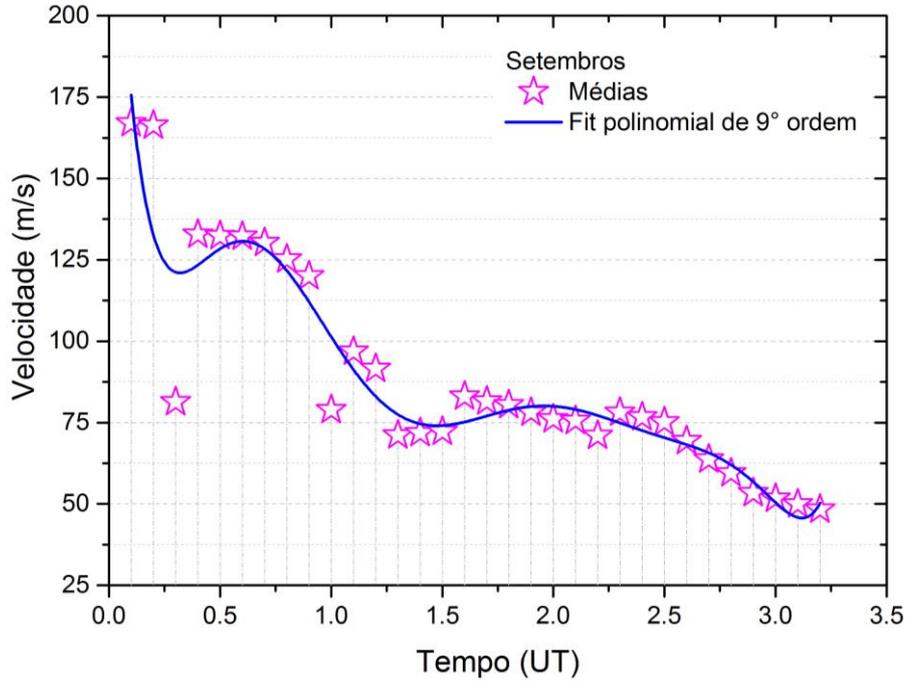
Analisando as velocidades obtidas neste estudo foi verificado que todas as ocorrências de bolhas apresentaram movimento para Leste, ou seja, nenhuma ocorrência de movimento da bolha para Oeste foi registrada. A confirmação desse dado também foi feita analisando as imagens de imageador. É possível verificar esta informação nas Figuras 5.5 a 5.10. Esta é uma característica que valida a metodologia inserida no LTIAM. Todas as velocidades apresentadas mostraram valores positivos, porém, se tivessem ocorrido casos de bolhas para Oeste a saída do LTIAM seria negativa.

É interessante perceber na Figura 5.14 referente ao mês de dezembro e, conseqüentemente, na Figura 5.16 referente ao agrupamento dos valores de todos os meses, a ocorrência da característica peculiar da deriva zonal durante o verão para alta atividade solar, que é um pico acentuado antes do amanhecer. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Fejer et al. (2005), mostrado na Figura 2.5 desta Tese, com dados do radar de espalhamento incoerente de Jicamarca. Esta é mais uma característica que também valida a metodologia implementada no LTIAM por ter mostrado de forma coerente o comportamento do plasma ionosférico, visto que as irregularidades parecem caminhar junto com o movimento do plasma.

Conforme vemos nas Figuras 5.11 a 5.16, o ajuste que melhor representou a tendência das velocidades foi o ajuste polinomial de 9º ordem, onde $y = \text{intercessão} + B_1x^1 + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4 + B_5x^5 + B_6x^6 + B_7x^7 + B_8x^8 + B_9x^9$. Dessa forma, a Tabela 5.1 apresenta todos os coeficientes obtidos nos ajustes realizados nas Figuras citadas.

A partir dos coeficientes será possível, em estudos futuros, elaborar um modelo empírico que descreva o comportamento da velocidade das bolhas de plasma sob as condições aqui estipuladas, de forma rápida e fácil para os usuários.

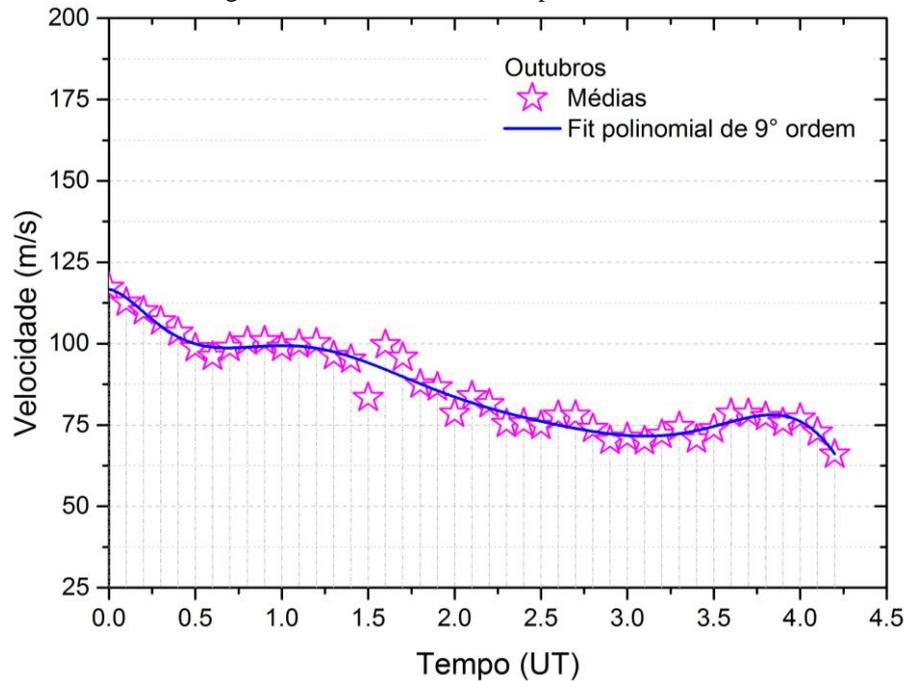
Figura 5.11: Média móvel e fit para o mês de setembro



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem

Fonte: Produção própria

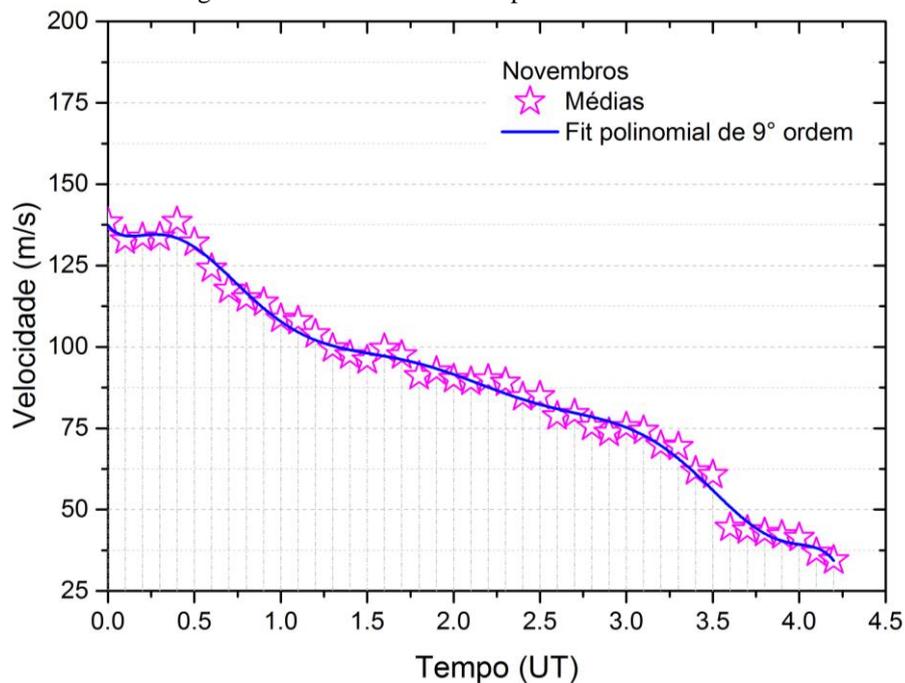
Figura 5.12: Média móvel e fit para o mês de outubro



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem.

Fonte: Produção própria

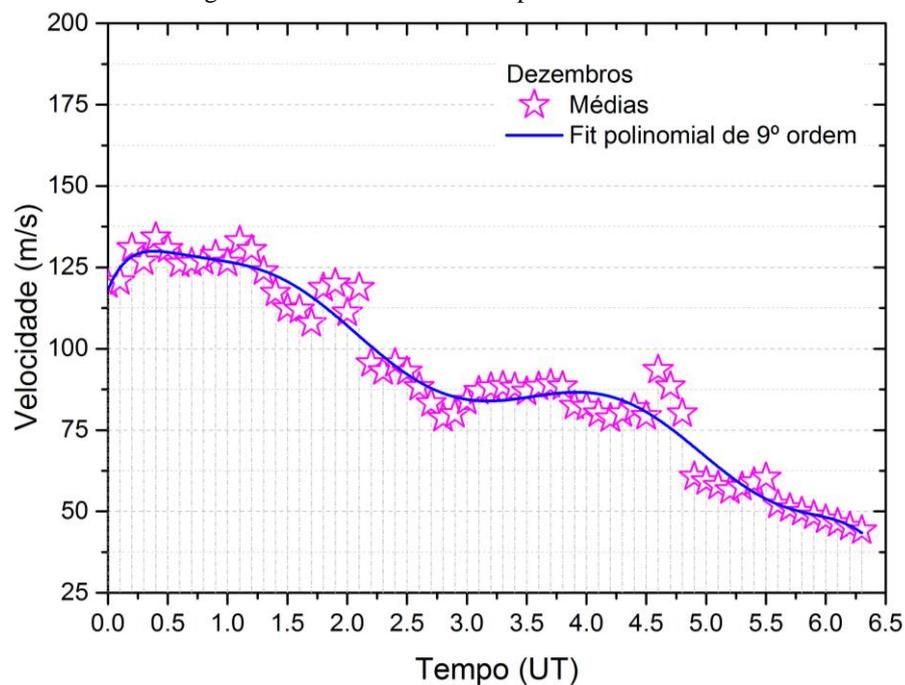
Figura 5.13: Média móvel e fit para o mês de novembro



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem.

Fonte: Produção própria

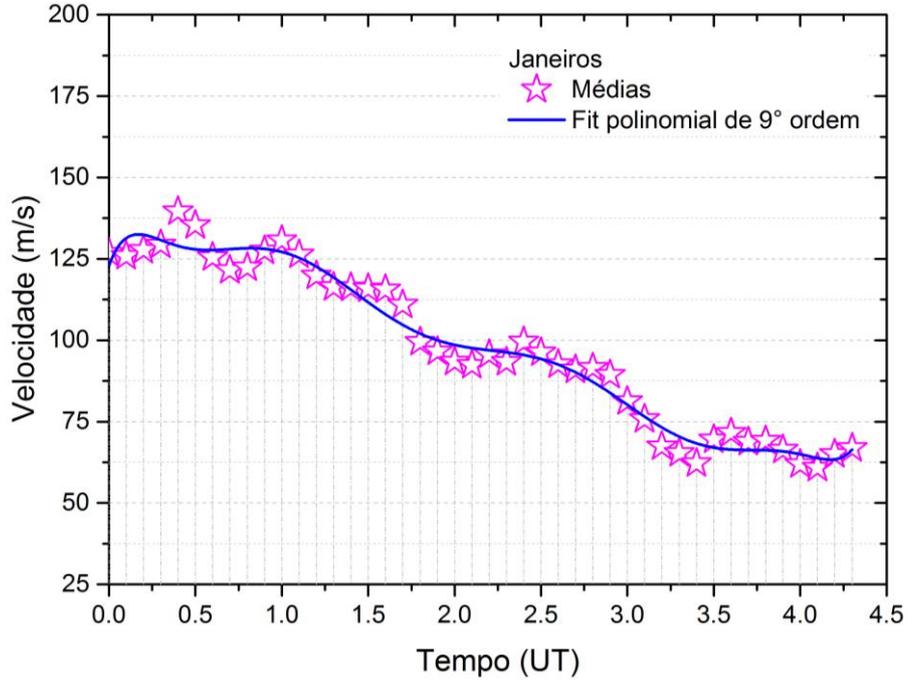
Figura 5.14: Média móvel e fit para o mês de dezembro



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem.

Fonte: Produção própria

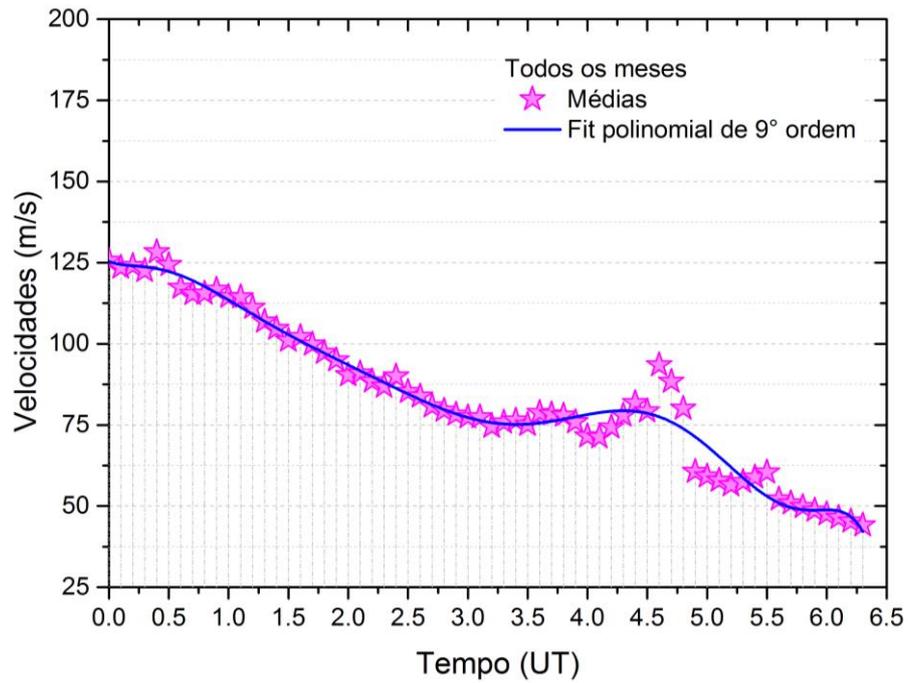
Figura 5.15: Média móvel e fit para o mês de janeiro



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem.

Fonte: Produção própria

Figura 5.16: Média móvel e fit para todo o banco de dados



Dados representados por estrelas referem-se a média móvel, enquanto que a curva azul refere-se ao ajuste polinomial de 9º ordem.

Fonte: Produção própria

Tabela 5.1: Coeficientes do ajuste polinomial de 9º ordem

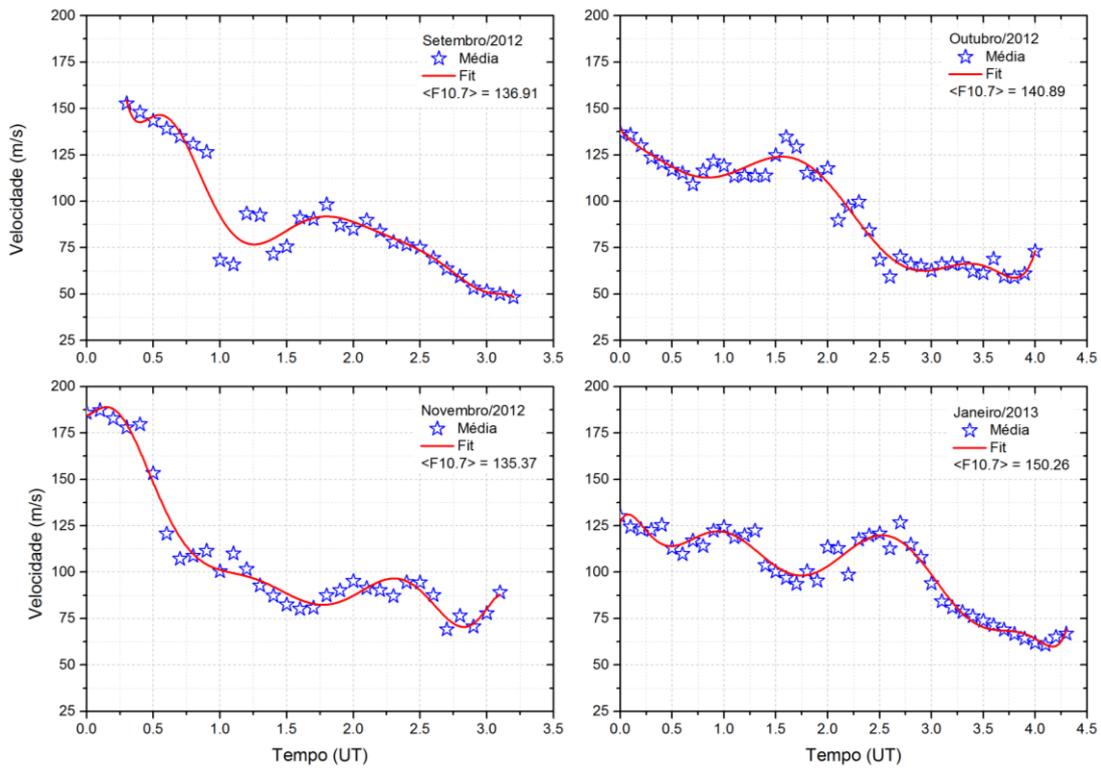
Coeficientes	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Todos
<i>Intercessão</i>	77.10	116.68	137.47	118.06	122.88	125.38
B_1	-1425.69	-7.39	-67.04	88.86	145.15	-13.81
B_2	4811.39	-243.33	453.34	-246.59	-757.24	58.65
B_3	-7571.42	676.23	-1270.59	329.84	1690.49	-139.64
B_4	6015.92	-800.89	1613.84	-244.09	-1967.59	136.01
B_5	-2333.21	512.00	-1115.15	102.33	1293.25	-71.17
B_6	244.35	-190.71	448.20	-24.90	-498.97	21.48
B_7	121.30	41.45	-104.72	3.48	112.05	-3.72
B_8	-42.33	-4.87	13.18	-0.25	-13.55	0.34
B_9	4.02	0.23	-0.69	0.0079	0.68	-0.012

Fonte: Produção própria

Os resultados médios estão de bom acordo com a literatura. As velocidades zonais foram maiores no horário de início da análise (2100LT), por vezes alcançando 300 m/s nos meses de setembro, outubro, mas principalmente em novembro. Contudo, o registro de velocidade nessa ordem foi algo pouco frequente, comparado com os demais registros. Isso se mostra principalmente devido estes valores terem sido desvanecidos na média (ver Figura 5.10). Ainda em relação a comportamento médio, o solstício de primavera (mês de setembro) apresentou as menores velocidades médias, com exceção do início da análise (entre 0000UT e 0100UT). Após a apresentação de seus valores mais altos (início do horário de estudo) observa-se a tendência de atenuação da velocidade no decorrer da noite. Este comportamento está fortemente ligado à dinâmica dos ventos neutros, visto que eles apresentam menor intensidade no final da noite e começo do dia.

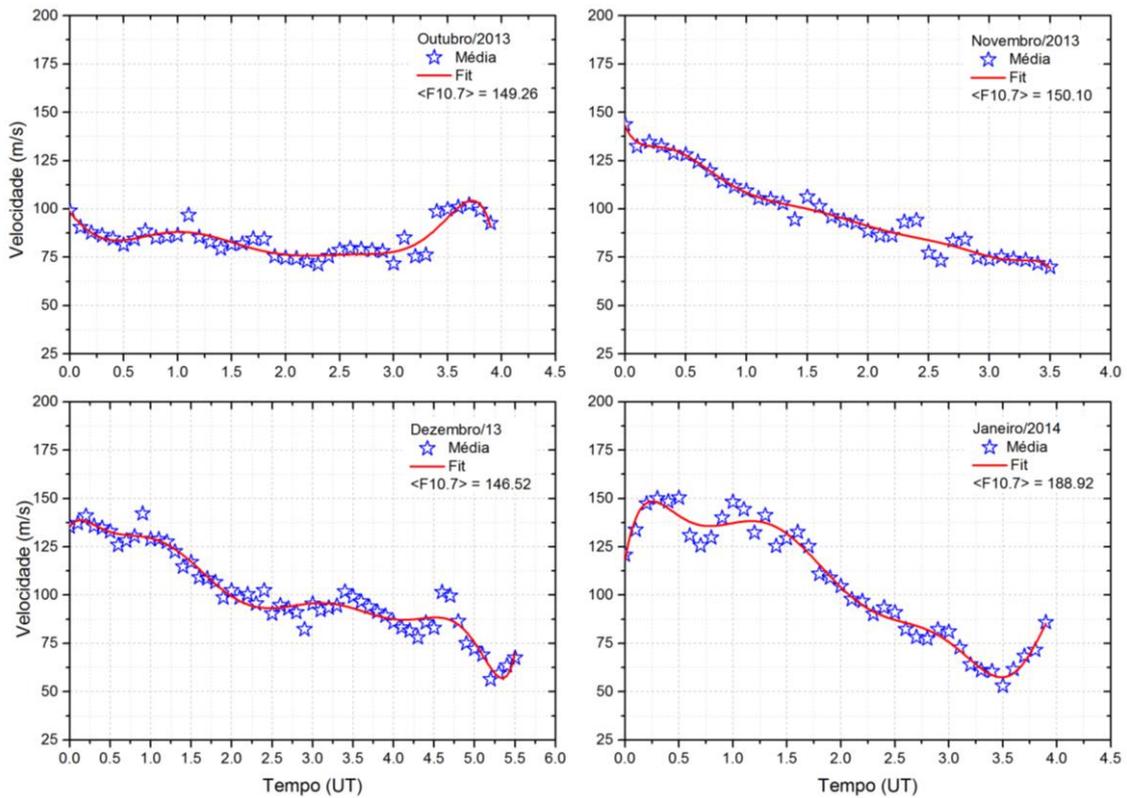
Uma análise levando em conta o comportamento mês a mês para cada ano do estudo pode ser visto nas Figuras 5.17 a 5.19, onde foram reunidos as médias das velocidades, o ajuste polinomial e o F10.7 médio.

Figura 5.17: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2012



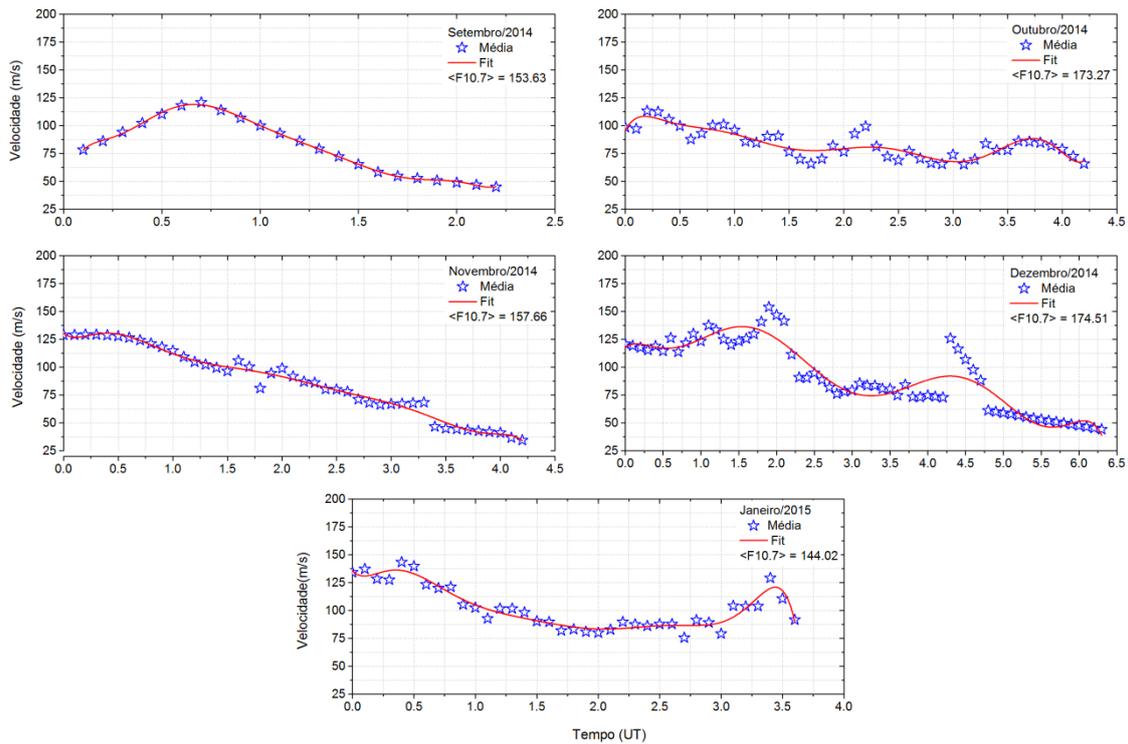
Fonte: Produção própria

Figura 5.18: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2013



Fonte: Produção própria

Figura 5.19: Médias e Ajuste polinomial para o ano de 2014



Fonte: Produção própria

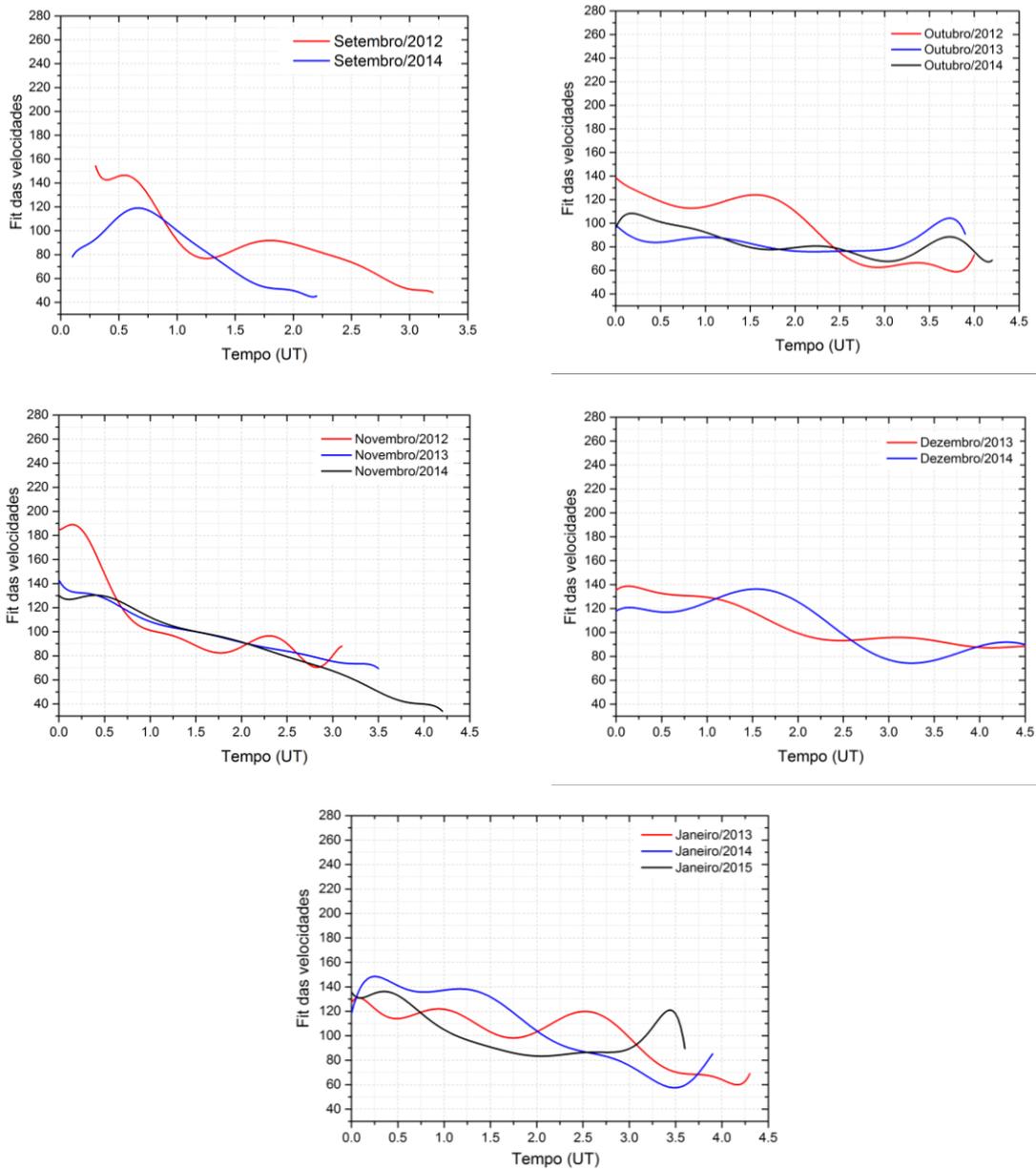
Parte da variabilidade apresentada ao comparar o mesmo mês, para os diferentes anos de estudo, pode ser justificada pela atividade solar. As velocidades zonais das bolhas de plasma são diferentes durante alta e baixa atividade solar. É bem conhecido que estas velocidades tendem a aumentar com o aumento do fluxo solar (SOBRAL; ABDU, 1991; SOBRAL et al., 1999; 2002; SAHAI et al., 2000; TERRA et al., 2004; KUMAR, 2017). Como as velocidades noturnas de deriva zonal são consequências dos campos elétricos verticais gerados pelos processos de dínamo da camada F que, por sua vez, estão relacionados com os ventos neutros zonais, então, quanto mais intensos forem os ventos neutros zonais, maiores são os campos elétricos e, portanto, as velocidades de deriva zonal das bolhas ionosféricas. Sendo assim, os resultados apresentados não foram esperados, visto que com o aumento do F10.7 ocorreu a diminuição da velocidade, principalmente entre 00 – 01 UT, com exceção para janeiro. O aumento do F10.7 aumenta a pressão da atmosfera neutra em torno do ponto subsolar e consequentemente também aumenta o gradiente de pressão próximo aos terminadores, cujo aumento tende a elevar a velocidade zonal da bolha principalmente na latitude onde se encontra o ponto subsolar.

Uma análise levando em conta o comportamento por mês revelou que ocorrem discordâncias do comportamento médio, o que pode ser visto na Figura 5.20, onde foram reunidos apenas os ajustes polinomiais de forma a se fazer uma abordagem comparativa. Vemos, por exemplo, que na maioria dos gráficos individuais apresentados nas Figuras 5.17 a 5.19 o horário de início da análise já consta com velocidades de irregularidades que estavam ocorrendo naquele horário. Porém, isso não ocorreu nos meses de setembro de 2012 e de 2014, como pode ser visto melhor na Figura 5.20.

Sabe-se que o início das irregularidades pode ser afetado por perturbações de campo elétrico originados em altas latitudes durante condições magneticamente perturbadas. No entanto, em condições calmas como nos casos abordados neste trabalho, existem vários processos, tais como, ventos neutros meridionais e condutividade da região E, que podem inibir o crescimento das irregularidades ou alterá-las. Como as bolhas de plasma alinhadas ao campo magnético derivam para altitudes que podem exceder até os 1500 km, as extremidades das bolhas propagam-se para fora do equador em direção aos pontos conjugados, sendo que a abrangência latitudinal a qual cada bolha pode atingir depende diretamente da altitude máxima que as bolhas alcancem.

As bolhas observadas nas primeiras horas da noite podem ocorrer em regiões por volta de $\pm 17^\circ$ de latitude magnética, quando elas chegam a alcançar um Apex de aproximadamente de 1000 km no equador magnético (KIL et al., 2002).

Figura 5.20: Ajustes polinomiais agrupados mês a mês



Fonte: Produção própria

Porém, as bolhas formadas em baixas latitudes, em horários mais avançados no decorrer da noite, geralmente, estão associadas à passagem das regiões de depleção alongadas ao norte e ao sul do equador magnético que estão derivando para Leste, e que foram geradas mais a Oeste na região equatorial (DE PAULA et al., 2004). E talvez esta seja a explicação para o surgimento “tardio” das bolhas nos meses de setembro dos anos 2012

e 2014. É importante lembrar que as velocidades foram calculadas quando as irregularidades passaram pelo estado da Bahia, o que não configura exatamente o equador.

As bolhas observadas em baixa latitude, conforme já foi mencionado, é fruto do seu crescimento ao longo do tubo de fluxo iniciando no equador magnético (SOBRAL et al., 2002; ABDU et al., 1983), sendo esperado que haja um atraso do momento de observação em comparação com as bolhas observadas sobre o próprio equador. No entanto, acontecem casos em que a bolha não se desenvolve ou as velocidades não são suficientes para atingir altitudes capazes de permitir a observação em baixas latitudes. Este é um dos motivos que faz com que a frequência de ocorrência de bolhas observadas em baixas latitudes seja menor quando comparadas com as observações de bolhas no equador.

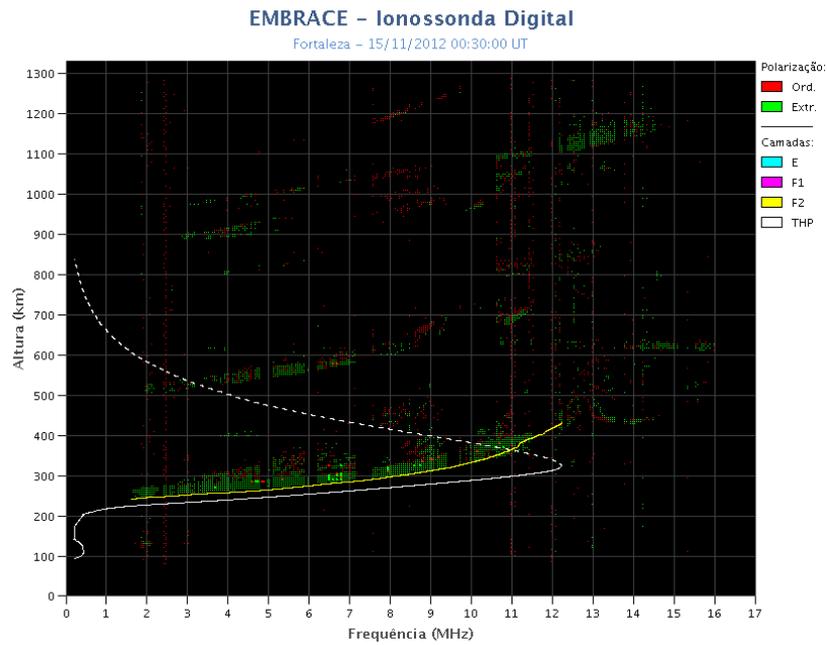
Outro ponto interessante nesta análise é que praticamente para todos os meses, com exceção de janeiro, os meses referentes ao ano de 2012 apresentaram velocidades maiores que os demais anos, mesmo em face de representar atividade solar menor. Fazendo um paralelo com as derivas zonais em Jicamarca, esperava-se que para período calmo, quanto maior a atividade solar, maior seriam as velocidades (ver Figura 2.6). Para fazer um estudo detalhado sobre isso, escolhemos o mês de novembro. As velocidades correspondentes ao ano de 2012 (curva vermelha da Figura 5.20) apresentaram valores elevados no início da análise em comparação com o mês de novembro dos demais anos. Em termos de atividade solar, os meses apresentaram F10.7 médio de 135,37 s.f.u, 146,52 s.f.u e 157,66 s.f.u para novembro/2012, novembro/2013 e novembro/2014, respectivamente. Uma investigação usando o modelo SUPIM-INPE e ionogramas foi feita para verificar se há possibilidade de que processos internos na bolha poderiam diminuir a condutividade Pedersen. Visto que a partir do desaparecimento da região E nos pontos conjugados e ao fim das correntes elétricas verticais originadas na região E, em tempos quietos, a bolha é impulsionada basicamente pelos ventos neutros médios ponderados pela condutividade Pedersen, integrados ao longo da linha de campo. Portanto, a condutividade Pedersen é um fator importante para a determinação da amplitude da velocidade zonal da bolha no período mais tarde da noite.

As Figuras 5.21 e 5.22 mostram ionogramas para a região de Fortaleza (CE) para os dias 15/11/2012 e 15/11/2014, respectivamente. A escolha do dia central remete a análise média do comportamento. Atividade solar mais alta causa maiores alterações nas derivas zonais. Analisando os ionogramas de Fortaleza é possível verificar que o espalhamento no sinal causado pela bolha é mais forte em 2014 do que em 2012. Contudo, maior espalhamento no sinal pode relacionar-se a maior amplitude e bifurcações das bolhas, não necessariamente à magnitude das suas velocidades.

A Figura 5.23 mostra as derivas calculadas pelo modelo SUPIM-INPE (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model at INPE; SOUZA et al., 2013, NOGUEIRA et al., 2013, SANTOS et al., 2016, BALAN et al., 2017). A curva vermelha refere-se a novembro/2012 ($\langle F10.7 \rangle = 135,37$) e a curva preta a novembro/2014 ($\langle F10.7 \rangle = 157,66$). Foi utilizado o dia 15 de cada mês de novembro para fins de análise média. Percebemos que praticamente não há alteração entre as curvas, apesar de que ambas representarem diferentes níveis de fluxo solar. Em seguida, para novembro/2014 a condutividade Pedersen foi reduzida em 50% (curva azul) para investigar os efeitos na dinâmica das bolhas.

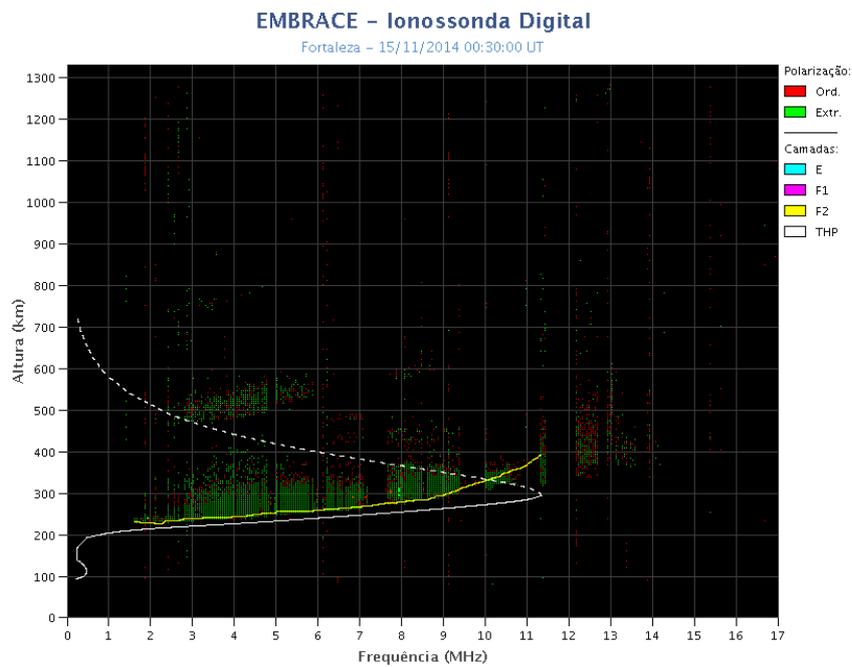
Os resultados não se alteraram. As derivas são controladas por uma ponderação entre condutividade Pedersen, ventos zonais e o termo com o fator Hall $\left(\frac{\Sigma H}{\Sigma P}\right)$, conforme descrito na equação 2.8. Sendo as condutividades apenas os pesos da média ponderada, a alteração dos pesos não causa impacto. A queda na condutividade Pedersen aumenta o fator Hall, e como as derivas verticais no horário do estudo, ou seja, noturnas, são negativas (para baixo) há uma intensificação no campo elétrico vertical (E_L) causando um aumento nas derivas zonais em vez de uma queda, como mostrou os resultados. Sendo assim, por exclusão desses fatores, compreende-se que as diferenças nas velocidades são causadas por ações de ventos.

Figura 5.21: Ionograma da região de Fortaleza (CE) para 15 de novembro de 2012



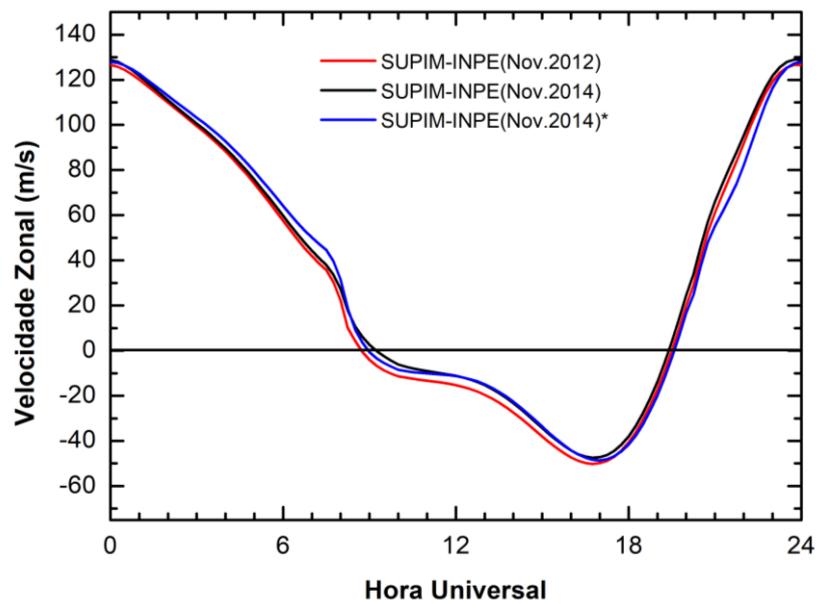
Fonte: EMBRACE

Figura 5.22: Ionograma da região de Fortaleza (CE) para 15 de novembro de 2014



Fonte: EMBRACE

Figura 5.23: Resultado do modelo SUPIM-INPE para novembro de 2012 e 2014



Fonte: SUPIM-INPE

Na próxima sessão será apresentada a validação da metodologia através da técnica de keogramas.

5.3 Validação da Metodologia por meio de comparação com a metodologia óptica

Nesta sessão será mostrada a técnica de keogramas em imagens all-sky da emissão OI 630 nm, utilizada para validar a metodologia inserida no modelo LTIAM.

Os imageadores são instrumentos capazes de abranger uma grande cobertura espacial, em detrimento de outros instrumentos, como a digissonda e o fotômetro. Como há o registro do movimento das irregularidades no decorrer do tempo, é possível inferir as velocidades através da análise de imagens.

O sistema de imageamento all-sky integra em si dispositivos CCDs (*Coupled Charge Device*), o qual lhe confere alta eficiência em relação à resolução temporal, sensibilidade (detecção de emissões mais fracas), baixo nível de ruído, entre outros. A lente all-sky, ou lente olho de peixe, fotografa uma imagem do céu com extensão de horizonte a horizonte, em ângulo de abertura de até 180°. Porém, este tipo de lente

resulta em uma imagem com grande distorção óptica. A Figura 5.24 mostra uma imagem original de aeroluminescência do OI 630 nm com a lente all-sky.

Figura 5.24: Imagem de bolha de plasma com a lente all-sky.

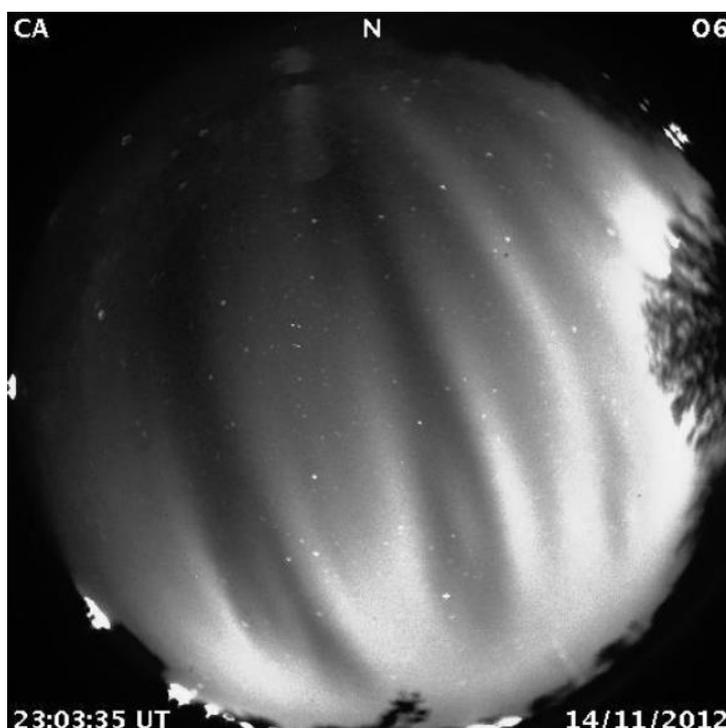


Imagem de lente all-sky da emissão OI em 630 nm obtida pelo imageador instalado em São João do Cariri (PB) no dia 14 de novembro de 2012. Nesta imagem é possível ver várias estruturas de bolhas de plasma.

Fonte: Imagem original obtida no site do EMBRACE

Cada imagem all-sky está associada a um instante no tempo, ou seja, cada imagem de airglow tem o registro do tempo em que ela foi fotografada, tornando possível fazer a estimativa da velocidade de alguma estrutura registrada neste instrumento. Porém, para aplicar a técnica de keogramas, a imagem precisa estar linearizada. A Figura 5.25 mostra a mesma imagem retratada na Figura 5.24, porém de forma linearizada.

A técnica de linearização das imagens pode ser conferida em alguns trabalhos (WRASSE, 2004; SANTOS, 2007; BAGESTON, 2010; PAULINO, 2012). As imagens utilizadas neste trabalho foram tratadas, linearizadas, com as estrelas removidas e cedidas gentilmente pelo Dr. Cristiano Wrasse, do INPE.

Figura 5.25: Imagem linearizada de bolha de plasma

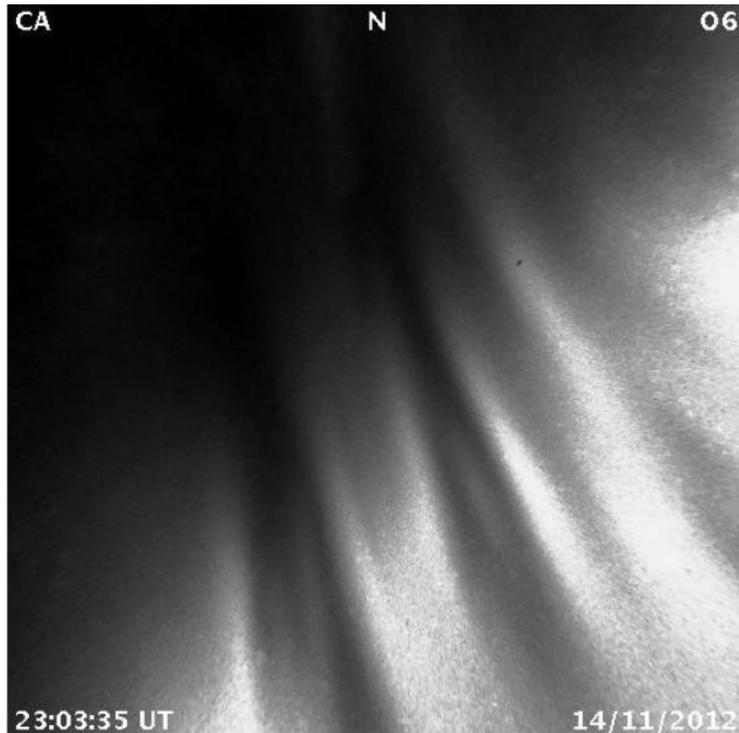


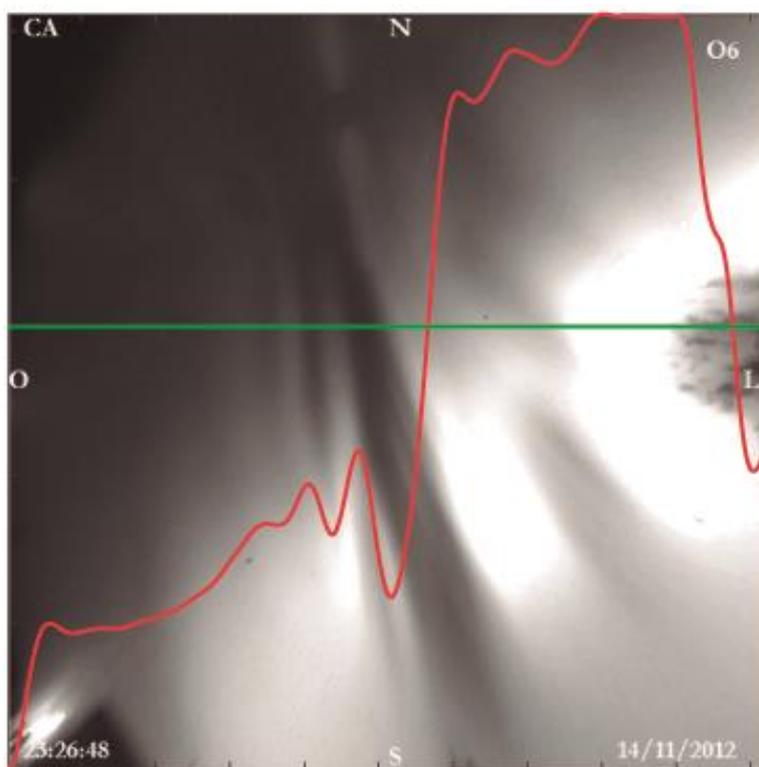
Imagem linearizada da emissão OI em 630 nm obtida pelo imageador instalado em São João do Cariri (PB) do dia 14 de novembro de 2012.

Fonte: Imagem linearizada obtida no site do EMBRACE

A técnica de keogramas consiste em escolher uma linha de pixels de cada imagem, ou seja, um corte que atravesse a imagem inteira e que não varie de posição a cada imagem analisada. A Figura 5.26 mostra um exemplo de corte em uma imagem linearizada do OI 630 nm. A linha verde refere-se à posição do corte escolhido, enquanto que a curva vermelha refere-se à variação de intensidade luminosa naquela linha de pixels. Como as bolhas são representadas pelas estrias escuras nas imagens, podemos ver o comportamento da curva vermelha quando a linha verde atravessa regiões claras e regiões escuras na imagem.

O corte é feito para todas as imagens da noite de estudo. Logo em seguida, os cortes são reunidos numa única imagem formando o keograma.

Figura 5.26: Corte Leste-Oeste em imagem all-sky linearizada



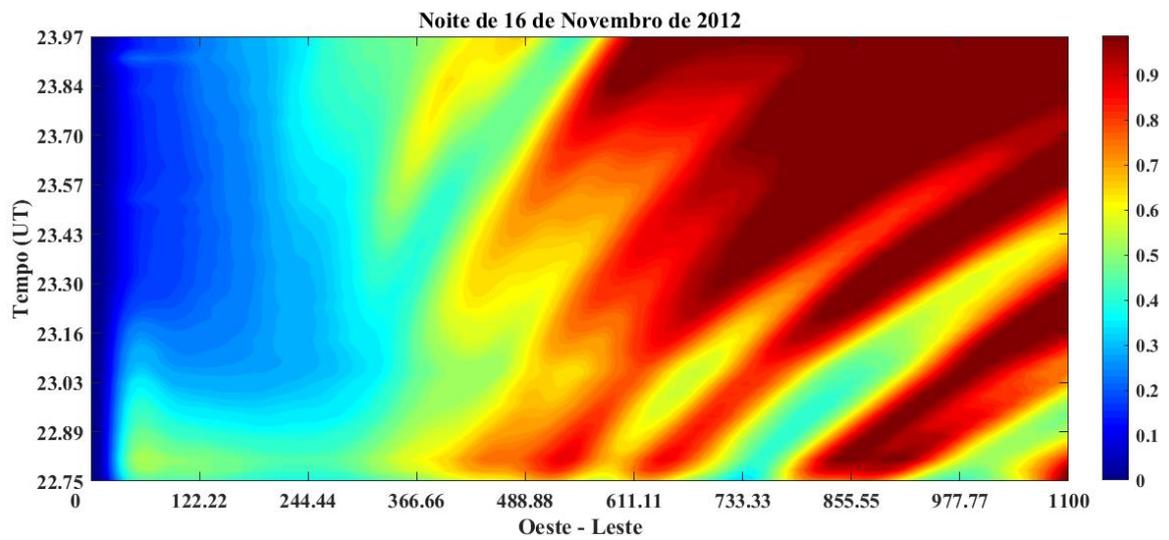
A linha verde refere-se ao corte na imagem registrando as regiões onde serão utilizadas para a construção dos keogramas. As imagens foram previamente tratadas e cedidas por Cristiano Wrasse.

Fonte: Produção própria

A Figura 5.27 mostra um keograma formado a partir dos cortes feitos nas imagens all-sky linearizadas para a noite de 16 de novembro de 2012, obtidas em São João do Cariri, (PB). Nesta representação, as cores frias descrevem as áreas com maiores rarefações, ou seja, as regiões de bolhas de plasma. A escala de cores à direita da figura representa o nível de rarefação na densidade do plasma.

A Figura 5.28 representa a estimativa da velocidade demonstrada em um keograma para a noite de 14 de novembro de 2012, representada pelas linhas contínua e tracejadas. Sendo assim é possível escolher dois pontos na irregularidade e a partir deles calcular a velocidade. Considerando um intervalo de tempo ($\Delta t = t_2 - t_1$) e o deslocamento da estrutura ($\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$) é possível calcular de forma simples as velocidades. Utilizaremos três dias diferentes como base para a validação das velocidades obtidas no LTIAM. Os dias são 11, 12 e 15 de novembro de 2012. A paleta de cores foi alterada de forma a dar ênfase para as regiões de bolhas de plasma.

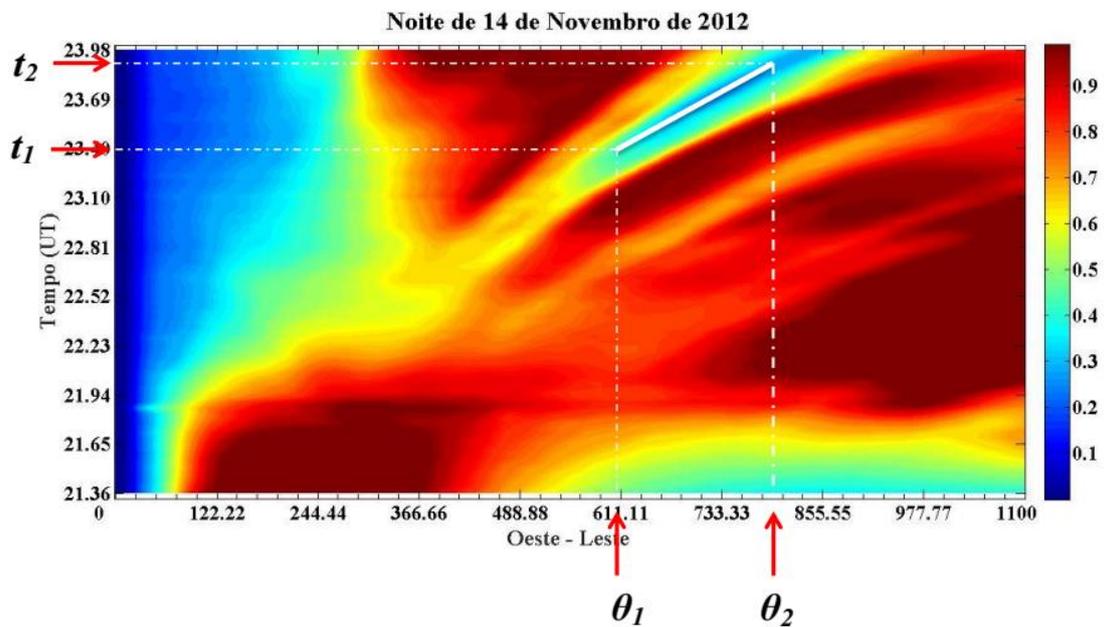
Figura 5.27: Exemplo de keograma



Keograma formado a partir de cortes feitos em imagens linearizadas da emissão do OI 630 nm da noite de 16 de novembro de 2012 obtidos em São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção própria

Figura 5.28: Estimativa das velocidades de bolhas utilizando a técnica de keogramas.

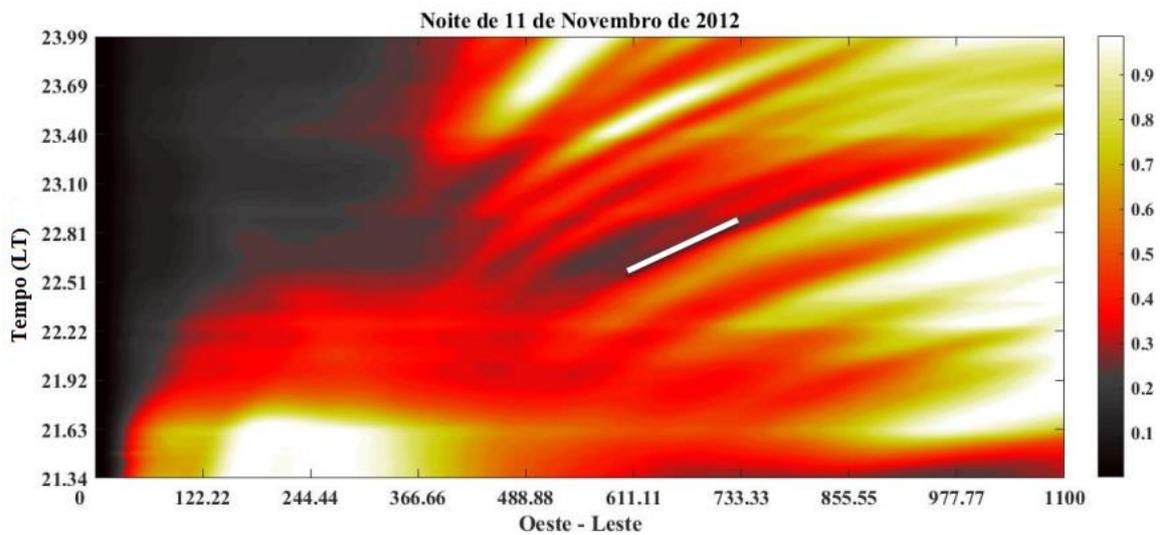


Método para estimar as velocidades de bolhas de plasma através de técnica de keogramas em imagens de airglow da emissão do OI 630 nm para o dia 14/11/2012 do imageador localizado em São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção própria

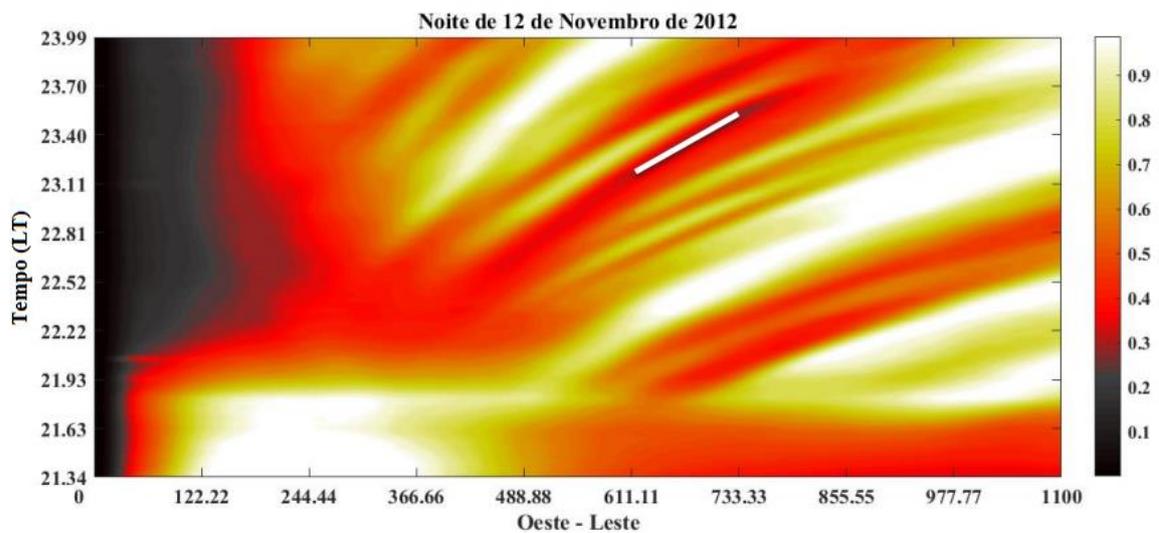
Levando em consideração as coordenadas dos pontos inicial e final das retas marcadas nas Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 temos que para o trecho representado as velocidades estimadas são respectivamente 87,05 m/s; 97 m/s; e 135,8 m/s. Estas velocidades são condizentes com as velocidades obtidas pelo LTIAM através dos dados de GNSS obtidos nas estações SAVO e SSA1 da RBMC.

Figura 5.29: Keograma da noite de 11 de novembro de 2012



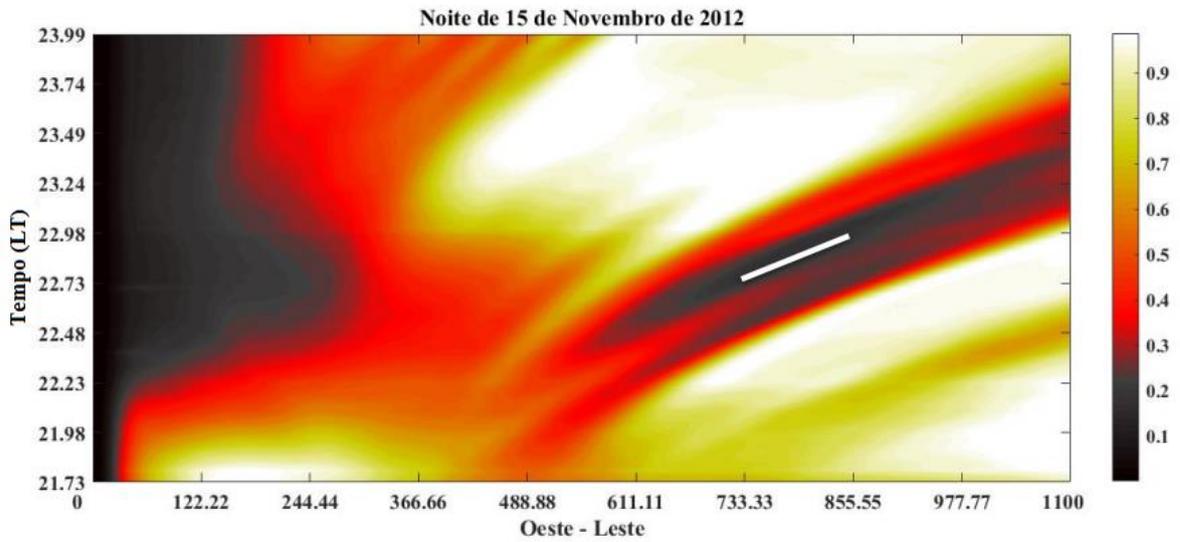
Fonte: Produção própria

Figura 5.30: Keograma da noite de 12 de novembro de 2012



Fonte: Produção própria

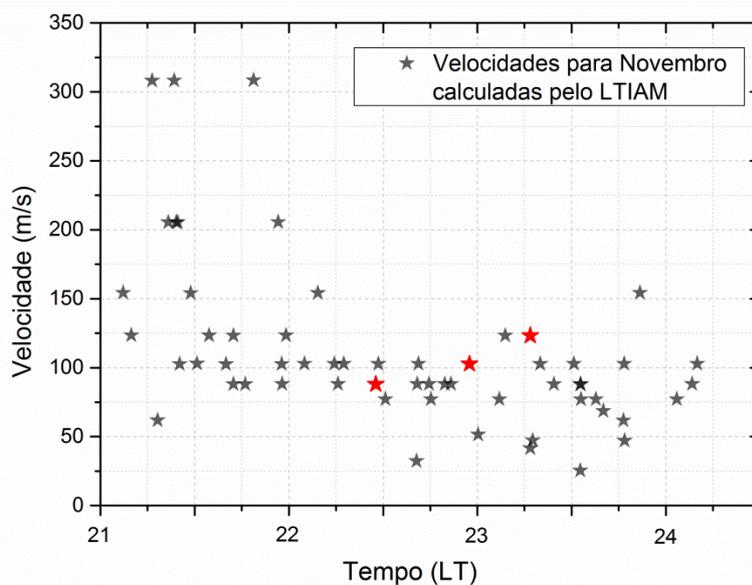
Figura 5.31: Keograma da noite de 15 de novembro de 2012



Fonte: Produção própria

A Figura 5.32 apresenta uma comparação dessas velocidades obtidas a partir dos keogramas com as velocidades obtidas pelo LTIAM. Todas as velocidades representadas na figura foram calculadas pelo LTIAM, porém as estrelas marcadas em vermelho representam as velocidades semelhantes aos valores obtidos nos keogramas.

Figura 5.32: Comparação das velocidades obtidas por keogramas e pelo LTIAM



Fonte: Produção própria

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bolhas de plasma são rarefações na densidade do plasma equatorial, caracterizando um tipo de irregularidade, cujas características são bastante conhecidas (SOBRAL et al., 1985, 1999, 2002; ABDU et al., 1983, 1985a, 1985b, 2009; MENDILLO et al., 1983; AGGSON et al., 1996; SAHAI et al., 2000; NISHIOCA et al., 2008; ABALDE et al., 2009; PAULINO et al., 2011). Elas estão alinhadas ao campo geomagnético e possuem dimensão na ordem de dezenas ou poucas centenas de quilômetros na direção zonal. Apresentam forte dependência com a hora local, longitude e sazonalidade, além de que instabilidades em seu próprio interior podem interferir nos sinais de rádio, GPS e telecomunicações, além de aplicações tecnológicas advindas destas. Por este motivo vem crescendo o número de trabalhos no sentido de aumentar a previsibilidade de ocorrência, modelagem/simulação de comportamento e cálculo da velocidade de propagação (ANDERSON; HAERENDEL, 1979; HAERENDEL et al., 1992; ECCLES, 1998; ARRUDA et al., 2006, HUBA et al., 2000, 2008; SOUSASANTOS et al., 2017).

Nessa perspectiva, o LTIAM é um modelo que foi desenvolvido para se estudar as anomalias ionosféricas, visto que ele identifica e calcula os gradientes ionosféricos decorrentes da passagem dessas irregularidades na ionosfera. A construção deste modelo foi planejada em caráter técnico para suprir a necessidade da comunidade aeronauta de usuários de GPS em entender/prever os efeitos da ionosfera no controle de tráfego aéreo, principalmente no tocante à prevenção de acidentes na decolagem e aterrissagem de aeronaves nos aeroportos. Porém, diante de tamanho potencial, vários trabalhos científicos utilizando o modelo começaram a ser publicados no sentido de investigar irregularidades ionosféricas e o impacto de tais perturbações nos posicionamentos obtidos por GPS (LUO et al., 2002; PULLEN et al., 2009; DATTA-BARUA, 2002; 2010; LEE et al., 2011, 2012, BANG; LEE, 2013). A maioria destes trabalhos, apresentados com forte apelo técnico e em publicações especializadas, apresentaram como foco a preocupação com irregularidades ionosféricas do tipo TIDs, visto que o modelo foi desenvolvido para uso nos aeroportos norte-americanos. No sentido de estudo de bolhas de plasma, o uso deste modelo se faz pioneiro. Diante do acesso ao seu código, o modelo foi adaptado para o cálculo de velocidade de bolhas de plasma a partir da análise de monitoramento contínuo da ionosfera por dados de GNSS,

obtidos pela rede RBMC. No trabalho desenvolvido nesta Tese o LTIAM foi utilizado para monitorar as bolhas de plasma, permitindo inferir automaticamente as velocidades das derivas zonais das irregularidades percebidas, simultaneamente, por duas estações receptoras de dados GNSS.

O LTIAM percebe a passagem da irregularidade entre duas estações da rede, estando elas próximas ou não. Porém, quanto mais distantes uma da outra, a confiabilidade da metodologia é reduzida. Para que ocorra alta eficiência da metodologia implementada, o *Two Station Method* (DATTA-BARUA, 2010; LEE et al., 2012, BANG; LEE, 2013) é importante que a distância entre as estações receptoras não ultrapasse 50 km. Diante de dificuldades como ausência ou falha de dados, foram escolhidas para o corrente estudo as estações SAVO e SSA1, da RBMC, as quais se localizam em Salvador (BA) e distam 9,7 km entre si. Logo que ambas as estações registrem a irregularidade, o LTIAM, através do algoritmo *k-means*, verifica o intervalo de tempo durante a passagem da irregularidade em cada uma das estações, para em seguida fornecer o valor da velocidade em diversos pontos da estrutura.

O estudo realizado nesta Tese envolveu os anos de 2012, 2013 e 2014 para os meses de setembro até janeiro do ano subsequente, escolhendo dez dias representativos para cada mês. Dias com ocorrência de bolha de plasma, verificado por imageador, e que obedecessem aos critérios de $F10.7 \geq 130$ s.f.u e de $\Sigma Kp \leq 24$. Todos os PRNs disponíveis para os dias do estudo foram processados. As velocidades calculadas apresentaram considerável variabilidade, o que já era esperado. Analisando as velocidades obtidas, o LTIAM forneceu todas as velocidades com valores positivos (convenção: valores positivos representam propagação para Leste). Após inspeção das imagens de imageador na emissão do OI 630 nm, foi constatado que todas as ocorrências de bolhas apresentaram movimento para Leste. Ou seja, dentro do banco de dados não houve evento de bolha para Oeste. Este fato corrobora para a confiabilidade do método. O modelo também foi capaz de reproduzir uma característica do plasma ionosférico, semelhante ao já anunciado por Fejer et al. (2005), que se refere a um pico na deriva zonal durante o verão para alta atividade solar. Esta similaridade é bastante coerente com o comportamento do plasma ionosférico, visto que as irregularidades parecem caminhar junto com o movimento do plasma.

Os resultados médios obtidos utilizando o LTIAM estão em conformidade com os valores registrados na literatura. Eles se apresentaram maiores no horário de início da análise (2100LT), alcançando até valores de 300 m/s de forma pontual, porém ocasional. Altas velocidades no início do horário de estudo e decorrente decaimento no transcorrer da noite. Esta tendência está atribuída à dinâmica dos ventos neutros, visto que eles apresentam menor intensidade no final da noite e começo do dia.

Ao fixar um mês e analisar as variações nos resultados médios de velocidade para os diferentes anos de estudo, era esperado verificar a influência da atividade solar. Visto que quanto maior o fluxo solar, maior é a tendência de elevação das velocidades zonais das bolhas. Porém, mesmo diante do aumento do F10.7 houve a diminuição de velocidade. Foi feita uma investigação utilizando o modelo SUPIM-INPE para verificar se variações na condutividade Pedersen eram as causas dos baixos valores, dado que sem a interferência das correntes verticais da região E, a bolha é impulsionada pelos ventos neutros ponderados pela condutividade Pedersen. As análises para as derivas calculadas pelo modelo SUPIM-INPE para os meses de novembro de 2012 e 2014 praticamente não mostraram alteração, até mesmo diante de uma diminuição da condutividade em 50%. Diante disso, entende-se que a diferença nas velocidades pode ser atribuída a ações de ventos. Futuramente análises utilizando modelo de ventos serão feitas para investigar mais aprofundadamente este comportamento.

Outra interferência também atribuída aos ventos refere-se ao registro tardio de velocidades para os meses de setembro de 2012 e 2014. A abrangência latitudinal a qual cada bolha pode atingir depende diretamente da altitude máxima que as bolhas alcancem, e fatores como os ventos neutros e condutividade da região E podem inibir o crescimento das irregularidades ou alterá-las.

Retornando aos objetivos que motivaram este estudo, pode-se afirmar que foram feitos muitos avanços. O objetivo principal deste trabalho foi calcular de forma automática, através do LTIAM, as velocidades das derivas zonais das bolhas de plasma para períodos geomagneticamente calmos. Este objetivo foi alcançado com êxito. Porém, quanto aos objetivos secundários, nem todos foram atingidos. E destes, dois merecem ser retomados aqui por motivação de estudos futuros:

- Ampliação do estudo estatístico dos resultados de velocidades zonais das bolhas fornecidos pelo LTIAM,

- Modelo empírico do comportamento das velocidades das bolhas de plasma fornecidas pelo LTIAM.

Além destes, outros trabalhos poderão ser elaborados de forma mais precisa, a partir da metodologia desenvolvida nesta Tese.

Por fim, é importante ressaltar que em termos de contribuição, a metodologia desenvolvida nesta Tese é totalmente automatizada, identifica os picos nos registros do conteúdo eletrônico total da ionosfera obtidos por satélite devido às irregularidades durante a noite por um algoritmo de reconhecimento de padrão. Além de ser a primeira vez que este tipo de metodologia é utilizado para o estudo de bolhas na região brasileira, a técnica possui grande potencial para uso em programas para monitoramento contínuo de clima espacial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABALDE, J. R.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BECKER-GUEDES, F.; BITTENCOURT, J. A.; PILLAT, V. G.; LIMA, W. L. C.; CANDIDO, C. M. N.; FREITAS, T. F. Day-to-day variability in the development of plasma bubbles associated with geomagnetic disturbances. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A4, 2009.
- ABDU, M. A.; MEDEIROS, R. T.; SOBRAL, J. H. A.; BITTENCOURT, J. A. Spread F plasma bubble vertical rise velocities determined from spaced ionosonde observations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 88(A11), 9197-9204, 1983.
- ABDU, M. A.; KANTOR, I. J.; BATISTA, I. S.; DE PAULA, E. R. East-west plasma bubble irregularity motion determined from spaced VHF polarimeters: Implications on velocity shear in the zonal F region bulk plasma motion. **Radio science**, v.20, n.01, p. 111-122, 1985a.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J. Equatorial ionospheric plasma bubble irregularity occurrence and zonal velocities under quiet and disturbed conditions, from polarimeter observations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.90, n.A10, p. 9921-9928, 1985b.
- ABDU, M. A. et al. Equatorial disturbance dynamo electric field longitudinal structure and spread F: A case study from GUAR/EITS Campaigns. **Geophysical research letters**, v. 24, n. 13, p. 1707-1710, 1997.
- ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere–thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 869-884, 2001.
- ABDU, M. A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n.5, p.771-787, 2005.
- ABDU, M.A.; KHERANI, E.A.; BATISTA, I.S.; DE PAULA, E.R.; FRITTS, D.C.; SOBRAL, J.H.A. Gravity wave initiation of equatorial spread F/plasma bubble irregularities based on observational data from the SpreadFEx campaign. **Annales Geophysicae** 27, 2607–2622, 2009.
- AGGSON, T. L.; LAAKSO, H.; MAYNARD, N. C.; PFAFF, R. F. In situ observations of bifurcation of equatorial ionospheric plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 5125-5132, 1996.
- ANDERSON, D.; HAERENDEL, G. The motion of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere, **J. Geophys. Res.**, v. 84, n. A8, 4251–4256, doi: 10.1029/JA084iA08p04251, 1979.

- ARRUDA, D. C.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; CASTILHO, V. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A. Theoretical and experimental zonal drift velocities of the ionospheric plasma bubbles over the Brazilian region. **Advances in Space Research**, v. 38, n. 11, p. 2610-2614, 2006.
- BAGESTON, J. V. **Caracterização de ondas de gravidade mesosféricas na Estação Antártica Comandante Ferraz**. 2010. 176 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/36FCLLE>. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.25.17.35-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36FCLLE>>.
- BAILEY, G. J.; BALAN, N. Some modelling studies of the equatorial ionosphere using the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model. **Advances in Space Research**, v. 18, n. 6, p. 59-68, 1996.
- BALAN, N.; SOUZA, J.; BAILEY, G. J. Recent developments in the understanding of equatorial ionization anomaly: A review. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, DOI 10.1016/j.jastp.2017.06.020, 2017.
- BANG, E.; LEE, J. Methodology of automated ionosphere front velocity estimation for ground-based augmentation of GNSS. **Radio Science**, v. 48, n. 6, p. 659-670, 2013.
- BILITZA, D. International reference ionosphere 2000. **Radio Science**, v. 36, n. 2, p. 261-275, 2001. doi: 10.1029/2000RS002432
- BILITZA, D.; BROWN, S. A.; WANG, M. Y.; SOUZA, J. R.; RODDY, P. A. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 86, 99-106, 2012.
- BLANC, M.; RICHMOND, A. D. The ionospheric disturbance dynamo, **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 1669 – 1686, 1980.
- BUOSANTO, M. J. Ionospheric storms – A review. **Space Science Reviews**, v. 88, n. 3 – 4, p. 563 – 601, 1999.
- BUST, G. S.; CROWLEY, G.; GARNER, T. W.; GAUSSIRAN, T. L.; MEGGS, R. W.; MITCHELL, C. N.; ZAPFE, B. Four-dimensional GPS imaging of space weather storms. **Space Weather**, V. 5, n. S02003, 2007. doi: 10.1029/2006SW00237
- CAKIR, S.; HAERENDEL, G.; ECCLES, J. V. Modeling the ionospheric response to artificially produced density enhancements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 97, n. A2, p. 1193-1207, 1992.
- COLLEY, W. R.; HELLIS, R. A. Low – latitude zonal and vertical ion drifts seen by DE 2, **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. A6, p. 6751-6761, 1989.

CROWLEY, G.; HACKERT, C. L.; MEIER, R. R.; STRICKLAND, D. J.; PAXTON, L. J.; PI, X.; ROBLE, R. G. Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 magnetic storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 111, A10, 2006.

DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; PULLEN, S.; LUO, M.; ENE, A.; QIU, D.; ENGE, P. Ionospheric threat parameterization for local area Global-Positioning-System-based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, v. 47, n. 4, p.1141-1151, 2010.

DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; PULLEN, S.; LUO, M.; BLANCH, J.; ENGE, P. Using WAAS Ionospheric data to estimate LAAS short baseline gradients. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 2002, San Diego. **Proceedings... ION**, 2002. p. 523-530.

DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; SOBRAL, J. H. A.; TAKAHASHI, H.; SANTANA, D. C.; GOBBI, D., ... TAYLOR, M. J. Ionospheric irregularity zonal velocities over Cachoeira Paulista. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, 64, 12, 1511-1516, 2002.

DE PAULA, E. R.; IVER, K. N.; HYSELL, D. L.; RODRIGUES, E. A.; ...; TRIVEDI, N. B. Multi-technique investigations of storm-time ionospheric irregularities over the São Luís equatorial station in Brazil. **Annales Geophysicae**. 22, 10, p. 3513-3522, 2004.

DE PAULA, E. R.; MUELLA, M. T. A. H.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; BEACH, T. L.; GROVES, K. M. Magnetic conjugate point observations of kilometer and hundred-meter scale irregularities and zonal drifts. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. A08307, doi: 10.1029/2010JA015383, 2010.

ECCLES, J. V. A simple model of low latitude electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 103, n. A11, p. 26699-26708, 1998.

ENGE, P. K. The global positioning system: Signals, measurements, and performance. **International Journal of Wireless Information Networks**, v. 1, n. 2, p. 83-105, 1994.

FABER, V. Clustering and the continuous k-means algorithm, **Los Alamos Science**, v. 22, n. 138144.21, p.138 – 144, 1994.

FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; GONZALES, C.A; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C.; F - Region east-west drifts at Jicamarca, **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A1, p. 215-218, 1981.

FEJER, B. G. The equatorial ionospheric electric fields. A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 5/6, p. 377-386, 1981b.

- FEJER, B. G.; KUDEKI, E.; FARLEY, D.; Equatorial F region zonal plasma drifts. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. A12, p. 12249-12255, 1985.
- FEJER, B. G.; GONZALES, S. A.; WOODMAN, R. F. Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca, **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A8, p. 13,901-13,906, 1991.
- FEJER, B. G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: A review, **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 677-693, 1991b.
- FEJER, B. G. F region plasma drifts over Arecibo: solar cycle, seasonal and magnetic activity effects, **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A8, p. 13645-13652, 1993.
- FEJER, B. G.; SOUZA, J. R.; SANTOS, A. S.; COSTA PEREIRA, A. E. Climatology of F region zonal plasma drifts over Jicamarca, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, A12310, doi:10.1029/2005JA011324, 2005.
- FEJER, B. G.; JENSEN, J.W.; SU, S.Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L20106, doi:10.1029/2008GL035584, 2008.
- FEJER, B. G.; TRACY, B. D.; PFAFF, R. F. Equatorial zonal plasma drifts measured by the C/NOFS satellite during the 2008–2011 solar minimum, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, p. 3891–3897, doi:10.1002/jgra.50382, 2013.
- 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, 2010.
- HAERENDEL, G.; ECCLES, J. V.; ÇAKIR, S. Theory for modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of shear in the horizontal plasma flow. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n. A2, p. 1209-1223, 1992.
- HAERENDEL, G.; ECCLES, J. V. The role of the equatorial electrojet in the evening ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 97, n. A2, p. 1181-1192, 1992.
- HUBA, J. D.; JOYCE, G; FEDDER, J. A. Sami2 is Another Model of Ionosphere (SAMI2): a new low-latitude ionosphere model. **Geophysical Research Letters**, v. 105, n. A10, 23035-23053, 2000.
- HUBA, J. D.; JOYCE, G.; KRALL, J. Three-dimensional equatorial spread F modeling. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 10, 2008.
- HUANG, C.S.; KELLEY, M.C. Nonlinear evolution of equatorial spread F.2. Gravity wave seeding of Rayleigh–Taylor instability. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, 101, 293–302, 1996.

- JUNG, S.; LEE, J. Long-term ionospheric anomaly monitoring for ground based augmentation systems. **Radio Science**, v. 47, n. 4, 2012.
- KANNUNGO, T.; MOUNT, D.; NETANYAHU, N.; PIAIKO, C.; SILVERMAN, R.; WU, A. An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 24 (7), 881 – 892, 2002.
- KHAZANOV, G. V. **Space Weather Fundamentals**. Boca Raton: CRC Press, ISBN (978-1-4987-4907-7). 2016
- KELLEY, M.C. **The Earth's ionosphere**. London: Academic Press, 487 p. ISBN (0-12-404012-8), Second Edition 2009.
- KIL, H.; KINTNER, P. M.; PAULA, E. R.; KANTOR, I. J. Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 105, A3, 5317-5327, 2000
- KIL, H.; KINTNER, P. M.; PAULA, E. R.; KANTOR, I. J. Latitudinal variations of scintillation activity and zonal plasma drifts in South America. **Radio Science**, 37, 1, 2002.
- KUMAR, S. Morphology of equatorial plasma bubbles during low and high solar activity years over Indian sector. **Astrophysics and Space Science**, v. 362, n. 5, p. 93, 2017.
- LEE, J.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ENGE, P. Assessment of nominal ionosphere spatial decorrelation for GPS-based aircraft landing systems, **AIAA Aircraft Journal**, 44, 5, 1662-1669, 2007.
- LEE, J.; JUNG, S; BANG, E.; SEO, J.; PULLEN, S.; ENGE, P. Long term monitoring of ionospheric anomalies to support the local area augmentation system. In: ION GNSS 2010, INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 23., 2010, Portland, OR, EUA. **Proceedings...** ION, 2010. p. 2651-2660. Disponível pelo link: http://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Lee_IONGNSS_2010_LongTermIonoMonitoring_C5_paper.pdf
- LEE, J.; DATTA-BARUA, S.; ZHANG, G.; PULLEN, S.; ENGE, P. Observations of low-elevation ionospheric anomalies for ground-based augmentation of GNSS. **Radio Science**, v. 46, RS6005, 2011.
- LEE, J.; JUNG, S; KIM, M.; SEO, J.; PULLEN, S.; CLOSE, S. Results from automated ionospheric data analysis for Ground-Based Augmentation Systems (GBAS). In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING (ITM) OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, Newport Beach, CA, EUA. **Proceedings...** ION, 2012, p. 1451-1461.

Disponível pelo link:

https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Lee_IONGNSS_2012_Automated_Iono_Analysis.pdf

LUO, M.; PULLEN, S.; AKOS, D.; XIE, G.; DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; ENGE, P. Assessment of ionospheric impact on LAAS using WAAS supertruth data. In: ION ANNUAL MEETING, 58., AND GUIDANCE TEST SYMPOSIUM, CIGTF 21., 2002, Albuquerque, NM, EUA. **Proceedings...** ION, 2002, p. 175-186.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, 5., 1967, Berkeley. **Proceedings...** Berkeley, CA: University of California Press, 1967. v. 1, p. 281-297.

MARTINIS, C.; MERIWETHER, J.; NICIEJEWSKI, R.; BIONDI, M.; FESEN, C.; MENDILLO, M. Zonal neutral winds at equatorial and low latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 67, p. 1559-1569, 2001.

MARTINIS, C.; ECCLES, J. V.; BAUMGARDNER, J.; MANZANO, J.; MENDILLO, M. Latitude dependence of zonal plasma drifts obtained from dual-site airglow observations, **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A3, doi: 10.1029/2002JA009462, 2003.

MENDILLO, M.; TYLER, A. Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, p. 5778-5782, 1983.

MISRA, P.; ENGE, P. **Global Positioning System: signals, measurement, and performance**. 2nd edition, Massachusetts: Ganga-Jamuna Press, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo Navstar – GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287 p. ISBN (85-7139-32)

NISHIOKA, M.; SAITO, A.; TSUGAWA, T. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A5, 2008.

NOGUEIRA, P. A. B.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R. ; BAILEY, G. J.; BATISTA, I. S.; SHUME, E. B.; DENARDINI, C. M. Longitudinal Variation in GNSS -TEC and Topside Ion Density over South American Sector Associated with the Four-Peaked Wave Structures. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, p. n/a-n/a, 2013.

PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F. D.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; GOBBI, D. Plasma bubble zonal drift characteristics observed by airglow images over Brazilian tropical region. **Rev. Bras. Geof.**, v. 29, n. 2, p. 239-246, 2011.

PAULINO, I. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera-ionosfera**. 2012. 274 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3BB4LPS>. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.07.16.25-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BB4LPS>>.

PI, X.; WANG, C.; HAJJ, G. A.; ROSEN, G.; WILSON, B. D.; BAILEY, G. J. Estimation of ExB Drift Using a Global Assimilative Ionospheric Model: Na Observation System Simulation Experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A2, 2003. doi: 10.1029/2001JA009235.

PULLEN, S.; PARK, Y. S.; ENGE, P. Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS. **Radio Science**, 44, RS0A21, 2009. doi: 10.1029/2008RS004084

RATCLIFFE, J. A. **Physics of the upper atmosphere**. New York and London: Academic Press, 586 p. ISBN (60-8053), 1960.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York; London: Academic Press, ISBN (0125889402), 1969.

ROBLE, R. G.; RIDLEY, E. C. Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Electrodynamics General Circulation Model (TIME-GCM): Equinox Solar Cycle Minimum Simulations (30-500 km). **Geophysical Research Letters**, v. 21, n. 6, 1994. doi: 10.1029/93GL03391

SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; TEIXEIRA, J. R.; TAKAHASHI, H. Plasma irregularities in the tropical F-region detected by OI 777.4 nm and a 630 nm nightglow measurements. **Journal of Geophysical Research**, 86, 3496-3500, 1981.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 15, p. 1377-1383, 2000.

SANTOS, A. M.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I. S. Disturbance zonal and vertical plasma drifts in the Peruvian sector during solar minimum phases, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 121, doi: 10.1002/2015JA022146, 2016.

SANTOS, F. A. V. **Investigação do fluxo de momento das ondas de gravidade na alta atmosfera através da aeroluminescência**. 2007. 217 p. (INPE-14815-TDI/1257). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/07.18.12.20>>.

SCHUNK, R.; SCHERLISS, L.; SOJKA, J. J.; THOMPSON, D. C.; ANDERSON, D. N.; CODRESCU, M.; HOWE, B. M. Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM). **Radio Science**, v. 39, n. 1, 2004. doi: 10.1029/2002RS002794

SCHUNK, R.; NAGY, A. **Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry**. Cambridge university press, ISBN (978-0-521-87706-0), Second Edition 2009.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S. Airglow studies on the ionosphere dynamics over low latitude in Brazil. **Annales Geophysicae**, 36, 199-204, 1980a.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; ZAMLUTTI, C. J.; BATISTA, I. S. Association between plasma irregularities and airglow Brazilian low latitudes. **Geophysical Research Letters**, 7, 980-982, 1980b.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; SAHAI, Y. Equatorial plasma bubble eastward velocity characteristics from scanning airglow photometer measurements over Cachoeira Paulista. **Journal of atmospheric and terrestrial physics**, v. 47, n. 8-10, p. 895-900, 1985.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A. Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by emission scanning photometers. **Journal of atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, p. 729-743, 1991

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; ZAMLUTTI, C. J.; BORBA, G. L. Solar and geomagnetic activity effects on nocturnal zonal velocities of ionospheric plasma depletions. **Advances in Space Research**, v. 24, n.11, p.1507-1510, 1999.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; DE PAULA, E. R.; ZAMLUTTI, C. J.; DE AQUINO, M. G.; BORBA, G. L. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977–1998) of 630nm airglow observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12, p. 1517-1524, 2002.

SOUSASANTOS, J.; KHERANI, E. A.; SOBRAL, J. H. A. An alternative possibility to equatorial plasma bubble forecasting through mathematical modeling and Digisonde data, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 122, 2079–2088, doi:10.1002/2016JA023241, 2017.

SOUZA, J. R.; ASEVEDO, W. D.; DOS SANTOS, P. C. P.; PETRY, A; BAILEY, G. J.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Longitudinal variation of the equatorial ionosphere: modeling and experimental results. **Advances in Space Research**, 51(4), 654-660, 2013.

TAKEYASU, S.; KEISUKE, M.; TAKAYUKI, Y.; SUSUMU, S. Air Navigation with Global Navigation Satellite Systems and the Ionospheric Effects. **Journal of the National Institute of Information and Communications Technology**, v. 56, n. 1-4, p. 231-242, 2009.

TANIAR, D. **Data mining and knowledge discovery technologies**, Advances in data warehousing and mining series, London: IGI Publishing, 380 p. ISBN (978-1-59904-960-1), 2008.

TERRA, P. M.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H. Plasma bubble zonal velocity variations with solar activity in the Brazilian region. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3123-3128, 2004.

TSUNODA, Roland T. On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F. **Geophysical research letters**, v. 32, n. 8, 2005.

TSUNODA, Roland T. Day-to-day variability in equatorial spread F: Is there some physics missing?. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 16, 2006.

YOON, M.; LEE, J. Medium scale traveling ionospheric disturbances in the Korean region on 10 November 2004: Potential impact on GPS-based navigation systems. **Space Weather**, 12, 173-186, doi: 1002/2013SW001002, 2014.

VALLADO, D. A. **Fundamentals of astrodynamics and applications**, Berlin: Springer, 2007. ISBN: 978-0-387-71831-6

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 2004. 253 p. (INPE-12249-TDI/978). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/05.24.10.59>>.

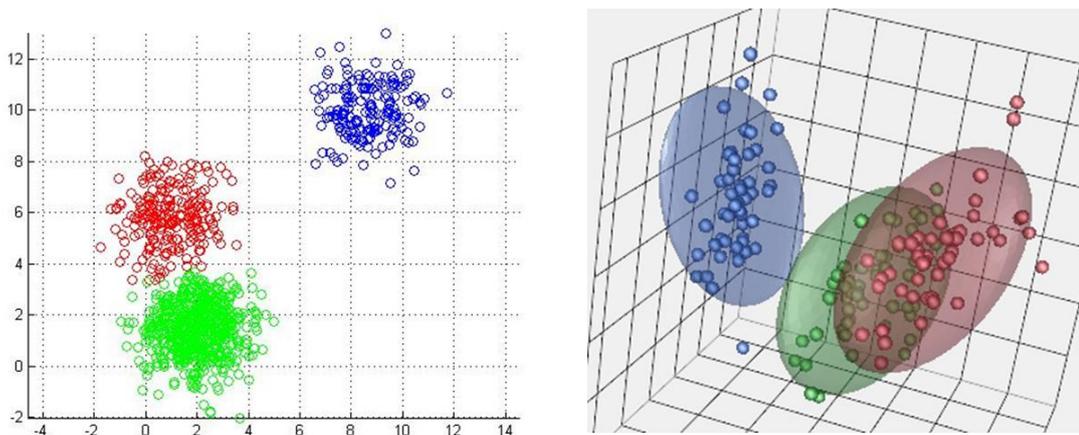
APÊNDICE A – ALGORITMO K-MEANS

As técnicas de agrupamento em exploração de dados tem recebido bastante atenção da comunidade especializada em linguagem de máquina devido a sua grande importância em diversos ramos de pesquisa. Neste sentido o *k-means* é um dos algoritmos de agrupamento e reconhecimento de padrões mais conhecidos.

Em exploração de dados, a extração do conhecimento a partir deles dá-se basicamente por dois meios distintos: a técnica supervisionada e a não supervisionada. A não supervisionada acontece principalmente quando o problema não é predefinido, e este é o caso do *k-means*. Em 1967 MacQueen (1967) desenvolveu o algoritmo de agrupamento *k-means* para a classificação e análise de observações multivariadas. Desde então, enquanto técnicas não supervisionadas vêm sendo estudadas extensivamente em áreas da estatística, aprendizagem de máquina e exploração de dados, o *k-means* se tornou o mais usado algoritmo de reconhecimento de padrão (TANIAR, 2008).

A Figura A1 mostra um exemplo gráfico de agrupamento feito pelo processamento do algoritmo *k-means* em duas e três dimensões.

Figura A1: Exemplos de processamento do k-means em 2D e 3D



Fonte: Material do curso Artificial Intelligence: Principles and Techniques da Universidade de Stanford. Disponível no link: <http://stanford.edu/~cpiech/cs221/handouts/kmeans.html> e acessado em 01/11/17.

Levando em consideração ao trabalho realizado nesta Tese, o *k-means* foi utilizado para selecionar padrões similares de atrasos ionosféricos nas duas estações escolhidas para o estudo. Dado um conjunto de n pontos (x_1, x_2, \dots, x_n) na dimensão espacial \mathbb{R} , o *k-means* tem por objetivo particionar as n observações dentro de k janelas $(S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\})$ de

modo a minimizar a distância quadrática média (norma euclidiana) de cada ponto de dado para o seu centro mais próximo dentro da janela (KANNUNGO et al., 2002; BANG AND LEE, 2013).

O k-means encontra o mínimo local usando um esquema iterativo simples. Uma função objetiva E pode ser minimizada por

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - z_i\| \quad (A1)$$

Onde x_j é o ponto do dado no conjunto S_i e z_i é o ponto de referência do conjunto S_i .

Em reconhecimento de padrão as características de um vetor representam as características numéricas de um objeto. Essas características do vetor são consideradas como input do problema ao aplicar o algoritmo. Para classificar arbitrariamente as curvas dos atrasos ionosféricos em grupos (ou janelas) de acordo com o tipo de padrão de atraso ionosférico, é necessária a seleção da característica do vetor que reflita acuradamente as características dos atrasos ionosféricos em questão.

Neste estudo são usados os coeficientes da curva polinomial que melhor se ajustou a série temporal dos atrasos ionosféricos como componentes das características do vetor. A melhor ordem da curva polinomial foi determinada para a análise para minimizar os erros.

Além das características do vetor, o valor de k é variável de acordo com o tamanho da série temporal do dia de estudo percebido por cada PRN. A partir daí, a estimativa automática da velocidade leva em consideração o par de estações entre as quais a irregularidade é observada. O algoritmo k-means inicia escolhendo pontos aleatoriamente dentro do domínio (x_1, x_2, \dots, x_n) e então cria as janelas associando cada observação com o ponto de referência mais próximo. Em sequência o centro geométrico de cada janela é considerado o novo ponto de referência para que ela seja usada para a nova partição. O procedimento se repete até que E na equação (A1) seja minimizado.

