

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**ESTUDO DO SISTEMA IONOSFERA-TERMOSEFERA DURANTE EVENTOS
EXTREMOS DE CLIMA ESPACIAL (TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS), NO
DECORRER DA FASE DESCENDENTE DO CICLO SOLAR 24.**

São José dos Campos, SP.

2020

BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**ESTUDO DO SISTEMA IONOSFERA-TERMOSEFERA DURANTE EVENTOS
EXTREMOS DE CLIMA ESPACIAL (TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS), NO
DECORRER DA FASE DESCENDENTE DO CICLO SOLAR 24.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, SP.

2020

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Ribeiro, Brunno Augusto Gomes
Estudo do sistema ionosfera-termosfera durante eventos extremos de clima espacial (tempestades geomagnéticas), no decorrer da fase descendente do ciclo solar 24 / Brunno Augusto Gomes Ribeiro; orientadora, Paulo Roberto Fagundes. - São José dos Campos, SP, 2020.

1 CD-ROM, 147 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

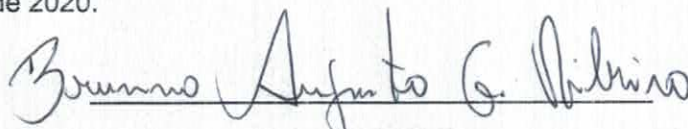
1. Física e Astronomia. 2. Tempestades Geomagnéticas. 3. Ionosfera. 4. GPS. 5. Ionossonda. I. Fagundes, Paulo Roberto, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Brunno Augusto Gomes Ribeiro, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 30 de Setembro de 2020.



Autor(a) da Obra

Data da defesa: 17 / 09 / 2020

BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**“ESTUDO DO SISTEMA IONOSFERA-TERMOSSFERA DURANTE
EVENTOS EXTREMOS DE CLIMA ESPACIAL (TEMPESTADES
GEOMAGNÉTICAS), NO DECORRER DA FASE DESCENDENTE
DO CICLO SOLAR 24.”**

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. ALEXANDRE TARDELLI _____

PROF. DR. PAULO ROBERTO FAGUNDES _____

PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT _____

PROF. DR. MARLOS ROCKENBACH DA SILVA - INPE _____

PROF. DR. MAURÍCIO JOSÉ ALVES BOLZAM - UFJ _____

Prof.^a Dr.^a Lucia Vieira

Diretora do IP&D - Univap

São José dos Campos, 17 de setembro de 2020.

Aos meus pais, Angela Maria Gomes Ribeiro e Nelson Lucio Ribeiro,
aos meus irmãos Camila, Cezar, Carolina
e minha esposa Bruna F. Ribeiro.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes pelo empenho dedicado à elaboração desta tese e pelo apoio e confiança.

Ao Prof. Dr. Peter Leroy (in memoriam) por sempre acreditar no meu potencial e pelas palavras de apoio durante momentos difíceis.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro e institucional no processo de número **2016/10495-5**.

À Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, por ter me permitido ingressar no programa de doutorado em Física e Astronomia.

A todos os professores, devo toda a minha gratidão. Obrigado por tudo que me ensinou e por nunca desistir de exercer a sua profissão. A palavra Doutor, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão o meu eterno agradecimento.

E aos meus colegas de curso e a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indiretamente para realização desta pesquisa.

Aos meus amáveis pais, Angela Maria e Nelson Ribeiro, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos meus queridos irmãos Camila, Cezar e Carolina por toda a força.

A minha linda e fantástica esposa Bruna F. Ribeiro pelo apoio ilimitado, compreensão, amor e incentivo, sempre. É para mim, um grande exemplo de garra e persistência.

Aos meus avós, Tios e Primos pelo incentivo.

Aos amigos, companheiros e irmãos na amizade, que fazem parte da minha vida e que vão continuar presentes para sempre.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha jornada, o meu sincero muito obrigado.

*“Eu quase que nada não sei. Mas desconfio de muita
coisa.”*

(Grande Sertão: Veredas.
João Guimarães Rosa, 1956)

ESTUDO DO SISTEMA IONOSFERA-TERMOSEFERA DURANTE EVENTOS EXTREMOS DE CLIMA ESPACIAL (TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS), NO DECORRER DA FASE DESCENDENTE DO CICLO SOLAR 24.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar o acoplamento do sistema ionosfera-termosfera desde a região equatorial/baixas latitudes até além da crista da Anomalia Ionosférica Equatorial (*Equatorial ionization anomaly* – EIA) durante períodos geomagneticamente perturbados nos setores latino-americano e africano. O estudo será realizado no decurso da fase descendente do ciclo solar 24 com tempestades geomagnéticas que ocorreram entre 16 e 18 de janeiro de 2013 (moderada, índice Dst -53 nT), entre 22 e 24 de junho de 2015 (intensa, índice Dst -204 nT) e entre 27 e 29 de maio de 2017 (intensa, índice Dst -125 nT) e os principais aspectos que serão abordados e investigados são: a) Propagação (como velocidade e direção) das TIDs (perturbações ionosféricas propagantes); b) Ocorrência de irregularidades de plasma do tipo Spread-F; c) Comportamento da EIA durante períodos perturbados; d) Perturbações ionosféricas positivas e negativas durante períodos perturbados; e) Acoplamento termosfera-ionosfera durante períodos perturbados; e f) Possíveis modificações no sistema termosfera-ionosfera devido ao dínamo perturbado e/ou PPEF (penetração rápida de campos elétricos). Os instrumentos que serão utilizados para investigação consistir em dados observacionais de GPS-TEC, ionossonda e fotômetro imageador all-sky.

Palavras -chave: Tempestades Geomagnéticas. Ionosfera. TEC. GPS. All-sky. Ionossonda.

STUDY OF IONOSPHERE-THERMOSPHERE DURING EXTREME SPACE WEATHER EVENTS (GEOMAGNETIC STORMS) DURING THE DESCENDING PHASE OF SOLAR CYCLE 24.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the coupling of the ionosphere-thermosphere system from the equatorial / low latitudes region to even beyond the crest of the Equatorial Ionospheric Anomaly (Equatorial ionization anomaly - EIA) during geomagnetically disturbed periods in the Latin American and African sectors. The study will be carried out during geomagnetic storms which occurred between 16 and 18 January 2013 (moderate, Dst index -53 nT), between 22 and 24 June 2015 (intense, Dst index - 204 nT) and between 27 and 29 May 2017 (intense, index Dst -125 nT) in/during the descending phase of the solar cycle 24 and the main aspects that will be addressed and investigated are: a) Propagation characteristics (such as speed and direction) of TIDs (traveling ionospheric disturbances); b) occurrence of plasma irregularities of the Spread-F type; c) EIA behavior during disturbed periods; d) positive and negative ionospheric disturbances during disturbed periods; e) thermosphere-ionosphere coupling during disturbed periods; and f) possible changes in the thermosphere-ionosphere system due to the disturbed dynamo and / or PPEF (rapid penetration of electric fields). The instruments that will be used for the investigation consist of GPS-TEC, ion probe and all-sky imager.

Keywords: Geomagnetic Storms. Ionosphere. TEC. GPS. *All-sky*. Ionosonde.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão da Atmosfera em Função do gradiente de temperatura.	26
Figura 2 – Distribuição vertical da composição química.	27
Figura 3 – Perfil vertical da ionosfera.	30
Figura 4 – Esquema de forças que atuam sobre o plasma causando o efeito fonte na ionosfera e originando a anomalia de ionização equatorial.....	36
Figura 5 – Ilustração da magnetosfera terrestre interagindo com o vento solar (concepção artística).	37
Figura 6 – Representação do campo magnético interplanetário (IMF) originário do Sol.....	38
Figura 7 – Reconexão do campo magnético interplanetário com a magnetosfera da Terra....	39
Figura 8 – Variação do índice Dst durante uma tempestade geomagnética juntamente com suas fases. As fases estão indicadas por linhas verticais.	40
Figura 9 – Variação diurna para o setor oeste na região de baixa latitude norte referente aos dias 06 a 07 de junho de 2013	42
Figura 10 – Ilustração do processo de undershielding mostrando a intensificação da EIA no setor diurno.	44
Figura 11 – Ilustração do processo de overshielding mostrando a inibição da EIA no setor diurno.....	45
Figura 12 – Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.....	46
Figura 13 – Mapa dos observatórios geomagnéticos responsável pelo índice Kp.	48
Figura 14 – Mapa dos observatórios geomagnéticos responsável pelo índice Dst.	50
Figura 15 – Disposição da constelação dos satélites do sistema GPS.....	53
Figura 16 – Localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS.	54
Figura 17 – Representação Gráfica da utilização de receptores GPS.	54
Figura 18 – Representação básica do sinal transmitido pelo sistema GPS.	55
Figura 19 – Componentes básico de um Receptor GPS.....	56
Figura 20 – Erros envolvidos entre o caminho direto e o caminho real.....	59
Figura 21 – Geometria do caminho da propagação do sinal do GPS até o receptor.	64
Figura 22 – Mapa do Brasil mostrando as estações GPS-TEC (ícones vermelhos) disponíveis para as análises das tempestades geomagnéticas.....	66
Figura 23 – Desenho esquemático do processo de transmissão da ionossonda.	68
Figura 24 – Ionograma obtido em Jataí em 1 de maio de 2017.	69
Figura 25 – Mapa da Rede de ionossondas UNIVAP.	71
Figura 26 – Sistema de transmissão e recepção da ionossonda digital CADI.....	72
Figura 27 – Antena de transmissão (A) e recepção (B) da CADI instalada em São José dos Campos.	73
Figura 28 – Tela inicial do programa UDIDA que foi desenvolvido pela UNIVAP.	74
Figura 29 – Ionograma obtido em São José dos Campos, em 01/05/17, mostrando a extração dos parâmetros ionosféricos ($h'f$, foF2 e hpF2).	74
Figura 30 – Sistema óptico detalhado do imageador All-sky.....	77
Figura 31 – Tela inicial da interface gráfica do UASDA, programa utilizado para a análise de dados obtidos pelo imageador all-sky.	79
Figura 32 – Índices geomagnéticos Dst e Kp, velocidade do vento solar (V_p), densidade de prótons (N_p) e campo magnético interplanetário (B_z) entre os dias 16-18 de janeiro de 2013.	81
Figura 33 – Sequência de mapas VTEC para o dia calmo (16 de janeiro de 2013) e perturbado (17 de janeiro de 2013) durante o período da fase principal da tempestade das 15:00 UT às 22:00 UT. As linhas pretas nos mapas indicam o equador geomagnético.	83

Figura 34 – Variação diurna do VTEC para os setores leste e oeste brasileiro durante 16 de janeiro (dia calmo, linha preta) e 17 de janeiro (dia perturbado, fase principal da tempestade, linha vermelha).	86
Figura 35 – Sequência de mapas VTEC para o período de transição entre as fases principal e de recuperação da tempestade geomagnética (de 17 a 18 de janeiro de 2013), entre as 17h e as 18h UT (~ 20:00 às 00:15 LT).....	89
Figura 36 – (A) Mapa Mostrando a localização das 6 estações GPS-TEC (ícones verdes) usadas para investigar a dinâmica da nuvem ionosférica positiva equatorial durante a transição das fases principal e de recuperação da tempestade geomagnética ocorrida em 17-18 de janeiro, 2013. (B) Os painéis à esquerda mostram a variação diurna do VTEC, entre 24 horas, para cada estação considerada durante as condições de período calmo (linha preta) e perturbado (linha vermelha). Os painéis à direita mostram as variações correspondentes Δ VTEC (Perturbado - Calmo) entre 22:00 e 06:00 UT.....	91
Figura 37 – (A) Mapa mostrando as localizações das estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica latitudinal da EIA nos setores leste (marcadores brancos) e oeste (marcadores verdes). As estações GPS-TEC são consideradas ao longo das direções perpendiculares ao equador geomagnético (linhas pretas). As distâncias entre os equadores geográficos e geomagnéticos e os setores leste e oeste brasileiros também são mostradas em quilômetros (km) e graus (com setas brancas duplas). (B) Gráficos de contorno VTEC mostrando a evolução da EIA no setor leste brasileiro em função do UT e dip latitude. (C) O mesmo que a Figura 33B, mas para o setor oeste brasileiro.....	93
Figura 38 – Gráficos de contorno para a diferença (Δ VTEC) entre o VTEC registrado em dias perturbados, 17 e 18 de janeiro de 2013, e no dia calmo, 16 de janeiro de 2013, das 15:00 UT às 05:00 UT. (A) Gráficos de contorno, para a diferença (Δ VTEC), mostrando a evolução das fases positivas da ionosfera no setor leste brasileiro em função do dip latitude e UT. (B) O mesmo que a Figura 34A, mas para o setor oeste brasileiro. A seta preta no painel superior indica o dip latitude da estação de ionossonda de Fortaleza.	95
Figura 39 – (A) As variações de h'F durante os períodos calmos (curvas negras) e perturbados (curvas vermelhas) de 16 de janeiro de 2013 (dia calmo) e 17 e 18 de janeiro de 2013 (dias perturbados) observadas em Jicamarca (JICA), Fortaleza (FORT) e Port Stanley (PSTA). (B) O mesmo que 39(A), mas para foF2. As bandas branca e amarela indicam Spread-F frequência e range, respectivamente.	97
Figura 40 – Índices geomagnéticos (Dst e Kp) e parâmetros interplanetários (Np, Vp e Bz) durante 22-24 de junho de 2015.	100
Figura 41 – Mapa do território brasileiro com as estações GPS-TEC representadas pelos os marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste) que foram utilizadas para analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015.	101
Figura 42 – As variações diurnas do VTEC (linhas sólidas vermelhas) para as estações GSP-TEC nos setores brasileiros Leste (A) e Oeste (B) durante as fases principal e de recuperação.	103
Figura 43 – Uma rede de estações GPS-TEC ao longo de linhas pretas que são perpendiculares ao equador geomagnético são usadas para investigar a variação diária da EIA, durante o período de 22 a 24 de junho de 2015. (A) Variação diurna da EIA no setor leste brasileiro. (B) Variação diurna da EIA no setor oeste brasileiro.....	105
Figura 44 – Mapas VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor brasileiro, obtidos através de 116 estações GPS-TEC. Os mapas são de 22 a 23 de junho de 2015, das 12:00 UT às 23:30 UT.....	107
Figura 45 – Mapa do território africano mostrando as estações GPS-TEC representadas pelos marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste) usadas para analisar o	

comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente.	109
Figura 46 – As variações diurnas do VTEC (linhas sólidas vermelhas) para as estações nos setores Leste (A) e Oeste (B) africanos durante as fases principal e de recuperação.....	110
Figura 47 – Mapa mostrando as localizações das estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica latitudinal da EIA nos setores leste (marcadores verdes) e oeste (marcadores vermelhos).	113
Figura 48 – Rede de estações GPS-TEC ao longo de linhas pretas que são perpendiculares ao equador geomagnético são usadas para investigar a variação diária da EIA, durante o período de 22 a 24 de junho de 2015. (A) Variação diurna da EIA no setor leste africano.	114
Figura 49 – Mapa do território africano com as estações GPS-TEC utilizadas na análise do comportamento da EIA. O setor leste foi acrescentado 6 estações.	115
Figura 50 – Variação diurna da EIA entre os dias 22-24 de junho de 2015 para o setor leste africano.	116
Figura 51 – Mapa do território africano mostrando as estações GPS-TEC representadas pelos os marcadores azuis usadas para analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015.....	117
Figura 52 - Mapas VTEC (gráfico de dispersão do TEC) em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor africano, obtidos através de 86 estações GPS-TEC.	118
Figura 53 – Gráficos de linha dos setores leste africano e brasileiro (A) e oeste africano e brasileiro (B).....	120
Figura 54 – Gráficos de contorno da variação diurna da EIA para os setores leste brasileiro (A) e setor leste africano (B) durante as fases principal e de recuperação.	122
Figura 55 – Índice auroral (AE) durante as fases principal e de recuperação da tempestade.	123
Figura 56 – Índices geomagnéticos (Dst e Kp) e parâmetros interplanetários (Np, Vp e Bz) durante 27 a 29 de maio de 2017.....	125
Figura 57 – Mapa do território brasileiro com as estações GPS-TEC(marcadores vermelhos para setor oeste e marcadores amarelos para setor leste), ionossondas (marcadores verdes) e all-sky (marcador azul) que foram utilizadas para analisar o comportamento ionosférico e EIA durante a tempestade geomagnética ocorrida em 27-29 de maio de 2017.	126
Figura 58 – As variações diurnas do VTEC, em função do UT, (linhas sólidas vermelhas) para os períodos de 27 a 29 de maio de 2017 para os setores (A) leste e (B) oeste brasileiro.	129
Figura 59 – Gráficos de contorno VTEC mostrando a evolução da EIA nos setores (A) leste e (B) oeste brasileiro em função do dip latitude e UT.....	131
Figura 60 – Mapas VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor brasileiro, obtidos através de 129 estações GPS-TEC.....	133
Figura 61 – As variações diurnas de h'F, em função do UT, para ARA, JAT e SJC durante o período de 27 a 29 de maio de 2017.....	135
Figura 62 – As variações diurnas de foF2, em função do UT, para ARA, JAT e SJC durante o período de 27 a 29 de maio de 2017.....	136
Figura 63 – Índice auroral (AE) durante as fases principal e de recuperação da tempestade.	137
Figura 64 – (A) Os painéis da esquerda mostram a variação diurna do VTEC para o setor leste durante 26 de maio (dia calmo, linha preta) e 28 de maio (dia perturbado, fase principal da tempestade, linha vermelha) para as estações SALU, RECF e CEFE. (B) O mesmo que (A), mas para as estações ROCD, CUIB e SMAR localizadas no setor oeste. Os painéis	

centrais mostram as variações $\Delta VTEC$ correspondentes (28 - 26). Os painéis da direita mostram as variações $\Delta VTEC$ correspondentes (Perturbado - média de 10 dias calmos).... 140

Figura 65 – Sequência de imagens, na emissão OI 630 nm, obtidas pelo fotômetro imageador All-Sky de Jataí realizada entre 06:12 e 07:27 UT (03:12 e 04:27 LT) na noite de 29 de maio de 2017.	142
Figura 66 – Sequência de imagens, na emissão OI 630 nm, obtidas pelo fotômetro imageador All-Sky de Manaus realizada das 07:55 às 08:57 UT (03:55 às 04:57 LT) na noite de 29 de maio de 2017.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais átomos e moléculas encontrados na atmosfera terrestre e seus potenciais de ionização e máximo comprimento de Onda.	29
Tabela 2 – Lista dos 13 observatórios magnéticos distribuídos pela Terra. A Tabela apresenta informações como: Nome, País, latitude e longitude.	48
Tabela 3 – Classificação das atividades geomagnéticas utilizando valores do índice Kp.....	49
Tabela 4 – Lista dos observatórios magnéticos responsáveis pelo índice Dst. A Tabela apresenta informações como: Nome, País, latitude e longitude.	50
Tabela 5 – Classificação das tempestades geomagnéticas através do índice Dst.....	50
Tabela 6 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos nas observáveis GPS.....	57
Tabela 7 – Lista de estações, coordenadas e instrumentos que a rede de observatórios da UNIVAP.....	71
Tabela 8 - Principais características das emissões do oxigênio atômico OI 557,7 nm, OI 630,0 nm e OI 777,4 nm que são observadas pelos imageadores da UNIVAP.....	77
Tabela 9 – Detalhes das 6 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a primeira perturbação ionosférica positiva que ocorreram em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade....	85
Tabela 10 – Detalhes das 6 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a segunda perturbação positiva da ionosfera que ocorreram de 17 a 18 de janeiro de 2013.....	92
Tabela 11 – Detalhes das 18 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a dinâmica da EIA nos setores leste e oeste do Brasil.....	94
Tabela 12 - Detalhes das 3 estações de ionossondas (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas nesta análise.	97
Tabela 13 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015 nos setores leste e oeste brasileiro.	102
Tabela 14 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015 nos setores leste e oeste africano.	108
Tabela 15 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017 nos setores leste e oeste brasileiro.	127
Tabela 16 – Detalhes das 3 estações de ionossondas (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para analisar está tempestade.	128

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AE – Eletrojato Auroral (Auroral Electrojet)
ACE – Advanced Composition Explorer
CADI – Canadian Advanced Digital Ionosonde
CCD – Charge Coupled Device
CME – Ejeções de Massa Coronal (Coronal Mass Ejection)
CMT – Campo magnético da Terra
Dst – Disturbance Storm Time
EIA – Anomalia de Ionização Equatorial (Equatorial ionization anomaly)
EUV – Extrema ultravioleta
GLONASS – Global Navigation Satellite Systems
GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite Systems)
GPS – Sistema de Posicionamento Global
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMF – Campo magnético interplanetário (interplanetary magnetic field)
ISGI – Serviço Internacional de Índices Geomagnético (International Service of Geomagnetic Índices)
Kp – Índice planetário (Planetary Kennziffer)
LT – Hora local
MAG – Magnetic Field Experiment
PPEF – Penetração rápida de campos elétricos (Prompt penetration electric field)
PRN – Códigos de ruído falsamente aleatório (pseudo-random-noise)
RF – Rádio frequências
RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
SSC – Início súbito (Storm Sudden Commencements)
SWEPAM – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor
TEC – Conteúdo Eletrônico Total (Total Electron Content)
TECU – Unidade de TEC (Electron Content Unit)
TID – Perturbação ionosférica propagante (Travelling Ionospheric Disturbance)
UASDA – UNIVAP All Sky Data Analysis
UDIDA – UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis
UHF – Faixa de frequência ultra-alta (Ultra High Frequency)
UNIVAP – Universidade do Vale do Paraíba

UT – Hora Universal

VTEC – Conteúdo Total de Elétrons na Vertical (Vertical Total Electron Content)

LISTA DE SIMBOLOS

Latinos

- B – Campo magnético interplanetário total, nT
- \mathbf{B} – Vetor campo geomagnético
- B_z – Componente vertical do campo magnético interplanetário
- c – Velocidade da luz, $3,0 \times 10^8$ m/s
- d_{R}^{S} – Atrasos das portadoras no hardware do satélite
- d_{R}^{R} – Atrasos das portadoras no hardware do receptor
- \mathbf{E} – Vetor campo elétrico
- f – Frequência nominal, Hz
- foF2 – Frequência do pico da camada F2
- f_t – Frequência da onda eletromagnética transmitida
- f_p – Frequência do plasma
- f° – Frequência do sinal gerado no oscilador do satélite
- f_R – Frequência do sinal gerado no oscilador do receptor
- f_1 – Frequência da portadora L1
- f_2 – Frequência da portadora L2
- f_5 – frequência da portadora L5
- g – Aceleração da gravidade terrestre, m s^{-2}
- h' – Altura virtual da camada ionosférica
- $h'f$ – Altura mínima virtual da camada F
- hpF2 – Altura do pico da camada da região F2
- H_m – Altura média do pico de densidade da ionosfera (300 km)
- H – Componente horizontal do campo geomagnético
- I_{fR}^{S} – Refração ionosférica para a fase da onda portadora
- I_{gR}^{S} – Refração ionosférica para o grupo
- k – Constante de Boltzmann, $1,381 \times 10^{-23}$ Joule . s
- L1 – Onda portadora do sinal GPS, MHz
- L2 – Onda portadora do sinal GPS, MHz
- L5 – Onda portadora do sinal GPS, MHz
- N – Ambiguidade

n – Densidade numérica dos constituintes atmosféricos, m^{-3}
 N_p – Densidade de prótons do vento solar
 N_e – Densidade de elétrons, $el\ m^{-3}$
 p – Pressão atmosférica, $Kg\ m^{-2}$
 ρ – Distância geométrica entre o satélite e o receptor.
 R – Antena receptora
 R_m – Raio médio da Terra
 S – Satélite
 T – Temperatura absoluta, K
 t – Tempo, s
 t^S – Instante de emissão do sinal
 t_R – Instante de recepção do sinal
 z – Ângulo zenital do satélite
 z' – Ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico
 v – Velocidade média de derivas das partículas ionizadas
 V_p – velocidade do vento solar
 v_f – Velocidade da fase portadora
 v_g – Velocidade da fase de grupo

Gregos

δ^S – Desvio do relógio do satélite
 δ_R – Desvio do relógio do receptor
 ρ – Distância geométrica
 ϕ_0^S – Fase da onda portadora gerada no receptor
 ϕ_{0R} – Fase da onda portadora gerada no satélite
 λ – Comprimento de onda
 $\Delta_{\mathfrak{R}}^{iono}$ – Efeitos das refrações ionosférica
 $\Delta_{\mathfrak{R}}^{trop}$ – Efeitos das refrações troposférica
 $m_{\mathfrak{R}}$ – Efeito do multicaminho nas portadoras L1 e L2
 $\varepsilon_{\mathfrak{R}}$ – Ruído do receptor nas portadoras L1 e L2

Símbolos Especiais

∇ – Operador nabla

∇_p – Gradiente de pressão

\mathfrak{R} – Pseudodistância

\sim – Aproximadamente

\mathbf{x} – Produto Vetorial

\mathfrak{S}_1 – Fase da onda portadora para L1 acrescida dos erros que interfere no cálculo do TEC

\mathfrak{S}_2 – Fase da onda portadora para L2 acrescida dos erros que interfere no cálculo do TEC

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos do trabalho.....	23
2 ATMOSFERA NEUTRA, IONOSFERA E MAGNETOSFERA	25
2.1 Atmosfera terrestre	25
2.2 Atmosfera neutra	25
2.3 Ionosfera.....	28
2.3.1 Camadas ionosféricas	29
2.3.2 Transporte de plasma na ionosfera.....	31
2.3.3 Eletrodinâmica da ionosfera terrestre.....	33
2.3.3.1 Ventos Neutros Termosféricos	34
2.3.3.2 Derivas ionosféricas.....	35
2.3.3.3 Anomalia de ionização equatorial.....	35
2.4 Magnetosfera terrestre.....	36
2.5 Tempestades Geomagnéticas	37
2.5.1 Efeitos das tempestades geomagnéticas na ionosfera.....	40
2.5.2 Campos elétricos perturbados.....	42
2.5.3 Penetração rápida de campo elétrico.....	42
2.5.4 Dínamo perturbado	45
2.5.5 Distúrbios ionosféricos propagantes	46
2.6 Principais Índices Geomagnéticos.....	47
2.7 Parâmetros Interplanetários	51
3 INSTRUMENTAÇÃO	51
3.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS).....	51
3.1.1 Sistemas de Posicionamento Global – GPS	52
3.1.2 O sinal do sistema GPS e suas especificações.....	55
3.1.3 Receptores GPS e seus componentes básicos	56
3.1.4 Observáveis do sistema GPS e erros relacionados	56
3.1.5 Refração ionosférica, cálculo do TEC e cálculo do VTEC	59
3.1.6 Redes de dados RBMC e UNAVCO	65
3.2 Ionossonda.....	66
3.2.1 Princípios de funcionamento da ionossonda	67
3.2.2 Rede de ionossondas UNIVAP	70
3.2.3 Análise de dados de ionossonda.....	73

3.3 Rede UNIVAP de imageadores de tipo <i>All sky</i>	75
3.3.1 Imageadores de tipo <i>All-sky</i>	76
3.3.2 Processamento de dados utilizando UASDA	78
4 ANÁLISE DE DADOS DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS	79
4.1 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 18 janeiro de 2013	80
4.1.1 Primeira perturbação ionosférica positiva observada em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade	82
4.1.2 Segunda perturbação ionosférica positiva observada em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade	88
4.1.3 Resposta da EIA devido as duas perturbações ionosféricas	92
4.1.4 Variações do h'F e foF2 durante período de tempestade da região equatorial até médias latitudes	96
4.1.5 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 16 e 18 janeiro de 2013	98
4.2 Tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015	99
4.2.1 Análise ionosférica sobre o território brasileiro	100
4.2.2 Análise ionosférica sobre o território africano	107
4.2.3 Comparação entre territórios africanos e brasileiros	119
4.2.4 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015	121
4.3 Tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017	124
4.3.1 Análise da dark-band observada em 29 maio de 2017	141
4.3.2 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017	144
5 CONCLUSÕES	145
6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	147
REFERÊNCIAS	148

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual se beneficiou significativamente das pesquisas em física da ionosfera durante o último século (navegação, posicionamento global, comunicação de longa distância, transmissão de dados e sinais via satélite). Porém, a mesma sociedade tornou-se extremamente dependente dessas novas tecnologias, e o uso dos satélites tornou-se imprescindível à sociedade moderna. Assim, uma compreensão detalhada da física da alta atmosfera e da física da ionosfera (ambiente onde a maioria dos satélites orbita), durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados, bem como o acoplamento entre as diversas camadas da atmosfera terrestre é importante para o progresso e o bem-estar da sociedade moderna.

Apesar do avanço científico alcançado através de estudos e novas tecnologias sobre o clima espacial, existem ainda questões a serem investigadas para um melhor entendimento dos processos de acoplamento de energia entre o Sol e a Terra (PRÖLSS, 1995; ABDU, 1997; FEJER; SCHERLIESS, 1997). Várias técnicas de observação, tais como medidas de ionossondas, medidas de fotômetros do tipo All-sky e medidas de receptores GPS-TEC, têm sido utilizadas para estudar o comportamento da ionosfera. Nesse sentido, um dos grandes desafios da física espacial é explicar o comportamento do sistema ionosfera-termosfera durante períodos geomagneticamente perturbados (tempestades geomagnéticas).

1.1 Objetivos do trabalho

Este estudo tem como objetivo investigar e compreender o acoplamento do sistema ionosfera-termosfera desde a região equatorial/Baixas latitudes até além do pico da Anomalia Ionosférica Equatorial (*Equatorial ionization anomaly* – EIA) durante períodos geomagneticamente perturbados, nos setores Latino-Americano e Africano. O estudo foi realizado no decurso da fase descendente do ciclo solar 24 com tempestades geomagnéticas que ocorreram em 16 – 21 de janeiro de 2013, em 22 – 24 de junho de 2015 e em 27 – 29 de maio de 2017. Durante as tempestades geomagnéticas foram investigados a ocorrência de irregularidades de plasma do tipo Spread-F, a velocidade e a direção de propagação das perturbações ionosféricas propagantes (*Travelling Ionospheric Disturbance* – TID) e as possíveis modificações no sistema termosfera-ionosfera devido ao dínamo perturbado ou a penetração rápida de campos elétricos (*Prompt penetration electric field* – PPEF). Para

analisar todas as perturbações que ocorrem durante as tempestades geomagnéticas foram utilizados dados de GPS-TEC, ionossonda e do fotômetro imageador all-sky. Para classificar as tempestades geomagnéticas utilizamos os índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) obtidos nos seguintes sítios: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>, https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html. Para visualização do início súbito das tempestades geomagnéticas (*sudden storm commencement* – SSC) utilizamos o boletim mensal do Serviço Internacional de Índices Geomagnético (*International Service of Geomagnetic Indices* – ISGI), que foi obtido no sítio: <http://isgi.unistra.fr/>. E para os dados de GPS-TEC utilizamos o banco de dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, sob a responsabilidade do projeto Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC (<http://www.ibge.gov.br/>) e UNAVCO que é um consórcio governado por uma universidade sem fins lucrativos que facilita a pesquisa e educação em geociências (<http://www.unavco.org/>). Os dados de Ionossondas do tipo CADI e de fotômetro imageador do tipo all-sky foram obtidos pela rede de observatórios de física espacial da UNIVAP. Para dados de Ionossondas do tipo DIGISSONDA, instalados em Jicamarca, Port Staley e Fortaleza utilizamos o banco de dados Lowell GIRO Data Center (<http://giro.uml.edu/>), onde são extraídos do observatório de rádio de Jicamarca do Instituto Geofísico del Peru (<http://www.igp.gob.pe/>), Port Stanley do Laboratório SERC Rutherford Appleton e o EMBRACE do Instituto Nacional Brasileiro para Pesquisa Espacial (INPE) (<http://www2.inpe.br/climaespacial/>).

O desenvolvimento e conclusão deste trabalho serão divididos em cinco Capítulos. No Capítulo 2 será abordada a atmosfera neutra, ionosfera e magnetosfera, destacando as camadas ionosféricas, o transporte de plasma ionosférico, a eletrodinâmica da ionosfera terrestre e tempestades geomagnéticas. Em seguida, no Capítulo 3, serão apresentados a instrumentação e metodologia que foram utilizados neste trabalho, como receptores GPS-TEC, ionossonda e fotômetro do tipo all-sky. No Capítulo 4 será apresentada a análise de dados das tempestades geomagnéticas. No Capítulo 5 serão apresentadas as contribuições deste trabalho para o estudo da ionosfera e as principais conclusões deste trabalho. Finalmente, no Capítulo 6 serão apresentadas as sugestões de trabalhos futuros.

2 ATMOSFERA NEUTRA, IONOSFERA E MAGNESTOFERA

2.1 Atmosfera terrestre

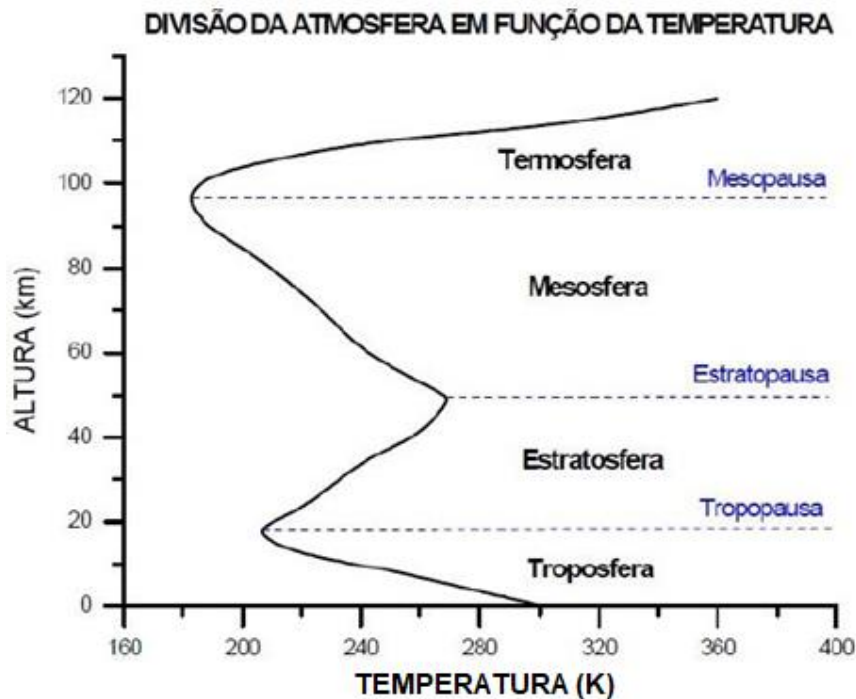
A atmosfera da Terra é composta essencialmente por gases, sendo o nitrogênio e o oxigênio os mais abundantes na atmosfera, que recobre toda superfície terrestre através da ação da gravidade e da força de gradiente de pressão. Suas estruturas estão relacionadas com vários parâmetros, como térmicos, químicos e eletromagnéticos, cujos valores podem mudar em função da hora, da época do ano, da latitude, da longitude e da atividade solar (JESUS, 2008; MOOR, 2011).

A atmosfera terrestre é classificada em camadas conforme sua temperatura, composição química e grau de ionização (HARGREAVES, 1992). A baixa e média atmosfera terrestre é classificada como atmosfera neutra e a alta atmosfera (composta por uma parte ionizada) é classificada em ionosfera. Acima da ionosfera temos a magnetosfera que é responsável por controlar toda a dinâmica das partículas carregadas através do campo magnético da Terra (CMT).

2.2 Atmosfera neutra

As divisões da atmosfera neutra baseiam-se na temperatura, na composição química e nos processos físicos dominantes. E de acordo com o gradiente vertical de temperatura a atmosfera pode ser dividida em: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera (BARRY; CHORLEY, 1995; SAHAI, 2008; KELLEY, 2009; SCHUNK; NAGY, 2009; MOOR, 2011; RIBEIRO, 2016). A Figura 1 mostra as divisões da atmosfera de acordo com o gradiente de temperatura.

Figura 1 – Divisão da Atmosfera em Função do gradiente de temperatura. Eixo das ordenada corresponde a base da camada em quilômetros e o eixo das abscissas corresponde a temperatura média em Kelvin.



Fonte: Aranha (2006).

A troposfera é a camada mais próxima da superfície terrestre. Sua altura se estende desde o solo até aproximadamente 20 km no equador e 10 km nos polos. A temperatura média na base da camada é ~290 K (17 °C) e no topo apresenta valores mínimos de 218 K (-55 °C) a 336 (-63 °C), este limite corresponde a tropopausa. A temperatura na troposfera se conserva por transferência convectiva e turbulenta de calor devido à irradiação solar.

A estratosfera é a segunda camada da atmosfera terrestre, situada acima da troposfera e se estende até aproximadamente 50 km de altura. Nesta camada a temperatura aumenta gradualmente com a altura onde a temperatura média é de 215 K (-58° C) na base e no topo aproximadamente 270 K (-3° C). O aumento da temperatura na parte superior da camada é devido à presença de ozônio, onde 90% do conteúdo total de ozônio da atmosfera terrestre concentra-se na estratosfera.

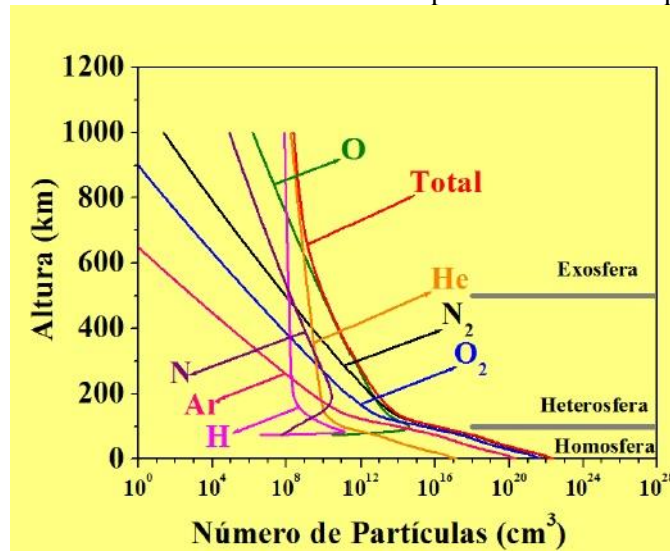
A mesosfera está acima da estratopausa e está localizada entre 50 e 100 km de altura. A temperatura média é aproximadamente 270 K (-3 °C) na base e 185 K (-88 °C) no topo. Nesta camada também é possível observar a presença de vapor d'água. É na mesosfera que ocorre a aeroluminescência das emissões da hidroxila, oxigênio atômico, oxigênio molecular, sódio

entre outros, no qual é fundamental destacar-se essa região devido à importância deste fenômeno para a pesquisa da alta atmosfera.

A termosfera está acima de 100 km de altura podendo chegar até 650 km da superfície da Terra. A temperatura no topo pode variar entre 1000 K (727 °C) e 2000 K (1727 °C) devido ao gradiente de temperatura variar com a hora local, sazonalmente, com a posição geográfica e com o nível de atividade solar. Esta camada possui um grande destaque no estudo da ionosfera porque encontra-se em contato com as partículas ionosféricas, isto é, a atmosfera neutra interagindo com a atmosfera ionizada.

Em relação a distribuição vertical da composição química, a atmosfera neutra pode ser dividida em homosfera, heterosfera e exosfera como mostrado na Figura 2 (TASCIONE, 1994; ABREU, 2007; MOOR, 2011).

Figura 2 – Distribuição vertical da composição química. Eixo das ordenada corresponde a base da camada em quilômetros e o eixo das abscissas corresponde o número de partículas por cm^3 .



Fonte: Duarte-Silva (2013).

A homosfera é a camada mais baixa que se estende desde o solo até aproximadamente 100 km de altura e os principais gases desta região são o oxigênio O_2 e o nitrogênio N_2 . A proporção volumétrica na homosfera é de 78% de nitrogênio N_2 , 21% de oxigênio O_2 e em menores proporções temos o argônio Ar, gás carbônico CO_2 e outros.

A heterosfera está entre 100 km e ~500 km de altura. Os principais gases da heterosfera são o hidrogênio atômico H (1), hélio He (4), oxigênio atômico O (16), nitrogênio N_2 (28), oxigênio O_2 (32) e argônio Ar (39) no qual a distribuição é conforme seu peso molecular.

A exosfera está acima de 500 km até 1000 km de altura e as moléculas e átomos dominantes são o hidrogênio H_2 e hélio o He, respectivamente. É na exosfera que ocorre perdas constantes de partículas para o meio interplanetário devido às altas temperaturas. Logo, os gases mais pesados, como Ar, O_2 e N_2 , são dominantes nas altitudes inferiores da heterosfera, enquanto nas altitudes superiores, os gases mais leves predominam, principalmente o H.

2.3 Ionosfera

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera neutra terrestre composta por partículas livres carregadas (íons e elétrons). A formação da ionosfera está associada principalmente à radiação solar que incide em átomos e moléculas que estão na atmosfera. Outras fontes de ionização acontecem devido a processos colisionais entre partículas excitadas (por exemplo entre íons, elétrons ou moléculas neutras) e radiação cósmicas. A ionosfera se estende entre aproximadamente 50 e 1000/2000 km de altura e é dividida em 3 regiões, as quais são denominadas de camadas D, E e F, da qual a camada F é subdividida em camada F1 e F2. A radiação solar, na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e dos raios X, ao incidir sobre a atmosfera neutra produz íons positivos e elétrons livres por meio do processo de fotoionização. Mesmo que a ionosfera possua um plasma fracamente ionizado, à medida que essa radiação penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons aumenta, até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Esta região é denominada de pico de ionização máxima e está em torno de 300 km de altura (DAVIES, 1990; SCHUNK; NAGY, 2009).

As partículas carregadas podem vir de diferentes lugares (temos como exemplo: galáxias, Sol, magnetosfera e ionosfera) e a precipitação de partículas de alta energia podem ocorrer com uma certa frequência, mesmo que esse processo seja considerado um processo secundário de ionização. A Tabela 1 apresenta os principais átomos e moléculas encontrados na atmosfera terrestre seguido de seus potenciais de ionização e o comprimento de onda.

Tabela 1 – Principais átomos e moléculas encontrados na atmosfera terrestre e seus potenciais de ionização e máximo comprimento de Onda.

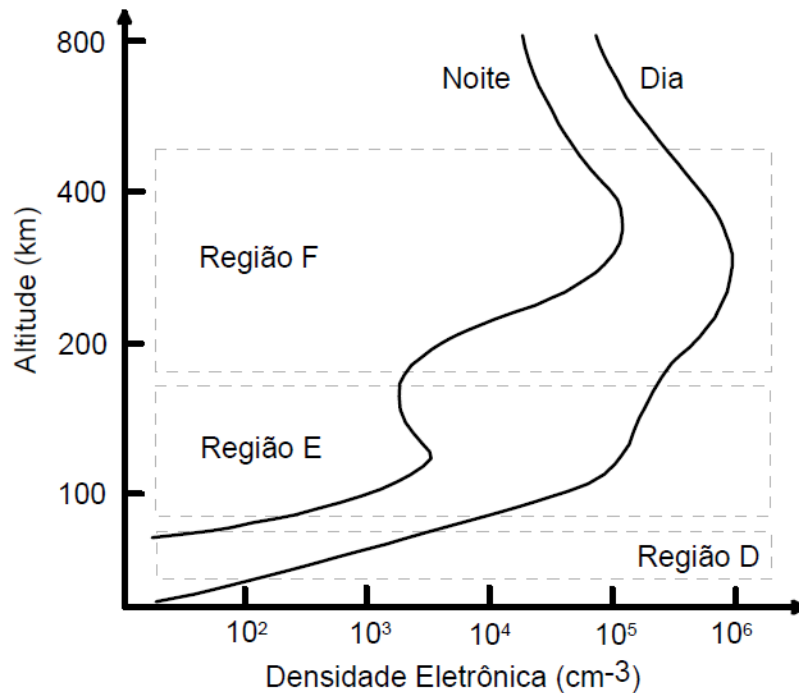
Espécie	Potencial de Ionização (eV)	Máximo Comprimento de Onda (λ_{max}) (Å)
NO	9,25	1340
O ₂	12,08	1027
H ₂ O	12,60	985
O ₃	12,80	970
H	13,59	912
O	13,61	911
CO ₂	13,79	899
N	14,54	853
N ₂	15,58	796
Ar	15,75	787
He	24,58	504

Fonte: Adaptada de Hargreaves (1992).

A ionosfera se forma, principalmente, pela ionização dos gases N₂, O₂ e O. Assim, após sua formação os íons e elétrons tendem a se recombinar e reagir com outras espécies de gases soltos na ionosfera, produzindo então novos íons. A velocidade relativa dos processos de produção e de perda da ionização depende da densidade eletrônica.

2.3.1 Camadas ionosféricas

A ionosfera varia com a altitude. Assim, quanto maior a altitude menor será a concentração dos gases na atmosfera, formando então, regiões distintas as quais são chamadas de camadas D, E e F (F1 e F2). A Figura 3 ilustra o perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera, tanto para o dia quanto para a noite. É importante mencionar que mudanças no comportamento da ionosfera podem ocorrer devido alguns fenômenos, como: efeitos meteorológicos e ondas; localização geográfica; sazonalidade; hora do dia; ciclo solar; e tempestade Geomagnéticas. Chamamos esse comportamento de variabilidade ionosférica. Como mencionamos, cada camada da ionosfera possui características distintas, as quais serão descritas e detalhada a seguir (HARGREAVES, 1992; MOOR, 2011; TARDELLI, 2016).

Figura 3 – Perfil vertical da ionosfera.

Fonte: Adaptada de Baumjohann e Treumann (1997).

a) Camada D

A camada D está localizada entre 50 e 80 km de altura e é formada pela absorção da radiação (com seção transversal menor que 10^{-19} cm²), a qual inclui raios X com $\lambda < 10$ Å, radiação ultravioleta com $\lambda > 1750$ Å e raios cósmicos. A densidade da atmosfera na camada D é maior do que nas outras regiões da ionosfera e por isso, essa camada existe apenas durante o dia, desaparecendo logo após o pôr-do-sol. Quando comparada com as outras camadas ionosféricas sua densidade eletrônica é relativamente baixa, com valores próximos a 10^3 elétrons/cm³. Porém, sua densidade eletrônica ainda pode afetar a propagação de ondas eletromagnéticas de baixa frequência. O processo dominante de perda iônica da camada D é o processo de perda quadrática: $L(n^+) = \alpha n_e^2$, no qual α é o coeficiente de recombinação efetiva (MOOR, 2011; TARDELLI, 2016; RIBEIRO, 2016).

b) Camada E

A camada E existe durante o dia e desaparece algumas horas após o pôr do sol e seus limites inferior e superior estão entre 80 e 130 km de altura, respectivamente. A camada E é

formada pela absorção da radiação com seção transversal menor que $5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ onde a faixa de radiação para a sua formação é a radiação solar no intervalo entre 100 e 310 Å e de $\lambda > 800$ Å. As radiações no espectro dos raios X ($\lambda > 10 - 00$ Å) provocam o surgimento dos íons N_2^+ e O_2^+ . Para a formação do íon O_2^+ temos a linha Lyman- β em $\lambda = 1025$ Å e a 34 linha C (III) em $\lambda = 977$ Å e para O^+ temos o Lyman-contínuo ($\lambda < 910$ Å). Alguns dos processos dominantes de perda iônica são (MOOR, 2011; TARDELLI, 2016; RIBEIRO, 2016):

1. Recombinação eletrônica dissociativa: $\text{XY}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{X} + \text{Y}, \alpha_D;$
2. Troca de carga: $\text{X}^+ + \text{YZ} \rightarrow \text{XY}^+ + \text{Z}, \alpha.$

c) Camada F

A camada F é subdividida em F1 (camada existente apenas durante o dia e localizada entre 130 e 200 km de altura) e F2 (presente durante o dia e a noite, seus limites inferior e superior estão entre 200 e 1000/2000 km de altura, respectivamente) e a ordem de grandeza da densidade eletrônica nesta camada é aproximadamente entre 10^6 e 10^7 elétrons cm^{-3} . A camada F é formada pela absorção da radiação cuja a seção transversal é maior que 10^{-17} cm^2 . A principal fonte de ionização da camada F é o EUV (extremo ultravioleta) com comprimentos de onda entre $796 < \lambda < 910$ Å. A faixa λ é a principal fonte de ionização dessa camada, sendo importante na geração dos íons O^+ e O_2^+ onde O^+ é o íon mais dominante da camada F. Os processos dominantes de perda iônica dessa camada são (MOOR, 2011; TARDELLI, 2016; RIBEIRO, 2016):

1. Processo de perda iônica quadrática;
2. Processo de perda iônica linear – $L(n^+) = \beta n_e$, em que, β é o coeficiente de recombinação efetiva.

2.3.2 Transporte de plasma na ionosfera

Os processos físicos e químicos que controlam o plasma da ionosfera resultam em produção e perda de ionização e em transporte (movimento) de ionização. A densidade eletrônica pode ser expressa em função da equação da continuidade (equação 1) (HARGREAVES, 1992; MOOR, 2011; TARDELLI, 2016):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (Nv),$$

(1)

onde:

q representa a taxa de produção da ionização;

L a taxa de perda da ionização por recombinação eletrônica;

$\nabla \cdot (Nv)$ expressa a perda de elétrons por transporte;

v representa a velocidade das partículas ionizadas; e

N representa a densidade eletrônica.

Deste modo determinamos também a taxa de produção de elétrons e íons, sendo (DAVIES, 1990; FEDRIZZI, 2003; BARBOSA, 2018):

$$q = \eta \cdot \sigma \cdot n \cdot I, \tag{2}$$

onde q é a taxa de produção de elétrons e íons, η a eficiência de ionização, σ a seção transversal de absorção do gás, n a concentração de um componente gasoso (considerando que a atmosfera terrestre possui apenas um componente gasoso) e I a intensidade da radiação ionizante.

No qual I é expressa por:

$$I = I_{\infty} e^{(-\rho(nH \cdot \sec \chi))},$$

(3)

onde:

I_{∞} – Intensidade de radiação solar fora da atmosfera;

ρ – A taxa de absorção do fóton;

χ – O ângulo zenital formado entre a direção da incidência da radiação e a direção vertical do plano; e

H – A altura de escala atmosférica.

Como mencionado no texto, o principal processo de ionização na ionosfera é a fotoionização de partículas neutras, as quais produzem íons e elétrons. O processo oposto da fotoionização é a recombinação, que equivale quando elétrons se recombinaem com íons formando átomos, moléculas e outras espécies de íons. Onde os principais processos capazes de interferir na dinâmica do plasma ionosférico, causando o seu deslocamento, são os ventos neutros termosféricos, os campos elétricos e o gradiente de pressão. Os ventos neutros são originados nas ondas de maré, onde o gradiente de pressão proporciona uma força de arraste. Os campos elétricos são produzidos por ventos que dão origem aos dínamos na camada E (durante o dia) e camada F (durante a noite). Assim, a deriva eletromagnética \mathbf{ExB} , transporta o plasma perpendicular ao campo magnético terrestre. E o processo de difusão que faz o plasma sofrer difusão ao longo das linhas de campo geomagnético, devido aos efeitos gravitacionais e ao gradiente de pressão (DAVIES, 1990; PILLAT, 2006; ABREU, 2012; TARDELLI, 2016).

2.3.3 Eletrodinâmica da ionosfera terrestre

Campos elétricos, ventos neutros e derivas de plasma são fatores imprescindíveis para entender a eletrodinâmica ionosférica que é regida pela interação da dinâmica da atmosfera neutra com o plasma ionosférico magnetizado. A ação dos ventos neutros da atmosfera, que interagem com a ionosfera magnetizada, produzem campos elétricos nas camadas E e F. Um fenômeno importante que ocorrem devido a eletrodinâmica ionosférica é a anomalia de ionização equatorial (*Equatorial ionization anomaly – EIA*).

As principais fontes de campos elétricos na ionosfera são os dínamos das camadas E e F, onde:

a) Dínamo da camada E

O dínamo da camada E é determinado por um sistema de correntes elétricas geradas devido à ação dos ventos de maré sobre as partículas carregadas na camada E. O dínamo da camada E, ou dínamo atmosférico, ocorre em torno dos 110 km de altura, onde a condutividade ionosférica é máxima. Na camada E o movimento dos ventos é conduzido por oscilações de marés, e que estão associados à absorção da radiação solar. A ação dos ventos

neutros sobre o plasma da camada E imerso no campo magnético da Terra, provoca o surgimento de campos elétricos (NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

b) Dínamo da camada F

O dínamo da camada F é gerado primariamente pela ação dos ventos termosféricos que induzem o movimento dos íons e elétrons pelas linhas de campo, com velocidade igual à componente dos ventos termosféricos nessa direção. Por existir a dependência com a carga das partículas carregadas, os íons se movimentam na direção de um campo elétrico induzido ($\mathbf{U} \times \mathbf{B}$) enquanto os elétrons se movimentam na direção contrária, dando origem assim a uma corrente elétrica. Quando essa corrente sofre alguma perturbação é gerado então um campo elétrico de polarização na camada F. Entre as camadas E e F, durante o dia, existe um forte acoplamento e por consequência deste acoplamento o campo elétrico de polarização da camada F é descarregado por correntes que fluem ao longo de \mathbf{B} e através da camada E, fechando o circuito de correntes entre as camadas E e F. À noite, com a diminuição da condutividade na camada E, o fluxo de correntes é interrompido e por isso o circuito não se fecha dando origem a campos elétricos de polarização na região F (NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

2.3.3.1 Ventos Neutros Termosféricos

Os ventos na atmosfera neutra são gerados principalmente pelos gradientes de pressão formados através da diferença de temperatura entre o lado diurno e noturno. Ou seja, a radiação solar causa o aquecimento na região atmosférica provocando a expansão térmica da parte iluminada no qual, desencadeia o abaixamento atmosférico que induzirá gradientes horizontais de pressão que fazem as partículas atmosféricas se deslocarem formando os ventos termosféricos. Assim, os ventos termosféricos, cumprem um papel fundamental na dinâmica da ionosfera, interagindo de modo efetivo com o plasma desta região e alterando o ambiente ionosférico. Por circularem na camada F os ventos neutros interagem com as partículas ionizadas por meio do arraste iônico. Tornando mais intensa no período diurno, porém, à noite, as partículas ionizadas se deslocam para altas altitudes devido aos ventos

serem direcionados para o equador, o que auxilia na manutenção ionosférica neste período (MOOR, 2011; BARBOSA, 2018).

2.3.3.2 Derivas ionosféricas

A deriva vertical do plasma tem um efeito acentuado nas regiões de baixas latitudes da ionosfera terrestre. Durante o período diurno a deriva desloca-se para cima e durante o período noturno a deriva desloca-se para baixo. Na região equatorial ocorre um pico na intensidade que chamamos de pico pré-reversão. Este fenômeno acontece antes da inversão da deriva para baixo, nas primeiras horas do pôr-do-sol (entre ~18:00 e 21:00 local time – LT), causando uma rápida subida da camada F na região equatorial.

Uma consequência do pico pré-reversão é o favorecimento para geração de instabilidades/irregularidades. Assim, o pico pré-reversão está relacionado com a velocidade de deriva vertical ao entardecer e com a intensificação do campo elétrico zonal que ocorre próximo ao terminador solar. O aumento no campo elétrico zonal é causado pelo surgimento de campos elétricos de polarização na região, os quais surgem devido à diminuição da condutividade da camada E, instantaneamente após o pôr-do-sol. O campo elétrico zonal no equador é direcionado para leste durante o período diurno e para oeste durante o período noturno, fazendo com que o plasma ionosférico no equador tenha um movimento vertical de subida e depois um movimento vertical de descida (SCHUNK; NAGY, 2009; MOOR, 2011).

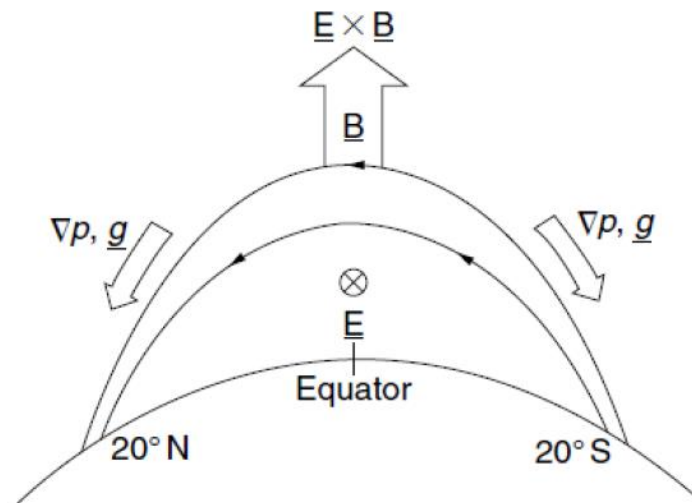
Quando temos o campo elétrico \mathbf{E} para leste e o campo magnético \mathbf{B} para norte é formado uma deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ para cima. Onde a componente zonal do vento neutro para leste aumenta devido ao vento soprar do lado diurno para o lado noturno. Quando a componente para leste do vento se intensifica, devido à combinação da intensificação do gradiente de condutividade dia-noite através do terminador, temos a condução do pico pré-reversão na direção leste do campo elétrico. Assim, a camada F sobe ao anoitecer (MOOR, 2011; ABREU, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

2.3.3.3 Anomalia de ionização equatorial

A anomalia de ionização equatorial (EIA), conhecida também como anomalia de *Appleton*, é um fenômeno que acontece na ionosfera devido à eletrodinâmica equatorial e é determinado por uma diminuição da densidade eletrônica na região equatorial e um acréscimo na densidade na região de baixas latitudes, onde são formadas duas cristas entre $\pm 15^\circ$ e $\pm 20^\circ$ norte e sul do equador magnético.

Este fenômeno causa o efeito fonte que aparece devido a uma deriva vertical de plasma ($\mathbf{E}_{\text{Leste}} \times \mathbf{B}$) para cima gerado pelo o campo elétrico zonal diurno direcionado para leste. Assim que o plasma ionosférico alcança grandes altitudes, o plasma difunde-se para baixo ao longo das linhas de campo magnético devido as forças de gradiente de pressão e gravitacional. O resultado são duas regiões de alta densidade localizadas em baixas latitudes (para melhor entendimento veja a Figura 4) (MOOR, 2011; KELLEY, 2009).

Figura 4 – Esquema de forças que atuam sobre o plasma causando o efeito fonte na ionosfera e originando a anomalia de ionização equatorial.



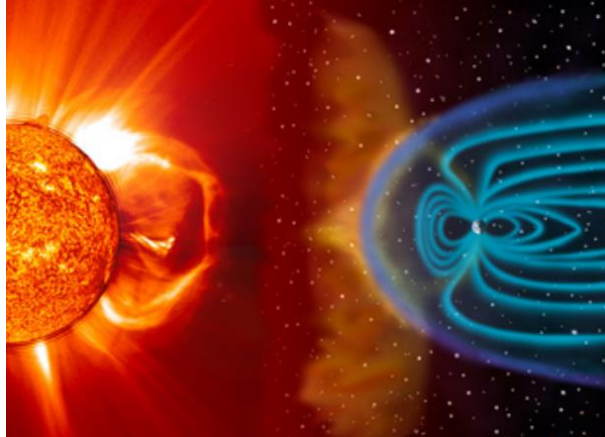
Fonte: Retirada de Kelly (2009).

2.4 Magnetosfera terrestre

A magnetosfera está acima da ionosfera (aproximadamente a partir de 1000 km de altura), no qual o limite superior é denominado magnetopausa. Essa região é responsável por controlar toda a dinâmica das partículas carregadas através do campo magnético da Terra (CMT). A magnetosfera atua como uma proteção para a Terra, dificultando as partículas oriundas do meio interplanetário a penetrarem à superfície terrestre. A Figura 5 mostra a ação

do vento solar na magnetosfera terrestre comprimindo o lado da terra que está direcionada para o Sol.

Figura 5 – Ilustração da magnetosfera terrestre interagindo com o vento solar (concepção artística).



Fonte: Retirada de Scientific American Brasil (2019).

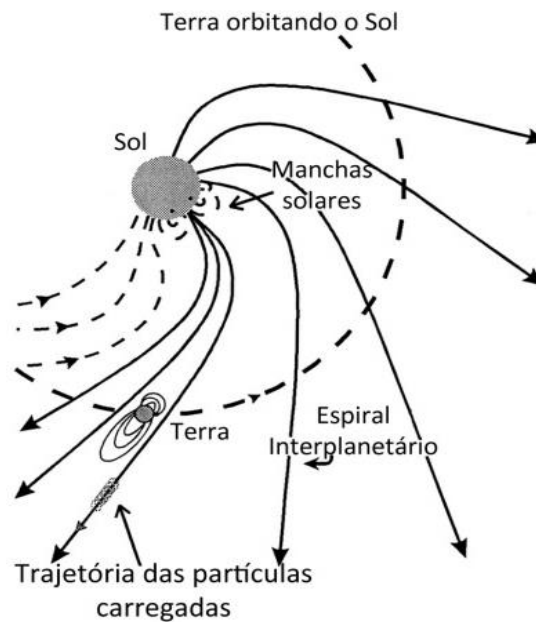
2.5 Tempestades Geomagnéticas

Pesquisas referente ao clima espacial ainda são de grande importância atualmente. O esforço para entender melhor o clima espacial ocorre porque a interação entre o Sol e a Terra afetam drasticamente o sistema magnetosfera-ionosfera-termosfera gerando uma variedade de fenômenos físicos que mesmo conhecidos precisam ser melhor investigados, incluindo tempestades geomagnéticas e distúrbios ionosféricos.

Durante o período calmo a velocidade do vento solar é aproximadamente entre 300 e 500 km/s e a densidade de partículas entre 5 e 10 partículas por cm^3 . Porém, esses valores mudam drasticamente quando o período fica perturbado (período perturbado é caracterizado pela ejeção frequente de uma enorme quantidade de plasma, no qual denominamos ejeção de massa coronal, *coronal mass ejection* – CME), assim, a velocidade e a densidade de partículas sofrem variações, subindo para valores aproximadamente entre 800 e 1500 km/s e 20 a 40 partículas por cm^3 , respectivamente. As partículas, vindas das CMEs, possuem uma velocidade e densidade diferente das partículas do meio interplanetário e por interação trocam momento e energia com o meio interplanetário. As CMEs podem atingir a Terra em 2 ou 3 dias (dependendo da intensidade da CME) e se estiver propagando em direção a Terra com a componente do campo magnético interplanetário (*interplanetary magnetic field* – IMF) direcionada para o sul teremos uma reconexão magnética causando então uma tempestade geomagnética.

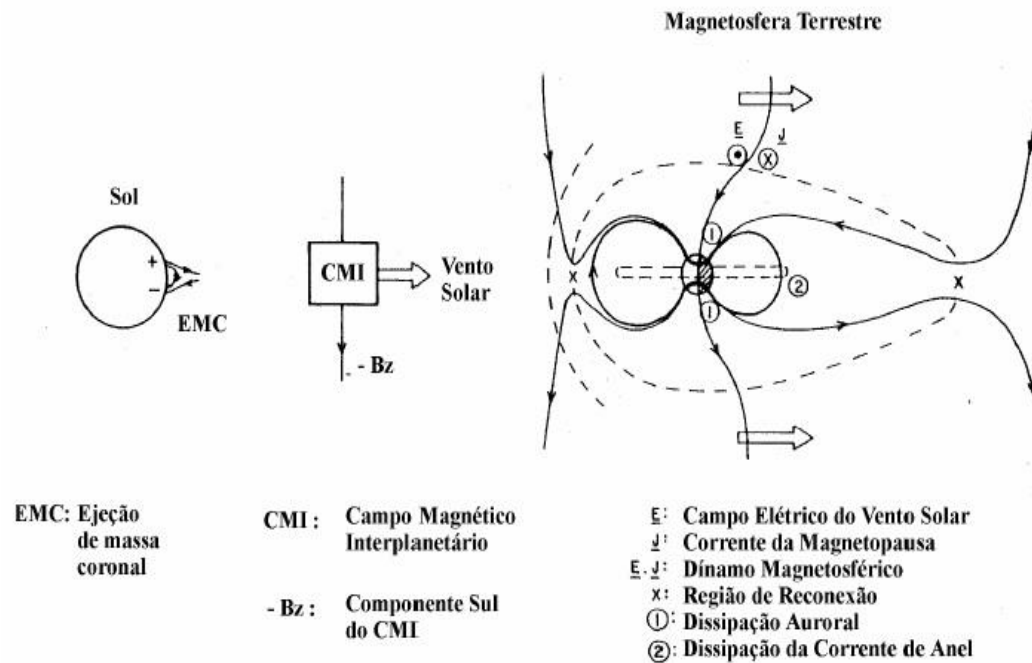
As reconexões magnéticas ocorrem quando as linhas do IMF (o vento sola é um plasma altamente condutor, e por isso ele carrega o campo magnético solar consigo, radialmente para fora do Sol. Como o Sol também é um plasma altamente condutor e executa movimento de rotação, carrega o campo magnético de sua superfície, e desta forma o IMF assume um formato de espiral de Parker tornando a interação entre o vento solar e o IMF ainda mais complexa, veja Figura 6) estão direcionadas para o sul e conectam com as linhas do CMT, que estão direcionadas para o norte. A linha reconectada é conduzida sobre a calota polar na direção da cauda da magnetosfera. Esse fenômeno é responsável por possibilitar a entrada de uma grande quantidade de energia para dentro da magnetosfera (Veja Figura 7) (TSURUTANI; GONZALEZ, 1997; FEDRIZZI, 2003; ABREU, 2007; RIBEIRO, 2016).

Figura 6 – Representação do campo magnético interplanetário (IMF) originário do Sol.



Fonte: Retirada e adaptada de Abreu (2007).

Figura 7 – Reconexão do campo magnético interplanetário com a magnetosfera da Terra.

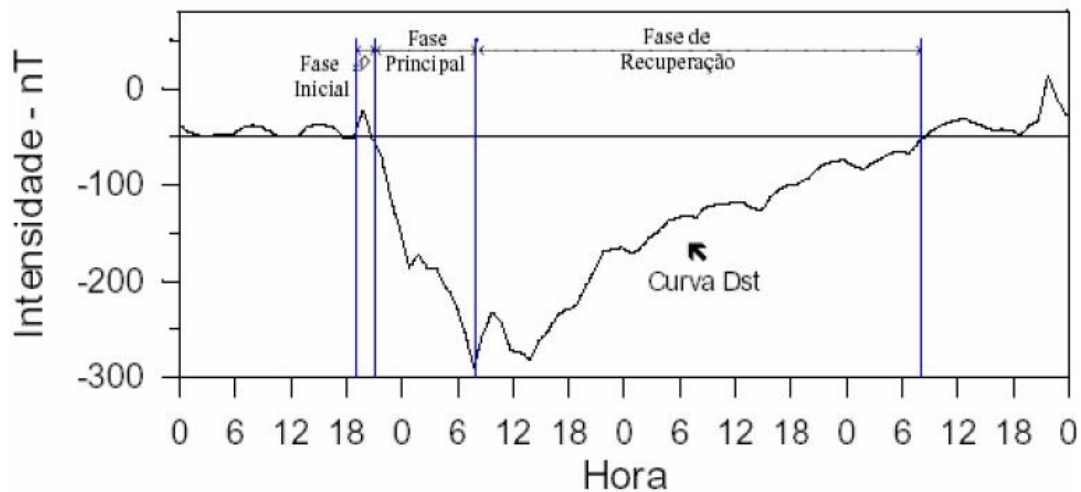


Fonte: Retirada e adaptada de Tsurutani e Gonzalez (1998).

A Figura 8 apresenta a variação do índice geomagnético Dst (*Disturbance Storm Time* - este índice é utilizado para classificar a intensidade da tempestade geomagnética e é obtido a partir de magnetogramas de baixas latitudes com resolução temporal de uma hora) durante a ocorrência de uma tempestade no qual é possível identificar três fases (fase inicial, fase principal e fase de recuperação). Antes da fase principal da tempestade o índice Dst pode exibir uma elevação positiva, no qual denominamos fase inicial ou início súbito (*Storm Sudden Commencements* – SSC). O SSC acontece devido à uma compressão da magnetosfera pelas estruturas solares que se deslocam através do vento solar desde o Sol até a Terra intensificando o sistema de correntes que fluem na magnetosfera originando um aumento do campo magnético medido na Terra. O SSC não é uma característica indispensável para ocorrências de tempestades geomagnéticas. Sendo assim, existe possibilidade de ocorrência de tempestade sem identificação da fase inicial. Logo após o SSC temos a fase principal, onde ocorre uma queda brusca do índice geomagnético. A fase principal pode ser explicada por meio da energização da corrente de anel através do processo de reconexão, na qual, gera um campo magnético com sentido oposto ao campo magnético terrestre. É durante a fase principal que o índice Dst alcança o mínimo valor no qual utilizamos para classificar a tempestade em fraca, moderada, intensa ou super intensa. Após a fase principal, temos a fase de recuperação, onde o índice Dst começa a aumentar até atingir valores semelhantes ao

período calmo (períodos sem tempestades geomagnéticas). A fase de recuperação é associada com perdas de íons da corrente de anel com a diminuição do fluxo solar. Podemos definir a corrente de anel como sendo o fluxo de partículas carregadas, situada ao redor da Terra, provocada por variações do campo geomagnético e aprisionada por ele em razão da não uniformidade do CMT (TSURUTANI; GONZALEZ, 1997; FEDRIZZI, 2003; ABREU, 2007; RIBEIRO, 2016).

Figura 8 – Variação do índice Dst durante uma tempestade geomagnética juntamente com suas fases. As fases estão indicadas por linhas verticais.



Fonte: Retirada de Abreu (2007).

2.5.1 Efeitos das tempestades geomagnéticas na ionosfera

As respostas ionosféricas às tempestades geomagnéticas compõem uma questão importante no clima espacial. Isso ocorre porque, durante as tempestades ionosféricas a composição, a densidade de elétrons e a eletrodinâmica são significativamente alteradas. Essas alterações resultam em interferências em sinais de satélites e outros meios de comunicação. Muitos estudos mostraram os efeitos das tempestades geomagnéticas na ionosfera (ABDU *et al.*, 2009; 2014; ASTAFYEVA *et al.*, 2018; BASU *et al.*, 2007; BATISTA *et al.*, 2006; 2012; KLIMENKO *et al.*, 2011; SAHAI *et al.*, 2004; 2009a; 2009b; 2011; 2012; FAGUNDES *et al.*, 2015; 2016; VENKATESH *et al.*, 2017) no entanto, os resultados mostraram que as respostas da ionosfera durante tempestades geomagnéticas são complexas e alguns mecanismos físicos ainda não são totalmente compreendidos. Isso ocorre porque os efeitos ionosféricos devido a tempestades geomagnéticas dependem de muitas

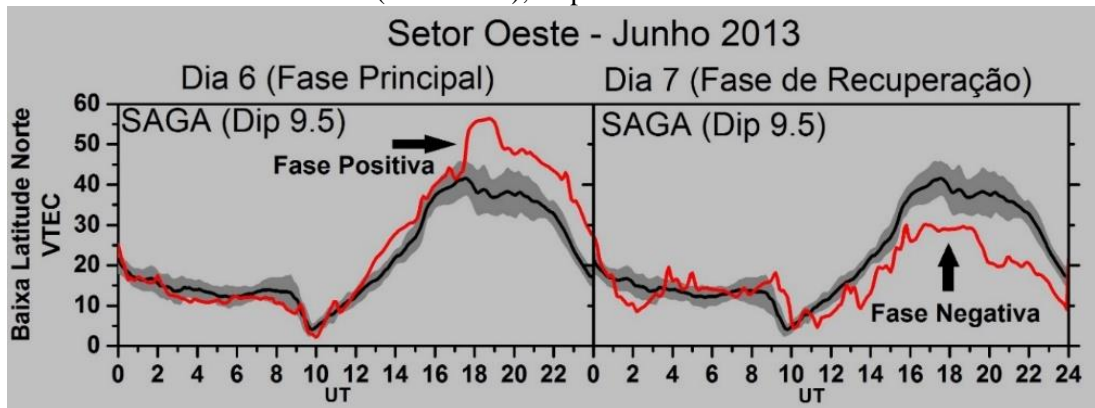
variáveis, como: intensidade da tempestade geomagnética, atividade solar, estação do ano, latitude, hora local, entre outros.

Quando ocorrem tempestades geomagnéticas é provável que aconteça distúrbios ionosféricos. Estes distúrbios podem durar horas e até dias, dependendo da intensidade da tempestade. Se durante a tempestade a densidade de elétrons aumentar, em comparação aos dias calmos (Consideramos dias calmos quando a média diária do Dst é aproximadamente $\pm 30nT$), denominamos tempestade ionosférica positiva ou perturbação ionosférica positiva (veja Figura 9). As perturbações ionosféricas positivas podem ser influenciadas por vários mecanismos, como (GONCHARENKO *et al.*, 2007, HUANG *et al.*, 2005, de ABREU *et al.*, 2010 e 2014, ASTAFYEVA *et al.*, 2015 e FAGUNDES *et al.*, 2016):

- Aumento na razão de densidade neutra O/N₂;
- Ventos meridionais perturbados que desloca a ionosfera para maiores altitudes; onde as taxas de recombinação são mais baixas;
- Campos elétricos perturbados para o leste que deslocam a ionosfera para maiores altitudes onde as taxas de recombinação são mais baixas;
- Fluxo de plasma protonosférico para baixo;
- Perturbações ionosféricas propagantes – TIDs;
- Redistribuição de plasma, devido a campos elétricos perturbados.

Por outro lado, se a densidade de elétrons diminuir, denominamos tempestade ionosférica negativa ou perturbação ionosférica negativa (veja Figura 9). A explicação mais aceita para os distúrbios ionosféricos negativos é devido a alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de O/N₂ (ASTAFYEVA *et al.*, 2018; FAGUNDES *et al.*, 2016).

Figura 9 – Variação diurna para o setor oeste na região de baixa latitude norte referente aos dias 06 a 07 de junho de 2013. As linhas vermelha e preta são os dias perturbado e a média de 10 dias calmos (Dst ± 30 nT), respectivamente.



Fonte: Retirada de Ribeiro (2016).

2.5.2 Campos elétricos perturbados

Campos elétricos, derivas ionosféricas e instabilidades do plasma na camada F equatorial mostram variações complexas quando comparamos os dias calmos durante períodos geomagneticamente perturbados. A complexidade de compreender este evento é devida ao meio instável do acoplamento entre as regiões de alta e baixa latitude. Basicamente as perturbações do campo elétrico ocorre devido a dois importantes processos: (BLANC; RICHMOND, 1980; SPIRO; WOLF; FEJER, 1988; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018):

- 1) Dínamo magnetosférico – Que resulta em mudanças no potencial da calota polar causando a penetração de campos elétricos para latitudes mais baixas.
- 2) Dínamo perturbado ionosférico – Ocorre devida a mudanças na circulação termosférica global induzida através do aquecimento joule em altas latitudes no decorrer de tempestades geomagnéticas.

2.5.3 Penetração rápida de campo elétrico

Penetração rápida de campo elétrica (PPEF) ocorrem devido a interação do vento solar e do campo magnético interplanetário (IMF) com a magnetosfera terrestre. Sempre que o IMF inverter para o sul, um campo elétrico amanhecer-anoitecer é gerado em altas latitudes (região polar) podendo penetrar em latitudes equatoriais. E se o transporte do fluxo magnético descrito por esse campo elétrico se estender para a magnetosfera, através da reconexão magnética, existirá então uma convecção do plasma em direção à terra dada por uma deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. A resposta da ionosfera para o campo elétrico de penetração é dada em termos

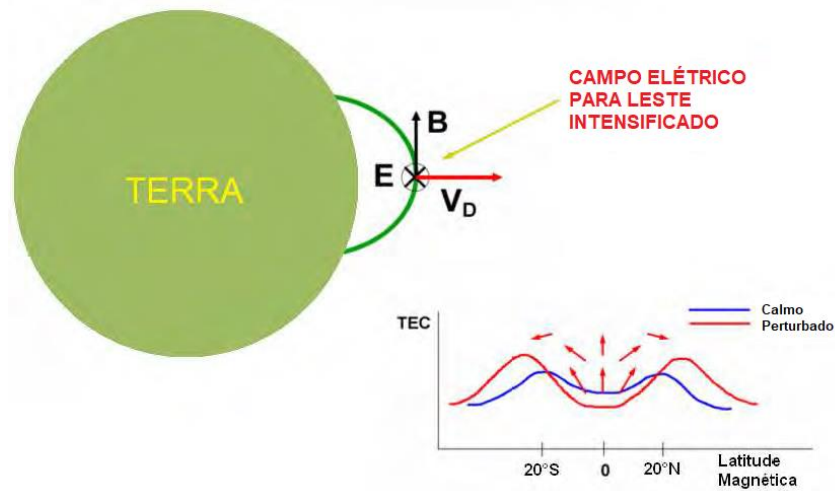
da geração de um campo elétrico de blindagem, o qual é estabelecido em uma escala de tempo que varia de 30 minutos a várias horas. Espera-se que essa blindagem ocorra devida à corrente de anel e à corrente da Região 2 (R2), que é responsável pela conexão entre a magnetosfera e a ionosfera.

Essas correntes são geradas necessariamente pelos gradientes térmicos e de pressão magnética no interior da magnetosfera. Sendo que as correntes R2 fluem para dentro e para fora da região auroral e em direção ao equador. Assim, a penetração direta dos campos elétricos da calota polar para baixas latitudes é modulada pela interação entre o plasma quente da magnetosfera e a ionosfera. Onde o resultado dessa interação é a intensificação das correntes R2 e o aparecimento de um campo elétrico anoitecer-amanhecer. Dessa forma o campo elétrico age no sentido de blindar a ionosfera, isto é, diminuir a penetração dos campos elétricos em direção às médias e baixas latitudes (TSURUTANI; GONZALES, 1997; RICHMOND; PEYMIRAT; ROBLE, 2003; NAKANO *et al.*, 2009; NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

Perturbações nos campos elétricos de origem magnetosférica estão relacionadas com a fase inicial de uma tempestade geomagnética. Assim, variações súbitas no potencial da calota polar e/ou da corrente de anel causam um aumento no campo elétrico zonal para leste, porém temporário. Definimos este evento como *undershielding*, onde é produzindo um aumento na deriva para cima seguido da diminuição de ionização na região equatorial (veja a Figura 10, onde mostra que a intensificação da EIA no setor diurno é devido à penetração de um campo elétrico para leste na magnetosfera interna. Como resultado, observamos alterações no TEC quando ocorre eventos de perturbações geomagnéticas).

O processo de *undershielding* corresponde a variações significativas do IMF para sul, quando existe um aumento na convecção magnetosférica. Consequentemente, o campo elétrico magnetosférico diurno-noturno aumenta significativamente. Desse modo, a camada de blindagem não consegue impedir que o campo elétrico magnetosférico penetre na magnetosfera. O resultado é a penetração do campo elétrico diurno-noturno na magnetosfera interna. Segundo Abdu *et al.* (1993) mudanças na EIA são facilmente observadas, na resposta do sistema ionosfera-termosfera equatorial, quando temos perturbações magnetosféricas. Estas alterações ocorrem devido aos campos elétricos, podendo acontecer também devido aos ventos termosféricos, durante os períodos de tempestade (NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

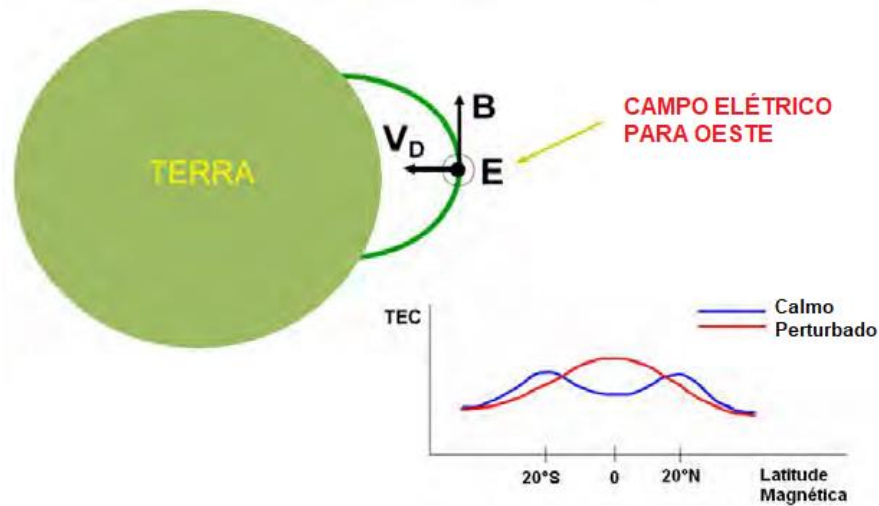
Figura 10 – Ilustração do processo de *undershielding* mostrando a intensificação da EIA no setor diurno.



Fonte: Retirada e adaptada de Negreti (2012).

Quando temos campos elétricos de origem magnetosférica para oeste podemos ter a inibição da EIA. Durante a fase de recuperação da tempestade, quando temos uma rápida inversão do IMF para o norte, ocorre o fenômeno que chamamos de *overshielding*. Este fenômeno causa a penetração do campo elétrico noturno-diurno para as latitudes equatoriais resultando na inibição da EIA no lado diurno e um rápido desenvolvimento da EIA no período noturno (veja Figura 11). Ainda que o campo elétrico magnetosférico diminua, a camada de blindagem tende a persistir por um certo período. Logo em seguida, temos a produção de um campo elétrico noturno-diurno na magnetosfera interna e na ionosfera de baixas latitudes. Assim, o campo elétrico na ionosfera equatorial tem seu sentido revertido temporariamente (FEDRIZZI, 2003; NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

Figura 11 – Ilustração do processo de *overshielding* mostrando a inibição da EIA no setor diurno

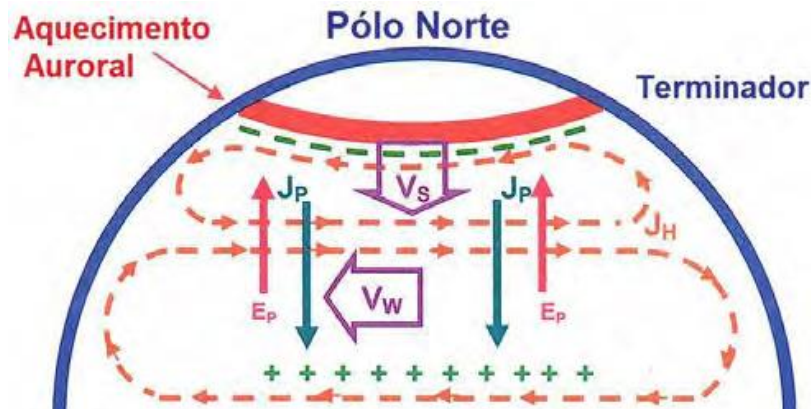


Fonte: Retirada e adaptada de Negreti (2012).

2.5.4 Dínamo perturbado

Quando ocorre injeção de energia na região auroral (altas latitudes), podendo ser por tempestades geomagnéticas, ventos neutros termosféricos são impulsionados em direção ao equador (V_s) gerando então o dínamo perturbado. O movimento de rotação terrestre faz com que apareçam movimentos zonais para oeste por causa da força Coriolis (V_w). O movimento zonal dos íons, e o campo magnético terrestre, criam a corrente Pedersen (J_p) que flui em direção ao equador e carregam positivamente a ionosfera de baixas latitudes. Este fenômeno ocorre até o momento em que o fluxo de corrente seja interrompido por um campo elétrico de polarização resultante (E_p). O campo E_p , perpendicular às linhas de B , produz uma deriva do plasma para oeste e uma corrente Hall (J_H). Quando esta corrente nos terminadouros são interrompidas temos como resultado dois laços de correntes que estabelecem o campo elétrico anoitecer-amanhecer. O campo elétrico zonal possui polaridade oposta ao campo elétrico do dínamo dos dias calmos e se estende para as regiões equatoriais e de baixas latitudes através da ionosfera condutora (NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018). Assim, mudanças no sistema de ventos contribui para a geração do dínamo perturbado. Para melhor entendimento do mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado veja a Figura 12 (BLANC; RICHMOND, 1980; SPIRO; WOLF; FEJER, 1988; NEGRETI, 2012; VALENTIM, 2015; BARBOSA, 2018).

Figura 12 – Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado. Onde V_S é o vento direcionado para o sul, V_W o vento direcionado para o oeste, E_p o campo elétrico de polarização, J_p a corrente Pedersen e J_H a corrente Hall.



Fonte: Retirada e adaptada de Negreti (2012).

2.5.5 Distúrbios ionosféricos propagantes

Distúrbios ionosféricos são observados em regiões equatoriais e de baixas latitudes durante períodos geomagneticamente perturbados. Um dos efeitos observados, durante distúrbios ionosféricos, é o aquecimento da alta atmosfera, zona auroral, tendo como resultado a precipitação de partículas energéticas, provocando uma intensificação das correntes elétricas em altas latitudes e, logo, causando um aquecimento joule. Este aquecimento resulta em alterações no movimento dos ventos termosféricos e na transferência de energia das altas latitudes para latitudes mais baixas, mudando toda a dinâmica do sistema termosfera-ionosfera equatoriais (ABREU *et al.* 2010a; ABREU, 2007).

O aquecimento na zona auroral podem causar ondas de gravidade, que são oscilações atmosféricas onde o período pode ser da ordem de minutos a horas e de escala espacial na ordem de quilômetros a milhares de quilômetros. As ondas de gravidade são oscilações resultantes do balanço entre as forças gravitacional e a força do gradiente de pressão que se propagam verticalmente. Logo, as ondas de gravidade podem se propagar como distúrbios atmosféricos propagantes (*traveling atmospheric disturbance* – TAD). Distúrbios atmosféricos propagantes podem interagir com a ionosfera, e quando interagem transferem energia na forma de ondas atmosféricas causando os distúrbios ionosféricos propagantes (*traveling ionospheric disturbance* – TID). Os distúrbios ionosféricos propagantes são irregularidades ionosféricas que se movem com velocidades de dezenas a centenas de quilômetros por hora e que são geradas em altas latitudes e se propagam para baixas latitudes

podendo chegar até a região equatorial (RISHBETH; GARRIOT, 1969; ABREU, 2007; ABREU *et al.* 2010a).

2.6 Principais Índices Geomagnéticos

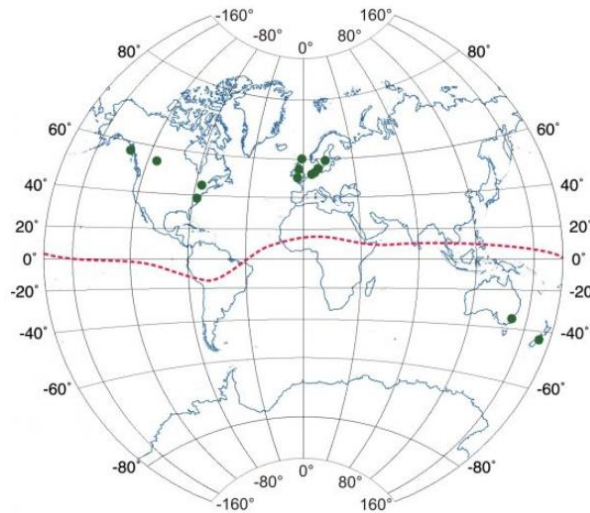
Os índices geomagnéticos têm como objetivo informar o comportamento da atividade geomagnética na Terra e assim, determinar a intensidade e a duração das tempestades. Para as regiões aurorais temos os índices AU, AL e AE e nas regiões subaurorais temos os índices Kp e Ap. Em regiões de médias e baixas latitudes os índices utilizados são o Dst, o SYM-H e o ASY-H. Os índices mais utilizados para estudar as tempestades geomagnéticas são: Kp (*Planetarische Kennziffer* ou *Planetary Index*), Dst (*Disturbance Storm Time*) e AE (*Auroral Electrojet*).

Neste estudo os índices geomagnéticos utilizados são: Kp e Dst. Os parâmetros interplanetários utilizados, com objetivo de complementar a análise dos períodos perturbados, são: Bz (componente vertical do campo magnético interplanetário), Np (densidade de prótons do vento solar) e Vp (velocidade do vento solar).

a) Índice Kp

Distúrbios geomagnéticos podem ser monitorados por observatórios magnéticos fixado em terra, registrando as três componentes do campo magnético. O índice Kp é derivado do índice K que segue uma padronização de 13 observatórios magnéticos. Sendo Kp a média aritmética dos valores encontrados nos observatórios que estão distribuídos em Terra (ver Figura 13 e Tabela 2). Definimos a variação do índice K sendo todas as perturbações irregulares do campo geomagnético causadas pela radiação de partículas solares no intervalo de 3 horas. O índice Kp é obtido a cada 3 horas, iniciando à zero hora, tendo um total de 8 valores diários (FEDRIZZI, 2003; ABREU, 2007; INGV, 2019; GFZ, 2018). Utilizamos o índice Kp para monitorar a intensidade das tempestades geomagnéticas, sendo possível classificá-las de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.

Figura 13 – Mapa dos observatórios geomagnéticos responsável pelo índice Kp. Os círculos verdes são observatorios e a linha tracejada vermelha corresponde ao equador magnético.



Fonte: Retirada de INGV (2019).

Tabela 2 – Lista dos 13 observatórios magnéticos distribuídos pela Terra. A Tabela apresenta informações como: Nome, País, latitude e longitude. *(continuação)*.

#	Nome	País	Lat	Long
1	Lerwick	Escócia	60°08'	358°49'
2	Meanook	Canadá	54°37'	246°40'
3	Sitka	Alasca	57°03'	224°40'
4	Eskdalemuir	Escócia	55°19'	356°48'
5	Lovö	Suécia	59°21'	17°50'
	Uppsala	Suécia	59°54'	17°21'
6	Agincourt	Canadá	43°47'	280°44'
	Ottawa	Canadá	45°24'	284°27'
7	Rude Skov	Dinamarca	55°51'	12°27'
	Brorfelde	Dinamarca	55°37'	11°40'
8	Abinger	Inglaterra	51°11'	359°37'
	Hartland	Inglaterra	50°58'	355°31'
9	Wingst	Alemanha	53°45'	9°04'
10	Witteveen	Holanda	52°49'	6°40'
	Niemegk	Alemanha	52°04'	12°41'
11	Cheltenham	EUA	38°42'	283°12'

Tabela 2 - Lista dos 13 observatórios magnéticos distribuídos pela Terra. A Tabela apresenta informações como: Nome, País, latitude e longitude. *(conclusão)*.

	Fredericksburg	EUA	38°12'	282°38'
12	Toolangi	Austrália	- 37°32'	145°28'
	Canberra	Austrália	- 35°18'	149°00'
13	Amberley	Nova Zelândia	-43°09'	172°43'

	Eyrewell	Nova Zelândia	-43°25'	172°21'
--	----------	---------------	---------	---------

Fonte: Retirada de GFF (2018).

Tabela 3 – Classificação das atividades geomagnéticas utilizando valores do índice Kp.

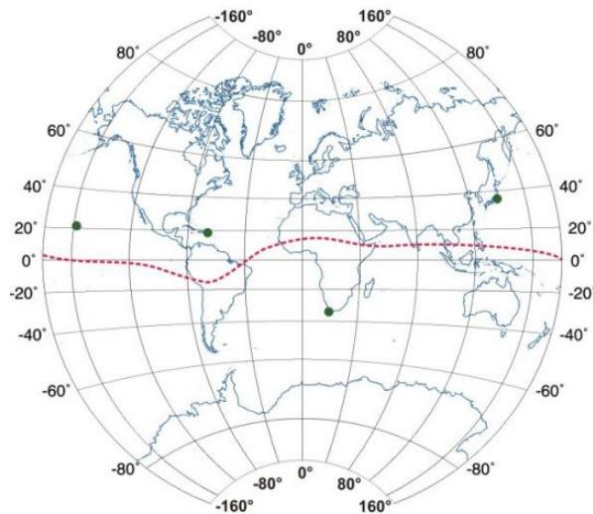
Atividade Geomagnética	Valor do índice Kp
Muito calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2-
Normal	2- a 3+
Perturbado	3+ a 4+
Muito perturbado	4+ a 9

Fonte: Retirada e adaptada de Abreu (2007).

b) Índice Dst

O índice Dst, utilizado para classificar o nível da tempestade geomagnética, é obtido a partir de magnetogramas de baixas latitudes com resolução temporal de uma hora, medido em nano tesla (nT). Esse índice reflete a intensidade da corrente de anel que é energizada pela entrada de partículas do vento solar na magnetosfera terrestre, induzindo um campo magnético no sentido contrário da componente horizontal (H) do campo geomagnético. O Dst é fornecido por estações que estão localizadas em baixas latitudes e distribuídas longitudinalmente pelo globo terrestre, como apontado pelos pontos verdes no mapa da Figura 14, cujos dados de cada uma das estações estão listados na Tabela 04. (FEDRIZZI, 2003; ABREU, 2007; INGV, 2019).

Figura 14 – Mapa dos observatórios geomagnéticos responsável pelo índice Dst. Os marcadores verdes correspondem aos observatórios e a linha tracejada vermelha corresponde ao equador magnético.



Fonte: Retirada de INGV (2019).

Tabela 4 – Lista dos observatórios magnéticos responsáveis pelo índice Dst. A Tabela apresenta informações como: Nome, País, latitude e longitude.

#	Nome	País	Lat	Long
1	Hermanus	África do Sul	-34,40°	19,22°
2	Kakioka	Japão	36,23°	140,18°
3	Honolulu	Havaí	21,32°	201,98°
4	San Juan	Porto Rico	18,38°	293,88°

Fonte: Retirado e adaptado de INGV (2019).

A Tabela 5 mostra os valores do índice Dst que são usados para classificar as tempestades geomagnéticas.

Tabela 5 – Classificação das tempestades geomagnéticas através do índice Dst.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Super intensa	< -250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: Retirada de Fedrizzi (2003).

2.7 Parâmetros Interplanetários

A aquisição dos parâmetros interplanetários é feita através do banco de dados da OMNIWeb que fornece uma ampla gama de dados dos índices de atividade solar e geomagnética. Estes dados são obtidos de várias espaçonaves (ACE, ISEE 3 e WIND) que estão localizadas em órbitas geocêntricas ou L1 (ponto de Lagrange) (OMNIWeb, 2019). Os equipamentos que medem os parâmetros do vento solar que foram utilizados nesse trabalho são:

1. Instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*) está instalado no satélite ACE e fornece informações das observações do Campo Magnético Interplanetário e suas componentes (B, Bx, By, Bz) (SMITH *et al.*, 1998);

2. Instrumento SWEPAM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*) fornece observações da velocidade do Vento Solar, temperatura de prótons e densidade de prótons (V_p , T_p , N_p) (MCCOMAS *et al.*, 1998). Este instrumento também está instalado no satélite ACE.

3. INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo serão descritas técnicas de investigação ionosférica utilizando a radiossondagem para aquisição de dados do Conteúdo Eletrônico Total (TEC) e do Conteúdo Eletrônico Total na vertical (VTEC) no qual, serão empregadas técnicas de sondagem ionosférica tipo receptor GPS-TEC e Ionossondas. Também faremos uma descrição do funcionamento e da aplicação das técnicas de medidas utilizando o GPS, bem como o funcionamento da ionossonda e técnicas de redução de dados. Além de técnicas de radiossondagem este trabalho ainda utilizou técnicas de utilização ópticas, como fotômetros imageadores de tipo *all Sky*, para complementar as análises dos dados neste estudo.

3.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

Uns dos primeiros sistemas de posicionamento por satélite artificial foi o NSS (*navy Navigation Satellite System*) conhecido como sistema Transit. Este sistema se baseava em

medidas Doppler e não oferecia uma boa precisão devido à pouca quantidade de satélites disponíveis. Assim, o Departamento de Defesa Americano desenvolveu o sistema GPS (*Global Positioning System*). O intuito era solucionar os problemas de baixa precisão, poucos satélites disponíveis, facilitar a operação do sistema e diminuir o custo para os usuários. Outro sistema de posicionamento por satélite oferecido é o GLONASS (*Global Navigation Satellite Systems*). Este sistema foi desenvolvido pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), atual Rússia, e foi criado para fins militares. Ele teve início no mesmo período do GPS, porém não foi muito difundido.

Além do GLONASS e do GPS, o GNSS engloba outros sistemas de posicionamento e navegação, como o Galileo que está em desenvolvimento pela comunidade europeia e o sistema de navegação chinês Beidou/Compass que também em desenvolvimento (MONICO, 2008; POLEZEL, 2010).

Nesse trabalho foram utilizados os sistemas GPS e GLONASS, uma vez que as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) e UNAVCO possuem receptores com capacidade de rastrear satélites GPS e GLONASS, no qual, os receptores coletam e armazenam continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidos pelos satélites.

3.1.1 Sistemas de Posicionamento Global – GPS

O GPS é um sistema de posicionamento ou radio navegação por satélite que ficam orbitando a Terra transmitindo ondas eletromagnéticas na faixa de frequência ultra-alta (*Ultra High Frequency – UHF* / valores entre 300 MHz e 3 GHz) com valores entre 1200 e 1500 MHz. O GPS possui aplicações na agricultura, controle de frotas, sistema geodésicos, navegações, posicionamentos e monitoramento ionosférico (sendo a razão de utilizamos o GPS para este estudo) (MONICO, 2000).

Definimos o funcionamento do GPS sendo uma constelação de satélites que oferece a um usuário determinar suas posições tridimensionais (latitude, longitude e altitude), sua velocidade e o seu horário podendo estar em qualquer ponto do globo terrestre (ROCHA, 2003; MONICO 2008). O Sistema GPS é formado por três principais segmentos (MONICO, 2008; POLEZEL, 2010): espacial, de controle e de usuário.

O segmento espacial consiste em 24 satélites (no mínimo) operacionais com orbitas de 22.200km de altitude, divididas em seis planos orbitais com inclinação de 55° em relação a

linha do equador geográfico. O sistema GPS transmite continuamente ondas eletromagnéticas na frequência de UHF e realiza a cada 12 horas uma volta completa ao redor do globo terrestre (ver Figura 15).

Figura 15 – Disposição da constelação dos satélites do sistema GPS.



Fonte: Retirada de Vaz Tolentino (2017).

O segmento de controle é responsável pelo domínio do sistema GPS através de estações de monitoramento terrestre. Estas estações têm como finalidade o monitoramento e manutenção total dos satélites garantido o funcionamento do sistema GPS. As estações terrestres são divididas em controle central (MASTER) localizada no Colorado, Estados Unidos, e outras cinco de monitoramento que estão espalhadas pela Terra (Hawaí, Kwajalein no Oceano Pacífico, Ilha Ascension no Atlântico Sul, Diego Garcia no Oceano Índico e Cabo Canaveral nos Estados Unidos) (ver Figura 16). O segmento de controle tem como função o monitoramento das órbitas dos satélites, as correções de posição, definição do sistema de tempo, o cálculo/previsões das efemérides dos satélites e a atualização das mensagens de navegação (ABREU, 2007; MONICO, 2008; MOOR, 2011).

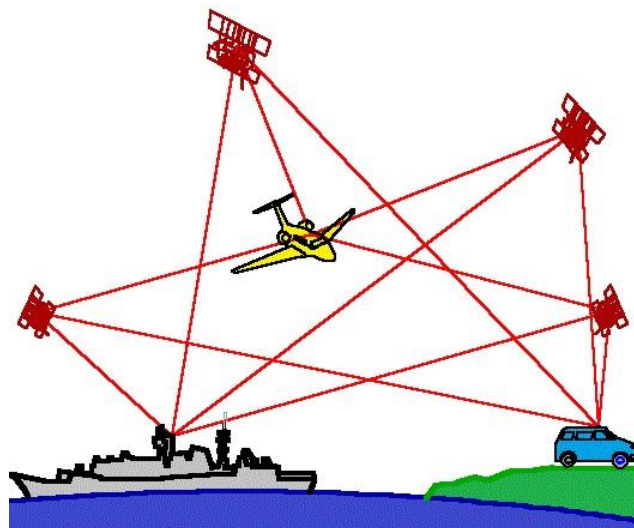
Figura 16 – Localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS.



Fonte: Retirada de Vaz Tolentino (2017).

O segmento de usuário é composto por receptores que recebem sinais de rádio (transmitido por satélites) e conseguem, através deste sinal, determinar a posição (em três dimensões), a velocidade do usuário e o tempo GPS. A Figura 17 mostra exemplos de segmentos de usuários com a utilização de receptores GPS instalados em aviões, veículos terrestres e navios (MONICO, 2000; MOOR, 2011; RIBEIRO, 2016).

Figura 17 – Representação Gráfica da utilização de receptores GPS em aviões, veículos terrestres e navios.

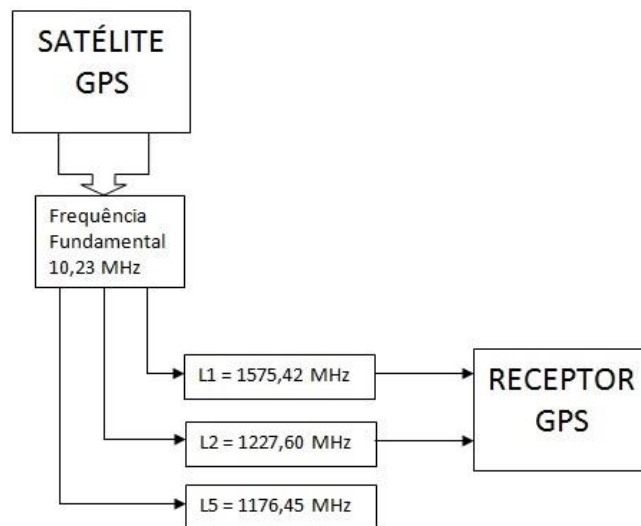


Fonte: Retirada de Ribeiro (2016).

3.1.2 O sinal do sistema GPS e suas especificações

Sabemos que os sinais enviados por cada satélite GPS transmitem em três ondas portadoras L1, L2 e L5. Elas são criadas com base da frequência fundamental de 10,23 MHz, e multiplicadas por 154, 120 e 115 respectivamente, como mostrado na Figura 18 (MONICO 2000; DUARTE-SILVA, 2013).

Figura 18 – Representação básica do sinal transmitido pelo sistema GPS.



Fonte: Retirada de Duarte-Silva (2013).

Após mostrar a representação fundamental da transmissão de sinais de GPS através da Figura 18, apresentamos as frequências L1, L2 e L5 com seus respectivos comprimentos de onda λ para os diferentes sinais GPS:

$$f_1 = 10,23 \text{ MHz} * 154 \rightarrow L1 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda \cong 19 \text{ cm};$$

$$f_2 = 10,23 \text{ MHz} * 120 \rightarrow L2 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda \cong 24 \text{ cm};$$

$$f_5 = 10,23 \text{ MHz} * 115 \rightarrow L5 = 1176,45 \text{ MHz e } \lambda \cong 25 \text{ cm}.$$

As ondas portadoras são geradas concomitantemente tendo como objetivo a diminuição e/ou correção dos erros provocados pela refração ionosférica. E através das portadoras L1 e L2 conseguimos estabelecer os códigos PRN (*pseudo-random-noise* – ruído falsamente aleatório) no qual, sabemos ser modulada pela fase permitindo efetuar medidas de longa distâncias a partir do tempo de propagação da modulação (MONICO 2000; MOOR, 2011; DUARTE-SILVA, 2013; RIBEIRO, 2016). Para este estudo foi utilizado a RBMC e UNAVCO que possuem receptores que trabalham em dupla frequência, sendo L1 e L2. É

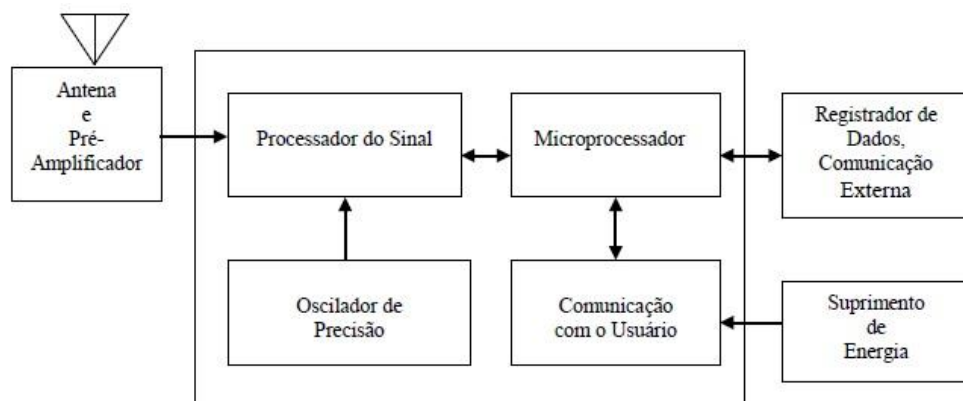
importante mencionar que alguns receptores podem trabalhar com frequência tripla (mais modernos), porém não é o caso deste estudo.

3.1.3 Receptores GPS e seus componentes básicos

Existem no mercado uma grande variedade de receptores que possuem propriedades próprias e são utilizados em áreas específicas. Embora tenha uma grande variedade, os receptores GPS possuem a mesma funcionalidade em relação a componentes (ver detalhes na Figura 19) (SEEBER, 1993; FEDRIZZI, 2003; MOOR, 2011).

Os receptores funcionam basicamente detectando sinais que são emitidos pelos os satélites. Após detectar o sinal ocorre um processamento de dados e em seguida enviado para o dispositivo de memória. O processamento dados, cálculos e decodificações de informações são gerenciados por microprocessadores. De tal modo que, um receptor GPS é responsável por identificar quatro ou mais satélites, definindo a distância e em seguida utilizando esta informação para obter sua posição (FEDRIZZI, 2003; MOOR, 2011).

Figura 19 – Componentes básico de um Receptor GPS.



Fonte: Retirada de Fedrizzi (2003).

3.1.4 Observáveis do sistema GPS e erros relacionados

Basicamente as observáveis do sistema GPS permitem ao usuário identificar a posição, a velocidade e o tempo. Seeber (1993) e Monico (2008) descrevem em seus trabalhos dois tipos de observáveis. Sendo a pseudodistância (ou medidas de pseudodistância a partir do código) e a fase da onda portadora (ou diferença da fase da onda portadora).

Definimos a pseudodistância sendo o resultado do não-sincronismo entre os osciladores responsável pela geração do código no satélite e sua réplica no receptor. A pseudodistância é basicamente a medida da distância entre a antena do satélite, no instante de transmissão do sinal, e a antena do receptor. Definimos o tempo de deslocamento como o tempo de propagação do sinal emitido pelo satélite até a chegada ao receptor (CAMARGO, 1999; MOOR, 2011; DUARTE-SILVA, 2013; RIBEIRO, 2016).

A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa do que a pseudodistância e é considerada a observável básica para a maioria das atividades geodésicas. Definimos esta observável como sendo a fase de batimento da onda portadora (MONICO, 2008; DUARTE-SILVA, 2013). Segundo Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001) a fase da onda portadora pode ser a diferença entre a fase do sinal emitido pela antena do satélite e o sinal recebido pela antena do receptor como resultado do tempo de propagação da onda através da distância geométrica ρ

Por se tratar de um sistema eletrônico as observáveis GPS estão sujeitas a erros que podem alterar ou diminuir a precisão das medidas. Assim, para melhorar a qualidade do serviço GPS (transmissão de sinais, recepção de sinais, precisão das medidas etc.) devemos diminuir o máximo de erros e conhecer as fontes causadores destes erros (MONICO, 2008; MOOR, 2011; RIBEIRO, 2016). Os erros podem ser separados em três grupos, como: erros aleatórios (são aqueles que não podem ser evitados), erros grosseiros (causados por falhas do equipamento e/ou por ação do operador) e erros sistemáticos (podem ser anulados através de técnicas específicas de observação).

As fontes e os principais erros que estão envolvidos nas observáveis GPS são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos nas observáveis GPS (continuação).

FONTES	ERROS
Satélite	Erro da órbita
	Erro do relógio
	Relatividade
	Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
	Fase <i>wind-up</i>

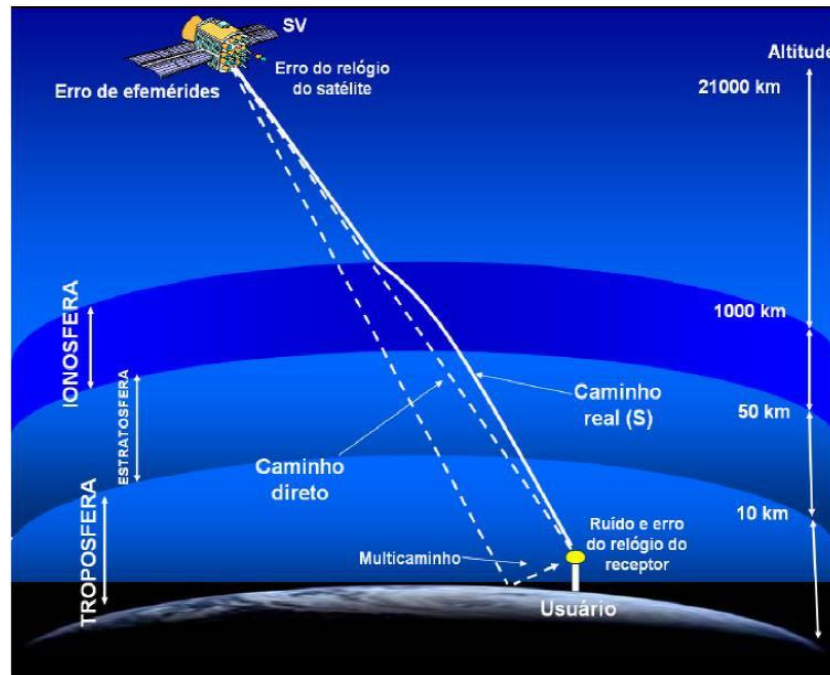
Tabela 6 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos nas observáveis GPS (conclusão).

Propagação do sinal	Refração troposférica
	Refração ionosférica
	Perdas de ciclos
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio
	Erro entre os canais
	Centro de fase da antena do receptor
	Atraso entre duas portadoras no hardware do receptor
	Fase <i>wind-up</i>
Estação - (alguns erros são, na realidade, efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos.)	Erro nas coordenadas
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Marés terrestres
	Movimento do polo
	carga oceânica
	Pressão da atmosfera

Fonte: Adaptada de Monico (2008).

Através da Figura 20 podemos ver os principais erros na transmissão de sinais entre o caminho direto (distância geométrica) e o caminho real.

Figura 20 – Erros envolvidos entre o caminho direto e o caminho real.



Fonte: Retirada de Oliveira (2003).

3.1.5 Refração ionosférica, cálculo do TEC e cálculo do VTEC

Entende-se que a ionosfera terrestre é um meio dispersivo e que nela se encontram as principais fontes de erros do sistema GPS devido à refração ionosférica. Isso ocorre porque a densidade de elétrons (N_e) livres nesta região é grande o suficiente para perturbar a propagação de ondas de rádio entre o satélite e o receptor. Assim, definimos o conteúdo eletrônico total ou TEC (do inglês, *Total Electron Content*) como sendo a medida da densidade de elétrons livres contida na extensão das ondas eletromagnéticas entre o receptor e o satélite (MONICO, 2008). Para inferir o TEC é necessário definir o índice de refração que ocorre quando uma onda passa de um meio para outro, de características distintas, tendo como resultado sua direção e velocidade alteradas.

Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001) mostra a velocidade de fase v_f e a velocidade de grupo v_g :

$$v_f = 1 - \frac{40,3N_e}{f^2}, \quad (4)$$

e

$$v_g = 1 + \frac{40,3N_e}{f^2}, \quad (5)$$

sendo N_e a densidade de elétrons e o valor de 40,3 uma constante. Nas quais as unidade de medida para N_e é el m^{-3} e para a constante 40,3 e $\text{mHz}^2 (\text{el m}^{-2})^{-1}$. A partir das equações 4 e 5, ao passo que ν_f aumenta, ocorre um retardo na ν_g . Notamos ao mesmo tempo que nas equações 4 e 5 o índice de refração para a fase é inferior ao do grupo e toda vez que a frequência for maior, suas diferenças serão menores, conseguindo um menor índice de refração (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001).

Os erros sistemáticos, aqueles que podem ser anulados através de técnicas específicas de observação devido a refração ionosférica, ocorre devido a diferença entre a distância medida (real) e a distância geométrica ρ entre o satélite e o receptor (Ver Figura 20) utilizando deduções físicas e matemáticas é possível encontrar equações que formam o erro em consequência da refração ionosférica para a fase da onda portadora I_{fR}^S e para o grupo I_{gR}^S conforme demonstrado por Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001):

$$I_{fR}^S = - \frac{40,3}{f^2} TEC, \quad (6)$$

e

$$I_{gR}^S = \frac{40,3}{f^2} TEC . \quad (7)$$

É indicado que para maiores detalhes sobre os erros nas observáveis GPS e deduções/métodos matemáticos das equações envolvidas, consultar Camargo (1999), Monico (2000 e 2008), Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001) e Fedrizzi (2003).

O TEC varia no tempo e no espaço e é um dos principais parâmetros utilizado para estudar o comportamento da ionosfera. O seu principal problema são seus valores que podem ser influenciados por inúmeras variáveis, tais como (MATSUOKA; CAMARGO, 2004; ABREU, 2007; MONICO, 2008): atividades geomagnéticas, ciclo solar, estação do ano, hora do dia e localização geográfica (devido à radiação solar).

O TEC é definido conforme definido pela Equação 8, como sendo a integral da densidade eletrônica por toda extensão percorrida pelo sinal entre o satélite S e o receptor R , em uma

coluna cilíndrica com seção transversal de área de 1 m² (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001):

$$TEC = \int_R^S N_e ds, \quad (8)$$

o TEC é medido em unidades de TEC (TECU – *Total Electron Content Unit*), onde 1 TECU vale 10¹⁶ elétrons m⁻². O TEC poder ser calculado utilizando as observáveis de pseudodistância e fase da onda portadora (SARDÓN; ZARRAOA, 1997; MATSUOKA; CAMARGO, 2004; ABREU, 2007; MONICO, 2008; MOOR, 2011).

A pseudodistância \mathfrak{R} é dada pela equação (9)

$$\mathfrak{R} = c\Delta t = c\Delta t(\text{GPS}) + c\Delta\delta = \rho + c\Delta\delta, \quad (9)$$

onde:

$$\Delta t = t_R - t^S, \quad (10)$$

$$\Delta\delta = \delta^S - \delta_R, \quad (11)$$

onde

c é a velocidade da luz no vácuo, t^S é o instante da emissão do sinal, t_R é o instante da recepção do sinal, δ^S é o desvio dos relógios do satélite e δ_R é o desvio do receptor em relação ao tempo e ρ é a distância geométrica entre o satélite e o receptor.

E a partir da observável de pseudodistância \mathfrak{R} podemos obter o TEC para as portadoras L1 e L2, que são dadas por (ABREU, 2007; MOOR, 2011):

$$\mathfrak{R}_1 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\mathfrak{R}1}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}}^{trop} + d_{\mathfrak{R}1}^S + d_{\mathfrak{R}1}^R + m_{\mathfrak{R}1} + \varepsilon_{\mathfrak{R}1}, \quad (12)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\mathfrak{R}2}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}}^{trop} + d_{\mathfrak{R}2}^S + d_{\mathfrak{R}2}^R + m_{\mathfrak{R}2} + \varepsilon_{\mathfrak{R}2}, \quad (13)$$

sendo que:

\mathfrak{R}_1 e \mathfrak{R}_2 – Pseudodistância para L1 e L2 acrescentados os erros que afetam o cálculo do TEC;

$\Delta_{\mathfrak{R}}^{iono}$ e $\Delta_{\mathfrak{R}}^{trop}$ – Efeitos das refrações ionosférica e troposférica, na devida ordem, nas portadoras L1 e L2;

$d_{\mathfrak{R}}^S$ e $d_{\mathfrak{R}}^R$ – Atrasos das portadoras no hardware do satélite e receptor, na devida ordem, gerados pelos diferentes caminhos que as portadoras L1 e L2 segue dentro do hardware;

$m_{\mathfrak{R}}$ – Efeito do multicaminho nas portadoras L1 e L2 ocorrido quando a antena do receptor recebe além do sinal direto do satélite, sinais refletidos por superfícies localizadas nas proximidades do receptor;

$\varepsilon_{\mathfrak{R}}$ – Ruído do receptor nas portadoras L1 e L2.

Segundo Fedrizzi (1999), Matsuoka e Camargo (2004) e Monico (2008), os erros entre a distância geométrica do satélite e receptor, o erro da refração troposférica e os erros referentes aos relógios do satélite e receptor afetam igualmente às observáveis nas portadoras L1 e L2. Logo, o TEC a partir da pseudodistância, é obtido através da equação 14:

$$TEC = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_2}^2 - f_{L_1}^2)} [(\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1) - d_{\mathfrak{R}} - m_{\mathfrak{R}} - \varepsilon_{\mathfrak{R}}],$$

(14)

no qual $d_{\mathfrak{R}} = d_{\mathfrak{R}}^S + d_{\mathfrak{R}}^R$ e representa a soma do erro sistemático interfrequência do satélite $d_{\mathfrak{R}}^S$ e do receptor $d_{\mathfrak{R}}^R$.

$$d_{\mathfrak{R}}^S = d_{\mathfrak{R}2}^S - d_{\mathfrak{R}1}^S, d_{\mathfrak{R}}^R = d_{\mathfrak{R}2}^R - d_{\mathfrak{R}1}^R, m_{\mathfrak{R}} = m_{\mathfrak{R}2} - m_{\mathfrak{R}1} \text{ e } \varepsilon_{\mathfrak{R}} = \varepsilon_{\mathfrak{R}2} - \varepsilon_{\mathfrak{R}1}$$

Como resolvido para pseudodistância também é possível calcular o TEC a partir da observável Fase da Onda Portadora. Sendo que o TEC, para as portadoras L1 e L2, é calculado pela equação 15 multiplicada por λ , como mostrado nas equações 16 e 17.

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + N,$$

(15)

onde:

$$\phi = -\Delta\phi_R^S,$$

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

ρ é a distância geométrica entre o satélite e o receptor

N é a ambiguidade num instante t

$$\mathfrak{S}_1 = \lambda\phi_1 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\phi_1}^{iono} + \Delta_{\phi}^{trop} + \lambda_1 N_1 + d_{\phi_1}^S + d_{\phi_1}^R m_{\phi_1} + \varepsilon_{\phi_1},$$

(16)

$$\mathfrak{S}_2 = \lambda\phi_2 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\phi_2}^{iono} + \Delta_{\phi}^{trop} + \lambda_2 N_2 + d_{\phi_2}^S + d_{\phi_2}^R m_{\phi_2} + \varepsilon_{\phi_2},$$

(17)

no qual:

\mathfrak{S}_1 e \mathfrak{S}_2 – fase da onda portadora para L1 e L2 acrescida dos erros que interfere no cálculo do TEC;

Assim, determinamos o TEC utilizando a fase da onda portadora como mostrada equação 18:

$$TEC = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)} [(\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - d_{\phi} - m_{\phi} - \varepsilon_{\phi}],$$

(18)

onde:

$d_{\phi} = d_{\phi}^S + d_{\phi}^R$ e representa a soma do erro sistemático interfrequência do satélite d_{ϕ}^S e do receptor d_{ϕ}^R .

Conforme Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001) é possível calcular o conteúdo total de elétrons na direção vertical (VTEC) utilizando o TEC, sendo:

$$VTEC = \cos(z') TEC,$$

(19)

onde o valor de z' é o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altitude média H_m e pode ser obtido por meio da seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001);

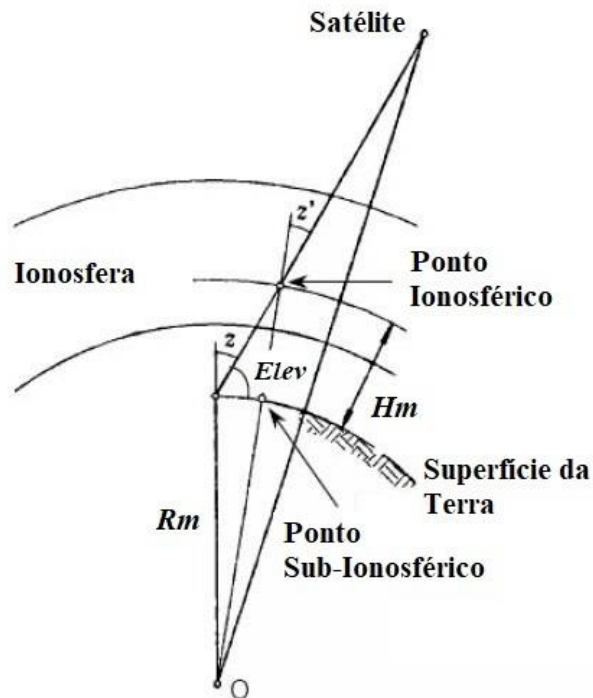
$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z, \quad (20)$$

onde:

- R_m – Raio médio da Terra (6570 km);
- H_m – Altura média do pico de densidade da ionosfera (300 km); e
- z – Ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - \text{elev}$, o ângulo de elevação do satélite é representado por *elev*).

Os detalhes das variáveis envolvidas na equação 20 e na geometria da trajetória da propagação do sinal transmitido da antena do satélite até a antena do receptor é visto na Figura 21.

Figura 21 – Geometria do caminho da propagação do sinal do GPS até o receptor.



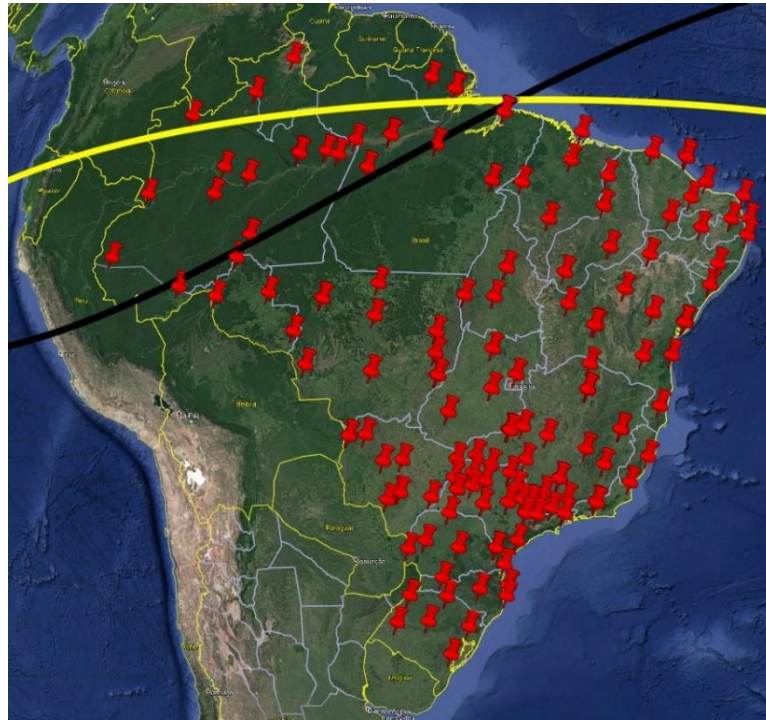
Fonte: Retirada e adaptada de Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001).

3.1.6 Redes de dados RBMC e UNAVCO

Os dados de GPS-TEC utilizado neste estudo foram obtidos através dos bancos de dados da RBMC e UNAVCO. Os dados sobre o território brasileiro foram disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE que é responsável pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC (<http://www.ibge.gov.br/>). E os dados para analisar o setor africano foram disponibilizados pela rede de dados em geociência UNAVCO (<http://www.unavco.org/>). Após a transferência dos dados de GPS-TEC é realizado um processamento de dados para se obter o VTEC. O TEC (medido em TECu = 10^{16} el /m²) é derivado das observações de GPS-TEC empregando uma metodologia análoga à utilizada por Seemala e Valladares (2011) (FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019).

Como os territórios brasileiro e africanos possui uma extensão longitudinal e latitudinal muito ampla e possuem estações GPS-TEC que cobrem uma grande área é possível realizar o estudo da eletrodinâmica ionosférica, clima espacial e a relação Sol – Terra. Quando estudamos as variações do VTEC e a evolução da EIA, durante os períodos geomagneticamente perturbados, escolhemos estações que estão estrategicamente situadas em diferentes latitudes e longitudes. A Figura 22 é exemplo de como a quantidade de receptores GPS facilitam a investigação ionosférica mostrando as localizações das estações/receptores GPS-TEC disponível, no território brasileiro, para a análise durante os períodos estudados.

Figura 22 – Mapa do Brasil mostrando as estações GPS-TEC (ícones vermelhos) disponíveis para as análises das tempestades geomagnéticas. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente.



Fonte: Autor.

Os critérios adotados para classificar as estações como equatorial, baixa latitude norte/sul e além da crista da EIA são apresentados a seguir (FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019):

- Dip Latitude $> 5^{\circ}\text{N}$ é de baixa latitude norte,
- $5^{\circ}\text{N} \leq \text{Dip Latitude} \leq 5^{\circ}\text{S}$ é a região equatorial,
- $5^{\circ}\text{S} < \text{Dip Latitude} < 20^{\circ}\text{S}$ é de baixa latitude sul, e
- Dip Latitude $\geq 20^{\circ}\text{S}$ é para região além da crista da AIE.

É importante mencionar que quando citamos uma estação de observação (GPS-TEC, Ionossonda ou All-sky) como sendo do hemisfério norte, sul ou equatorial estamos referindo ao equador magnético e não ao geográfico.

3.2 Ionossondas

Nesta seção são apresentados funcionamento da ionossonda e suas técnicas de radiossondagem que foram aplicadas para obtenção dos dados ionosféricos sendo que as ionossondas utilizadas para observar e estudar a resposta ionosférica são do tipo CADI

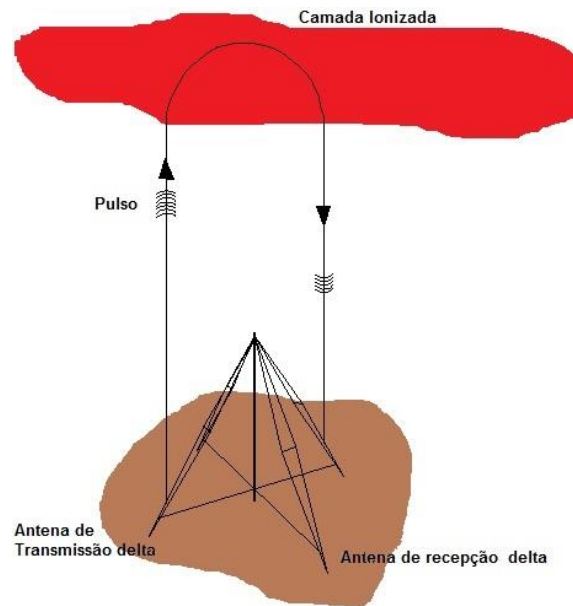
(*Canadian Advanced Digital Ionosonde* que faz parte de Rede de observação ionosférica do grupo de física espacial da UNIVAP (PILLAT, 2006) e do tipo DIGISSONDA (obtido através do banco de dados Lowell GIRO Data Center e foram extraídos do observatório de rádio de Jicamarca do Instituto Geofísico del Peru, de Port Stanley do Laboratório SERC Rutherford Appleton e do EMBRACE do Instituto Nacional Brasileiro para Pesquisa Espacial INPE, (RIBEIRO *et al.*, 2019). Os parâmetros ionosféricos, tais como: h'F (altura mínima virtual da camada F), foF2 (frequência do pico da camada F2) e hpF2 (aproximadamente altura virtual máxima da camada F2) são obtidos, processados e analisados através de *softwares* de redução de dados.

3.2.1 Princípios de funcionamento da ionossonda

Com o objetivo de estudar e medir a altura da camada ionosférica foi desenvolvido, entre a década de 1920 – 1930, um equipamento chamado ionossonda que transmite pulsos de rádio frequências (RF) (MITRA, 1952; JESUS, 2008). No início, a tecnologia utilizada na ionossonda se baseava em sistemas analógicos no qual era empregado o uso de válvulas e seus componentes ocupava grandes dimensões. Porém, com o avanço da ciência e da tecnologia as ionossondas sofreram alterações e começaram a ser desenvolvidas usando C.I. (circuito integrado), tornando mais compactas e possibilitando o armazenamento dos ionogramas em computadores, permitindo que os ionogramas digitais sejam processados e reduzidos de modo a obter parâmetros ionosféricos com auxílio de programas de computadores (REINISCH, 1986a; 1986b; MACDOUGALL; GRANT; SHEN, 1994; REINISCH, 1996c; PILLAT, 2006; JESUS, 2008; DUARTE-SILVA, 2013).

O processo de funcionamento da ionossonda é basicamente a transmissão de pulsos de radiofrequência, através de uma antena, e após um curto período (na ordem de microssegundos, μs) a onda transmitida é refletida pela ionosfera e capturada por uma antena receptora. Em seguida o computador da ionossonda calcula o tempo de transmissão e recepção do pulso de RF fornecendo no final informações sobre a altura da camada ionosférica para uma determinada frequência. A Figura 23 ilustra a sondagem da ionosfera através da ionossonda, no qual é composto por um sistema de transmissão e recepção que emite pulsos RF numa frequência que varia entre 1 e 25 MHz.

Figura 23 – Desenho esquemático do processo de transmissão da ionossonda.



Fonte: Retirada e adaptada Duarte-Silva (2013).

A ionossonda, após processar o sinal recebido, gera curvas de reflexão (altura x frequência), no qual chamamos de ionogramas (ver Figura 24). Utilizando os atrasos de tempo do pulso transmitido e recebido e adotando que a onda de rádio viaja na velocidade da luz podemos deduzir a altura virtual da camada ionosférica (DAVIES, 1990; DUARTE-SILVA, 2013):

$$h' = \frac{ct}{2},$$

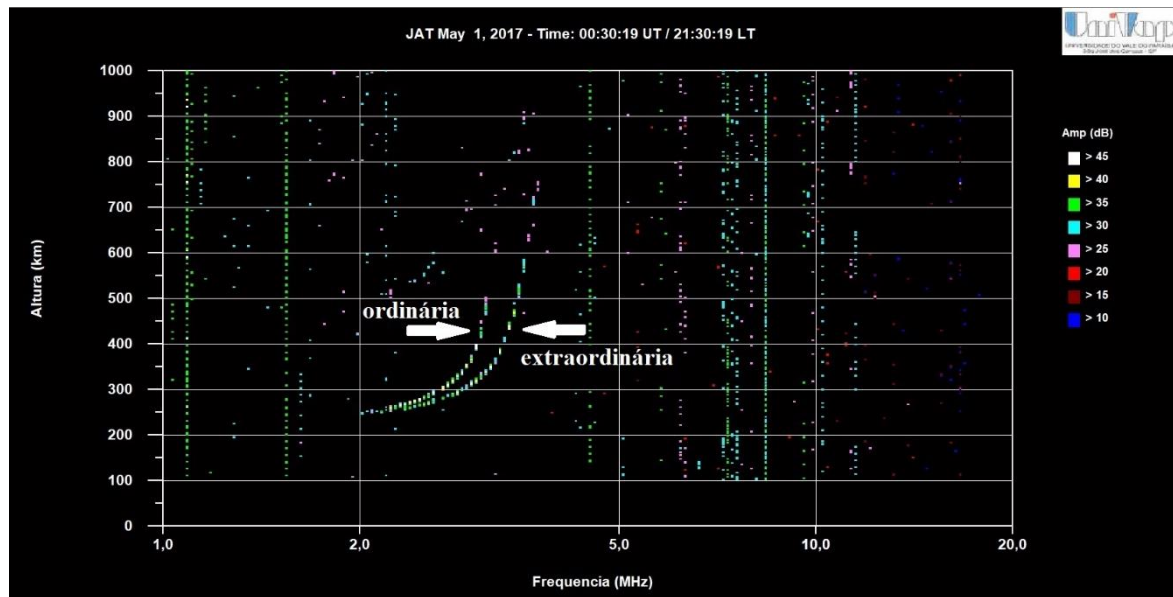
(21)

sendo:

- h' a altura virtual da camada ionosférica;
- c a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s);
- t o tempo gasto durante a propagação do pulso de rádio.

A altura virtual da camada ionosférica não corresponde com a altura real. Isto ocorre porque a altura virtual é obtida usando a velocidade da luz no vácuo. Porém, sabemos que na ionosfera a velocidade de grupo é menor que a velocidade da luz no vácuo devido à presença de elétrons livres. Logo, a altura registrada no ionograma possui valor maior que a altura real. Assim, adotamos o termo “virtual” para diferenciar da altura real (DAVIES, 1990; JESUS, 2008; MOOR, 2011; DUARTE-SILVA, 2013).

Figura 24 – Ionograma obtido em Jataí em 1 de maio de 2017. As setas horizontais indicam os ecos que correspondem a componente ordinária e extraordinária.



Fonte: Programa UDIDA.

Através de técnicas de sondagem é possível obter certas variáveis ionosféricas (MITRA, 1952; JESUS, 2008; MOOR, 2011; DUARTE-SILVA, 2013) como: tempo de propagação do sinal (sendo o intervalo do sinal transmitido e o tempo da recepção); intensidade do sinal refletido; e estado de polarização do sinal recebido. Assim, sabendo que o meio refrativo é regido pela densidade eletrônica, campo magnético do meio, frequência e polarização da onda transmitida é possível determinar algumas propriedades das ondas que se propagam no meio ionosférico (JESUS, 2008).

Se observamos a Figura 24 percebemos no ionograma ecos que correspondem as componentes ordinárias (polarização linear) e extraordinárias (polarização não linear). Isto ocorre devido ao sentido da polarização da onda transmitida e do campo magnético que faz com que a ionosfera seja birrefringente. Assim, sabendo que a altura de reflexão da onda eletromagnética transmitida é proporcional à frequência desta onda, ocorre então um aumento da frequência da onda transmitida resultando em reflexões de onda alcançando maiores altitudes. Quando a frequência da onda eletromagnética transmitida (f_t) é igual ou menor a frequência do plasma (f_p) teremos as ondas ordinárias. Porém, se a frequência transmitida for maior que a frequência do plasma as ondas transmitidas penetrarão a camada e não serão refletidas. Para facilitar o entendimento das curvas de altura que se formam nas camadas

ionosféricas utilizamos a equação de propagação (MITRA, 1952; JESUS, 2008; DUARTE-SILVA, 2013, TARDELLI, 2016):

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \varepsilon_0}},$$

(22)

onde:

n_e é a densidade de elétrons por m^3 , m a massa do elétron, e ε_0 a permissividade elétrica do vácuo.

No caso de ondas extraordinária a reflexão da onda eletromagnética transmitida ocorre em uma frequência mais elevada do que a onda ordinária e corresponde à metade da girofrequência do elétron. Porém, outros fatores podem influenciar, como o campo magnético.

3.2.2 Rede de ionossondas UNIVAP

A universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP possui uma rede de observatórios com instrumentos que estudam fenômenos que ocorrem na atmosfera terrestre, em especial na ionosfera. A Figura 25 e a Tabela 7 mostram em detalhes, as localizações dos observatórios no setor brasileiro juntamente com as coordenadas geográficas e magnéticas.

Figura 25 – Mapa da Rede de ionossondas UNIVAP

Fonte: Autor.

Tabela 7 – Lista de estações, coordenadas e instrumentos que a rede de observatórios da UNIVAP.

Estação	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)	Instrumentos
Manaus	2,6° S	60,2° O	3.8	All-sky e Magnetômetro
Araguatins	5,7° S	48,1° O	- 5.0	Ionossonda, Fabry-Perot, All-Sky e Magnetômetro
Jataí	19,0° S	51,7° O	- 13.4	Ionossonda, All-Sky e Magnetômetro
S. J. Campos	23,2° S	46,0° O	- 20.4	Ionossonda, Fabry-Perot, All-Sky e Magnetômetro

Fonte: Autor.

A ionossonda digital do tipo CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) foi desenvolvida pela Rede Canadense de Pesquisa Espacial. Sua potência de transmissão é de 600 W com uma duração do pulso de 20 μ s no qual é possível obter uma resolução de 6 km de altura (MACDOUGALL; GRANT; SHEN, 1994; JESUS, 2008; TARDELLI, 2016). A ionossonda do tipo CADI opera simultaneamente em dois diferentes modos de varredura de frequências:

1. Transmite pulsos com uma resolução temporal de 300 segundos (5 min), e os ionogramas são obtidos através da digitalização de sinais recebidos em até 180 frequências (1-20 MHz).
2. Transmite pulsos com uma resolução temporal de 100 segundos, no qual são obtidos ionogramas rápidos, operando em apenas seis frequências pré-selecionadas (3,1; 4,1; 5,1; 6,3; 7,1, e 8,1 MHz)

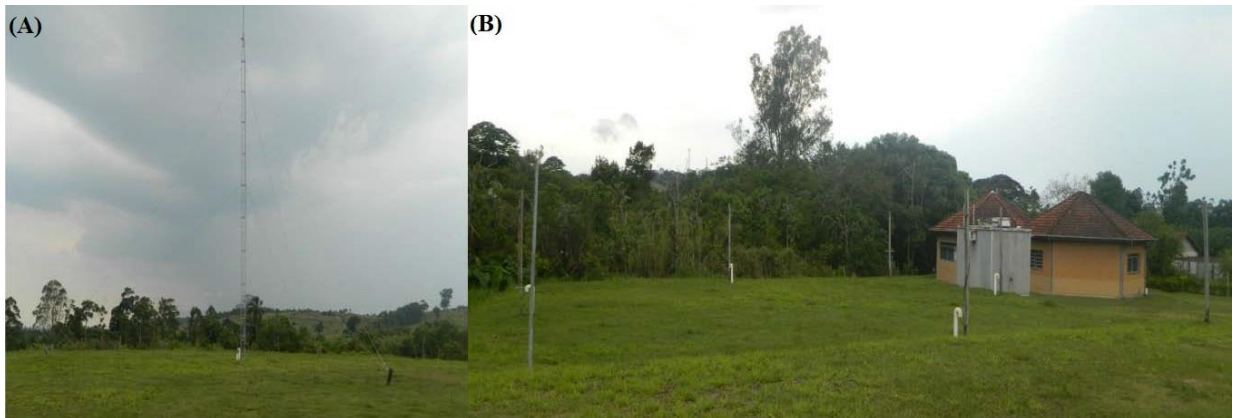
A Figura 26 mostra o sistema de transmissão e recepção da ionossonda CADI instalado na Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos, SP. A antena de transmissão (armada em um dipolo em delta simples suportada por uma torre de 20 m de altura) e a antena de recepção (formada através de um sistema de quatro dipolos) são mostradas na Figura 27A e 27B.

Figura 26 – Sistema de transmissão e recepção da ionossonda digital CADI.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Antena de transmissão (A) e recepção (B) da CADI instalada em São José dos Campos.



Fonte: Retirada de Tardelli (2016).

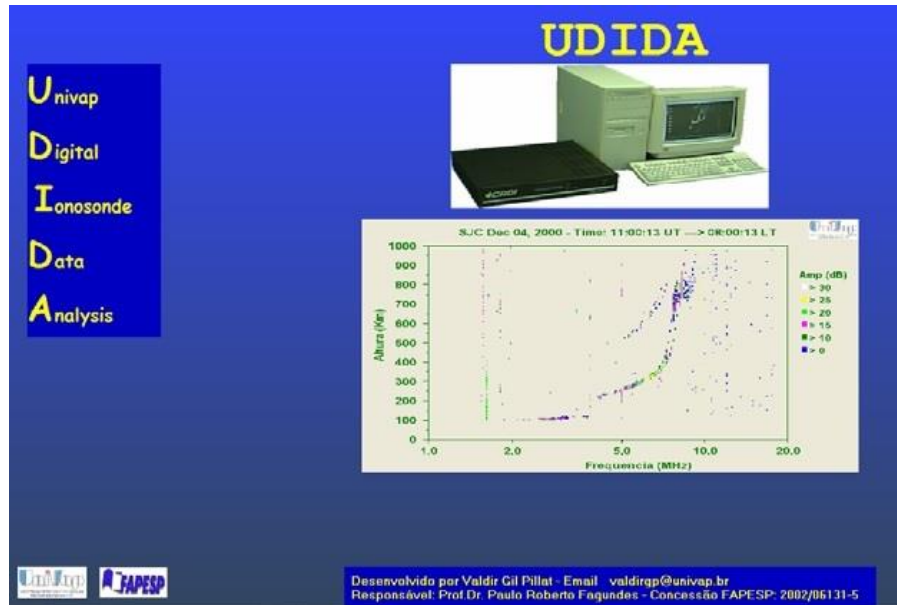
Sabemos que a altitude de sondagem da ionossonda está localizada entre 100 e 1000 km. Porém, o foco deste trabalho se concentra na camada F. No qual, a base da camada F está entre 240 e 270 km de altitude e o pico da camada F entre 300 e 350 km de altitude.

3.2.3 Análise de dados de ionossonda

Através do programa UDIDA (*UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis*), desenvolvido pelo grupo de física espacial da UNIVAP (PILLAT, 2006), é possível fazer a extração dos parâmetros ionosféricos nos ionogramas sendo possível investigar a variação espaço-temporal dos parâmetros durante o período geomagneticamente perturbado. A Figura 28 mostra a tela inicial do programa UDIDA que usamos com os dados observacionais da rede de ionossonda UNIVAP. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado dados observacionais de ionossondas. E por se tratar de dados observacionais foi necessário que o método de extração de dados passasse por processos computacionais até está disponível para confecção de gráficos. A Figura 29 mostra recursos disponíveis no programa que tem como objetivo facilitar a redução de dados. É importante destacar-se que utilizando o programa UDIDA os dados podem ser reduzidos automaticamente e manualmente. Entretanto, os dados para esta tese foram reduzidos manualmente. Nos ionogramas foram extraídos os parâmetros ionosféricos de cada camada podendo esses parâmetros serem reduzidos pelo programa UDIDA (PILLAT, 2006; JESUS, 2008; TARDELLI, 2016). É importante mencionar que também utilizamos o software da Lowell GIRO Data Center para redução de dados da DIGISSONDA. Os parâmetros ionosféricos utilizados neste trabalho são:

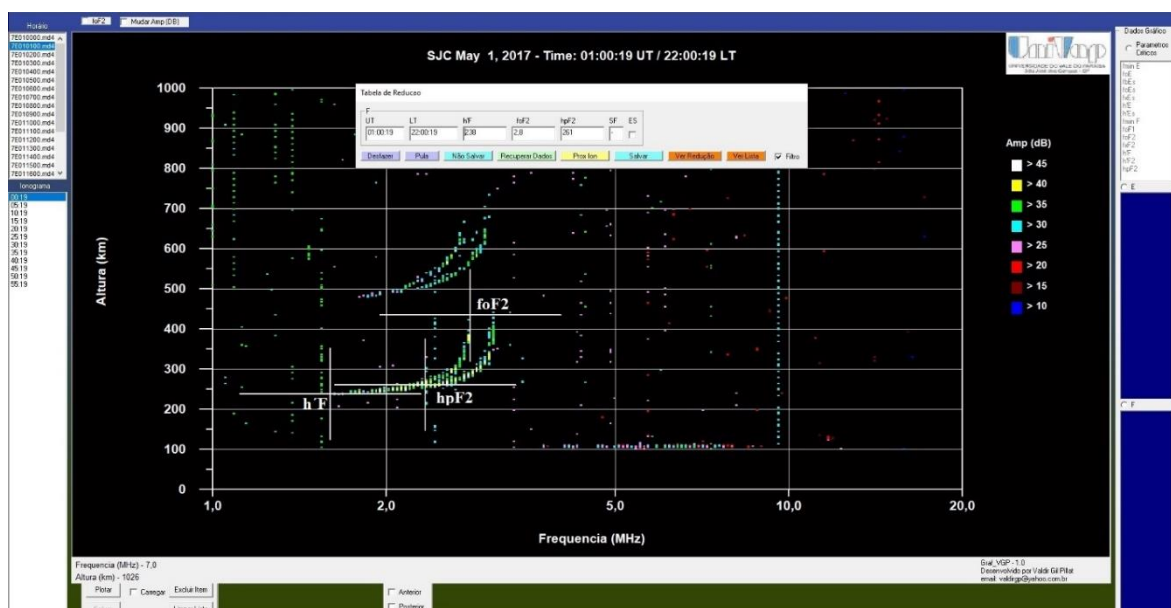
- $h'F$: Altura mínima virtual da onda ordinária da região F;
- $foF2$: Frequência crítica da onda ordinária da região F;
- *Spread-F* do tipo range e frequência.

Figura 28 – Tela inicial do programa UDIDA que foi desenvolvido pela UNIVAP.



Fonte: Programa UDIDA.

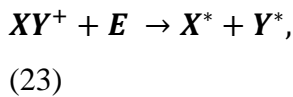
Figura 29 – Ionograma obtido em São José dos Campos, em 01/05/17, mostrando a extração dos parâmetros ionosféricos ($h'f$, $foF2$ e $hpF2$). Observamos na tela os recursos para redução de dados.



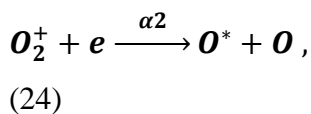
Fonte: Programa UDIDA.

3.3 Rede UNIVAP de imageadores de tipo *All sky*

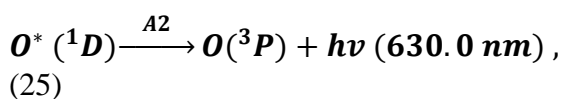
Além de ionossondas a rede de instrumentos ionosféricos UNIVAP conta com fotômetros imageadores do tipo All-sky que estão em operação em São José dos Campos (SP), Jataí (GO), Araguatins (TO) e Manaus (AM) e que fazem observação em três emissões (linhas) do oxigênio atômico (OI 557,7 nm, OI 630,0 nm e OI 777,4 nm), conforme ilustra a Figura 25, cujos dados estão listados na Tabela 7. Para esta pesquisa foi utilizado a emissão OI 630,0 nm, que tem origem na base da camada F com uma altitude que varia entre 240 e 270 km (base da camada F). A recombinação dissociativa do íon molecular com os elétrons, onde o resultado gera a linha vermelha OI 630,0 nm, é chamado de processo de produção do oxigênio atômico excitado $O(^1D)$ na camada F (PIMENTA, 2003; WRASSE, 2005; TARDELLI-COELHO, 2017) e conforme a reação química geral pode ser descrito como:



Para dissociar o íon molecular XY^* em átomos excitados uma parcela da energia da reação é usada. No qual podem ser produzido alguns produtos através da recombinação dissociativa do íon molecular, como por exemplo:



Ao decair para o estado fundamental espontaneamente o átomo do oxigênio atômico no nível 1D libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética, emitindo discreta linha no comprimento de onda 630,0 nm.



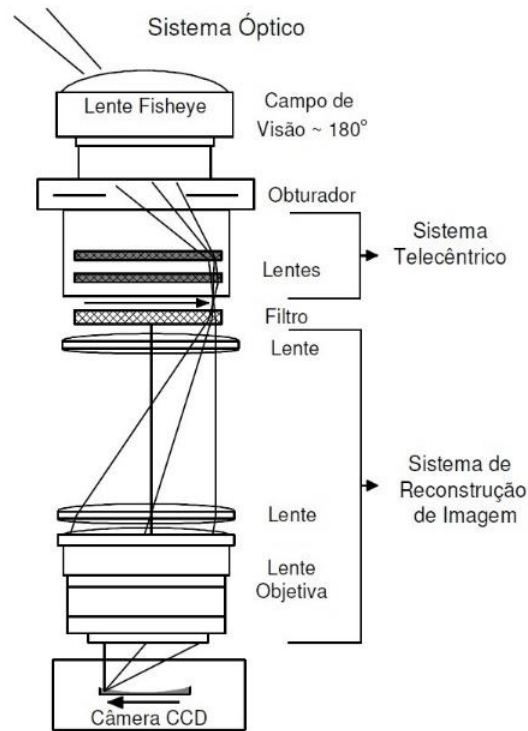
A aquisição de imagens da emissão OI 630,0 nm são obtidas no decorrer da noite (noites sem nuvens, sem neblinas e sem luzes oriundas da Lua e/ou fontes externas). Em seguida, caso seja observado algum fenômeno durante o período perturbado, começamos o

processamento de dados das imagens observadas. No qual, será possível estudar as características morfológicas e dinâmicas da estrutura (direção, período e velocidade). É importante destacar-se que a combinação de análises dos dados de GPS-TEC, ionossondas e imagens da emissão OI 630 nm tornam-se uma ferramenta poderosa para estudar os efeitos da tempestade geomagnética no sistema ionosfera-termosfera.

3.3.1 Imageadores de tipo *All-sky*

Os imageadores *all-sky* são utilizados para medir emissões de luminescência atmosférica e são basicamente composto por um sistema óptico e uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*). Por ter uma lente do tipo olho de peixe (*fisheye*) possui um campo de visão de 180° no qual, o alcance espacial é maior quando comparado com outros instrumentos ionosféricos (foguetes e ionossonda) (PIMENTA, 2003; WRASSE, 2005; TARDELLI-COELHO, 2017). Os resultados das medições são registrados em imagens e guardados em bancos de dados ficando disponíveis para serem computacionalmente processadas.

A Figura 30 mostra o desenho esquemático do imageador mostrando que o sistema óptico é composto por uma lente *all-sky*, um obturador (*shutter*), um conjunto de lentes telecêntricas, um sistema de filtros de interferência (roda de filtros), um sistema de reconstrução de imagens e uma câmera CCD.

Figura 30 – Sistema óptico detalhado do imageador All-sky.

Fonte: Retirada e adaptada de Wrasse (2005).

A luz que incide sobre o sistema óptico, através da lente olho de peixe, produz uma imagem que denominamos de primária que é igual ao tamanho do filtro de interferência. O conjunto de lentes telecêntricas fazem com que os raios de luz que vem da lente olho de peixe fiquem paralelos ao eixo do sistema óptico. A trajetória óptica é então interrompida pelo sistema de filtros de interferência (roda de filtros). A Tabela 8 lista as características dos filtros e as respectivas alturas médias do pico das camadas de luminescência do oxigênio atômico. Após passar pela roda de filtros a luz passa por um sistema de lente. No qual denominamos de sistema de reconstrução de imagens que tem como objetivo reduzir o tamanho da imagem primária para o tamanho da câmera CCD (PIMENTA, 2003; WRASSE, 2005; TARDELLI-COELHO, 2017).

Tabela 8 - Principais características das emissões do oxigênio atômico OI 557,7 nm, OI 630,0 nm e OI 777,4 nm que são observadas pelos imageadores da UNIVAP.

Emissão (nm)	Largura de banda (nm)	Altura média do pico da camada de emissão (km)
OI 557,7	2,65	240 - 270 (Base da camada F)

OI 630,0	1,5	240 - 270 (Base da camada F)
OI 777,4	1,35	300 – 350 (Pico da Camada F)

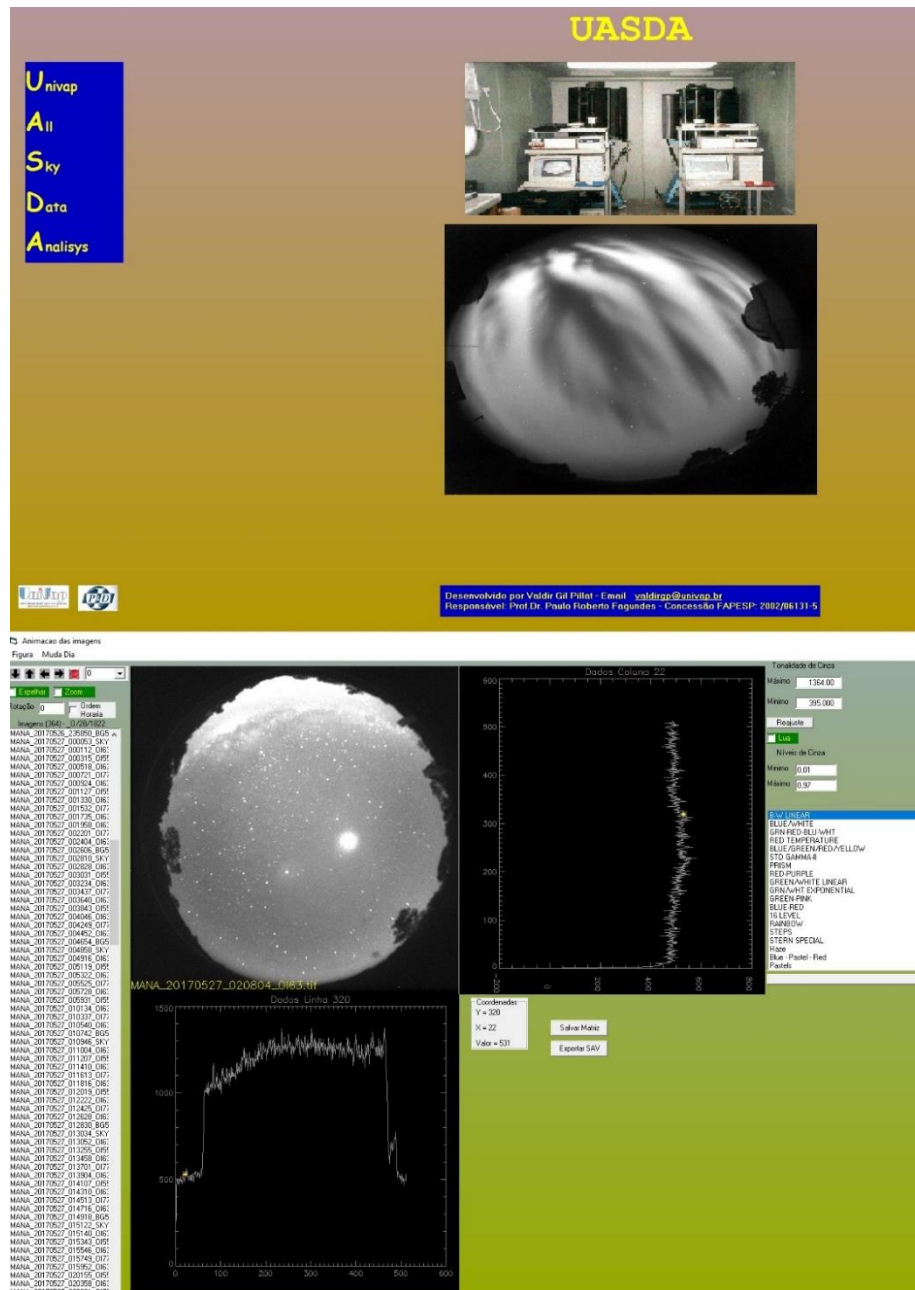
Fonte: autor.

Por mérito do avanço e das inovações tecnológicas os imageadores atuais possibilitam vários recursos que podem ser controlados por computadores. Um desses novos recursos é a possibilidade da troca de filtros automaticamente durante a observação e um banco de dados com as imagens em formato digital. O imageador da rede UNIVAP utiliza uma câmera CCD de alta resolução com sistema CCD CH350 Photometrics detectors da Keo Consultants.

3.3.2 Processamento de dados utilizando UASDA

Para o processamento computacional dos dados, obtidos pelos os imageadores, foi desenvolvido pelo grupo de física espacial da UNIVAP um software chamado UASDA (*UNIVAP All Sky Data Analysis*) (ABALDE *et al.*, 2001; 2004). O software nos permite, por imagens observadas e salvas, estudar os fenômenos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera da Terra (como variação da densidade eletrônica, a altura da camada F, pico da camada F e outros), tornando-o uma ferramenta importante para a análise de dados durante períodos calmos e perturbados (TARDELLI-COELHO, 2017). A Figura 31 mostra a interface gráfica do programa UASDA juntamente com uma imagem obtida pelo fotômetro all-sky.

Figura 31 – Tela inicial da interface gráfica do UASDA, programa utilizado para a análise de dados obtidos pelo imageador all-sky. Imagem obtida em Manaus em 27 de maio de 2017



Fonte: Programa UASDA.

4 ANÁLISE DE DADOS DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Tempestade ionosférica é um termo comum que descreve as variações ionosféricas induzidas por perturbações geomagnéticas. Estas perturbações ionosféricas ocorrem principalmente como consequência de uma entrada súbita de energia do vento solar no sistema magnetosfera-ionosfera-termosfera e apresentam aumentos e/ou diminuições na

densidade eletrônica, sendo denominadas perturbações ionosféricas positivas e/ou negativas, respectivamente (GONCHARENKO *et al.*, 2007; HUANG *et al.*, 2005; ABREU *et al.*, 2010b; 2014; ASTAFYEVA *et al.*, 2018; FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019).

Para analisar a resposta da ionosfera durante períodos perturbados, foram utilizados dados de GPS-TEC, ionossonda e imageador all-sky. Deste modo, conseguimos investigar as ocorrências de irregularidades no plasma (como Spread-F), a velocidade e a direção de propagação das TIDs (distúrbios ionosféricos propagantes), as modificações no sistema termosfera-ionosfera devido a PPEF (penetração rápida de campos elétricos) e o comportamento da EIA (como variações latitudinal e longitudinal da EIA).

Neste capítulo apresentamos a análise de dados de três tempestades ionosféricas ocorridas na fase descendente do ciclo solar 24. A primeira tempestade analisada ocorreu em 16 – 18 de janeiro de 2013, a segunda em 22 – 24 de junho de 2015 e a terceira tempestade estudada em 27 – 29 de maio de 2017.

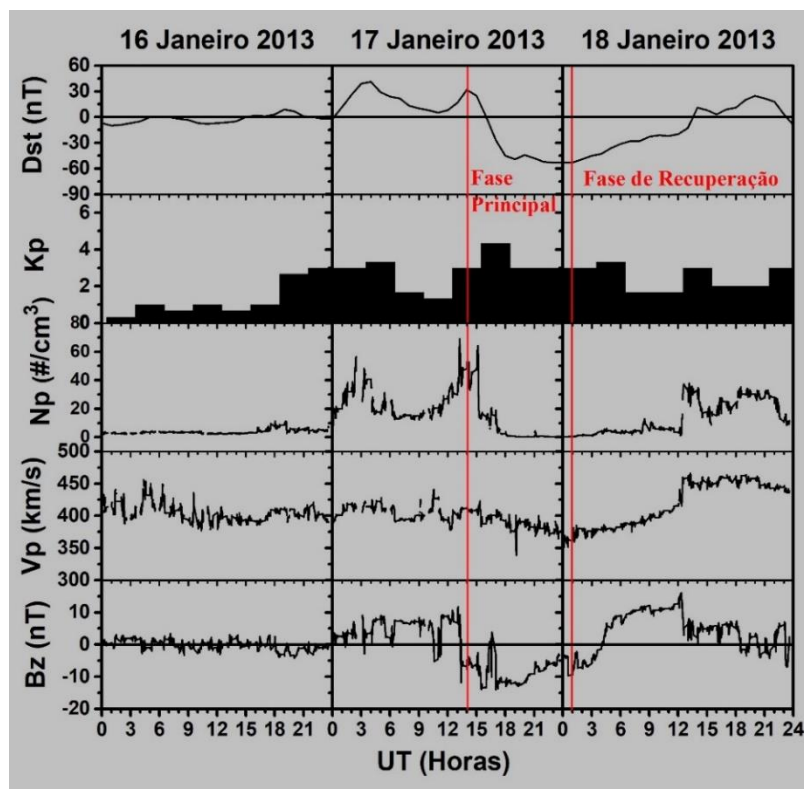
4.1 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 18 janeiro de 2013

Este estudo investigou a resposta da região F na região equatorial para além da crista da EIA durante a tempestade geomagnética moderada ($Dst = -53$ nT) que ocorreu entre 17 e 18 de janeiro de 2013, durante a alta atividade do ciclo solar 24. Foram utilizados uma rede de 82 receptores GPS de dupla frequência, abrangendo uma área de $30^\circ \times 30^\circ$ em latitude e longitude e três ionossondas localizadas no setor sul-americano.

A Figura 32 apresenta as variações dos índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros do vento solar (Bz , Vp e Np) durante o período de 16 a 18 de janeiro de 2013. Pode-se notar que o Dst apresentou dois picos positivos em 17 de janeiro de 2013. O valor máximo do Dst é visto em 17 de janeiro às 04:00 UT com um valor de 41 nT e diminui lentamente, atingindo 5 nT em torno das 11:00 UT. No entanto, durante este período, não há nenhuma inversão do campo magnético interplanetário (IMF- Bz) para o sul que possa caracterizar o início da tempestade geomagnética. Mais tarde, aproximadamente às 14:00 UT, o Dst aumenta novamente e um segundo pico de 32 nT aparece. Ao mesmo tempo, a componente Bz do IMF inverte para o sul causando o início da tempestade geomagnética. Posteriormente, o Dst diminuiu rapidamente até atingir um valor mínimo de -53 nT em 18 de janeiro às 01:00 UT. O IMF- Bz reteve para o sul a partir de 12:00 UT em 17 de janeiro e virou para o norte às 04:00 UT em 18 de janeiro. A velocidade do vento solar durante o período calmo é de cerca de 340

km/s aumentando para aproximadamente 480 km/s durante a fase principal. A densidade de prótons do vento solar aumentou de ~ 5 partículas por cm^3 (período calmo) para 40 partículas por cm^3 (período perturbado). Durante a fase principal a densidade de prótons apresentou dois picos que estão quase sincronizados com os dois picos do índice Dst (Veja figura 32 para maiores detalhes). O índice Kp também apresentou valores elevados, com um máximo de 4 em 17 de janeiro, às 23:00 UT durante a fase principal da tempestade geomagnética.

Figura 32 – Índices geomagnéticos Dst e Kp, velocidade do vento solar (V_p), densidade de prótons (N_p) e campo magnético interplanetário (B_z) entre os dias 16-18 de janeiro de 2013. As linhas verticais vermelhas indicam o início e o fim da fase principal da tempestade geomagnética.



Fonte: Autor.

É importante ressaltar que as causas e a compreensão das perturbações que ocorreram durante esta tempestade geomagnética exigiram um grande esforço. Para este estudo foram analisadas duas perturbações ionosféricas positivas que são apresentadas separadamente. A primeira perturbação ionosférica positiva foi a propagação de uma TID durante o dia e consequentemente a sua interação com a fase de desenvolvimento da EIA. A segunda perturbação ionosférica positiva observada ocorreu a noite e foi caracterizada como uma nuvem ionosférica positiva equatorial que se propagou de leste para oeste. É importante

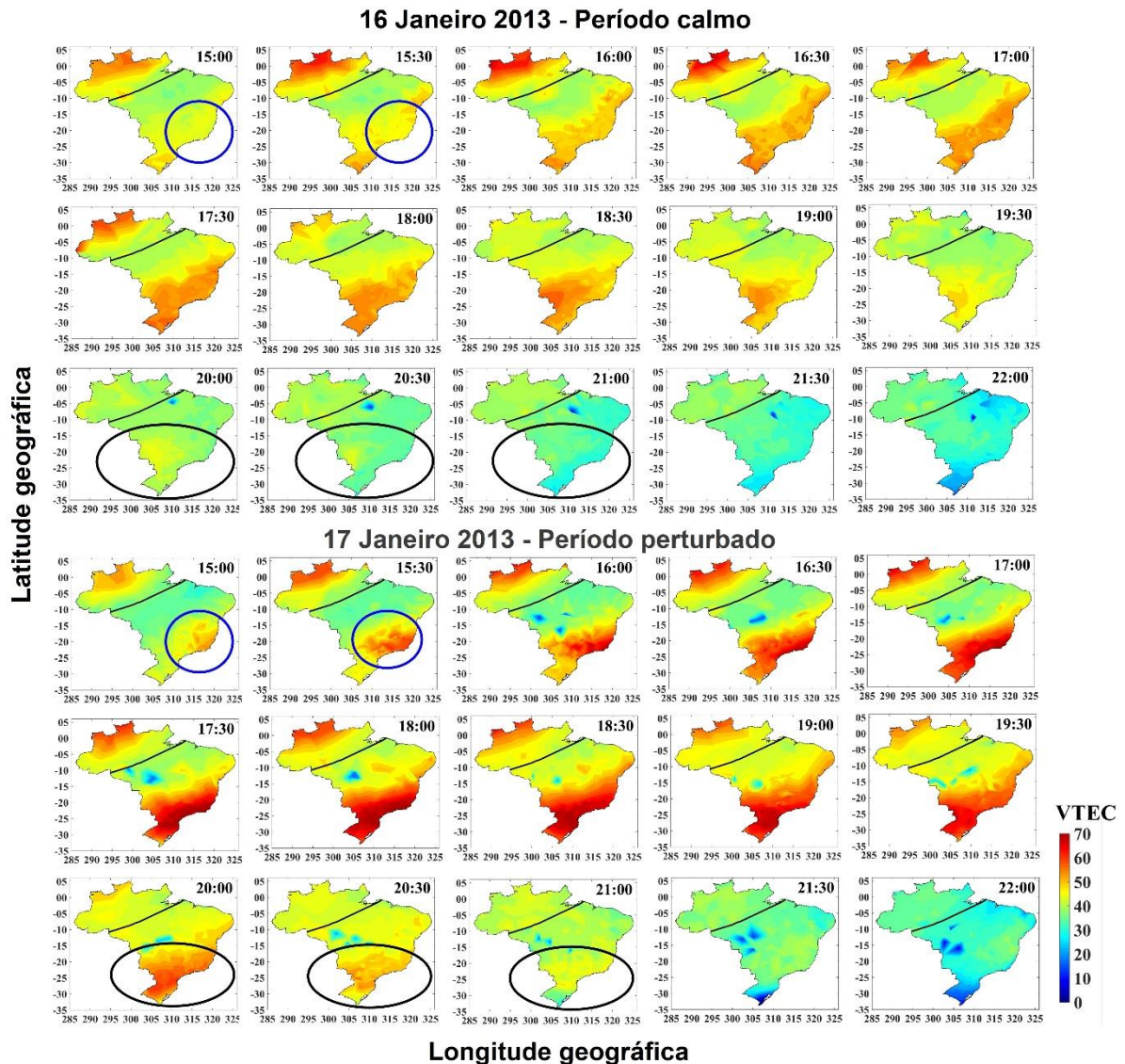
mencionar que é a primeira vez que analisamos e relatamos perturbações ionosféricas com estas características.

4.1.1 Primeira perturbação ionosférica positiva observada em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade

Fagundes *et al.* (2016) mostraram que perturbações ionosféricas positivas causadas pela penetração rápida do campo elétrico (PPEF) ocorrem quase que simultaneamente nos receptores GPS que estão localizada desde a região equatorial até a região além da crista da EIA. Geralmente, isso acontece porque o campo elétrico induzido pela PPEF eleva toda a camada F para altitudes mais altas, onde as taxas de recombinação são mais baixas e, portanto, a densidade do plasma é maior em comparação aos dias calmos. Além disso, o PPEF pode gerar o efeito super-fonte, que reforça e estende a crista da EIA para mais distante do equador em comparação ao período calmo. No entanto, a perturbação positiva ionosférica causada por TID é vista primeiro na região além da crista do EIA e depois em baixa latitude e/ou região equatorial (BECKER-GUEDES *et al.*, 2007; ABREU *et al.*, 2010b). Além disso, mudanças na densidade termosférica podem ocorrer durante o período perturbado e gerar estruturas semelhantes a ondas de larga escala (BRUINSMA *et al.*, 2006). Segundo Bruinsma *et al.*, (2006) essas ondas podem estar associadas às chamadas ondas de gravidade “diretas” forçadas na região auroral e se propagando para longe da fonte.

Dados de VTEC de 82 receptores GPS são analisados para traçar os mapas das variações espaço-temporais do TEC sobre o setor brasileiro. A Figura 33 mostra uma sequência de mapas VTEC no intervalo de 30 minutos no qual, o painel superior represente um dia calmo (16 de janeiro de 2013) e o painel inferior um dia perturbado (17 de janeiro de 2013) das 15:00 UT às 22:00 UT (~12:00 a 19:00 LT), que é o intervalo de tempo correspondente à fase principal da tempestade. A escala da barra de cores varia de 0 (azul escuro) a 70 (vermelho escuro) TECu. Estas sequências de mapas VTEC são muito úteis para comparar o comportamento ionosférico durante o período calmo e perturbado. É importante mencionar que o dia calmo usado neste estudo é o dia anterior à tempestade.

Figura 33 – Sequência de mapas VTEC para o dia calmo (16 de janeiro de 2013) e perturbado (17 de janeiro de 2013) durante o período da fase principal da tempestade das 15:00 UT às 22:00 UT. As linhas pretas nos mapas indicam o equador geomagnético. Os círculos azuis no painel inferior às 15:00 e 15:30 UT indicam o distúrbio ionosférico positivo. As elipses pretas, no painel inferior, indicam assinatura do distúrbio ionosférico positivo vista entre as 20:00 e as 21:00 UT em latitudes baixas (padrão vermelho).



Fonte: Autor.

A Figura 33 mostra que a estrutura positiva reforça a EIA, uma vez que o VTEC alcança valores mais altos (padrão vermelho escuro, VTEC ~ 60-70 unidades) em comparação com o dia calmo. Além disso, durante o dia perturbado, a assinatura da perturbação positiva pode ser vista entre as 20:00 e as 21:00 UT (~17:00 - 17:30 LT) em baixas latitudes (padrão vermelho fraco - elipses pretas). Porém, durante o dia calmo, entre as 20:00 e as 21:00 UT, a crista da EIA aparece fraca e nenhum padrão vermelho ou amarelo é visto nos mapas.

Durante o dia calmo (16 de janeiro de 2013, Figura 33 - painel superior) a EIA em baixas latitudes apresentou um padrão amarelado (unidades VTEC ~ 45) às 15:00 UT (~ 12: 00 LT) de leste para o oeste. A EIA torna-se mais forte das 16:00 às 18:00 UT (~ 13: 00 - 15:00 LT), em seguida o VTEC aumenta em baixas latitudes e o padrão amarela torna-se avermelhado (VTEC ~ 55 unidades) de leste para o oeste a partir das 16:00 UT (13:00 LT) até as 19:00 UT (16:00 LT). Esta variação é geralmente esperada no desenvolvimento da crista da EIA durante um dia calmo. Após as 20:00 UT (18:00 LT) a crista da EIA diminui em sua intensidade ao longo do tempo e o padrão avermelhado torna-se amarelado e em seguida esverdeado (VTEC ~ 30 unidades, conforme destacado pelas elipses pretas).

Durante a fase principal da tempestade, a crista da EIA apresenta uma evolução diferente e conseqüentemente mudanças significativas são vistas nos valores do VTEC. A Figura 33 (painel inferior) mostra que uma perturbação positiva ionosférica é inicialmente vista em baixas latitudes na faixa geográfica entre as latitudes de -20° e -25° e longitudes de 315° e 320° (padrão vermelho) às 15:00 UT (cerca de 12:00 LT, como destacado por um círculo azul), em 17 de janeiro.

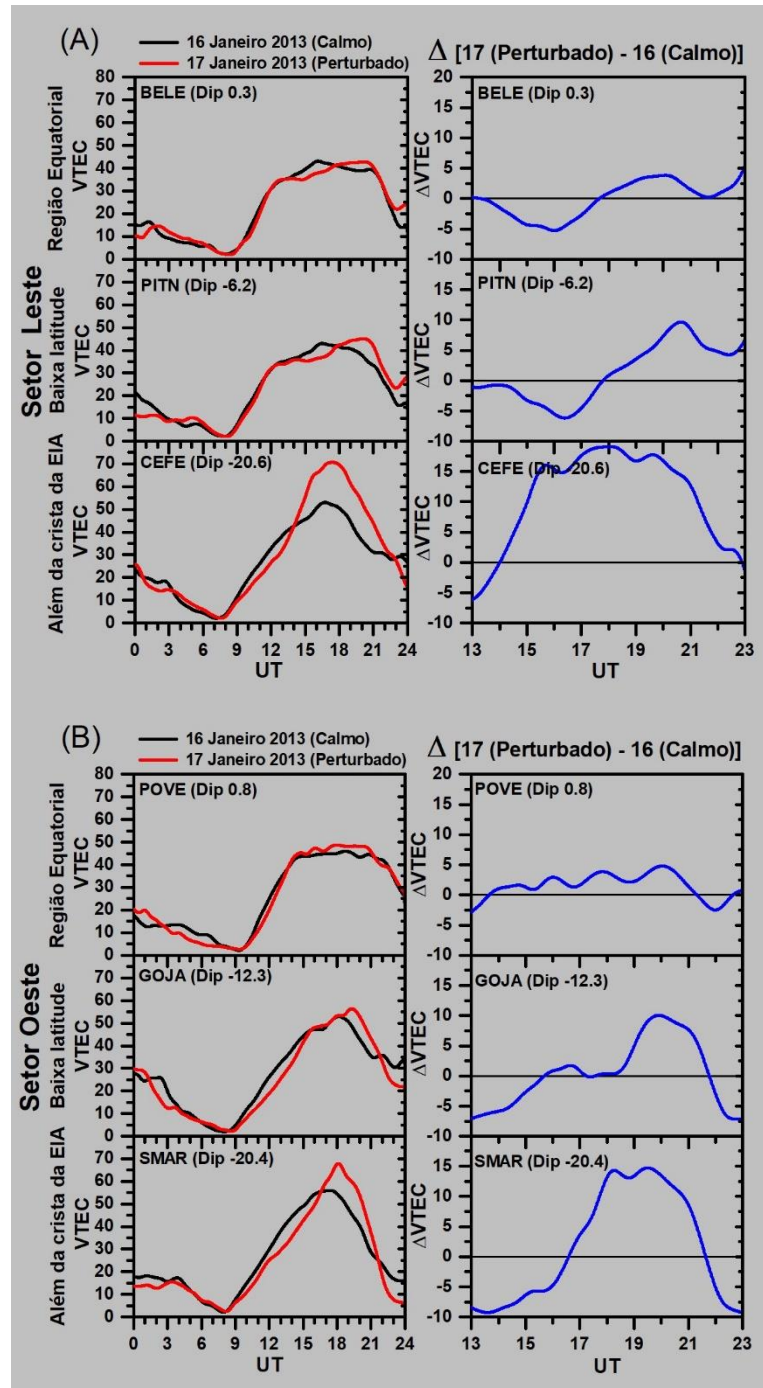
Para destacar o efeito longitudinal da perturbação positiva ionosférica, são consideradas 6 estações GPS, sendo 3 localizadas no setor leste brasileiro e 3 no setor oeste brasileiro. Além disso, para investigar os distúrbios latitudinais, cada uma das estações acima mencionadas são consideradas de tal forma que 3 estações em cada setor estão distribuídas na região equatorial, região de baixa latitude e região além das cristas da EIA. As coordenadas geográficas, juntamente com o dip latitude, dessas estações são dadas na Tabela 9. A comparação do VTEC entre os dias calmos (linha preta, 16 de janeiro) e perturbado (linha vermelha, 17 de janeiro) são apresentadas nos painéis esquerdo da Figura 34A e 34B para os setores leste e oeste brasileiro, respectivamente. Os painéis da direita, Figuras 34A e 34B, apresentam a diferença no VTEC (Δ VTEC) entre os dias perturbados e calmos nos períodos entre 13:00 e 23:00 UT, para uma melhor compreensão da fase positiva da tempestade. As Figuras 34A e 34B mostram que a perturbação ionosférica positiva, além da crista de EIA (dip latitude ~ -20), é mais forte em comparação com latitudes mais baixas e permanece várias horas em ambos os setores. Em latitudes mais baixas, a perturbação ionosférica ocorre mais tarde e tem uma duração mais curta, indicando que essa estrutura se propaga para o equador. A perturbação ionosférica apresenta a intensidade fraca na região equatorial e não é possível distinguir se é devido às perturbações da tempestade ou à variabilidade do dia a dia.

Tabela 9 – Detalhes das 6 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a primeira perturbação ionosférica positiva que ocorreram em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade.

Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Setor leste brasileiro				
Belém	BELE	- 1.4	48.5	0.3
Teresina	PITN	- 5.1	42.8	- 6.2
Vitoria	CEFE	- 20.3	40.3	- 20.6
Setor oeste brasileiro				
Porto Velho	POVE	- 8.7	63.9	0.8
Jatai	GOJA	- 17.9	51.7	- 12.3
Santa Maria	SMAR	- 29.7	53.7	- 20.4

Fonte: Autor.

Figura 34 – (A) Os painéis da esquerda mostram a variação diurna do VTEC para o setor leste brasileiro durante 16 de janeiro (dia calmo, linha preta) e 17 de janeiro (dia perturbado, fase principal da tempestade, linha vermelha) para BELE (dip latitude 0,3), PITN (dip latitude -6.2) e CEFE (dip latitude -20.6). Os painéis da direita mostram as variações Δ VTEC correspondentes (Perturbado - Calmo) das 13:00 às 23:00 UT. (B) O mesmo que (A), mas para as estações POVE (dip latitude 0,8), GOJA (dip latitude -12,3) e SMAR (dip latitude -20,4) no setor oeste.



Fonte: Autor.

As Figuras 33 e 34 mostram os valores de VTEC que são maiores durante o período diurno perturbado (17/01/2013) em relação ao período calmo (16/01/2013), o que indica a presença de uma fase positiva da perturbação ionosférica.

Utilizando os mapas de TEC (Figura 33) e a variação diurna do VTEC, para os setores do leste e oeste brasileiros (Figura 34), verificou-se que a interação espaço-tempo entre a crista da EIA e a perturbação positiva ionosférica se propaga para o equador ao mesmo tempo que a crista da EIA está se desenvolvendo e ficando mais intensa. O pico positivo inicialmente observado fundiu-se na crista da EIA e após algumas horas, a crista da EIA está completamente desenvolvida. No presente caso, é complicado separar a evolução espaço-temporal da crista da EIA e uma propagação da estrutura ionosférica positiva em direção à região equatorial devido a ambos os fenômenos ocorrerem ao mesmo tempo e no mesmo lugar. No entanto pode-se notar que esta estrutura ionosférica positiva é uma TID tipo soliton proveniente das médias-altas latitudes e que se expandiu como uma frente de onda em direção à região equatorial (15:00 UT, ~ 12:00 LT, círculos azuis).

É claramente notado a partir da Figura 34 que a estrutura positiva aparece, em primeiro lugar, na região além da crista da EIA e em seguida em baixa latitude, mostrando-se tratar de uma onda em grande escala viajando das latitudes médias para o equador, devido ao atraso de tempo no pico positivo entre as diferentes estações vistas nas variações de $\Delta VTEC$, nos painéis do lado direito da Figura 34. Além disso, a frente de onda tipo TID aparece em uma pequena faixa longitudinal e latitudinal ($\sim 5^\circ$) e, portanto, exclui a possibilidade de que essa estrutura de onda esteja relacionada à penetração rápida de campo elétrico ou efeito super-fonte, porque esses fenômenos são de grande escala e a área perturbada sob estas condições geralmente são muito maiores (FAGUNDES *et al.*, 2016).

A perturbação positiva, após atingir a costa brasileira, se desloca para o equador e se espalha longitudinalmente para o oeste, enquanto a EIA se torna mais forte com uma extensão geográfica maior e uma duração maior que a usual. Entre 18:30 e 18:45 UT, a combinação da perturbação positiva ionosférica e a crista da EIA cobre a maior parte da região brasileira de baixa latitude. No entanto, a perturbação ionosférica positiva perde força e atinge fracamente a região equatorial já que a perturbação positiva ionosférica é vista muito pequena nas estações equatoriais de BELE e POVE, nos setores leste e oeste brasileiros (ver painéis superiores das Figuras 34A e 34B).

Segundo Abreu *et al.* (2010a), as TIDs são geradas em altas latitudes e se propagam para baixas latitudes até a região equatorial. Em seu estudo, usando redes GPS-TEC e ionossonda é

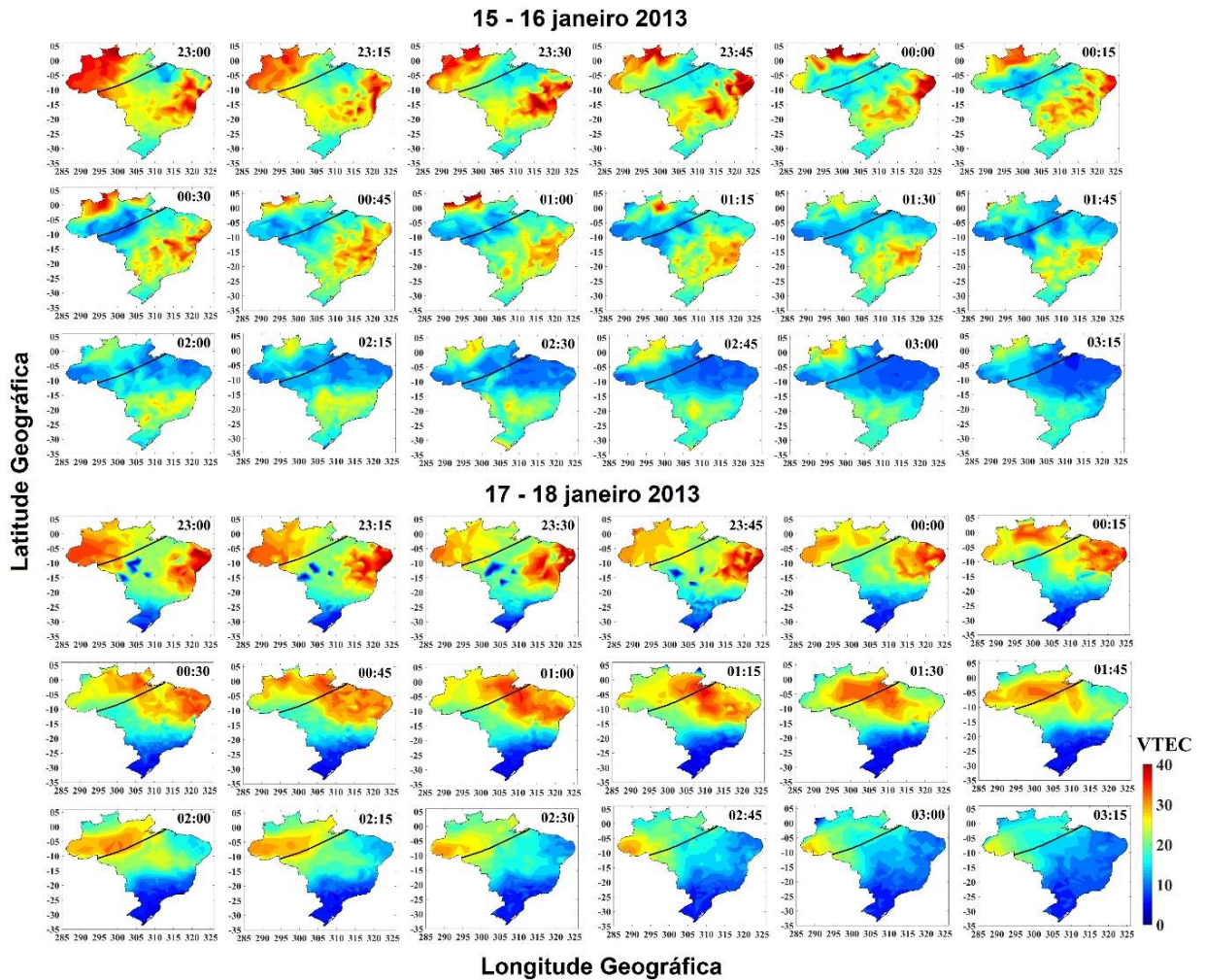
possível identificar uma TID tipo soliton propagando-se para noroeste a partir da região além da crista da EIA até a região equatorial. No entanto, o evento mostrado por Abreu *et al.* (2010a) ocorreu durante a noite e a interação com a crista da EIA não estava presente.

As Figuras 33 e 34 indicam que a fonte de perturbação ionosférica positiva provém de latitudes médias/altas, reforçando a crista da EIA e fazendo com que dure mais tempo em comparação com o período calmo. Outro indicativo que a estrutura ionosférica positiva indica a presença de uma TID e a propagação para o equador.

4.1.2 Segunda perturbação ionosférica positiva observada em 17 de janeiro de 2013, durante a fase principal da tempestade

A Figura 35 mostra uma sequência de mapas VTEC durante dias calmos (15-16 de janeiro de 2013, painel superior) e durante a transição entre as fases principal e de recuperação da tempestade geomagnética (17-18 de janeiro, painel inferior), a partir das 23:00 às 03:15 UT (~ 20:00 às 00:15 LT).

Figura 35 – Sequência de mapas VTEC para o período de transição entre as fases principal e de recuperação da tempestade geomagnética (de 17 a 18 de janeiro de 2013), entre as 17h e as 18h UT (~ 20:00 às 00:15 LT). A curva preta em cada mapa indica o equador geomagnético.



Fonte: Autor.

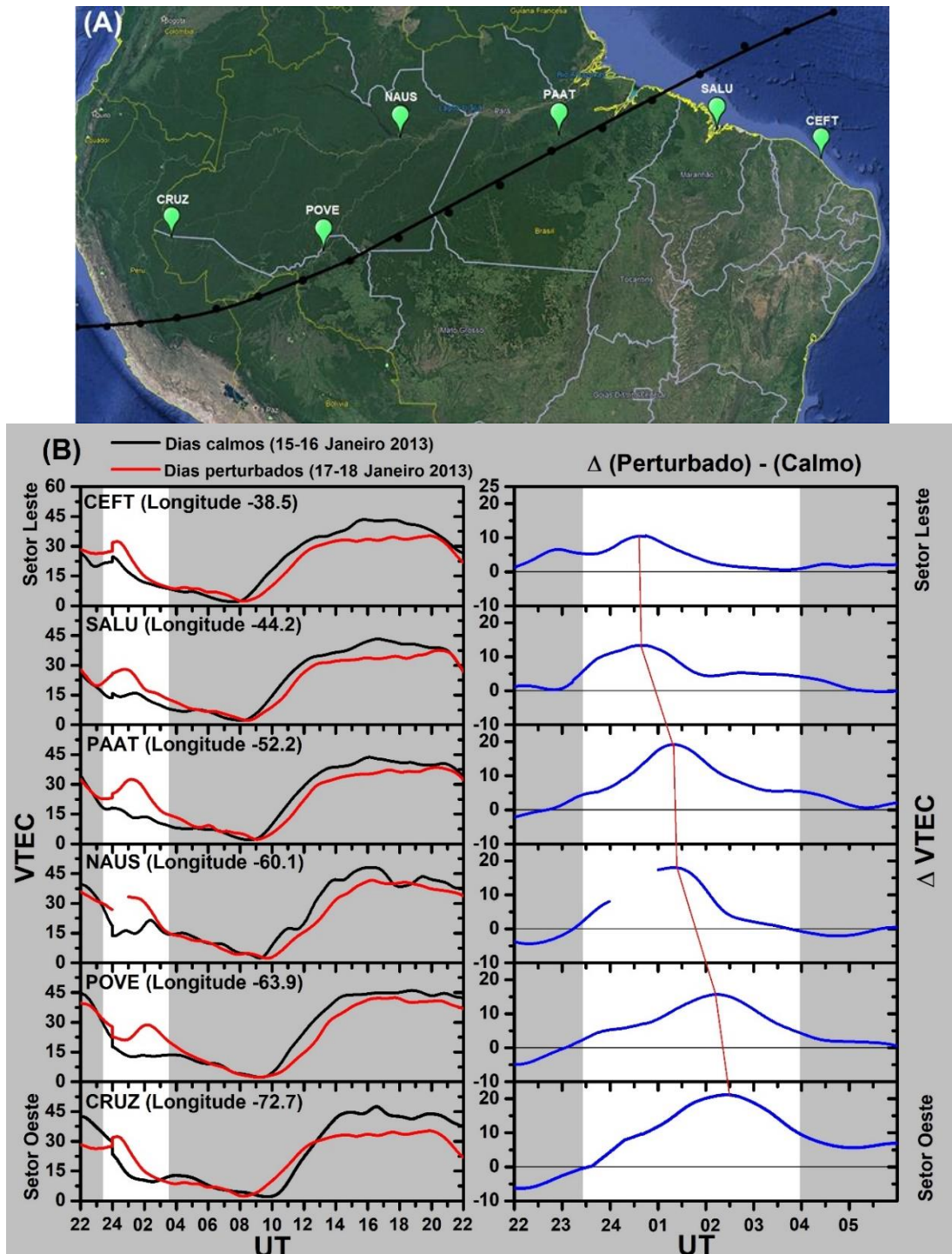
Durante os dias calmos (15 a 16 de janeiro, Figura 35 - painel superior) a intensificação da crista da EIA é observada em baixas latitudes às 23:00 UT (~ 20:00 LT). Esta intensificação de VTEC, em baixas latitudes, podem ser devido ao aumento pré-reverso (PRE) do campo elétrico a leste que ocorre logo após o pôr do sol e causa uma intensificação do efeito fonte equatorial e, conseqüentemente, o fortalecimento da crista de EIA. Mais tarde a crista da EIA perde sua força, como visto no painel superior da Figura 35. Perto da região equatorial magnética, o VTEC varia de ~15-20 TECu a ~5-10 TECu. É importante mencionar que durante o período calmo, após as 02:15 UT (~23:15 LT), o VTEC ao redor do equador geomagnético é caracterizado por valores realmente baixos.

Durante a transição da fase principal para a fase de recuperação, entre as 23:00 e as 00:15 UT de 17 a 18 de janeiro, a crista da EIA tem um forte gradiente VTEC leste-oeste. No setor leste, o VTEC apresenta valores de ~30-40 TECu, enquanto no setor oeste está em torno de ~5-10 TECu. O alto valor de VTEC, visto perto do setor leste da EIA, move-se para a região equatorial e começa a propagar para o oeste. Com relação a isso, a sequência de mapas destaca uma inesperada nuvem ionosférica positiva se propagando na região equatorial do setor leste para o setor oeste.

Para melhor analisar a propagação da nuvem ionosférica equatorial positiva foi escolhida seis estações GPS separadas entre setores leste e oeste da América do Sul ao longo do equador geomagnético. As localizações geográficas destas seis estações são mostradas na Figura 36A e os detalhes correspondentes são apresentados na Tabela 10. As variações diurnas do TEC durante os períodos calmos (15-16 de janeiro) e perturbado (17-18 de janeiro) para cada uma das seis estações consideradas são apresentados na coluna da esquerda da Figura 36B. As diferenças correspondentes no VTEC (Δ VTEC) entre os períodos perturbado e calmo são apresentadas na coluna da direita da Figura 36B. Pode ser visto claramente, na faixa vertical branca na coluna da esquerda da Figura 36B, que há um forte aumento no VTEC durante o período de transição da fase principal para a fase de recuperação da tempestade geomagnética (23:00 UT às 03:00 UT) quando comparado com o período calmo. As variações Δ VTEC mostram que a nuvem positiva ocorre primeiro no setor leste e se propaga em direção ao setor oeste ao mesmo tempo que intensifica sua força.

Até onde sabemos, é a primeira vez que esse tipo de nuvem positiva ionosférica equatorial noturna é observado e relatado durante a transição entre a fase principal e a fase de recuperação de uma tempestade geomagnética.

Figura 36 – (A) Mapa Mostrando a localização das 6 estações GPS-TEC (ícones verdes) usadas para investigar a dinâmica da nuvem ionosférica positiva equatorial durante a transição das fases principal e de recuperação da tempestade geomagnética ocorrida em 17-18 de janeiro, 2013. O equador geomagnético é indicado como uma curva preta. (B) Os painéis à esquerda mostram a variação diurna do VTEC, entre 24 horas, para cada estação considerada durante as condições de período calmo (linha preta) e perturbado (linha vermelha). Os painéis à direita mostram as variações correspondentes Δ VTEC (Perturbado - Calmo) entre 22:00 e 06:00 UT.



Fonte: Autor.

Tabela 10 – Detalhes das 6 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a segunda perturbação positiva da ionosfera que ocorreram de 17 a 18 de janeiro de 2013.

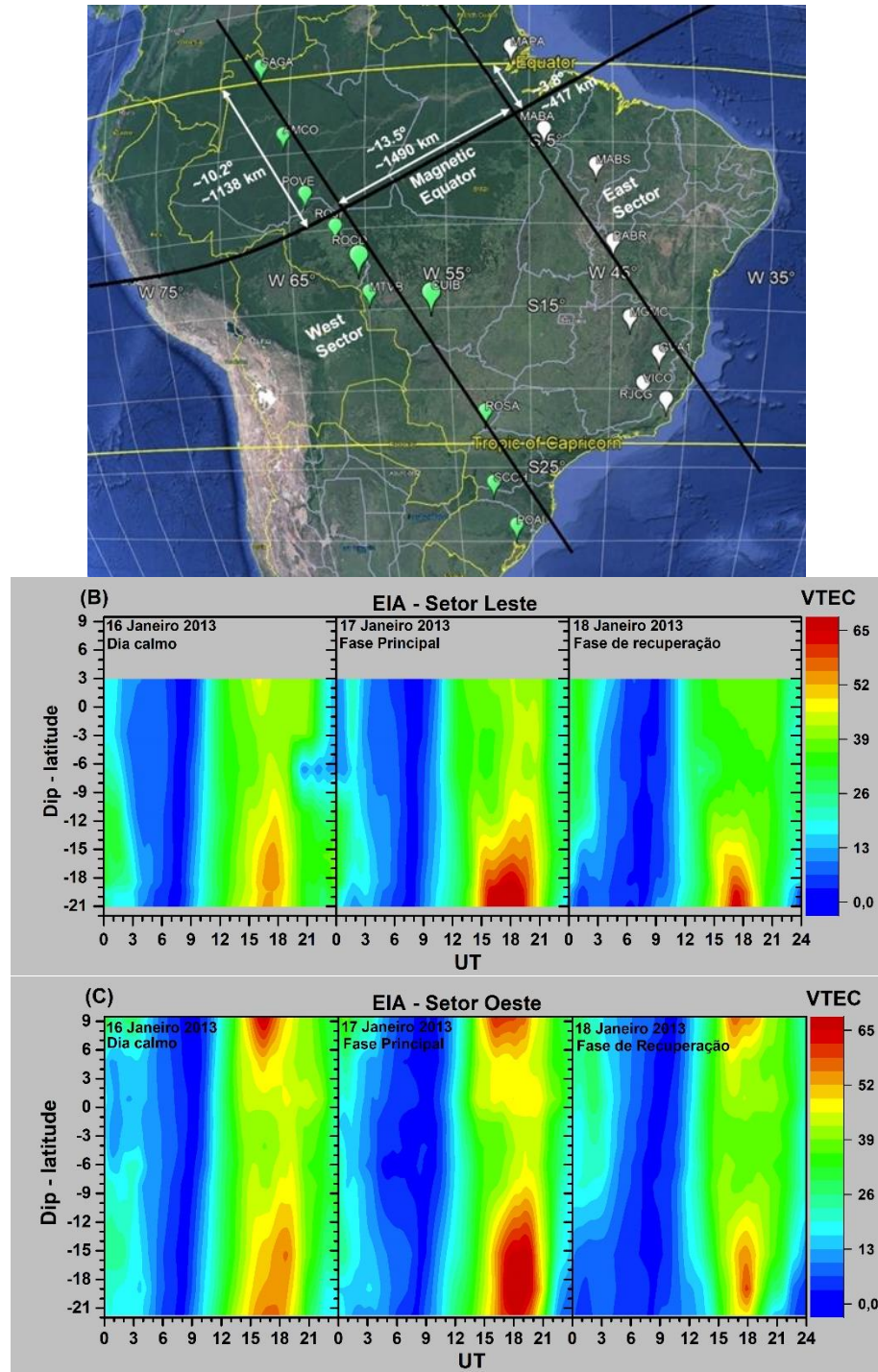
Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Fortaleza	CEFT	- 3.7	38.5	- 7.4
São Luiz	SALU	- 2.6	44.2	- 3.1
Altamira	PAAT	- 3.2	52.2	0.7
Manaus	NAUS	- 3.0	60.1	4.6
Porto Velho	POVE	- 8.7	63.9	0.9
Cruzeiro do Sul	CRUZ	- 7.6	72.7	3.8

Fonte: Autor.

4.1.3 Resposta da EIA devido as duas perturbações ionosféricas

Para estudar a EIA durante as perturbações ionosféricas positivas, duas redes latitudinais de estações GPS-TEC são consideradas. A metodologia aplicada é similar à utilizada por Fagundes *et al.* (2016) onde, usando duas linhas pretas perpendiculares ao equador geomagnético como referência, são escolhidas estações GPS-TEC próxima ao meridiano magnético. A Figura 37 mostra o mapa com as localizações das duas redes de estações GPS-TEC, nos setores oeste e leste brasileiro. Foi possível escolher 10 estações de GPS no setor oeste e 8 estações de GPS no setor leste para investigar a variabilidade diária da EIA durante 16 a 18 de janeiro de 2013, tanto para condições calmas quanto para perturbadas. Os detalhes destas 18 estações GPS, juntamente com as coordenadas geográficas e o dip latitude, são apresentadas na Tabela 11. As Figuras 37B e 37C mostram gráficos de contorno de VTEC em função da dip latitude e UT para ambos os setores. Os painéis superiores referem-se ao setor leste, enquanto os painéis inferiores referem-se ao setor oeste. É possível observar na Figura 37 que durante a fase principal (17 de janeiro) a EIA se mostrou mais forte (intensificada) quando comparada ao dia 16 (dia calmo) e ao dia 18 (fase de recuperação) indicando que uma perturbação ionosférica positiva do tipo TID pode ter intensificado a EIA.

Figura 37 – (A) Mapa mostrando as localizações das estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica latitudinal da EIA nos setores leste (marcadores brancos) e oeste (marcadores verdes). As estações GPS-TEC são consideradas ao longo das direções perpendiculares ao equador geomagnético (linhas pretas). As distâncias entre os equadores geográficos e geomagnéticos e os setores leste e oeste brasileiros também são mostradas em quilômetros (km) e grau (com setas brancas duplas). (B) Gráficos de contorno VTEC mostrando a evolução da EIA no setor leste brasileiro em função do UT e dip latitude. (C) O mesmo que a Figura 33B, mas para o setor oeste brasileiro.



Fonte: Autor.

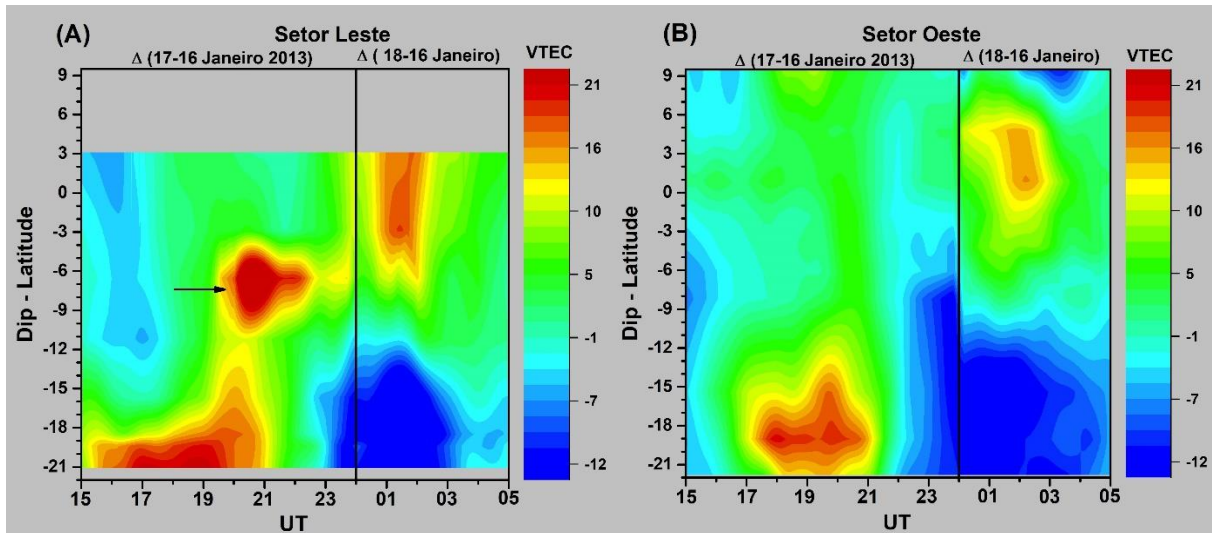
Tabela 11 – Detalhes das 18 estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a dinâmica da EIA nos setores leste e oeste do Brasil.

Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Setor leste brasileiro				
Macapá	MAPA	- 0.1	51.1	2.9
Marabá	MABA	- 5.4	49.1	- 2.9
Balsas	MABS	- 7.5	46.0	- 6.5
Barreiras	BABR	- 12.2	45.0	- 11.2
Montes Claros	MGMC	- 16.7	43.9	- 15.7
Governador Valadares	GVA1	- 18.9	42	- 18.8
Viçosa	VICO	- 20.8	42.9	- 19.4
Campos dos Goytacazes	RJCG	- 21.8	41.3	- 21.1
Setor oeste brasileiro				
São G. da Cachoeira	SAGA	- 0.2	67.1	9.5
Coari	AMCO	- 4.9	65.3	4.8
Porto Velho	POVE	- 8.7	63.9	0.9
Ji-Paraná	ROJI	- 10.9	62.0	- 1.7
Colorado d'Oeste	ROCD	- 13.1	60.6	- 4.2
Vila B. dá S. Trindade	MTVB	- 15.0	60.0	- 6.1
Cuiabá	CUIB	- 15.6	56.1	- 8.2
Rosana	ROSA	- 22.5	53.0	- 15.4
Chapeco	SCCH	- 27.1	52.6	- 19.0
Porto Alegre	POAL	- 30.1	51.1	- 21.8

Fonte: Autor.

Para melhor compreensão da evolução espaço-temporal das perturbações ionosféricas positivas, a diferença no VTEC entre os dias geomagneticamente perturbados (dias 17 e 18 de janeiro) e o dia calmo (dia 16 de janeiro) é calculada e os resultados são apresentados nas Figuras 38A e 38B. Analisando as mudanças $\Delta VTEC$, ocorridas entre 17 de janeiro às 15:00 UT e 18 de janeiro às 05:00 UT, é possível observar que ambos os setores mostram uma estrutura ondulatória de propagação sobreposta a EIA (Figuras 38A e 38B). No setor leste a EIA é mais ampla em escala de tempo e a propagação da estrutura em forma de onda é mais evidente do que no setor oeste quando comparamos a Figura 38A com a Figura 38B. Isto significa que a TID se propagou em direção ao equador muito mais no setor leste do que no setor oeste.

Figura 38 – Gráficos de contorno para a diferença (Δ VTEC) entre o VTEC registrado em dias perturbados, 17 e 18 de janeiro de 2013, e no dia calmo, 16 de janeiro de 2013, das 15:00 UT às 05:00 UT. **(A)** Gráficos de contorno, para a diferença (Δ VTEC), mostrando a evolução das fases positivas da ionosfera no setor leste brasileiro em função do dip latitude e UT. **(B)** O mesmo que a Figura 34A, mas para o setor oeste brasileiro. A seta preta no painel superior indica o dip latitude da estação de ionossonda de Fortaleza.



Fonte: Autor.

Percebe-se que as variações do Δ VTEC no setor oeste são significativamente diferentes daquelas do setor leste. A primeira perturbação ionosférica positiva do tipo TID atinge o setor leste cerca de 2 horas (~15:00 UT) antes do setor oeste (~17:00 UT). Além disso, os distúrbios no setor leste estão muito mais próximos da região equatorial do que no setor oeste. Isso indica que o distúrbio do tipo TID penetra mais profundamente na região equatorial no setor leste do que no setor oeste. Além disso, no setor leste, após a propagação da TID, a crista da EIA se intensifica novamente. Além do mais, a segunda perturbação positiva ionosférica pode ser observada nas Figuras 37B e 37C comparando os diferentes padrões registrados em torno do equador entre 00:00 e 03:00 UT nos dias 16 e 18 de janeiro. O primeiro é significativamente menor que o segundo, o que é uma indicação clara do surgimento de uma nuvem ionosférica positiva equatorial. Por outro lado, as Figuras 38A e 38B mostram uma segunda perturbação positiva ionosférica (nuvem) na Δ VTEC em 18 de janeiro, perto da região equatorial em ambos os setores. No setor leste, a perturbação positiva se estende de $-5,9^\circ$ a $> 3^\circ$ dip latitude e dura de 00:30 às 01:20 UT. No setor oeste, se estende de $-0,6^\circ$ a $5,3^\circ$ dip latitude e dura de 1:00 às 2:00 UT. As Figuras 35 (painel inferior), 36B, 38A e 38B mostram a mesma nuvem ionosférica positiva movendo-se para oeste a partir de diferentes perspectivas. É notório que, durante a noite, geralmente à deriva do plasma zonal

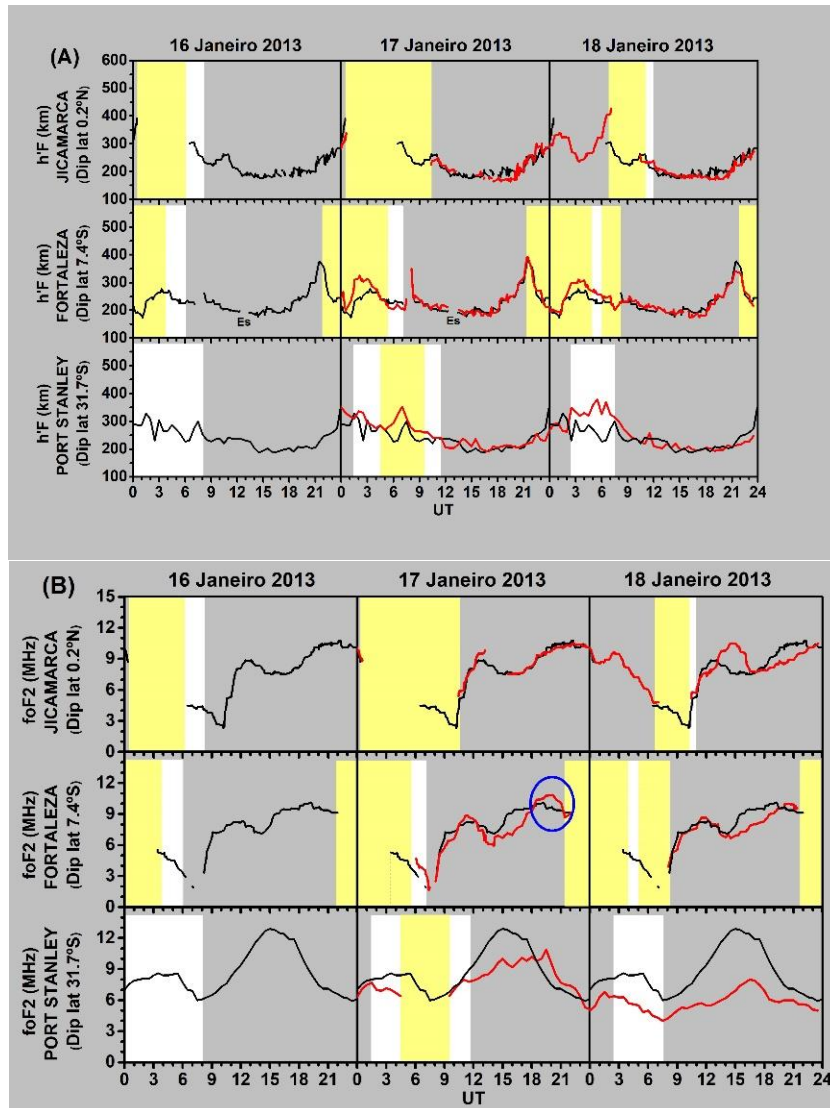
flui para o leste, porém, durante o período perturbado à deriva do plasma zonal pode reverter e fluir para o oeste (GHODPAGE *et al.*, 2018; PAULINO *et al.*, 2010; SAU *et al.*, 2017). Isso pode explicar por que essa nuvem ionosférica positiva se desloca para o oeste durante a noite. No entanto, o mecanismo físico responsável por sua formação e porque ela se torna confinada perto da região equatorial são questões difíceis de explicar. Também a relação entre a nuvem ionosférica positiva e a perturbação do tipo TID observada durante o dia não é clara.

4.1.4 Variações do h'F e foF2 durante período de tempestade da região equatorial até médias latitudes

As variações de dois importantes parâmetros ionosféricos da camada F (h'F e foF2) durante a tempestade geomagnética ocorridos entre 16 e 18 de janeiro de 2013, são apresentados nas Figuras 39A e 39B respectivamente para duas estações equatoriais/baixa latitude (JICA e FORT) e uma estação de média latitude (PSTA), como detalhado na Tabela 12. É importante mencionar que não foi possível utilizar dados de ionossondas da rede de instrumentos da UNIVAP (ver Tabela 7) porém, contamos com colaboradores que forneceram dados de ionossondas, onde foi possível extrair os parâmetros ionosféricos h'F e foF2. As ionossondas utilizada nessa análise são do tipo DIGISSONDA e estão instaladas em Jicamarca, Port Staley e Fortaleza. Os dados foram obtidos através do banco de dados Lowell GIRO Data Center (<http://giro.uml.edu/>), onde são extraídos do observatório de rádio de Jicamarca do Instituto Geofísico del Peru (<http://www.igp.gob.pe/>), Port Stanley do Laboratório SERC Rutherford Appleton e o EMBRACE do Instituto Nacional Brasileiro para Pesquisa Espacial (INPE) (<http://www2.inpe.br/climaespacial/>).

É bem conhecido que o movimento vertical ascendente ou descendente da camada F pode afetar foF2. Isso ocorre porque, em altas altitudes, as taxas de recombinação são menores e o foF2 aumenta ou vice-versa. No entanto, este não é o único mecanismo para aumentar ou diminuir o foF2. Vale ressaltar que o mês de janeiro apresentou uma alta ocorrência de Spread-F e grandes irregularidades ionosféricas (bolhas de plasma) no setor brasileiro (PIMENTA *et al.*, 2001; SAHAI; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, 2000), o que dificulta a validação de foF2 e h'F de um ionograma com a precisão necessária.

Figura 39 – (A) As variações de h'F durante os períodos calmos (curvas negras) e perturbados (curvas vermelhas) de 16 de janeiro de 2013 (dia calmo) e 17 e 18 de janeiro de 2013 (dias perturbados) observadas em Jicamarca (JICA), Fortaleza (FORT) e Port Stanley (PSTA). (B) O mesmo que 39(A), mas para foF2. As bandas branca e amarela indicam Spread-F frequência e range, respectivamente.



Fonte: Autor.

Tabela 12 - Detalhes das 3 estações de ionossondas (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas nesta análise.

Nomes das estações Ionossondas	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Jicamarca	JICA	- 11.5	76.4	0.2
Fortaleza	FORT	- 3.4	38.3	- 7.4
Port Stanley	PSTA	- 51.4	57.5	- 31.7

Fonte: Autor.

Analisando a Figura 39A, observamos que h'F durante o período perturbado não apresenta diferenças significativas quando comparado com o período calmo. As variações de foF2 na Figura 39B indicam a presença de uma perturbação ionosférica negativa durante a tempestade geomagnética. Como a TID não atingiu a costa sul do Brasil (entre -35° de latitude e 305° de longitude), que está alinhado com a estação de ionossonda de Port Stanley, não esperamos que a TID venha de alta latitude do setor Antártico sul-americano. No entanto, a TID atinge a costa brasileira em baixas latitudes, nas faixas de coordenadas geográficas entre -20° e -25° de latitude e 315° e 320° de longitude, sugerindo então que a TID venha da região de alta latitude (Antártica) podendo ser do lado Africano. Por outro lado, uma comparação entre o Δ VTEC na Figura 38A (-7,4° dip latitude, como indicado pela seta preta) e foF2 na Figura 39B (Fortaleza, painel do meio), destaca uma correspondência de uma perturbação positiva ionosférica de 19:30 às 22:30 UT (16:30 às 19:30 LT). Portanto, tanto o VTEC quanto o foF2 em Fortaleza mostram um aumento na densidade do plasma. No entanto, este aumento de foF2 é visto sem qualquer perturbação em h'F. Estes resultados suportam a ideia de que a perturbação do tipo TID tipo onda apresentou um reforço após atravessar a crista da EIA.

Devido este segundo evento ionosférico positivo ocorrer durante a noite e as ocorrências de Spread-F não permitirem fazer qualquer tipo de comparações entre condições calmas e perturbadas não foi possível observar a assinatura da nuvem positiva ionosférica nos ionogramas em FORT e JICA (foF2 e h'F).

4.1.5 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 16 e 18 janeiro de 2013

Nesta seção, apresentamos e discutimos duas perturbações ionosféricas positivas que ocorreram durante uma tempestade geomagnética moderada que ocorreu em 17 e 18 de janeiro de 2013. Através de observações de VTEC, h'F e foF2 que foram realizadas em várias estações nas regiões equatoriais e de baixa latitude no Brasil, no Peru, e na estação de médias latitudes em Port Stanley foi possível apresentar os principais resultados deste estudo:

É importante ressaltar que tempestades geomagnéticas moderadas podem perturbar fortemente a evolução espaço-temporal de VTEC e EIA nas regiões equatorial e de baixa latitude. Conseqüentemente, a eletrodinâmica ionosférica, quando comparada com dias calmos, é fortemente perturbada.

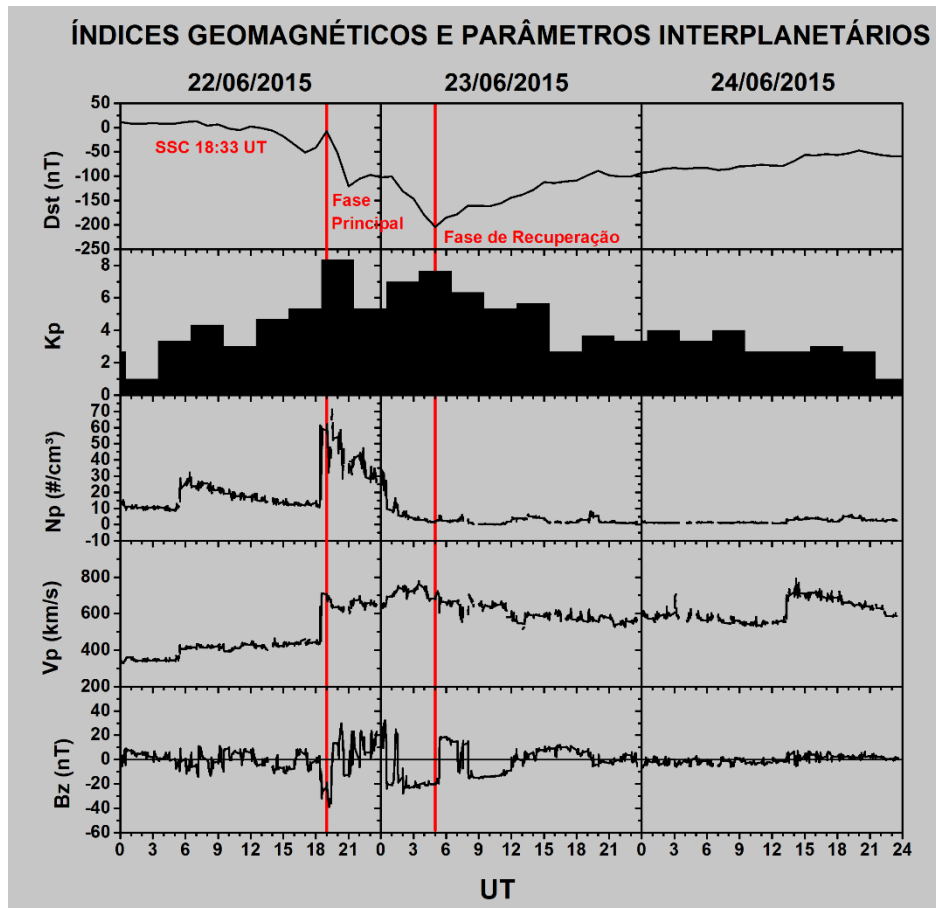
Duas perturbações ionosféricas positivas foram observadas no setor brasileiro. A primeira ocorreu durante o dia no meio da fase principal da tempestade geomagnética (17 de janeiro de 2013) e a segunda foi uma perturbação positiva ionosférica noturna que ocorreu durante a transição entre as fases principal e de recuperação da tempestade. A primeira perturbação ionosférica positiva é do tipo TID e atinge a costa brasileira entre -20° e -25° de latitude e 315° e 320° de longitude. Este é um caso interessante porque a TID alcança a região de baixa latitude durante o dia no momento que a crista da EIA está se intensificando. As observações indicaram que a TID se propagou em direção ao equador e interagiu com a crista da EIA. A segunda perturbação ionosférica positiva observada foi uma nuvem que se desenvolve no setor equatorial do leste brasileiro durante a noite, após as 20:00 LT (23:00 UT), que se propagou para o oeste. Esta nuvem foi confinada na região equatorial e é a primeira vez que este tipo de estrutura foi observado durante a transição entre as fases principal e de recuperação de uma tempestade geomagnética (para maiores informações sobre a análise desta tempestade ver (RIBEIRO *et al.*, 2019).

4.2 Tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015

Análise da tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 de junho de 2015 com o início súbito (SSC) às 18:33 UT. Observamos através da Figura 40 que os índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) foram significativamente perturbados durante a tempestade geomagnética; o índice Dst alcançou o valor mínimo de -204 nT (fase principal iniciada em 23/06/2015 às 05:00 UT), no qual, foi possível classificar a tempestade como intensa. O índice Kp apresentou valores de 8+ em 22/06/2015 entre 19:00 e 21:00 UT e 8- em 23/06/2015 entre 04:00 e 06:00 UT mostrando que o campo geomagnético estava muito perturbado. A velocidade do vento solar durante o período calmo (antes da tempestade geomagnética) era de aproximadamente 270 km/s e aumentou expressivamente para ~ 790 km/s em 23/06/2015 às $\sim 03:00$ UT durante o período perturbado. A densidade de prótons, durante o período perturbado, atingiu valores próximos a 70 partículas por cm^3 em 22/06/2015 às $\sim 19:00$ UT. A componente vertical IMF-Bz oscilou-se entre norte e sul no decorrer do período perturbado. O IMF-Bz inverteu para o sul no início da fase principal, em 22/06/2015 às $\sim 19:00$ UT, ocasionando a tempestade geomagnética. Em seguida, o IMF-Bz oscilou entre norte e sul até o início da fase de recuperação. No decorrer da fase de recuperação, às 12:00 UT (23/06/2015), o IMF-Bz voltou a se comportar semelhante

aos dias calmos. Segundo Astafyeva *et al.* (2018) esta tempestade é a segunda maior tempestade do ciclo solar 24, sendo que a tempestade geomagnética mais intensa ocorreu em 17 de março de 2015 e foi chamada de *St. Patrick's day geomagnetic storm* onde o valor mínimo do índice Dst foi de -223 nT.

Figura 40 – Índices geomagnéticos (Dst e Kp) e parâmetros interplanetários (Np, Vp e Bz) durante 22-24 de junho de 2015. As fases principais e de recuperação são indicadas por linhas vermelhas.



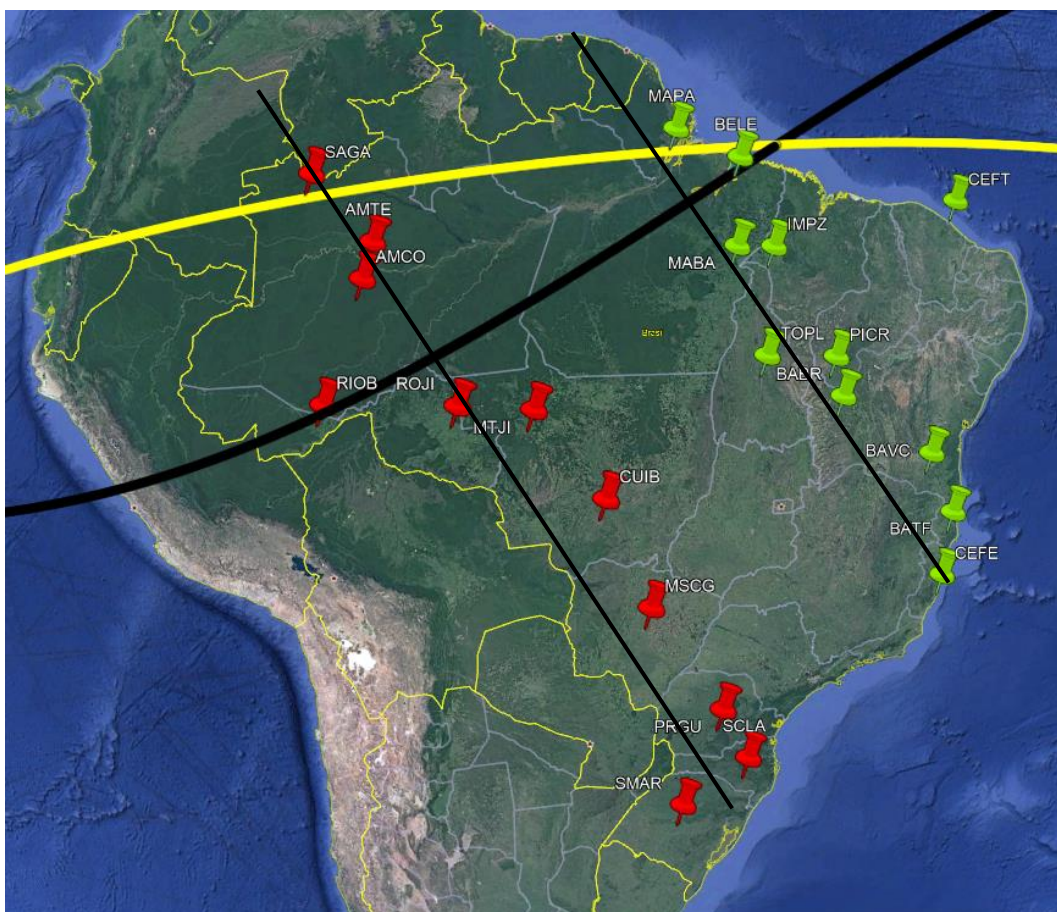
Fonte: Autor.

4.2.1 Análise ionosférica sobre o território brasileiro

A Figura 41 mostra o mapa do território brasileiro com estações GPS-TEC, representadas pelos marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste), utilizadas para gerar gráficos de linha e assim, analisar o comportamento ionosférico durante a intensa tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 de junho de 2015. As linhas dos equadores geográfico e geomagnético são indicadas como curvas amarela e preta, respectivamente. A Tabela 13 complementa as informações da Figura 41, apresentando informações das estações

GPS-TEC (nomes das estações, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) que foram utilizadas para analisar a resposta ionosférica no decorrer da tempestade geomagnética em junho de 2015.

Figura 41 – Mapa do território brasileiro com as estações GPS-TEC representadas pelos os marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste) que foram utilizadas para analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente. As estações GPS-TEC são consideradas ao longo das direções perpendiculares ao equador geomagnético (linhas pretas).



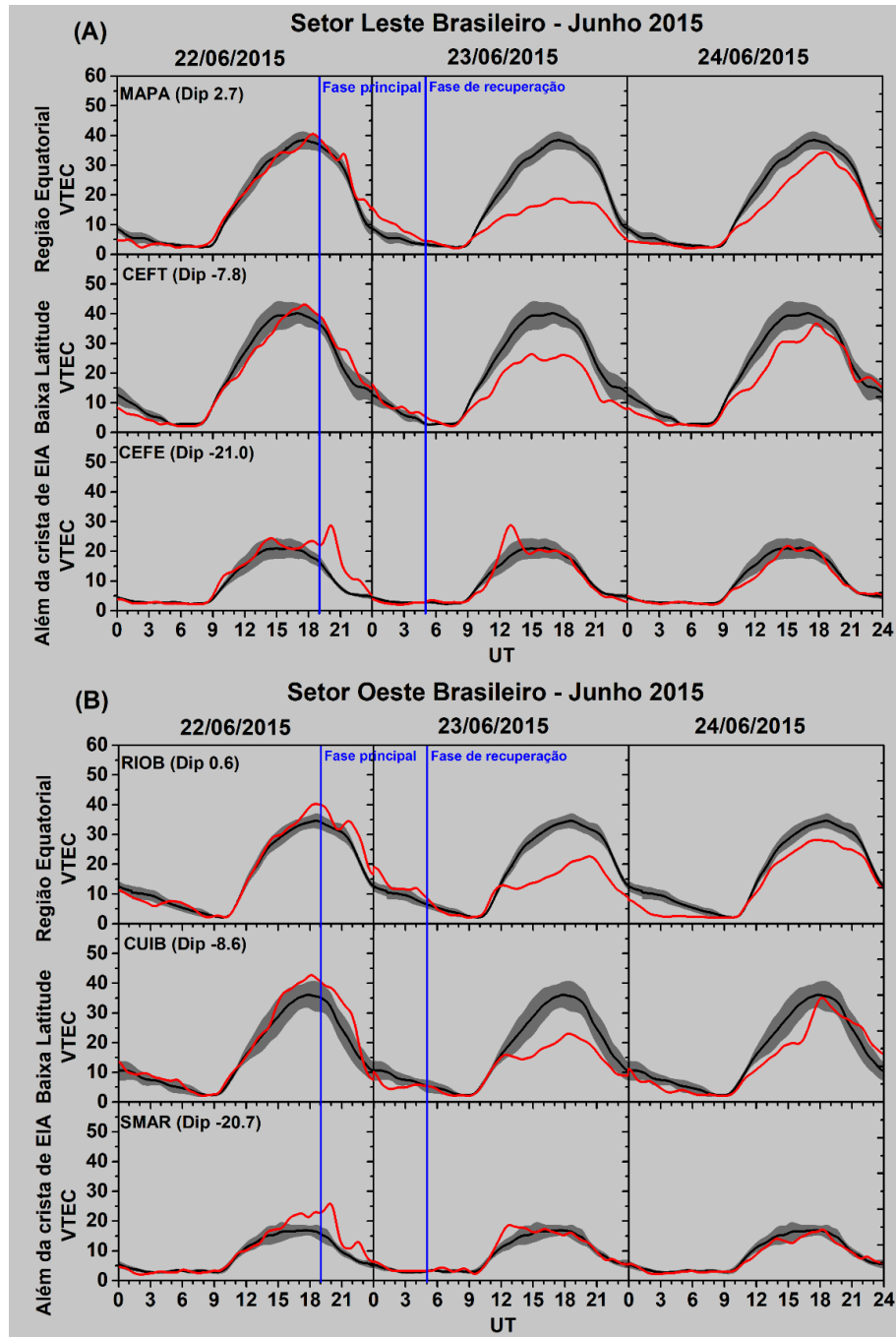
Fonte: Autor.

Tabela 13 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015 nos setores leste e oeste brasileiro.

Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Setor leste brasileiro				
Macapá	MAPA	- 0.1	51.1	2.7
Belém	BELE	- 1.4	48.5	- 0.1
Marabá	MABA	- 5.4	49.1	- 3.3
Imperatriz	IMPZ	- 5.5	47.5	- 4.3
Fortaleza	CEFT	- 3.7	38.5	-7.8
Palmas	TOPL	- 10.2	48.0	- 7.9
Corrente	PICR	- 10.4	45.2	- 10.0
Barreiras	BABR	- 12.2	44.9	- 11.6
Vitória da Conquista	BAVC	- 14.9	40.8	- 16.4
Teixeira de Freitas	BATF	- 17.6	39.8	- 19.2
Vitoria	CEFE	- 20.3	40.3	- 21.0
Setor oeste brasileiro				
São Gabriel da Cachoeira	SAGA	- 0.2	67.1	9.2
Tefé	AMTE	- 3.4	64.7	5.6
Rio Branco	RIOB	- 9.9	67.8	0.6
Ji-Paraná	ROJI	- 10.9	61.9	- 2.1
Juína IFMT	MTJI	- 11.4	58.7	- 3.8
Coari	AMCO	- 4.9	65.3	- 4.5
Cuiabá	CUIB	- 15.6	56.1	- 8.6
Campo Grande	MSCG	- 20.4	54.5	- 13.3
Guarapuava	PRGU	- 25.4	51.5	- 18.7
Santa Maria	SMAR	- 29.7	53.7	- 20.7
Lages	SCLA	-27.8	50.3	- 20.9

Fonte: Autor.

Figura 42 – As variações diurnas do VTEC (linhas sólidas vermelhas) para as estações GSP-TEC nos setores brasileiros Leste (A) e Oeste (B) durante as fases principal e de recuperação. A média dos dias calmos do VTEC e o desvio padrão ($\sigma \pm 1$) são mostrados como linhas sólidas pretas e bandas cinzas, respectivamente. As linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação, respectivamente.



Fonte: Autor.

A resposta ionosférica da camada F durante a fase principal e a fase de recuperação, observada no território brasileiro, tanto para o setor leste como para o oeste, apresentou algumas semelhanças e diferenças. Assim, a fim de destacar tais semelhanças e diferenças,

uma comparação entre dias perturbados (linhas sólidas vermelhas), média dos dias calmos (linhas sólidas pretas) e o desvio-padrão ± 1 (bandas cinzas) são apresentados nas Figuras 42A e 42B. Os dias calmos utilizados para calcular os valores médios calmos e o desvio padrão foram de 10 dias com média de $Dst \pm 30$ nT. Os 10 dias escolhido foram 1 a 5 de junho de 2015 e 1 a 3, 9 a 10 de julho de 2015.

Após o início da fase principal da tempestade (22/06/2015) foi observado perturbações positivas de baixa intensidade (valores do dia perturbado próximos a média dos dias calmos) na região equatorial e na região de baixas latitudes. Esse comportamento é visto tanto no setor leste como no setor oeste. Porém, na região além da crista da EIA, em ambos os setores, é visto perturbações ionosféricas positivas quando comparada com outras regiões. Sendo que, nas estações CEFÉ (setor leste), entre 17:00 e 00:00 UT, e SMAR (setor oeste), entre 15:00 e 00:00 UT, as perturbações ionosféricas positivas foram, respectivamente, $\sim 60\%$ e $\sim 40\%$ maiores em referência a média dos dias calmos (ver Figuras 42A e 42B).

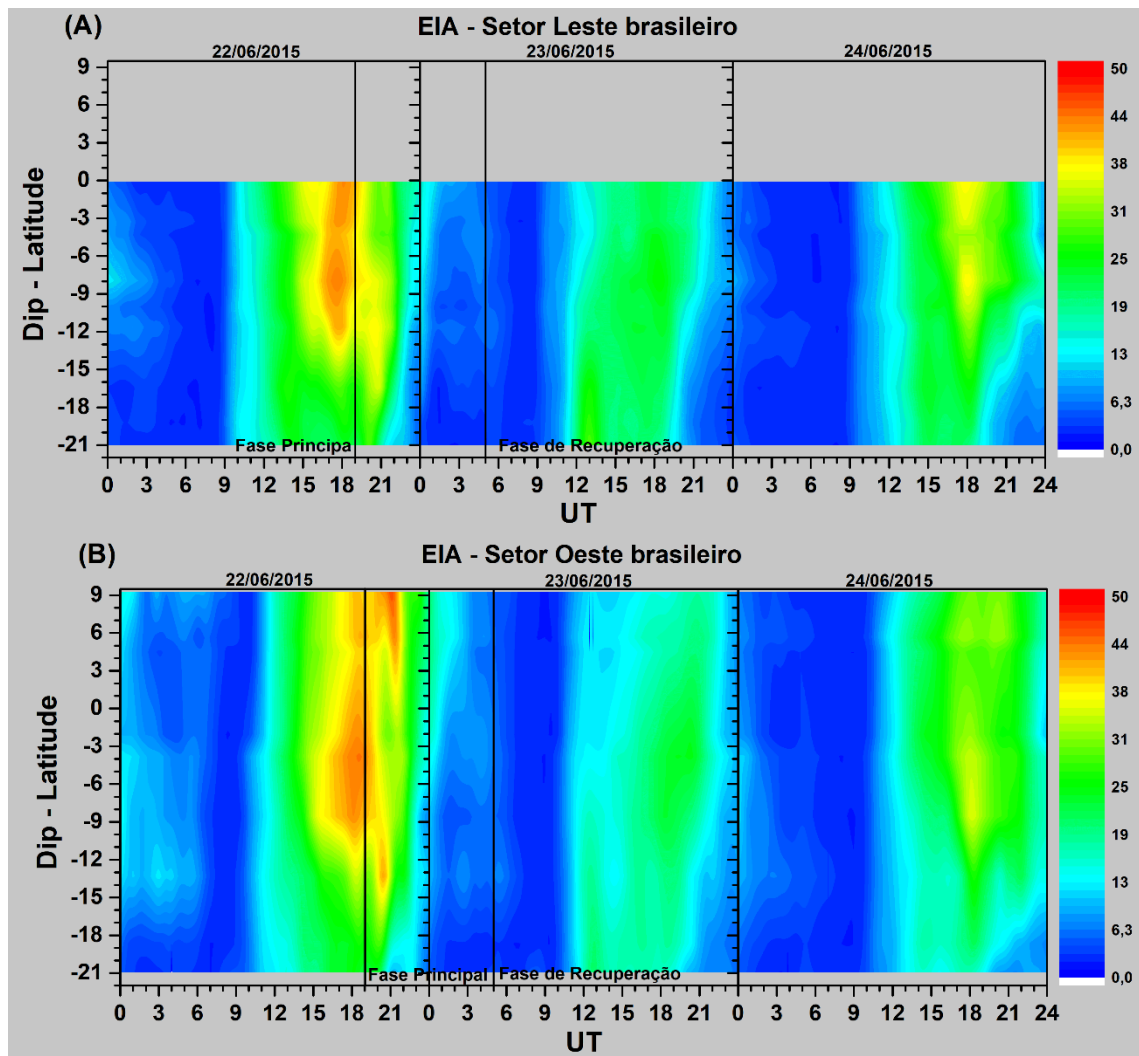
Diferentemente da fase principal, observamos no primeiro dia da fase de recuperação (23/06/2015) fortes perturbações negativas nas estações localizadas na região equatorial e na região de baixa latitude. Na estação MAPA (setor leste/região equatorial), entre 09:00 e 00:00 UT, e RIOB (setor oeste/região equatorial), entre 12:00 e 00:00 UT, as perturbações ionosféricas negativas foram, respectivamente, $\sim 48\%$ e $\sim 42\%$ menores quando comparamos com a média dos dias calmos. Nas estações que estão na região de baixa latitude, CEFT (setor leste), entre 09:00 e 00:00 UT, e CUIB (setor oeste), entre 12:00 e 00:00 UT, as perturbações negativas foram, respectivamente, $\sim 35\%$ e $\sim 37\%$ menores em relação a média dos dias calmos. Nas estações localizadas além da crista da EIA foram observadas perturbações ionosféricas positivas, semelhante a fase principal, porém menos acentuada. Na estação CEFÉ (setor leste), entre 11:00 e 15:00 UT, a perturbação ionosférica positiva foi $\sim 21\%$ maior que a média dos dias calmos e na estação SMAR (setor oeste), entre 11:00 e 15:00 UT, observamos um aumento de $\sim 33\%$ em referência a média dos dias calmos (ver Figuras 42A e 42B).

No segundo dia da fase de recuperação (24/06/2015) continuamos a observar perturbações negativas, porém, mais próxima ao desvio padrão. Esse comportamento do VTEC é visto nos setores leste e oeste. Nota-se na região além da crista da EIA a diminuição total do VTEC, em ambos os setores, quando comparado a outras regiões (Figuras 42A e 42B).

Para investigar o comportamento da EIA sobre o território brasileiro foram analisados dados de VTEC de duas redes de estações GPS-TEC que estão perpendiculares ao equador

geomagnético, no qual, envolve a região equatorial, região de baixa latitude e região além da crista da EIA para os setores leste e oeste. As Figuras 43A e 43B mostram as variações dia a dia da EIA de 22 a 24 de junho de 2015 nos setores leste e oeste, respectivamente.

Figura 43 – Uma rede de estações GPS-TEC ao longo de linhas pretas que são perpendiculares ao equador geomagnético são usadas para investigar a variação diária da EIA, durante o período de 22 a 24 de junho de 2015. **(A)** Variação diurna da EIA no setor leste brasileiro. **(B)** Variação diurna da EIA no setor oeste brasileiro.



Fonte: Autor.

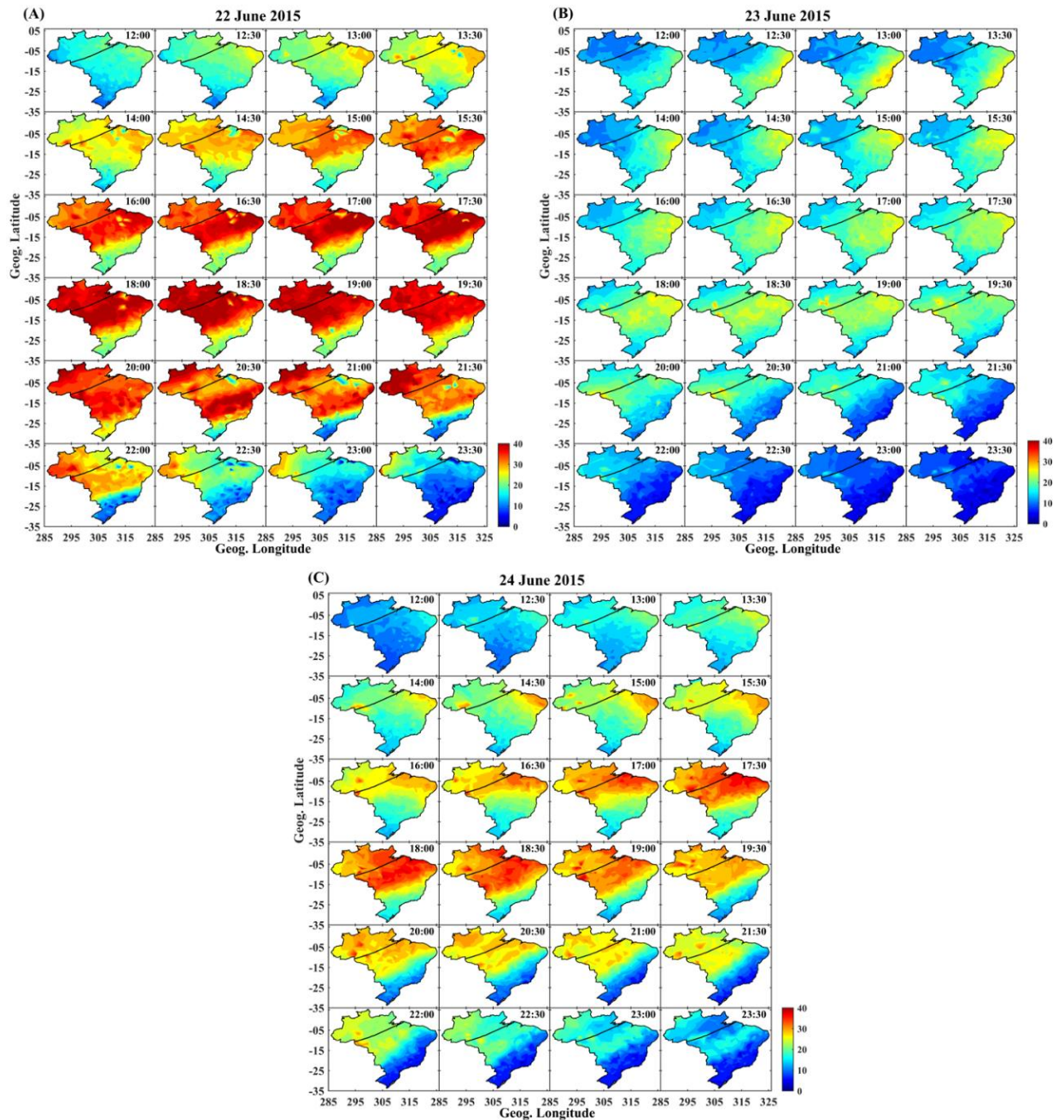
Durante a fase principal, em 22-23, observamos um comportamento incomum nos gráficos da EIA. Este comportamento é caracterizado por uma grande extensão, em relação ao dip latitude, que vai desde a região equatorial até além da crista da EIA. Sendo que no setor leste a EIA se estende de 0° a -18° dip latitude e no setor oeste a EIA se estende de 9° a -18° dip latitude (ver Figuras 43A e 43B). Este comportamento da EIA indica uma intensificação

do efeito fonte que é chamado de efeito super-fonte, que possivelmente está relacionada com a rápida penetração do campo elétrico (PPEF). No entanto, a duração do efeito super-fonte foi apenas durante as horas iniciais da fase principal da tempestade. Em seguida, no primeiro dia da fase de recuperação, observamos uma diminuição significativa da EIA, aparentando haver uma supressão/inibição da EIA. Em seguida, no segundo dia da fase de recuperação (24 de junho), a EIA é restaurada, mas não forte como no dia 22 de junho. O comportamento da EIA, observado durante a tempestade, são semelhantes em ambos os setores, porém, é visível que a EIA estava mais perturbada no setor oeste.

Os distúrbios positivos observados na EIA, nos setores leste e oeste, ocorrem simultaneamente com as perturbações ionosféricas positivas visto nas Figuras 42A e 42B. Além disso é importante mencionar que a EIA diminuiu ao ponto de parecer que foi suprimida durante o primeiro dia da fase de recuperação (ver Figuras 43A e 43B). Este comportamento é sincronizado com as fortes perturbações ionosféricas negativas também presentes nas Figuras 42A e 42B. Também é possível observar na região além da crista da EIA, no setor leste, uma pequena intensificação (cor amarela) que está sincronizado com um pequeno pico observado no primeiro dia da fase de recuperação.

As Figuras 44A, 44B e 44C mostram os mapas regionais do VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o Brasil, obtidos por meio de 116 estações GPS-TEC, que apresentam as mudanças do VTEC durante a fase principal e da fase de recuperação da tempestade no setor brasileiro, nos dias 22, 23 e 24 de junho de 2015 das 12:00 UT às 23:30 UT (resolução de meia hora). Observado as Figuras 44A, 44B e 44C notamos o aumento do VTEC, esse aumento ocorre quase que simultaneamente da região equatorial até além da crista da EIA durante a fase principal, indicando a ocorrência de uma rápida penetração do campo elétrico (PPEF). Em seguida, observamos a sua diminuição significativa no primeiro dia da fase de recuperação. No segundo dia da fase de recuperação observamos a EIA retornando a se comportar como esperado em dias calmos.

Figura 44 – Mapas VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor brasileiro, obtidos através de 116 estações GPS-TEC. Os mapas são de 22 a 23 de junho de 2015, das 12:00 UT às 23:30 UT.



Fonte: Autor.

4.2.2 Análise ionosférica sobre o território africano

Além da análise da resposta ionosférica feita sobre o território brasileiro, durante a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 de junho de 2015, também foi analisada a resposta ionosférica sobre o território africano. A Tabela 14 apresenta detalhes da localização

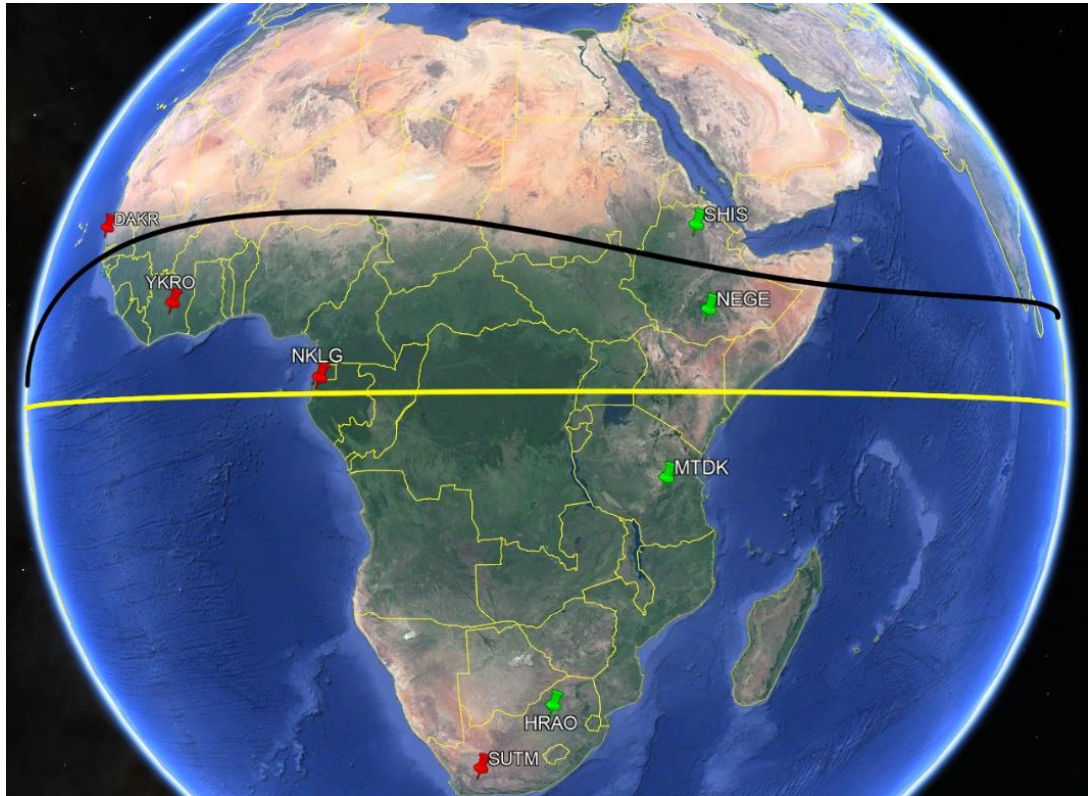
das estações GPS-TEC que foram utilizadas para analisar a tempestade (para visualizar as estações verificar o mapa do território africano nas Figuras 45, 47 e 49).

Tabela 14 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015 nos setores leste e oeste africano.

Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+O)	Dip. Lat. (+N)
Setor leste africano				
Ankober	ANKO	9.6	39.8	2.1
Arusha	ARSH	- 3.4	36.7	- 14.5
Dodoma	DODM	- 6.2	35.7	- 18.3
Ginir	GINR	7.2	40.7	- 0.7
Hartebeesthoek	HRAO	- 25.9	27.7	- 41.9
Kuwait University	KUWT	29.3	47.9	26.6
Mbamba Bay	MBBC	- 11.3	34.8	- 25.0
Eldoret	MOIU	0.3	35.3	- 10.1
Mtandika	MTDK	- 7.5	36.4	- 19.9
Negele	NEGE	5.3	39.6	- 3.1
Shimsheha	SHIS	11.9	38.9	4.9
Matogoro Songea	SNGC	- 10.7	35.7	- 24.1
SolarVillage	SOLA	24.9	46.4	21.2
Tehran	TEHN	35.7	51.3	34.4
Setor oeste africano				
Dakar	DAKR	14.7	- 17.4	4.8
N'Koltang (GABON)	NKLG	0.4	9.7	- 13.9
Sutherland	SUTM	- 32.4	20.8	- 45.7
Yamoussoukro	YKRO	6.9	- 5.2	- 5.6

Fonte: Autor.

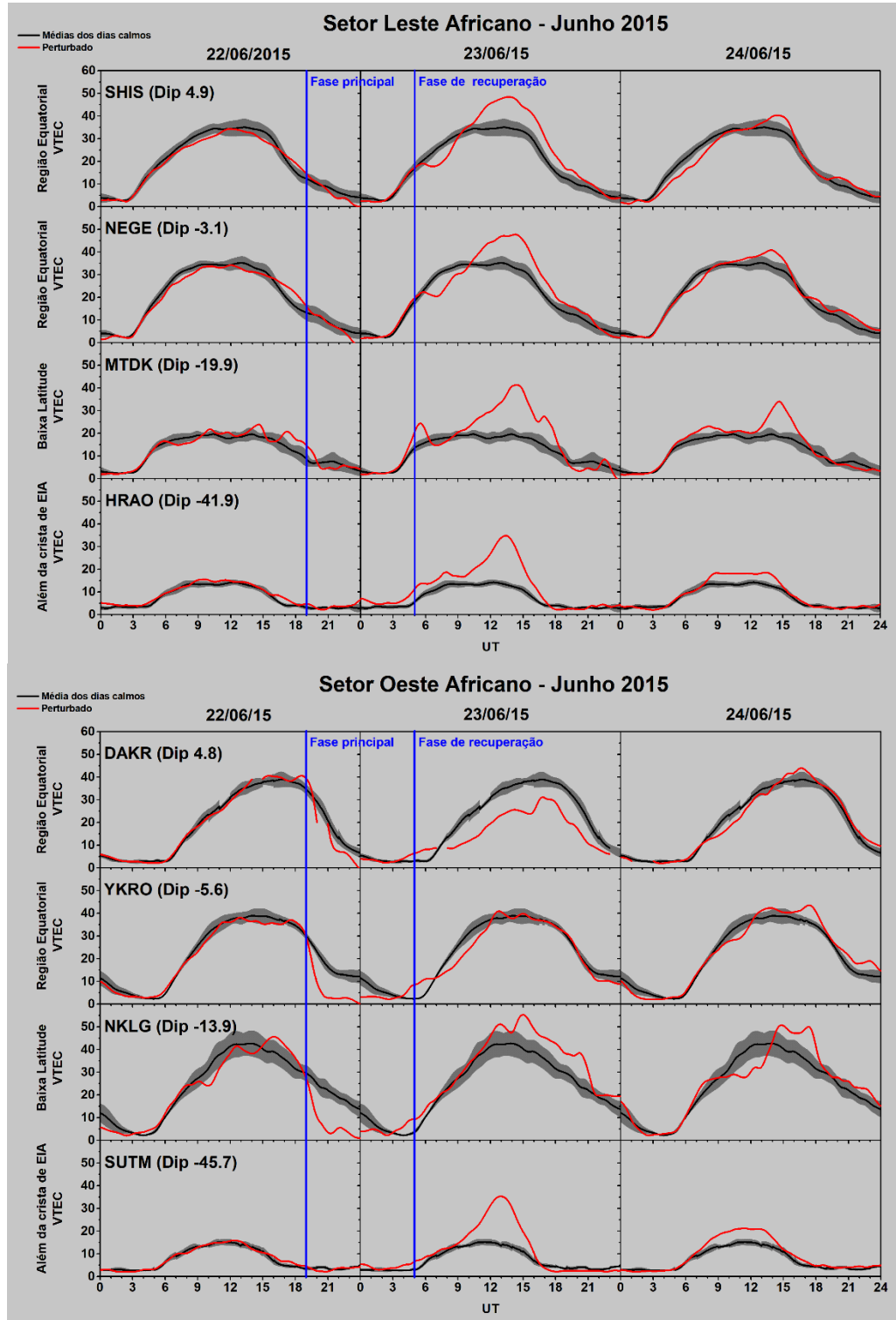
Figura 45 – Mapa do território africano mostrando as estações GPS-TEC representadas pelos marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste) usadas para analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente.



Fonte: Autor.

Mapa do território africano (Figura 45) mostrando as estações GPS-TEC representadas pelos marcadores vermelhos (setor oeste) e marcadores verdes (setor leste) usadas para gerar gráficos de linha e assim, analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em junho de 2015. As linhas dos equadores geográfico e geomagnético são indicadas como curvas amarela e preta, respectivamente.

Figura 46 – As variações diurnas do VTEC (linhas sólidas vermelhas) para as estações nos setores Leste (A) e Oeste (B) africanos durante as fases principal e de recuperação. A média dos dias calmos do VTEC e o desvio padrão ($\sigma \pm 1$) são mostrados como linhas sólidas pretas e bandas cinzas, respectivamente. As linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação, respectivamente.



Fonte: Autor.

As Figuras 46A e 46B são gráficos de linha e mostram a resposta ionosférica da camada F, durante a fase principal e a fase de recuperação, observada no território africano. As linhas sólidas vermelhas representam os dias perturbados, as linhas sólidas pretas representam a média dos dias calmos e as bandas cinzas representam o desvio-padrão ± 1 . Os dias calmos utilizados para calcular os valores médios calmos e o desvio padrão foram de 10 dias com média de Dst ± 30 nT. Os 10 dias escolhido foram 1 a 5 de junho de 2015 e 1 a 3, 9 a 10 de julho de 2015. Para esta análise foram escolhidas 4 estações (sendo 2 para setor leste e 2 para o setor oeste) da região equatorial, no qual 2 estações estão no setor norte e 2 estações estão no setor sul magnético. Também foram escolhidas 2 estações para baixa latitude e 2 estações para região além da crista da EIA. Este critério foi adotado porque o território africano possui uma grande extensão longitudinal e latitudinal.

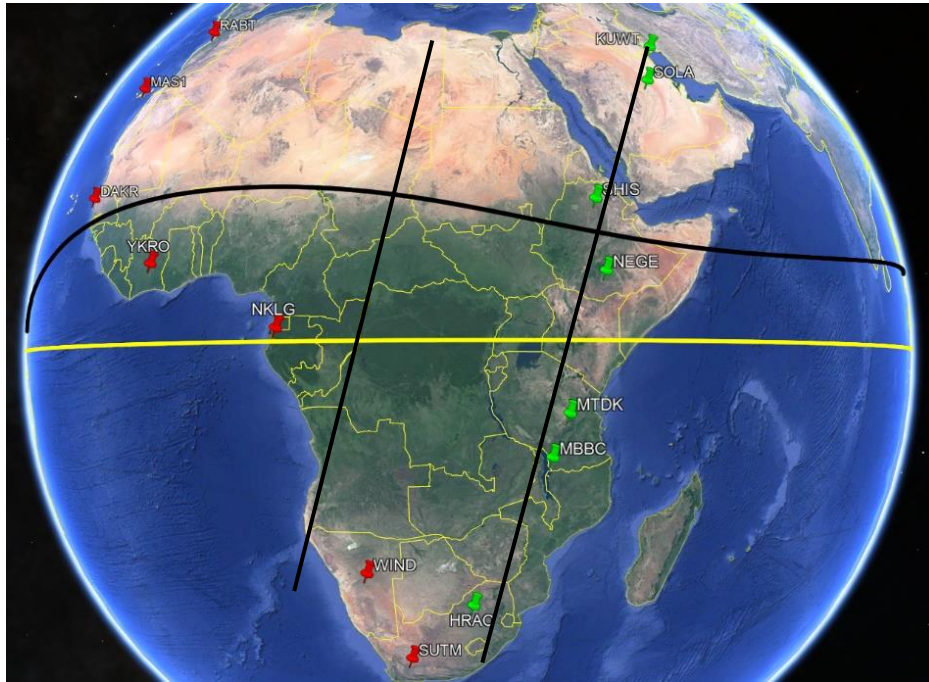
Durante a fase principal da tempestade (22/06/2015) foi observado, no setor oeste, valores negativos de VTEC quando comparamos o período perturbado (linha vermelha) com a média dos dias calmos (linha preta) sendo que, esse comportamento é observado na região equatorial e na região de baixa latitude (ver Figuras 46A e 46B). Nas estações localizadas além da crista da EIA, tanto no setor leste como no setor oeste, o comportamento ionosférico do período perturbado foi próximo a média dos dias calmos. Em detalhes, temos que o período perturbado, na estação DAKR (setor oeste / região equatorial) não apresentou variações significantes quando comparado a média dos dias calmos, porém na estação YKRO (setor oeste / região equatorial), entre 18:00 e 00:00 UT, a diminuição foi de ~45% quando comparamos com a média dos dias calmos. Nas estações localizadas na região de baixa latitude somente na estação NKLG (setor oeste) foi notada perturbação ionosférica negativa, sendo que, entre 18:00 e 00:00 UT a diminuição foi de ~49% em relação à média dos dias calmos. Na estação MTDK (setor leste) o período perturbado se comportou próximo a média dos dias calmos.

Durante o primeiro dia da fase de recuperação (23/06/2015) foi observado, na região equatorial, entre os setores leste e oeste, perturbações ionosféricas negativas e positivas (ver Figuras 46A e 46B) sendo que, no setor leste, nas estações SHIS, entre 05:00 e 23:00 UT, e NEGE, entre 06:00 e 23:00 UT, as perturbações ionosféricas foram, respectivamente, ~18% e ~15% maiores em relação à média dos dias calmos. Nas estações localizadas no setor oeste, DAKR, entre 03:00 e 00:00 UT, e YKRO, entre 03:00 e 12:00 UT, as perturbações negativas foram, respectivamente, ~28% e ~03% menores quando comparamos com a média dos dias calmos. Na região de baixa latitude, nos setores leste e oeste, notamos perturbações

ionosféricas positivas quando comparamos o período perturbado com a média dos dias calmos, sendo que na estação MTDK (leste), entre 05:00 e 23:00 UT, e NKLG (setor oeste), entre 10:00 e 23:00 UT, apresentou respectivamente, um aumento de ~42% e ~23%. Na região além da crista da EIA foram observadas perturbações ionosféricas positivas sendo que nas estações HRAO (setor leste), entre 00:00 e 21:00 UT, e SUTM (setor oeste), entre 09:00 e 19:00 UT, os aumentos foram, respectivamente, de ~69% e ~74% em referência a média dos dias calmos.

No decorrer do segundo dia da fase de recuperação (24/06/2015) observamos que o período perturbado se encontra próximo ao desvio padrão (banda cinza), com fracas perturbações positivas e negativas (ver Figuras 46A e 46B). Na região equatorial, tanto no setor leste como no setor oeste, o comportamento ionosférico do dia perturbado foi próximo a média dos dias calmos. Na região de baixa latitude, em ambos os setores, notamos fracas perturbações ionosféricas positivas quando comparamos ao período dos dias calmos, onde na estação MTDK (leste), entre 06:00 e 18:00 UT, e NKLG (setor oeste), entre 09:00 e 19:00 UT, tivemos um aumento de ~27% e ~03%, respectivamente. Na região além da crista da EIA observamos perturbações ionosféricas positivas nas estações HRAO (setor leste) e SUTM (setor oeste), entre 08:00 e 18:00 UT, com aumentos de ~31% e ~36%, respectivamente, em referência a média dos dias calmos.

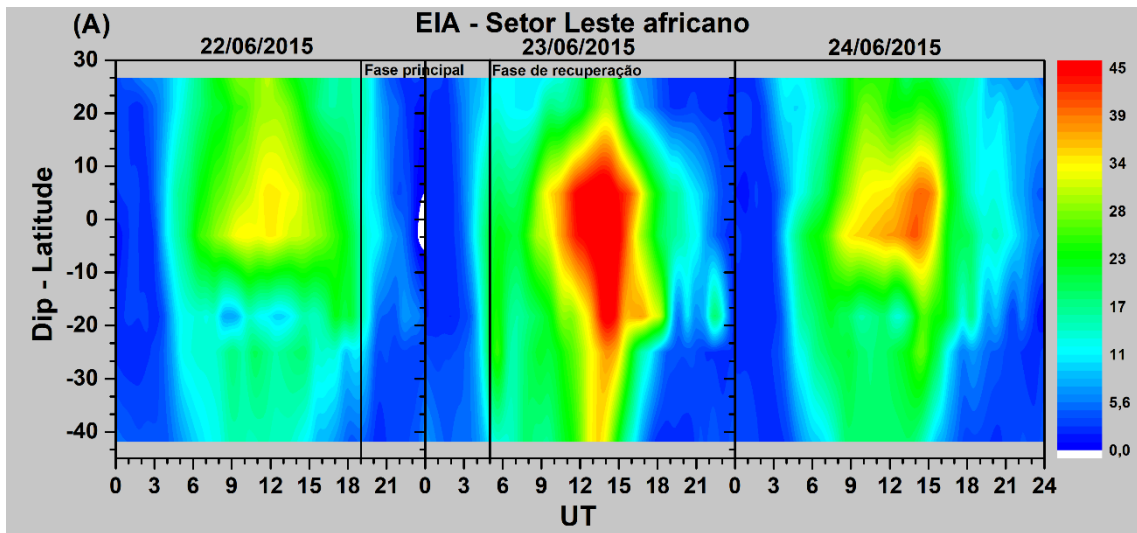
Figura 47 – Mapa mostrando as localizações das estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica latitudinal da EIA nos setores leste (marcadores verdes) e oeste (marcadores vermelhos). As estações GPS-TEC são consideradas ao longo das direções perpendiculares ao equador geomagnético (linhas pretas).



Fonte: Autor.

A Figura 47 mostra as localizações de duas redes de estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica da EIA nos setores leste (marcadores verdes) e oeste (marcadores vermelhos) sobre o território africano durante a tempestade. A metodologia aplicada é a mesma utilizada para estudar a EIA no território brasileiro e é similar à utilizada por Fagundes *et al.* (2016) e Ribeiro *et al.* (2019). Usando as linhas pretas perpendiculares ao equador geomagnético como referência, são escolhidas estações GPS próxima ao meridiano magnético, de tal modo que sejam escolhidas estações que contemplem as regiões equatoriais, baixa latitude e além da crista da EIA, possibilitando investigar e compreender o comportamento da EIA durante o período perturbado (ver Figura 48). Notamos que as estações mais próximas estão muito desalinhadas e não seguem a linha preta perpendicular sendo assim, não é possível analisar e nem confeccionar gráficos que possibilite estudar o comportamento da EIA no setor oeste.

Figura 48 – Rede de estações GPS-TEC ao longo de linhas pretas que são perpendiculares ao equador geomagnético são usadas para investigar a variação diária da EIA, durante o período de 22 a 24 de junho de 2015. (A) Variação diurna da EIA no setor leste africano.



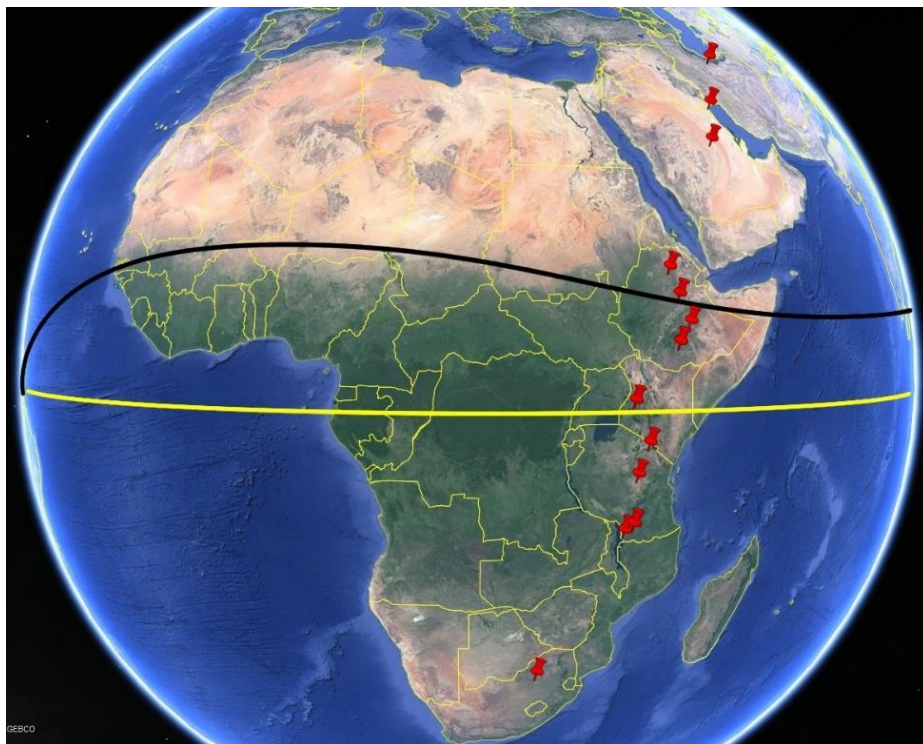
Fonte: Autor.

Durante a fase principal, no setor leste, observamos que a EIA está pouco intensa, sendo possível observar uma fraca intensificação (cor amarela) na região equatorial. No entanto, no decorrer da fase de recuperação observamos uma forte intensificação da EIA (cor vermelha) que se concentra entre $\sim 10^\circ$ e -10° dip latitude. Também é possível observar o aumento da extensão da EIA, que se estende de 20° a -40° , em relação ao dip latitude, não sendo possível observar as cristas da EIA (ver Figura 48). Esse comportamento não é esperado durante a fase de recuperação, uma vez que durante tempestades geomagnéticas, na fase de recuperação, ocorrem alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de O/N_2 , fazendo que a EIA diminua podendo até parecer que foi suprimida. No segundo dia da fase de recuperação a EIA se comporta como esperando em dias calmos.

Devido à falta de estações GPS próximo a linha preta traçada perpendicular ao equador magnético no setor oeste (ver Figura 47) e por não seguir o critério adotado para analisar a EIA durante o período perturbado, não foi utilizado estações do setor oeste. Porém, acrescentamos mais 6 novas estações no setor leste, com um total de 13 estações (ver Figura 49), para aumentamos a confiabilidade da análise do comportamento da EIA durante a tempestade geomagnética. Consequentemente, confeccionamos um novo gráfico de contorno, para o setor leste africano, com o limite superior de 45 TECu (ver Figura 50). A análise anterior usando a Figura 48 mostrou está correta. Sendo possível observar, tanto na Figura 48

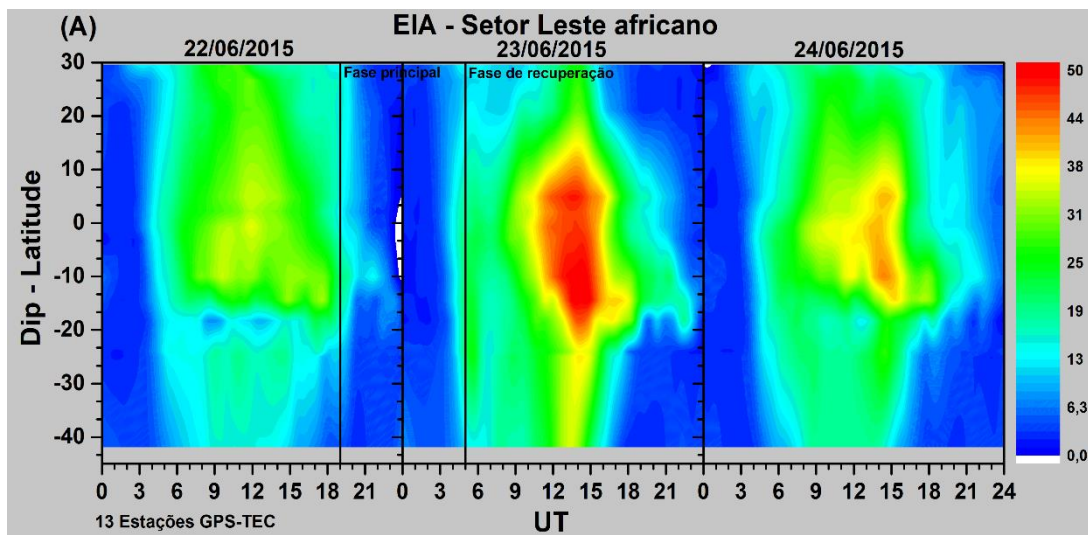
como na Figura 50, no decorrer da fase de recuperação, uma forte intensificação da EIA (cor vermelha) e um aumento da extensão em referência ao dip latitude.

Figura 49 – Mapa do território africano com as estações GPS-TEC utilizadas na análise do comportamento da EIA. O setor leste foi acrescentado 6 estações. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente.



Fonte: Autor.

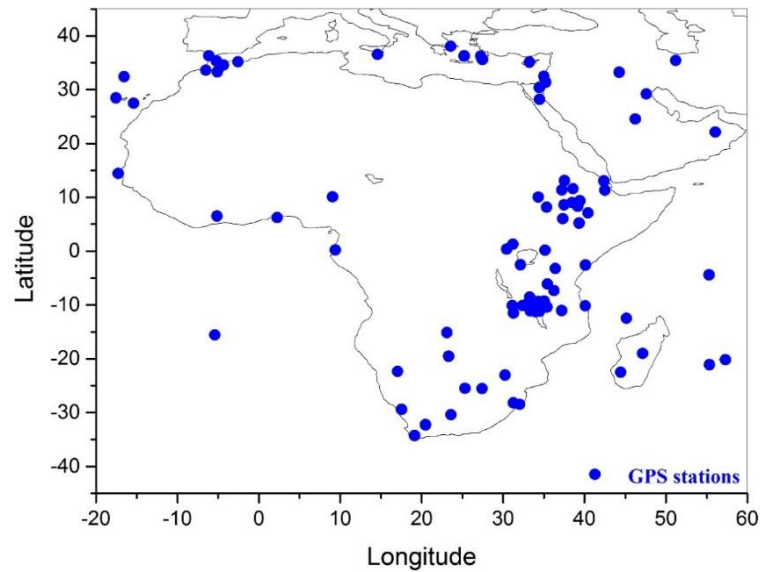
Figura 50 – Variação diurna da EIA entre os dias 22-24 de junho de 2015 para o setor leste africano. TECu máximo igual a 50.



Fonte: Autor.

A Figura 51 mostra um mapa, do território africano, onde estão localizados os receptores GPS disponíveis para análise. Notamos, através da Figura 51, que grande parte da África não é coberta por estações, durante o período estudado (tempestade de junho de 2015). Assim, confeccionar gráficos de contorno podem dar resultados errados tornando as figuras não confiáveis para interpretação do comportamento da camada F.

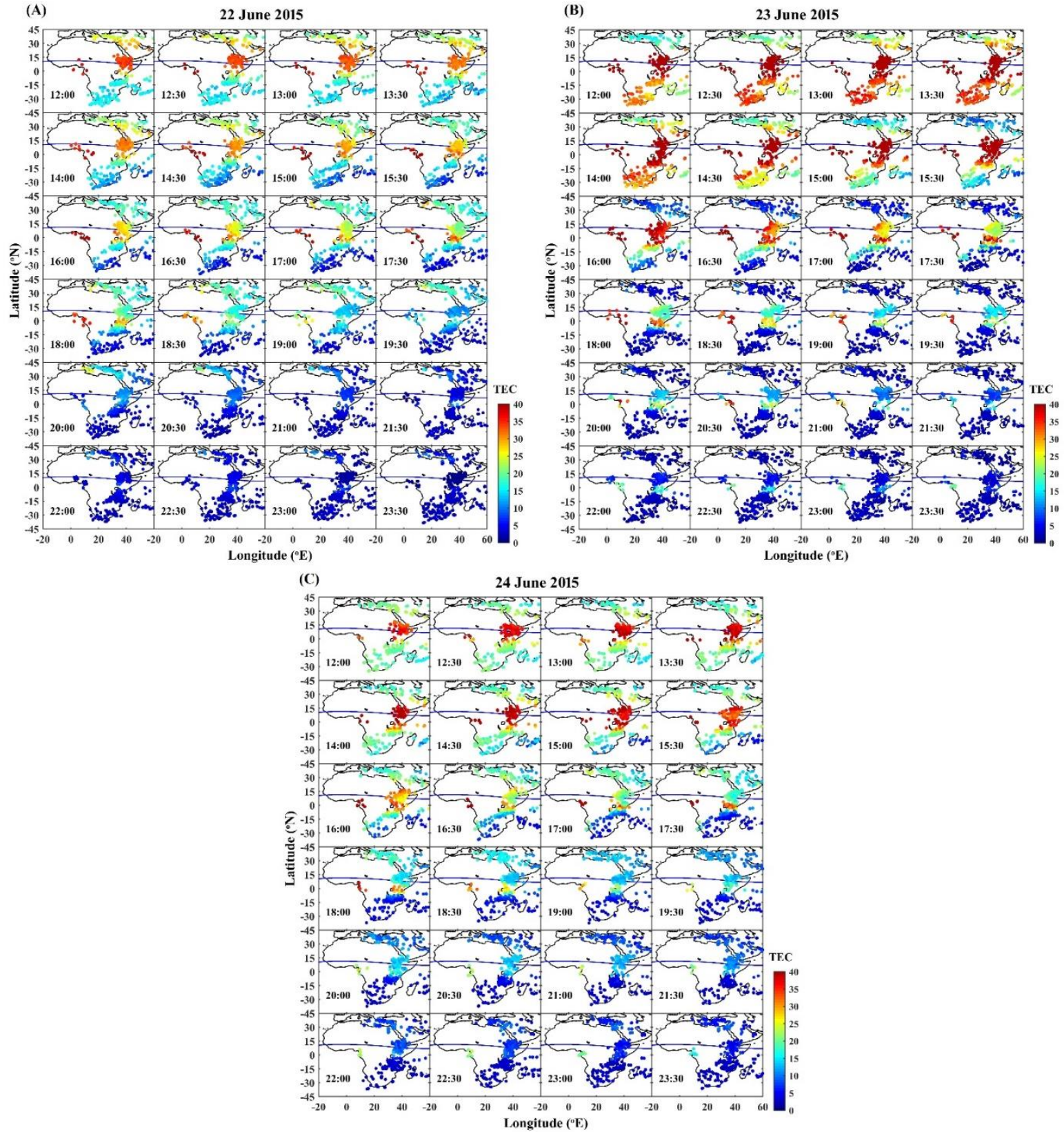
Figura 51 – Mapa do território africano mostrando as estações GPS-TEC representadas pelos os marcadores azuis usadas para analisar o comportamento ionosférico durante a tempestade geomagnética ocorrida em 22-24 de junho de 2015.



Fonte: Autor.

Para resolver a falta de estações no território oeste africano foi confeccionado gráficos de dispersão do TEC onde conseguimos explicar o comportamento do TEC e EIA durante a tempestade geomagnética. A Figura 52 mostra mapas VTEC (gráfico de dispersão do TEC) em função da longitude e latitude geográfica, sobre o setor africano, obtidos através de aproximadamente 86 estações GPS-TEC. Os mapas são de 22 a 24 de junho de 2015, das 12:00 UT às 23:30 UT. Os pontos nos gráficos de dispersão são os locais dos satélites com elevação superior a 20° graus. Quando observamos as Figuras 52A, 52B e 52C notamos o aumento significativo do VTEC durante o primeiro dia da fase de recuperação da tempestade. Esse aumento ocorre, quase que simultaneamente, da região equatorial até além da crista do EIA, sendo mais evidente no setor leste. Durante a fase principal e o segundo dia da fase de recuperação observamos a EIA se comportar como esperado em dias calmos.

Figura 52 - Mapas VTEC (gráfico de dispersão do TEC) em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor africano, obtidos através de 86 estações GPS-TEC. Os mapas são do dia 22 (A), 23 (B) e 24 (C) de junho de 2015, das 12:00 UT às 23:30 UT.



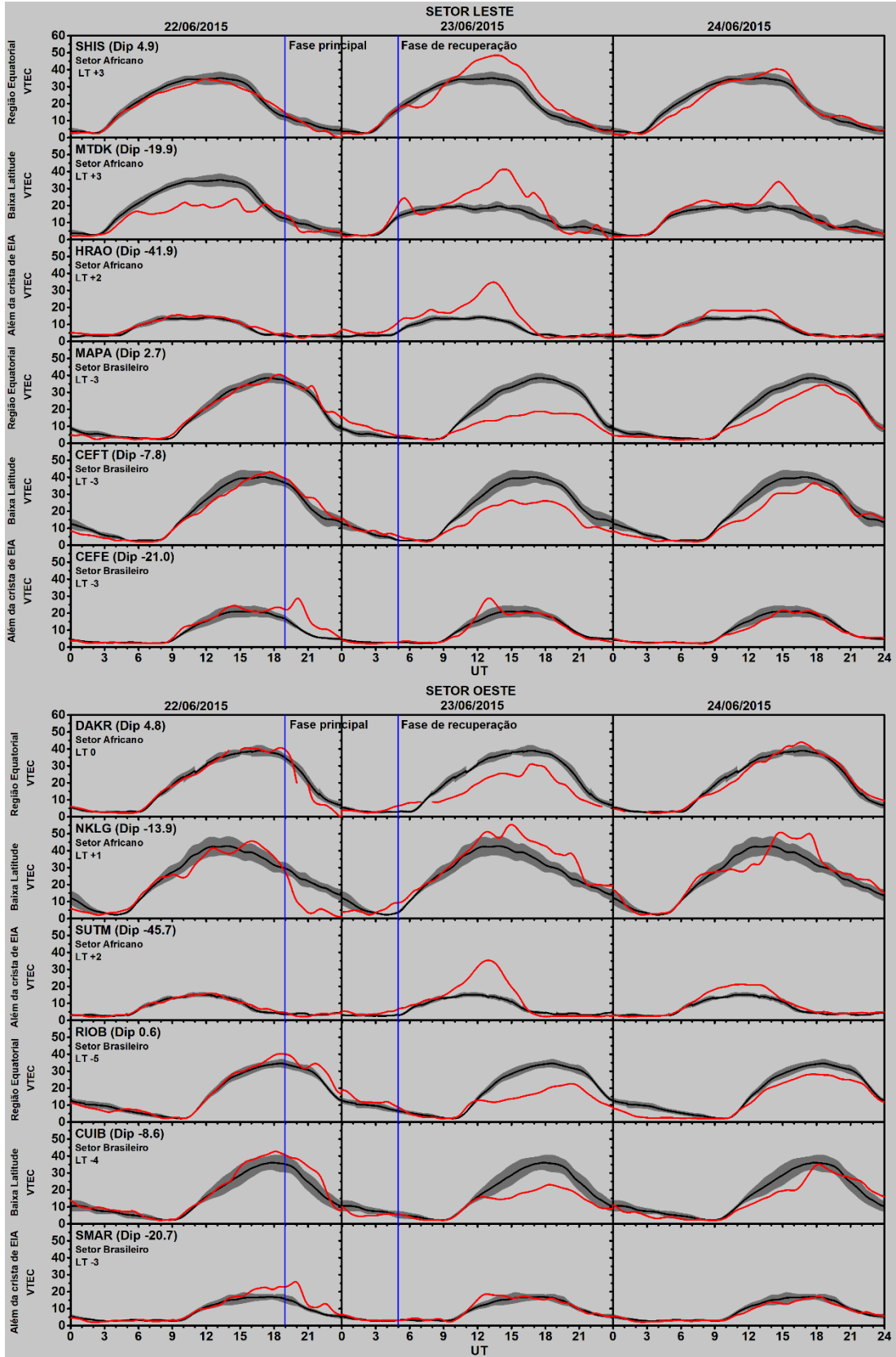
Fonte: Autor.

4.2.3 Comparação entre territórios africanos e brasileiros

As Figuras 53A e 53B mostram gráficos de linha para a região equatorial, baixa latitude e além da crista da EIA, para os setores leste e oeste, dos territórios africanos e brasileiros, respectivamente. Durante somente a fase principal, observamos no território africano, que o período perturbado apresentou um comportamento próximo a média dos dias calmos, exceto na estação NKLG (setor oeste/baixa latitude) onde notamos perturbação ionosférica negativa. Diferente do território africano, o território brasileiro apresentou perturbações ionosféricas positivas em todas as estações durante a fase principal da tempestade. No decorrer do primeiro dia da fase de recuperação notamos no território africano diferenças no comportamento do período perturbado, entre os setores leste e oeste, quando comparamos com o período calmo. Sendo que no setor leste observamos perturbações positivas na região equatorial, baixa latitude e além da crista EIA e no setor oeste observamos perturbações negativas na região equatorial, porém, na região de baixa latitude e além da crista EIA observamos perturbações positivas. No território brasileiro, em ambos os setores, notamos na região equatorial e baixa latitude, perturbações negativas, entretanto, na região além da crista EIA notamos perturbações positivas.

Os diferentes comportamentos observados entre os territórios podem ser explicados devido a diferença de hora local (LT) uma vez que o início da tempestade geomagnética, em relação a universal time (UT), ocorreu às ~18:30 UT. Porém, em relação a LT, a tempestade teve início no período noturno no território africano e no período diurno no território brasileiro. Para o setor leste africano temos $LT = UT + 3h$ para as estações SHIS (região equatorial) e MTDK (região de baixa latitude) e $LT = UT + 2h$ para a estação HRAO (região além da crista da EIA). Para o setor leste brasileiro temos $LT = UT - 3h$ para todas as estações escolhida (MAPA, CEFT e CEFÉ). No setor oeste africano temos $LT = UT$ para a estação DAKR (região equatorial), $LT = UT + 1h$ para a estação NKLG (região de baixa latitude) e $LT = UT + 2h$ para a estação SUTM (região além da crista da EIA). Para o setor oeste brasileiro temos $LT = UT - 5h$ para a estação RIOB (região equatorial), $LT = UT - 4h$ para estação CUIB (região de baixa latitude) e $LT = UT - 3h$ para a estação SMAR (região além da crista da EIA).

Figura 53 – Gráficos de linha dos setores leste africano e brasileiro (A) e oeste africano e brasileiro (B). As linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação.



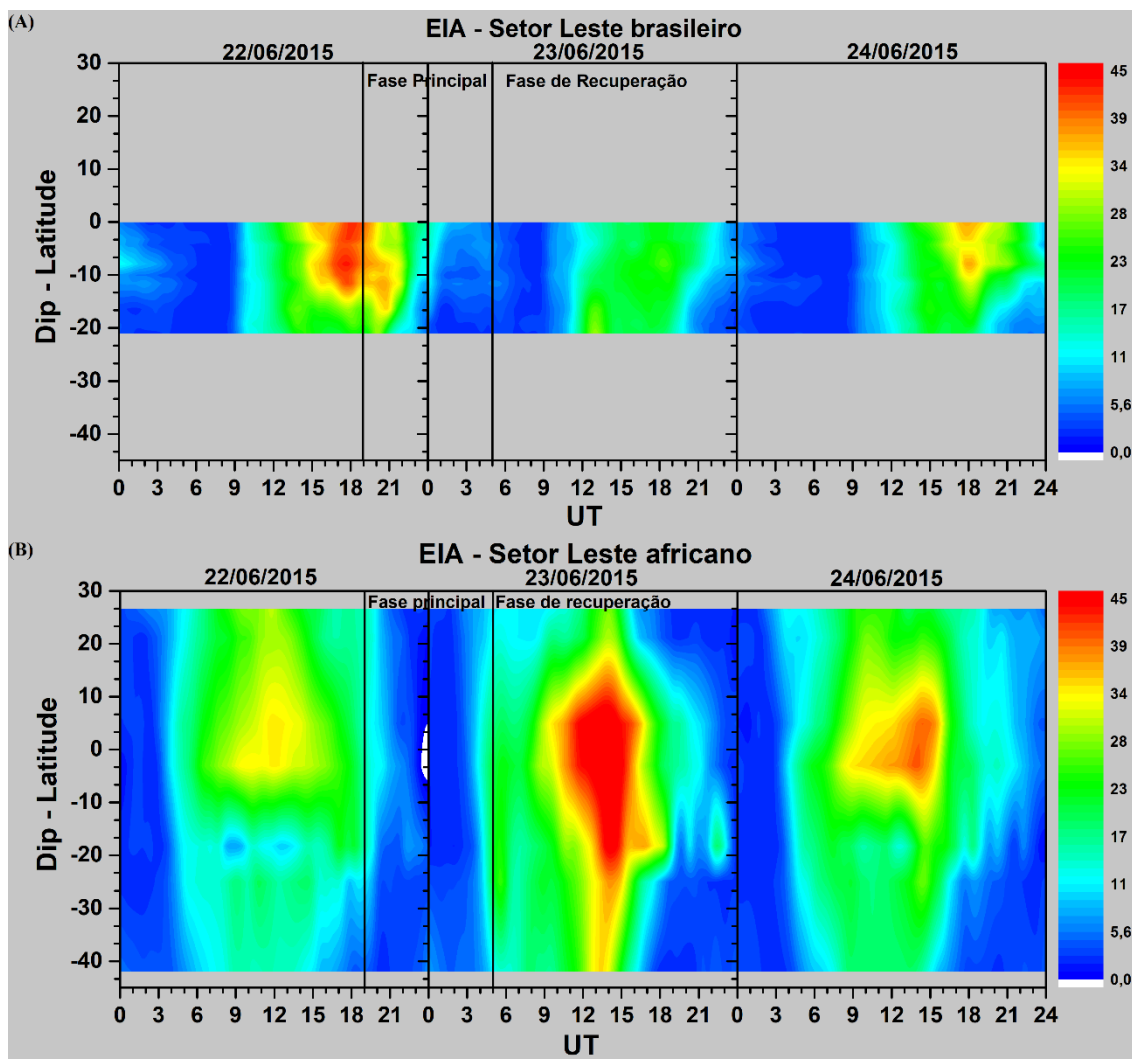
Fonte: Autor.

4.2.4 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 22 e 24 junho de 2015

Nesta análise, usamos dados de GPS-TEC para investigar o comportamento ionosférico durante a intensa tempestade geomagnética que ocorreu em junho de 2015. Destacamos os efeitos ionosféricos, da camada F, nas regiões equatoriais, baixas latitudes e além da crista da EIA nos territórios africanos e brasileiro. Foram utilizadas redes de receptores GPS-TEC com 86 estações, no território africano, e 116 estações, no território brasileiro. A tempestade geomagnética foi considerada intensa e atingiu o valor mínimo do índice Dst de -204 nT. Sendo que o desenvolvimento da tempestade geomagnética impactou a resposta ionosférica, nos territórios africanos e brasileiros, através de mecanismos físicos diferentes como descrito a seguir.

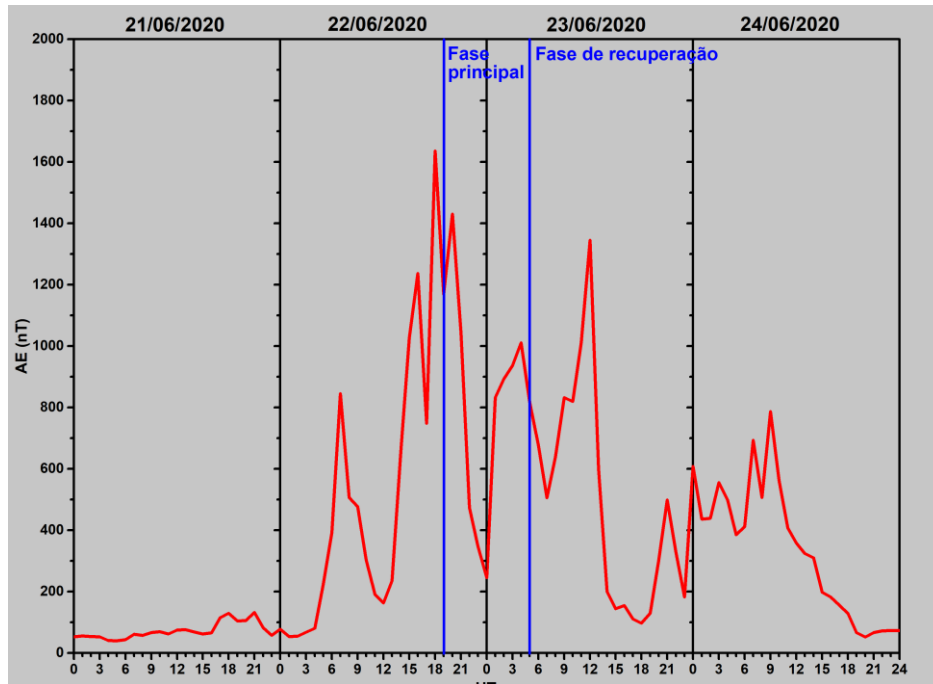
Foi observado no setor leste brasileiro na Figura 54A, durante a fase principal, um comportamento incomum nos gráficos da EIA. Este comportamento é caracterizado por uma grande extensão latitudinal que vai desde a região equatorial até além da crista da EIA indicando uma intensificação do efeito fonte. Esta intensificação do efeito fonte é denominada de super-fonte e pode estar relacionada com a penetração rápida de campo elétrico (PPEF) (ASTAFYEVA *et al.*, 2018; MACHO *et al.*, 2020). A PPEF ocorre devido a interação do vento solar e do campo magnético interplanetário (IMF Bz) com a magnetosfera terrestre. Sempre que o IMF Bz inverte para o sul (observamos essa inversão na Figura 40, onde notamos um comportamento oscilatório de Bz durante a tempestade), um campo elétrico amanhecer-anoitecer é gerado em altas latitudes (veja Figura 55, onde o índice auroral-AE apresentou perturbações durante a fase principal e de recuperação da tempestade), podendo penetrar em latitudes equatoriais, de tal modo que variações súbitas no potencial da calota polar e/ou da corrente de anel causam um aumento temporário no campo elétrico zonal para leste. Com isso, observamos nas Figuras 53A, dia 22/06/2015, a ocorrência do fenômeno que chamamos *undershielding*, produz um aumento na deriva para cima seguido da diminuição de ionização na região equatorial podendo então ser observado uma intensificação da EIA no setor diurno. Durante a fase de recuperação da tempestade, dia 23/06/2015, quando ocorre uma rápida inversão do IMF Bz para o norte (ver Figura 40), observamos o fenômeno que chamamos de *overshielding*. Este fenômeno causa a penetração do campo elétrico noturno-diurno para as latitudes equatoriais resultando na inibição da EIA no lado diurno, como visto na Figura 54A.

Figura 54 – Gráficos de contorno da variação diurna da EIA para os setores leste brasileiro (A) e setor leste africano (B) durante as fases principal e de recuperação. As linhas pretas indicam a fase principal e a fase de recuperação.



Fonte: Autor.

Figura 55 – Índice auroral (AE) durante as fases principal e de recuperação da tempestade. As linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação.



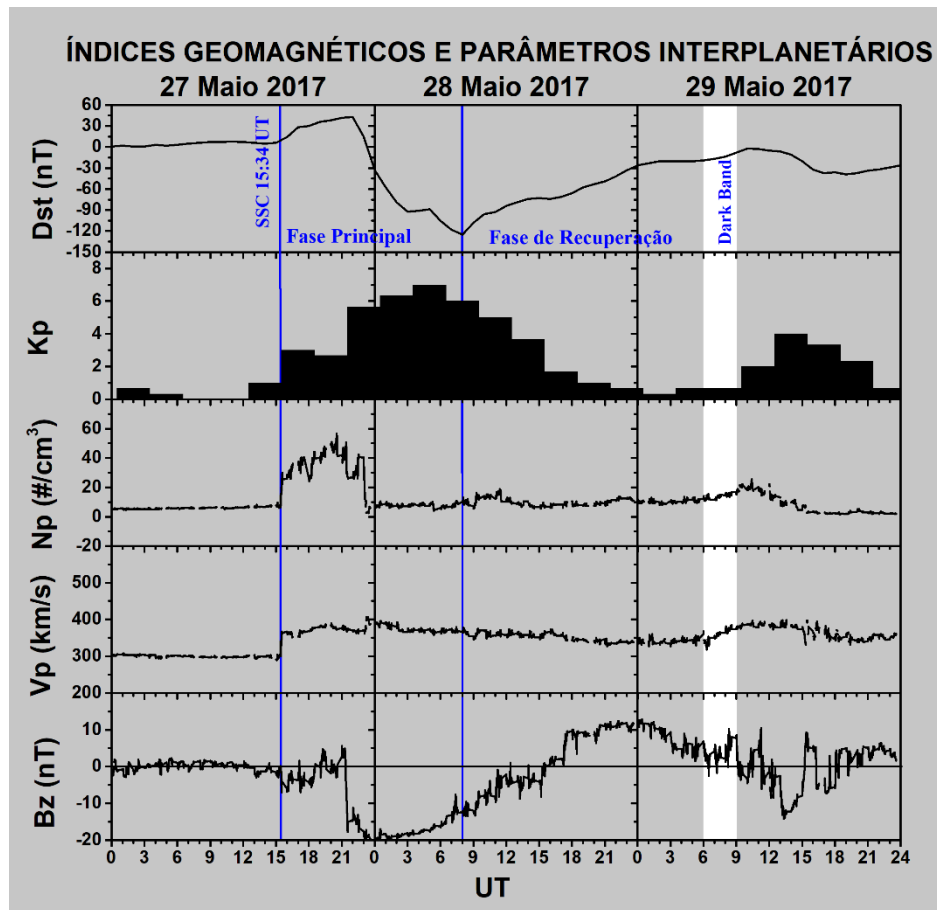
Fonte: Autor.

No setor leste africano, Figura 54B, observamos durante a fase principal (dia 22/06/2015) que a crista da EIA não está visível, sendo possível observar somente uma fraca intensificação (cor amarela) na região equatorial. Na fase de recuperação, dia 23/06/2015, observamos a intensificação da EIA (cor vermelha) e um aumento da extensão, em relação ao dip latitude, não sendo possível observar as cristas da EIA. Provavelmente esse comportamento da anomalia, onde temos uma inibição da EIA na fase principal e uma intensificação da fase de recuperação, ocorreu devido ao dínamo perturbado. Sendo que durante o período noturno a penetração de campos elétricos perturbados não é efetiva. Porém, na fase de recuperação o dínamo perturbado torna-se efetivo em virtude dos ventos termosféricos perturbados gerados durante período de tempestade. O dínamo perturbado atua algumas horas depois do início das tempestades geomagnéticas e quando ocorre injeção de energia na região de altas latitudes (Ver Figura 55) os ventos neutros termosféricos são impulsionados em direção ao equador gerando então o dínamo perturbado. Logo, mudanças no sistema de ventos podem contribuir para geração do dínamo perturbado.

4.3 Tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017

Analizamos a resposta da camada F, no setor brasileiro, durante a intensa tempestade geomagnética, que ocorreu entre 27 e 29 de maio de 2017, utilizando observações de multi-instrumentos sobre o setor brasileiro. Para este estudo utilizamos uma rede de 129 receptores GPS-TEC, 3 ionossondas tipo CADI e 1 imageador all-sky (emissão OI 630 nm). Durante este evento, os índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) foram significativamente perturbados conforme observado na Figura 56. O início súbito (SSC) da tempestade teve início às 15:34 UT no dia 27/05/2017 e no mesmo dia, às 22:00 UT, o Dst atingiu um valor máximo de 43 nT (fase inicial). Em seguida, o Dst começou a diminuir e atingiu seu valor mínimo de -125 nT (fase principal) às 08:00 UT em 28/05/2017 no qual classificamos a tempestade como intensa. O índice Kp alcançou um valor de 6+ entre 04:00 e 06:00 UT em 28/05/2017 onde classificamos a atividade geomagnética como muito perturbado. O vento solar durante o período calmo era de ~300 km/s e aumentou para ~380 km/s às 15:00UT, em 27/05/17, e se manteve próximo a esse valor durante todo o período perturbado. A densidade de prótons atingiu valores máximos próximo a ~60 partículas por cm³, entre 15:00 e 23:00 UT em 27/05/17, após esse período a densidade voltou a se comportar similar ao período calmo. O IMF-Bz inverteu bruscamente para o sul às ~21:00 UT em 27/05/17 e permaneceu durante toda a fase principal e início da fase de recuperação. Após algumas horas na direção sul o IMF-Bz inverteu para o norte, às ~15:00 UT em 28/05/17, permanecendo até as 09:00 UT em 29/05/17. Em seguida o IMF-Bz apresentou um comportamento oscilatório entre norte e sul (ver Figura 56).

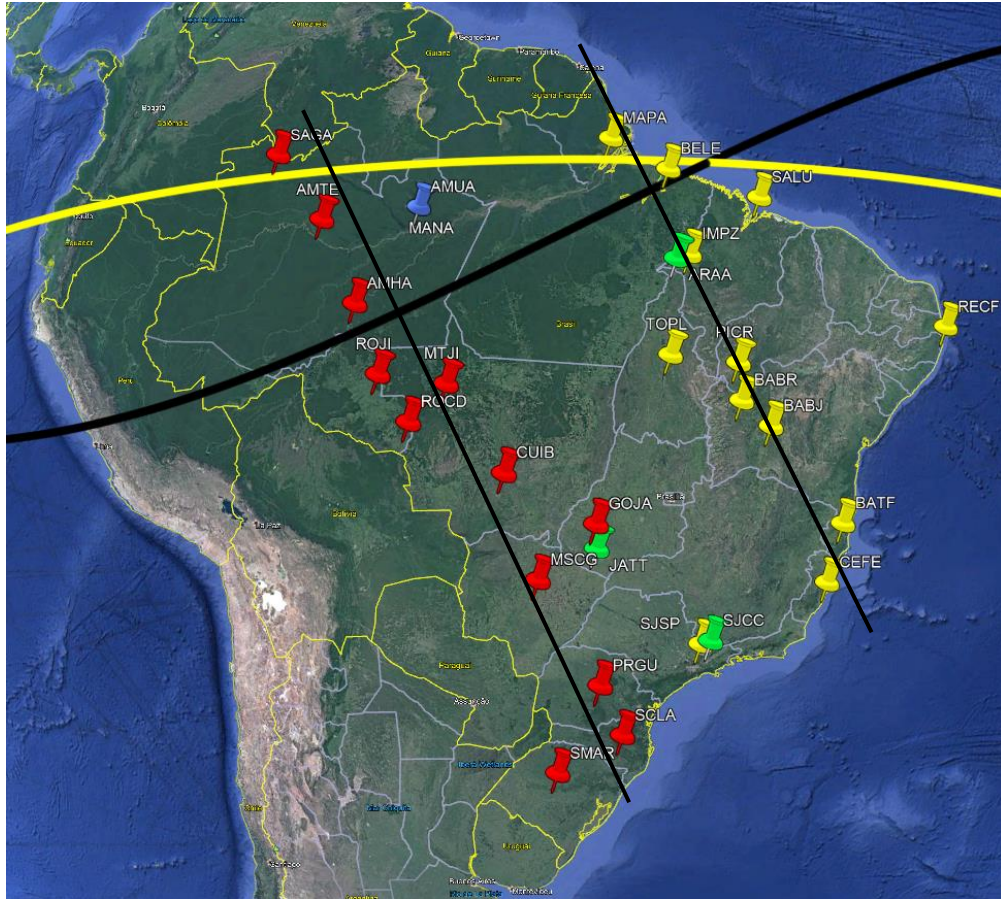
Figura 56 – Índices geomagnéticos (Dst e Kp) e parâmetros interplanetários (Np, Vp e Bz) durante 27 a 29 de maio de 2017. As fases principal e de recuperação são indicadas por linhas azuis. Além disso, o retângulo branco mostra o período em que ocorreu uma dark-band TID.



Fonte: Autor.

A Figura 57 mostra o mapa do território brasileiro com estações GPS-TEC (marcadores vermelhos para setor oeste e marcadores amarelos para setor leste), ionossondas (marcadores verdes) e all-sky (marcador azul) utilizadas para gerar gráficos e assim, analisar o comportamento ionosférico e EIA durante a intensa tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 de maio de 2017. As linhas dos equadores geográfico e geomagnético são indicadas como curvas amarela e preta, respectivamente. As Tabelas 15 e 16 apresentam detalhes das localizações das estações GPS-TEC, all-sky e ionossondas, respectivamente, que foram utilizadas para analisar a resposta da ionosfera no decorrer da intensa tempestade geomagnética.

Figura 57 – Mapa do território brasileiro com as estações GPS-TEC(marcadores vermelhos para setor oeste e marcadores amarelos para setor leste), ionossondas (marcadores verdes) e all-sky (marcador azul) que foram utilizadas para analisar o comportamento ionosférico e EIA durante a tempestade geomagnética ocorrida em 27-29 de maio de 2017. Os equadores geográfico e geomagnético são indicados como curvas amarela e preta, respectivamente. Para analisar EIA estações GPS-TEC são consideradas ao longo das direções perpendiculares ao equador geomagnético (linhas pretas).



Fonte: Autor.

Tabela 15 – Detalhes das estações GPS-TEC (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para estudar a tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017 nos setores leste e oeste brasileiro. * Estações GPS-TEC utilizadas para comparar a resposta ionosférica com estações ionossondas. ** O imageador all-sky também está instalado em Manaus, porém existe diferença na sua localização com o receptor GPS-TEC (coordenadas: lat 2.6°S, lon 60.2°O e Dip lat 38°N).

Nomes das estações GPS	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+W)	Dip. Lat. (+N)
Setor leste brasileiro				
Macapá	MAPA	- 0.1	51.1	2.2
Belém	BELE	- 1.4	48.5	- 0.5
São Luís	SALU	- 1.4	44.2	- 3.9
Imperatriz	IMPZ*	- 5.5	47.5	- 4.7
Palmas	TOPL	- 10.2	48.0	- 8.4
Corrente	PICR	- 10.4	45.2	- 10.5
Barreiras	BABR	- 12.2	44.9	- 12.0
Bom Jesus da Lapa - IFBA	BABJ	- 13.3	43.5	- 13.8
Recife	RECF	- 8.1	34.9	- 14.3
Teixeira de Freitas	BATF	- 17.6	39.8	- 19.7
São José dos Campos	SJSP*	- 23.2	45.9	- 20.4
Vitoria	CEFE	- 20.3	40.3	- 21.5
Setor oeste brasileiro				
São Gabriel da Cachoeira	SAGA	- 0.2	67.1	8.9
Tefé	AMTE	- 3.4	64.7	5.4
Manaus - UEA	AMUA**	- 3.1	60.0	3.8
Humaitá	AMHA	- 7.5	63.0	1.0
Ji-Paraná	ROJI	- 10.9	61.9	- 2.3
Juína IFMT	MTJI	- 11.4	58.7	- 4.1
Colorado d'Oeste	ROCD	- 13.1	60.6	- 4.8
Cuiabá	CUIB	- 15.6	56.1	- 8.6
Jataí	GOJA*	- 17.9	51.7	- 13.0
Campo Grande	MSCG	- 20.4	54.5	- 13.7
Guarapuava	PRGU	- 25.4	51.5	- 18.9
Santa Maria	SMAR	- 29.7	53.7	- 20.7
Lages	SCLA	-27.8	50.3	- 21.3

Fonte: Autor.

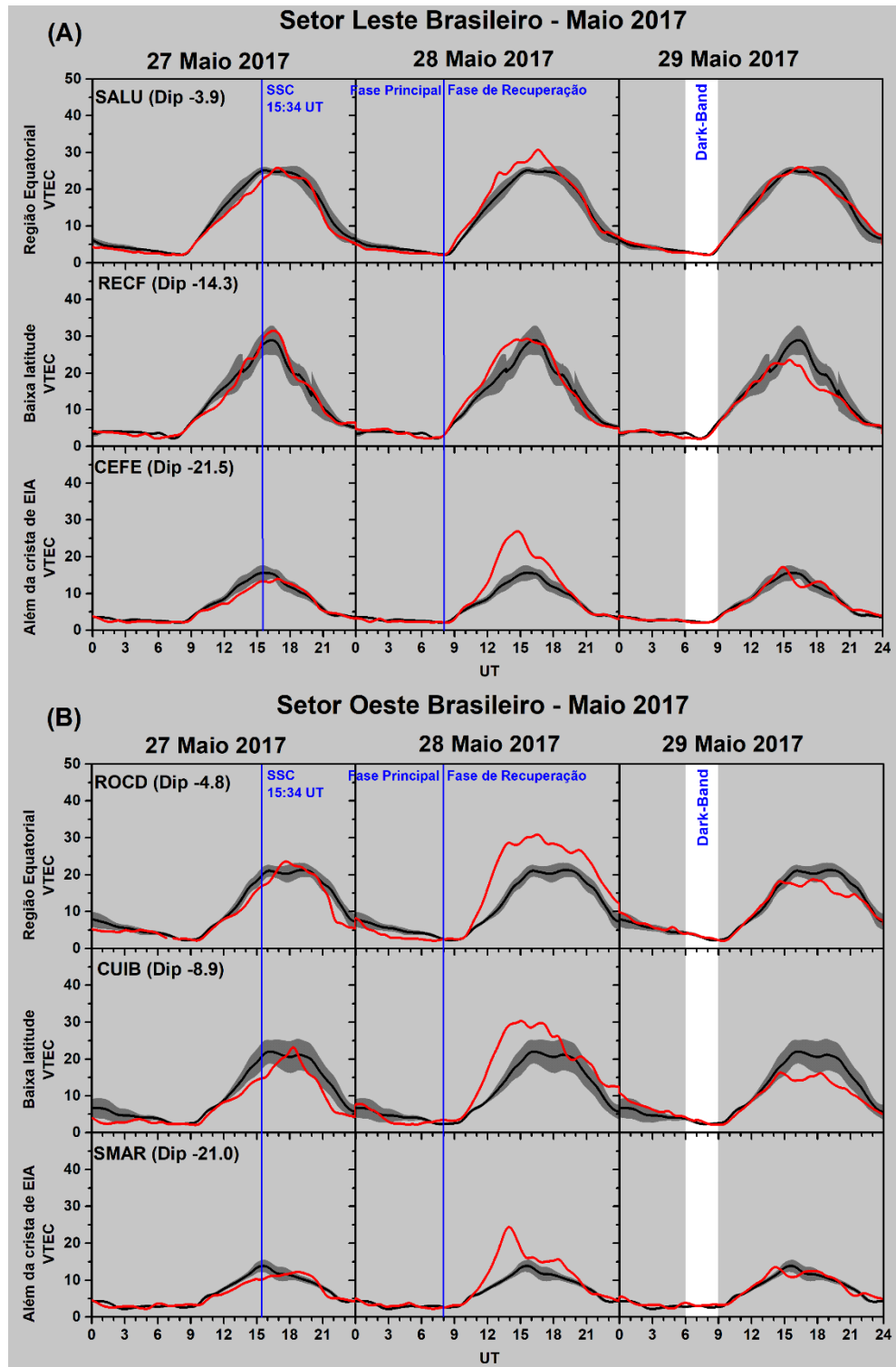
Tabela 16 – Detalhes das 3 estações de ionossondas (nomes, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) usadas para analisar a tempestade.

Nomes das estações Ionossondas	Códigos das estações	Geo. Lat. (+N)	Geo. Lon. (+W)	Dip. Lat. (+N)
Araguatins	ARA	- 5.7	48.1	- 5.0
Jataí	JAT	- 19.0	51.7	- 13.4
São José Campos	SJC	- 23.2	46.0	- 20.4

Fonte: Autor.

A Figura 58 (**A**-setor leste e **B**-setor oeste) apresenta dados de VTEC, em função do tempo (UT), no qual observamos as comparações da média dos dias calmos com os dias perturbados para a região equatorial, baixa latitude sul e além da crista da EIA. As variações diurnas do VTEC são representadas através das linhas sólidas vermelha para as estações GSP-TEC localizadas nos setores leste e oeste brasileiros. A média VTEC dos dias calmos e o desvio padrão ($\sigma \pm 1$) são mostrados como linhas sólidas pretas e bandas cinzas, respectivamente. As linhas azuis indicam o SSC, a fase principal e a fase de recuperação, respectivamente. Além disso, o retângulo branco indica quando a faixa escura (*dark-band*) cruza a estação all-sky em Manaus (MAN). Os dias calmos utilizados para calcular os valores médios e o desvio padrão foram entre os dias 01-10 de maio de 2017 com Dst médio de ± 30 nT.

Figura 58 – As variações diurnas do VTEC, em função do UT, (linhas sólidas vermelhas) para os períodos de 27 a 29 de maio de 2017 para os setores (A) leste e (B) oeste brasileiro. A média dos dias calmos e o desvio padrão ($\sigma \pm 1$) são mostrados como linhas pretas sólidas e bandas cinzas, respectivamente. As linhas azuis indicam o SSC, a fase principal e a fase de recuperação, respectivamente. Além disso, o retângulo branco indica quando a faixa escura que cruza a estação MAN foi observada.



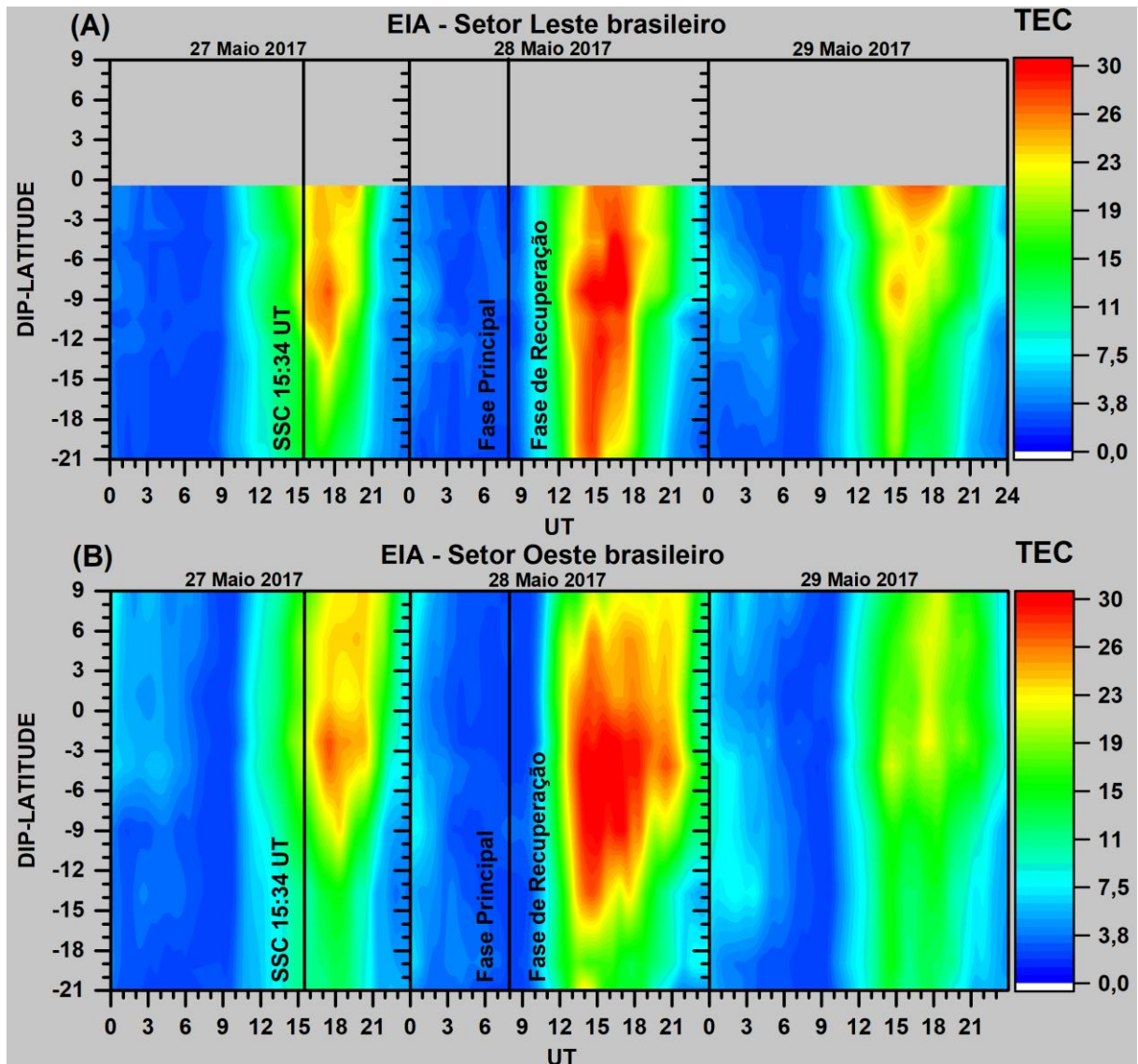
Fonte: Autor.

Nas Figuras 58A e 58B o VTEC, durante a fase principal da tempestade, teve magnitude e variação similares em comparação à média dos dias calmos. Esse comportamento foi observado em todas as regiões e nos setores leste e oeste brasileiro. No entanto, as Figuras 58A e 58B mostraram que o VTEC, durante a fase de recuperação (28/05/2017), sofreu variações que são observadas na região equatorial até a região além da crista da EIA. Durante o primeiro dia da fase de recuperação, observamos fortes distúrbios ionosféricos positivos em todas as estações GPS-TEC analisadas, tanto para o setor leste como para o setor oeste, provavelmente causadas pela tempestade geomagnética. Na região equatorial, estações SALU (setor leste) entre 09:00 e 19:00 UT, e ROCD (setor oeste) entre 10:00 e 00:00 UT, mostraram perturbações ionosféricas positivas ~16% e ~51% maiores em referência a média dos dias calmos, respectivamente. Nas estações que estão na região de baixa latitude, RECF (setor leste) entre 09:00 e 19:00 UT, e CUIB (setor oeste) entre 10:00 e 20:00 UT, as perturbações positivas foram, respectivamente, ~14% e ~44% maiores que a média dos dias calmos. E nas estações localizadas além da crista da EIA, nas estações CEFÉ (setor leste) entre 10:00 e 20:00 UT, e SMAR (setor oeste), entre 11:00 e 21:00 UT as perturbações positivas foram, respectivamente, ~48% e ~45% maiores que a média dos dias calmos (ver Figuras 58A e 58B). As Figuras 58A e 58B mostram que as perturbações ionosféricas positivas, observadas no dia 28/05/2017, possuem um certo sincronismo ocorrendo no mesmo intervalo de tempo (entre 10:00 e 19:00 UT). Possivelmente esse sincronismo é devido a uma rápida penetração do campo elétrico (PPEF) gerada pela intensa tempestade geomagnética.

Em seguida, no segundo dia da fase de recuperação (29/05/2017), observamos que o período perturbado apresentou fracos distúrbios negativos. É importante ressaltar que temos uma diminuição total do VTEC na região além da crista da EIA, em ambos os setores, quando comparamos com a região equatorial e região de baixa latitude.

Para analisar o comportamento da EIA no decorrer do período perturbado foram utilizados dados de VTEC de duas cadeias longitudinais de estações GPS-TEC que estão perpendiculares ao equador geomagnético e que abrangem as regiões equatorial, baixa latitude e além da crista da EIA para os setores leste e oeste brasileiro (ver Figura 57). A Figura 59 (**A**-setor leste e **B**-setor oeste) mostra a evolução da EIA através dos gráficos de VTEC (dip latitude x UT) durante a fase principal e de recuperação da tempestade geomagnética.

Figura 59 – Gráficos de contorno VTEC mostrando a evolução da EIA nos setores (A) leste e (B) oeste brasileiro em função do dip latitude e UT.



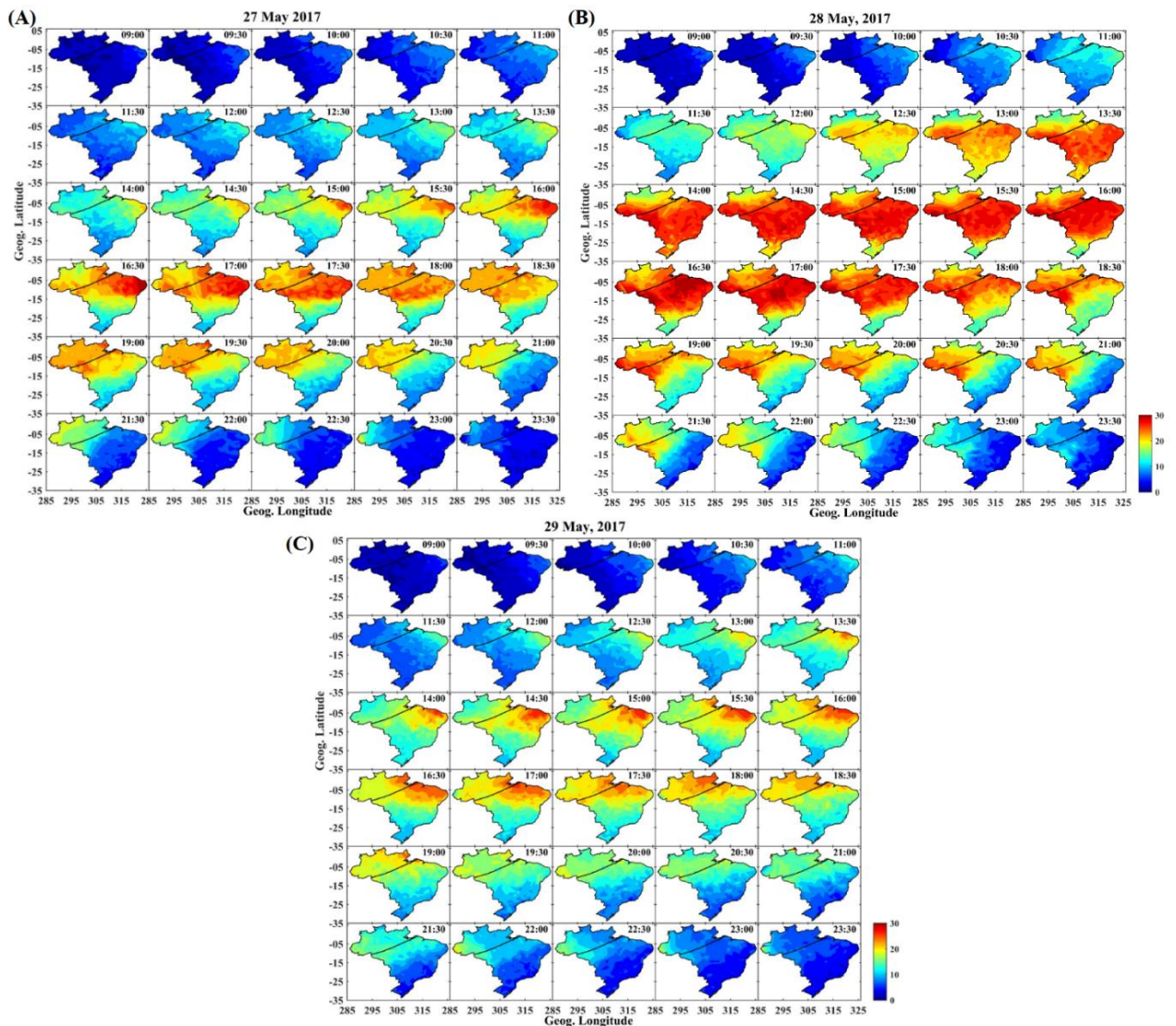
Fonte: Autor.

Durante a fase principal (27/05/2017) observamos que a EIA comportou-se de modo esperado, tanto no setor leste como no setor oeste, onde conseguimos ver a formação da crista sul da EIA. No entanto, durante o primeiro dia da fase de recuperação (28/05/2017), notamos que a EIA apresentou um comportamento anômalo não esperado em ambos os setores. A partir das 12:00 UT, a EIA apresentou um aumento da extensão, em função ao dip latitude, sendo que no setor leste a EIA se estendeu de -1° a -21° e no setor oeste de 8° a -17° sendo possível observar desde a região equatorial até além da crista da EIA. No setor oeste notamos que a EIA é mais ampla em escala de tempo do que no setor leste. Sendo possível observar a EIA entre $\sim 12:00$ e $\sim 22:00$ UT, no setor oeste, e entre $\sim 12:00$ e $\sim 19:00$ UT no setor leste (ver

Figuras 59A e 59B). Provavelmente este comportamento foi causado por uma intensificação do efeito fonte (efeito super-fonte) relacionado a intensa tempestade geomagnética. Após esse comportamento incomum da EIA, no segundo dia da fase de recuperação, foi observado a diminuição da intensidade da EIA tanto no setor leste como no setor oeste. É importante mencionar que os distúrbios observados na EIA (setores leste e oeste) estão sincronizados com as perturbações positivas observadas nas Figuras 58A e 58B.

A Figura 60 mostra os mapas regionais do VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o território brasileiro, obtidos por meio de 129 estações GPS-TEC. Os mapas apresentam as variações do VTEC durante a fase principal e da fase de recuperação da tempestade nos dias 27 (A), 28 (B) e 29 (C) de maio de 2017 das 09:00 UT às 23:30 UT com resolução temporal de meia hora. Esses mapas têm como objetivo facilitar a identificação de estruturas e propagações que ocorrem na ionosfera durante períodos perturbados. Quando observamos a Figura 60A notamos o aumento do VTEC iniciando no setor leste às 12:00 UT ocorrendo primeiramente na região de baixa latitude. Esse comportamento é esperado e acontece devido ao nascer do sol. O aumento do VTEC, na Figura 60B entre 13:00 e 17:00 UT, ocorre quase que ao mesmo tempo desde a região equatorial até além da crista da EIA. Esse comportamento indica a ocorrência de uma rápida penetração do campo elétrico (PPEF) e possivelmente foi causado pela intensa tempestade geomagnética. Em seguida, no segundo dia da fase de recuperação (Figura 60C), observamos a diminuição do VTEC em comparação aos dias 27 e 28 de maio de 2017.

Figura 60 – Mapas VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor brasileiro, obtidos através de 129 estações GPS-TEC. Os mapas são de 27 (A), 28 (B) e 29 (C) de maio de 2017, das 09:00 UT às 23:30 UT.



Fonte: Autor.

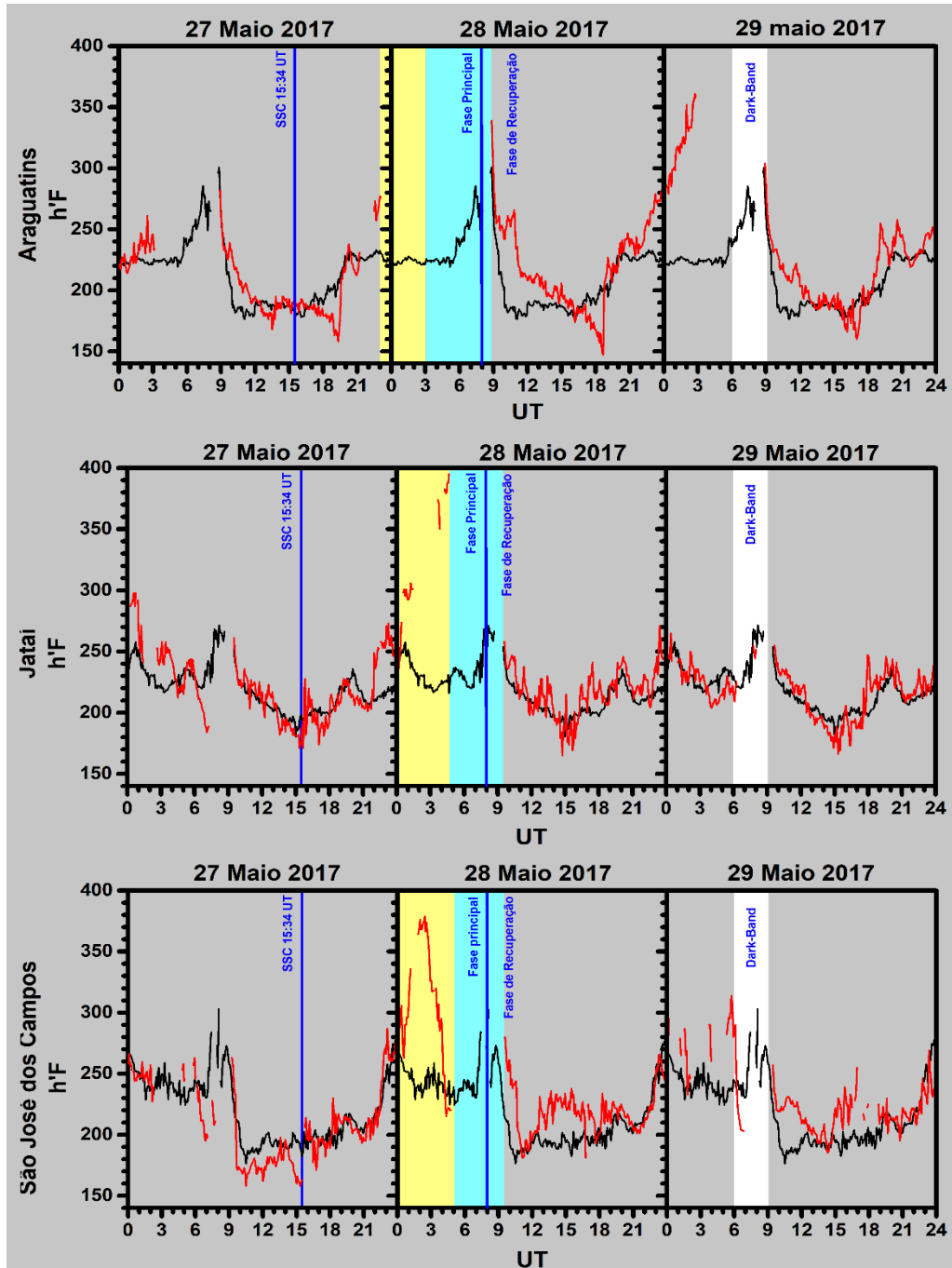
As Figuras 61 e 62 mostram as variações dos parâmetros ionosféricos da camada F em função do UT ($h'F$ e foF_2 , respectivamente) durante a intensa tempestade geomagnética, para três estações que estão localizadas na região equatorial e na região de baixa latitude (Araguatins - ARA, Jataí - JAT e São José dos Campos - SJC). As linhas vermelhas e pretas indicam respectivamente o período perturbado e calmo. As linhas azuis indicam o SSC, a fase principal e a fase de recuperação, respectivamente. Além disso, os retângulos amarelo, azul e branco, nas Figuras 61 e 62, indicam, respectivamente, o período que foi observado spread-F, período que a camada F não pôde ser observada pela ionossonda e período que foi observado

a passagem da dark-band/TID pela estação all-sky MAN. A metodologia aplicada para escolher os dias calmos e assim, calcular os valores médios e realizar comparações entre os períodos perturbado e calmo são as mesmas aplicadas na análise do TEC, feitas na Figura 58. Os dias calmos utilizados foram os dias 01 a 10 de maio de 2017 com Dst médio de ± 30 nT, no qual, consideramos um período geomagneticamente calma.

A Figura 61 mostra que o parâmetro ionosférico $h'F$, durante o período perturbado, apresentou diferenças significativas quando comparado com o período calmo. Notamos que durante a fase principal da tempestade, no dia 28/05/2017 a partir das 00:00 UT, a rápida subida da camada F ($h'F$), em SJC, não acompanhou a média dos dias calmos. Em ARA e JAT, no dia 28/05/2017 inicialmente às 00:00 UT, a camada F também não acompanhou a média dos dias calmos, indicando que houve uma subida da camada F, porém não foi possível confirmar devido a ocorrência de spread-F que impossibilitou a visualização da camada e a redução de dados para a extração de $h'F$ durante o período perturbado. Na estação ARA observamos a ocorrência de spread-F iniciando às ~23:10 UT no dia 27/05/2017 e permanecendo até as ~03:00 UT do dia 28/05/2017. Na estação JAT a ocorrência de spread-F iniciou às ~00:00 UT até as ~04:50 UT do dia 28/05/2017. E em SJC foi observado a ocorrência de spread-F das ~00:00 UT até as 05:15 UT do dia 28/05/2017, porém, diferente das estações ARA e JAT, foi possível identificar a base da camada F nos ionogramas, no qual possibilitou extrair o parâmetro ionosférico $h'F$.

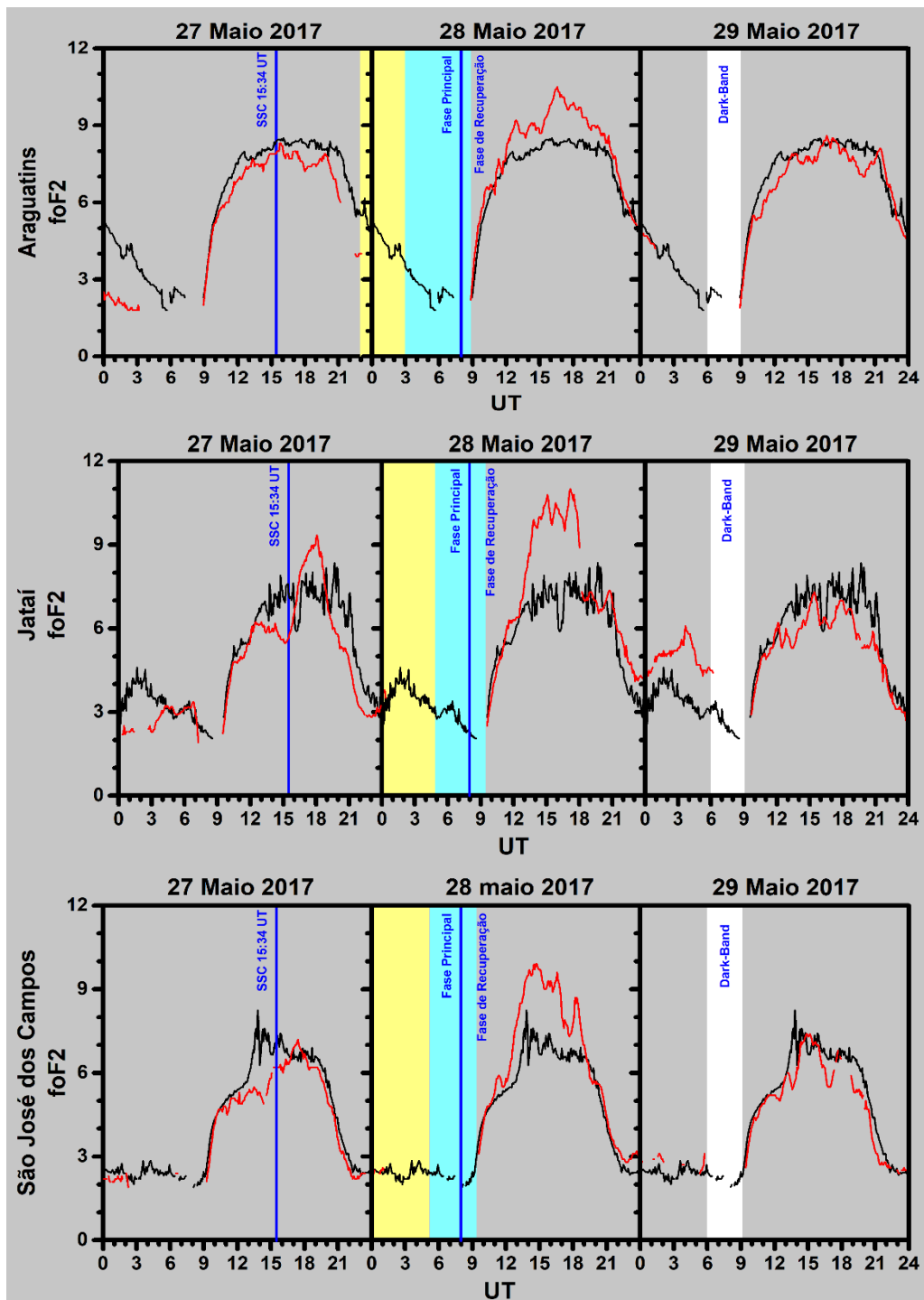
A Figura 62 mostra que durante a fase de recuperação (28/05/2017) o parâmetro ionosférico foF2 sofreu variações ionosféricas positivas observadas nas estações ARA, JAT e SJC. Provavelmente essas perturbações foram causadas pela intensa tempestade geomagnética. Nas estações ARA, entre 10:00 e 23:00 UT, JAT, entre 10:00 e 20:00 UT, e SJC, entre 10:00 e 20:00 UT, as perturbações ionosféricas positivas foram, respectivamente, ~13%, ~24% e ~22% maiores em referência a média dos dias calmos.

Figura 61 – As variações diurnas de $h'F$, em função do UT, para ARA, JAT e SJC durante o período de 27 a 29 de maio de 2017. As linhas vermelhas e pretas indicam o período perturbado e calmo, respectivamente. Além disso, os retângulos amarelo, azul e branco indicam, respectivamente, o período que foi observado spread-F, período que a camada F não pôde ser observada pela ionossonda e período que foi observado a passagem da dark-band/TID pela estação all-sky MAN.



Fonte: Autor.

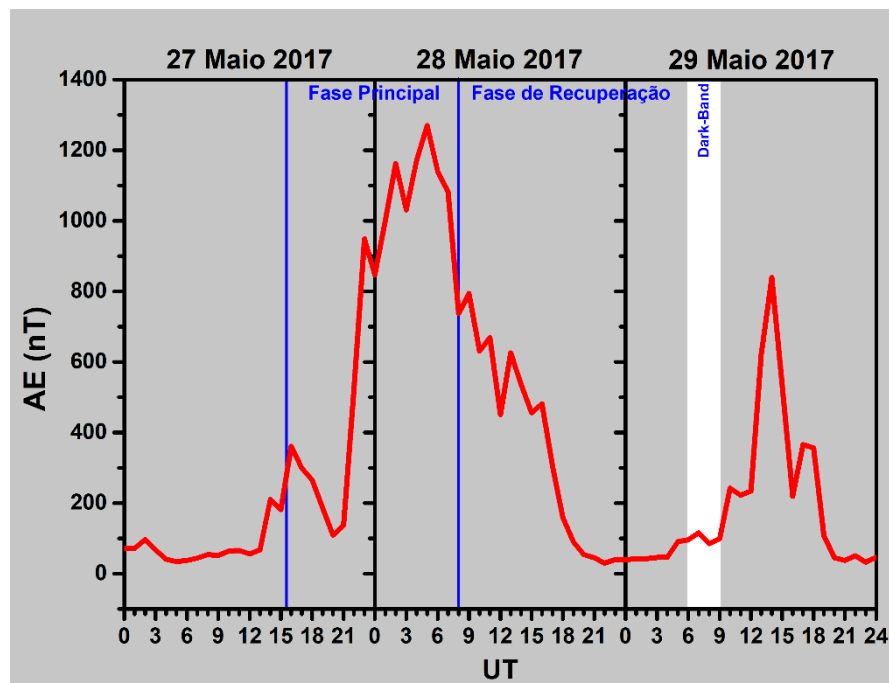
Figura 62 – As variações diurnas de foF2, em função do UT, para ARA, JAT e SJC durante o período de 27 a 29 de maio de 2017. As linhas vermelhas e pretas indicam o período perturbado e calmo, respectivamente. Além disso, os retângulos amarelo, azul e branco indicam, respectivamente, o período que foi observado spread-F, período que a camada F não pôde ser observada pela ionossonda e período que foi observado a passagem da dark-band/TID pela estação all-sky MAN.



Fonte: Autor.

A Figura 63 mostra o índice auroral (AE) durante as fases principal e de recuperação da tempestade entre os dias 27-29 de maio de 2017. A linha vermelha indica o índice AE e as linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação. O retângulo branco indica o período que foi observado a passagem da dark-band/TID pela estação all-sky MAN.

Figura 63 – Índice auroral (AE) durante as fases principal e de recuperação da tempestade. A linha vermelha indica o índice AE e as linhas azuis indicam a fase principal e a fase de recuperação. O retângulo branco indica o período que foi observado a passagem da dark-band/TID pela estação all-sky MAN.



Fonte: Autor.

Notamos na Figura 63 o aumento no índice AE a partir do dia 27/05/2017 às ~21:00 UT. Em seguida, no dia 28/05/2017, ocorre o aumento máximo de AE (~1300nT) às 05:00 UT. O aumento de AE pode provocar o aquecimento joule na região auroral e em seguida geração de ventos termosféricos perturbados. Normalmente os ventos perturbados demoram aproximadamente entre 6 e 10 horas para atingir as regiões de baixas latitudes e equatoriais. Porém, durante tempestades classificadas como intensas e muito intensas os ventos perturbados podem atingir as regiões de baixas latitudes e equatoriais num período muito mais rápido.

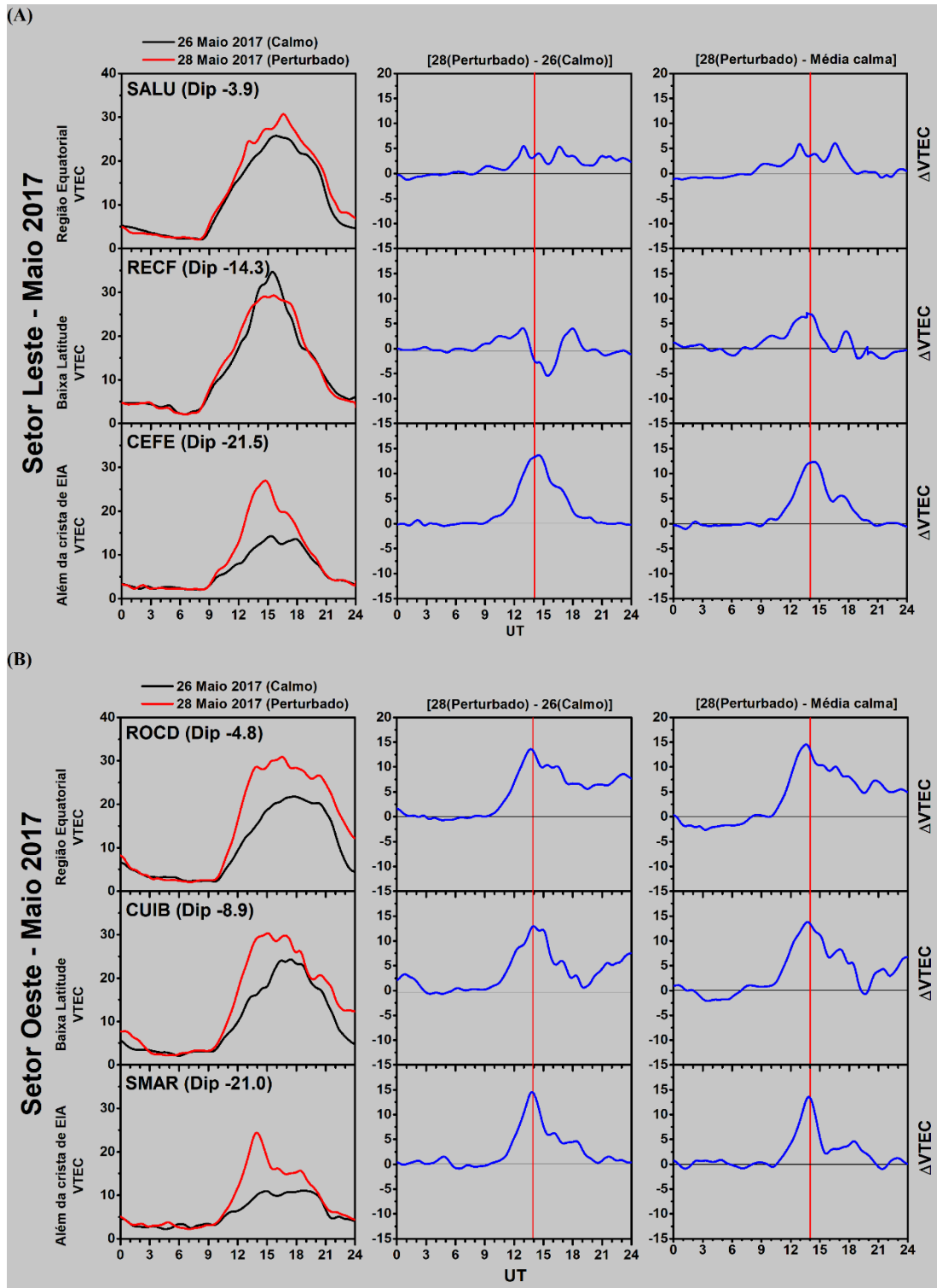
É provável que a rápida subida da camada F, observada na Figura 61, foi provocada pela penetração de campo elétrico causado pelo vento termosférico perturbado que foram gerados na região auroral (ver Figura 63). Após a elevação da camada F podem ocorrer perturbações

ionosférica. No caso desta análise, vimos na Figura 62, após ~8 horas, perturbações ionosféricas positivas observadas nas estações ARA, JAT e SJC. Segundo Fagundes *et al.* (2016) e Ribeiro *et al.* (2019) perturbações ionosféricas positivas podem ser causadas por penetrações rápidas do campo elétrico (PPEF), porém podem ser causadas por outros mecanismos.

Para visualizar melhor as perturbações ionosféricas positivas, que ocorreram após a rápida subida da camada F, confeccionamos gráficos de diferenças $\Delta VTEC$ (ver Figuras 64A e 64B) para as regiões equatoriais até além da crista da EIA para os setores leste e oeste brasileiro para o dia 28 de maio de 2017. Os painéis da esquerda mostram a variação diurna do VTEC para o setor leste brasileiro durante 26 de maio (dia calmo, linha preta) e 28 de maio (dia perturbado, linha vermelha) para as estações SALU, RECF e CEFÉ. **(B)** O mesmo que **(A)**, mas para as estações ROCD, CUIB e SMAR que estão localizadas no setor oeste brasileiro. Os painéis centrais mostram a subtração correspondente a $\Delta VTEC = 28 - 26$. E os painéis da direita mostram a subtração correspondente a $\Delta VTEC = 28 -$ média de 10 dias calmos.

As Figuras 64A e 64B mostram que as perturbações ionosféricas positivas ocorreram aproximadamente no mesmo intervalo de tempo, entre as 11:00 e as 19:00 UT, e o valor máximo ocorre às ~14:00 UT ($\pm 2h$). Este comportamento é observado para todas as estações (setor leste e oeste), tanto nos painéis centrais ($\Delta VTEC = 28 - 26$) quanto nos painéis da direita ($\Delta VTEC =$ perturbado - média de 10 dias calmos), exceto para estação RECF, onde o dia 26 de maio (em relação ao VTEC) possui um valor maior do que o dia 28 de maio, porém, quando observamos a média dos 10 dias calmos, subtraído ao dia 28, notamos o pico de VTEC nos painéis da direita, caracterizando perturbação ionosférica positiva. Quando comparamos com a Figura 62, notamos que as perturbações positivas possuem um sincronismo com as Figuras 64A e 64B. Provavelmente este sincronismo é devido a PPEF.

Figura 64 – (A) Os painéis da esquerda mostram a variação diurna do VTEC para o setor leste durante 26 de maio (dia calmo, linha preta) e 28 de maio (dia perturbado, fase principal da tempestade, linha vermelha) para as estações SALU, RECF e CEFE. (B) O mesmo que (A), mas para as estações ROCD, CUIB e SMAR localizadas no setor oeste. Os painéis centrais mostram as variações Δ VTEC correspondentes (28 - 26). Os painéis da direita mostram as variações Δ VTEC correspondentes (Perturbado - média de 10 dias calmos)



Fonte: Autor.

4.3.1 Análise da dark-band observada em 29 maio de 2017

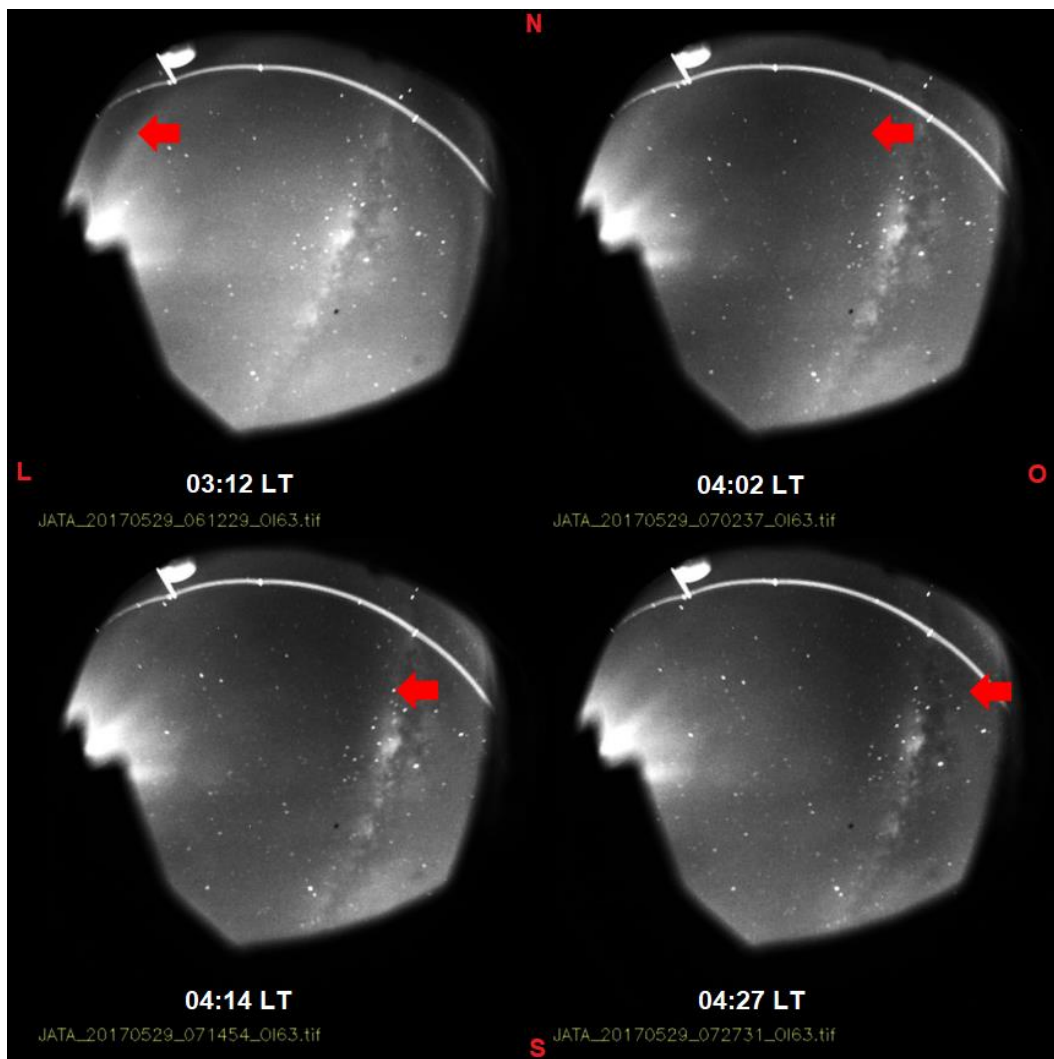
Usando imagens de fotômetro imageador All-Sky instalado em Manaus e Jataí (ver Tabela 7 e Figura 25 para maiores detalhes sobre a localização dos imageadores) investigamos a ocorrência de estruturas de bandas escuras, conhecidas como dark-band, na emissão de OI630 nm a uma altitude de 240 – 270 km, que é a faixa de altitude típica da emissão do OI 630,0 nm, durante a intensa tempestade de maio de 2017.

A dark-band foi observada primeiro na estação all-sky de Jataí propagando-se de leste para oeste entre aproximadamente 03:00 e 04:40 LT (06:00 – 07:40 UT), onde a hora local (LT) é de -3 horas em relação ao tempo universal (UT), porém, devido à forte poluição luminosa as imagens extraídas deste imageador não foram usadas porque não possuía qualidade suficiente para serem aplicadas na ferramenta computacional UASDA. Este programa processa as imagens dos imageadores all-sky e através do processo de linearização calcula os valores dos parâmetros ionosféricos observado nas imagens (TARDELLI-COELHO, 2017). Após ser notada em Jataí a dark-band foi observada na estação de Manaus entre 03:55 e 04:57 LT (06:55 – 07:57 UT) onde a hora local (LT) em Manaus é de -4 horas em relação ao tempo universal (UT). As imagens obtidas pelo imageador de Manaus estavam com maior qualidade onde foi possível utilizar o programa UASDA para calcular a velocidade de propagação da banda escura.

A Figura 65 mostra uma sequência de imagens all-sky, na emissão de OI630 nm, obtidas através da estação de Jataí na noite de 29 de maio de 2017 entre 03:12 e 04:27 LT onde foi possível observar a propagação da dark-band. As setas vermelhas nas imagens mostram o limite frontal da dark-band onde observamos uma grande frente de onda escura atravessando o campo de visão, indo de leste para oeste. Devido as péssimas condições de observação na estação de Jataí a sequência de imagens observada na Figura 65 não foi utilizada para calcular a características de propagação da onda. Apesar disso, conseguimos através das imagens obtidas da estação de Manaus calcular a velocidade de propagação da dark-band. A Figura 66 mostra uma sequência de imagens all-sky na emissão de OI630 nm obtidas da estação de Manaus na noite de 29 de maio de 2017 entre 03:55 e 04:57 LT onde foi possível observar a propagação da dark-band. As setas vermelhas que estão nas imagens mostram o limite frontal da banda escura. Onde, na sequência das imagens, notamos uma grande frente de onda escura atravessando o campo de visão, indo de leste para oeste. Essa estrutura escura aparece no campo de visão do imageador all-sky, como depleções, variando o brilho da emissão OI 630,0

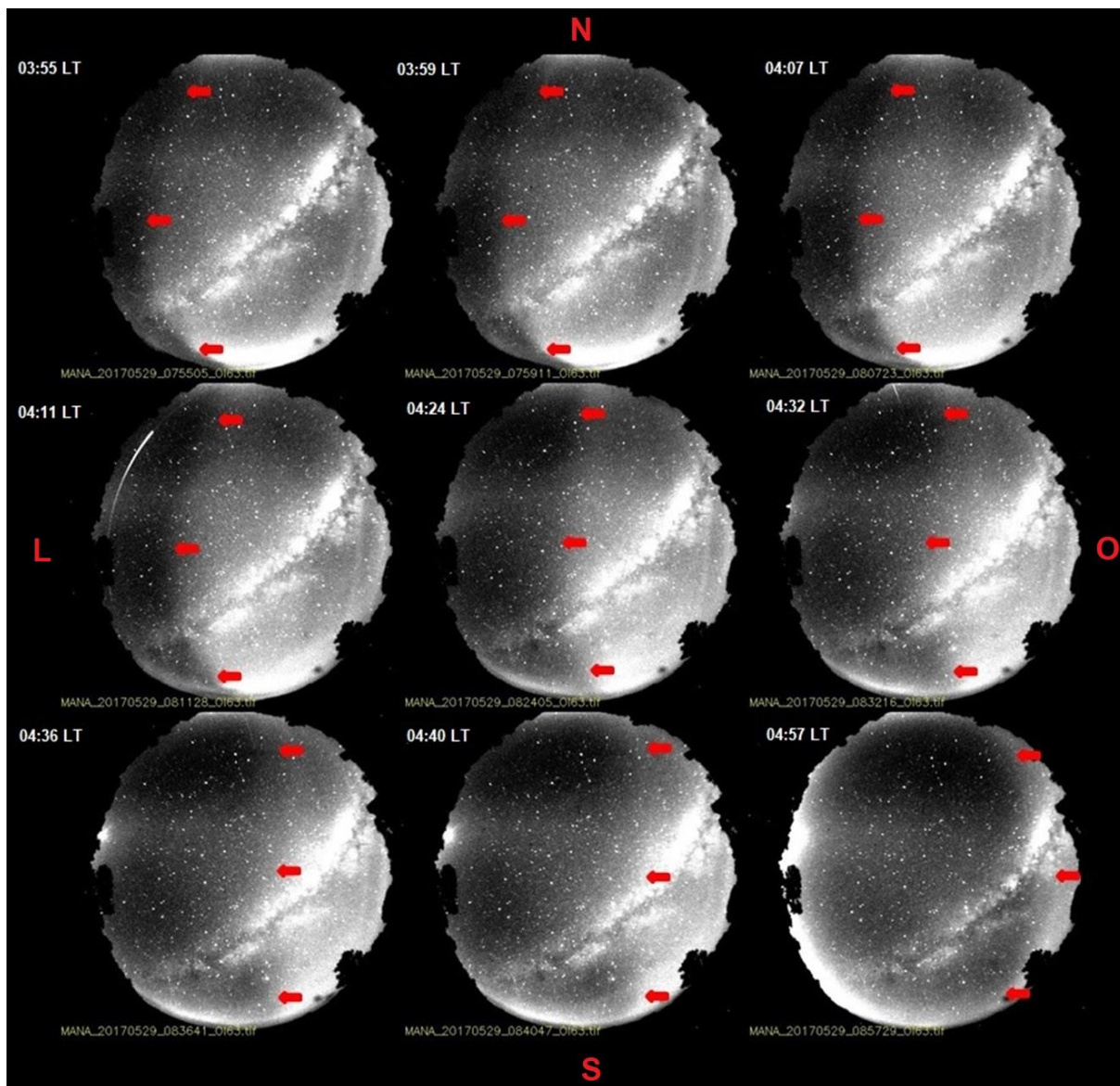
nm com faixas escuras propagantes (PIMENTA; AMORIM; CANDIDO, 2008). Utilizando o programa UASDA, executamos o processo de linearização que modifica a dimensão em pixels para coordenadas geográficas, onde ocorre o processamento de parametrização em graus ou quilômetros (ABALDE *et al.*, 2001; 2004; TARDELLI-COELHO, 2017). Após a linearização, escolhemos um ponto na frente da onda e inferimos o tempo e a distância que a dark-band atravessa o campo de visão do imageador e em seguida calculamos a velocidade média. O valor encontrado, após este processo, foi de ~ 200 m/s no qual está próximo aos valores citados por Pimenta, Amorim e Candido (2008).

Figura 65 – Sequência de imagens, na emissão OI 630 nm, obtidas pelo fotômetro imageador All-Sky de Jataí realizada entre 06:12 e 07:27 UT (03:12 e 04:27 LT) na noite de 29 de maio de 2017. É possível observar a propagação da dark-band propagando de leste para oeste. As setas vermelhas mostram o limite frontal da banda escura.



Fonte: Autor.

Figura 66 – Sequência de imagens, na emissão OI 630 nm, obtidas pelo fotômetro imageador All-Sky de Manaus realizada das 07:55 às 08:57 UT (03:55 às 04:57 LT) na noite de 29 de maio de 2017. É possível observar a propagação da dark-band (durante a fase de recuperação) atravessando o campo de visão, indo de leste para oeste. As setas vermelhas mostram o limite frontal da banda escura.



Fonte: Autor.

E segundo Pimenta, Amorim e Candido (2008) dark-band são eventos classificados como termosféricos/ionosféricos e podem não estar relacionados a perturbações geomagnéticas sendo que no dia 29/05/2017, segundo dia da fase de recuperação, a média do índice geomagnético Dst é aproximadamente -21 nT.

4.3.2 Considerações finais sobre a tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 maio de 2017

Neste estudo foi realizada a investigação do comportamento da ionosfera, durante a intensa tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 de maio de 2017. Para esta análise utilizamos uma rede de 129 receptores GPS-TEC, 3 ionossondas tipo CADI e 1 imageador all-sky (emissão OI 630 nm). Utilizando dados de GPS-TEC analisamos a variação do conteúdo eletrônico total na vertical (VTEC), a comparação do VTEC entre dias calmos e perturbados e a variabilidade da EIA durante o período perturbado. E assim, foi possível detalhar os distúrbios ionosféricos positivos que ocorreram durante a fase de recuperação no dia 28 de maio. É importante mencionar que, durante a fase de recuperação, é comum observar perturbações ionosféricas negativas que ocorrem devido a alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de O/N_2 enquanto que, durante a fase principal da tempestade observamos distúrbios ionosféricos positivos que ocorrem devido à combinação de vários outros mecanismos (ASTAFYEVA *et al.*, 2018; FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019). Em relação à EIA, notamos que ela se comportou de maneira perturbada durante o período estudado, com diminuições e aumentos de sua intensidade, observando um efeito fonte mais intenso.

Nos dados de ionossondas foi possível extrair os parâmetros ionosféricos da camada F em função do tempo (UT) ($h'F$ e $foF2$, respectivamente) para as estações Araguatins (ARA), Jataí (JAT) e São José dos Campos (SJC). Através dos parâmetros $h'F$ e $foF2$ observamos a rápida subida da camada F e variações positivas durante o período perturbado, que provavelmente ocorreram devido a intensa tempestade geomagnética.

Também foi utilizado fotômetro imageador All-Sky, instalado em Manaus, no qual conseguimos investigar a ocorrência de uma dark-band (análise feita na emissão de OI630 nm que corresponde a uma altitude de 240 – 270 km) no dia 29 de maio de 2017. Através de sequências de imagens foi possível calcular a velocidade média da dark-band que foi aproximadamente 200 m/s e identificar sua direção de propagação onde observamos sua frente de onda escura atravessa o campo de visão, indo de leste para oeste.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi estudar o acoplamento do sistema ionosfera-termosfera desde a região equatorial/baixas latitudes até além da crista da Anomalia Ionosférica Equatorial (*Equatorial ionization anomaly* – EIA) durante períodos geomagneticamente perturbados nos setores latino-americano e africano e os principais aspectos que foram abordados e investigados são: a) Propagação (como velocidade e direção) das TIDs (perturbações ionosféricas propagantes); b) Ocorrência de irregularidades de plasma do tipo Spread-F; c) Comportamento da EIA durante períodos perturbados; d) Perturbações ionosféricas positivas e negativas durante períodos perturbados; e) Acoplamento termosfera-ionosfera durante períodos perturbados; e f) Possíveis modificações no sistema termosfera-ionosfera devido ao dínamo perturbado e/ou PPEF (penetração rápida de campos elétricos).

Os períodos geomagneticamente perturbados estudados foram: a tempestade geomagnética (moderada, Dst -53 nT) que ocorreu entre 16 e 18 de janeiro de 2013, a tempestade geomagnética (intensa, Dst -204 nT) que ocorreu entre 22 e 24 de junho de 2015 e a tempestade geomagnética (intensa, Dst -125 nT) que ocorreu entre 27 e 29 de maio de 2017. Neste estudo foram utilizados dados experimentais de GPS-TEC, ionossondas e imageadores all-sky.

Apesar de todos os avanços científicos sobre o clima espacial existem ainda questões a serem investigadas para um melhor entendimento dos processos de acoplamento de energia entre o Sol e a Terra. Nesse sentido, um dos grandes desafios da física espacial é explicar todos os comportamentos do sistema ionosfera-termosfera durante períodos geomagneticamente perturbados (tempestades geomagnéticas).

Os principais resultados relacionados a esta investigação foram:

1. Tempestades geomagnéticas moderadas podem perturbar fortemente a evolução espaço-temporal equatorial e de baixa latitude de VTEC e EIA. Conseqüentemente, a eletrodinâmica ionosférica é fortemente perturbada quando comparamos com os dias calmos. Como visto na tempestade geomagnética ocorrida entre 16 e 18 de janeiro de 2013. Porém, intensas tempestades geomagneticamente também perturbam fortemente a ionosfera.

2. Foram observados distúrbios ionosféricos propagantes (TIDs) e penetrações rápidas de campos elétricos (PPEF) durante as tempestades geomagnéticas investigadas. E presenciamos que ocorrências de TIDs e PPEF podem perturbar/mudar drasticamente o comportamento da EIA.
3. O comportamento anômalo da EIA mais observado nesse estudo foram: a intensificação em função do VTEC e o aumento da extensão, em função ao dip latitude e em função do tempo, sendo que este comportamento da EIA indica uma intensificação do efeito fonte que é chamado de efeito super-fonte. Observamos também a diminuição da EIA em função do VTEC (supressão/inibição).
4. Durante as tempestades geomagnéticas foi observado perturbações ionosféricas positivas e negativas. Normalmente, durante a fase principal da tempestade, observamos perturbações ionosféricas positivas que podem ocorrer devido a vários mecanismos. Enquanto, durante a fase de recuperação, é comum observar perturbações ionosféricas negativas que ocorrem devido a alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de O/N_2 .
5. Durante a tempestade geomagnética, ocorrida entre 27 e 29 de maio de 2017, foi observado ocorrências de spread-F na fase principal. Devido a esta irregularidade não conseguimos visualizar a rápida subida da base da camada F e nem reduzir dados para a extração de $h'F$.
6. A dark-band observada durante a tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 de maio de 2017 apresentou velocidade média de ~ 200 m/s e direção de leste para oeste. É provável que esta dark-band não esteja relacionada com as perturbações geomagnéticas devido a média diária do índice Dst ser aproximadamente -21 nT.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o entendimento nos estudos referente aos períodos geomagneticamente perturbado (tempestades geomagnéticas). No entanto, mais estudos são necessários para compreender melhor os processos eletrodinâmicos relacionados ao acoplamento do sistema ionosfera-termosfera desde a região equatorial até altas latitudes (região polar) durante tempestades geomagnéticas. Assim, se faz necessário algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Estudar as tempestades geomagnéticas de diferentes intensidades, como por exemplo, fracas e moderadas e investigar a sua influência em diferentes latitudes magnéticas (região equatorial, baixas latitudes até altas latitudes) e assim compreender melhor o comportamento ionosférico durante tempestades geomagnéticas ocorridas durante o ciclo solar 24.
- Ampliar os setores estudados (região global) para investigar as diferentes respostas ionosféricas durante tempestades geomagnéticas ocorridas durante o ciclo solar 24.
- Estudar perturbações ionosféricas, durante o ciclo solar 24, utilizando simultaneamente diversos equipamentos, tais como, ionossondas, GPS, imageadores do tipo All-Sky, Fabry-Perot, magnetômetros e dados de satélites.
- Investigar o comportamento de irregularidades ionosférica (Spread-F/Bolhas de plasma) durante tempestades geomagnéticas com imageadores do tipo All-Sky distribuídos pelo globo terrestre.

REFERÊNCIAS

- ABALDE, J. R. *et al.* Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging: New results. **Journal of geophysical research-space physics**, n. 106, A12, 30331-30336, 2001. DOI: 10.1029/2001JA001115.
- ABALDE, J. R. *et al.* Height-resolved ionospheric drifts at low latitudes from simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging observations. **Journal of geophysical research-space physics**, n. 109, A11, A11308, 2004. DOI: 10.1029/2004JA010560.
- ABDU, M. A. *et al.* Global scale equatorial ionization anomaly (EIA) response to magnetospheric disturbances based on the May-June 1987 SUNDIAL-coordinated observations. **Annales Geophysicae**, v. 11, n. 7, p. 585-594, 1993.
- ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 59, n. 13, p. 1505–1519, 1997.
- ABDU, M. A. *et al.* Equatorial evening prereversal vertical drift and spread F suppression by disturbance penetration electric fields, **Geophys. Res. Lett.**, n. 36, L19103, 2009. doi:10.1029/2009GL039919.
- ABDU, M. A. *et al.* The role of electric fields in sporadic E layer formation over low latitudes under quiet and magnetic storm conditions, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, n. 115, p. 95-105, 2014. doi:10.1016/j.jastp.2013.12.003.
- ABREU, A. J. **Efeitos de supertempestades geomagnéticas na camada F ionosférica sobre o setor brasileiro estudados por GPS**. 131f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.
- ABREU, A. J. *et al.* Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm, **Journal of Geophysics Research: Space Physics**, n. 115, 2010a. <https://doi.org/10.1029/2010JA015661>.
- ABREU, A. J. *et al.* Response of the ionospheric F-region in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm in April 2000 observed by GPS, **Advances in Space Research**, v. 45, n. 11, p. 1322-1329, 2010b. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.003>.
- ABREU A. J. **Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais**. 193f. Tese (Doutorado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012.
- ABREU, A. J. *et al.* Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24, **Adv. Space Res.**, v. 53, n. 9, p. 1313–1328, 2014. doi:10.1016/j.asr.2014.02.011.
- ARANHA S. L. **Estudo de ondas planetária na Ionosfera em baixa latitudes e região equatorial**. 2006. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

ASTAFYEVA, E. *et al.* Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, n. 123, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024981>

BARBOSA F. R. E. **Estudo das irregularidades ionosféricas de grande e média escala durante períodos geomagneticamente calmo e perturbado.** Tese (Doutorado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2018.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, weather and climate.** London: Routledge, 1995.

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A., **Basic space plasma physics.** London: Imperial College Press, 1997.

BASU, S. *et al.* Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms, **J. Geophys. Res.**, n. 112, 2007. doi:10.1029/2006JA012192.

BATISTA, I. S. *et al.* Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm, **J. Geophys. Res.**, n. 111, 2006. doi:10.1029/2005JA011428.

BATISTA, I. S. *et al.* Early morning enhancement in ionospheric electron density during intense magnetic storms, **Adv. Space Res.**, v. 49, n. 11, p. 1544–1552, 2012. doi:10.1016/j.asr.2012.01.006.

BECKER-GUEDES, F. *et al.* The ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003, **Annales Geophysicae**, v. 25, n. 4, p. 863–873, 2007. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-863-2007>.

BLANC, M.; RICHMOND, A.D. The ionospheric disturbance dynamo, **J. Geophys. Res.**, v. 8, n. 5, 1980.

BRUINSMA, S. *et al.* Thermospheric density response to the 20-21 November 2003 solar geomagnetic storm from CHAMP and GRACE accelerometer data, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 111, A06303, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011284>.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência.** 1999. 209f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

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

DUARTE-SILVA, M. H. **Estudo da espessura equivalente ionosférica durante um ano de baixa atividade solar.** 2013. 117f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2013.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming over the equatorial, low, and middle latitudes in the South American sector, **J. Geophys. Res. Space Physics**, n. 120, p. 7889–7902, 2015 doi:10.1002/2014JA020649.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian sector, **Journal of Geophysics Research: Space Physics**, v. 121, n. 6, p. 5613-5625, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022214>.

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

FEJER, B. G.; SCHERLIESS, L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields, **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. A11, p. 24,047–24, 1997.

GFZ – German Research Centre for Geosciences. Disponível em: <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>. Acesso em: 12 dez. 2018.

GONCHARENKO, L. P. *et al.* Observations of a positive storm phase on 10 September 2005, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 69, n. 10–11, p. 1253–1272, 2007. doi:10.1016/j.jastp.2006.09.011.

GHODPAGE, R.N. *et al.* Ionospheric response to major storm of 17th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8 degrees N, 74.2 degrees E, 10.6 degrees dip. Lat.), **Advances in Space Research**, v. 62, n. 3, p. 624-637, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.003>.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992,

HOFFMANN-WELLENHOF, B. *et al.* **Global Positioning System: Theory and Practice**. New York: Springer-Verlag Wien, 2001.

HUANG, C. S. *et al.* A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network, **J. Geophys. Res.**, n. 110, A06303, 2005. doi:10.1029/2004JA010865.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas) GNSS. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>. Acesso em: 14 nov. 2017.

INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Disponível em: http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/23/kp_planetary_index. Acesso em: 10 jan. 2019.

JESUS, R. **Estudos de eventos do tempo espacial (“space weather”) e a ocorrência de bolhas de plasmas ionosféricas no setor brasileiro e japonês usando sondagem ionosférica**. 2008. 98f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2008.

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**, 2nd ed. London: Elsevier, 2009.

KLIMENKO, M. V. *et al.* Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9-14 September 2005, **Radio Sci.**, n. 46, 2011. doi:10.1029/2010RS004590.

MACDOUGALL, J. W.; GRANT, I. F.; SHEN, X. **The Canadian Advanced Digital Ionosonde: Design and Results (Report UAG-104)**. World Data Center A for Solar - Terrestrial Physics, National Geophysical Data Center. Boulder, CO: P. Wilkinson. 21- 27, 1994.

MACHO, E. P. *et al.* Ionospheric response to the June 2015 geomagnetic storm in the South American region. **Advances in space research**, v. 65, n. 9, p. 2172-2183, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.02.025>

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

MCCOMAS, D. J. *et al.* Solar wind electron proton alpha monitor (SWEPAM) for the advanced composition explorer. **Space Sci. Rev.**, v. 86, p. 563-612, 1998.

MITRA, S. K. **The upper atmosphere**. Institute of Radio Physics and Electronics. Calcutta: University College of Science, 1952

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Ed. UNESP. 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Ed. UNESP, 2008.

MOOR, L. P. **Estudo das irregularidades ionosféricas da região F durante um período de atividade solar mínima**. 2011. 161f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.

NAKANO, S. *et al.* Impact of the solar wind dynamic pressure on the Region 2 field-aligned currents, **J. Geophys. Res.**, v. 11, n. 4, 2009. doi:10.1029/2008JA013674.

NEGRETI, P. M. S. **Estudo do conteúdo eletrônico total na região brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 291f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

OMNIWeb. Disponível em: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html. Acesso em: 30 jan. 2019.

PAULINO, I. *et al.* Optical observations of plasma bubble westward drifts over Brazilian tropical region, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 72, n. 5-6, p. 521-527, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.01.015>.

PILLAT, V. G. **Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional LION e comparação com parâmetros ionosféricos observados.**

Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

PIMENTA, A. A. **Estudo da deriva zonal e dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical.** 196f. Tese (Doutorado em Geofísica), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

PIMENTA, A. A.; AMORIM, D. C. M.; CANDIDO, C. M. N. Thermospheric dark band structures at low latitudes in the Southern Hemisphere under different solar activity conditions: A study using OI 630 nm emission all-sky images, **Geophysical Research Letters**, v. 35, 2008. doi:10.1029/2008GL034904.

PIMENTA, A. A. *et al.* Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions, **Advances in Space Research**, v. 27, n. 6/7, p. 1213-1218, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00200-9).

POLEZEL, W. G. C. **Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no Posicionamento.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

PRÖLSS, G. **Ionospheric F-region storms, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics.** Boca Raton: CRC Press, 1995.

REINISCH, B.W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. **Radio Science**, v. 21, n.3, p.331-341, 1986a.

REINISCH, B.W. **The digisonde 256 system and ionospheric research.** URSI INAG Ionospheric Station Inf. Bulletin, INAG-48, 1986b.

REINISCH, B. W., Modern Ionosondes, *In*: KOHL, H.; RUSTER, R.; SCHLEGEL, K., **Modern Ionospheric Science**, Katlenburg: 1996c. p. 440-458.

RIBEIRO, B. A. G. **Resposta ionosférica as tempestades geomagnéticas desde a região equatorial até além da crista da anomalia de ionização equatorial, durante o ciclo solar 24.** 2016. 134f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

RIBEIRO, B. A. G. *et al.* Equatorial and low-latitude positive ionospheric phases due to moderate geomagnetic storm during high solar activity in January 2013. **Advances in Space Research**, 2019. doi <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.032>

RICHMOND, A. D.; PEYMIRAT, C.; ROBLE, R. G. Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, **J. Geophys. Res.**, v. 108, n. A3, 2003.

RISHBETH, H.; GARRIOT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969.

ROCHA, J. A. M. R. **GPS: Uma abordagem prática**. Recife: Bagaço, 2003.

SAHA, K. **The Earth's Atmosphere: Its Physics and Dynamics**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

SARDÓN, E.; ZARRAOA, N. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases? **Radio Science**, v. 32, n. 5, p. 1899-1910, 1997.

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. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00179-6).

SAHAI, Y. *et al.* Generation of large-scale equatorial F region plasma depletions during low range Spread-F season, **Ann. Geophys.**, n. 22, n. 1, p. 15–23, 2004.

SAHAI, Y. *et al.* Effects observed in the ionospheric F region in the east Asian sector during the intense geomagnetic disturbances in the early part of November 2004, **J. Geophys. Res.**, n. 114, 2009a. doi:10.1029/2008JA013053.

SAHAI, Y. *et al.* Effects observed in the Latin American sector ionospheric F region during the intense geomagnetic disturbances in the early part of November 2004, **J. Geophys. Res.**, n. 114, 2009b. doi:10.1029/2007JA013007.

SAHAI, Y. *et al.* Studies of ionospheric F region response in the Latin American sector during the geomagnetic storm of 21–22 January 2005, **Ann. Geophys.**, v. 29, n. 5, p. 919–929, 2011. doi:10.5194/angeo-29-919-2011.

SAHAI, Y. *et al.* Effects observed in the equatorial and low latitude ionospheric F region in the Brazilian sector during low solar activity geomagnetic storms and comparison with the COSMIC measurements, **Adv. Space Res.**, v. 50, n. 10, p. 1344–1351, 2012. doi:10.1016/j.asr.2012.07.006.

SAU, S. *et al.* First observation of interhemispheric asymmetry in the EPBs during the St. Patrick's Day geomagnetic storm of 2015, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 6, p. 6679-6688, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024213>.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. Cambridge: University Press, 2009.

SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. **Atividade solar confunde o campo magnético terrestre**. 2019. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/atividade_solar_confunde_o_campo_magnetico_terrestre.html. Acesso em: 15 jan. 2019.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlim: Walter de Gruyter, 1993.

SEEMALA, G. K.; VALLADARES, C. E. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008. **Radio Sci.**, n. 46, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011RS004722>.

SMITH, C. W. *et al.* The ACE magnetic fields experiment. **Space Sci. Rev.**, n. 86, p. 613–632, 1998.

SPIRO, R. W.; WOLF, R. A.; FEJER, B. G. Penetration of high latitude electric field effects to low latitudes during SUNDI AL 19 84, **Ann. Geophys.**, n. 6, p. 39 – 50, 1988.

TARDELLI, A. **Estudo de múltiplas estratificações da camada-f ionosférica em regiões de baixa latitude e equatorial**. 124p. Tese (Doutorado em Física e Astronomia), - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

TARDELLI-COELHO, F. **Estudo de características de Blobs de plasma ionosférico observadas no setor brasileiro**. 128f. Tese (Doutorado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2017.

TASCIONE, T. F. **Introduction to he space environment**. 2nd. ed. Malabar: Orbit Book Company, 1994.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The interplanetary cause of magnetic storms: a review. *In*: TSURUTANI, B. T. *et al.* **Magnetic storms**. Washington, DC.: [s.ed.], 1997. v. 98.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. Magnetic Storm. *In*: TSURUTANI, B. T.; SUESS, S. T. **From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares e Cosmic Rays**. Washington: American Geophysical Union, 1998.

VALENTIM, A. M. S. **Campos elétricos e derivas do plasma na ionosfera equatorial do setor americano durante tempestades magnéticas**. 227f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

VAZ TOLENTINO. 2017. Disponível em: <http://www.vaztolentino.com.br/conteudo/562-TECNOLOGIA-GPS-SEGMENTO-ESPACIAL-SEGMENTO-DE-CONTROLE-SEGMENTO-DO-USUaRIO>. Acesso em: 20 fev. 2017.

VENKATESH, K. *et al.* Electrodynamic disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. **J. Geophys. Res.: Space Phys.**, v. 122, n. 4, p. 4553-4570, 2017. doi 10.1002/2017JA024009.

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 253f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.