

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

BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**RESPOSTA IONOSFÉRICA AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS DESDE A  
REGIÃO EQUATORIAL ATÉ ALÉM DA CRISTA DA ANOMALIA DE  
IONIZAÇÃO EQUATORIAL, DURANTE O CICLO SOLAR 24.**

São José dos Campos, SP

2016



BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**RESPOSTA IONOSFÉRICA AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS DESDE A  
REGIÃO EQUATORIAL ATÉ ALÉM DA CRISTA DA ANOMALIA DE  
IONIZAÇÃO EQUATORIAL, DURANTE O CICLO SOLAR 24.**

Dissertação 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 Mestre em Astronomia e Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, SP

2016



Brunno Augusto Gomes Ribeiro.

Resposta ionosférica as tempestades geomagnéticas desde a região equatorial até além da crista da anomalia de ionização equatorial, durante o ciclo.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia e Física do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, 2015.

1. Tempestades Geomagnéticas 2. Ionosfera 3. TEC 4. GPS  
5. Orientador Paulo Roberto Fagundes.

Autorizo para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura do Aluno:

Data da defesa: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_



BRUNNO AUGUSTO GOMES RIBEIRO

**RESPOSTA IONOSFÉRICA AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS DESDE A  
REGIÃO EQUATORIAL ATÉ ALÉM DA CRISTA DA ANOMALIA DE  
IONIZAÇÃO EQUATORIAL, DURANTE O CICLO SOLAR 24.**

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia, 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. Paulo Roberto Fagundes (UNIVAP) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arian Ojeda Gonzáles (UNIVAP) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Caius Lucius Selhorst (UNIVAP) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Clezio Marcos De Nardin (INPE) \_\_\_\_\_

Suplente:

Prof. Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella (UNIVAP) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretora do IP&D - Univap

São José dos Campos, 11 de agosto de 2016.



Aos meus pais, Angela Maria Gomes Ribeiro e Nelson Lucio Ribeiro,  
aos meus irmãos  
e minha noiva Bruna Ferreira.



## 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 dissertação e pelo apoio e confiança.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro e institucional no processo de número 2014/10124-1.

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

A todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

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

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

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

A minha linda noiva Bruna Ferreira pelo apoio ilimitado, compreensão, amor e incentivo, sempre. É para mim, um grande exemplo de garra e persistência.

Aos amigos Matheus, Marcela, Sérgio e Paulo, 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.



“Faça elevar  
O cosmo no seu coração  
Todo o mal, combater, despertar o poder  
Sua constelação  
Sempre irá te proteger  
Supera a dor e dá forças pra lutar...”

(Hiroaki Matsuzawa, 1986)



## **RESPOSTA IONOSFÉRICA AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS DESDE A REGIÃO EQUATORIAL ATÉ ALÉM DA CRISTA DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL, DURANTE O CICLO SOLAR 24.**

### **RESUMO**

Este trabalho investiga a resposta ionosférica as tempestades geomagnéticas desde a região equatorial até além da crista da anomalia de ionização equatorial (AIE), durante o primeiro semestre de 2013. O estudo foi realizado durante o máximo do ciclo solar 24 (2013-2014). A eletrodinâmica da ionosfera durante períodos perturbados é um dos tópicos mais importantes do Tempo Espacial (“Space Weather”). Neste estudo foi utilizada uma rede de 90 estações de GPS-TEC, distribuídos em numa faixa de  $30^{\circ}$  x  $30^{\circ}$  de latitude e longitude. Foram investigadas 8 tempestades geomagnéticas moderadas e intensas, mas para efeito didático faremos a apresentação de apenas 5 eventos. Notou-se nos eventos estudados a ocorrência de distúrbios ionosféricos positivos e negativos, durante a fase principal e de recuperação, respectivamente. Em alguns eventos o comportamento da AIE no setor Leste e Oeste apresentam algumas diferenças na intensidade e tempo de duração. Indicando que a resposta ionosférica no setor Leste e Oeste brasileiro apresentam características diferentes. Porém, uma das tempestades apresentou a propagação de um distúrbio ionosférico propagante (TID) que foi analisado e estudado em detalhe. A TID penetrou no setor brasileiro com velocidade de  $\sim 218$  m/s e com uma direção de propagação para noroeste.

**Palavras – Chaves:** Tempestades Geomagnéticas, Ionosfera, TEC, GPS.



## **IONOSPHERIC RESPONSE TO GEOMAGNETIC STORMS FROM EQUATORIAL REGION TO THE EQUATORIAL IONIZATION ANOMALY CREST, DURING THE SOLAR CYCLE 24.**

### **ABSTRACT**

This work investigates the ionospheric (F-region) response during the geomagnetic storms from the equatorial region to the equatorial ionization anomaly (EIA) crest and beyond, during the first half of the year 2013. This study period belongs to the high solar activity (HSA, 2013-2014) period. The study on ionospheric electrodynamics during disturbed times is one of the most important topics of contemporary Space Weather. The present investigation used a network of 90 GPS-TEC stations, located in Brazilian territory, covering a wide area of  $30^\circ \times 30^\circ$  de latitude e longitude. About 8 moderate to severe geomagnetic storms are investigated. However, for didactic purposes we will show only 5 events. It is observed that the vertical total electron content (VTEC) showed positive and negative ionospheric storm effects during the storm main and recovery phases, respectively. Also, two latitudinal chains of GPS-TEC stations from equatorial region to low latitudes in the east and west Brazilian sectors are used to investigate the storm time behavior of the equatorial ionization anomaly (EIA) in the east and west Brazilian sectors. It was noted that the EIA intensity in the east sectors are usually stronger than the west sector. One of the most interesting observations was the propagation of Travelling Ionospheric Disturbances (TID) which was analyzed and studied in detail. The average TID type soliton speed velocity and propagation direction were found to be 218 m / s and northwest, respectively.

**Keywords:** Geomagnetic Storms, Ionosphere, TEC, GPS.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica dos ciclos solares 23 e 24.....	32
Figura 2 – Campo magnético interplanetário (IMF) proveniente do Sol com seu formato espiral. ....	33
Figura 3 – Classificação da Atmosfera em Função do Gradiente de.....	35
Figura 4 – Ilustração do vento solar interagindo com a magnetosfera terrestre.....	36
Figura 5 – Perfil vertical da ionosfera. ....	38
Figura 6 – Estrutura de formação da região F1 segundo o comportamento das perdas quadráticas (curva a) e linear (curva a) no qual se pode formar um pico na concentração eletrônica ou apenas uma inflexão. Ne: densidade eletrônica; $h_o$ : altura do máximo da perda quadrática e $h_t$ : altura de transição. ....	40
Figura 7 – Reconexão do campo magnético interplanetário com a magnetosfera Terrestre....	41
Figura 8 – Variação do índice Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982. As diferentes fases das tempestades estão indicadas por linhas verticais.....	42
Figura 9 – Mapa da localização da rede de observatórios magnéticos responsável pelo índice Kp disseminado por toda Terra. ....	45
Figura 10 – Mapa contendo a rede de observatório geomagnético encarregado pelo índice Dst. ....	46
Figura 11 – Representação das forças que agem sobre o plasma. Efeito fonte criando a anomalia equatorial de ionosférica. ....	48
Figura 12 – Imagem da constelação dos satélites do sistema GPS. ....	50
Figura 13 – Mapa com as localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS.....	51
Figura 14 – Representação Gráfica da utilização de receptores GPS com usuários finais. ....	52
Figura 15 – Representação sucinta da transmissão de sinais GPS. ....	53
Figura 16 – Esquema básico Receptor GPS. ....	55
Figura 17 – Erros envolvidos nas observáveis GPS.....	60
Figura 18 – Geometria do caminho da propagação do sinal satélite / receptor.....	65
Figura 19 – Gráfico de VTEC para os dias 12 e 13 de janeiro de 2013. As siglas POVE, CUIB e SMAR significam, nesta ordem, Porto Velho, Cuiabá e Santa Maria com suas respectivas localizações (Dip latitude). ....	66

Figura 20 – Mapa do setor brasileiro com 90 estações GPS-TEC disponíveis, utilizadas para analisar eventos geomagnéticos ocorridos no primeiro semestre de 2013. O equador geomagnético é mostrado através dos pontos pretos.....	68
Figura 21 – Localizações das 20 estações GPS-TEC utilizadas para análise das tempestades geomagnéticas. Os marcadores amarelos indicam as regiões de baixa latitude norte e sul; os marcadores vermelhos indicam a região equatorial e os marcadores verdes indicam regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. O equador geomagnético é mostrado através dos pontos pretos.....	69
Figura 22 – Mapa da localização das estações GPS-TEC escolhidas para análise da evolução da Anomalia durante os períodos estudados. Os marcadores vermelhos indicam o grupo de estações no Setor Oeste e os marcadores amarelos indicam o grupo de estações no setor Leste. E as linhas pretas o meridiano magnético as quais as estações estão próximas.....	70
Figura 23 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. O SSC, fase principal e recuperação são indicados por linhas vermelhas. ....	71
Figura 24 – Região de baixa latitude norte.....	73
Figura 25 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte..	74
Figura 26 – Região equatorial. ....	74
Figura 27 – Região de baixa latitude sul. ....	75
Figura 28 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. ....	75
Figura 29 – Variação diurna para o setor Leste.....	76
Figura 30 – Variação diurna para o setor Oeste. ....	77
Figura 31 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 16 a 21 de março.....	79
Figura 32 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 16 a 21 de março. ....	79
Figura 33 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. O SSC, fase principal e recuperação são indicados por linhas vermelhas. ....	81
Figura 34 – Região de baixa latitude norte.....	83
Figura 35 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte..	84
Figura 36 – Região equatorial .....	84
Figura 37 – Região de baixa latitude sul. ....	85
Figura 38 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. ....	85
Figura 39 – Variação diurna para o setor Leste.....	86
Figura 40 – Variação diurna para o setor Oeste. ....	87
Figura 41 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 31 de maio a 03 de junho. ....	89

Figura 42 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 31 de maio a 03 de junho.	89
Figura 43 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. A fase principal e de recuperação são indicadas por linhas vermelhas. ....	91
Figura 44 – Região de baixa latitude norte. ....	93
Figura 45 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte..	94
Figura 46 – Região equatorial. ....	94
Figura 47 – Região de baixa latitude sul. ....	95
Figura 48 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. ....	95
Figura 49 – Variação diurna para o setor Leste. ....	96
Figura 50 – Variação diurna para o setor Oeste. ....	97
Figura 51 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 05 a 08 de junho. ....	99
Figura 52 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 05 a 08 de junho. ....	99
Figura 53 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. A fase principal e de recuperação são indicadas por linhas vermelhas. ....	101
Figura 54 – Região de baixa latitude norte. ....	103
Figura 55 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte. ....	104
Figura 56 – Região equatorial. ....	104
Figura 57 – Região de baixa latitude sul. ....	105
Figura 58 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. ....	105
Figura 59 – Variação diurna para o setor Leste. ....	106
Figura 60 – Variação diurna para o setor Oeste. ....	107
Figura 61 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 13 a 16 de julho. ....	109
Figura 62 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 13 a 16 de julho. ....	109
Figura 63 – Índices geomagnéticos e parâmetros do vento solar. As mudanças das fases são indicadas pelas linhas pontilhadas vermelhas, onde cada letra em negrito indica a sua respectiva fase. <b>A</b> : Fase principal da tempestade 1; <b>B</b> : Fase de Recuperação da tempestade 1; <b>C</b> : Fase principal da tempestade 2; <b>D</b> : Fase de Recuperação da tempestade 2; <b>E</b> : Fase principal da tempestade 3; <b>F</b> : Fase de Recuperação da tempestade 3. O SSC, que ocorreu às 17:32 UT, é indicado pela linha vermelha. O preenchimento azul indica o período de ocorrência do distúrbio ionosférico propagante –TID. ....	111
Figura 64 – Região de baixa latitude norte. ....	113

Figura 65 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte. .....	114
Figura 66 – Região equatorial. ....	114
Figura 67 – Região de baixa latitude sul. ....	115
Figura 68 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. ....	115
Figura 69 – Variação diurna para o setor Leste. ....	116
Figura 70 – Variação diurna para o setor Oeste. ....	117
Figura 71 – Mapa do setor brasileiro mostrando a evolução do VTEC (Latitude x Longitude) obtido das 82 estações de GPS-TEC disponíveis ocorrida no dia 17 de janeiro de 2013 das 14:00 UT às 23:20 UT. É observado nessa figura o comportamento <b>completo</b> da Perturbação ionosférica propagante – TID. ....	118
Figura 72 – Mapa do setor brasileiro mostrando a evolução do VTEC (Latitude x Longitude). Evento ocorrido em 17 de janeiro de 2013 das 14:00 UT às 20:80 UT. É observado nessa figura o comportamento <b>parcial</b> , porém com uma resolução melhor da Perturbação ionosférica propagante – TID. ....	119
Figura 73 – Localização das estações GPS utilizadas para análise das TIDs. As retas indicam os 3 grupos de estações, onde os marcadores vermelhos indicam as estações da 1º Grupo, os marcadores azuis indicam as estações da 2º Grupo, os marcadores amarelos indicam as estações da 3º Grupo. A seta que está perpendicular as retas além de indicar a direção da TID foi utilizada para calcular a distância média entre os grupos. Os pontos pretos indicam o equador magnético. ....	120
Figura 74 – Mapa do setor brasileiro mostrando a direção da perturbação ionosférica propagante (TID) para direção <b>noroeste</b> . ....	121
Figura 75 – Análise da Perturbação Ionosférica Propagante – TID ocorrida em 17 de janeiro de 2013. As cores usadas para identificar o 1º Grupo, 2º Grupo e 3º Grupo de estações no gráfico são referentes aos marcadores utilizados na Figura 73. As linhas verticais (pontilhadas) indicam a defasagem temporal da TID em relação as médias de um grupo para o outro. ....	122
Figura 76 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 16 a 21 de janeiro. ....	124
Figura 77 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 16 a 21 de janeiro. ....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Gases existentes na nossa atmosfera e seus potenciais de ionização seguido do máximo comprimento de Onda. ....	37
Tabela 2 – Classificação das atividades geomagnéticas através dos valores do índice Kp.....	44
Tabela 3 – Lista completa contendo informações dos 13 observatórios magnéticos espalhado por todo o globo terrestre.....	45
Tabela 4 – Denominação e localização da rede de observatório geomagnético responsável pelo índice Dst. ....	46
Tabela 5 – Classificação das Tempestades geomagnéticas através dos valores do índice Dst.	47
Tabela 6 – Fontes e erros incluídos nas observáveis GPS.....	59
Tabela 7 – Classificação e data de ocorrência das 5 tempestades geomagnéticas. ....	67
Tabela 8 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.....	72
Tabela 9 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	77
Tabela 10 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste. ....	78
Tabela 11 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.....	82
Tabela 12 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	87
Tabela 13 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste. ....	88
Tabela 14 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.....	92
Tabela 15 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	97
Tabela 16 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	98
Tabela 17 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.....	102
Tabela 18 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	107
Tabela 19 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste. ....	108
Tabela 20 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.....	112
Tabela 21 – Informações geográficas dos Grupos de estações GPS utilizadas para análise das TIDs.....	121
Tabela 22 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.....	123
Tabela 23 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste. ....	123
Tabela 24 – Principais características da fase principal, de recuperação e da EIA durante as tempestades geomagnéticas. ....	125

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

- AE – Eletrojato Auroral (Auroral Electrojet)
- ACE – Advanced Composition Explorer
- AMCO – Estação de Coari
- APSA – Estação de Santana
- AS – Anti-spoofing
- BABR – Estação de Barreiras
- BELE – Estação de Belém
- BOAV – Estação de Boa Vista
- C/A – Código de fácil aquisição (course-acquisition)
- CEFE – Estação de Vitoria
- CEFT – Estação de Fortaleza
- CME – Ejeções de Massa Coronal (Coronal Mass Ejection)
- CMT – Campo magnético da Terra
- CRUZ – Estação de Cruzeiro do Sul
- CUIB – Estação de Cuiabá
- DGPS – Sistema de GPS Diferencial (Differential GPS)
- DoD – Departamento de Defesa dos Estados Unidos (Department of Defense)
- Dst – Disturbance Storm Time
- EIA – Anomalia de Ionização Equatorial (Equatorial ionization anomaly)
- EUV – Extrema ultravioleta
- GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite Systems)
- GOJA – Estação de Jataí
- GPS – Sistema de Posicionamento Global
- GVAL – Estação de Governador Valadares
- ho – Altura do máximo da perda quadrática
- $H_m$  – Altura média da ionosfera
- ht – Altura de transição
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IMBT – Estação de Imbituba
- IMF – Campo magnético interplanetário (interplanetary magnetic field)

ISGI – Serviço Internacional de Índices Geomagnético (International Service of Geomagnetic Índices)

Kp – Índice planetário (Planetarische Kennziffer)

MABA – Estação de Marabá

MABS – Estação de Balsas

MAG – Magnetic Field Experiment

MAPA – Estação de Macapá

MGBH – Estação de Belo Horizonte

MGMC – Estação de Montes Claros

MSCG – Estação de Campo Grande

MTVB – Estação de Vila Bela da Santíssima Trindade

N – Ambiguidade

Ne – Densidade eletrônica

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

Np – Densidade de prótons do vento solar

ONRJ – Estação de Rio de Janeiro - ON

P – Código preciso (precise)

PAAT – Estação de Altamira

PITN – Estação de Teresina

POAL – Estação de Porto Alegre

POVE – Estação de Porto Velho

PPS – Serviços de Posicionamento Preciso

PRGU – Estação de Guarapuava

PRN – Códigos de ruído falsamente aleatório (pseudo-random-noise)

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

RECF – Estação de Recife

RIOB – Estação de Rio Branco

RIOD – Estação de Rio de Janeiro - IBGE

RJCG – Estação de Campos dos Goytacazes

$R_m$  – Raio médio da Terra

RNMO – Estação de Mossoró

ROCD – Estação de Colorado d'Oeste

ROGM – Estação de Guajará-Mirim

ROJI – Estação de Ji-Parana  
ROSA – Estação de Rosana  
RT – Raio terrestre  
S/A – Disponibilidade seletiva (Selective Availability)  
SAGA – Estação de São Gabriel da Cachoeira  
SALU – Estação de São Luíz  
SAVO – Estação de Salvador-INCRA  
SCCH – Estação de Chapecó  
SCLA – Estação de Lages  
SEAJ – Estação de Aracaju - São Cristóvão  
SMAR – Estação de Santa Maria  
SPS – Serviços de Posicionamento Padrão  
SSC – Início súbito (Storm Sudden Commencements)  
SWEPAM – Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor  
TEC – Conteúdo Total de Elétrons (Total Electron Content)  
TECU – Unidade de TEC (Electron Content Unit)  
TID – Perturbação ionosférica propagante (Travelling Ionospheric Disturbance)  
TOPL – Estação de Palmas  
UBA1 – Estação de Ubatuba (Marégrafo)  
UHF – Faixa de frequência ultra-alta (Ultra High Frequency)  
UT – Hora Universal  
VICO – Estação de Viçosa  
Vp – Velocidade do vento solar  
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
- $d_{\mathcal{R}}^S$  – Atrasos das portadoras no hardware do satélite
- $d_{\mathcal{R}}^R$  – Atrasos das portadoras no hardware do receptor
- $\mathbf{E}$  – Vetor campo elétrico
- $f$  – Frequência nominal, Hz
- $f^s$  – 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
- $g$  – Aceleração da gravidade terrestre,  $m\ s^{-2}$
- $Hm$  – Altura média da ionosfera
- $I_{fR}^S$  – 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
- $n$  – Densidade numérica dos constituintes atmosféricos,  $m^{-3}$
- $N$  – Ambiguidade na observável fase da onda portadora
- $N_e$  – Densidade de elétrons,  $el\ m^{-3}$
- $p$  – Pressão atmosférica,  $Kg\ m^{-2}$
- $R$  – Antena receptora
- $Rm$  – 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  
 $v_f$  – Velocidade da fase portadora  
 $v_g$  – Velocidade da fase de grupo

### **Gregos**

$\delta^S$  – Desvio do relógio do satélite  
 $\delta_R$  – Desvio do relógio do receptor  
 $\rho$  – Distância geométrica  
 $\phi_0^S$  – Fase da onda portadora gerada no receptor  
 $\phi_{0R}$  – Fase da onda portadora gerada no satélite  
 $\lambda$  – 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**

$\nabla$  – Operador nabla  
 $\nabla_p$  – 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

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
1.1 Um breve contexto histórico da relação Sol – Terra .....	31
1.2 Camadas da atmosfera terrestre .....	34
1.3 Magnetosfera terrestre .....	36
1.4 Ionosfera .....	37
1.4.1 Camada D .....	39
1.4.2 Camada E.....	39
1.4.3 Camada F.....	39
1.5 Tempestades Geomagnéticas.....	40
1.5.1 Índices Geomagnéticos.....	43
1.6 Parâmetros Interplanetários .....	47
1.7 Anomalia de Ionização Equatorial .....	47
<b>CAPÍTULO 2. INSTRUMENTAÇÃO .....</b>	<b>49</b>
2.1 Sistemas de Posicionamento Global (“GLOBAL POSITIONING SYSTEM GPS”) .....	49
2.1.1 Segmento Espacial.....	50
2.1.2 Segmento de Controle .....	50
2.1.3 Segmento de Usuário.....	51
2.2 Aplicações. ....	52
2.3 Transmissão dos sinais dos Satélites GPS e suas especificações. ....	53
2.4 Receptores GPS .....	54
2.5 Observáveis GPS .....	55
2.5.1 Pseudodistância .....	56
2.5.1 Fase da Onda Portadora.....	57
2.6 Observáveis e seus erros relacionados .....	59
2.6.1 Refração Ionosférica.....	60
2.7 Determinando o Conteúdo Total de Elétrons (TEC).....	61
2.7.1 Utilizando a observável pseudodistância para calcular o TEC.....	62
2.7.2 Utilizando a observável Fase da Onda Portadora para calcular o TEC.....	63
2.8 Conteúdo Total de Elétrons na vertical (VTEC) .....	64
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISE DE DADOS E OBSERVAÇÃO .....</b>	<b>67</b>
3.1 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 20 março de 2013 (Intensa).....	70

3.1.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA ).....	72
3.1.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados.....	77
3.2 Tempestade geomagnética ocorrida entre 31 de maio a 3 de junho 2013 (Intensa).....	80
3.2.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados.....	87
3.3 Tempestade geomagnética ocorrida entre 5 a 8 de junho de 2013 (Moderada).....	90
3.3.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA ).....	92
3.3.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados.....	97
3.4 Tempestade geomagnética ocorrida entre 13 a 16 de julho de 2013 (Moderada).....	100
3.4.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA ).....	102
3.4.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados.....	107
3.5 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 21 janeiro de 2013 (Moderada).....	110
3.5.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA ).....	112
3.5.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados.....	122
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>126</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>128</b>

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

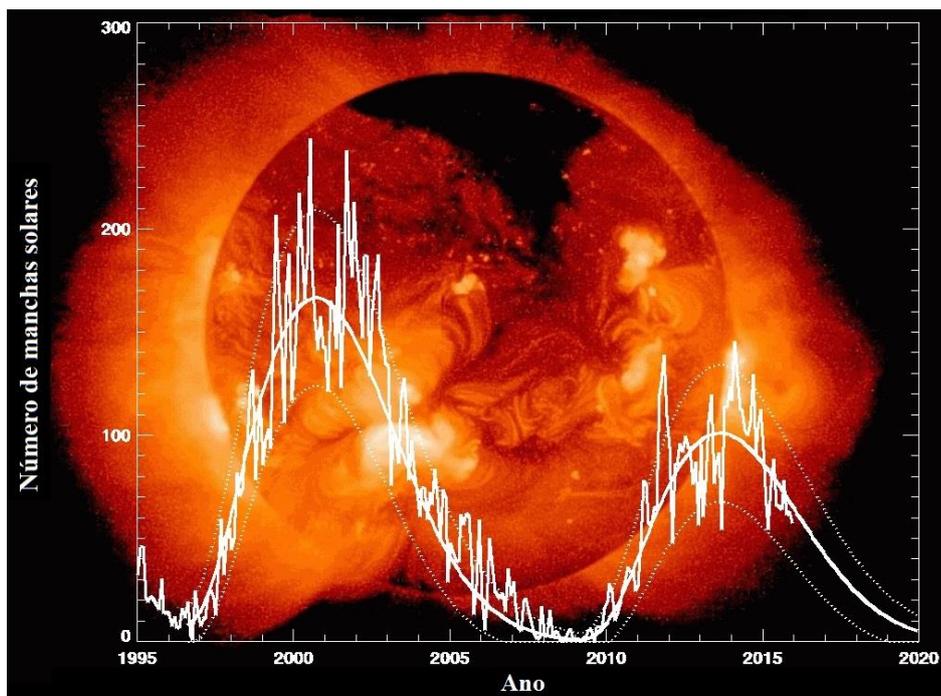
### 1.1 Um breve contexto histórico da relação Sol – Terra

O Sol está sendo estudado há, pelo menos, 4 séculos usando telescópios. Inicialmente, utilizaram-se observações a olho nu. Porém, as informações científicas obtidas, durante essa fase inicial, foram bastante limitadas. Mas, após o desenvolvimento de telescópios óticos e de rádio telescópios, ocorreu um avanço extraordinário na física solar. A partir da década de 70, através de observação a partir do espaço, utilizando instrumentos embarcados em satélite e balões, deu-se outro passo importante no estudo da física solar. Atualmente, técnicas modernas possibilitaram desvendar detalhes das estruturas solares, que antes não eram possíveis.

Com todo este esforço, detalhes importantes sobre as estruturas (manchas solares, filamentos, buracos coronais, etc.), sobre a ejeção de massa coronal, sobre os *flares*, sobre a morfologia das camadas do Sol e sobre o comportamento eletrodinâmico do campo magnético solar foram, aos poucos, sendo desvendados. A descoberta de que o Sol apresenta um ciclo de 11 anos foi feita por Heinrich Schwabe, em 1843, mostrando que o número de manchas solares (regiões escuras no disco solar, com campos magnéticos superiores a 1500 Gauss), apresenta um ciclo característico: o número de manchas solares aumenta e diminui perfazendo um ciclo de aproximadamente 11 anos (CLIVER 1994, 1995; FRIAÇA, et al. 2000).

Durante a atividade solar máxima a quantidade de manchas solares é maior, podendo atingir mais de 100 manchas na sua superfície. Nesse estágio, a radiação eletromagnética ionizante (extrema ultravioleta (EUV) e raios-X) é mais intensa, quando comparada com o período de atividade solar mínima. A Figura 1 mostra o comportamento dos 2 últimos ciclos solares (ciclo 23 e ciclo 24) em função do número de manchas solares ao longo do tempo. O ciclo solar 24 teve início em 2008 e o seu termino está previsto para 2019, neste momento encontra-se na fase descendente (MATSUOKA, et al., 2013).

Figura 1 – Representação gráfica dos ciclos solares 23 e 24.



Fonte: Adaptado de Solar Science (2016)

O nascimento da Física da relação Sol – Terra teve início com as pesquisas de Edward Sabine, que, em 1852, mostrou existir uma relação entre o número de manchas solares e a ocorrência de distúrbios no campo magnético terrestre, ou seja, durante o período em que o número de manchas solares é máximo, o número de distúrbios no campo geomagnético é maior, estabelecendo, assim, uma correlação entre os dois fenômenos. No entanto, naquele momento, ele não conseguiu estabelecer o mecanismo pelo qual o campo magnético terrestre era afetado pelo campo magnético solar. Por esse motivo, a ideia de Sabine sofreu uma forte oposição, principalmente do Lord Kelvin, que, em 1863, calculou que o campo magnético solar necessitaria ser 120 vezes mais intenso, para causar algum tipo de perturbação no campo magnético terrestre. Alguns anos após as críticas de Lord Kelvin, foi sugerido por George Biddell Airy, em 1868, que as variações bruscas do campo magnético terrestre (distúrbios geomagnéticos) poderiam ser causadas por correntes elétricas, transientes, próximas à Terra (CLIVER 1994 E CLIVER 1995).

Em 1878, Balfour Stewart sugeriu que a variação diária, no campo magnético terrestre, poderia ser causada por correntes elétricas na alta atmosfera. A sua hipótese era que um gás menos denso e bom condutor se movimentava através das linhas de campo magnético terrestre, devido à ação dos ventos de marés atmosféricas e assim poderia gerar correntes

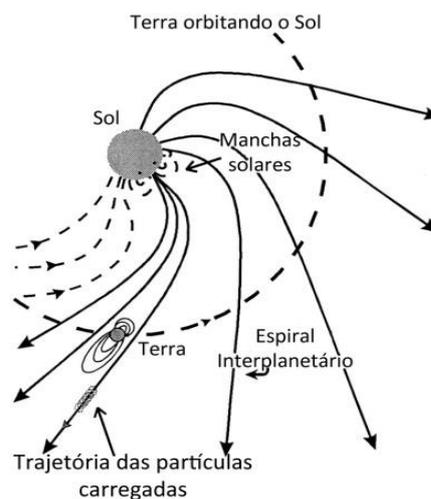
elétricas e conseqüentemente campos magnéticos. Nascia, assim, a física da ionosfera. Em 1899, Guglielmo Marconi realizou a transmissão de sinais sem fios, através do canal da Mancha, e posteriormente, em 1901, transmitiu sinais da Inglaterra até St. John's Newfoundland (agora Canadá), usando a ionosfera como refletor.

Porém, somente um século após a descoberta do ciclo solar de 11 anos e da relação entre distúrbios magnéticos e o número de manchas solares, outro passo importante foi dado no sentido de entender o acoplamento entre o Sol-Terra: a descoberta da existência do vento solar por Parker E. (1958), que expandiria o horizonte da física da relação Sol-Terra, via a interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre (magnetosfera-ionosfera-termosfera).

Durante períodos calmos a velocidade do vento solar é da ordem de 300 – 500 km/s e a densidade entre 5 -10 partículas  $\text{cm}^{-3}$ . Os períodos perturbados se caracterizam pela ejeção de uma enorme quantidade de plasma, este fenômeno é chamado de Ejeção de Massa Coronal (do inglês *Coronal Mass Ejection* - CME) (KIRCHHOFF, 1991). Assim, durante períodos perturbados a velocidade e densidade de partículas são drasticamente alteradas para valores entre 800 - 1500 km/s e 20 – 40 partículas  $\text{cm}^{-3}$ , respectivamente.

Devido à rotação solar, o campo magnético interplanetário (do inglês *interplanetary magnetic field* - IMF) assume a forma de “saia de bailarina” (Veja Figura 2), tornando assim a interação entre o vento solar e o IMF ainda mais complexa (ABREU, 2007; GARNIERI, 2005).

Figura 2 – Campo magnético interplanetário (IMF) proveniente do Sol com seu formato espiral.



Fonte: Adaptado de Observations of magnetic fields (2016).

As partículas oriundas das CMEs por possuírem uma velocidade e densidade diferente das partículas do meio ambiente interplanetário e, portanto, durante o seu trajeto troca momento e energia com o meio interplanetário. As CMEs podem atingir a Terra em 2 ou 3 dias, se estiver viajando na direção da Terra. Se a componente do campo magnético interplanetário intrínseco a CME estiver direcionada para o sul teremos uma melhor geoficiência no acoplamento Sol-Terra.

A nossa sociedade se beneficiou significativamente das pesquisas em física da ionosfera, durante o último século (comunicação de longa distância, transmissão de dados e sinais via satélite e posicionamento global e navegação). Porém, a mesma sociedade tornou-se extremamente dependente dessas novas tecnologias, e o emprego 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, e bem como o acoplamento entre as diversas camadas da atmosfera terrestre é importante para o progresso da sociedade moderna.

Foi investigado 8 tempestades geomagnéticas moderadas e intensas, mas para efeito didático faremos a apresentação de apenas 5 eventos geomagnéticas que ocorreram durante o período compreendido entre janeiro e julho de 2013 (máximo solar do ciclo solar 24). O estudo foi realizado utilizando em média 80 estações de GPS-TEC distribuídas sobre o território brasileiro.

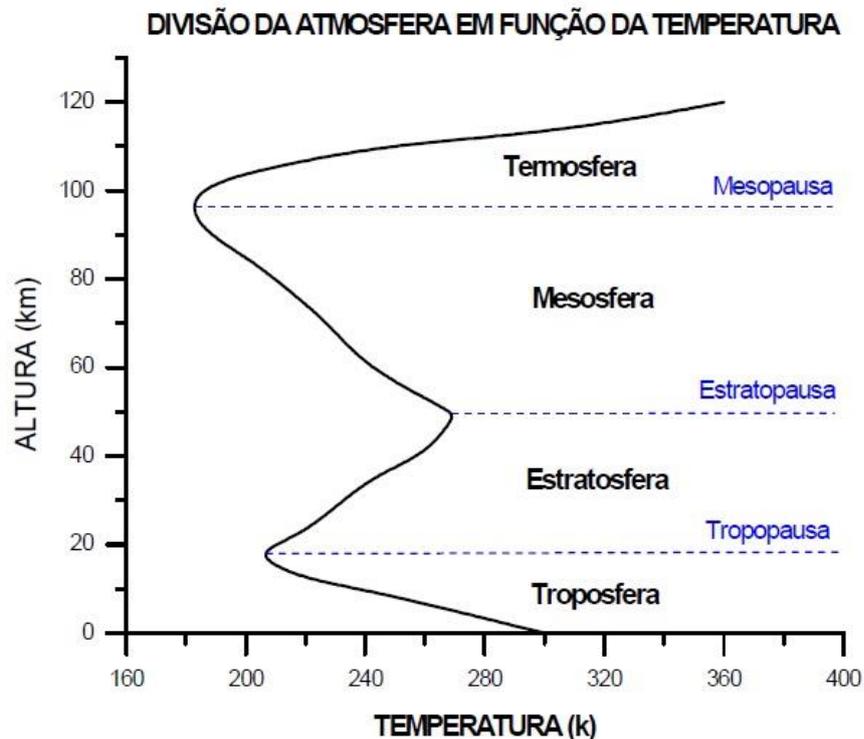
## **1.2 Camadas da atmosfera terrestre**

A atmosfera terrestre é classificada em camadas conforme sua temperatura, grau de ionização e composição química (HARGREAVES, 1992). As camadas são nomeadas e definidas através das mudanças na temperatura em função da altitude (MOHANAKUMA, 2008), como mostra a Figura 3. Conforme indicadas:

- Troposfera é a camada mais próxima da superfície Terrestre. Sua altura é de 20 km no equador e de 10 km nos polos. Sua temperatura média é aproximadamente a 290 K (17°C) e no topo (18 km) chega a 210 K (-63° C).

- Estratosfera é segunda camada da atmosfera terrestre, começando após a tropopausa e chega a uma altura máxima de aproximadamente 50 km. A temperatura média é 215 K (-58° C) e no topo pode chegar a 270 K (-3° C).
- Mesosfera está entre estratopausa e mesopausa, sua altura está entre 50 e 100 km. A temperatura média é aproximadamente 270 K (-3° C) no topo chega a 185 K (-88° C).
- Termosfera está acima de 100 km podendo chegar até 650 km da superfície da Terra. A temperatura no topo varia entre 1000 K (727° C) e 2000 K (1727° C) dependendo do ciclo solar.
- Exosfera é a camada mais afastada da superfície Terrestre. É uma região de mudanças entre a atmosfera e o meio interplanetário. O limite superior está entre 960 a 1000 km. Nessa altitude o ar torna-se menos denso e é onde as moléculas de gás escapam para o espaço.

Figura 3 – Classificação da Atmosfera em Função do Gradiente de Temperatura.



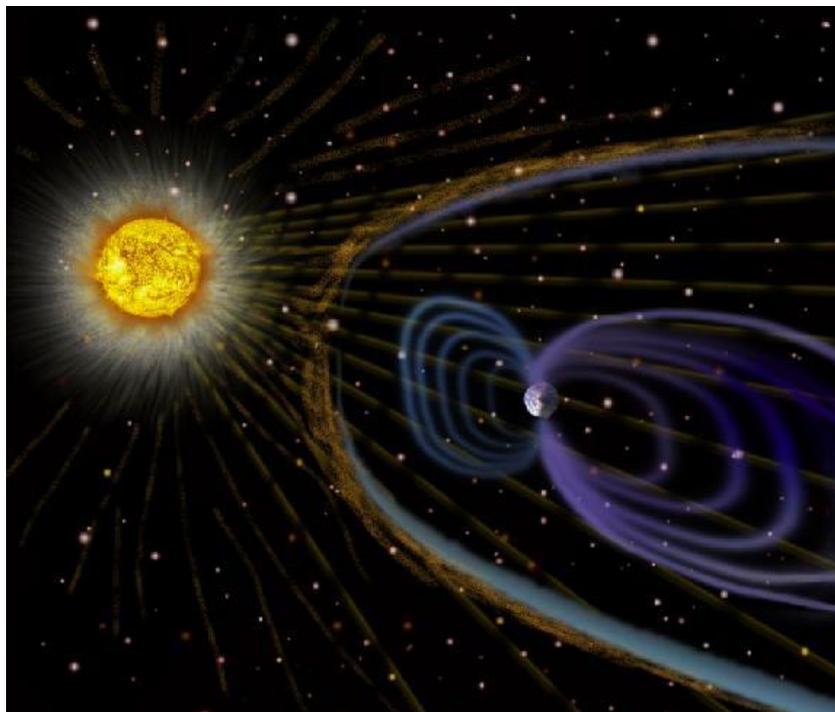
Fonte: Aranha (2006)

### 1.3 Magnetosfera terrestre

Acima das camadas, a cerca de 1000 km, cujo limite é a magnetopausa temos a magnetosfera. Essa região controla a dinâmica das partículas carregadas (constituído principalmente por prótons e elétrons) através do campo magnético da Terra (CMT) funcionando como se fosse um escudo, protegendo-se das partículas que viajam pelo espaço, bloqueando para que não cheguem à superfície terrestre (KIRCHHOFF, 1991).

Na Figura 4 é possível notar que o vento solar comprime a magnetosfera terrestre na face voltada para o Sol (~10 Raios Terrestre) e alonga na face oposta (~ 60 RT), desta forma alterando o formato da magnetosfera.

Figura 4 – Ilustração do vento solar interagindo com a magnetosfera terrestre.



Fonte: SOHO – NASA (2016)

O CMT controla o movimento das partículas ionizadas e as configurações de campos na magnetosfera e na ionosfera, assim qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em mudanças nas condições de transporte do meio ionizado. As tempestades geomagnéticas mais intensas são frequentemente relacionadas à ocorrência de uma CME (MATSUOKA, et al., 2013).

## 1.4 Ionosfera

A ionosfera é a região da atmosfera superior terrestre, classificada de acordo com a ionização e é composta por partículas livres carregadas (íons e elétrons). Ela se estende entre aproximadamente 50-1000 km de altitude. Nesta região o plasma é fracamente ionizado e em torno de 300 km existe o pico de ionização, no qual a densidade eletrônica é máxima.

A radiação solar na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e dos raios-X são os principais agentes ionizantes que ao interagir sobre a atmosfera neutra produz pares de íons-elétrons. Esse processo ocorre durante a fotoionização, que consiste na produção de partículas, quando a radiação solar incide sobre átomos e moléculas (KIRCHHOFF, 1991).

A precipitação de partículas de alta energia é considerada um processo secundário de ionização. As partículas carregadas podem vir de diversos lugares, como galáxias, Sol, magnetosfera e ionosfera. Na Tabela 1 apresentamos os potenciais de ionização e o comprimento de onda específico que ioniza os gases existentes na atmosfera.

Tabela 1 – Gases existentes na nossa atmosfera e seus potenciais de ionização seguido do máximo comprimento de Onda.

Espécie	Potencial de Ionização (eV)	Máximo Comprimento de Onda ( $\lambda_{max}$ )	
		(Å)	(nm)
NO	9,25	1340	134,0
O <sub>2</sub>	12,08	1027	102,7
H <sub>2</sub> O	12,60	985	98,5
O <sub>3</sub>	12,80	970	97,0
H	13,59	912	91,2
O	13,61	911	91,1
CO <sub>2</sub>	13,79	899	89,9
N	14,54	853	85,5
H <sub>2</sub>	15,41	804	80,4
N <sub>2</sub>	15,58	796	79,6
Ar	15,75	787	78,7
Ne	21,56	575	57,5
He	24,58	504	50,4

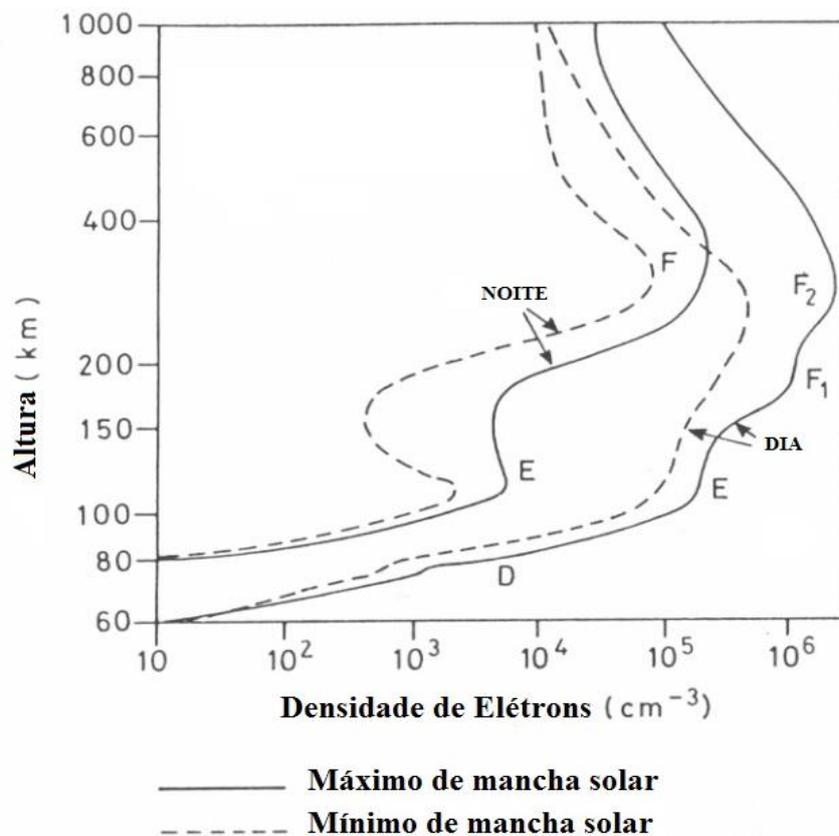
Fonte: Adaptada de Hargreaves (1992)

A produção de partículas livres carregadas gera um pico na atmosfera, chamado de pico de ionização. O número de íons produzidos é proporcional ao número de fótons incidentes e ao número de partículas ionizadas. Dessa forma a densidade atmosférica reduz com a altura. Assim, nos níveis inferiores, ainda que exista aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons diminui consideravelmente. Isso ocorre porque parte

da radiação ionizante foi integrada/absorvida nos níveis superiores e a taxa de perda domina sobre a taxa de produção de elétrons (DAL POZ, 2010; KIRCHHOFF, 1991).

Em função da variação vertical da densidade eletrônica com a altura podemos classificar a ionosfera em 3 camadas (D, E e F). A Figura 5 mostra a variação da densidade eletrônica com o ciclo solar (máximo e mínimo) e a variabilidade diária (dia e noite).

Figura 5 – Perfil vertical da ionosfera.



Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997).

A produção de partículas carregadas requer radiação solar direta de modo que a concentração de íons diminui do dia para a noite. Assim a região D deixa de existir à noite logo ao pôr do sol, a região E enfraquece notavelmente até desaparecer e a região F, pela sua configuração, continua presente durante a noite, mais enfraquecido.

### 1.4.1 Camada D

A camada D está entre 50-80 km de altura e é ionizada ao longo do dia através de raios-X, da linha espectral Lyman-alfa e de raios cósmicos. Os choques entre elétrons, íons e partículas neutras são frequentes na camada D e causa redução nos sinais de rádio ao relacionam-se com a ionosfera. À noite, quando não possui radiação solar, a camada D deixa de existir em poucos minutos após o pôr do sol. Esta camada é estreita e mostra um enfraquecimento considerável nas concentrações de elétrons.

### 1.4.2 Camada E

A camada E está entre 80-130 km de altura. Quando atingidas pelos raios-X, que depende da atividade solar e do ângulo zenital do sol, produz ionização de  $N_2$ ,  $O_2$  e  $O$ . Após a ionização, o resultado da fotoionização e da troca de cargas são os íons  $NO^+$  e  $O_2^+$ . A camada E existe durante o dia e desaparece após algumas horas do pôr do sol, sua concentração é da ordem de  $10^{11}$  elétrons  $m^{-3}$ .

### 1.4.3 Camada F

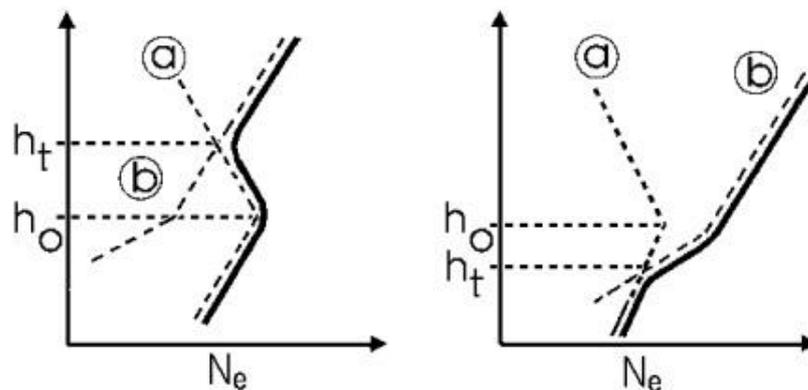
A camada F, subdividida em F1 (130 a 200 km) e F2 (200 a 1000 km), está presente durante o dia e a noite. Esta camada é formada através da ionização do oxigênio atômico  $O$  pela radiação EUV gerando elétrons livres e  $O^+$ . A concentração da densidade vai depender do ângulo zenital do sol e da atividade solar.

A Figura 6 mostra o pico (ou inflexão) característico da região F1. Essa região é de interesse por causa da transição das leis quadráticas e linear para a perda eletrônica. A curva vertical de densidade eletrônica  $N_e$ , dependendo da altura máxima de perda quadrática  $h_o$ , sofre alterações para perda linear onde passa a dominar todo o processo. Assim, para camadas mais baixas da ionosfera, como as camadas D e E, o que predomina é a perda eletrônica quadrática e nas camadas mais alta (camada F) o que domina é a perda linear (ARANHA, 2006; KIRCHHOFF, 1991).

A região F1 desaparece durante a noite permanecendo somente a região F2, que é composta principalmente de elétrons livres e  $O^+$ . A sua formação e concentração de elétrons são dependentes da difusão, mas pode variar com a atividade solar. Esta região apresenta os

maiores valores de concentração de elétrons livres ao longo do dia tendo o seu pico ao meio-dia local e nas primeiras horas da tarde. No decorrer da noite a concentração diminui, mas não desaparece, devido aos efeitos da difusão e da radiação provinda de outras fontes (PAIVA, 2004).

Figura 6 – Estrutura de formação da região F1 segundo o comportamento das perdas quadráticas (curva a) e linear (curva a) no qual se pode formar um pico na concentração eletrônica ou apenas uma inflexão.  $N_e$ : densidade eletrônica;  $h_o$ : altura do máximo da perda quadrática e  $h_t$ : altura de transição.



Fonte: Adaptado de Kirchhoff (1991)

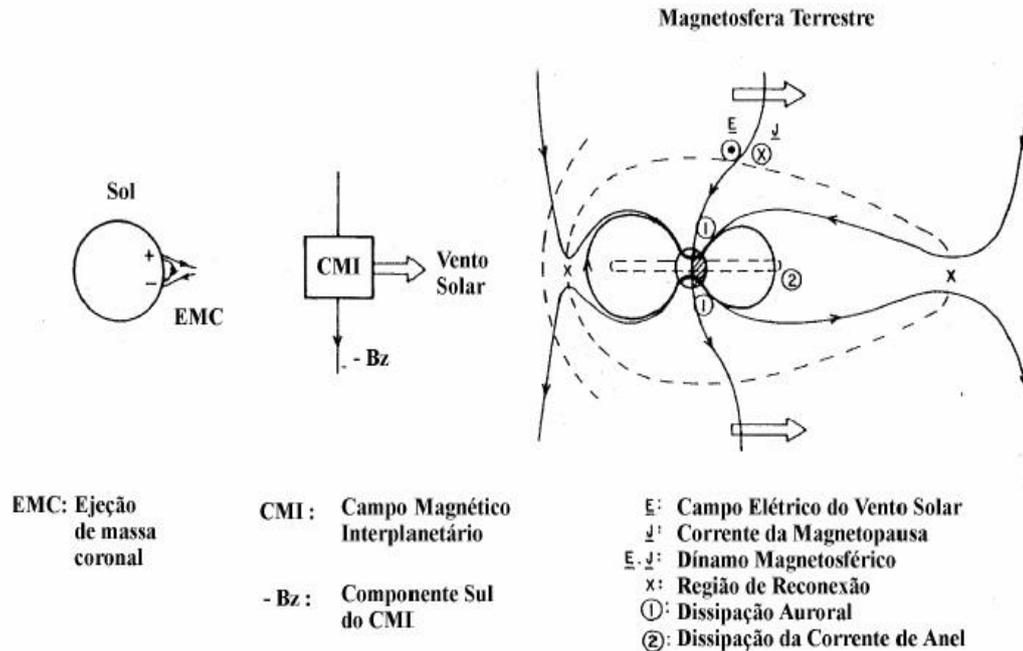
### 1.5 Tempestades Geomagnéticas

As observações solares são consideradas fundamentais para o estudo da física da relação Sol-Terra. Emissões nos mais diversos comprimentos de onda e partículas lançadas e trazidas pelo vento solar atingem a Terra a todo o momento. Radiações e CMEs, oriundas do Sol, causam perturbações diversas na Terra, podendo gerar tempestades magnéticas e até alterações significativas no nível de eletrização da atmosfera e da ionosfera (ABREU, 2007).

As tempestades geomagnéticas ocorrem pela entrada de energia do vento solar na magnetosfera pelo processo de reconexão magnética (veja Figura 7). As linhas do campo magnético interplanetário quando direcionadas para o sul conectam com as linhas do campo magnético da Terra, que são direcionadas para o norte. A linha reconectada é conduzida sobre a calota polar na direção da cauda da magnetosfera. Em seguida ocorre uma nova reconexão. Esse evento é responsável por introduzir uma grande quantidade de energia para dentro da magnetosfera (TSURUTANI E GONZALEZ 1997; GARNIERI, 2005).

A reconexão é considerada o principal processo de transferência de energia para dentro da magnetosfera.

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



Fonte: Adaptada de Tsurutani e Gonzalez (1998).

As tempestades geomagnéticas ocorrem quando existe um aumento repentino na velocidade do vento solar junto ao IMF quando direcionado para o sul. As tempestades são classificadas em diferentes fases e intensidades. O principal índice para caracterizar a tempestade é o Dst (do inglês *Disturbance Storm Time*). A Figura 8 apresenta a variação típica do Dst durante um período perturbado além de indicar a fase inicial, fase principal e fase de recuperação.

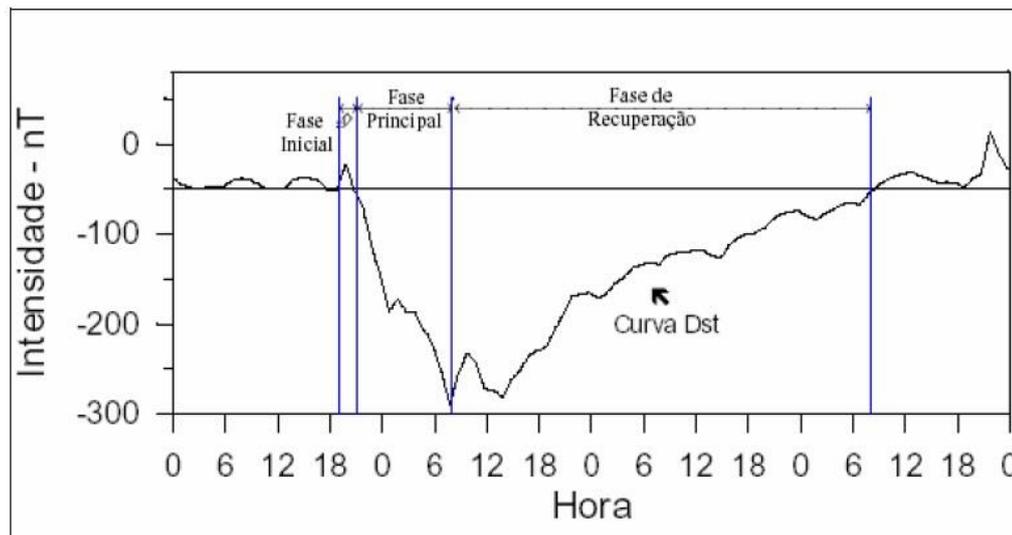
Antes do início da tempestade o índice Dst exibe uma elevação positiva denominada fase inicial ou início súbito (do inglês *Storm Sudden Commencements* – SSC). A ocorrência do SSC não é essencial para que aconteça uma tempestade geomagnética. Assim, podemos dizer que a fase inicial não é uma característica fundamental para ocorrências (JOSELYN E TSURUTANI, 1990). Após o SSC temos a fase principal, no qual ocorre uma queda brusca no índice geomagnético. É nesse período que o Dst alcança o valor mínimo, no qual classificamos a tempestade em fraca, modera, intensa ou muito intensa) (GONZALEZ, et al., 1994; FEDRIZZI 2003). Depois da fase principal o Dst começa a elevar iniciando a fase de

recuperação até atingir valores parecidos quando não havia tempestades (classificado como dias calmos) (YAMASHITA, 1999).

O Dst apresenta este comportamento em razão do intenso acréscimo de partículas presa na magnetosfera por causa da Taxa de variação do campo geomagnético e de sua curvatura, que transportam a derivas dessas partículas (íons de Leste para Oeste e elétrons de Oeste para Leste) gerando a Corrente de anel (GONZALEZ, et al.,1994).

A corrente de anel é o fluxo de partículas carregadas, localizada ao redor da Terra, causado por alterações do campo geomagnético e aprisionada por ele em razão da não uniformidade do CMT. A corrente de anel está em torno da Terra produzindo um campo magnético que é diretamente oposto ao campo magnético da Terra, ou seja, se a diferença entre elétrons e prótons fica maior, o CMT se tornará mais fraco. O Dst com valores negativo significa que o CMT está enfraquecido. Isso ocorre durante uma tempestade geomagnética.

Figura 8 – Variação do índice Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982. As diferentes fases das tempestades estão indicadas por linhas verticais



Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)

Os efeitos mais comuns das tempestades geomagnéticas são: intensificação de correntes elétricas na magnetosfera e na ionosfera, ocorrência de auroras nas regiões polares, aceleração de partículas carregadas e a alterações drásticas na eletrodinâmica da ionosfera. Essas alterações na ionosfera causam interferência no desempenho dos satélites e no Sistema de Posicionamento Global (GPS) em telecomunicações, e até mesmo em astronautas que se encontram em naves espaciais, devido a radiação solar (SAVIAN, et al., 2005).

Quando ocorrem eventos geomagnéticos a ionosfera sofre alterações na sua composição, na sua densidade eletrônica e na sua dinâmica. Essas mudanças podem durar horas ou até mesmo por alguns dias dependendo da intensidade da tempestade geomagnética. Sempre que acontece um aumento (comparado com a média dos dias calmos) na densidade de elétrons na ionosfera causado pela eletrodinâmica das tempestades geomagnéticas chamamos de "tempestade ionosférica positiva ou distúrbio ionosférico positivo". Se ocorrer o inverso, diminuição na densidade de elétrons, chamamos de "tempestade ionosférica negativa ou distúrbio ionosférico negativo". Os distúrbios ionosféricos negativos são causados por alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de O/N<sub>2</sub>, devido a perturbações atmosféricas e os distúrbios ionosféricos positivos podem ser influenciadas por vários mecanismos, sendo eles (GONCHARENKO et al., 2007, HUANG et al., 2005, de ABREU et al., 2010 e 2014 e FAGUNDES et al., 2016):

- a) Aumento na densidade de oxigênio atômico.
- b) Ventos meridionais perturbados que desloca a ionosfera para maiores altitudes, onde as taxas de recombinação são mais baixas.
- c) Campos elétricos perturbados para o Leste que deslocam a ionosfera maiores altitudes onde as taxas de recombinação são mais baixas.
- d) Fluxo de plasma protoferico para baixo.
- e) Perturbações ionosféricas propagantes (do inglês *Travelling Ionospheric Disturbances* – TIDs).
- f) Redistribuição de plasma, devido a campos elétricos perturbados.

### 1.5.1 Índices Geomagnéticos

A função dos índices geomagnéticos é fornecer informações sobre o comportamento das atividades geomagnéticas na Terra. Na região Auroral temos os índices AU, AL e AE. Nas regiões Subauroral temos os índices Kp e Ap e para as regiões de medias e baixas latitudes os índices usados são o Dst, o SYM-H e o ASY-H. Os mais utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas são os índices *Disturbance Storm Time* (Dst), *Planetarische Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e *Auroral Electrojet* (AE) (FEDRIZZI, 2003; AKEL, 2010).

Utilizaremos para este trabalho os índices Kp, Dst e os parâmetros interplanetários Bz (componente vertical do campo magnético interplanetário), Np (densidade de prótons do

vento solar) e Vp (velocidade do vento solar) que são obtidos através do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*).

### Índice Kp

O índice K é um índice local quase logarítmico que engloba as alterações envolvidas nas atividades geomagnéticas, em intervalos de 3 horas, referente à curva do dia calmo para um observatório magnético estabelecido (FEDRIZZI, 2003). As medidas obtidas são modificadas para uma escala quase logarítmica no qual os valores podem mudar de acordo com a Tabela 2 (FEDRIZZI, 2003). Os valores do índice Kp, mostrado na Tabela 2 é utilizado para classificar as atividades geomagnéticas.

Tabela 2 – Classificação das atividades geomagnéticas através dos valores do índice Kp.

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

Fonte: Fedrizzi (2003)

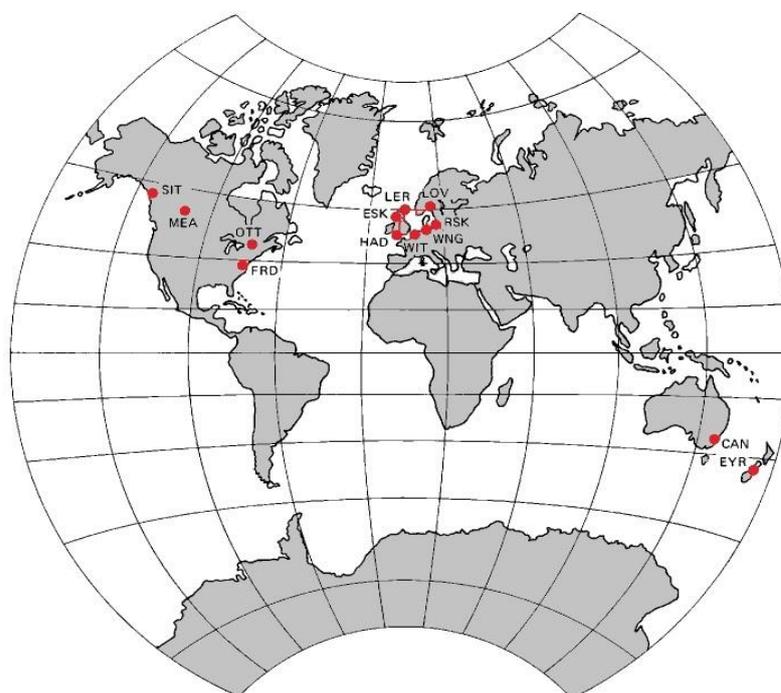
O índice interplanetário Kp, inserido por J. Bartels em 1949, é derivado do índice K que segue uma padronização de 13 observatórios magnéticos (GFZ, 2016). O índice Kp é a média aritmética dos valores encontrados nos 13 observatórios, que estão espalhados pela Terra. O Kp é obtido a cada 3 horas, iniciando a zero hora. Assim, um dia possui 8 valores (YAMASHITA, 1999). Na Tabela 3 apresentamos informações (Nome, país, latitude, longitude e sigla) de cada observatório seguindo da Figura 9 que ilustra as localizações dos observatórios.

Tabela 3 – Lista completa contendo informações dos 13 observatórios magnéticos espalhado por todo o globo terrestre.

	Sigla	Nome	País	Lat	Long
1	LER	Lerwick	Escócia	60 ° 08 '	358 ° 49 '
2	MEA	Meanook	Canadá	54 ° 37 '	246 ° 40 '
3	SIT	Sitka	Alasca	57 ° 03 '	224 ° 40 '
4	ESK	Eskdalemuir	Escócia	55 ° 19 '	356 ° 48 '
5	LOV	Lovo	Suécia	59 ° 21 '	17 ° 50 '
	UPS	Uppsala	Suécia	59 ° 54 '	17 ° 21 '
6	AGN	Agincourt	Canadá	43 ° 47 '	280 ° 44 '
	OTT	Otawa	Canadá	45 ° 24 '	284 ° 27 '
7	RSV	rude Skov	Dinamarca	55 ° 51 '	12 ° 27 '
	BFE	Brorfelde	Dinamarca	55 ° 37 '	11 ° 40 '
8	ABN	Abinger	Inglaterra	51 ° 11 '	359 ° 37 '
	HAD	Hartland	Inglaterra	50 ° 58 '	355 ° 31 '
9	WNG	Wingst	Alemanha	53 ° 45 '	9 ° 04 '
10	WIT	Witteveen	Holanda	52 ° 49 '	6 ° 40 '
	NGK	Niemegk	Alemanha	52 ° 04 '	12 ° 41 '
11	CLH	Cheltenham	EUA	38 ° 42 '	283 ° 12 '
	FRD	Fredericksburg	EUA	38 ° 12 '	282 ° 38 '
12	TOO	Toolangi	Austrália	-37 ° 32 '	145 ° 28 '
	CNB	Canberra	Austrália	-35 ° 18 '	149 ° 00 '
13	AML	Amberley	nova Zelândia	-43 ° 09 '	172 ° 43 '
	EYR	Eyrewell	nova Zelândia	-43 ° 25 '	172 ° 21 '

Fonte: Adaptado de GFZ (2016)

Figura 9 – Mapa da localização da rede de observatórios magnéticos responsável pelo índice Kp disseminado por toda Terra.



Fonte: Adaptado de INGV (2016).

## Índice Dst

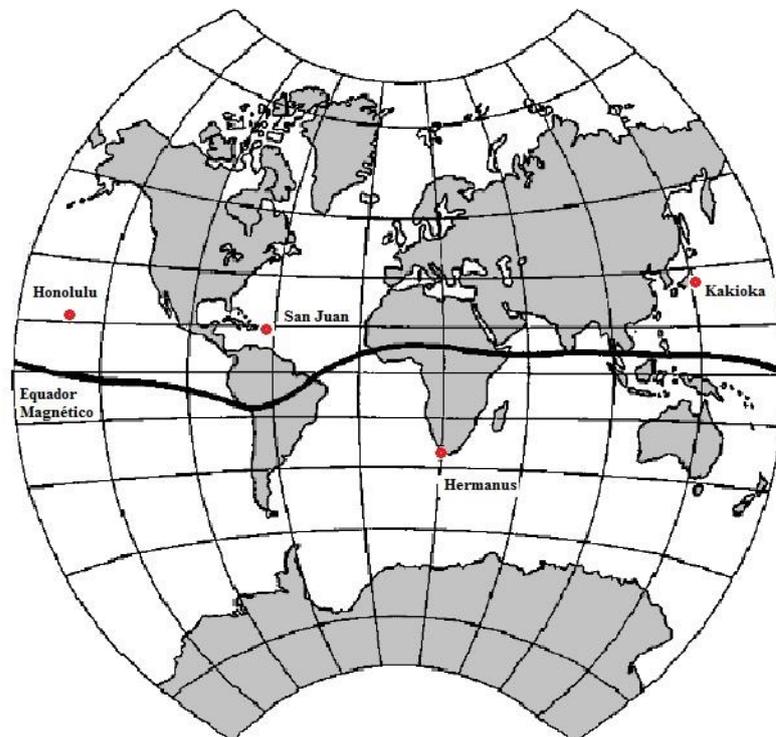
O índice Dst é utilizado para medir a intensidade de uma tempestade geomagnética. Toda alteração que ocorre na corrente de anel da magnetosfera terrestre é monitorada por esse índice (SUGIURA E CHAPMAN, 1960). Os dados são obtidos a partir de uma rede de observatórios geomagnéticos localizados em baixas latitudes e distribuídos longitudinalmente. Na Tabela 4 mostramos suas localizações e em seguida ilustramos em um mapa suas posições na Figura 10.

Tabela 4 – Denominação e localização da rede de observatório geomagnético responsável pelo índice Dst.

	Nome	País	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
1	Hermanus	África do Sul	- 34,40 °	19,22 °	-33,3 °
2	Kakioka	Japão	36,23 °	140,18 °	26,0 °
3	Honolulu	Hawai	21,32 °	201,98 °	21,1 °
4	San Juan	Porto Rico	18,38 °	293,88°	29,9 °

Fonte: Abreu (2007)

Figura 10 – Mapa contendo a rede de observatório geomagnético encarregado pelo índice Dst.



Fonte: Adaptado de Abreu (2007)

Na Tabela 5 apresentamos os valores do índice Dst que são utilizadas para classificar a intensidade das tempestades geomagnéticas.

Tabela 5 – Classificação das Tempestades geomagnéticas através dos valores do índice Dst.

<b>Intensidade da Tempestade</b>	<b>Dst (nT)</b>
Muito intensa	< - 250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a – 100
Fraca	-30 a -50

Fonte: Fedrizzi (2003)

## 1.6 Parâmetros Interplanetários

Utilizando o satélite ACE, um dos satélites responsável por monitorar o vento solar, conseguimos informações sobre parâmetros interplanetários que são utilizados para estudar eventos eletromagnéticos. O satélite ACE possui equipamentos responsáveis por observar cada parâmetro do vento solar e enviar para a central de monitoramento do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*): (SAVIAN, et al., 2005).

- O instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*) que é encarregado por fornece observações do Campo Magnético Interplanetário e suas componentes (B, Bx, By, Bz) (SMITH, et al., 1998);
- O instrumento SWEPAM (*Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor*) que é designado a fornece observações da velocidade do Vento Solar, temperatura de prótons e densidade de prótons (Vp, Tp, Np) (MCCOMAS, et al., 1998).

## 1.7 Anomalia de Ionização Equatorial

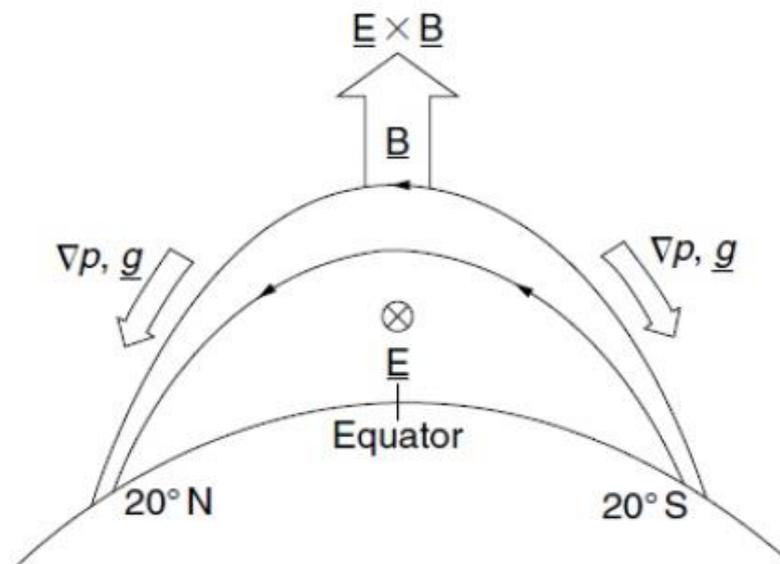
Sabemos que a Anomalia de Ionização Equatorial (*Equatorial ionization anomaly* – EIA) também conhecida como anomalia de Appleton, é um evento que acontece na ionosfera em razão da movimentação elétrica na região equatorial.

Ao longo do dia as condutividades das regiões E e F são acopladas através das linhas de campo magnético, o que curto-circuita o dínamo da região F. Como a condutividade na região E é elevada o circuito de corrente por meio das linhas de campo fica mais efetivo. Em razão

da presença dos campos elétricos zonais para Leste, o plasma ionosférico no equador segue em direção a altitudes mais elevadas. Em seguida, o processo de difusão conduz o plasma em direção a latitudes mais afastadas do equador. Este transporte de plasma para fora do equador é conhecido como efeito fonte equatorial. Por causa desse efeito, aparece ao norte e ao sul do equador, entre  $\sim 15^\circ$ - $20^\circ$  de latitude, regiões com concentração elevada de plasma. Estas regiões são denominadas cristas da anomalia de ionização equatorial (MOOR 2011).

A Figura 11 mostra os efeitos da deriva  $\vec{E} \times \vec{B}$  e da difusão que tentam produzir uma distribuição perfeita de ionização sobre o equador mais não consegue devido à ação dos ventos neutros termosféricos (KELLEY 2009b).

Figura 11 – Representação das forças que agem sobre o plasma. Efeito fonte criando a anomalia equatorial de ionosférica.



Fonte: Kelley 2009b

## CAPÍTULO 2. INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo iremos abordar o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System - GPS*) que é a principal ferramenta investigativa do nosso estudo. O GPS é uma constelação de satélites que ficam orbitando a Terra, emitindo ondas eletromagnéticas na faixa de frequência ultra-alta (*Ultra High Frequency – UHF*) 300 MHz a 3 GHz, que utiliza valores aproximados entre 1200 a 1500 MHz.

Apresentaremos uma breve introdução sobre sinais transmitidos, suas aplicações e principais observáveis. Além de citar os erros mais comuns relacionados com as observáveis de GPS e suas fontes. Também será mostrado o cálculo para definir o TEC (*Total Electron Content – Conteúdo Total de Elétrons*) e VTEC (*Vertical Total Electron Content – Conteúdo Total de Elétrons na Vertical*).

### 2.1 Sistemas de Posicionamento Global (“GLOBAL POSITIONING SYSTEM GPS”)

O GPS é um sistema de posicionamento ou radionavegação por satélites com alcance mundial do qual um usuário pode indicar sua posição e tempo em qualquer lugar no globo terrestre. Esse sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*Department of Defense – DoD*), com propósito de ser o principal sistema de navegação das forças armadas norte americano. São surpreendentes suas aplicações no qual são usados na agricultura, controle de frotas, geodésicos, navegações, posicionamentos e até mesmo no monitoramento ionosférico (MONICO, 2000). Explicamos o funcionamento do GPS sendo o conjunto de vários satélites que permite a um usuário (Aeronaves, pessoas, veículos, etc), em qualquer lugar do globo terrestre, estabelecer suas posições tridimensionais (latitude, longitude e altitude), sua velocidade e hora, 24 horas por dia, independente das condições atmosféricas (ROCHA, 2003).

Separamos o GPS em 3 segmentos: espacial, de controle e de usuário que serão apresentados a seguir.

### 2.1.1 Segmento Espacial

O segmento espacial é composto por 32 satélites em órbita, sendo que 24 operacionais (Figura 12), distribuído de forma circular todo o globo terrestre em 6 órbitas distintas. Essas órbitas estão em planos de inclinação de  $55^\circ$  com relação a linha do equador geográfico, realizando a cada 12 horas uma volta ao redor da Terra. Os satélites estão em torno de 20.200 km de altitude e transmitem ondas eletromagnéticas na frequência de UHF para a Terra (ROCHA, 2003). Cada órbita possui 4 satélites.

Figura 12 – Imagem da constelação dos satélites do sistema GPS.



Fonte: Vaz Tolentino (2015)

### 2.1.2 Segmento de Controle

Os satélites GPS são controlados pelo Segmento de Controle que são estações de monitoramento terrestre. As estações terrestres têm o objetivo de monitorar, corrigir e garantir o correto funcionamento do sistema GPS, podendo, inclusive, modificar parâmetros orbitais. Existem 6 estações, uma de controle central (MASTER) localizada no Colorado, Estados Unidos, e outras 5 de monitoramento que estão localizadas no Hawaí, Kwajalein no Oceano Pacífico, Ilha Ascension no Atlântico Sul, Diego Garcia no Oceano Índico e Cabo Canaveral nos Estados Unidos (Figura 13). As localizações foram estrategicamente escolhidas tendo em vista oferecer um seguimento constante a cada satélite do sistema GPS.

Algumas funções como: monitorar as órbitas dos satélites, correções de posição, manter o tempo GPS (escala de tempo dada pelos relógios atômicos dos satélites), calcular as efemérides dos satélites e parâmetros do relógio e atualizar as mensagens de navegação são bem específicas do segmento de controle (ABREU, 2007).

Figura 13 – Mapa com as localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS.

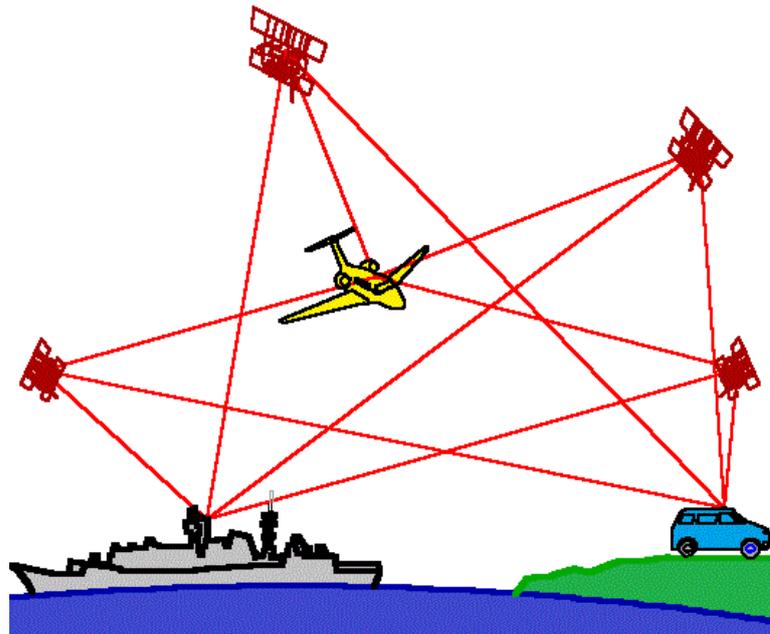


Fonte: Vaz Tolentino (2015)

### 2.1.3 Segmento de Usuário

Formado por receptores o segmento de usuário é de uso civil e militar. Os sinais que são transmitidos pelo conjunto de satélites são recebidos pelos receptores que irão determinar a posição, velocidade do usuário e o tempo GPS. Na Figura 14 representamos os exemplos de segmentos de usuários no qual sua aplicação pode ser na navegação, Geodésia ou em outras atividades que possibilitam o uso dos dados de GPS (MONICO, 2000).

Figura 14 – Representação Gráfica da utilização de receptores GPS com usuários finais.



Fonte: adaptada de Dana (2015).

Encontram-se disponível para o segmento de usuário os serviços SPS (Serviços de Posicionamento Padrão) e o PPS (Serviços de Posicionamento Preciso) sua diferença está na qualidade das precisões e na autorização de utilização do serviço. O SPS é de uso civil que oferece precisões de 100 metros do plano horizontal e 156 metros no plano vertical com a possibilidade estatística de 95%, com a disponibilidade seletiva (*Selective Availability – S/A*) acionada. S/A possui a finalidade de criar um erro intencional produzido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, para controlar a precisão do serviço de GPS. O PPS concede previsões de 22 metros no plano horizontal e 27,7 metros no plano vertical com a possibilidade estatística de 95%, seu uso é de aplicação exclusiva dos militares e entidades autorizadas (KAPLAN E HEGARTY, 2006).

## 2.2 Aplicações.

Por possuir uma ótima precisão e fornecerem dados de maneira constante e em tempo real os GPS estão sendo utilizados atualmente em diversas áreas, no qual podemos ressaltar:

- Aquisição de dados ionosféricos;
- Comunicações;
- Definição de órbitas e posições de satélites;

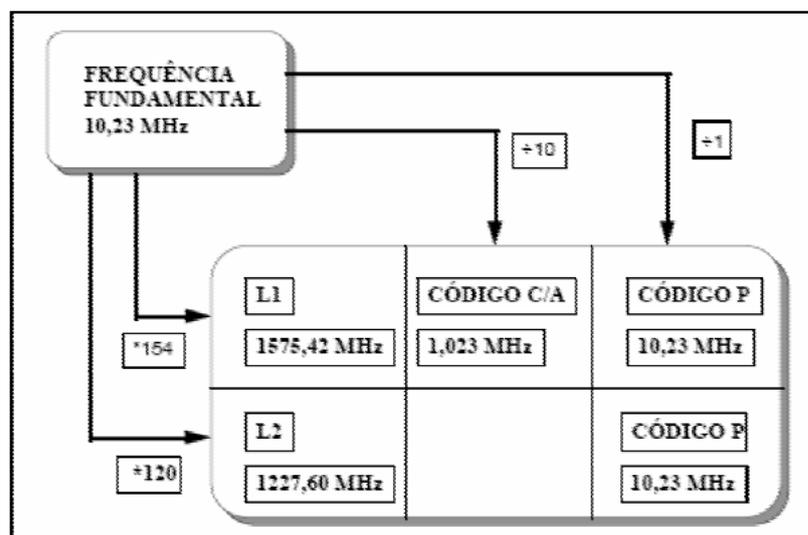
- Localizações (aviões, automóveis, animais, homem, etc);
- Mapeamentos;
- Navegações aéreas, marítimas e terrestres;
- Utilização para exploração de petróleo e afins;

Além dessas aplicações citadas, existem situações que a precisão se torna fator extremamente importante e a qualidade do sinal pode ser potencializada através do sistema de GPS Diferencial (*Differential GPS – DGPS*) (FREDRIZZI, 1999). O DGPS é um receptor GPS estacionário, que se encontra sobre um ponto de coordenadas conhecidas, que define os erros e envia dados com as correções a outros receptores gerando uma melhor precisão. Para exemplificar aplicações que necessitam de máxima precisão podemos citar navegação em rota, procedimentos de pouso e decolagem e aproximação de embarcações em portos e áreas restritas.

### 2.3 Transmissão dos sinais dos Satélites GPS e suas especificações.

Sabemos que os sinais enviados pelos satélites GPS são criados com base da frequência fundamental de 10,23 MHz e multiplicados por 154 e 120, nesta ordem, conseguindo assim as frequências L1 e L2, pertencentes às ondas portadoras gerando as operações sem levar em consideração o tempo.

Figura 15 – Representação sucinta da transmissão de sinais GPS.



Fonte: Adaptado de Monico (2000)

A Figura 15 exibe a representação fundamental da transmissão de sinais de GPS. Através disso, tem-se um resumo das frequências L1 e L2 e seus respectivos comprimentos de onda  $\lambda$  para os diferentes sinais GPS:

$$f_1 = 10,23 \text{ MHz} * 154 \rightarrow L1 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda \cong 19,03 \text{ cm} \quad (1)$$

e

$$f_2 = 10,23 \text{ MHz} * 120 \rightarrow L2 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda \cong 24,45 \text{ cm} \quad (2)$$

A frequência L1 é modulada em fase pelo código C/A (*course-acquisition* – fácil aquisição) e pelo código P (*precise* – preciso) em companhia com as mensagens de navegação. A frequência L2 é modulada somente pelo código P junto com as mensagens de navegação (MATSUOKA, 2003). As informações sobre os relógios, orbitas e funcionamento dos satélites estão contidas nas mensagens de navegação (FEDRIZZI, 1999).

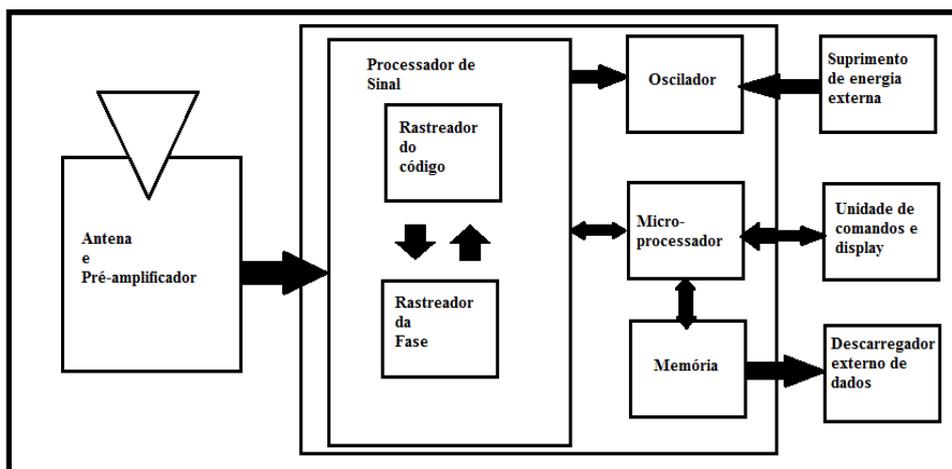
Com base nos códigos PRN (*pseudo-random-noise* – ruído falsamente aleatório) são estabelecidos os códigos C/A e P no qual o PRN é modulado em relação às portadoras que são criadas por algoritmo, ocasionando uma informação codificada em série aleatória de (+1 e -1) ou (0 e 1) (MONICO,2000).

Para uso civil e com comprimento de onda em torno de 300 m o código C/A é criado apenas na portadora L1, no qual é enviado a uma razão de 1,023 MHz. Para uso militar o código P tem o comprimento de onda em torno de 30 m podendo ser criado nas portadoras L1 e L2 e enviado com a frequência de 10,23 MHz. O código P é acessível somente quando o AS (*anti-spoofing*) estiver ativado. AS é um método de criptografia do código P, dando em código Y seguro, tendo em vista resguardar contra usuários não autorizados.

## 2.4 Receptores GPS

Sabemos que para cada situação específica os tipos de receptores se diferem. Embora se encontre uma grande variedade de equipamentos, os receptores GPS possuem praticamente os mesmos componentes de funcionalidades (SEEBER, 1993). Na Figura 16 vemos os componentes básicos de um receptor GPS.

Figura 16 – Esquema básico Receptor GPS.



Fonte: Adaptado de Fedrizzi (1999)

Os receptores utilizam uma antena, na qual permite receber sinais em todas as posições do hemisfério. Após adquirir o sinal, ele é enviado à seção de processamento. O dispositivo de memória é importante porque os dados quando recebidos devem estar sempre disponíveis para um novo processamento. Todos os cálculos, decodificações de informações e processamento dos sinais são gerenciado pelo microprocessador. Assim um receptor GPS identifica 4 ou mais satélites, define a distância para cada um e utiliza esta informação para obter sua posição (MOOR, 2011).

## 2.5 Observáveis GPS

Seeber (1993) descreve sobre 4 tipos de observáveis, que são:

- Medidas de pseudodistância a partir do código;
- Diferenças de pseudodistância a partir da contagem Doppler integrada;
- Fase ou diferença de fase de onda portadora;
- Diferenças do tempo de viagem do sinal a partir das medições interferométricas;

Nesta seção iremos citar somente 2 tipos de observáveis GPS. Primeiramente iremos descrever sobre a pseudodistância e em seguida sobre a fase da onda portadora, ressaltando que esses 2 tipos são os mais importantes para este trabalho.

### 2.5.1 Pseudodistância

O conceito de pseudodistância é a medida de distância entre a antena do satélite, no instante de transmissão do sinal, e a antena do receptor adquirida pelos códigos C/A e P e caracteriza-se através do não sincronismo entre os relógios dos satélites e dos receptores. É o produto da velocidade da luz no vácuo pelo tempo de deslocamento necessário para a máxima correlação da sequência do código emitido pelo satélite e a réplica gerada pelo receptor (CAMARGO, 1999). O tempo de deslocamento refere-se ao tempo de propagação do sinal emitido pelo satélite até a chegada ao receptor.

Hofmann-Wellenhof et al., (2001) descreve a pseudodistância em função do intervalo de tempo  $\Delta t$ , sendo:

$$\Delta t = t_R - t^S \quad (3)$$

$$\Delta t = [t_R(GPS) - \delta_R] - [t^S(GPS) - \delta^S] \quad (4)$$

$$\Delta t = \Delta t(GPS) + \Delta\delta \quad (5)$$

onde

$$\Delta t(GPS) = t_R(GPS) - t^S(GPS)$$

e

$$\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$$

Onde  $t^S$  é o instante da emissão,  $t_R$  o instante da recepção do sinal,  $\delta^S$  o desvio dos relógios do satélite e  $\delta_R$  o desvio do receptor em relação ao tempo GPS.

Resolvendo o produto do intervalo de tempo  $\Delta t$  pela velocidade da luz no vácuo  $c$ , obtemos a pseudodistância  $\mathfrak{R}$ :

$$\mathfrak{R} = c\Delta t = c\Delta t(GPS) + c\Delta\delta = \rho + c\Delta\delta \quad (6)$$

sendo  $\rho$  a distância geométrica entre o satélite e o receptor.

### 2.5.1 Fase da Onda Portadora

A fase da onda portadora é muito mais precisa do que a pseudodistância, no qual é considerada a observável básica para quase todas as atividades geodésicas. Quando é feita a medida inicial não se sabe ao certo o número inteiro de ciclos, que chamamos de ambiguidade  $N$ , entre o receptor e o satélite. O receptor executa a contagem de ciclos inteiros logo após começar a primeira medida que acontece até a próxima medição. Esta situação descreve como a medição da fase de onda portadora se torna ambígua com relação a um número de ciclos inteiros envolvidos entre o receptor e os satélites no período da primeira observação (CAMARGO, 1999).

Hofmann-Wellenhof et al., (2001) refere-se à fase da onda portadora  $\Phi_R^S$  em ciclos, que pode ser representada (equações 7 e 8, nesta ordem) sendo a diferença entre a fase do sinal emitido pelo satélite e a recebida pelo receptor consequência do tempo de propagação da onda através da distância geométrica  $\rho$ .

$$\Phi^S(t) = f^S t - f^S \frac{\rho}{c} - \Phi_0^S \quad (7)$$

$$\Phi_R(t) = f_R t - \Phi_{0R} \quad (8)$$

sendo que,

$$\Phi_0^S = f^S \delta^S$$

e

$$\Phi_{0R} = f_R \delta_R$$

Sabendo que:

- $t$  – sistema de tempo GPS iniciado no instante  $t_0 = 0$ ;
- $f^S$  e  $f_R$  – frequência do sinal gerado pelo oscilador do satélite e receptor respectivamente;

- $\phi_0^S$  e  $\phi_{0R}$  – fases iniciais que contêm os desvios dos relógios em relação ao tempo GPS.

Desta maneira, a fase da onda portadora será:

$$\phi_R^S(t) = \phi^S(t) - \phi_R(t) \quad (9)$$

no qual  $\phi^S(t)$  e  $\phi_R(t)$  indicam, nesta ordem, as diferenças entre fase do sinal recebido do satélite e o criado pelo receptor. Quando efetuamos uma substituição simples na equação 9 obtemos:

$$\phi_R^S(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f^S \delta^S + f_R \delta_R + (f^S - f_R)t \quad (10)$$

Quando separamos de modo progressivo e contínuo as frequências  $f^S$  e  $f_R$  tendo em consideração à frequência nominal  $f$ , percebemos que a diferença é muito pequena, tanto que aproximamos as frequências  $f^S$  e  $f_R$  à  $f$ . Desta forma podemos reescrever a equação 10:

$$\phi_R^S = -f \frac{\rho}{c} - f \Delta\delta \quad (11)$$

Desse modo, a fase da portadora, considerando a ambiguidade  $N$  em certo instante  $t$  e  $\Delta\phi_R^S$  correspondendo à fração de ciclo de fase, será dada por:

$$\phi_R^S(t) = \Delta\phi_R^S|_{t_0}^t + N \quad (12)$$

Efetuada a substituição da equação 12 na equação 11 e levando em consideração  $\Delta\phi_R^S(t_0) = 0$ , conseguimos uma equação para a fase da portadora:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + N \quad (13)$$

no qual

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

e

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

## 2.6 Observáveis e seus erros relacionados

Para melhorar a qualidade do sinal e das medições é necessário diminuir o máximo possível os erros. Para que isso ocorra é preciso conhecer as fontes e erros incluídos no processo. Como em todo processo eletrônico as observáveis GPS também estão sujeitas a erros que podem alterar ou diminuir a precisão das medidas. Esses erros podem ser separados em 3 partes, sendo elas:

- Erros aleatórios – são aqueles que não podem ser evitados, sendo assim uma propriedade característica da observação;
- Erros grosseiros – são causados por falhas do equipamento e/ou por ação do operador;
- Erros sistemáticos – podem ser anulados através de técnicas específicas de observação;

Na Tabela 6 demonstramos as fontes e os principais erros que estão envolvidos nas observáveis GPS.

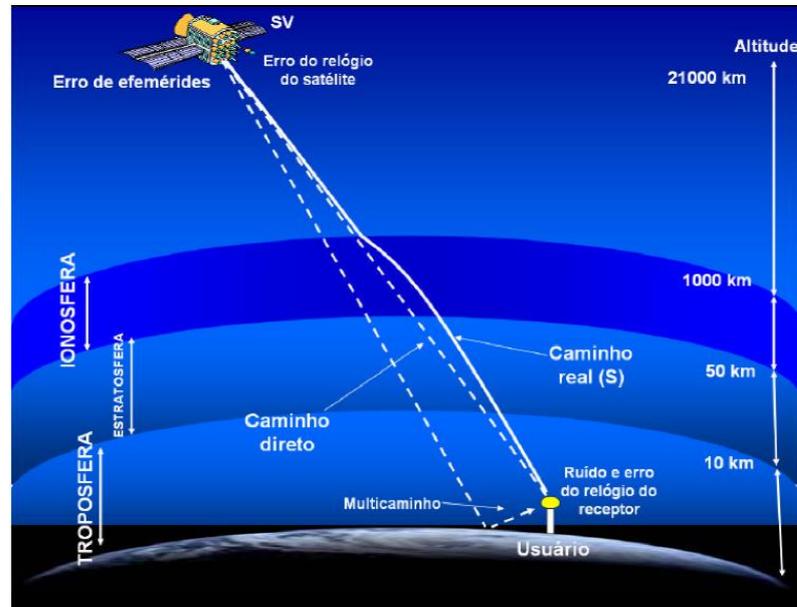
Tabela 6 – Fontes e erros incluídos nas observáveis GPS.

<b>FONTES</b>	<b>ERROS</b>
Satélite	Erro do relógio
	Erro da órbita
	Atraso das portadoras no hardware do satélite
Propagação do sinal	Refração ionosférica
	Refração troposférica
	Perdas de ciclos
	Multicaminho ou Sinais refletidos
Receptor / Antena	Erro do relógio
	Atraso das portadoras no hardware do receptor
	Ruído do receptor

Fonte: Adaptado de Monico (2000).

Podemos ver na Figura 17, os principais erros envolvidos no sistema GPS indicando a diferença do caminho direto (distância geométrica) e o caminho real.

Figura 17 – Erros envolvidos nas observáveis GPS



Fonte: Oliveira (2003)

### 2.6.1 Refração Ionosférica

Na ionosfera terrestre encontramos as principais fontes de erros no sistema GPS causado pelo efeito da refração ionosférica. O conteúdo eletrônico total ou TEC (do inglês, *Total Electron Content*) está diretamente ligado com a refração ionosférica. Definimos o TEC e a Refração de ondas sendo, respectivamente, a medida da densidade de elétrons ( $N_e$ ) livres que percorre por toda a extensão das ondas eletromagnéticas entre o receptor e o satélite e o fenômeno de refração, que ocorre quando uma onda passa de um meio para outro de características distintas, tendo sua direção e velocidade alteradas.

Para a velocidade de fase  $v_f$  e velocidade de grupo  $v_g$  temos seus respectivos índices de refração que são fornecida por Hofmann-Wellenhof et al., (2001):

$$v_f = 1 - \frac{40,3N_e}{f^2} \quad (14)$$

e

$$\nu_g = 1 + \frac{40,3N_e}{f^2} \quad (15)$$

no qual  $N_e$  é a densidade de elétrons e 40,3 é uma constante. A unidade de medida usada para  $N_e$  é dado em  $\text{el m}^{-3}$  e para a constante 40,3 em  $\text{mHz}^2(\text{el m}^{-2})^{-1}$ . Segundo as equações 14 e 15, acontece uma elevação da  $\nu_f$  e um retardo na  $\nu_g$ . Percebemos também que nas equações 14 e 15 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.

O erro sistemático em razão da refração ionosférica ocorre por causa da diferença entre a distância medida (real) e a distância geométrica  $\rho$  entre o satélite e o receptor (Figura 17). Podemos através de cálculos e deduções matemáticas encontrar equações que geram o erro em consequência da refração ionosférica para a fase da onda portadora  $I_{fR}^S$  e para o grupo  $I_{gR}^S$  como mostrado por Hofmann-Wellenhof et al., (2001):

$$I_{fR}^S = - \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (16)$$

e

$$I_{gR}^S = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (17)$$

Para aprofundamentos e maiores detalhes a respeito das fontes e erros implicando nas observáveis GPS e métodos matemáticos das equações envolvidas, consultar Hofmann-Wellenhof et al., (2001), Camargo (1999) e Monico (2000).

## 2.7 Determinando o Conteúdo Total de Elétrons (TEC)

O TEC é excessivamente usado para estudos relacionados à ionosfera. Ele varia no tempo e no espaço e seu valor pode ser influenciado por inúmeras variáveis (MATSUOKA et al., 2004), por exemplo:

- Ciclo solar;
- Estação do ano;
- Hora do dia;
- Localização geográfica;

- Atividades geomagnéticas;

Conseguimos determinar o TEC através da 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  $1 \text{ m}^2$  (KLOBUCHAR, 1991; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001)

$$TEC = \int_R^S N_e ds \quad (18)$$

no qual o TEC é medido em unidades de TEC (TECU – *Electron Content Unit*, que refere uma unidade de TEC) e vale  $10^{16}$  elétrons  $\text{m}^{-2}$ . Por meio das observáveis de pseudodistância e fase da onda portadora o TEC pode ser obtido através de cálculos matemáticos (SARDÓN E ZARRAOA, 1997).

### 2.7.1 Utilizando a observável pseudodistância para calcular o TEC

Em relação a observável de pseudodistância (equação 6), o TEC é obtido para as portadoras L1 e L2 e dado por:

$$\mathfrak{R}_1 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\mathfrak{R}1}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}1}^{trop} + d_{\mathfrak{R}1}^S + d_{\mathfrak{R}1}^R + m_{\mathfrak{R}1} + \varepsilon_{\mathfrak{R}1} \quad (19)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\mathfrak{R}2}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}2}^{trop} + d_{\mathfrak{R}2}^S + d_{\mathfrak{R}2}^R + m_{\mathfrak{R}2} + \varepsilon_{\mathfrak{R}2} \quad (20)$$

no qual

$\mathfrak{R}_1$  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, nesta ordem, nas portadoras L1 e L2;

$d_{\mathfrak{R}}^S$  e  $d_{\mathfrak{R}}^R$  – atrasos das portadoras no hardware do satélite e receptor, nesta ordem, gerados pelos distintos 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.

Fedrizzi (1999) e Matsuoka et al., (2004) afirma que o erro entre a distância geométrica do satélite e receptor, o erro da refração troposférica e os erros referentes aos relógios do satélite e receptor prejudicam de maneira semelhante às observáveis nas portadoras L1 e L2.

Temos o conhecimento que os efeitos da refração ionosférica para o atraso de grupo de acordo com a equação 17 são  $\Delta_{\mathfrak{R}}^{iono}$ . Se subtrairmos a equação 19 de 20 iremos obter a seguinte equação:

$$\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1 = \Delta I_{gR}^S + d_{\mathfrak{R}}^S + d_{\mathfrak{R}}^R + m_{\mathfrak{R}} + \varepsilon_{\mathfrak{R}} \quad (21)$$

no qual,

$$\Delta I_{gR}^S = I_{gR_2}^S - I_{gR_1}^S = 40,3 \text{ TEC} \left( \frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2} \right) \quad (22)$$

e

$$d_{\mathfrak{R}}^S = d_{\mathfrak{R}_2}^S - d_{\mathfrak{R}_1}^S, d_{\mathfrak{R}}^R = d_{\mathfrak{R}_2}^R - d_{\mathfrak{R}_1}^R, m_{\mathfrak{R}} = m_{\mathfrak{R}_2} - m_{\mathfrak{R}_1} \text{ e } \varepsilon_{\mathfrak{R}} = \varepsilon_{\mathfrak{R}_2} - \varepsilon_{\mathfrak{R}_1}.$$

Para obter o TEC utilizando a pseudodistância é necessário fazer a substituição da equação 22 na equação 21 e por manipulação matemática conseguimos a equação:

$$\text{TEC} = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_2}^2 - f_{L_1}^2)} [(\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1) - d_{\mathfrak{R}} - m_{\mathfrak{R}} - \varepsilon_{\mathfrak{R}}] \quad (23)$$

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  $d_{\mathfrak{R}}^R$ .

### 2.7.2 Utilizando a observável Fase da Onda Portadora para calcular o TEC

O TEC para as portadoras L1 e L2 é obtido pela equação 13 multiplicada por  $\lambda$ , como mostrado abaixo:

$$\mathfrak{S}_1 = \lambda \phi_1 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\phi_1}^{iono} + \Delta_{\phi}^{trop} + \lambda_1 N_1 + d_{\phi_1}^S + d_{\phi_1}^R m_{\phi_1} + \varepsilon_{\phi_1} \quad (24)$$

$$\mathfrak{S}_2 = \lambda\phi_2 = \rho + c\Delta\delta + \Delta_{\phi_2}^{iono} + \Delta_{\phi}^{trop} + \lambda_2 N_2 + d_{\phi_2}^S + d_{\phi_2}^R m_{\phi_2} + \varepsilon_{\phi_2} \quad (25)$$

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;

Os efeitos da refração ionosférica para a fase é representado por  $\Delta_{\phi}^{iono}$  de acordo com a equação 16. Se subtraímos a equação 25 da equação 24 iremos obter a seguinte equação:

$$\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2 = \Delta I_{fR}^S + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + d_{\phi}^S + d_{\phi}^R + m_{\phi} + \varepsilon_{\phi} \quad (26)$$

no qual

$$\Delta I_{fR}^S = I_{fR_2}^S - I_{fR_1}^S = 40,3 \text{ TEC} \left( \frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2} \right) \quad (27)$$

e

$$d_{\phi}^S = d_{\phi_1}^S - d_{\phi_2}^S, d_{\phi}^R = d_{\phi_1}^R - d_{\phi_2}^R, m_{\phi} = m_{\phi_1} - m_{\phi_2} \text{ e } \varepsilon_{\phi} = \varepsilon_{\phi_1} - \varepsilon_{\phi_2}.$$

Fazendo a substituição da equação 27 na equação 26 e utilizando a manipulação matemática, conseguimos obter o TEC para a fase da onda portadora:

$$\text{TEC} = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)} [(\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - d_{\phi} - m_{\phi} - \varepsilon_{\phi}] \quad (28)$$

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

## 2.8 Conteúdo Total de Elétrons na vertical (VTEC)

Hofmann-Wellenhof et al., (2001) fornece o conteúdo total de elétrons na direção vertical sendo:

$$\text{VTEC} = \cos(z') \text{TEC} \quad (29)$$

no qual o valor de  $z'$  representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altitude média  $H_m$  e é obtido através da seguinte equação (Hofmann-Wellenhof et al., 2001);

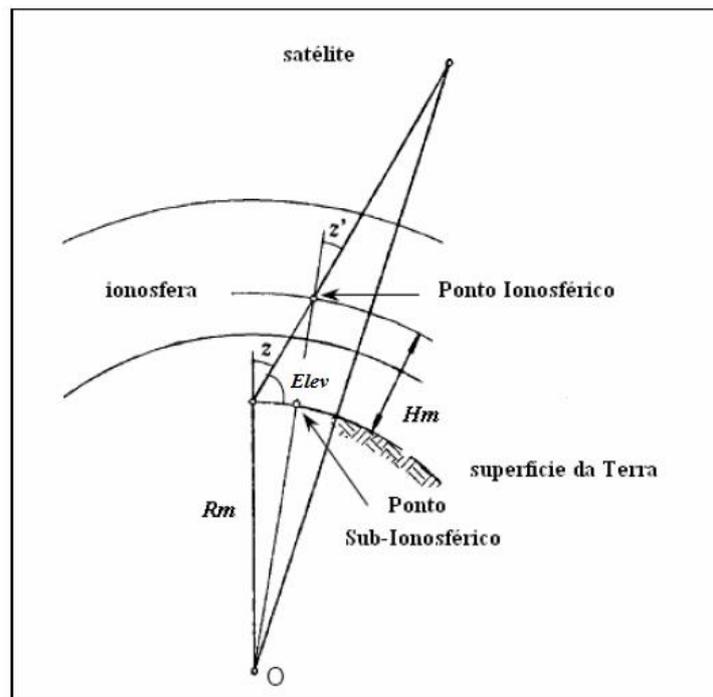
$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z \quad (30)$$

no qual

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

A Figura 18 mostra em detalhes as quantidades envolvidas na equação 29 e a geometria da trajetória da propagação do sinal do satélite até o receptor.

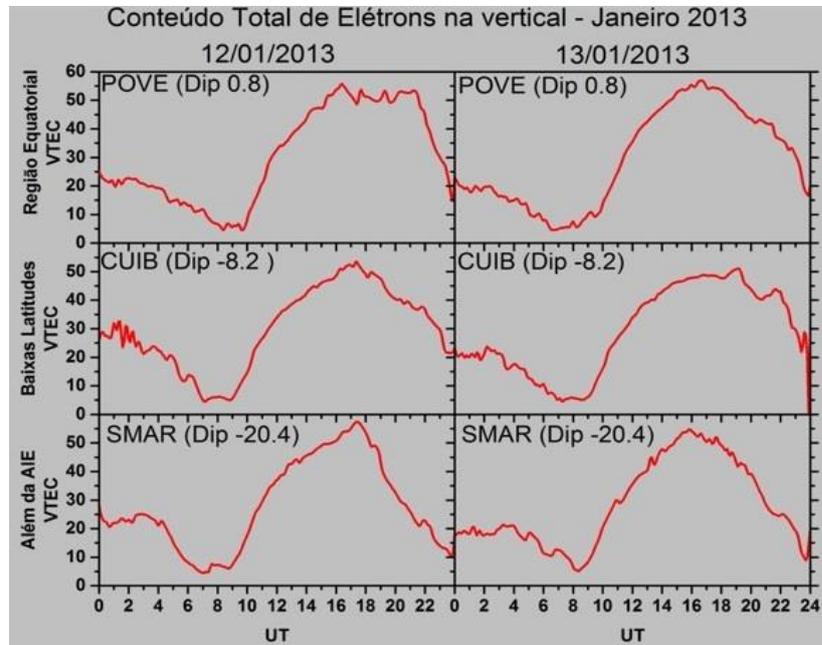
Figura 18 – Geometria do caminho da propagação do sinal satélite / receptor.



FONTE: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001).

Na Figura 19 apresentamos um gráfico de VTEC para os dias 12 e 13 de janeiro de 2013.

Figura 19 – Gráfico de VTEC para os dias 12 e 13 de janeiro de 2013. As siglas POVE, CUIB e SMAR significam, nesta ordem, Porto Velho, Cuiabá e Santa Maria com suas respectivas localizações (Dip latitude).



### CAPITULO 3. ANALISE DE DADOS E OBSERVAÇÃO

As tempestades geomagnéticas que serão apresentadas e estudadas neste capítulo ocorreram no primeiro semestre de 2013 (máximo do ciclo solar 24). Os estudos foram realizados utilizando dados de GPS-TEC distribuídos pelo Brasil. O território brasileiro possui uma extensão longitudinal e latitudinal muito ampla e assim permite que as estações GPS-TEC cubram uma grande área, permitindo o estudo da eletrodinâmica ionosférica, clima espacial e a relação Sol-Terra. A Tabela 7 apresenta características de 5 eventos investigado neste período.

Tabela 7 – Classificação e data de ocorrência das 5 tempestades geomagnéticas.

Tempestade Geomagnética	Data	Dst	Classificação
1	16 a 20 de março de 2013	-132 nT	Intensa
2	31 de maio a 3 de junho de 2013	-119 nT	Intensa
3	5 a 8 de junho de 2013	-73 nT	Moderada
4	13 a 16 de julho de 2013.	-73 nT	Moderada
5	16 a 21 de janeiro de 2013	-53 nT	Moderada

Os dados de GPS são 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/>). Após a transferência dos dados de GPS é realizado um processamento de dados para se obter o VTEC. O início súbito (*sudden storm commencement* – SSC) de cada tempestade geomagnética é obtido no site do ISGI, onde é fornecido um boletim mensal do Serviço Internacional de Índices Geomagnético (*International Service of Geomagnetic Indices* – ISGI - <http://isgi.unistra.fr/>). A classificação e as características de todas as tempestades são realizadas com auxílio dos índices geomagnéticos (Dst e Kp) e dos parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) que são obtidos nos seguintes sítios: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> , <http://www.swpc.noaa.gov/>. É importante citar que neste capítulo quando mencionamos uma estação como sendo do hemisfério norte, sul e equador se referem ao hemisfério magnético e não ao geográfico.

Na Figura 20 mostramos a localização das 90 estações GPS-TEC disponível para a análise das perturbações geomagnéticas durante o período escolhido. Porém, para o estudo da



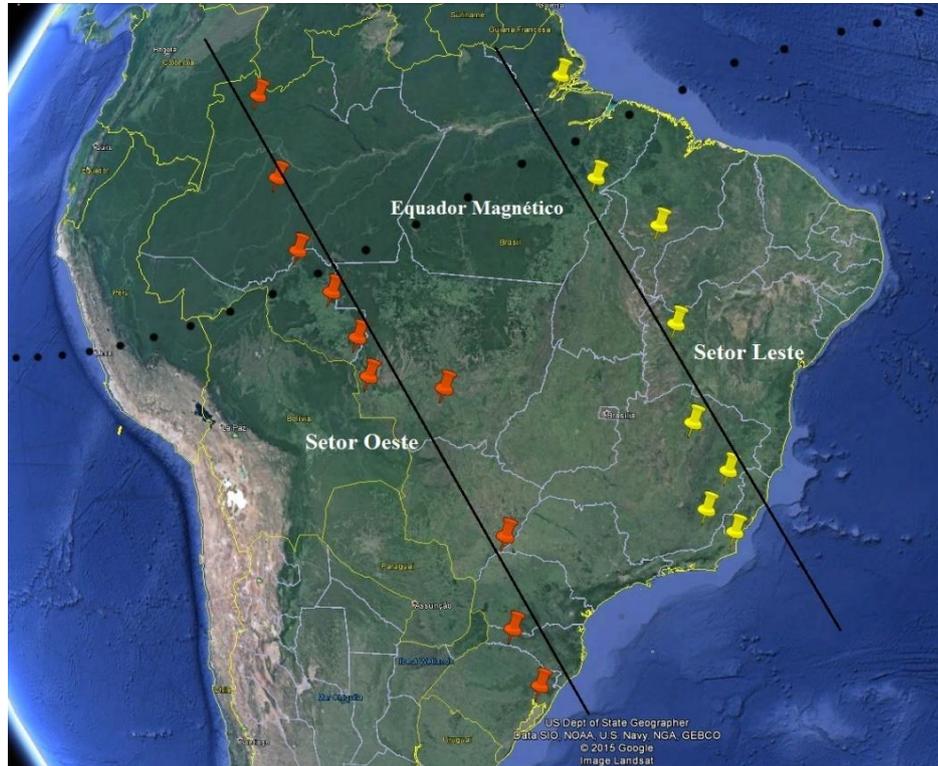
Figura 21 – Localizações das 20 estações GPS-TEC utilizadas para análise das tempestades geomagnéticas. Os marcadores amarelos indicam as regiões de baixa latitude norte e sul; os marcadores vermelhos indicam a região equatorial e os marcadores verdes indicam regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial. O equador geomagnético é mostrado através dos pontos pretos.



Para análise do comportamento da EIA durante os dias estudados, foram escolhidas aproximadamente 18 estações que estão separadas em 2 setores (Leste e Oeste). Escolhemos as estações que mais se aproximam de uma reta traçada (meridiano magnético, linha preta) que está perpendicular ao equador magnético. (Figuras 22).

Figura 22 – Mapa da localização das estações GPS-TEC escolhidas para análise da evolução da Anomalia durante os períodos estudados. Os marcadores vermelhos indicam o grupo de estações no Setor Oeste e os marcadores amarelos indicam o grupo de estações no setor Leste.

E as linhas pretas o meridiano magnético as quais as estações estão próximas.

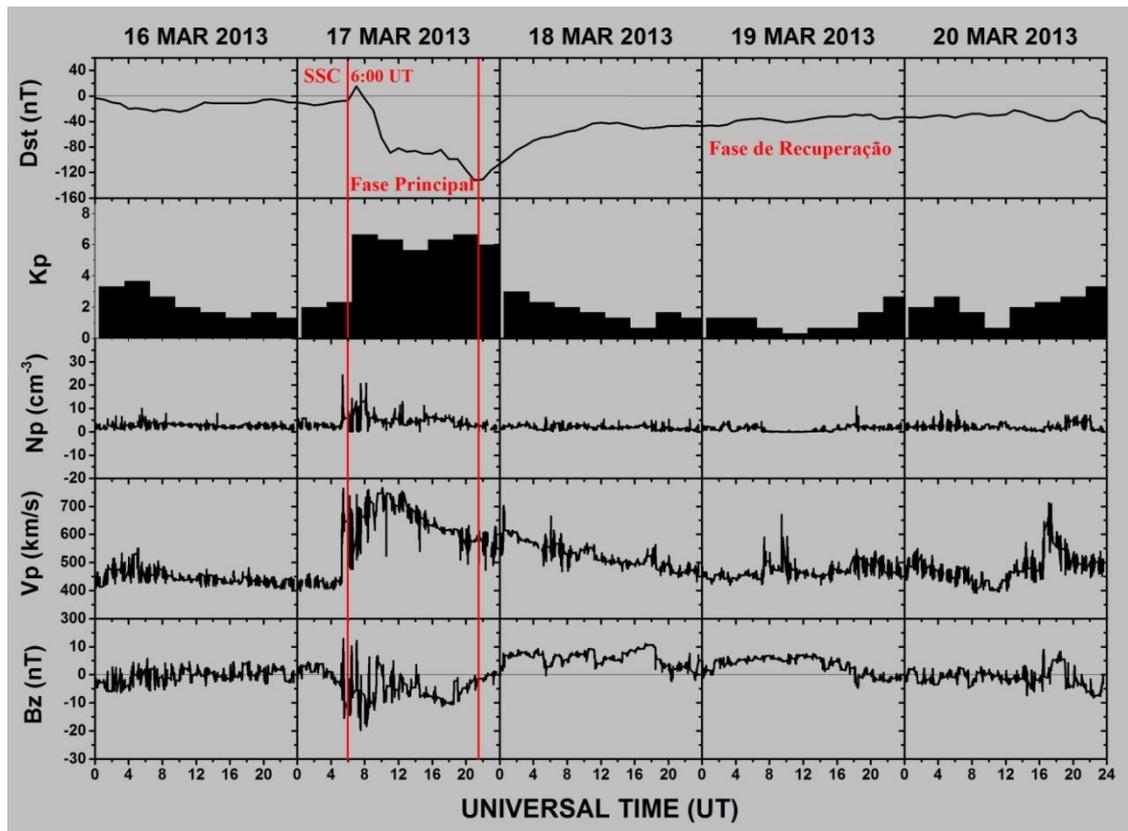


### 3.1 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 20 março de 2013 (Intensa)

Esta tempestade geomagnética apresentou um comportamento clássico, onde o início súbito, a fase principal e a de recuperação estão muito bem caracterizados e definidos. Na Figura 23 está indicado o horário em que ocorreu o início súbito - SSC (17/03/2013 às 06:00 UT). O índice Dst atingiu um valor máximo de 15 nT às 07:00 UT (17/03/2013) durante o SSC e no mesmo dia, às 21:00 UT, durante a fase principal o Dst alcançou um valor mínimo de -132 nT com o Kp atingindo um valor máximo de 7-. A fase de recuperação iniciou-se em 18 de março permanecendo por alguns dias. Esta tempestade foi classificada como intensa devido ao Dst ter atingido o valor de -132 nT. Os parâmetros interplanetários Vp, Np e Bz sofreram alterações significativas durante este evento. Onde o vento solar durante o período calmo estava em torno de 400 km/s e durante o início súbito da tempestade mudou rapidamente para uma faixa de 600 - 700 km/s. A densidade atingiu um valor de 20 partículas  $\text{cm}^{-3}$ .

O IMF-Bz na maioria do tempo permaneceu na direção sul durante as 6 primeiras horas da fase principal. No entanto, em alguns momentos reverteu para a direção norte. Após as primeiras 6 horas o IMF-Bz ficou na direção sul até o final da fase principal. No decorrer da fase de recuperação o IMF-Bz continuou na direção norte até retornar a se comportar como no dia 16 (Ver Figura 23).

Figura 23 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. O SSC, fase principal e recuperação são indicados por linhas vermelhas.



A Tabela 8 mostram as estações que foram utilizadas nos gráficos de contorno e as Tabelas 9 e 10 as que foram utilizadas no estudo da evolução da EIA (coordenadas geográficas e Dip latitude).

Tabela 8 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.

	Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>Baixas latitudes - Norte</b>					
<b>Leste</b>	Boa Vista	BOAV	2.83 N	60.70 O	10.0° N
<b>Oeste</b>	São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
<b>Região Equatorial</b>					
<b>Leste</b>	Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
	São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S
	Santana	APSA	0.05 S	51.16 O	3.0° N
<b>Oeste</b>	Rio Branco	RIOB	9.96 S	67.80 O	0.8 N
	Porto Velho	POVE	8.71 S	63.90 O	0.8° N
	Guajará-Mirim	ROGM	10.78 S	65.33 O	0.6° S
<b>Baixas latitudes - Sul</b>					
<b>Leste</b>	Recife	RECF	8.05 S	34.95 O	13.5° S
	Fortaleza	CEFT	3.70 S	38.46 O	7.4° S
	Salvador-INCRA	SAVO	12.93 S	38.43 O	15.7° S
<b>Oeste</b>	Cuiabá	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.2° S
	Campo Grande	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
	Rosana	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.4° S
<b>Além da crista da AIE</b>					
<b>Leste</b>	Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
	Rio de Janeiro-ON	ONRJ	22.90 S	43.21 O	20.8° S
	Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
<b>Oeste</b>	Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
	Lages	SCLA	27.80 S	50.30 O	20.6° S
	Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.8° S

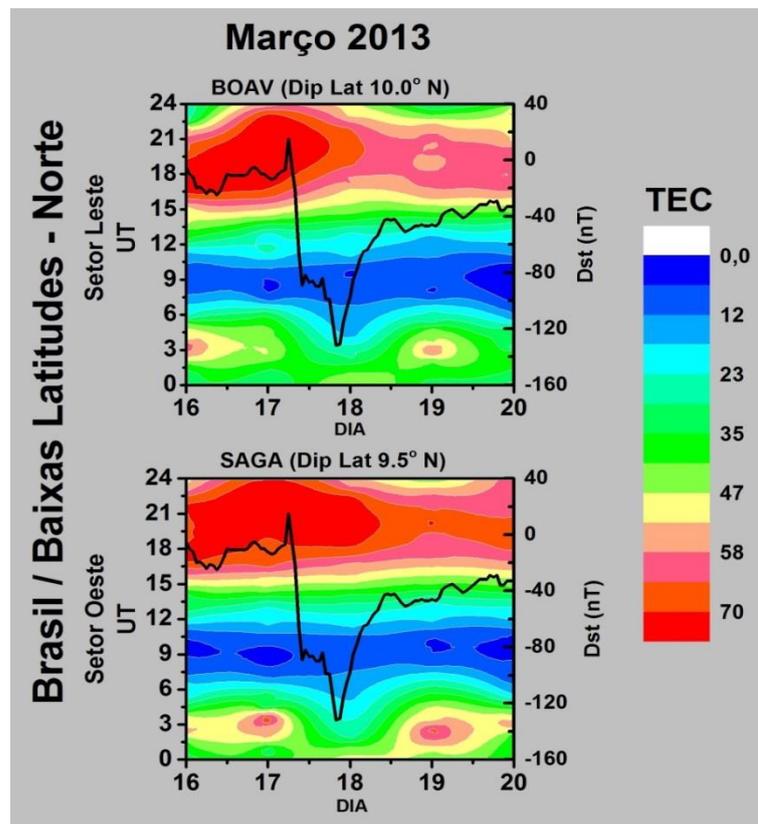
### 3.1.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA)

As Figuras 24, 26, 27 e 28 mostram a variação do VTEC para região de baixa latitude norte e sul, equatorial e além da crista da EIA (referente ao hemisfério magnético) do território brasileiro. Estas figuras apresentam gráficos de contorno VTEC, para 6 estações, onde os painéis superiores e inferiores referem-se ao setor Leste (3 estações) e Oeste (3 estações), respectivamente. Para região de baixa latitude norte utilizamos somente as estações BOAV (Leste) e SAGA (Oeste) por não haver mais estações disponíveis nessa região. As linhas pretas, sobrepostas ao gráfico de contorno, indicam a variação do Dst no decorrer da tempestade geomagnética.

As Figuras 25, 29 e 30 mostram as comparações do VTEC para os dias perturbados (linhas vermelhas), da média dos dias calmos (linhas pretas) e o desvio padrão (bandas cinza). Os dias calmos utilizados para calcular os valores médios e o desvio padrão foram de 10 dias.

Percebe-se, nas figuras de contorno (Figuras 24, 26, 27 e 28), nos setores Leste e Oeste, que o VTEC possui valores máximos entre 14:00 UT e 00:00 UT em todas as regiões, exceto na região além da crista da EIA quando o comportamento do VTEC se difere, mostrando que os valores máximos estão entre 15:00 UT e 21:00 UT (período diurno). Nas regiões de baixa latitude norte e sul, entre 00:00 UT e 06:00 UT notamos valores positivos de menor intensidade. O período noturno apresenta os valores mínimos se comparado ao período diurno. Observamos que durante a fase de recuperação da tempestade uma diminuição do TEC em todas as regiões.

Figura 24 – Região de baixa latitude norte.



A Figura 25 mostra a comparação do VTEC dos dias perturbados com os dias calmos para região de baixas latitudes norte. Na fase inicial notamos que houve um distúrbio ionosférico positivo somente no setor Oeste. Durante a fase principal houve um distúrbio ionosférico positivo em ambos os setores e no decorrer da fase de recuperação observamos distúrbios ionosféricos negativos fracos em ambos os setores. Os distúrbios ionosféricos negativos que ocorreram durante esta tempestade geomagnética são causados por alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de  $O/N_2$ .

Figura 25 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte.

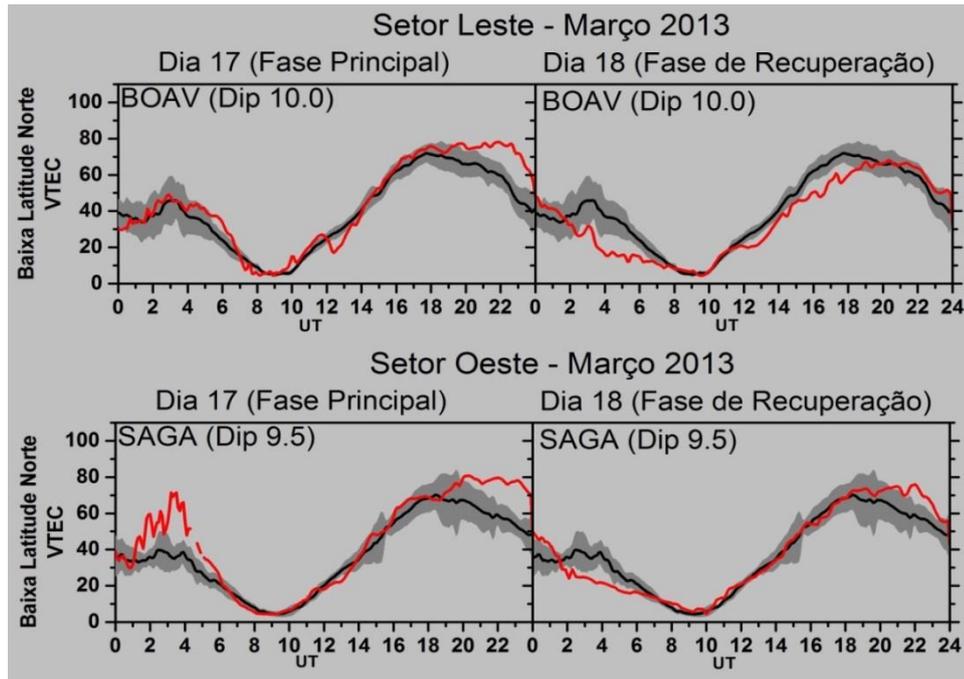


Figura 26 – Região equatorial.

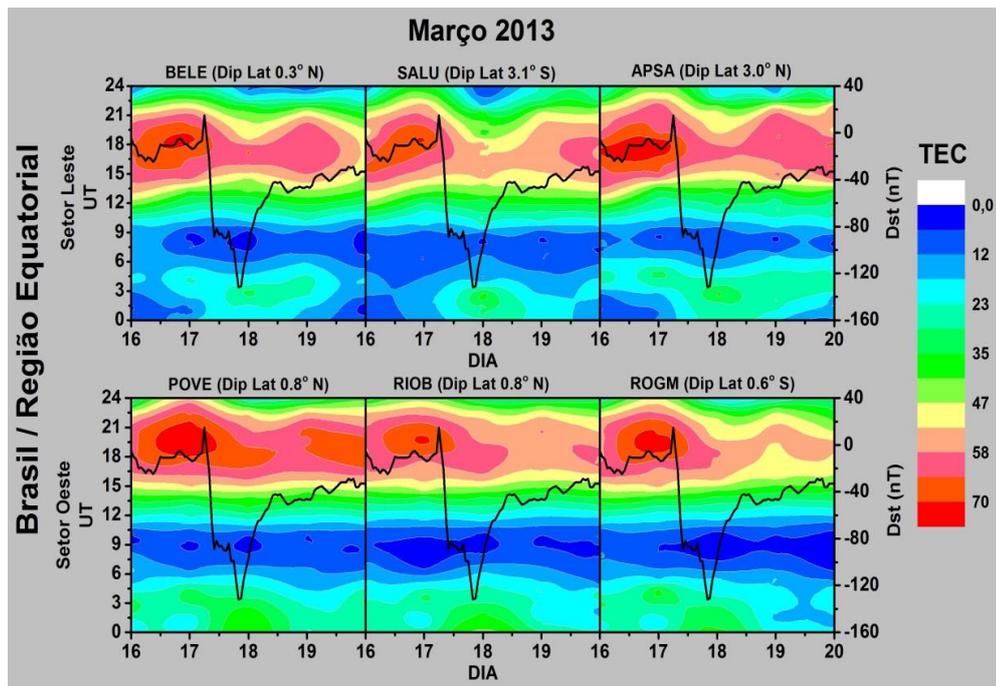


Figura 27 – Região de baixa latitude sul.

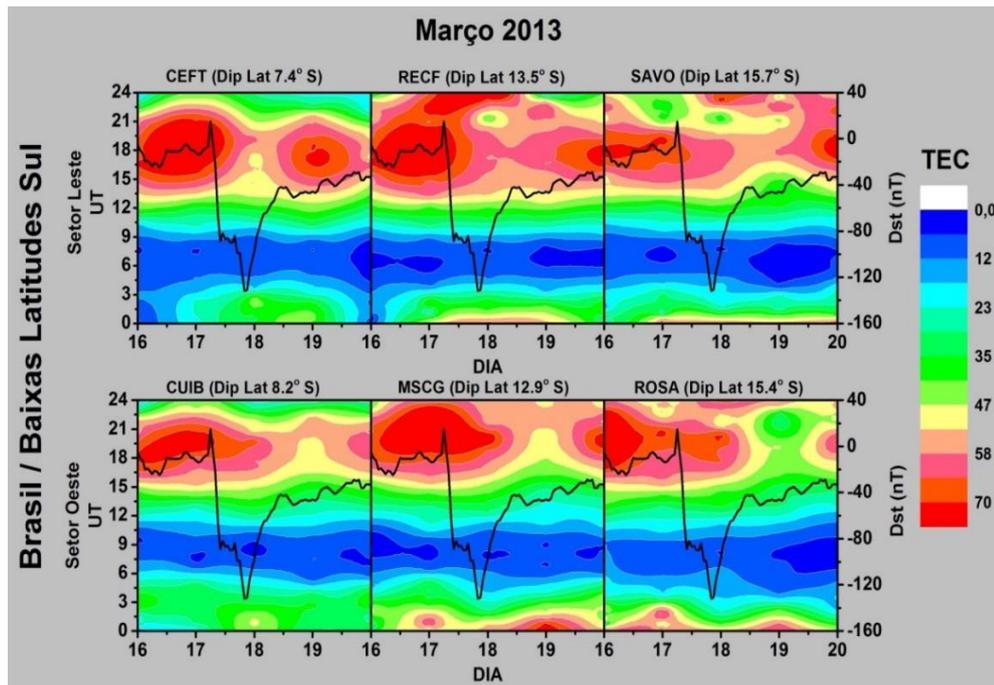
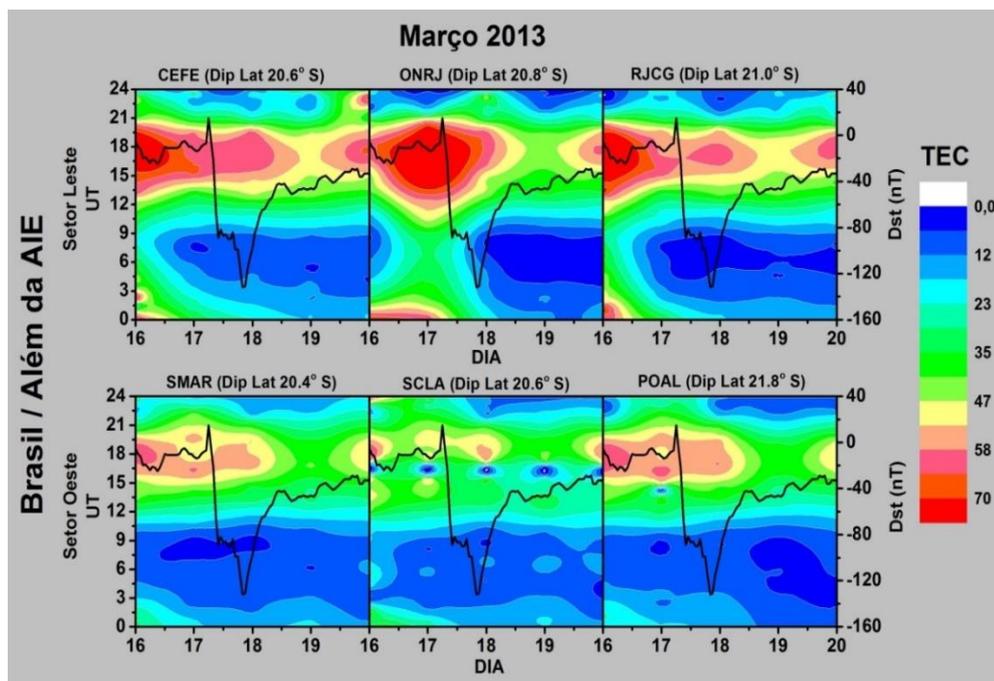


Figura 28 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial.



Nas Figuras 29 e 30, na região equatorial, observamos durante a fase inicial e principal que não foi observado perturbações significativas do VTEC nos setores Leste e Oeste e no decorrer da fase de recuperação notamos que houve distúrbios ionosféricos positivos fracos em ambos os setores. Para região de baixa latitude sul o VTEC mostra-se perturbado durante

a fase principal, no qual conseguimos notar distúrbios ionosféricos positivos que permanece até o início da fase de recuperação tanto no setor Leste como no Oeste e durante a fase de recuperação o VTEC se comporta de maneira similar aos dias calmos. Na região além da crista da EIA notamos a diminuição significativa do VTEC em ambos os setores quando comparado às outras regiões. Na fase inicial e de recuperação o VTEC se comporta semelhante aos dias calmos em ambos os setores Leste e Oeste e durante a fase principal observamos que houve um distúrbio ionosférico positivo fraco nos setores Leste e Oeste.

Figura 29 – Variação diurna para o setor Leste.

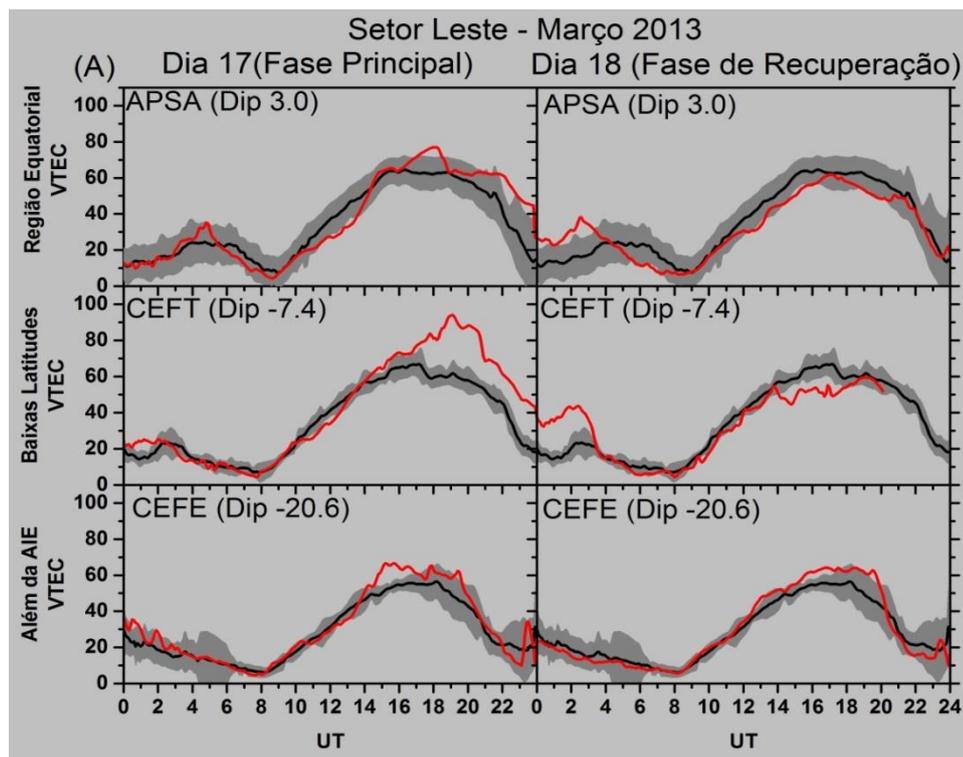
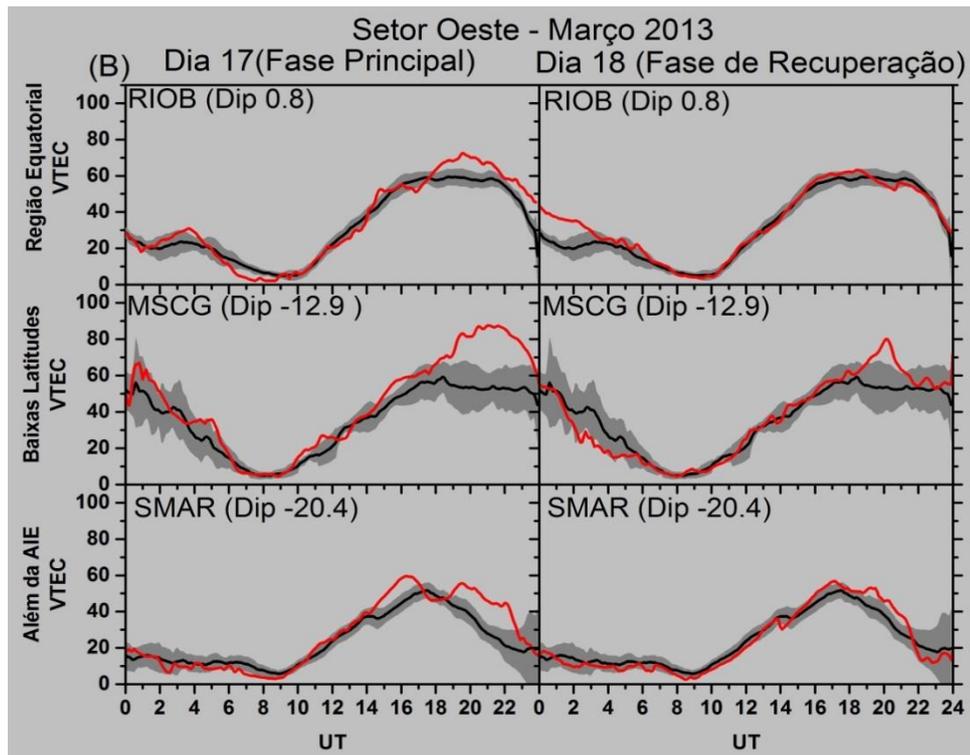


Figura 30 – Variação diurna para o setor Oeste.



### 3.1.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados

As Tabelas 9 e 10 apresentam as localizações das estações GPS que foram utilizadas para o estudo da evolução da EIA. As estações foram escolhidas com o intuito de analisar a resposta ionosférica a tempestade geomagnética para os setores Leste e Oeste brasileiro durante os dias 16 – 21 de março de 2013.

Tabela 9 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

Setor Leste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Barreiras	BABR	12.15 S	44.98 O	11.1° S
Gov. Valadares	GVAL	18.85 S	41.95 O	18.4° S
Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
Imperatriz	IMPZ	5.48 S	47.48 O	3.8° S
Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
Palmas	TOPL	10.16 S	48.33 O	7.5° S

Tabela 10 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste.

<b>Setor Oeste</b>				
<b>Estação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Dip. Latitude</b>
<b>Cuiabá</b>	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.1° S
<b>Imbituba</b>	IMBT	28.23 S	48.65 O	21.6° S
<b>Campo Grande</b>	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
<b>V. B. Santíssima Trindade</b>	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
<b>Porto Velho</b>	POVE	8.71 S	63.9 O	0.8° N
<b>Guarapuava</b>	PRGU	25.38 S	51.48 O	18.2° S
<b>Colorado d'Oeste</b>	ROCD	13.11 S	60.55 O	4.2° S
<b>Ji-Paraná</b>	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
<b>Rosana</b>	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.3° S
<b>São Gabriel da Cachoeira</b>	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N

As Figuras 31 e 32 apresentam a evolução da EIA nos setores Leste e Oeste brasileiro usando o VTEC (latitude x tempo), no qual se torna possível perceber as variações dia-a-dia da EIA entre 16-21 de março. O objetivo é analisar o comportamento da EIA durante os períodos perturbados.

Na fase inicial, nos setores Leste e Oeste, observamos uma intensificação (período perturbado) do VTEC na região equatorial, baixa latitude sul e além da crista da EIA, sendo mais proeminente na região de transição entre baixa latitude sul e além da crista da EIA (Ver Figuras 31 e 32).

Durante a fase principal notamos um comportamento atípico da anomalia que é caracterizado por uma ampla extensão longitudinal que vai desde a região equatorial até além da crista da EIA, sugerindo uma intensificação do efeito fonte. Um aspecto marcante deste evento é a descontinuidade da anomalia nos setores Leste e Oeste, sendo mais acentuado no setor Leste. Porém, no setor Oeste percebermos que houve uma intensificação da Anomalia no dia 17 de março. Durante o primeiro e segundo dia da fase de recuperação no setor Leste notamos que a EIA foi inibida e no setor Oeste a diminuição de intensidade da EIA inicia-se a partir do segundo dia da fase de recuperação. Definimos que a diminuição de intensidade da EIA ocorre quando sua extensão longitudinal é muito menor, ficando aproximadamente ilegível (Ver Figuras 31 e 32).

Esta tempestade geomagnética foi classificada como intensa e apresentou perturbações ionosféricas relativamente fracas. A principal perturbação foi uma intensificação da extensão da EIA que ocorreu durante a fase principal juntamente com uma descontinuidade na região

de baixa latitude sul ( $\sim 13^\circ - 18^\circ$  latitude). Nos primeiros dias da fase de recuperação notou-se uma diminuição de intensidade da EIA tanto no setor Leste como no setor Oeste.

Figura 31 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 16 a 21 de março.

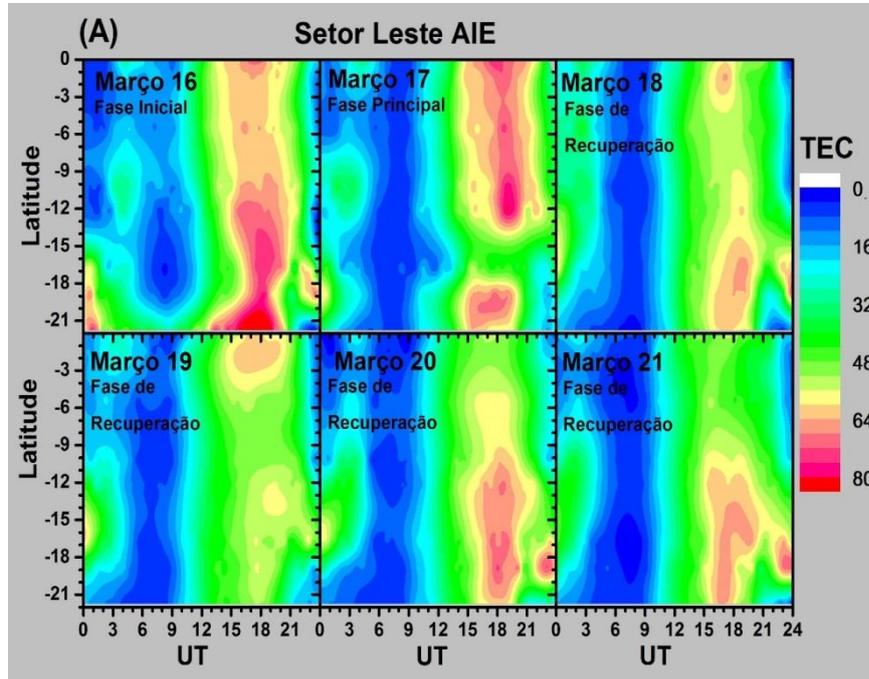
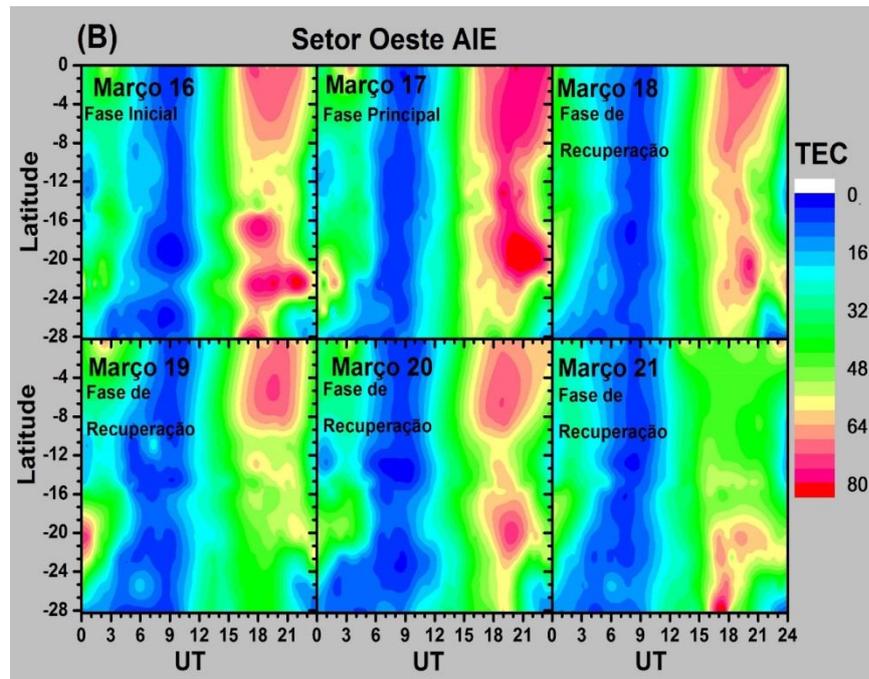


Figura 32 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 16 a 21 de março.



### 3.2 Tempestade geomagnética ocorrida entre 31 de maio a 3 de junho 2013 (Intensa)

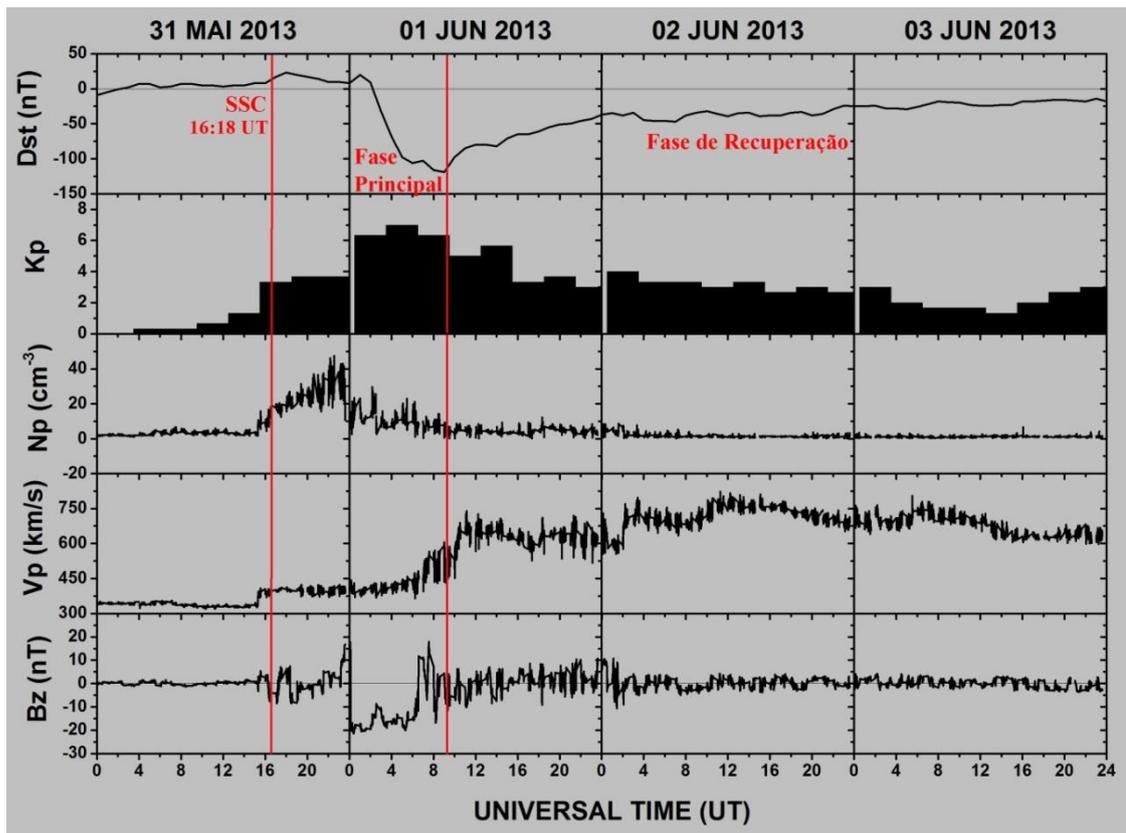
Este evento geomagnético apresentou um comportamento esperado, no qual conseguimos observar todas as fases de uma tempestade. O início súbito, a fase principal e a fase de recuperação estão muito bem caracterizados.

A Figura 33 é mostra a variação temporal dos índices geomagnéticos Dst e Kp para todo o período estudado. Nota-se que o SSC ocorreu às 16:18 UT atingindo um valor máximo de 23 nT. No decorrer da fase de principal o Dst alcançou o valor mínimo de -119 nT às 21:00 UT em 01/06/2013 e o índice Kp atingiu um valor máximo de 7. Em seguida, durante a fase de recuperação, os índices Dst e Kp restaura lentamente os seus comportamentos.

Os parâmetros interplanetários Vp, Np e Bz sofreram mudanças significativas durante o período perturbado (Figura 33). O vento solar estava em torno de 320 km/s e no decorrer da fase inicial, principal e de recuperação aumentou gradativamente até atingir valores entre 700 - 800 km/s. A densidade eletrônica durante o período calmo estava entre 2-3 partículas  $\text{cm}^{-3}$  e durante a fase inicial da tempestade atingiu 45 partículas  $\text{cm}^{-3}$  e em seguida, durante a fase principal e de recuperação, decresce até atingir valores entre 3-5 partículas  $\text{cm}^{-3}$ . A partir do dia 03/06/2013 o Np volta a se comportar como em períodos calmos.

Na fase inicial o IMF-Bz oscilou entre norte e sul por um período de 8 horas (Figura 33). No início da fase principal da tempestade o IMF-Bz inverte bruscamente para o sul, permanecendo até o início da fase de recuperação. O comportamento oscilatório do IMF-Bz retorna na fase de recuperação voltando em seguida a se comportar de modo semelhante aos dias calmos.

Figura 33 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. O SSC, fase principal e recuperação são indicados por linhas vermelhas.



A Tabela 11 mostram a localização das estações que foram utilizadas nos gráficos de contorno e as Tabelas 12 e 13 as que foram utilizadas no estudo da evolução da EIA (coordenadas geográficas e Dip latitude).

Tabela 11 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.

	Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>Baixas latitudes - Norte</b>					
<b>Leste</b>	Boa Vista	BOAV	2.83 N	60.70 O	10.0° N
<b>Oeste</b>	São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
<b>Região Equatorial</b>					
<b>Leste</b>	Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
	São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S
	Santana	APSA	0.05 S	51.16 O	3.0° N
<b>Oeste</b>	Rio Branco	RIOB	9.96 S	67.80 O	0.8 N
	Cruzeiro do Sul	CRUZ	7.60 S	72.66 O	3.8° N
	Guajará-Mirim	ROGM	10.78 S	65.33 O	0.6° S
<b>Baixas latitudes - Sul</b>					
<b>Leste</b>	Recife	RECF	8.05 S	34.95 O	13.5° S
	Teresina	PITN	5.10 S	42.80 O	6.2° S
	Salvador-INCRA	SAVO	12.98 S	38.43 O	15.8° S
<b>Oeste</b>	Campo Grande	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
	V. B. da Santíssima Trindade	MTVB	15.00 S	59.98 O	6.1° S
	Jataí	GOJA	17.88 S	51.73 O	12.3° S
<b>Além da crista da AIE</b>					
<b>Leste</b>	Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
	Rio de Janeiro - ON	ONRJ	22.90 S	43.30 O	21.7° S
	Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
<b>Oeste</b>	Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
	Lages	SCLA	27.80 S	50.30 O	20.6° S
	Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.8° S

### 3.2.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA)

As Figuras 34, 36, 37 e 38 apresentam a variação do VTEC para os setores Leste e Oeste brasileiro em baixa latitude norte, equatorial, baixa latitude sul e além da crista da EIA (referente ao hemisfério magnético) entre os dias 31 de maio a 03 de junho. Cada uma destas figuras apresenta gráficos de contorno VTEC onde os painéis superiores e inferiores referem-se ao setor Leste (3 estações) e Oeste (3 estações), respectivamente. Para região de baixa latitude norte somente as estações BOAV (Leste) e SAGA (Oeste) foram usadas por não haver mais estações disponíveis nessa área. As linhas pretas nas figuras de contorno indicam a variação do Dst durante a tempestade geomagnética. Onde a superposição do gráfico de contorno e a evolução do Dst possibilita destacar o progresso do VTEC nas diferentes fases da tempestade.

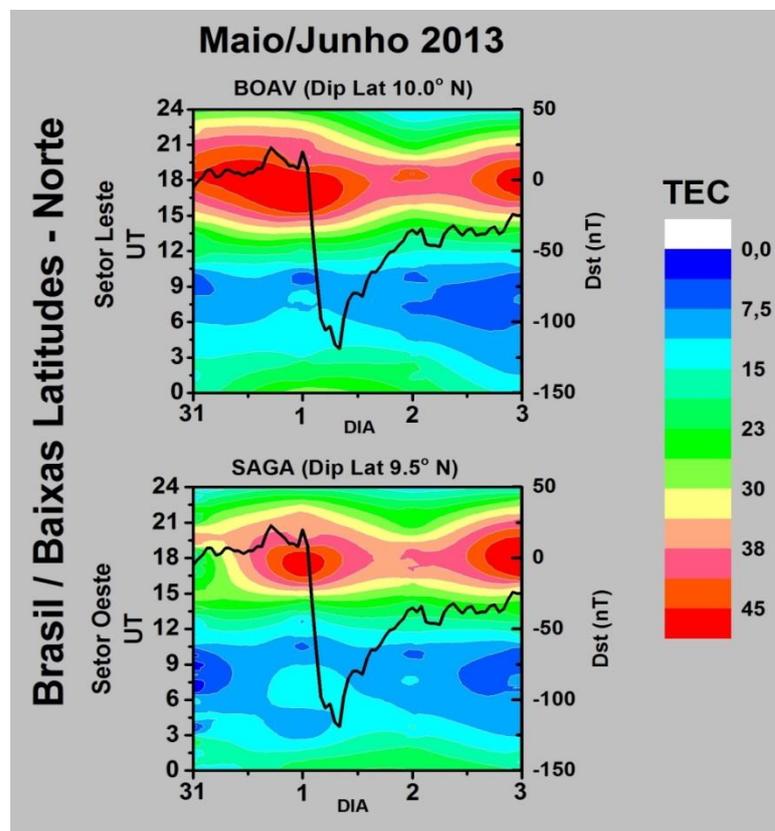
As Figuras 35, 39 e 40 tem o intuito de facilitar a análise do comportamento do VTEC comparando os dias perturbados (linhas vermelhas) com a média dos dias calmos (linhas

pretas) e o desvio padrão (bandas cinza). Foram utilizados 10 dias calmos para calcular os valores médios e o desvio padrão.

Nas figuras 34, 36, 37 e 38 observamos que o contorno do VTEC possui valores máximos entre 12:00 UT e 22:00 UT, exceto na região além da crista da EIA, no qual os valores máximos de VTEC estão entre 12:00 UT e 18:00 UT (período diurno). No período considerado noturno, entre 00:00 UT e 12:00 UT o VTEC apresentou valores menores se comparado com os valores diurnos. Na estação CRUZ (Oeste da região equatorial) percebemos um valor positivo durante a fase principal entre 00:00 UT e 02:00 UT.

No decorrer da fase de recuperação, em todas as regiões, observamos uma diminuição dos valores máximos seguido de inibições para algumas estações. Este comportamento mostra que durante as tempestades geomagnéticas a ionosfera apresenta para cada região uma resposta diferente (Ver Figuras 34, 36, 37 e 38).

Figura 34 – Região de baixa latitude norte.



A Figura 35 mostra que na região de baixa latitude norte, durante a fase inicial, houve distúrbios ionosféricos negativos no setor Oeste. No decorrer da fase principal o VTEC se comportou de modo similar à média dos dias calmos tanto para o setor Lestes quanto para o

Oeste. E durante a fase de recuperação observamos, em ambos os setores, distúrbios ionosféricos negativos fracos. As principais alterações observadas foram distúrbios ionosféricos negativos no setor Oeste durante a fase inicial.

Figura 35 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte.

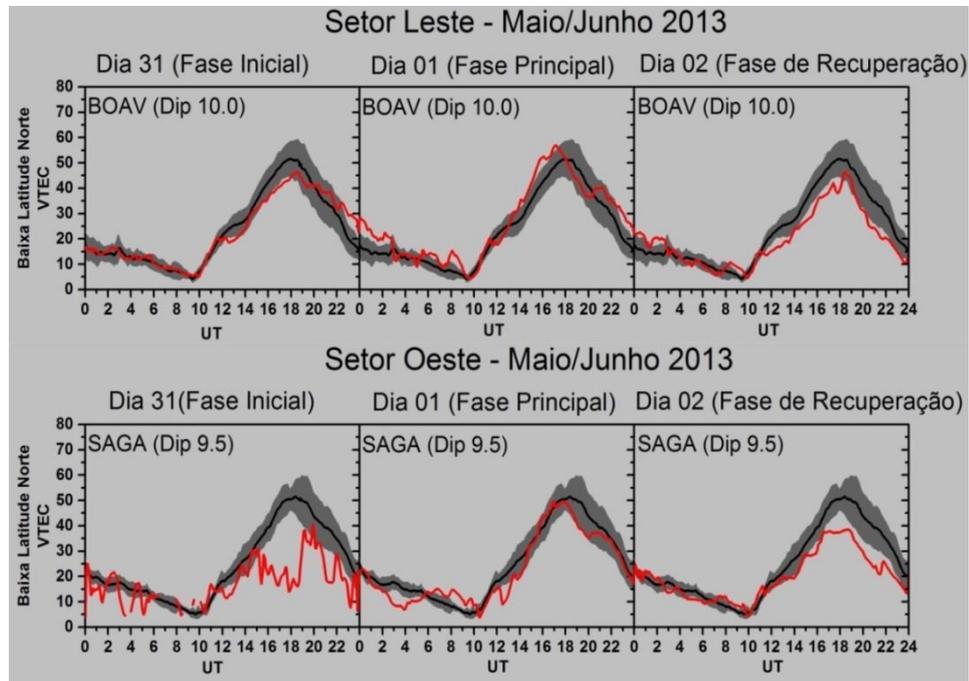


Figura 36 – Região equatorial

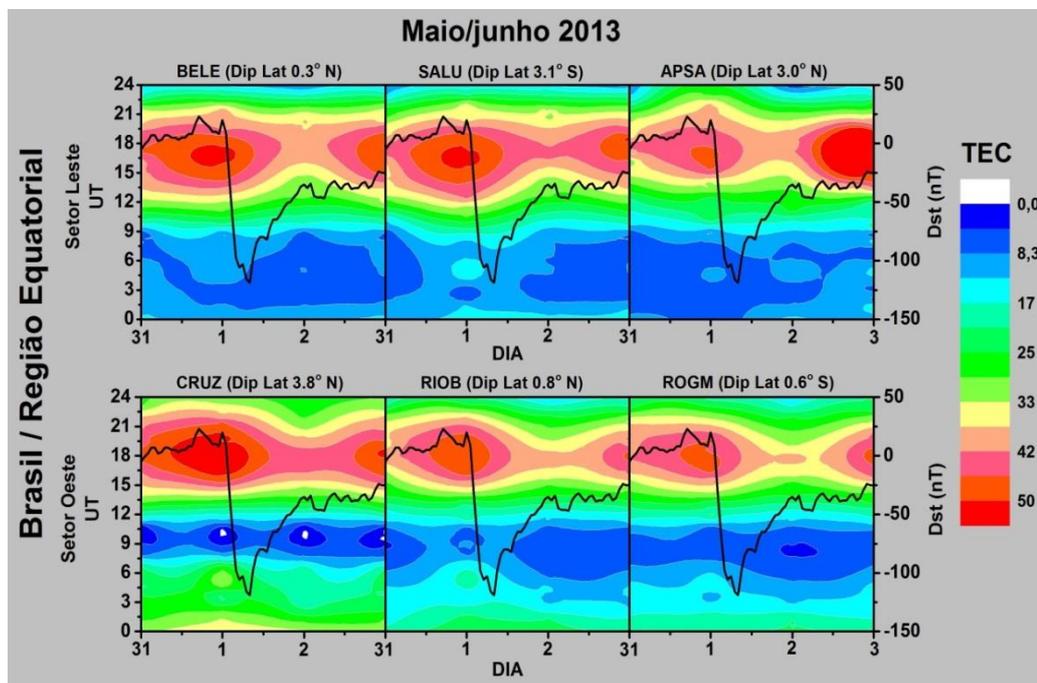


Figura 37 – Região de baixa latitude sul.

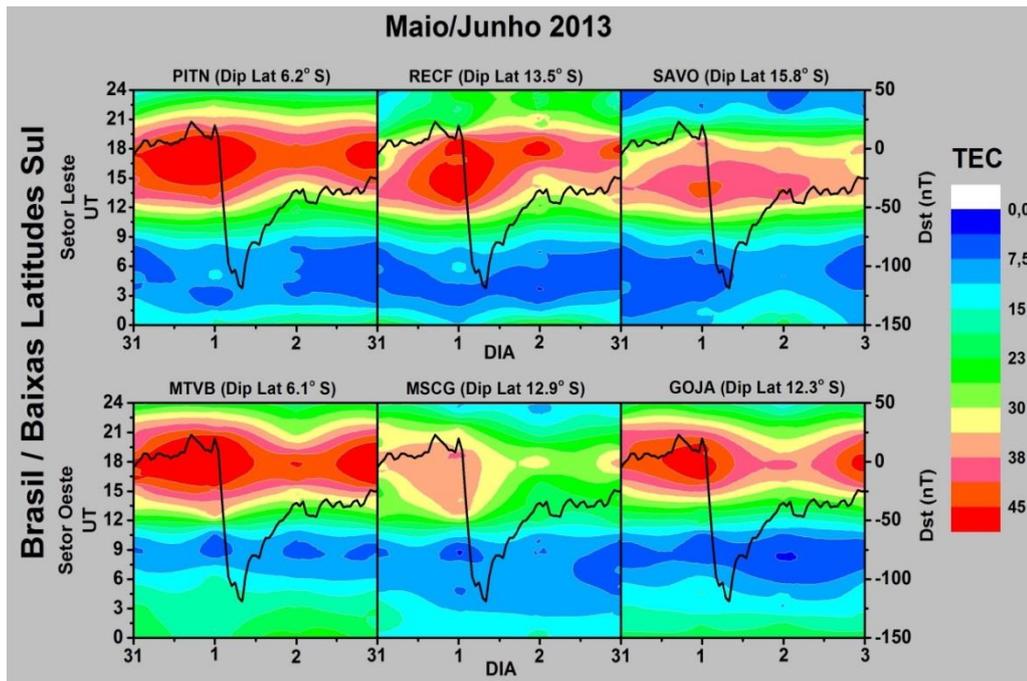
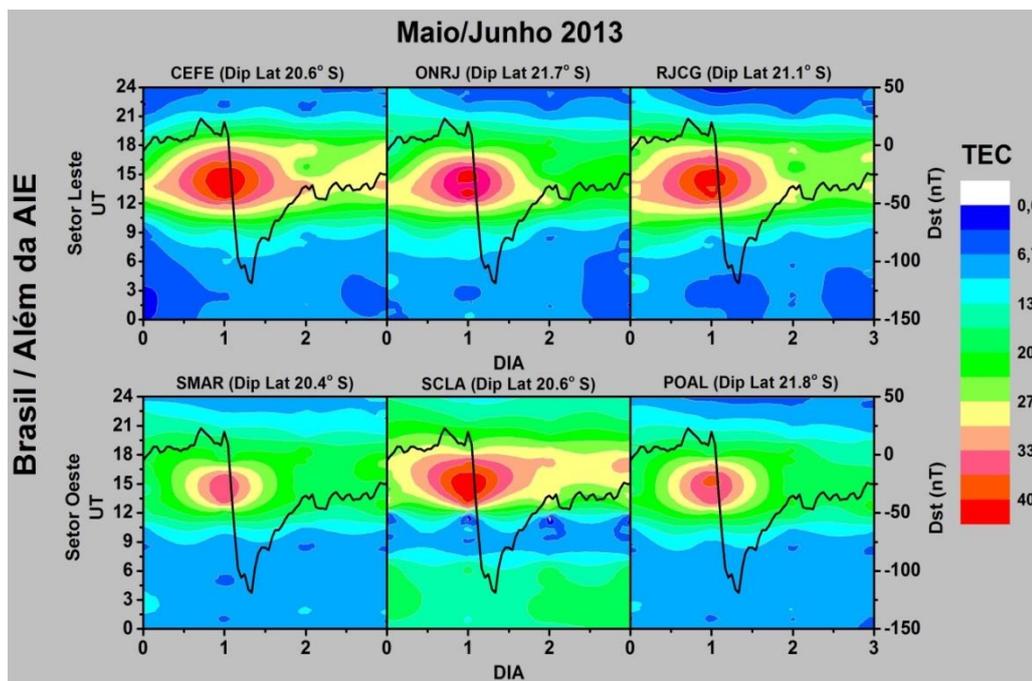


Figura 38 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial.



As Figuras 36 e 40 mostram que na região equatorial, baixa latitude sul e Além da crista da EIA que o VTEC não sofreu alterações significativas se comportando de modo semelhante às medias dos dias calmos analisados para os setores Leste e Oeste durante a fase inicial e principal, exceto na estação RECF, onde notamos um pico ionosférico negativo. Na

fase de recuperação observamos alterações somente na região além da crista da EIA . No qual, percebemos que houve um distúrbio ionosférico positivo em ambos os setores. De modo geral, observamos a diminuição do VTEC na região além da crista da EIA se comparado às outras regiões. Durante está tempestade geomagnética os distúrbios ionosféricos negativos são causados por variações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de  $O/N_2$ .

Figura 39 – Variação diurna para o setor Leste.

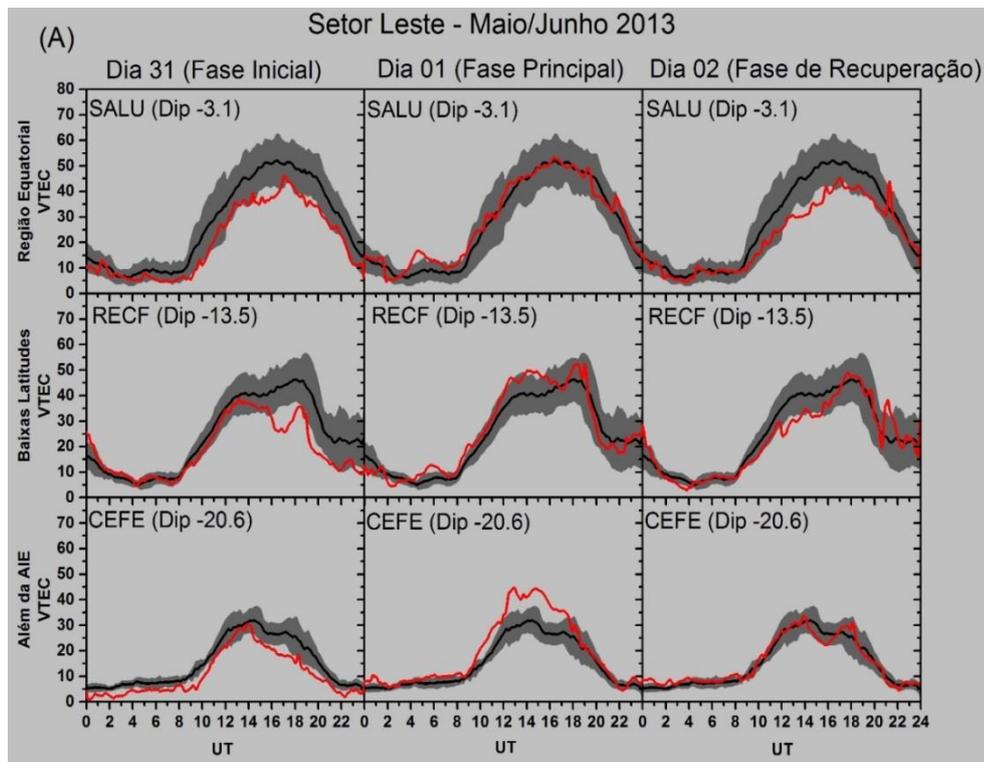
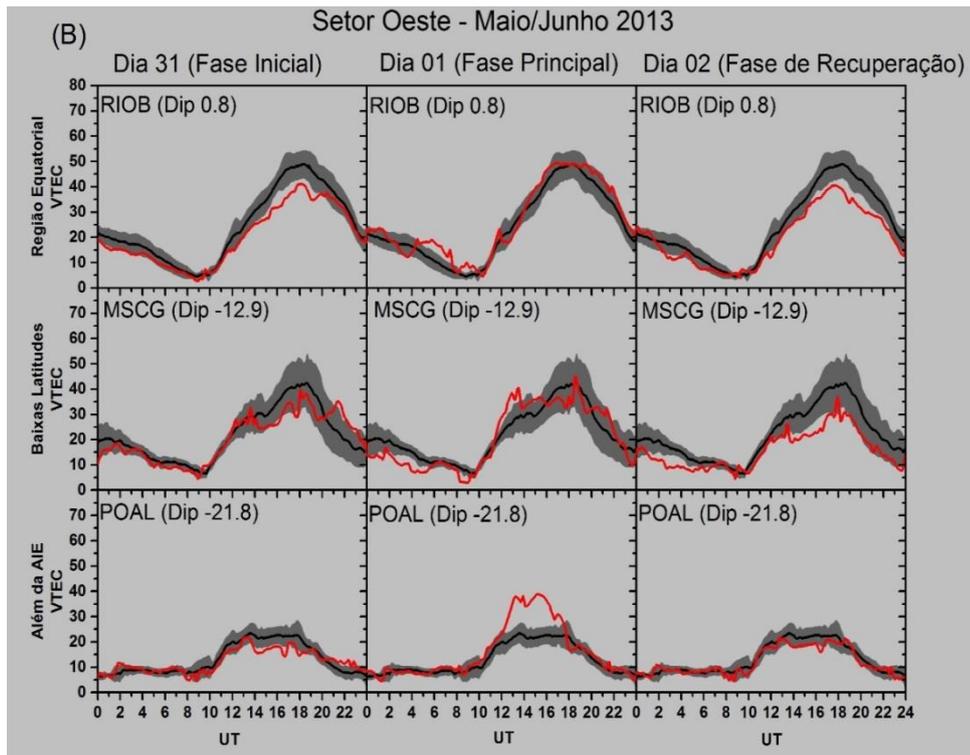


Figura 40 – Variação diurna para o setor Oeste.



### 3.2.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados

As Tabelas 12 e 13 apresentam a localização das estações GPS utilizadas no estudo da evolução da EIA durante o período escolhido. Estas estações foram escolhidas de tal forma a permitir estudar a resposta ionosférica a tempestade nos setores Leste e Oeste brasileiro.

Tabela 12 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

Setor Leste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Barreiras	BABR	12.15 S	44.98 O	11.1° S
Gov. Valadares	GVAL	18.85 S	41.95 O	18.4° S
Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
Marabá	MABA	5.35 S	49.11 O	2.8° S
Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
Palmas	TOPL	10.16 S	48.33 O	7.5° S
Balsas	MABS	7.53 S	46.03 O	6.5° S

Tabela 13 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste.

<b>Setor Oeste</b>				
<b>Estação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Dip. Latitude</b>
<b>Coari</b>	AMCO	4.86 S	65.33 O	4.7° N
<b>Cuiabá</b>	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.1° S
<b>Campo Grande</b>	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
<b>V. B. Santíssima Trindade</b>	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
<b>Porto Alegre</b>	POAL	30.06 S	51.11 O	21.7° S
<b>Porto Velho</b>	POVE	8.71 S	63.9 O	0.8° N
<b>Guarapuava</b>	PRGU	25.38 S	51.48 O	18.2° S
<b>Colorado d'Oeste</b>	ROCD	13.11 S	60.55 O	4.2° S
<b>Ji-Paraná</b>	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
<b>São Gabriel da Cachoeira</b>	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N

As Figuras 41 e 42 nos permitiram analisar a evolução da EIA através dos gráficos de VTEC (Latitude x tempo) durante as fases inicial, principal e recuperação nos setores Leste e Oeste, respectivamente. O objetivo é analisar o comportamento da EIA antes e durante os períodos perturbados.

Durante a fase principal a EIA apresentou um comportamento anômalo em ambos os setores. Este comportamento é caracterizado por uma grande extensão longitudinal que vai desde a região equatorial até além da crista da EIA, indicando uma intensificação do efeito fonte. Também notamos, neste evento, uma descontinuidade da anomalia nos setores Leste e Oeste, sendo mais acentuado do que no evento ocorrido em 16 a 21 de março de 2013.

Uma característica importante observada nesta tempestade foi o tempo de ocorrência da EIA durante a fase principal e de recuperação. Notamos que na fase principal houve um aumento no tempo de duração da EIA de aproximadamente 8 horas (13:00 às 21:00 UT) em ambos os setores. No entanto, durante o primeiro dia da recuperação observamos uma diminuição de intensidade da EIA, ou seja, a sua extensão longitudinal é muito menor e a sua duração foi de apenas 4 horas (veja as Figuras 41 e 42).

Figura 41 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 31 de maio a 03 de junho.

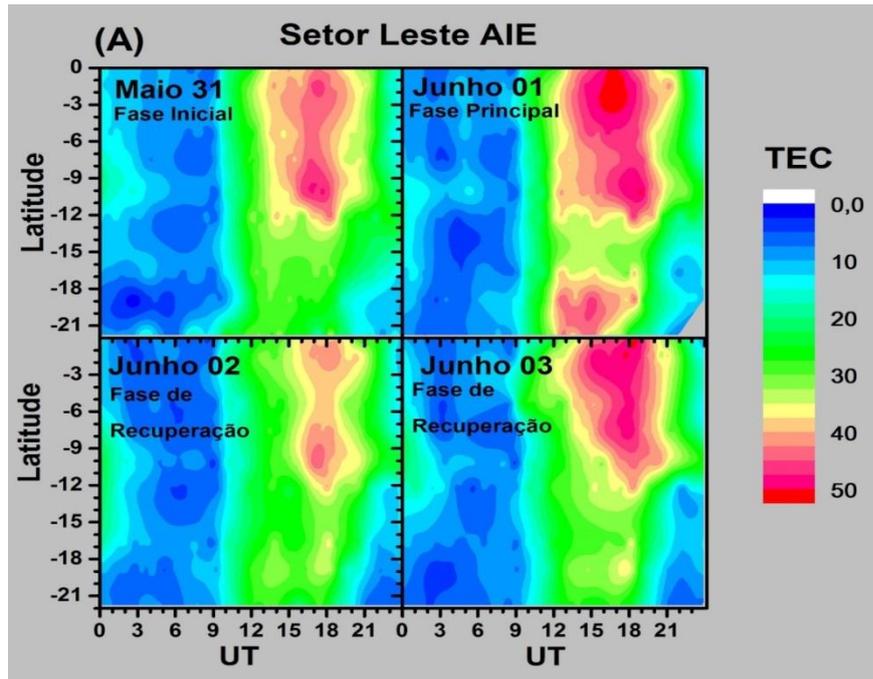
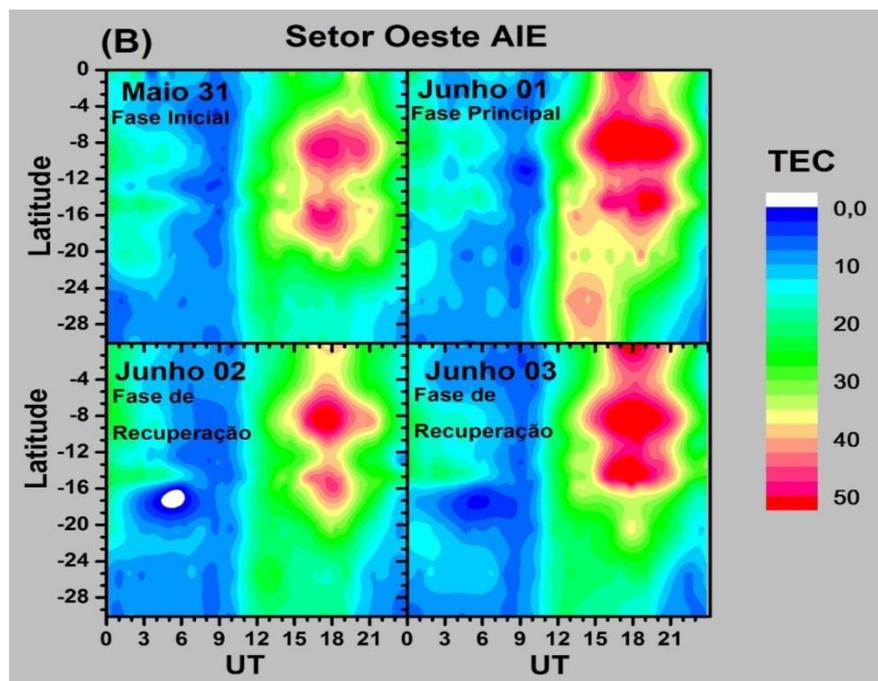


Figura 42 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 31 de maio a 03 de junho.



Esta tempestade apesar de ser classificada como intensa apresentou alterações ionosféricas relativamente fracas. As principais perturbações foram um discreto distúrbio ionosférico negativo na região de baixa latitude norte seguido de uma diminuição de intensidade da EIA durante o primeiro dia da fase de recuperação. Uma intensificação da EIA

durante a fase principal, incluindo uma descontinuidade ( $\sim 12^\circ - 18^\circ$  latitude) da EIA na região de baixa latitude sul também foi notada.

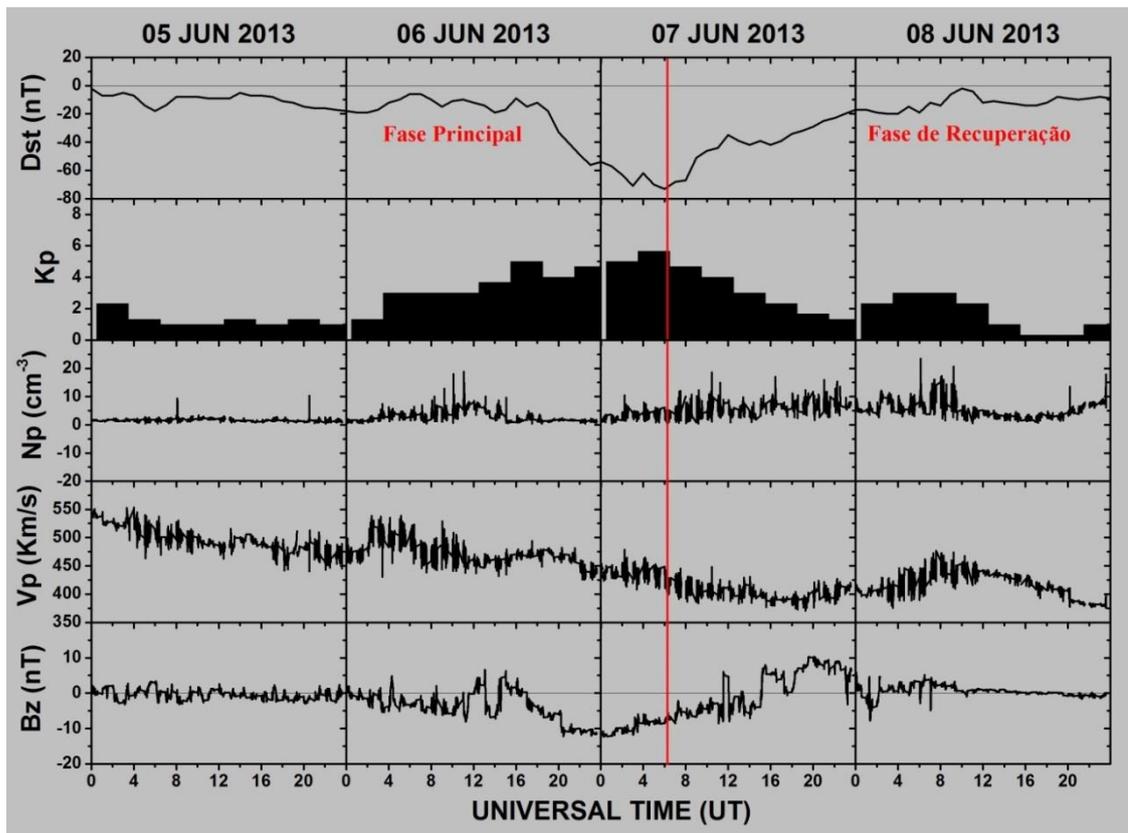
### **3.3 Tempestade geomagnética ocorrida entre 5 a 8 de junho de 2013 (Moderada)**

A Figura 43 apresenta eventos geomagnéticos que ocorreram entre 5 a 8 de junho de 2013. Notamos que os índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) sofreram alterações durante os períodos estudados. O boletim do ISGI não indicou o SSC para o período investigado. Porém, conseguimos identificar a fase principal e a de recuperação desta tempestade.

O índice Dst, em 05 de junho às 14:00 UT, atingiu o valor máximo de -5 nT e no decorrer da fase principal alcançou um valor mínimo de -73 nT com o Kp atingindo um valor de 6-. O vento solar durante o período calmo estava em torno de 550 km/s e no decorrer do período estudado a velocidade foi diminuindo para entre 400-370 km/s. A densidade atingiu um valor aproximado de 20 partículas  $\text{cm}^{-3}$  durante a fase de recuperação no qual se mostrou mais perturbado (Figura 43).

A componente vertical do campo magnético interplanetário se comportou oscilando entre norte e sul no decorrer da tempestade geomagnética. Na fase principal o IMF-Bz inverteu para o sul às 16:00 UT do dia 06 de junho permanecendo por 24 horas até o início da fase de recuperação. Quando se iniciou a fase de recuperação o IMF-Bz reverteu para norte permanecendo por 10 horas. Logo depois o IMF-Bz retornou a se comportar de modo semelhante ao início do período estudado (ver Figura 43).

Figura 43 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. A fase principal e de recuperação são indicadas por linhas vermelhas.



A Tabela 14 mostram as estações utilizadas nos gráficos de contorno e as Tabelas 15 e 16 as que foram utilizadas no estudo da evolução EIA (coordenadas geográficas e Dip latitude).

Tabela 14 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.

	Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>Baixas latitudes - Norte</b>					
<b>Leste</b>	Boa Vista	BOAV	2.83 N	60.70 O	10.0° N
<b>Oeste</b>	São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
<b>Região Equatorial</b>					
<b>Leste</b>	Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
	São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S
	Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
<b>Oeste</b>	Rio Branco	RIOB	9.96 S	67.80 O	0.8 N
	Ji-Paraná	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
	Guajará-Mirim	ROGM	10.78 S	41.31 O	0.6° S
<b>Baixas latitudes - Sul</b>					
<b>Leste</b>	Recife	RECF	8.05 S	34.95 O	13.5° S
	Teresina	PITN	5.10 S	42.80 O	6.2° S
	Salvador-INCRA	SAVO	12.98 S	38.43 O	15.8° S
<b>Oeste</b>	Campo Grande	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
	Cuiabá	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.2° S
	Rosana	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.4° S
<b>Além da crista da AIE</b>					
<b>Leste</b>	Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
	Rio de Janeiro - ON	ONRJ	22.90 S	43.30 O	21.7° S
	Ubatuba (Marégrafo)	UBA1	23.50 S	45.11 O	21.2° S
<b>Oeste</b>	Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
	Lages	SCLA	27.80 S	50.30 O	20.6° S
	Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.8° S

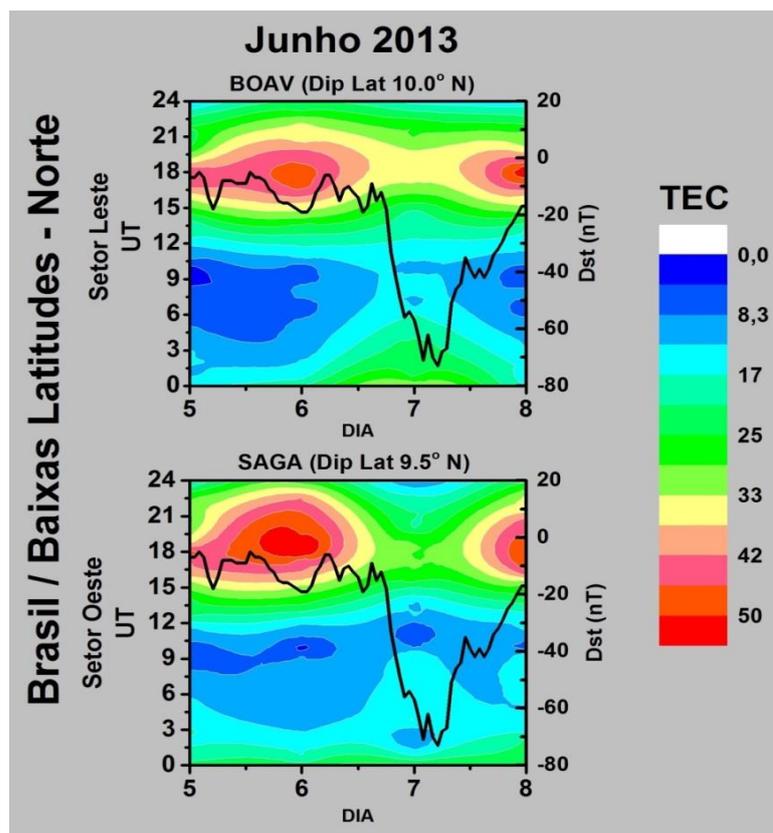
### 3.3.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA )

As Figuras 44, 46, 47 e 48 mostram a variação do VTEC para região de baixa latitude norte e sul, região equatorial e região além da crista da EIA (referente ao hemisfério magnético). Estas figuras apresentam gráficos de contorno VTEC, onde os painéis superiores e inferiores referem-se aos setores Leste (3 estações) e Oeste (3 estações), respectivamente. Para região de baixa latitude norte foi usado somente às estações BOAV (Leste) e SAGA (Oeste) por não haver mais estações disponíveis. As linhas pretas indicam a variação do Dst durante a tempestade geomagnética e são sobrepostas ao gráfico de contorno VTEC permitindo destacar a progresso do VTEC durante as diferentes fases da tempestade.

Para melhor entender o comportamento do VTEC durante os dias estudados foram feitas comparações dos dias perturbados (linhas vermelhas), da média dos dias calmos (linhas pretas) e o desvio padrão (bandas cinza) que são mostradas nas Figuras 45, 49 e 50. Os dias calmos utilizados para calcular os valores médios e o desvio padrão foram de 10 dias.

Analisando as Figuras 44, 46, 47 e 48, observamos nos setores Leste e Oeste, que o VTEC possui valores máximos entre 12:00 UT e 23:00 UT, exceto na região além da crista da EIA onde os valores máximos de VTEC estão entre 12:00 UT e 18:00 UT. Para estação SCLA (Oeste da região além da crista da EIA) os valores máximos estão entre 12:00 UT e 21:00 UT (ver Figura 79). Entretanto, entre 00:00 UT e 12:00 o VTEC exibe valores menores (período noturno) se comparado com os valores diurnos.

Figura 44 – Região de baixa latitude norte.



A Figura 45 apresenta a comparação dos dias calmos com os dias perturbados para região de baixa latitude norte durante a fase principal e no início da fase de recuperação. Notamos nos setores Leste e Oeste distúrbios ionosféricos positivos, sendo mais significativos a Oeste. E no decorrer da fase de recuperação percebemos um período ionosférico negativo para ambo os setores. Explicamos a ocorrência de distúrbios ionosféricos negativos quando acontecem alterações na composição neutra que conduz à diminuição na taxa de densidade de  $O/N_2$  durante tempestades geomagnéticas.

Figura 45 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte.

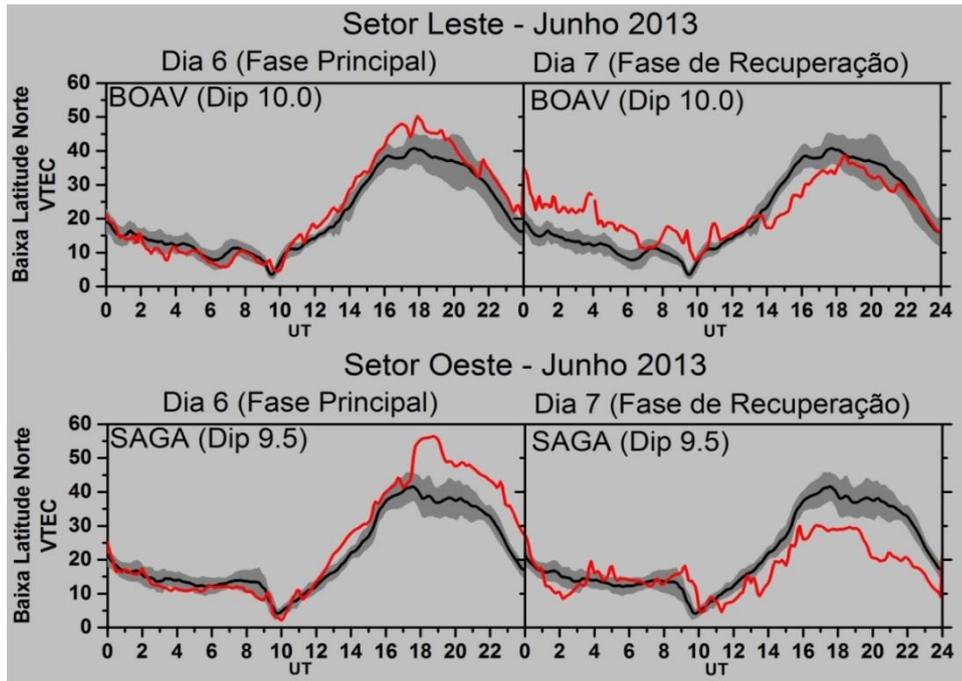


Figura 46 – Região equatorial.

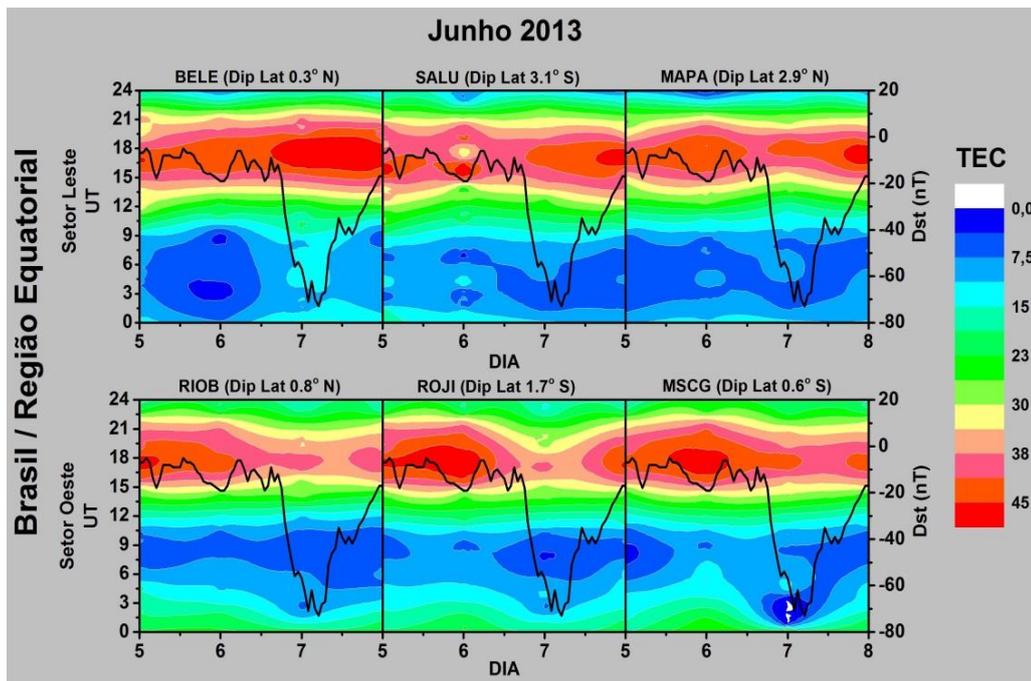


Figura 47 – Região de baixa latitude sul.

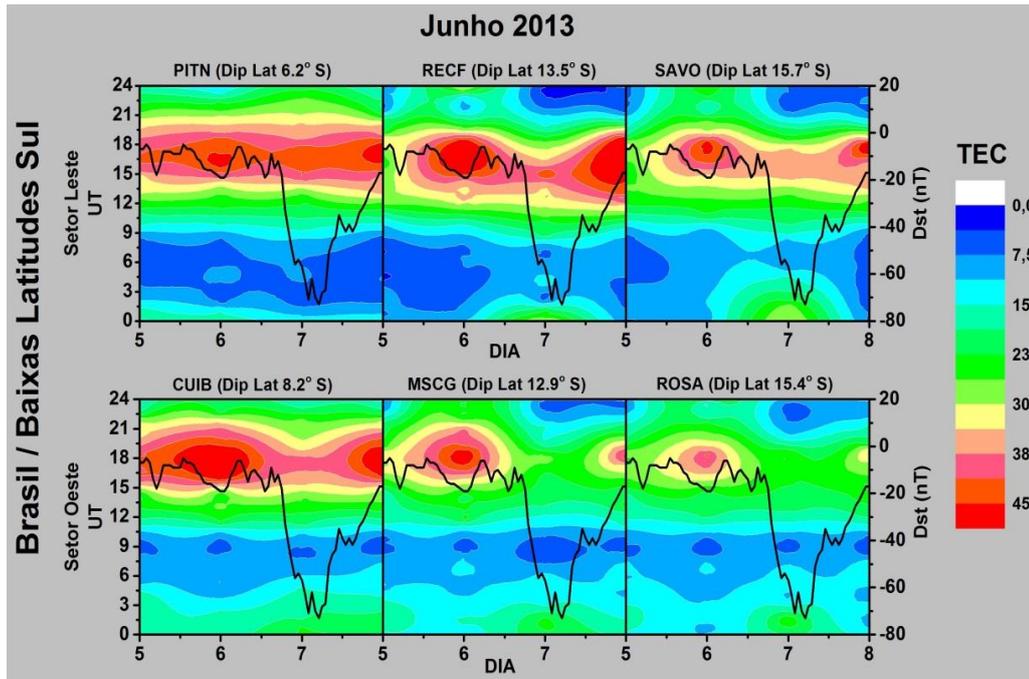
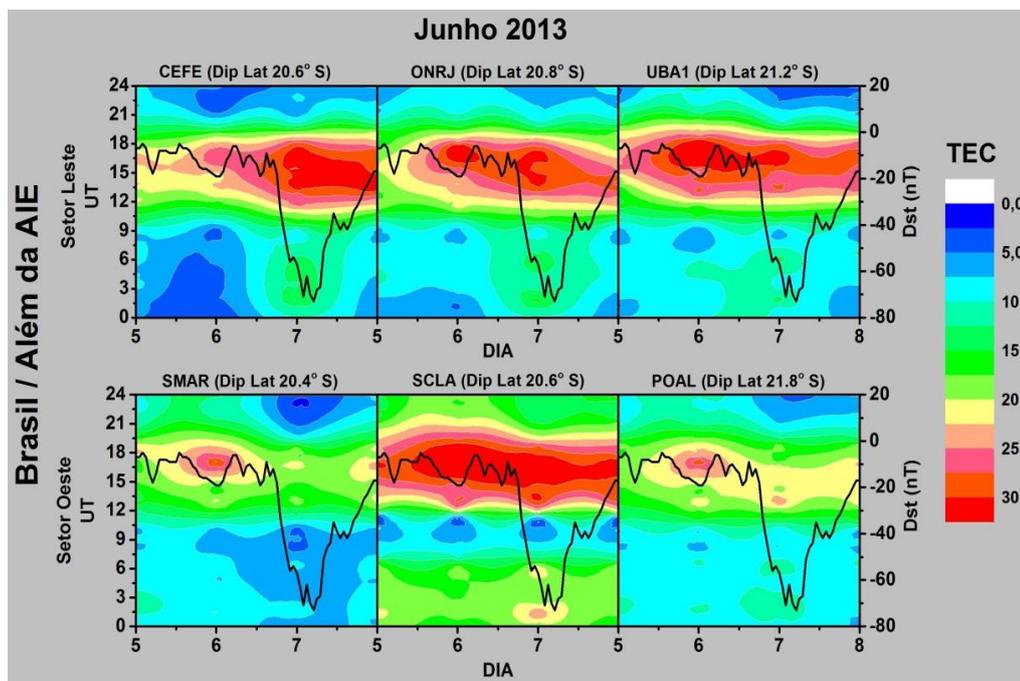


Figura 48 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial.



As Figuras 49 e 50 apresentam as comparações dos dias calmos com os dias perturbados para a região equatorial, baixa latitude sul e além da crista da EIA . Sem alterações significativas, observamos que o comportamento do VTEC durante a fase principal e de recuperação é similar aos dias calmos em ambos os setores para a região equatorial. Para região de baixa latitude sul, no setor Leste, notamos distúrbios ionosféricos positivos na fase principal e durante a fase de recuperação. No setor Oeste notamos distúrbios ionosféricos positivos somente na fase principal. Para a região além da crista da EIA o VTEC diminui em relação às outras regiões. Observamos distúrbios ionosféricos positivos fracos no setor Oeste durante a fase principal e no setor Leste durante a fase de recuperação.

Figura 49 – Variação diurna para o setor Leste.

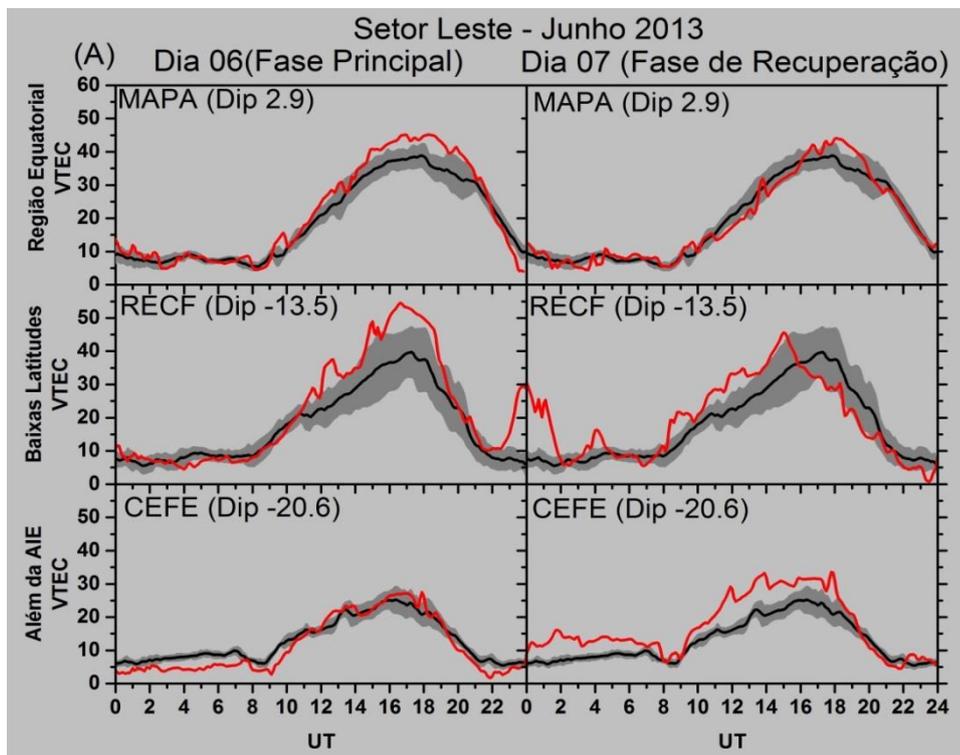
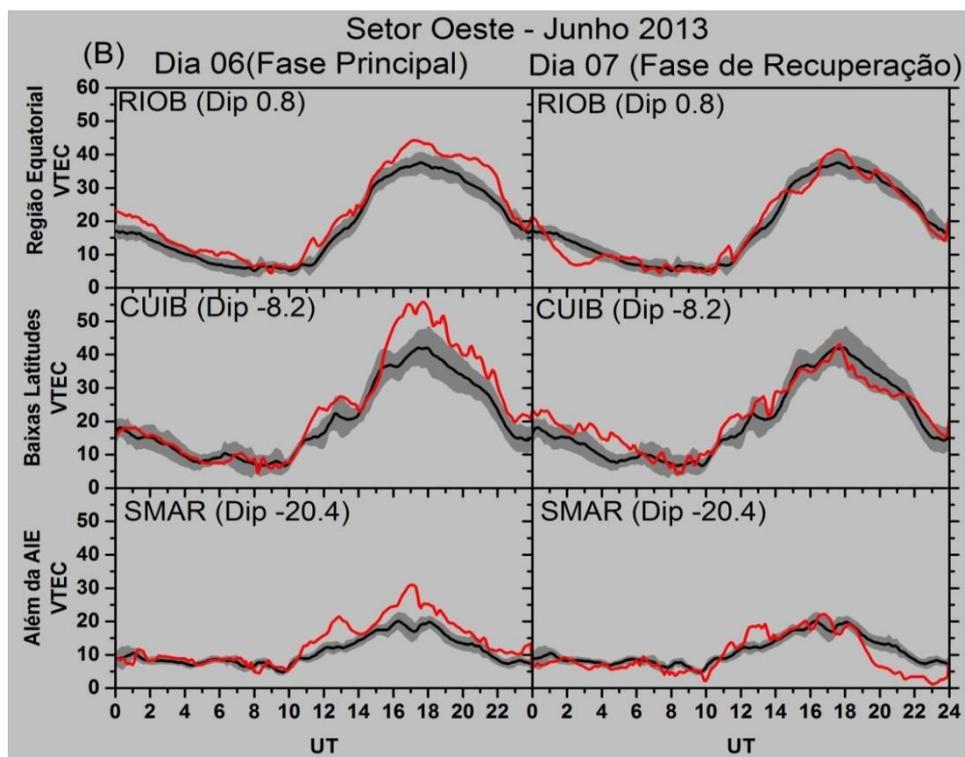


Figura 50 – Variação diurna para o setor Oeste.



### 3.3.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados

As Tabelas 15 e 16 apresentam a localização das estações GPS que foram utilizadas para estudar o comportamento da EIA. Assim, foi possível analisar a resposta da EIA a tempestade geomagnética nos setores Leste e Oeste brasileiro durante todo o período analisado.

Tabela 15 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

Setor Leste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Barreiras	BABR	12.15 S	44.98 O	11.1° S
Gov. Valadares	GVAL	18.85 S	41.95 O	18.4° S
Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
Marabá	MABA	5.35 S	49.11 O	2.8° S
Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
Palmas	TOPL	10.16 S	48.33 O	7.5° S

Tabela 16 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

<b>Setor Oeste</b>				
<b>Estação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Dip. Latitude</b>
<b>Coari</b>	AMCO	4.86 S	65.33 O	4.7° N
<b>Cuiabá</b>	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.1° S
<b>Campo Grande</b>	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
<b>V. B. Santíssima Trindade</b>	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
<b>Porto Alegre</b>	POAL	30.06 S	51.11 O	21.7° S
<b>Porto Velho</b>	POVE	8.71 S	63.9 O	0.8° N
<b>Guarapuava</b>	PRGU	25.38 S	51.48 O	18.2° S
<b>Colorado d'Oeste</b>	ROCD	13.11 S	60.55 O	4.2° S
<b>Ji-Paraná</b>	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
<b>São Gabriel da Cachoeira</b>	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N

As Figuras 51 e 52 mostram a evolução do VTEC (Latitude x tempo) no qual, conseguimos estudar as variações da EIA durante o período perturbado para os setores Leste e Oeste, respectivamente. Para esta tempestade notamos que durante a fase inicial os valores máximos se concentram na região equatorial e baixa latitude sul, sendo mais intenso no setor Oeste. Na fase principal observamos um aumento da EIA, abrangendo quase todas as regiões estudadas, no qual é mais intenso no setor Oeste. Durante a fase de recuperação percebemos uma diminuição de intensidade da EIA em que aparecem valores máximos na região equatorial e região de baixa latitude sul para o setor Leste e no setor Oeste somente na região de baixa latitude sul.

Esta tempestade foi classificada como moderada e apresentou perturbações ionosféricas não significativas. Podemos dizer que EIA se comportou de maneira esperada. No qual, aparece ao norte e ao sul do equador, entre  $\sim 15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  de latitude, picos dos valores máximos.

Figura 51 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 05 a 08 de junho.

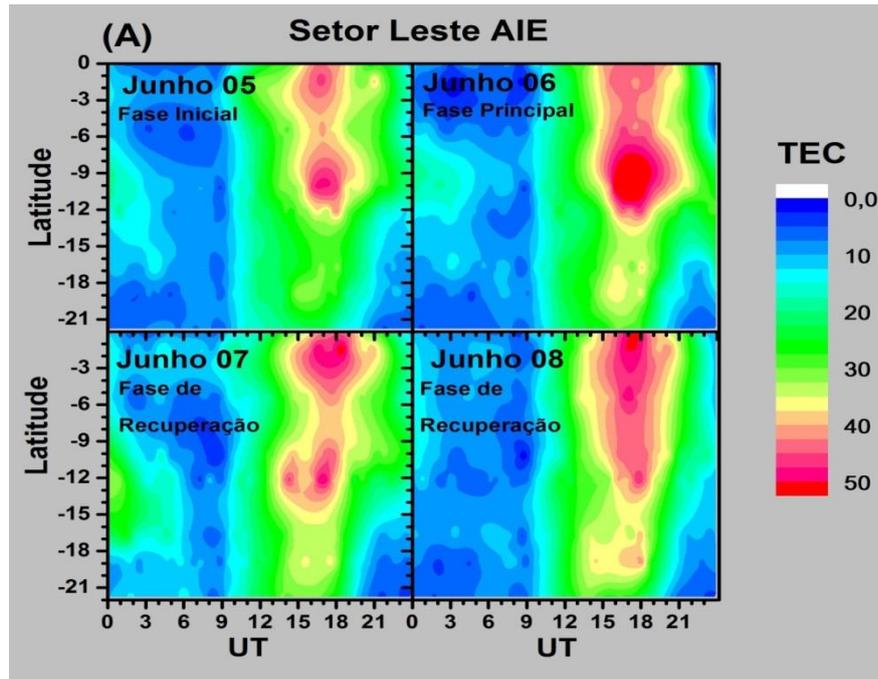
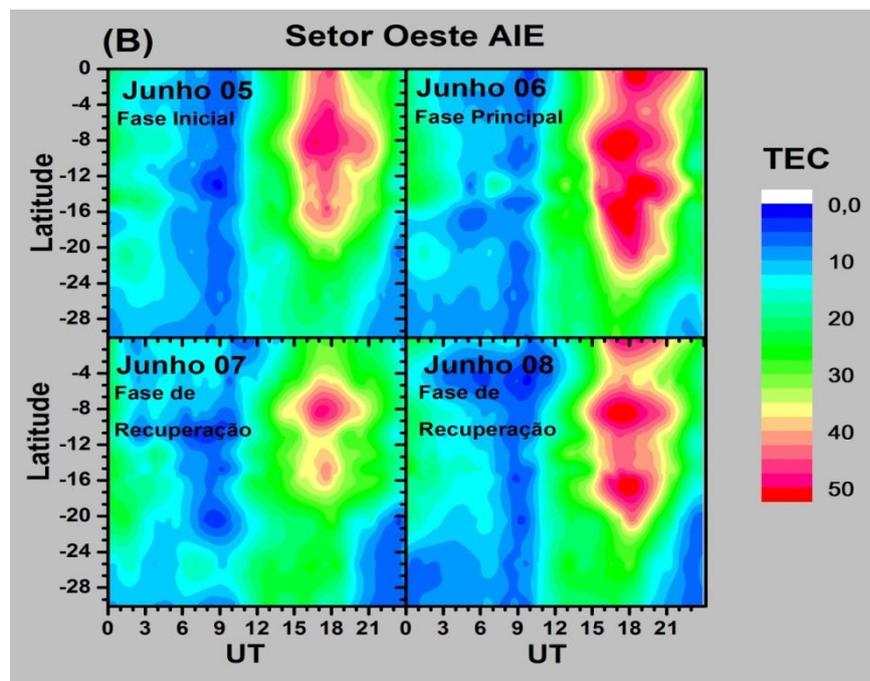


Figura 52 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 05 a 08 de junho.



### 3.4 Tempestade geomagnética ocorrida entre 13 a 16 de julho de 2013 (Moderada)

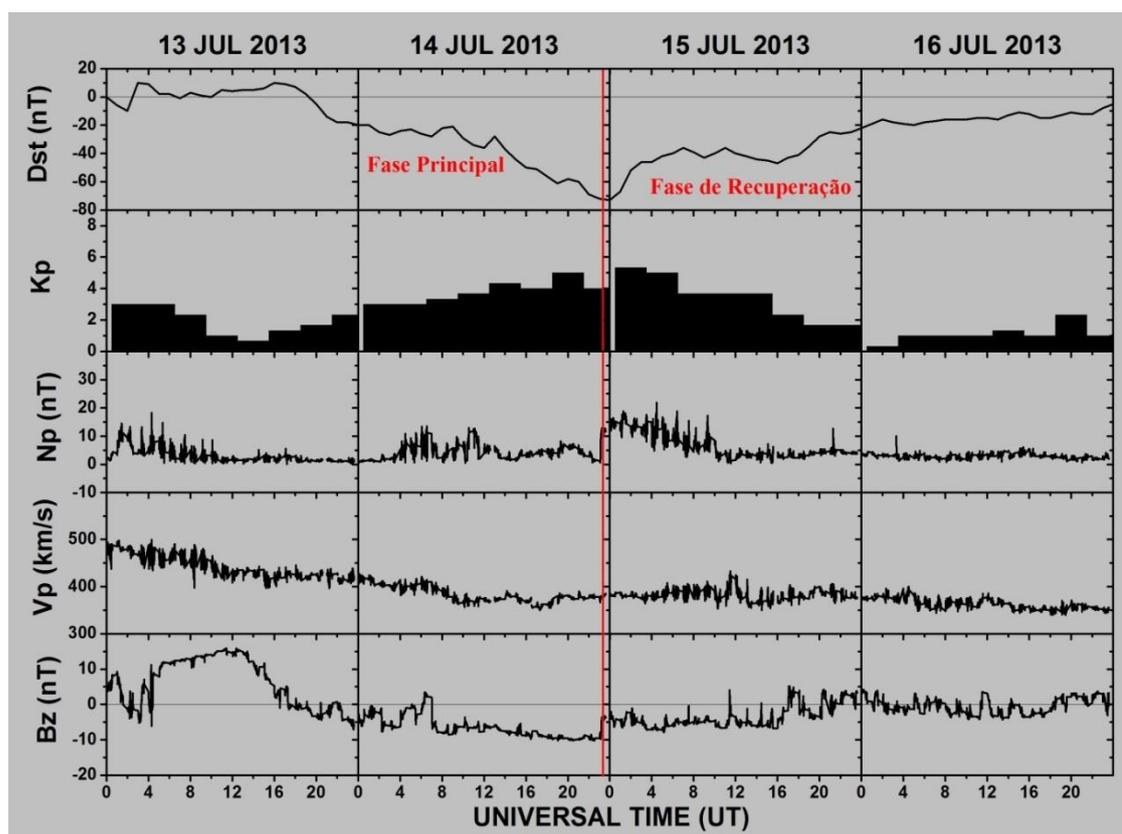
A Figura 53 apresenta os valores dos índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) para os dias entre 13 a 16 de julho de 2013, com intuito de auxiliar na análise da tempestade geomagnética.

O boletim do ISGI não indica o SSC para o período analisado. Porém é possível, através da Figura 53, identificar a fase principal e de recuperação desta tempestade geomagnética. O índice Dst atingiu um valor máximo de 10 nT às 16:00 UT (13/07/2013) e na fase principal, no dia 15 de julho às 00:00 UT, o Dst alcançou um valor mínimo de -73 nT. O índice Kp alcançou um valor de 5+.

No decorrer do dia 13 de julho o vento solar estava por volta de 500 km/s e durante a tempestade, na fase principal e de recuperação, a velocidade do vento solar foi diminuindo até manter valores aproximados entre 350-380 km/s. A densidade se manteve sem perturbações durante a fase principal. Porém na fase de recuperação atingiu um valor aproximado de 20 partículas  $\text{cm}^{-3}$  (ver Figura 53).

No dia 13 de junho, na fase inicial, o IMF-Bz encontrava-se na direção norte. No mesmo dia, às 18:00 UT o IMF-Bz inverteu para o sul, permanecendo por toda fase principal e início da fase de recuperação. No dia 15 de julho, às 18:00 UT, o IMF-Bz oscilou entre norte e sul por algumas horas, durante a fase de recuperação. Em seguida o IMF-Bz se comportou sem oscilações bruscas até o fim do período analisado (ver Figura 53).

Figura 53 – Índices geomagnéticos Dst e Kp e parâmetros interplanetários Np, Vp e Bz. A fase principal e de recuperação são indicadas por linhas vermelhas.



A Tabela 17 exhibe as estações que foram usadas nos gráficos de contorno e as Tabelas 18 e 19 as que foram usadas no estudo da EIA (coordenadas geográficas e Dip latitude).

Tabela 17 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.

	Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>Baixas latitudes - Norte</b>					
<b>Leste</b>	Boa Vista	BOAV	2.83 N	60.70 O	10.0° N
<b>Oeste</b>	São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
<b>Região Equatorial</b>					
<b>Leste</b>	Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
	São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S
	Santana	APSA	0.05 S	51.16 O	3.0° N
<b>Oeste</b>	Rio Branco	RIOB	9.96 S	67.80 O	0.8 N
	Colorado d'Oeste	ROCD			4.2° S
	Guajará-Mirim	ROGM	10.78 S	65.33 O	0.6° S
<b>Baixas latitudes - Sul</b>					
<b>Leste</b>	Recife	RECF	8.05 S	34.95 O	13.5° S
	Fortaleza	CEFT	3.70 S	38.46 O	7.4° S
	Salvador-INCRA	SAVO	12.93 S	38.43 O	15.7° S
<b>Oeste</b>	Cuiabá	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.2° S
	V. B. da Santíssima Trindade	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
	Rosana	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.4° S
<b>Além da crista da AIE</b>					
<b>Leste</b>	Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
	Rio de Janeiro-ON	ONRJ	22.90 S	43.21 O	20.8° S
	Ubatuba (Marégrafo)	UBA1	23.50 S	45.11 O	20.2° S
<b>Oeste</b>	Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
	Lages	SCLA	27.80 S	50.30 O	20.6° S
	Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.8° S

### 3.4.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA )

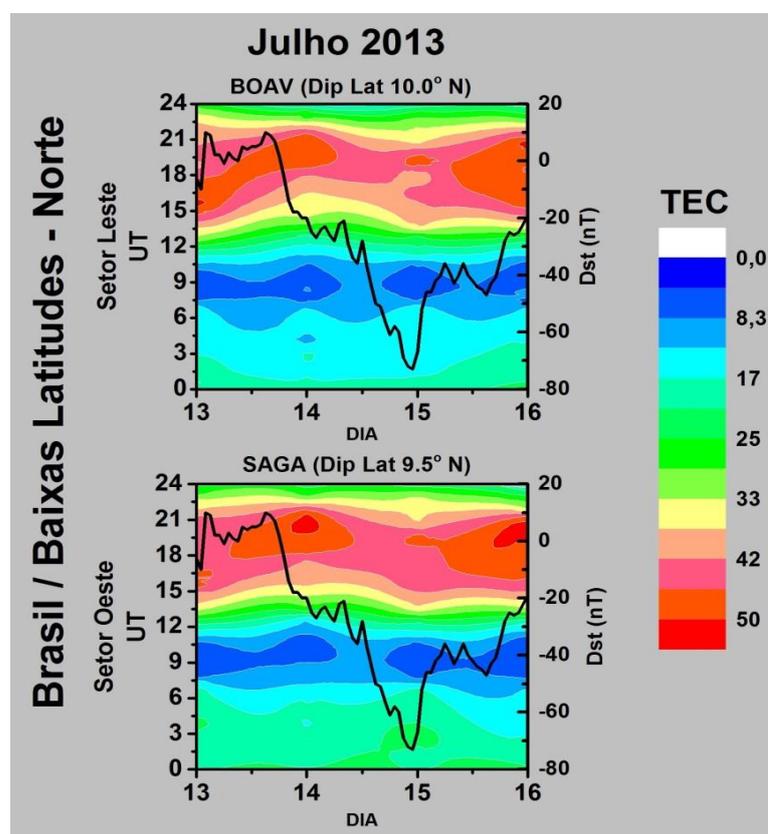
As Figuras 54, 56, 57 e 58 mostram a variação do VTEC para os setores Leste (3 estações) e Oeste (3 estações) brasileiro para as regiões de baixa latitude norte e sul, região equatorial e região além da crista da EIA (referente ao hemisfério magnético). Para região de baixa latitude norte foi usado somente às estações BOAV (Leste) e SAGA (Oeste) por não haver mais estações disponíveis nessa região. Estas figuras apresentam gráficos de contorno VTEC, onde os painéis superiores e inferiores referem-se ao setor Leste e Oeste, respectivamente. As linhas pretas indicam a variação do Dst durante a tempestade geomagnética que estão sobreposta os gráficos de contorno com o intuito de simplificar a análise.

As Figuras 55, 59 e 60 foram feitas para analisar o comportamento do VTEC para os dias perturbados (linhas vermelhas), da média dos dias calmos (linhas pretas) e o desvio

padrão (bandas cinza). Foram usados 10 dias calmos para calcular os valores médios e o desvio padrão.

As figuras de contorno (Figuras 54, 56, 57 e 58) nos setores Leste e Oeste possui valores máximos de VTEC entre 14:00 UT e 22:00 UT, exceto a região além da crista da EIA, onde os valores máximos estão entre 14:00 UT e 18:00 UT (período diurno). Entre 00:00 UT e 12:00 UT o VTEC apresentou valores mínimos quando se comparando aos valores encontrados no período diurnos. Para estação ROSA (Oeste da região de baixa latitude sul) e em todas as estações da região além da crista da EIA percebemos valores máximos, na fase principal da tempestade, entre 00:00 UT - 03:00 UT.

Figura 54 – Região de baixa latitude norte.



Não foram encontradas perturbações significativas durante a fase inicial, principal e de recuperação para região de baixa latitude norte (ver Figura 55). O VTEC se comportou semelhante à média dos dias calmos analisados em ambos os setores.

Figura 55 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte.

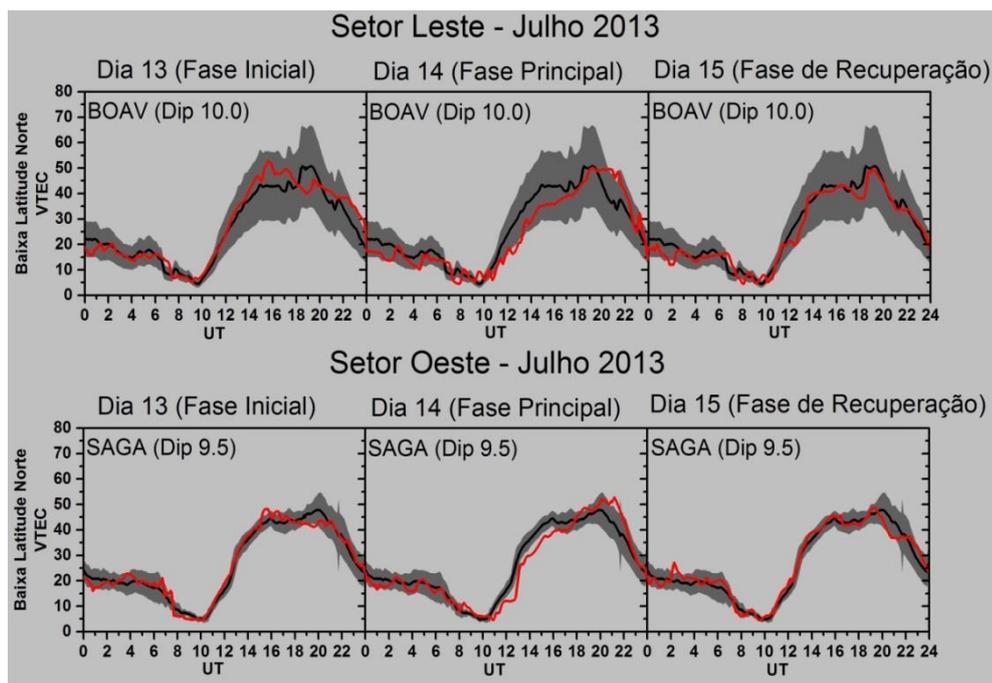


Figura 56 – Região equatorial.

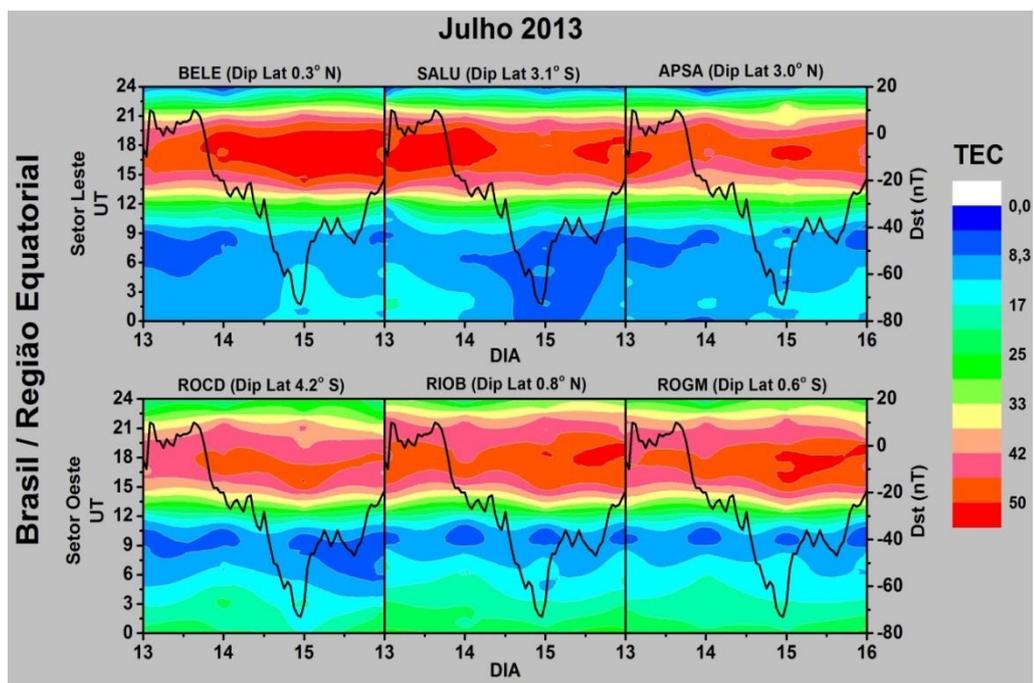


Figura 57 – Região de baixa latitude sul.

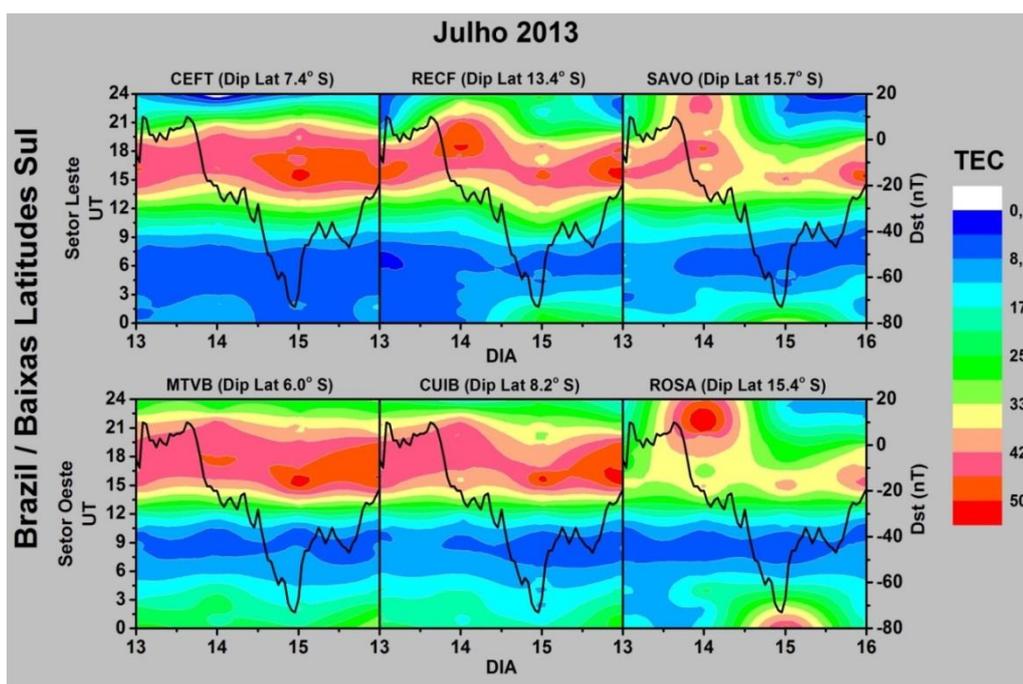
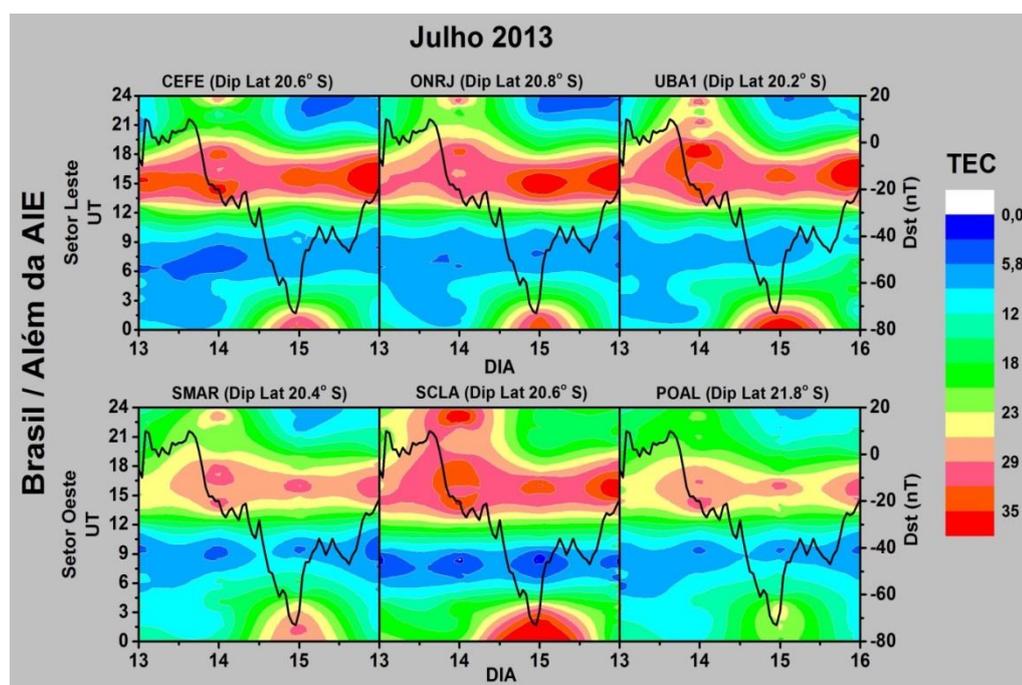


Figura 58 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial.



Na região equatorial, somente no setor Leste, notamos que houve distúrbios ionosféricos positivos no decorrer da fase inicial, fase principal e fase de recuperação. Na região de baixa latitude sul, apenas no setor Leste, observamos novamente ocorrências de distúrbios ionosféricos positivos durante a fase principal e de recuperação. Na região além da

crista da EIA notamos, agora em ambos os setores Leste e Oeste, a ocorrência de distúrbios ionosféricos positivos durante a fase principal e de recuperação. Assim, de modo geral, podemos dizer que a região além da crista da EIA apresentou uma diminuição do VTEC em relação às outras regiões. Notamos também que o setor Leste o VTEC se comportou de modo mais perturbado do que o setor Oeste (Figuras 59 e 60).

Figura 59 – Variação diurna para o setor Leste.

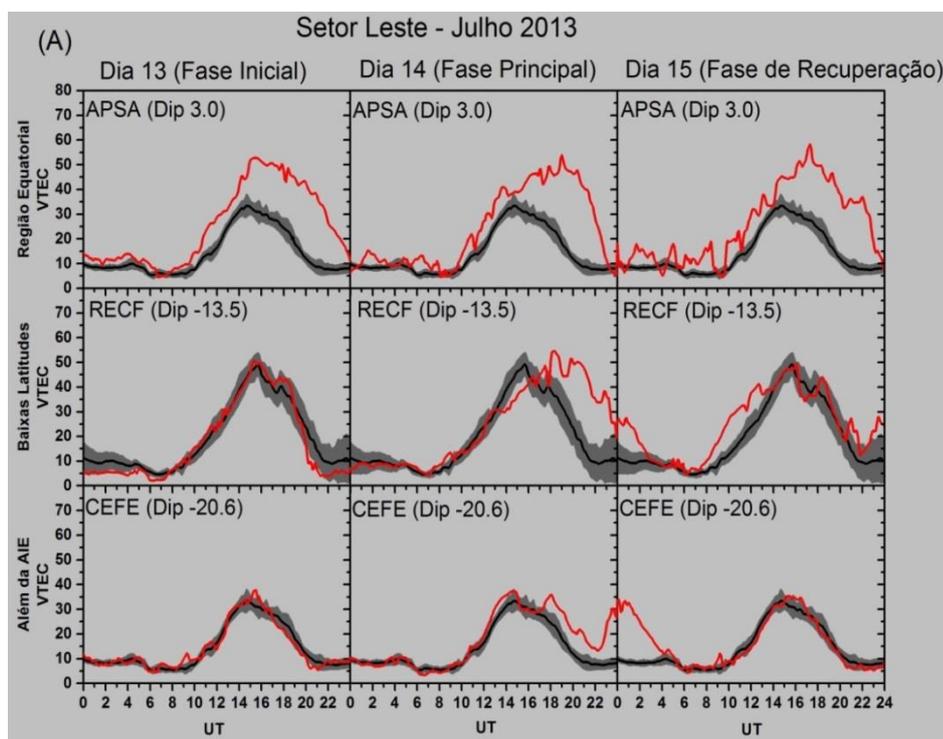
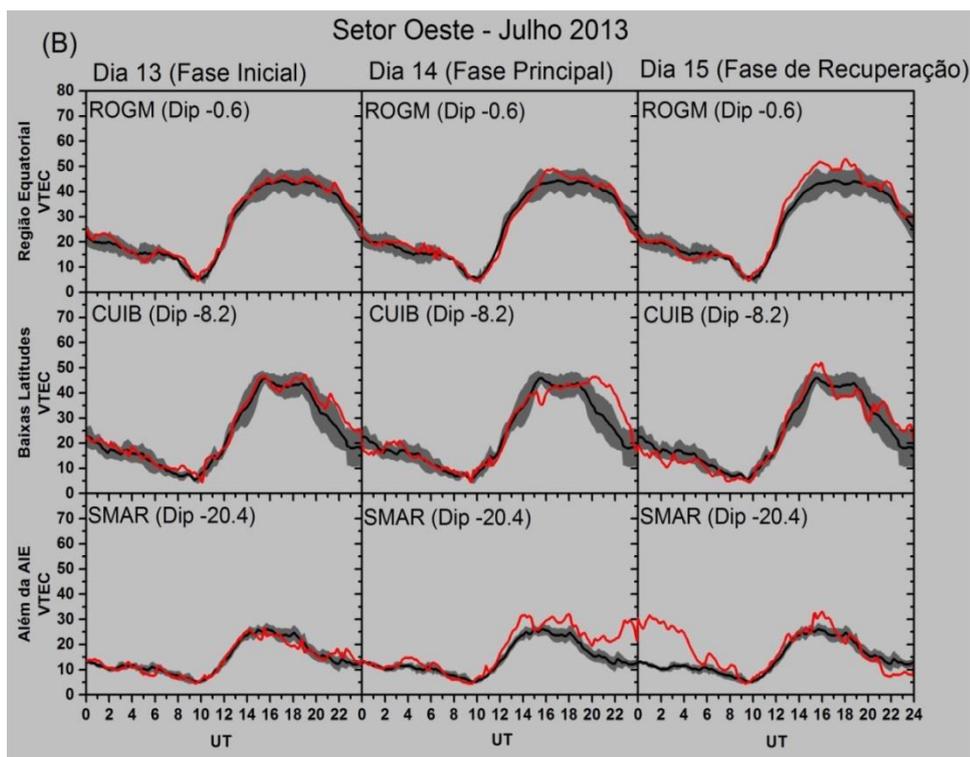


Figura 60 – Variação diurna para o setor Oeste.



### 3.4.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados

As Tabelas 18 e 19 apresentam as localizações das estações GPS, separadas em setores Leste e Oeste, que foram selecionadas para investigar a resposta da EIA durante a ocorrência desta tempestade geomagnética.

Tabela 18 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

Setor Leste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Barreiras	BABR	12.15 S	44.98 O	11.1° S
Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
Marabá	MABA	5.35 S	49.11 O	2.8° S
Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
Belo Horizonte	MGBH	19.33 S	43.91 O	18.1 S
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
Palmas	TOPL	10.16 S	48.33 O	7.5° S

Tabela 19 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste.

<b>Setor Oeste</b>				
<b>Estação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Dip. Latitude</b>
<b>Coari</b>	AMCO	4.86 S	65.33 O	4.7° N
<b>Cuiabá</b>	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.1° S
<b>Campo Grande</b>	MSCG	20.43 S	54.53 O	12.9° S
<b>V. B. Santíssima Trindade</b>	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
<b>Porto Alegre</b>	POAL	30.06 S	51.11 O	21.7° S
<b>Porto Velho</b>	POVE	8.71 S	63.9 O	0.8° N
<b>Guarapuava</b>	PRGU	25.38 S	51.48 O	18.2° S
<b>Colorado d'Oeste</b>	ROCD	13.11 S	60.55 O	4.2° S
<b>Ji-Paraná</b>	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
<b>São Gabriel da Cachoeira</b>	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N

As Figuras 61 e 62 mostram a evolução do VTEC (Latitude x tempo) no qual, possibilita estudar a EIA durante a fase inicial, fase principal e fase de recuperação nos setores Leste e Oeste, respectivamente. O objetivo é analisar o comportamento da EIA antes e durante os períodos perturbados.

A EIA durante o período calmo estende-se desde a região equatorial até baixas latitudes (~13°-16° latitude). No entanto, durante o período perturbado a anomalia estendeu-se até latitudes maiores que 20°. Caracterizando a ocorrência de um efeito fonte intenso. Um comportamento semelhante do efeito fonte intenso no setor brasileiro foi notado por FAGUNDES et al., 2016 durante a tempestade de St. Patrick (Ver figura 61 e 62).

Esta tempestade geomagnética foi classificada como moderada e apresentou um comportamento atípico em relação às outras tempestades estudadas. Sendo que as principais perturbações foram o aumento dos valores máximos da EIA durante a fase principal. Durante a fase inicial, principal e de recuperação notou-se distúrbios ionosféricos positivos mais significativos no setor Leste.

Figura 61 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 13 a 16 de julho.

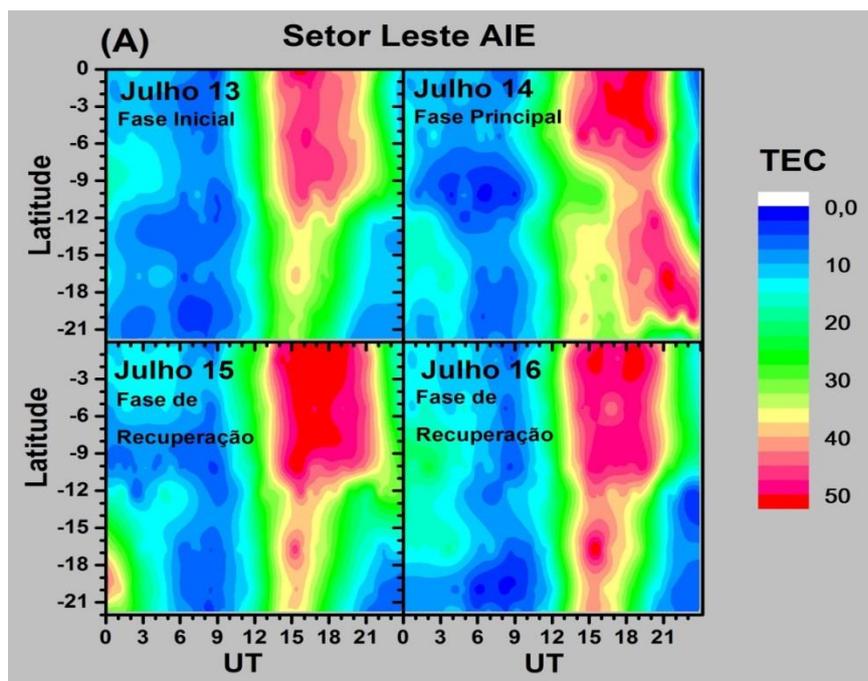
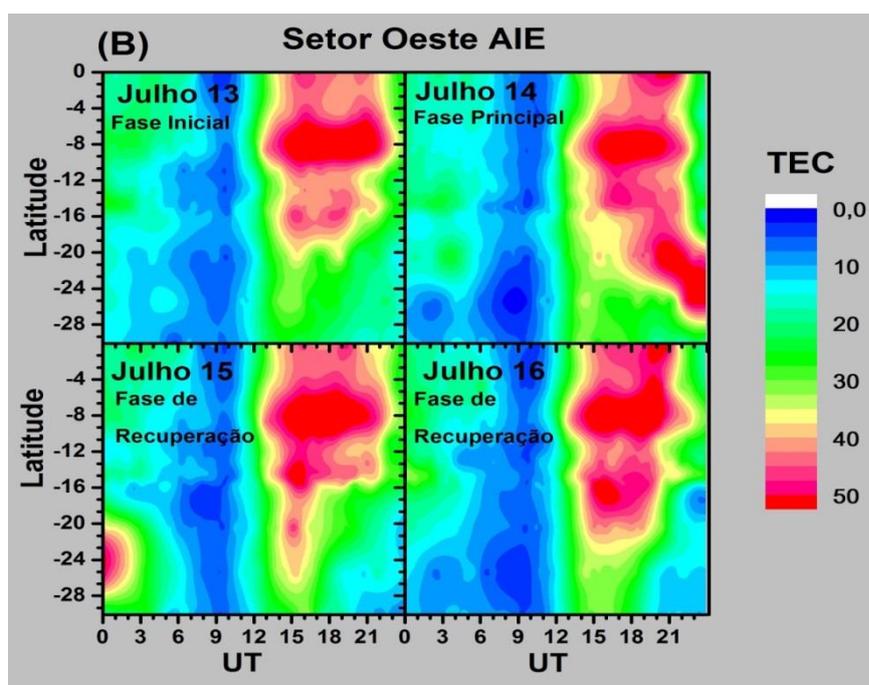


Figura 62 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 13 a 16 de julho.



### 3.5 Tempestade geomagnética ocorrida entre 16 a 21 janeiro de 2013 (Moderada)

Entre os dias 16 a 21 de janeiro foram observadas 3 tempestades geomagnéticas que ocorreram em um curto intervalo de tempo. Este período foi o mais complicado de todos os que foram analisados no decorrer do 1º semestre de 2013. Através da Figura 63 notamos o comportamento perturbado dos índices geomagnéticos e dos parâmetros interplanetários do vento solar, no qual sofreram alterações bruscas durante o período estudado. Essas mudanças repentinas tornaram a análise bastante complexa, dificultando, por exemplo, a identificação das fases das tempestades, o encontro dos valores máximos e mínimos da densidade eletrônica e a análise da velocidade do plasma perturbado.

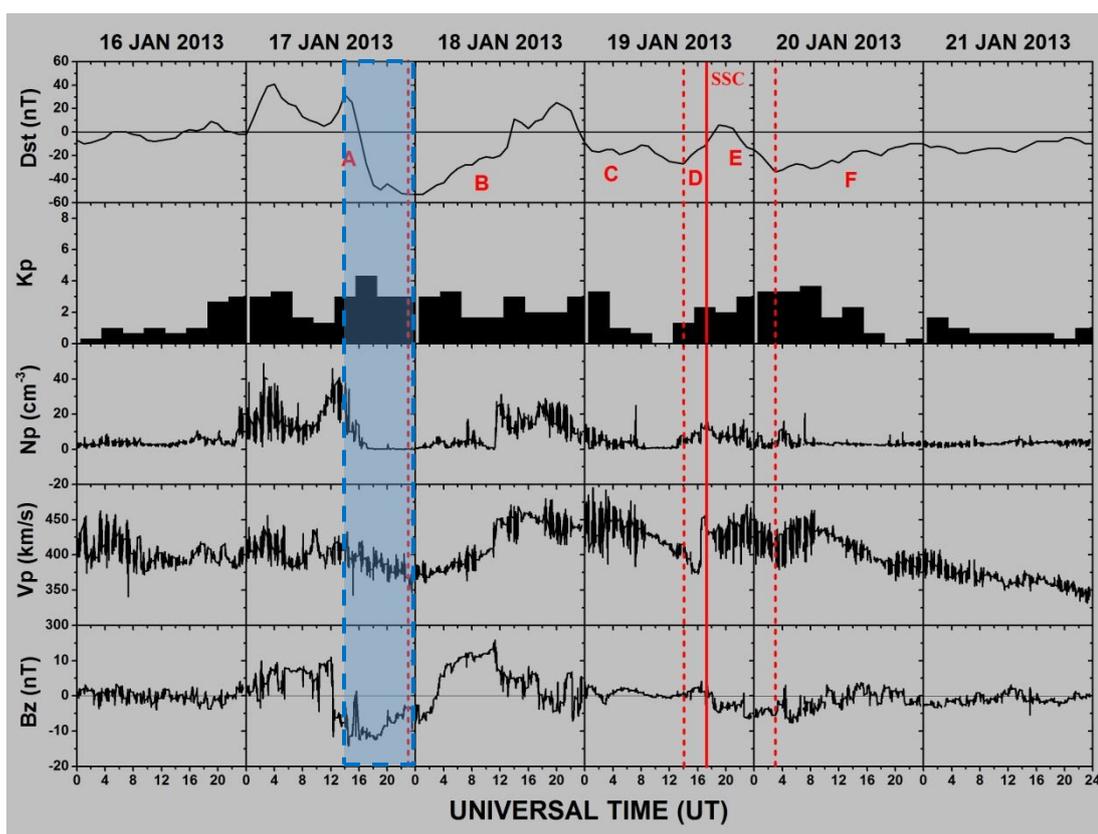
O boletim do ISGI indicou somente um SSC que ocorreu às 17:32 UT no dia 19 de janeiro. Provavelmente, existiu alguma dificuldade em identificar os outros SSCs devido à complexidade do período perturbado. Porém, para cada evento (no qual chamamos de tempestade 1, tempestade 2 e tempestade 3) foi possível identificar a fase principal e a fase de recuperação (Veja Figura 63).

A Figura 63 apresenta a variação temporal dos índices geomagnéticos (Dst e Kp) e os parâmetros interplanetários do vento solar (Bz, Vp e Np) para os dias analisados. Durante todo período perturbado estudado o Dst chegou a um valor máximo de 41 nT em 17 de janeiro às 04:00 UT. Na fase principal da tempestade 1, às 23:00 UT do dia 17 de janeiro, o Dst alcançou um valor mínimo de -53 nT e apresentou o índice Kp igual a 4+. Durante a fase principal da tempestade 2, às 14:00 UT do dia 19 de janeiro, o Dst atingiu um valor de -27 nT com um Kp de 3+. E no decorrer da fase principal da tempestade 3, às 03:00 UT do dia 20 de janeiro, o valor do Dst foi de -34 nT com um valor de Kp igual a 4-. O vento solar durante o período calmo estava em torno de 340 km/s e no decorrer do período perturbado alterou rapidamente para valores próximos a 480 km/s e a densidade chegou a valores próximos a 40 partículas  $\text{cm}^{-3}$ .

Na Figura 63 observamos que a componente IMF-Bz inverteu para o sul em duas etapas. A primeira inversão teve uma duração de 16 horas (iniciando às 12:00 UT do dia 17 até às 04:00 UT do dia 18). A partir deste momento, o IMF-Bz inverteu para o norte por 14 horas (partindo as 04:00 até às 18:00 UT do dia 18). Em seguida tivemos um comportamento oscilatório entre norte e sul por 24 horas (começando às 18:00 UT do dia 18 até às 18:00 UT do dia 19). Às 18:00 UT do dia 19 até às 10:00 UT do dia 20 de janeiro o IMF-Bz

permaneceu para o sul por 16 horas. Em seguida o IMF-Bz se comportou de maneira oscilatória até o fim dos dias analisados.

Figura 63 – Índices geomagnéticos e parâmetros do vento solar. As mudanças das fases são indicadas pelas linhas pontilhadas vermelhas, onde cada letra em negrito indica a sua respectiva fase. **A**: Fase principal da tempestade 1; **B**: Fase de Recuperação da tempestade 1; **C**: Fase principal da tempestade 2; **D**: Fase de Recuperação da tempestade 2; **E**: Fase principal da tempestade 3; **F**: Fase de Recuperação da tempestade 3. O SSC, que ocorreu às 17:32 UT, é indicado pela linha vermelha. O preenchimento azul indica o período de ocorrência do distúrbio ionosférico propagante – TID.



A Tabela 20 apresenta as estações que foram empregadas nos gráficos de contorno e as Tabelas 22 e 23 as que foram utilizadas no estudo da EIA (coordenadas geográficas e Dip latitude).

Tabela 20 – Informações das 20 estações GPS juntamente com suas coordenadas.

	Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>Baixas latitudes - Norte</b>					
<b>Leste</b>	Boa Vista	BOAV	2.83 N	60.70 O	10.0° N
<b>Oeste</b>	São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
<b>Região Equatorial</b>					
<b>Leste</b>	Belém	BELE	1.40 S	48.45 O	0.3° N
	São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S
	Altamira	PAAT	3.20 S	52.16 O	0.7° N
<b>Oeste</b>	Cruzeiro do Sul	CRUZ	7.60 S	72.66 O	3.8° N
	Porto Velho	POVE	8.71 S	63.90 O	0.8° N
	Ji-Parana	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
<b>Baixas latitudes - Sul</b>					
<b>Leste</b>	Teresina	PITN	5.10 S	42.80 O	6.2° S
	Fortaleza	CEFT	3.70 S	38.46 O	7.4° S
	Salvador-INCRA	SAVO	12.93 S	38.43 O	15.7° S
<b>Oeste</b>	Cuiabá	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.2° S
	Jataí	GOJA	17.88 S	51.73 O	12.3° S
	Rosana	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.4° S
<b>Além da crista da AIE</b>					
<b>Leste</b>	Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
	Rio de Janeiro-ON	ONRJ	22.90 S	43.21 O	20.8° S
	Ubatuba	UBA1	23.50 S	45.11 O	20.2° S
<b>Oeste</b>	Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
	Lages	SCLA	27.80 S	50.30 O	20.6° S
	Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.8° S

### 3.5.1 Estudo da variação do VTEC em baixas latitudes, região equatorial e além da crista da Anomalia ionosférica equatorial (EIA )

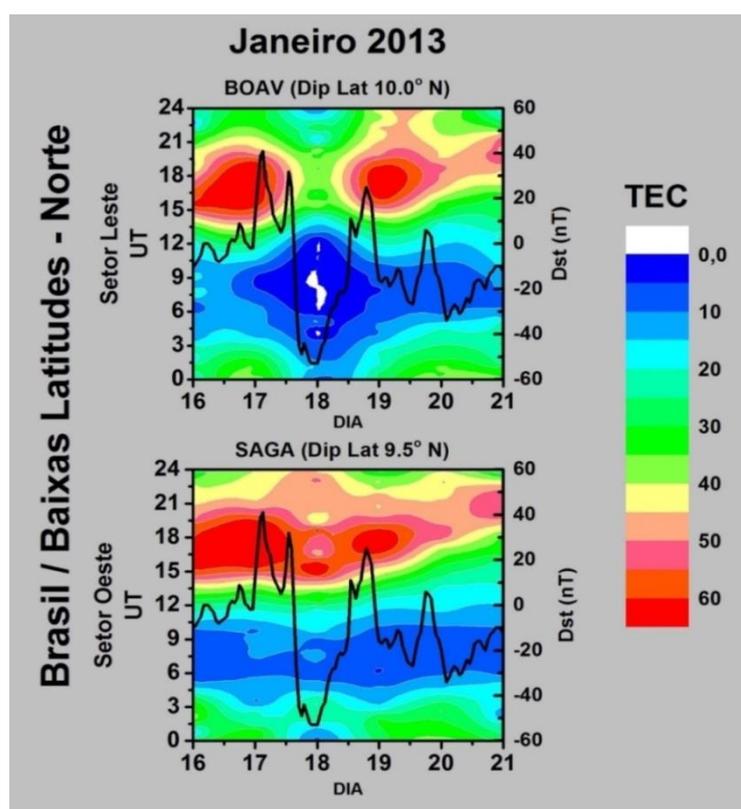
As Figuras 64, 66, 67 e 68 apresentam a variação do VTEC para o setor Leste e Oeste brasileiro nas regiões de baixa latitude norte, equatorial, baixa latitude sul e além da crista da EIA (referente ao hemisfério magnético) entre os dias 16 a 21 de janeiro. Nos gráficos de contorno VTEC temos os painéis superiores e inferiores referente ao setor Leste (com 3 estações) e Oeste (com 3 estações), respectivamente. Para região de baixa latitude norte utilizamos somente as estações BOAV (Leste) e SAGA (Oeste) por não haver mais estações disponíveis nessa região. As linhas pretas indicam a variação do Dst que sobreposta ao gráfico de contorno facilita a análise sobre a evolução do VTEC durante todo período perturbado.

As Figuras 65, 69 e 70 são gráficos de comparações utilizados para analisar os dias perturbados (linhas vermelhas), com a média dos dias calmos (linhas pretas) e o desvio

padrão (bandas cinza). Os dias calmos usados para calcular os valores médios e o desvio padrão foram de 10 dias.

As figuras de contorno (Figuras 64, 66 e 67) apresentam os valores máximos entre 12:00 UT e 22:00 UT para região equatorial e regiões de baixa latitude norte e sul nos setores Leste e Oeste. Para a região além da crista da EIA (Figura 68) os valores máximos de VTEC estão entre 14:00 UT e 20:00 UT. Os valores mínimos, comparado como os valores máximos, aparece para todas as regiões entre 00:00 UT e 12:00 UT.

Figura 64 – Região de baixa latitude norte.



A Figura 65 apresenta o comportamento do VTEC para região de baixa latitude norte. Nota-se que no setor Leste o VTEC mostrou-se mais perturbado do que no setor Oeste. Onde, não houve alterações significativas. Para o setor Leste notamos que no dia 17 de janeiro ocorreu um distúrbio ionosférico positivo fraco e durante o dia 18 um distúrbio ionosférico negativo intenso. No dia 19 notamos um distúrbio ionosférico negativo fraco seguido de um distúrbio ionosférico positivo fraco. Os distúrbios ionosféricos negativos, como citado nas tempestades anteriores, podem ser explicados através das alterações que acontecem na

composição neutra que conduz à diminuição da taxa de densidade de  $O/N_2$  durante tempestades geomagnéticas.

Figura 65 – Variação diurna para os setores Leste e Oeste na região de baixa latitude norte.

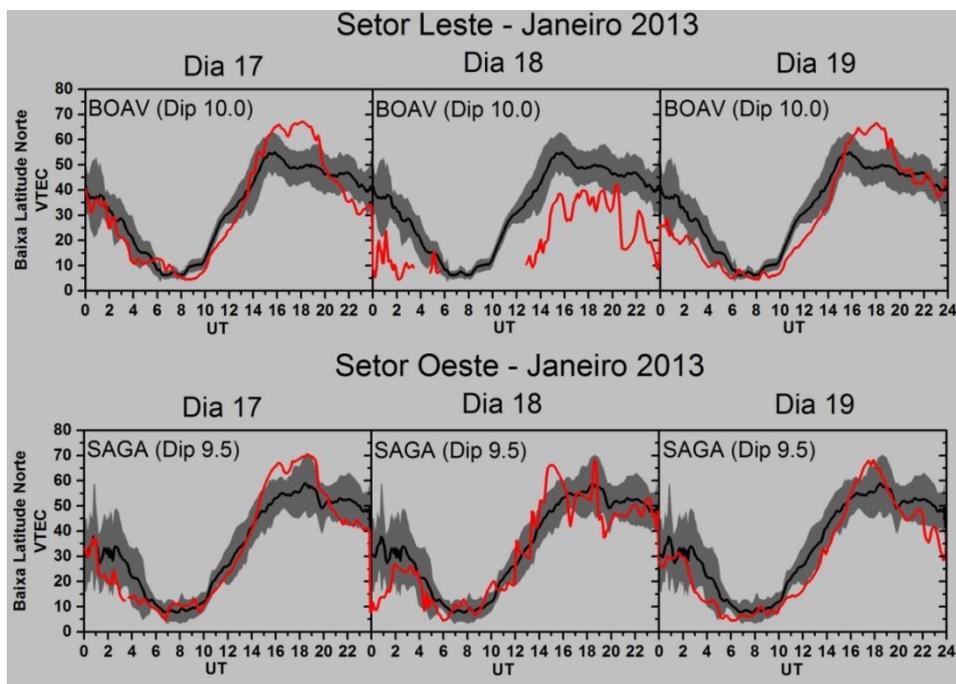


Figura 66 – Região equatorial.

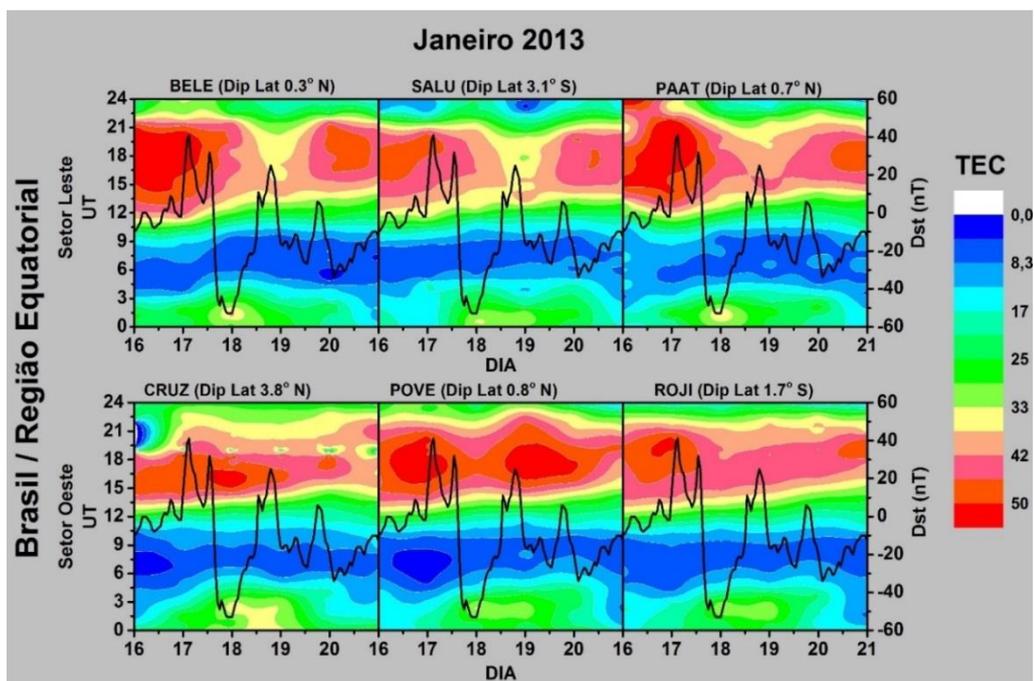


Figura 67 – Região de baixa latitude sul.

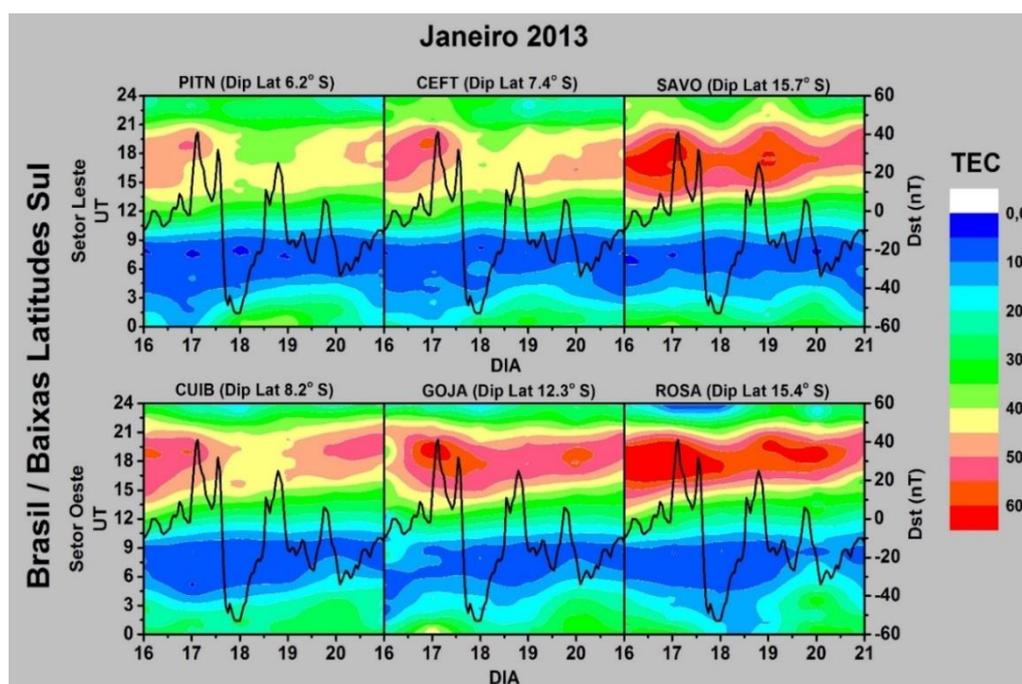
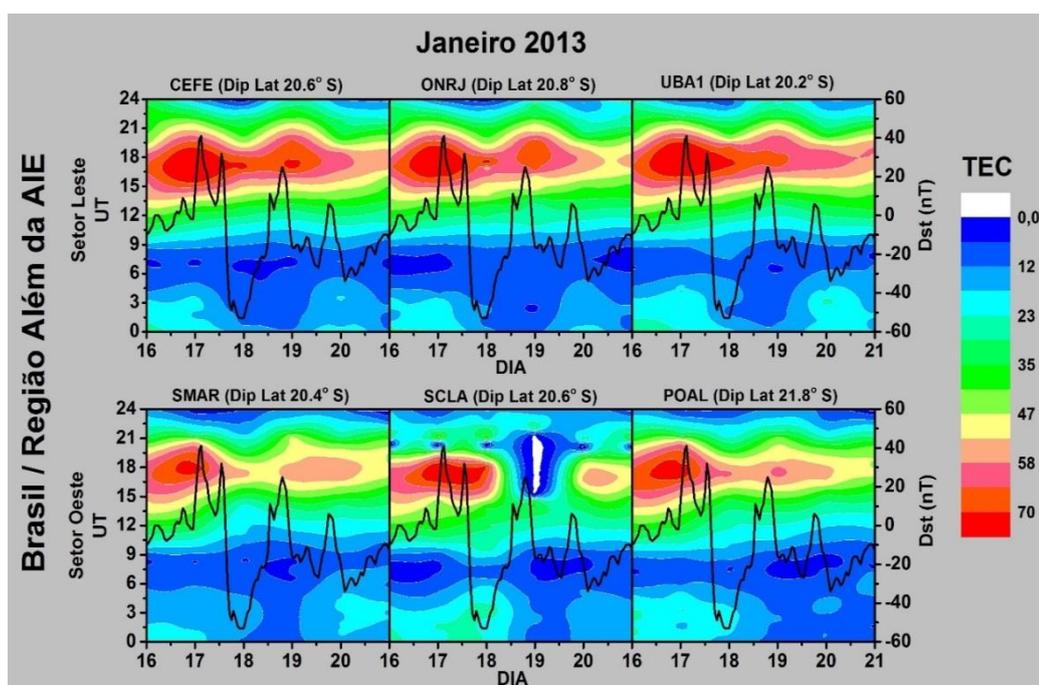


Figura 68 – Regiões além da crista da Anomalia de Ionização Equatorial.



Nas Figuras 69 e 70 é possível observar que na região equatorial, nos setores Leste e Oeste, durante o dia 17 o VTEC não apresentou perturbações significativas. Entretanto, no início do dia 18 conseguimos observar um distúrbio ionosférico positivo seguido de um distúrbio ionosférico negativo. No dia 19 percebemos um comportamento parecido com o dia

18, onde notamos um distúrbio ionosférico positivo seguido também de um distúrbio ionosférico negativo.

Para região de baixa latitude sul não foi observado perturbações no VTEC durante o dia 17. Porém, no dia 18 foram observados distúrbios ionosféricos negativos em ambos os setores e no dia 19 notamos um distúrbio ionosférico positivo fraco (somente para o setor Leste) seguido de distúrbios ionosféricos negativos tanto para os setores Leste e Oeste (Ver Figuras 69 e 70).

Na região além da crista da EIA durante o dia 17 de janeiro houve um distúrbio ionosférico positivo expressivo em ambos os setores. No decorrer do dia 18 e 19 observamos distúrbios ionosféricos negativos seguidos de picos positivos nos setores Leste e Oeste (Ver Figuras 69 e 70).

Figura 69 – Variação diurna para o setor Leste.

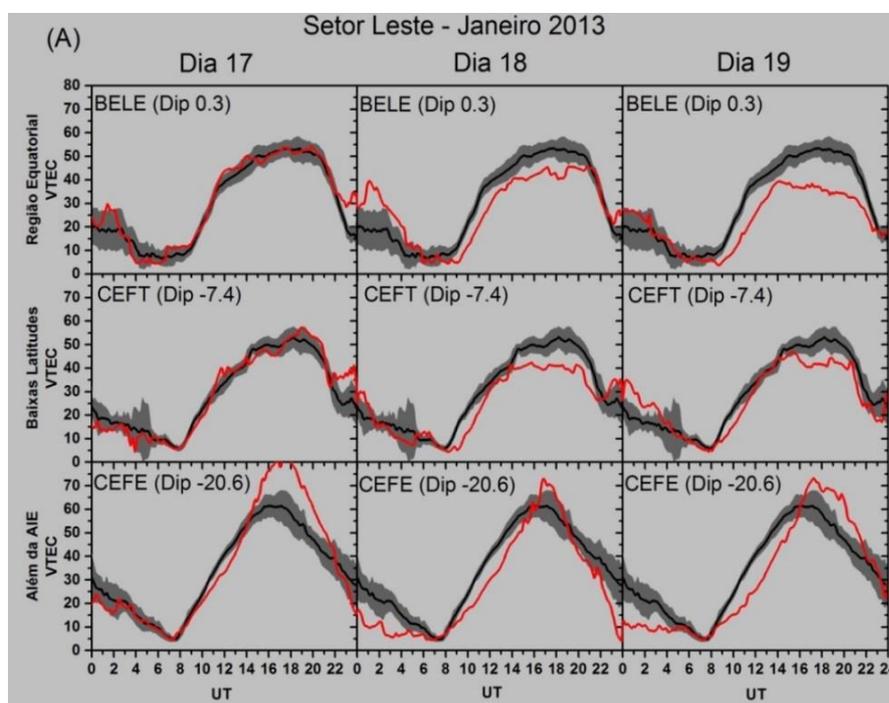
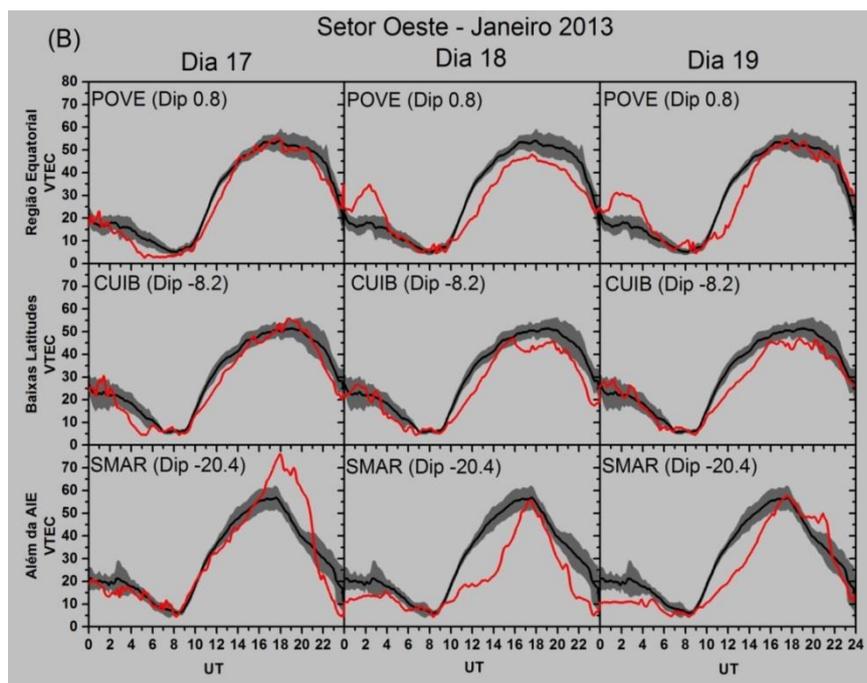


Figura 70 – Variação diurna para o setor Oeste.



As Figuras 71 e 72 mostram os mapas da evolução do VTEC (longitude x latitude geográfica) para todo o setor brasileiro, obtida através das 82 estações de GPS-TEC disponíveis. Os mapas apresentam as alterações do VTEC com o tempo durante a fase principal da tempestade 1 no dia 17 de janeiro das 14:00 UT às 23:20 UT.

Através das Figuras 71 e 72 conseguimos observar o aumento de VTEC (distúrbio ionosférico positivo) se propagando pelas regiões além da crista da EIA, baixa latitude sul e região equatorial em direção a noroeste. O distúrbio ionosférico positivo aparece primeiro na região além da crista da EIA entre 14:00 UT – 22:00 UT no dia 17 de janeiro de 2013. Em seguida, notamos picos positivos na região de baixa latitude sul que começou às 22:00 UT, também no dia 17 de janeiro. E depois, às 23:00 UT, na região equatorial, observamos picos positivos no final do dia 17 e início do dia 18 (Ver Figuras 65, 69 e 70). Durante este evento de propagação do aumento do VTEC a componente vertical do campo magnético interplanetário inverteu bruscamente para o sul às 12:00 UT do dia 17 de janeiro permanecendo até aproximadamente as 04:00 UT do dia 18 de janeiro.

Distúrbios que ocorrem na ionosfera e que são produzidos em períodos geomagnéticos perturbados pelo efeito Joule em altas latitudes (região polar) e que se propagam para regiões de baixas latitudes e região equatorial são chamados de perturbações ionosféricas propagantes – TIDs (FAGUNDES et al., 2007) e podem explicar os distúrbios ionosféricos positivos que são vistos durante as tempestades geomagnéticas. De modo análogo com a TID tipo soliton

(frente de onda) notada em 17 de janeiro de 2013, a perturbação ionosférica propagante detectada em de Abreu et al., (2010) é do tipo soliton, com direção de propagação para noroeste e com velocidade entre 100 a 400 m/s. Normalmente, TIDs tipo soliton são geradas em altas latitudes no decorrer da fase principal das tempestades (de ABREU et al., 2010).

Figura 71 – Mapa do setor brasileiro mostrando a evolução do VTEC (Latitude x Longitude) obtido das 82 estações de GPS-TEC disponíveis ocorrida no dia 17 de janeiro de 2013 das 14:00 UT às 23:20 UT. É observado nessa figura o comportamento **completo** da Perturbação ionosférica propagante – TID.

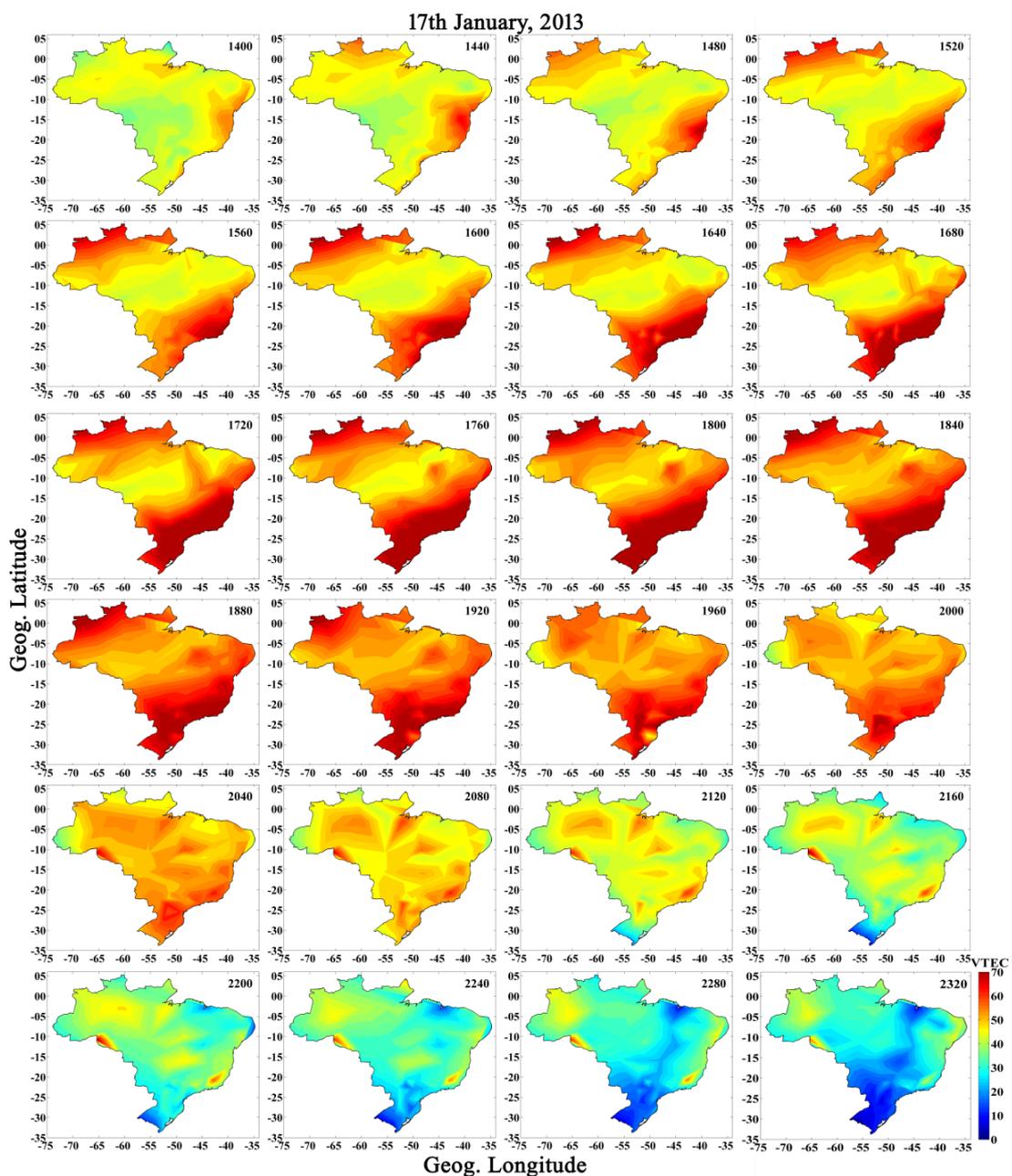
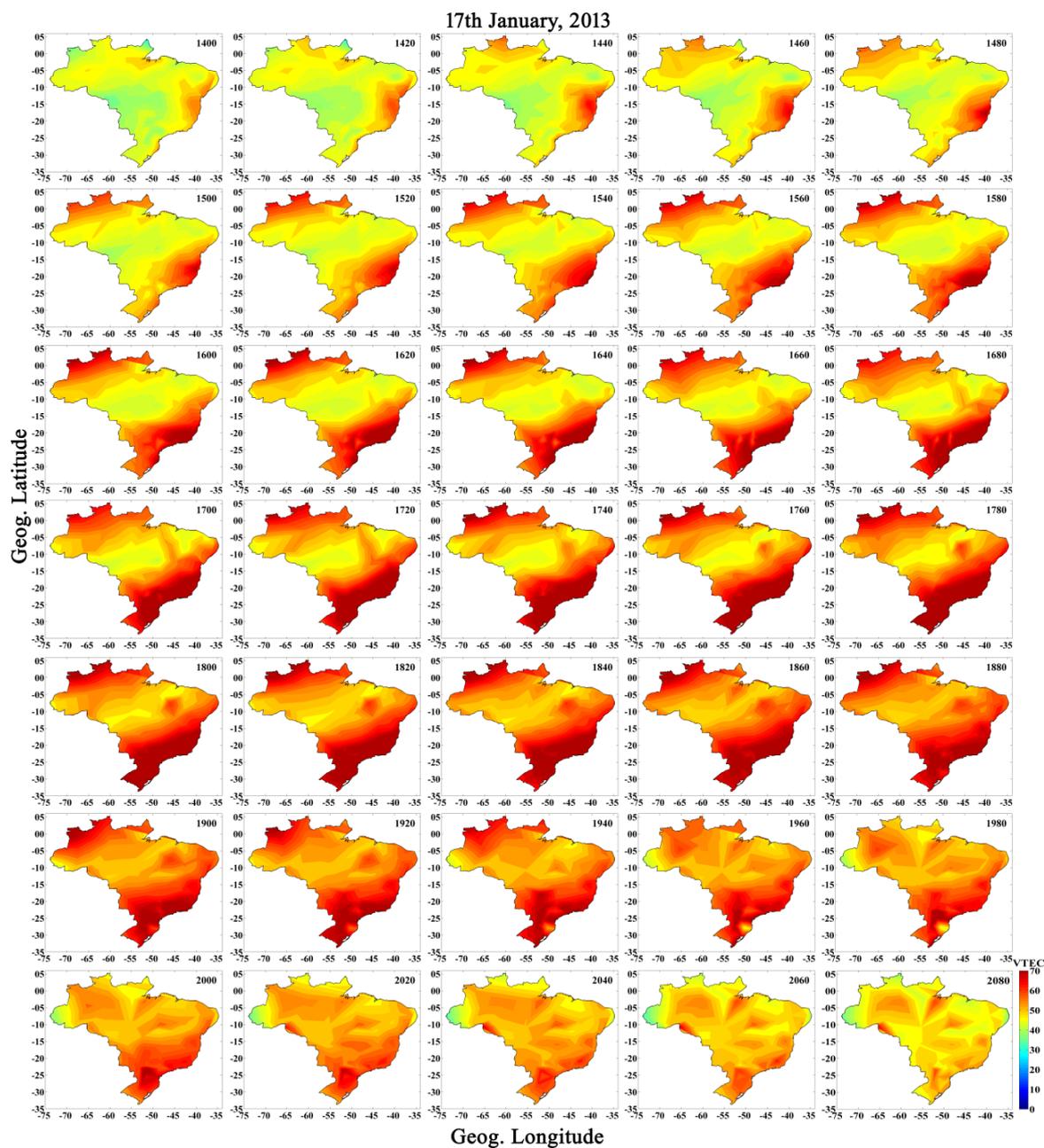
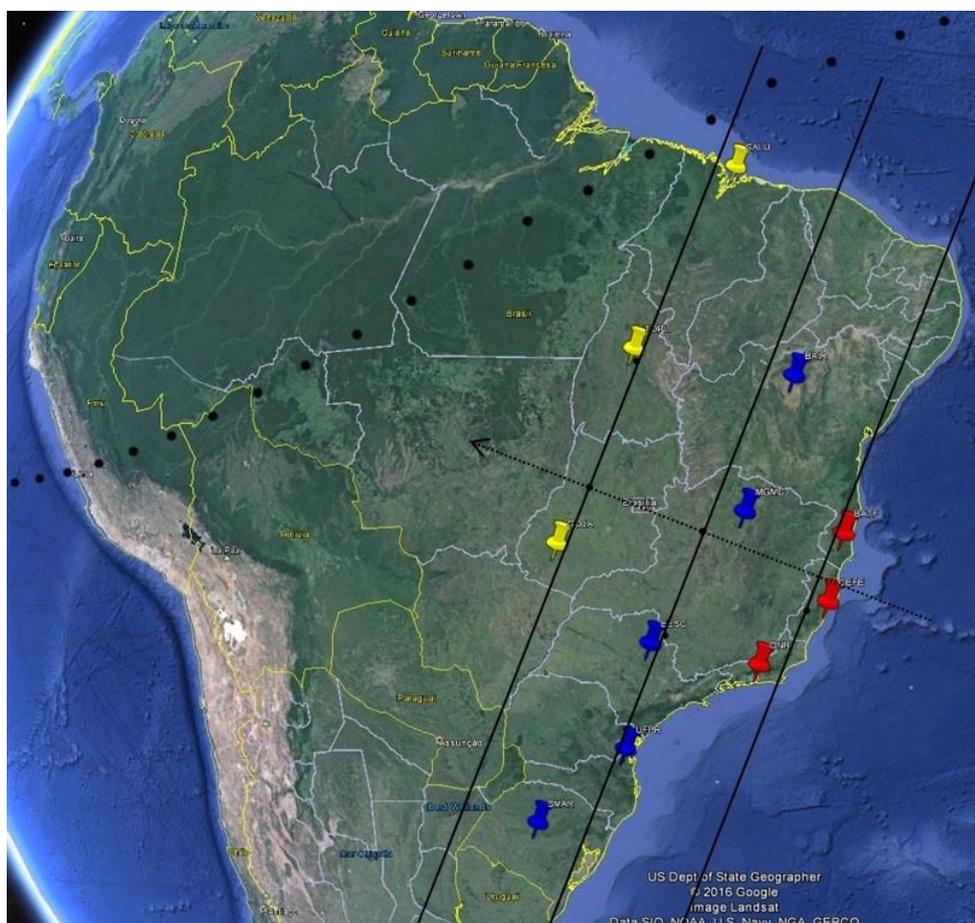


Figura 72 – Mapa do setor brasileiro mostrando a evolução do VTEC (Latitude x Longitude). Evento ocorrido em 17 de janeiro de 2013 das 14:00 UT às 20:80 UT. É observado nessa figura o comportamento **parcial**, porém com uma resolução melhor da Perturbação ionosférica propagante – TID.



A Figura 73 e a Tabela 21 mostram as localizações e as informações geográficas das 11 estações GPS-TEC que foram utilizadas na análise da TID no dia 17 de janeiro durante a fase principal da tempestade 1. A Figura 74 apresenta o mapa do setor brasileiro indicando a direção de propagação da TID para noroeste.

Figura 73 – Localização das estações GPS utilizadas para análise das TIDs. As retas indicam os 3 grupos de estações, onde os marcadores vermelhos indicam as estações da 1º Grupo, os marcadores azuis indicam as estações da 2º Grupo, os marcadores amarelos indicam as estações da 3º Grupo. A seta que está perpendicular as retas além de indicar a direção da TID foi utilizada para calcular a distância média entre os grupos. Os pontos pretos indicam o equador magnético.



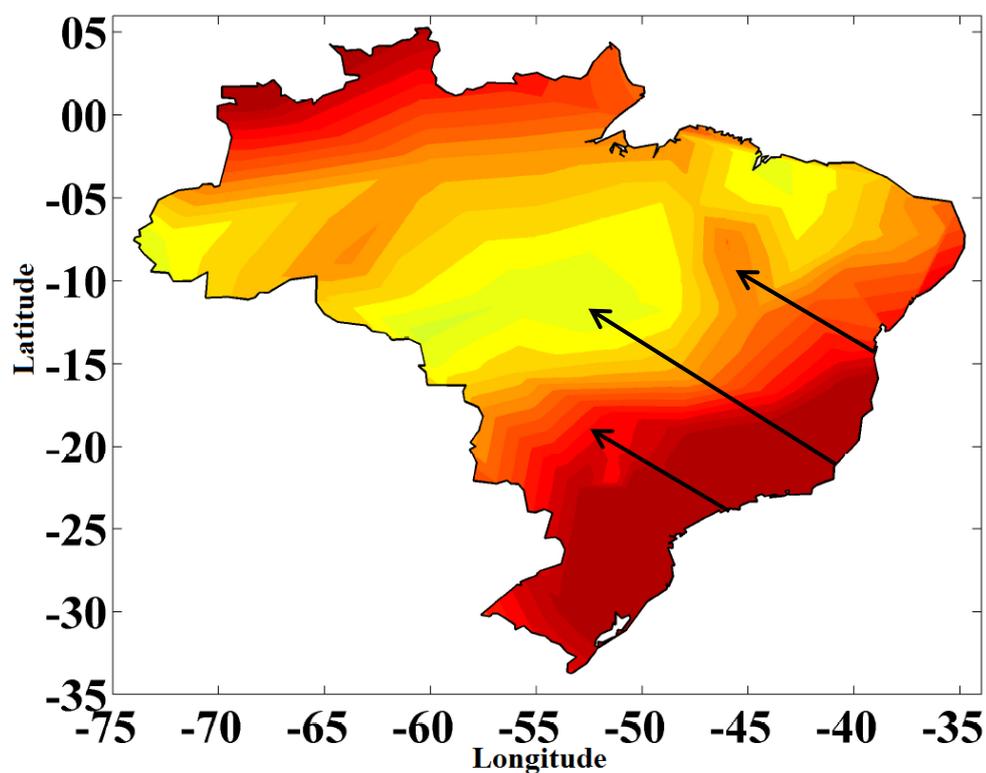
Como mencionado por Lima et al. (2004) a velocidade de propagação das TIDs estão em torno de 100 a 400 m/s. Sendo que, em alguns casos, quando há a ocorrência de tempestades geomagnéticas classificada como muito intensas (considerando como critério o  $Dst < -250$  nT), essas velocidades podem chegar a 1000 m/s (BECKER-GUEDES et al. 2007).

A média das velocidades da TID que ocorreu em 17 de janeiro foi de ~218 m/s. Assim, entre o 1º- 2º grupo de estações a velocidade alcançada foi de ~390 m/s. Entre o 2º - 3º grupo de estações a velocidade diminuiu para ~100 m/s e entre 1º - 3º grupo de estações a velocidade foi de ~160 m/s (Ver Figura 73 e 75).

Tabela 21 – Informações geográficas dos Grupos de estações GPS utilizadas para análise das TIDs.

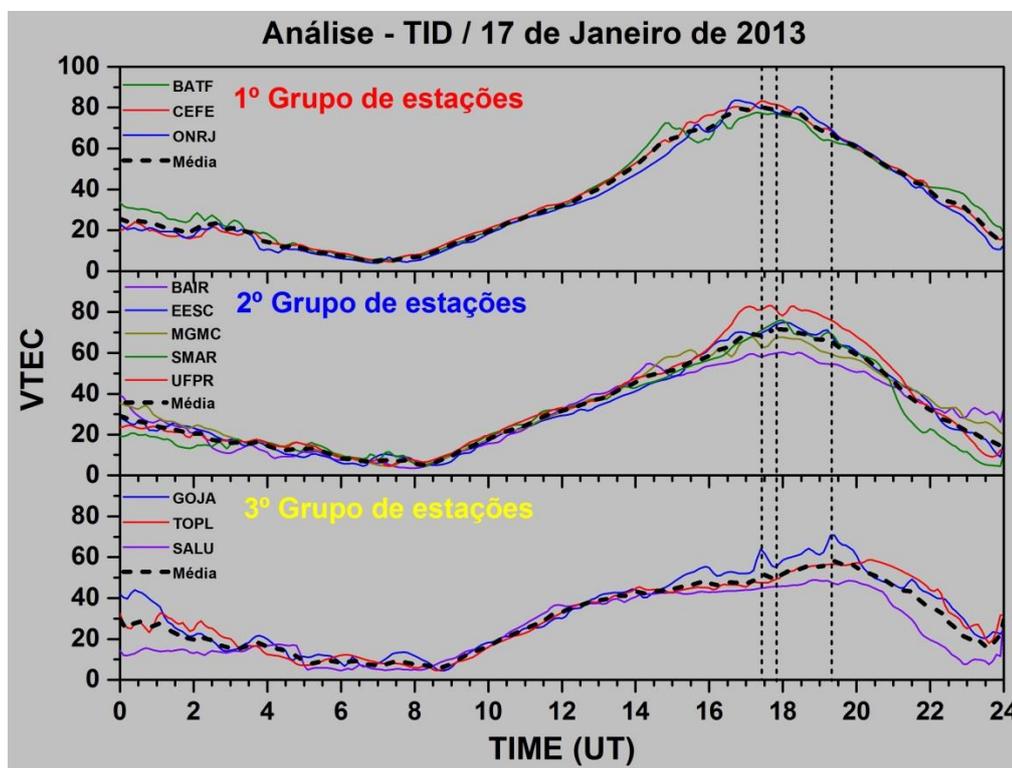
Estação GPS	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
<b>1º Grupo de Estações</b>				
Teixeira de Freitas	BATF	17.55 S	39.75 O	18.8° S
Vitoria	CEFE	20.31 S	40.31 O	20.6° S
Rio de Janeiro - ON	ONRJ	22.90 S	43.21 O	20.8° S
<b>2º Grupo de Estações</b>				
Irecê	BAIR	11.30 S	41.86 O	12.3° S
São Carlos	EESC	22.00 S	47.90 O	17.5° S
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Santa Maria	SMAR	29.71 S	53.71 O	20.4° S
Curitiba	UFPR	25.43 S	49.21 O	19.4° S
<b>3º Grupo de Estações</b>				
Jataí	GOJA	17.88 S	51.73 O	12.3° S
Palmas	TOPL	10.16 S	48.33 O	7.5° S
São Luiz	SALU	2.60 S	44.21 O	3.1° S

Figura 74 – Mapa do setor brasileiro mostrando a direção da perturbação ionosférica propagante (TID) para direção **noroeste**.



A Figura 75 apresenta o aumento do VTEC, em função do tempo, separados por 3 regiões, no qual chamamos de 1º Grupo, 2º Grupo e 3º Grupo de estações que mostram o comportamento do VTEC no qual, caracteriza uma TID.

Figura 75 – Análise da Perturbação Ionosférica Propagante – TID ocorrida em 17 de janeiro de 2013. As cores usadas para identificar o 1º Grupo, 2º Grupo e 3º Grupo de estações no gráfico são referentes aos marcadores utilizados na Figura 73. As linhas verticais (pontilhadas) indicam a defasagem temporal da TID em relação as médias de um grupo para o outro.



### 3.5.2 Estudo da Anomalia ionosférica equatorial durante os dias perturbados

As Tabelas 22 e 23 apresentam a localização das estações GPS usadas no estudo da evolução EIA. Estas estações foram escolhidas de tal forma a permitir estudar a resposta ionosférica a tempestade no setor Leste e Oeste brasileiro durante os dias 16 a 21 de janeiro.

Tabela 22 – Informações das estações GPS localizada no setor Leste.

Setor Leste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Barreiras	BABR	12.15 S	44.98 O	11.1° S
Gov. Valadares	GVAL	18.85 S	41.95 O	18.4° S
Marabá	MABA	5.35 S	49.11 O	2.8° S
Balsas	MABS	7.53 S	46.03 O	6.5° S
Macapá	MAPA	0.08 S	51.10 O	2.9° N
Montes Claros	MGMC	16.71 S	43.85 O	15.6° S
Campos dos Goytacazes	RJCG	21.75 S	41.31 O	21.0° S
Viçosa	VICO	20.31 S	40.31 O	19.4° S

Tabela 23 – Informações das estações GPS localizada no setor Oeste.

Setor Oeste				
Estação	Sigla	Latitude	Longitude	Dip. Latitude
Coari	AMCO	4.86 S	65.33 O	4.7° N
Cuiabá	CUIB	15.55 S	56.06 O	8.1° S
V. B. Santíssima Trindade	MTVB	15.00 S	59.95 O	6.0° S
Porto Alegre	POAL	30.06 S	51.11 O	21.7° S
Porto Velho	POVE	8.71 S	63.9 O	0.8° N
Colorado d'Oeste	ROCD	13.11 S	60.55 O	4.2° S
Ji-Paraná	ROJI	10.86 S	61.96 O	1.7° S
Rosana	ROSA	22.51 S	52.95 O	15.3° S
São Gabriel da Cachoeira	SAGA	0.15 S	67.05 O	9.5° N
Chapecó	SCCH	27.13 S	52.58 O	19.0° S

As Figuras 76 e 77 mostram a evolução do VTEC (Latitude x tempo) no qual é possível estudar a EIA durante os dias 16 e 21 de janeiro para os setores Leste e Oeste, respectivamente.

No dia 16 de janeiro, nos setores Leste e Oeste, identificamos valores máximos na região de transição entre baixa latitude sul e além da crista da EIA. Durante o dia 17 observamos que a EIA se intensificou, no qual, conseguimos notar os valores máximos na região equatorial e além da crista da EIA em ambos os setores. Para os dias 18, 19 e 20 a EIA exibiu um comportamento de diminuição de intensidade do VTEC nos setores Leste e Oeste. A Anomalia de Ionização Equatorial volta a se comportar como esperado sendo mais evidente no setor Leste a partir do dia 21 de janeiro (Figura 76 e 77).

Figura 76 – Evolução EIA no setor Leste brasileiro entre os dias 16 a 21 de janeiro.

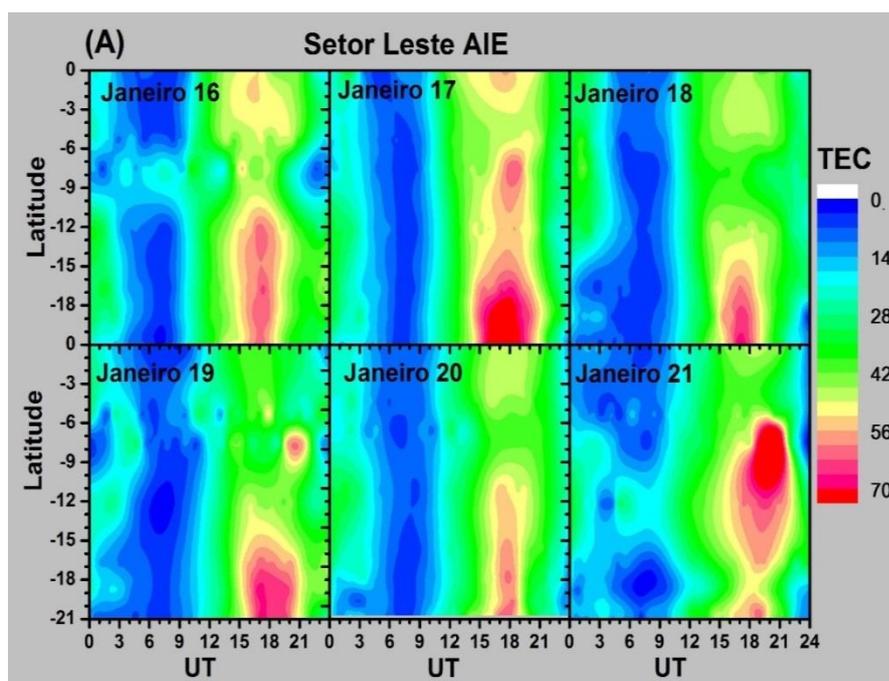
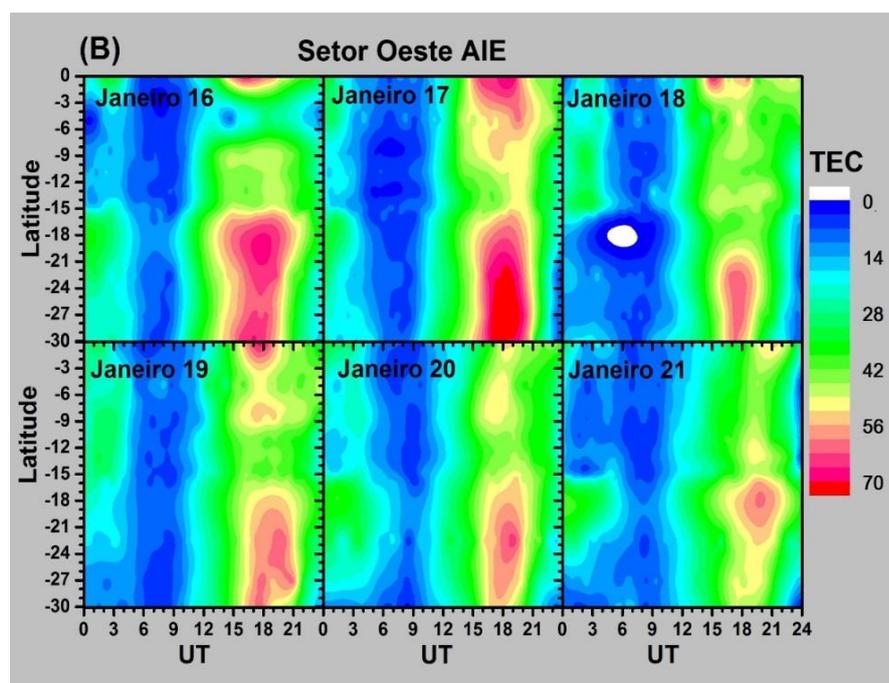


Figura 77 – Evolução EIA no setor Oeste brasileiro entre os dias 16 a 21 de janeiro.



Utilizando o menor valor do índice Dst encontrado classificamos este evento geomagnético como moderado. No decorrer deste período estudado as perturbações ionosféricas foram relativamente fracas. Entretanto, no dia 17 de janeiro conseguimos observar uma perturbação ionosférica propagante (TID) de tipo soliton direcionada para

norooeste com uma velocidade de ~218 m/s, apresentadas nas Figuras 71 e 72. A Anomalia, no dia 17, estava mais acentuada na região de transição entre baixa latitude sul e além da crista da EIA para ambos os setores. Em seguida ocorreu uma diminuição de intensidade da Anomalia de Ionização Equatorial.

A Tabela 24 apresenta as principais características que aconteceram durante a fase principal, fase de recuperação e da EIA no decorrer de todo o período estudado.

Tabela 24 – Principais características da fase principal, de recuperação e da EIA durante as tempestades geomagnéticas.

Tempestade Geomagnética	Data	Dst (mínimo)	Classificação	Principais Características		
				Fase Principal	Fase de Recuperação	AIE
1	16 a 20 de março de 2013	-132 nT	Intensa	distúrbios ionosféricos positivos	Sem alterações significativas	Aumento da extensão latitudinal e diminuição de intensidade da AIE
2	31 de maio a 3 de junho de 2013	-119 nT	Intensa	discreto distúrbio ionosférico negativo na região de baixa latitude norte	Sem alterações significativas	Aumento da extensão latitudinal da AIE. Descontinuidade (~12° - 18° latitude)
3	5 a 8 de junho de 2013	-73 nT	Moderada	Distúrbios ionosféricos positivo	Distúrbios ionosféricos positivo na região equatorial e além da crista	Valores máximos esperado ao sul do equador, entre ~0° a 20° latitude
4	13 a 16 de julho de 2013.	-73 nT	Moderada	Distúrbios ionosféricos positivo em todas as regiões no setor leste	Distúrbios ionosféricos positivo no início da fase	Intensificação da extensão e aumento do tempo da AIE
5	16 a 21 de janeiro de 2013	-53 nT	Moderada	TID direção de propagação para norooeste com velocidade de ~218 m/s	Distúrbios ionosféricos negativo em todas as regiões	Diminuição de intensidade da AIE na região equatorial e baixa latitude sul.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSÃO

O estudo dos efeitos das tempestades geomagnéticas na ionosfera é extremamente atual e de grande interesse da comunidade científica internacional. Nesta investigação, foi estudada a resposta ionosférica a tempestades geomagnéticas que ocorreram no primeiro semestre de 2013 (janeiro a julho). No qual, estavam disponíveis 90 estações GPS-TEC para a análise das perturbações geomagnéticas durante o período escolhido. A análise do comportamento da ionosfera foi estudada utilizando a variação do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC), a comparação do VTEC entre dias calmos e perturbados e a variabilidade da Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) durante tempestades geomagnéticas, inferidos de estações GPS-TEC da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Esta rede de Receptores RBMC permite estudar o comportamento da ionosfera em uma ampla extensão territorial do Brasil.

Os principais resultados observados nos 5 eventos estudados são:

1º evento: foi classificado como intensa e apresentou distúrbios ionosféricos relativamente fracos. A principal perturbação foi a intensificação da extensão da EIA que ocorreu durante a fase principal juntamente com uma descontinuidade na região de baixa latitude sul (13° - 18° latitude). Nos primeiros dias da fase de recuperação notou-se uma diminuição de intensidade da EIA tanto no setor Leste como no setor Oeste.

2º evento: também foi classificada como intensa e apresentou alterações ionosféricas fracas. As principais perturbações foram um modesto distúrbio ionosférico negativo na região de baixa latitude norte seguido de uma diminuição de intensidade da EIA durante o primeiro dia da fase de recuperação. No decorrer da fase principal notamos também uma intensificação da EIA, incluindo uma descontinuidade da EIA na região de baixa latitude sul (~12° - 18° latitude).

3º evento: foi classificada como moderada e apresentou perturbações ionosféricas não significativas. Podemos dizer que EIA se comportou de maneira esperada. No qual, aparece ao norte e ao sul do equador, entre ~15°-20° de latitude, picos dos valores máximos.

4º evento: classificada como moderada apresentando um comportamento atípico em relação às outras tempestades estudadas. Durante a fase inicial, principal e de recuperação notou-se distúrbios ionosféricos positivos sendo mais significativos no setor Leste. A EIA durante o período calmo estende-se desde a região equatorial até baixas latitudes ( $\sim 13^\circ$ - $16^\circ$  latitude). No entanto, durante o período perturbado a anomalia estendeu-se até latitudes maiores que  $20^\circ$ . Caracterizando a ocorrência de um efeito de super-fonte.

5º evento: utilizando o menor valor de índice Dst, encontrado entre as 3 tempestades geomagnéticas, este evento foi classificado como moderado. No decorrer de todo o período estudado as perturbações ionosféricas foram relativamente fracas. Entretanto, no dia 17 de janeiro conseguimos detectar uma perturbação ionosférica propagante (TID) de tipo soliton direcionada para noroeste com uma velocidade de  $\sim 218$ m/s. A Anomalia, no dia 17, estava mais acentuada na região de transição entre baixa latitude sul e além da crista da EIA para ambos os setores. Em seguida ocorreram inibições da Anomalia de Ionização Equatorial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

AKEL, A. F. **Contribuições ao Estudo das Perturbações Geomagnéticas na Superfície da Terra.** 42f. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2010.

ARANHA, S. L. **Estudo de ondas planetária na Ionosfera em baixa latitudes e região equatorial.** Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

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

BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; SPINOZA, E.; PILLAT, V. G.; LIMA, W. L. C.; BASU, SU.; BASU, SA.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MACKENZIE, E. M.; PI, X.; BITTENCOURT, J. A. The ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003. **Ann. Geophys.**, 25(4), 863–873, doi:10.5194/angeo-25-863-2007. 2007.

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

DAL POZ, W. R.. **Investigações Preliminares sobre a Influência do Clima Espacial no Posicionamento Relativo com GNSS.** 2010. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DANA, P. H. Global Positioning System Overview: [http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html), acesso em 13 set. 2015.

de ABREU, A.J.; FAGUNDES, P.R.; GENDE, M.; BOLAJI, O.S.; de JESUS, R.; BRUNINI, C. 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.**, 53(9), 1313-1328, DOI: 10.1016/j.asr.2014.02.011, 2014.

de ABREU, A.J.; FAGUNDES, P.R.; SAHAI, Y.; de JESUS, R.; BITTENCOURT, J.A.; BRUNINI, C.; GENDE, M.; PILLAT, V.G.; LIMA, W.L.C.; ABALDE, J.R.; PIMENTA, A.A. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm. **J. Geophys. Res.**, 115(A12312), DOI: 10.1029/2010JA015661, 2010.

DST INDEX: [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html), acesso em 02 maio de 2015.

E.W. CLIVER. Solar Activity and Geomagnetic Storms: The First 40 Years. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**. V. 75, N. 49, p. 569, 574-575, 1994.

\_\_\_\_\_. Solar Activity and Geomagnetic Storms: The Corpuscular Hypothesis. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**. V. 75, N. 52, p. 609, 612-613, 1994.

\_\_\_\_\_. Solar Activity and Geomagnetic Storms: From M Regions and Flares to Coronal Holes and CMEs. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**. V. 76, N. 8, p. 75-83, 1995.

FAGUNDES, P.R.; KLAUSNER, V; SAHAI, Y; PILLAT, V. G; BECKER-GUEDES, F; BERTONI, F.C; BOLZAN, M. J. A; ABALDE, J. R. Observations of daytime F2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region, **Journal of Geophysical Research**, vol 112 , doi:10.1029/2006JA011888. 2007.

FAGUNDES, P.R.; CARDOSO, F.A.; FEJER, B.G.; VENKATESH, K; RIBEIRO B.A.G.; PILLAT, V.G. Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian Sector”. **Journal of Geophysical Research - Space Physics**, DOI: 10.1002/2015JA022214, 2016.

FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados de GPS**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

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

FRIAÇA, AMANCIO C. S; GOUVEIA DAL PINO, B; JATENCO PEREIRA, V; SODRÉ JR, L. **Astronomia: Uma Visão Geral do Universo**. São Paulo. SP: EDUSP, 2000.

GARNIERI, F. L. **Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração**. 2005. São José dos Campos. 315p. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

GEOFORSCHUNGSZENTRUM (GFZ). Indices of global geomagnetic activity: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/kp-index/erklaerung/kp-observatorien/>, acesso: em 10 de fevereiro 2016.

GONCHARENKO, L.P.; FOSTER, J.C.; COSTER, A.J.; HUANG, C.; APONTE, N.; PAXTON, L.J. Observations of a positive storm phase on September 10, 2005. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 69(10-11), 1253-1272, DOI: 10.1016/j.jastp.2006.09.011, 2007.

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

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge University Press, 1992, ISBN (0521427371).

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

HUANG, C.S.; FOSTER, J.C.; GONCHARENKO, L.P.; ERICKSON, P.J.; RIDEOUT, W.; COSTER, A.J. A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network. **J. Geophys. Res.**, 110(A6), DOI: 10.1029/2004JA010865, 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas) GNSS: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=7>, acesso em 07 de maio de 2015.

INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: [http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic\\_indices/23/kp\\_planetary\\_index](http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/23/kp_planetary_index), acesso em 25 de janeiro de 2016.

ISGI – International Service of Geomagnetic Indices: <http://isgi.unistra.fr/>, acesso em 18 de fevereiro de 2016.

JOSELYN, J. A., TSURUTANI, B. T. Geomagnetic sudden impulses and storm sudden commencements: A note on terminology. **Eos Transaction**, v. 71, n. 47, p. 1808, 1990.

KAPLAN, ELLIOT D; HEGARTY, CHRISTOPHER J. **Understanding Global Positioning System: Principles and Applications GPS**. Second Edition, 2006.

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

KIRCHHOFF, V.W.J.H. **Introdução à Geofísica Espacial**. 1ed São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo, 1991.

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric Effects on GPS**. GPS World, p. 48-51, April, 1991.

LIMA, W. L. C.; BECKER-GUEDES F.; SAHAI Y.; FAGUNDES P. R.; ABALDE J. R.; CROWLEY G.; AND BITTENCOURT J. A. Response of the equatorial and low-latitude ionosphere during the space weather events of April 2002, **Ann. Geophys.**, 22(9), 3211–3219, doi:10.5194/angeo-22-3211-2004. 2004.

MATSUOKA, M. T.; **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. 2003. 164 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88546>>.

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. 56/01, 2004.

MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C.; KLEIN, I.; CAMARGO, P. O.; PEREIRA, V. A. S. **Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira**. Boletim de Ciências Geodésicas, v.19, n.1, p.14-33, 2013.

MCCOMAS, D. J., S. J. BAME, P. BARKER, W. C. FELDMAN, J. L. PHILLIPS, P. RILEY, AND J.W. GRIFFEE (1998), **Solar wind electron proton alpha monitor (SWEPAM) for the advanced composition explorer**, Space Sci. Rev., 86, 563–612.

MOHANAKUMAR, K. **Stratosphere troposphere interactions na introduction**. Cochin: Springer, 2008.

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

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

NOAA - parâmetros interplanetários: <http://www.swpc.noaa.gov/>, acesso em 7 de maio de 2015.

OBSERVATIONS OF MAGNETIC FIELDS. **Magnetic fields in stars and in the Interplanetary medium:** <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/March03/Vallee2/Vallee3.html>, Acesso em 16 de fevereiro 2016.

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

PAIVA, J.A.G.. **Efeitos da Ionosfera de Baixas Latitudes no GPS – SBAS (Global System Positioning –Space Based Augmentation System).** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PARKER, E. Suprathermal particle generation in the solar corona. **Astrophysical Journal**, 128, 677-685, 1958.

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

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.

SAVIAN, J. F.; SILVA, M. R.; LAGO A.; MUNAKATA, K.; GONZALEZ, W. D.; SCHUCH, N.. **Análise de Tempestades Geomagnéticas super intensas e de estruturas do meio interplanetário relacionadas, através da observação de raios cósmicos de superfície de alta energia.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 23(2), p. 173-179, 2005.

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

SMITH, C. W., J. L'HEUREUX, N. F. NESS, M. H. ACUÑA, L. F. BURLAGA, AND J. SCHEIFELE (1998), **The ACE magnetic fields experiment**, Space Sci. Rev., 86, 613–632.

SOHO – NASA: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/Particle/solwind.html>, acesso em 24 de março de 2016.

Solar Science – NASA: [http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn\\_predict\\_1.gif](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif), acesso em 15 de janeiro 2016.

SUGIURA, M.; CHAPMAN, S. **The average morphology of geomagnetic storms with sudden commencement**. Göttingen: Abandl. Akad. Wiss. Göttingen, 1960.

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

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

VAZ TOLENTINO: <http://www.vaztolentino.com.br/conteudo/562-TECNOLOGIA-GPS-SEGMENTO-ESPACIAL-SEGMENTO-DE-CONTROLE-SEGMENTO-DO-USUaRIO>, acesso em 17 de outubro de 2015.

YAMASHITA, C. S. **Efeitos das tempestades magnéticas intensas na Ionosfera de baixa latitude**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.