

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

FELIPE ANTONIO CARDOSO

**ESTUDO DA IONOSFERA SOBRE O EQUADOR MAGNÉTICO NO SETOR
BRASILEIRO DURANTE DIFERENTES PERÍODOS DE
ATIVIDADE SOLAR**

São José dos Campos, SP.

2021

FELIPE ANTONIO CARDOSO

**ESTUDO DA IONOSFERA SOBRE O EQUADOR MAGNÉTICO NO SETOR
BRASILEIRO DURANTE DIFERENTES PERÍODOS DE
ATIVIDADE SOLAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Gil Pillat

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, SP.

2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Cardoso, Felipe Antonio

Estudo da ionosfera sobre o equador magnético no setor brasileiro durante diferentes períodos de atividade solar / Felipe Antonio Cardoso; orientador, Prof. Dr. Valdir Gil Pillat; co-orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes. - São José dos Campos, SP, 2021.

1 CD-ROM, 99 p.

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

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Ionosfera. 3. Tempestades magnéticas. 4. Sistema de Posicionamento Global. I. Pillat, Prof. Dr. Valdir Gil, orient. II. Fagundes, Prof. Dr. Paulo Roberto, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Felipe Antonio Cardoso, autor(a) da obra acima referenciada:

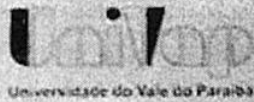
Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

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

São José dos Campos, 19 de Maio de 2021.




Autor(a) da Obra

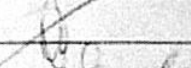


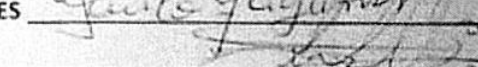
FELIPE ANTONIO CARDOSO


“ESTUDO DA IONOSFERA SOBRE O EQUADOR MAGNÉTICO NO SETOR BRASILEIRO DURANTE DIFERENTES PERÍODOS DE ATIVIDADE SOLAR.”


Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, 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. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ 

PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT 

PROF. DR. PAULO ROBERTO FAGUNDES 

PROF. DR. ALEXANDRE TARDELLI 

PROF. DR. MAURÍCIO JOSÉ ALVES BOLZAM - UFJ 

Prof.ª Dr.ª Lúcia vieira
Diretora do IP&D – Univap
São José dos Campos, 29 de março de 2021.

Av. Shishima Hifumi, 2911 - 12244-000
São José dos Campos – SP
www.univap.br

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Eliana
Cristina Antonio Cardoso e
Laudenir Cardoso, e ao meu irmão,
Henrique Antonio Cardoso.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais e irmão, que mesmo diante de todas as dificuldades da vida me incentivaram e apoiaram, incondicionalmente, a concluir este curso que representou uma parte importante em minha vida.

A Pamela Ianovalli que me incentivou e apoiou durante todo o curso, sempre curiosa e animada em relação a cada pequeno avanço deste trabalho. Seu entusiasmo e inquietude são contagiantes e me deram energia para continuar em frente.

Aos meu orientador, Prof. Dr. Valdir Gil Pillat, e coorientador, Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes, cuja ajuda e atenção foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores doutores e aos colegas do laboratório de física e astronomia, do IP&D da UNIVAP, que, com seu entusiasmo, companherismo, determinação e bom humor, tornam o ambiente super agradável e propício ao desenvolvimento da ciência.

A Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, pela oportunidade de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia (PPGFA).

A CAPES pela bolsa de estudos.

A FAPESP pelo apoio aos meus orientadores e ao instituto de pesquisa e desenvolvimento da UNIVAP.

RESUMO

A ionosfera e sua dinâmica de plasma são temas de estudos desde a sua descoberta, compreender a dinâmica desta região da atmosfera terrestre é fundamental para a compreensão dos fatores que influenciam o funcionamento de satélites e equipamentos tecnológicos que suportam sistemas de telecomunicação baseada em sinais eletromagnéticos ou ondas de rádio, cuja aplicabilidade é parte fundamental do dia-a-dia da sociedade humana moderna. Este trabalho utiliza receptores GPS (*Global Positioning System*) de 19 estações GPS-TEC, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que estão localizados entre $\pm 5^\circ$ de latitude magnética a partir do equador magnético, para analisar o Conteúdo Eletrônico Total (TEC) da ionosfera na região do equador magnético, sobre o setor brasileiro, com o objetivo de identificar as características desta região para os dias geomagneticamente calmos ($DST > -30$ nT) nos anos de 2015 e 2018. Utilizaram-se ferramentas computacionais desenvolvidas especialmente para este trabalho para organizar os dados obtidos pelos receptores GPS com resolução de 1 minuto, para os 24 meses estudados, permitindo a manipulação eficiente e a obtenção de informação relevante da variação do TEC sobre o equador magnético. Este estudo mostrou que o valor máximo do TEC registrado para períodos de alta atividade é, aproximadamente, duas vezes maior que os valor de TEC máximo registrado nos períodos de baixa atividade solar, para o mesmo período do ano. Observou-se, também, que independente da época do ano, ou período de atividade solar, o mínimo valor de TEC é de $\sim 2,5$ TECU e é registrado no horário de 09:00 UT. Os resultados mostram, também, que nos meses de final de inverno, primavera-verão e início de outono, do ano de 2015 (alta atividade solar) o TEC apresenta um segundo pico por volta das 00:00 UT. Também se verificou a viabilidade de utilizar as ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho para estudar o desenvolvimento de irregularidades ionosféricas em um curto espaço de tempo (dias). Com este objetivo selecionou-se o período geomagnético de 27-28 de setembro de 2017 onde foi possível verificar que houve a inibição na evolução de irregularidades ionosféricas durante a fase principal deste período geomagneticamente perturbado.

Palavras – chave: Tempestades Geomagnéticas. Ionosfera. TEC. GPS.

STUDY OF THE IONOSPHERE ON THE MAGNETIC ECUADOR IN THE BRAZILIAN SECTOR DURING DIFFERENT PERIODS OF SOLAR ACTIVITY

ABSTRACT

The ionosphere and its plasma dynamics have been the subject of studies since its discovery, understanding the dynamics of this region of the Earth's atmosphere is fundamental for understanding the factors that influence the functioning of satellites and technological equipment that support telecommunication systems based on electromagnetic signals or radio waves, whose applicability is a fundamental part of the daily life of modern human society. This work uses GPS receivers (Global Positioning System) from 19 GPS-TEC stations, from the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC), which are located within $\pm 5^\circ$ of magnetic latitude from the magnetic equator, to analyze the Total Electronic Content (TEC) of the ionosphere in the region of the magnetic equator, over the Brazilian sector, with the objective of identifying the characteristics of this region for the geomagnetically calm days ($STP > -30nT$) in the years 2015 and 2018, which are, respectively, years of maximum and minimal solar activity within the solar cycle 24. Computational tools developed especially for this work were used to organize the data obtained by GPS receivers with a resolution of 1 minute, for the 24 months studied in this work, allowing efficient manipulation and obtaining relevant information on TEC variation over the magnetic equator. This study showed that the maximum TEC value registered for periods of maximum activity is approximately twice as high as the maximum TEC value registered in periods of minimum solar activity, for the same period of the year. It was also observed that regardless of the time of year, or period of solar activity, the minimum TEC value is ~ 2.5 TECU and is recorded at 09:00 UT. The results also show that in the months of late winter, spring-summer and early autumn, in the year 2015 (maximum solar activity), TEC presents a second peak at around 00:00 UT. We also verify the viability of using the computational tools developed in this work to study the development of ionospheric irregularities during smaller time frame (days). The geomagnetic period of 27-28 September 2017 was selected to this aim. It was possible to verify that there was an inhibition in the evolution of ionospheric irregularities during the main phase of this geomagnetically disturbed period.

Keywords: Geomagnetic storms. Ionosphere. TEC. GPS.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação da evolução temporal do estado das linhas de campo magnético com o avanço do ciclo solar. Da esquerda para a direita. 28
- Figura 2 – Histórico do número de manchas solares registradas, por estimativa (vermelho) e por contagem instrumental (azul), em um período de 400 anos. Em destaque os Mínimos de Maunder, Dalton e o Máximo Moderno. 29
- Figura 3 - Valores mensais do fluxo solar 10.7 cm, para o período do ciclo solar 24, registrados pela Sociedade Internacional de Energia Solar (ISES). 30
- Figura 4 - Mapa contendo a rede de observatório geomagnético encarregado pelo índice DST. 33
- Figura 5 – Perfil da atmosfera terrestre por temperatura (esquerda) e por densidade eletrônica (direita). Para cada um dos perfis as camadas são designadas. 35
- Figura 6 – Representação do efeito fonte que dá origem a anomalia da ionização equatorial com a representação das forças e direções que agem sobre o plasma ionosférico durante o processo. 40
- Figura 7 – Esquema das componentes que envolvem o fenômeno de pico de pré-reversão.... 41
- Figura 8 - Representação do caminho percorrido pelo sinal de satélite através de estruturas de irregularidades ionosféricas. 42
- Figura 9 - Representação artística do desenvolvimento de bolhas de plasma a partir do terminador dia-noite na direção leste. Em destaque o Equador geográfico e o equador magnético. 43
- Figura 10 - Representação da evolução das bolhas de plasma no meio ionosférico. O plasma menos denso sofre deriva vertical em direção ao plasma mais denso. 44
- Figura 11 - Exemplo de bolhas de plasma observadas através de imageador All-Sky (painel esquerdo) sobre a estação de Araguatins e exemplo de espalhamento F, observado por ionossonda (painel direito) sobre a estação de Araguatins para o dia 26 de setembro de 2017 no horário aproximado de 02:50 UT. 45
- Figura 12 – Presença de bolha de plasma, em mapas de contorno da distribuição do TEC e ROTI sobre o setor brasileiro para o dia 25 de setembro de 2017 as 04h:00m, na região oeste do Brasil, perpendicular ao equador magnético entre 6°N e 24°S de latitude. 46
- Figura 13 – Modelo computacional de irregularidades ionosféricas a gerado a partir de dados de emissão 135,6 nm para o horário de 23:59 UT para março de 2019. 46
- Figura 14 - Ilustração da constelação dos satélites do sistema GPS. 47
- Figura 15 - Representação gráfica da utilização de receptores GPS com usuários finais. 48

Figura 16 - Esquema de um receptor GPS.	49
Figura 17 - Erros envolvidos nas observáveis GPS.....	51
Figura 18 - Geometria do caminho da propagação do sinal satélite / receptor.	54
Figura 19 - Distribuição das estações GPS-TEC pertencentes a RBMC em território brasileiro. Destaque para pontilhado branco que indica o caminho do equador magnético.	56
Figura 20 – Estações GPS da RBMC utilizadas neste trabalho, distribuídas no mapa do território brasileiro. Destaque para pontilhado branco que indica o caminho do equador magnético.	58
Figura 21 - Exemplo da apresentação dos valores de TEC, obtidos usando os arquivos STD (painel superior), e os arquivos CMN (painel inferior), para os receptores selecionados neste trabalho.	62
Figura 22 - Parte 1 da representação visual do algoritmo usado para unificar as medições dos satélites GPS dentro da região deste estudo. (a) satélites dispostos sobre o mapa dividido em quadrantes de 1° de latitude por 1° de longitude geográfica, (b) detalhe dos satélites dentro do quadrante, (c) agrupamento dos satélites na coordenada, sem os décimos, correspondente.	65
Figura 23 - Parte 2 da representação visual do algoritmo usado para unificar as medições dos satélites GPS dentro da região deste estudo. (a) todas as medições dentro de um quadrante são representadas por uma única média, (b) a média das medições então é considerada com uma medição feita no centro do quadrante, (c) visão geral de todas as médias já calculadas e dispostas no mapa na região de interesse.....	66
Figura 24 - Exemplo da apresentação da média mensal do TEC, obtidos usando os arquivos CMN, para os satélites selecionados para cada receptor GPS usado neste trabalho.	67
Figura 25 - Demonstração da região selecionada para o filtro espacial dos satélites que estão dentro do limite de $\pm 5^\circ$ de latitude magnética, para os receptores GPS selecionados.	68
Figura 26 – Aplicação final do filtro espacial (área em verde) na região do equador magnético (linha pontilhada preta), incluindo os limites superior (linha tracejada vermelha) e inferior (linha tracejada azul) na região do equador magnético que compreende $- + 5^\circ$ de latitude magnética.....	69
Figura 27 - Delimitação dos setores leste (vermelho) e oeste (preto) que correspondem aos filtros de medições de TEC via satélite nestas regiões do equador magnético sobre o setor brasileiro.	70
Figura 28 - Comparação da média mensal de VTEC para o primeiro semestre dos anos de 2015 (vermelho) e 2018 (azul), respectivamente alta e baixa atividade solar. Destaca-se o número de dias calmos e o número de estações analisadas para compor cada um dos gráficos apresentados na figura.	73

Figura 29 - Comparação da média mensal de VTEC para o segundo semestre dos anos de 2015 (vermelho) e 2018 (azul), respectivamente alta e baixa atividade solar. Destaca-se o número de dias calmos e o número de estações analisadas para compor cada um dos gráficos apresentados na figura.	74
Figura 30 – Comparação da média mensal de VTEC nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do equinócio de março em ambos os anos de 2015 e 2018.	76
Figura 31 - Comparação da média mensal de VTEC nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do solstício de junho em ambos os anos de 2015 e 2018.	76
Figura 32 - Comparação da média mensal de VTEC nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do equinócio de setembro em ambos os anos de 2015 e 2018.	77
Figura 33 - Índices geomagnéticos Dst, Kp e índices do meio interplanetário Vp e Bz. A fase principal e fase de recuperação são indicadas nas cores amarelo e azul respectivamente.	78
Figura 34 - Variação horária de TEC entre 00:00UT e 05:00UT para os dias 26, 27, 28, 29 e 30 de setembro de 2017 sobre o setor brasileiro.	79
Figura 35 - Variação horária de ROTI entre 00:00 UT e 05:00 UT para os dias 26, 27, 28, 29 e 30 de setembro de 2017 sobre o setor brasileiro.	81
Figura 36 – Altitude da camada F (h'F) e frequência crítica da camada F2 (foF2) registrados através de ionosonda pela estação de Araguatins (ARA dip latitude: -4.49°) para os dias 27, 28 e 29 de setembro de 2017. Em destaque as fases principais (em amarelo) e de recuperação (em azul claro) e a média de 5 dias calmos (em preto) para o mesmo mês.	82
Figura 37 - TEC para os setores leste (em vermelho) e oeste (em preto), definidos na Figura 27, comparado a 22 dias geomagneticamente calmos (em cinza) nos mesmos setores, para os dias 27, 28, e 29 de setembro de 2017. Em destaque a fase principal (em amarelo) e a fase de recuperação (em azul claro) do período perturbado.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Denominação e localização da rede de observatório geomagnético responsável pelo índice Dst.	32
Tabela 2 – Classificação das Tempestades geomagnéticas por meio dos valores do índice Dst.	34
Tabela 3 - Relação das principais fontes de erros encontrados em sistemas GPS.	50
Tabela 4 - Detalhes das estações GPS, da RBMC, utilizadas neste trabalho.	57

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CME – Ejeção de massa coronal (*coronal mass ejection*)

Dst – Tempo de Distúrbio da Tempestade (*Disturbance Storm Time*)

EIA – Anomalia de Ionização Equatorial (*Equatorial Ionization Anomaly*)

EUV – Ultravioleta Extremo

GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems*)

GPS – Sistema de Posicionamento Global

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMF – Campo magnético interplanetário (*interplanetary magnetic field*)

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

Ne – Densidade eletrônica

Np – Densidade de prótons do vento solar

P – Código preciso (*precise*)

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas *GNSS*

TEC – Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content*)

TECU – Unidade de TEC (*Electron Content Unit*)

UHF – Faixa de frequência ultra-alta (*Ultra High Frequency*)

UT – Hora Universal

Vp – Velocidade dos prótons no vento solar

VTEC – Conteúdo Eletrônico Total na Vertical (*Vertical Total Electron Content*)

LISTA DE SIMBOLOS

LATINOS

- $d_{\mathfrak{R}}^R$ – Atrasos das portadoras no hardware do receptor
- $d_{\mathfrak{R}}^S$ – Atrasos das portadoras no hardware do satélite
- I_{fR}^S – Refração ionosférica para a fase da onda portadora
- I_{gR}^S – Refração ionosférica para o grupo
- N_e – Densidade de elétrons, el m⁻³
- v_f – Velocidade da fase portadora
- v_g – Velocidade da fase de grupo
- B – Campo magnético interplanetário total, nT
- B** – Vetor campo geomagnético
- Bz – Componente vertical do campo magnético interplanetário
- c – Velocidade da luz, 3,0x 10⁸ m/s
- E** – Vetor campo elétrico
- Hm – Altura média da ionosfera
- N – Ambiguidade na observável fase da onda portadora
- n – Densidade numérica dos constituintes atmosféricos, 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
- v – velocidade média de derivas das partículas ionizadas
- z – Ângulo zenital do satélite
- z' – Ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico

GREGOS

- $\Delta_{\mathfrak{R}}^{iono}$ – Efeitos das refrações ionosférica
- $\Delta_{\mathfrak{R}}^{trop}$ – Efeitos das refrações troposférica

$m_{\mathfrak{R}}$ – Efeito do multicaminho nas portadoras L1 e L2

ϕ_{0R} – Fase da onda portadora gerada no satélite

ϕ_0^S – Fase da onda portadora gerada no receptor

δ_R – Desvio do relógio do receptor

δ^S – Desvio do relógio do satélite

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

λ – Comprimento de onda

ρ – Distância geométrica

SÍMBOLOS ESPECIAIS

∇_p – Gradiente de pressão

\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

∇ – Operador nabla

\sim – Aproximadamente

\mathfrak{R} – Pseudodistância

\mathbf{x} – Produto Vetorial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	MOTIVAÇÃO	23
1.2	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	23
1.3	JUSTIFICATIVA	24
1.4	OBJETIVOS	24
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	O SOL E SEU CICLO DE ATIVIDADE	26
2.2	ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS	31
2.2.1	O índice Dst – <i>Disturbance storm time</i>	32
2.3	IONOSFERA	34
2.3.1	Regiões ionosféricas	36
2.4	DÍNAMOS IONOSFÉRICOS	38
2.5	ANOMALIA DA IONIZAÇÃO EQUATORIAL	39
2.6	PICO PRÉ-REVERSO	40
2.7	IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS	41
2.8	SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL – GPS	46
2.8.1	Receptor GPS	48
2.8.2	Observáveis GPS	49
2.8.3	Observáveis e os erros relacionados	50
2.8.4	Refração ionosférica	51
2.8.5	Determinando o conteúdo eletrônico total (<i>TEC</i>)	52
2.8.6	Determinando o conteúdo total de elétrons na vertical (<i>VTEC</i>)	53
2.8.7	Determinando a Taxa de Variação do TEC (<i>ROT</i>)	54
2.8.8	Determinando o Índice de Variação de TEC (<i>ROTI</i>)	55
3	DADOS E METODOLOGIA	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1	COMPARAÇÃO DA MÉDIA MENSAL DO VTEC PARA PERÍODOS DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR	72

4.2	ANÁLISE DO PERÍODO GEOMAGNETICAMENTE PERTURBADO DE 27 E 28 DE SETEMBRO DE 2017.....	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	

1 INTRODUÇÃO

A existência de uma região condutora na atmosfera denominada ionosfera foi prevista no início do século XIX, quando se postulava que as alterações observadas no campo magnético terrestre poderiam ser causadas por uma região atmosférica com propriedades condutoras (GOODMAN, 2005). Um século mais tarde, com o advento da comunicação, para médias distâncias (centenas de quilômetros), utilizando ondas de rádio, foi possível verificar a existência de uma região atmosférica com propriedades elétricas capazes de refletir as ondas de rádio permitindo que estas viajassem em torno do planeta percorrendo longas distâncias (milhares de quilômetros). O aprimoramento desta tecnologia de comunicação e o estudo do meio pelo qual as ondas de rádio viajam na atmosfera era fundamental para dar o próximo passo tecnológico que substituiria as redes cabeadas de telégrafos, utilizadas para comunicação a longa distância naquela época (MARCONI, 1909). O termo ionosfera só entrou no vocabulário científico em 1926, quando o físico escocês Robert Watson-Watt introduziu a palavra em uma carta publicada pela revista *Nature* em 1969 (CLARK, 2016). Ainda no início do século XX, nos Estados Unidos e Inglaterra, surgiram os primeiros estudos acerca da natureza e comportamento da ionosfera (MITRA, 1936). Durante o período da segunda guerra mundial várias estações de monitoramento ionosférico foram instaladas ao redor do mundo para servir de apoio as comunicações dos Aliados, com os dados gerados por essas estações foram possíveis avanços no estudo ionosférico naquele período (APPLETON, 1946). A ionosfera é objeto de interesse de uma quantidade considerável de pesquisadores ao redor do mundo, sua compreensão é fundamental para a concepção, construção e manutenção de equipamentos que dependem de ondas de rádio para seu funcionamento, como por exemplo rádios comunicadores de frequências VHF e UHF, torres de telecomunicações, rádio telescópios, satélites de telecomunicações, satélites de rede de posicionamento global, entre outros. O comportamento da ionosfera é fortemente influenciado pelas condições do clima espacial, que por sua vez é fortemente influenciado pelo nível de atividade solar e condições da magnetosfera terrestre, esses fatores fazem com que as condições ionosféricas sofram variações constantes, que podem afetar significativamente no funcionamento de equipamentos como os citados anteriormente, acarretando prejuízos financeiros e sócio econômicos. A boa compreensão dos processos físicos e químicos que acontecem na ionosfera é fundamental não só para evitar prejuízos financeiros, mas também para a preservação e manutenção da saúde e vida humana.

1.1 Motivação

A região equatorial da ionosfera terrestre tem sido ponto de interesse de vários trabalhos publicados na área de ciências da Terra. Devido a limitações espaciais, muitas vezes estudos da ionosfera na região sobre o equador magnético estão limitados a regiões com baixa abrangência longitudinal, onde a linha do equador magnético atravessa regiões de terra firme que possuem estações de monitoramento cujos dados podem ser utilizados, como é o caso de regiões na África, Índia e Japão. Por outro lado, a região do equador magnético sob o setor brasileiro oferece a oportunidade de estudar a dinâmica da ionosfera utilizando-se uma boa quantidade de receptores do sistema de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*), sob uma extensa área latitudinal e longitudinal que está sob uma região onde a linha imaginária do equador magnético apresenta uma configuração única, atravessando o equador geográfico do sul para o norte induzindo sistemas de correntes que só são observadas nesta configuração (CHULLIAT *et al.*, 2015). A motivação deste trabalho é analisar o perfil médio do conteúdo eletrônico total (TEC) sobre uma estreita faixa latitudinal de $\pm 5^\circ$ a partir do equador magnético, sob diferentes níveis de atividade solar. Além de observar a influência da atividade solar sob o TEC na região equatorial, a análise da média em longos períodos pode revelar também o efeito das estações do ano, dos sistemas de correntes, e de outros fenômenos atmosféricos que acontecem diariamente como por exemplo a anomalia ionosférica equatorial. Espera-se que a metodologia empregada na análise das médias do TEC seja útil também na análise de períodos geomagneticamente perturbados de poucos dias, a fim de observar de forma visual, e de várias formas diferentes, a dinâmica na evolução temporal e espacial do plasma ionosférico na região equatorial. Espera-se que as informações e discussões levantadas neste trabalho possam contribuir para o aumento do conhecimento da comunidade científica a cerca desta região em específico e possa, também, contribuir para o desenvolvimento de modelos e trabalhos futuros sobre a ionosfera terrestre na região equatorial.

1.2 Importância da Pesquisa

O estudo da região equatorial da ionosfera é fundamental para trazer um melhor entendimento dos processos físicos que acontecem naquela região e que podem influenciar nas tecnologias de comunicação, que são comumente utilizadas nos dias de hoje por equipamentos eletrônicos como satélites ou sistemas de navegação.

1.3 Justificativa

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) é formada por cerca de 140 estações de monitoramento GPS, cada estação equipada com um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), distribuídas por todo o território nacional. Vinte e três destas estações estão distribuídas em diferentes localidades dentro da região do equador magnético abordada neste trabalho, cujos limites e configurações serão detalhados na seção de metodologia. Essa configuração é extremamente favorável para o estudo da ionosfera na região do equador magnético.

A linha imaginária do equador magnético circunda o planeta Terra, e atravessa grandes regiões de terra firme somente sobre a América do Sul e sobre o continente Africano. Abdu et al. (2005), realizaram um estudo direcionado na eletrodinâmica da região do equador magnético e evidenciam que fenômenos eletrodinâmicos da ionosfera são influenciados pela configuração do equador magnético sobre a América do Sul, seu trabalho sugere que novos estudos sobre a ionosfera sejam feitos nesta região. Portanto, este trabalho é importante para complementar estudos anteriores e ampliar o conhecimento sobre a ionosfera na região do equador magnético no setor brasileiro.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de estudar a dinâmica da ionosfera por meio da análise de dados de TEC obtidos por receptores GPS, do GNSS, na região sob o equador magnético, no setor brasileiro, em diferentes períodos de atividade solar, dentro do ciclo solar 24. A análise da variação do TEC, nestes períodos, pode nos fornecer informações sobre o comportamento da ionosfera naquela região, revelando a ocorrência de eventos e fenômenos relevantes para esta área do conhecimento. Para isso pretendemos utilizar os dados de TEC obtidos a partir das estações GPS selecionadas para organizá-los em gráficos, imagens e animações a fim de obter informações sobre como a atividade solar, bem como a ocorrência de fenômenos ionosféricos, influenciam a dinâmica do plasma sobre a região do equador magnético.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esse documento foi estruturado para oferecer a compreensão dos objetivos do estudo, a fim de tornar clara a importância deste estudo para a área das geociências, nos seguintes capítulos:

- **Revisão da Leitura:** Este capítulo oferece uma introdução sobre a relação Sol-Terra, introduzindo de forma objetiva os principais elementos que compõem este sistema e como a ionosfera é influenciada pelas diferentes condições do clima espacial. Será fornecida explicação acerca dos fenômenos ionosféricos mais importantes para este estudo, sobre índices geomagnéticos e interplanetários que são utilizados para caracterizar as condições do clima espacial, bem como o conhecimento adquirido por estudos anteriores sobre o comportamento ionosférico para as condições de clima espacial que este trabalho aborda.

- **Metodologia:** Neste capítulo é apresentado ao leitor quais os meios e critérios utilizados para obtenção dos dados de TEC do estudo, como empregou-se computação e algoritmos para tornar o trabalho de análise de dados mais eficiente. Será apresentado, também, qual foi o processo de evolução da metodologia aplicada para obtermos os resultados aqui apresentados.

- **Resultados:** Neste capítulo apresentamos uma discussão sobre os resultados obtidos para os períodos selecionados. Incluímos uma análise aplicando a mesma metodologia sobre dados de TEC para dias geomagneticamente perturbados a fim de verificar a eficácia e versatilidade dos métodos e ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho e discutimos os efeitos desta perturbação geomagnética sobre a região do equador magnético.

- **Considerações Finais:** Apoiando-se nos capítulos anteriores serão apresentadas as considerações finais acerca da avaliação dos resultados obtidos por este trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

“Clima Espacial” é o termo mais utilizado por cientistas para se referir as condições do Sol, vento solar, meio interplanetário, magnetosfera, ionosfera e termosfera que podem afetar o desempenho ou funcionamento de equipamentos que estejam no espaço ou na superfície terrestre e que podem ser prejudiciais aos satélites, ao desempenho do sistema GPS e à saúde humana. Variações no clima espacial podem danificar satélites, prejudicar ou interromper meios de comunicação e sistemas de navegação, causando significativas perdas socioeconômicas. Levando em consideração a influência do clima espacial sobre as atividades e saúde humana, é de extremo interesse que tenhamos a capacidade de entender sua atuação sobre planeta Terra e no espaço afim de estarmos preparados para minimizar seus efeitos negativos sobre nossa sociedade e sobre nossa tecnologia (WILLIAM; CHRISTINA, 2015; KANE, 2006).

2.1 O Sol e seu ciclo de atividade

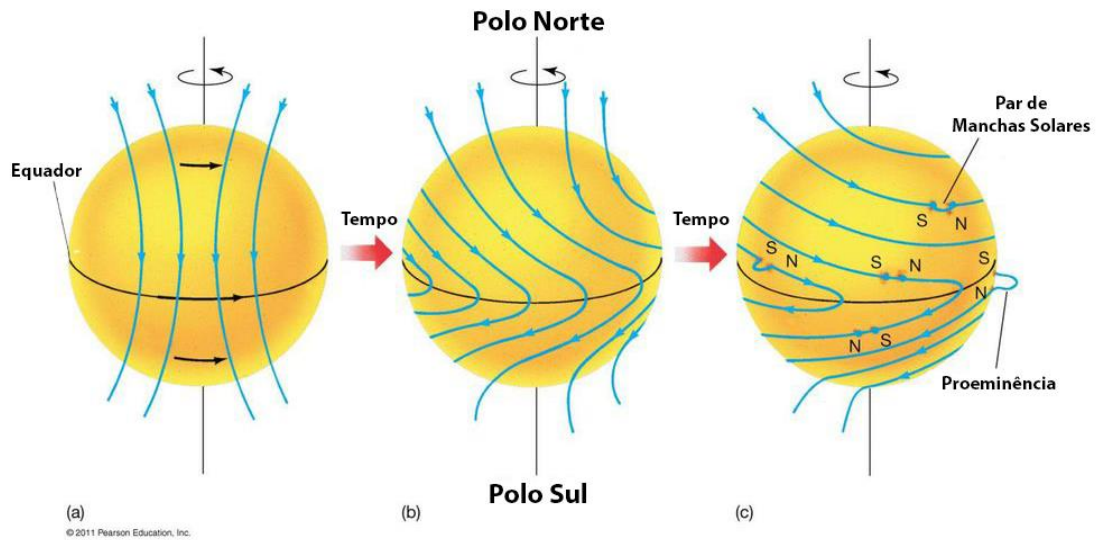
O Sol é uma enorme esfera de gás altamente ionizado (plasma) formado quase todo de hidrogênio (~73%) e hélio (~25%), incluindo outros elementos como oxigênio, carbono, neon e ferro em quantidades muito menores. O Sol possui pelo menos 4,5 bilhões de anos de idade e aproximadamente 330.000 vezes a massa do planeta Terra. No núcleo do Sol, a todo momento, ocorre o processo de fusão de átomos de hidrogênio cujo resultado é a formação de átomos de hélio e a liberação da energia que mantém o Sol como estrutura, impedindo que sua enorme força gravitacional cause o colapso da matéria solar sobre si mesma. O processo de fusão nuclear no interior do Sol é gradual e deve continuar ocorrendo por, pelo menos, mais 5 bilhões de anos, até que a quantidade de fusões de hidrogênio em hélio não seja mais suficiente para gerar a energia necessária para impedir a atuação da força da gravidade sobre a estrutura solar. Durante o período final de sua vida, as camadas mais externas da atmosfera solar deverão se expandir transformando o Sol em uma estrela do tipo gigante vermelha, cujo raio pode ultrapassar a órbita da Terra. Após ejetar suas camadas mais externas somente o núcleo interno, e extremamente quente, do Sol restará, permanecendo como uma anã branca por bilhões de anos. O cenário de evolução estelar do Sol é típico de estrelas de massa baixa e moderada (WOOLFSON, 2000; SARBANI; ANTIA, 2008; SILVA, 2009).

Uma das primeiras observações documentadas do Sol foram realizadas por Galileu Galilei em 1609 quando ele, usando um recém inventado telescópio, pôde observar manchas escuras na superfície solar. Atualmente, sabe-se que estas manchas são regiões da superfície solar onde intensas linhas de campo magnético inibem o processo de convecção do plasma solar, diminuindo a temperatura do plasma naquela região, causando assim a aparente diferença de brilho entre a mancha e o restante da superfície solar (CLIVER, 1994a; 1994b).

Em 1843, o astrônomo alemão Heinrich Schwabe verificou que o número de manchas solares variava de forma característica dentro de um período de aproximadamente 11 anos, porém não havia meios para estudar o que causava essa periodicidade (FRIAÇA *et al.*, 2000).

O avanço tecnológico possibilitou a humanidade construir satélites artificiais e instrumentos que foram capazes de proporcionar o estudo mais detalhado e quase ininterrupto do Sol, fornecendo dados que ajudaram os cientistas a compreender os mecanismos que regem seu comportamento. Estes avanços foram responsáveis por permitir a observação de estruturas e eventos solares que até então eram pouco estudados, como por exemplo: manchas solares, filamentos, buracos coronais, explosões solares, e o comportamento eletrodinâmico do campo magnético solar. Pode-se, também, verificar que a variação periódica do número de manchas solares observadas por Heinrich Schwabe é causada pela modificação da estrutura do campo magnético solar ao longo do tempo. Dentro de um período regular de aproximadamente onze anos, o campo magnético solar é “torcido” pela rotação diferencial do Sol, como representado na Figura 1, que na região do equador é de aproximadamente 24 dias, enquanto em regiões de altas latitudes é de aproximadamente 38 dias. Ao final deste período de onze anos as linhas de campo magnético do Sol voltam a entrar em estado de equilíbrio, onde o número de manchas solares diminui, até praticamente desaparecerem, deixando a superfície solar quase que uniforme quando observada utilizando um telescópio simples por meio do método de projeção (CLIVER, 1994a; 1994b).

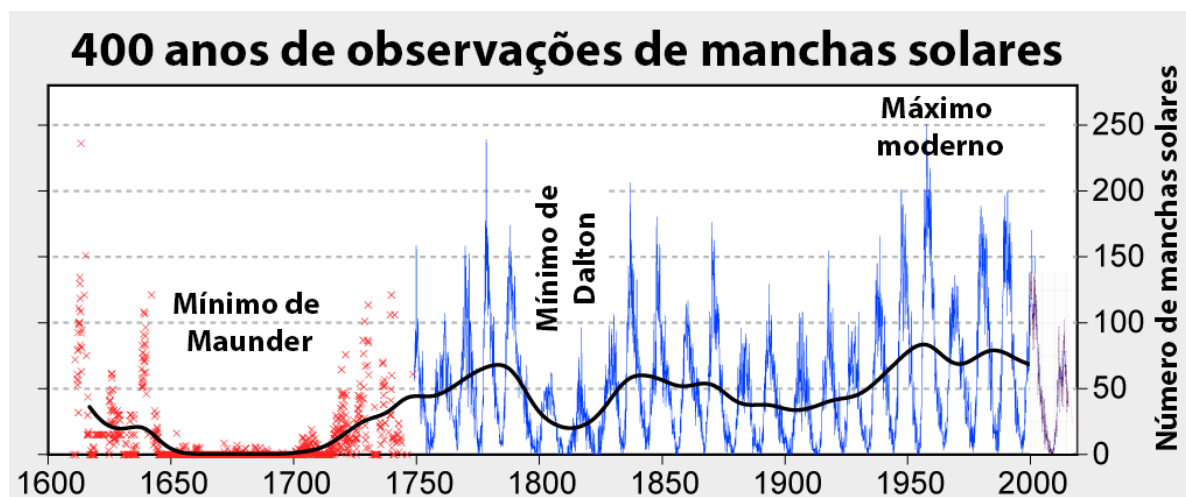
Figura 1 – Representação da evolução temporal do estado das linhas de campo magnético com o avanço do ciclo solar. Da esquerda para a direita.



Fonte: Adaptado de Hawkins (2018)

Os ciclos solares começaram a ser contabilizados a partir do ano de 1755, como mostrado na Figura 2, quando foi possível estabelecer os primeiros registros da contagem de manchas solares, e são definidos dentro do período de onze anos, dividindo-se em períodos de atividade solar baixa e atividade solar alta, com períodos de atividade solar ascendente e atividade solar descendente entre eles (BURLAGA, 1995). O período de atividade solar alta é, normalmente, associado ao surgimento de uma maior quantidade de manchas solares, em relação ao período de baixa atividade solar, e é observado cinco anos após o início do ciclo. O período de atividade solar baixa é, normalmente, associado a ausência de manchas na superfície solar e é observado no período que compreende a transição de um ciclo para o próximo (MATSUOKA, 2003).

Figura 2 – Histórico do número de manchas solares registradas, por estimativa (vermelho) e por contagem instrumental (azul), em um período de 400 anos. Em destaque os Mínimos de Maunder, Dalton e o Máximo Moderno.

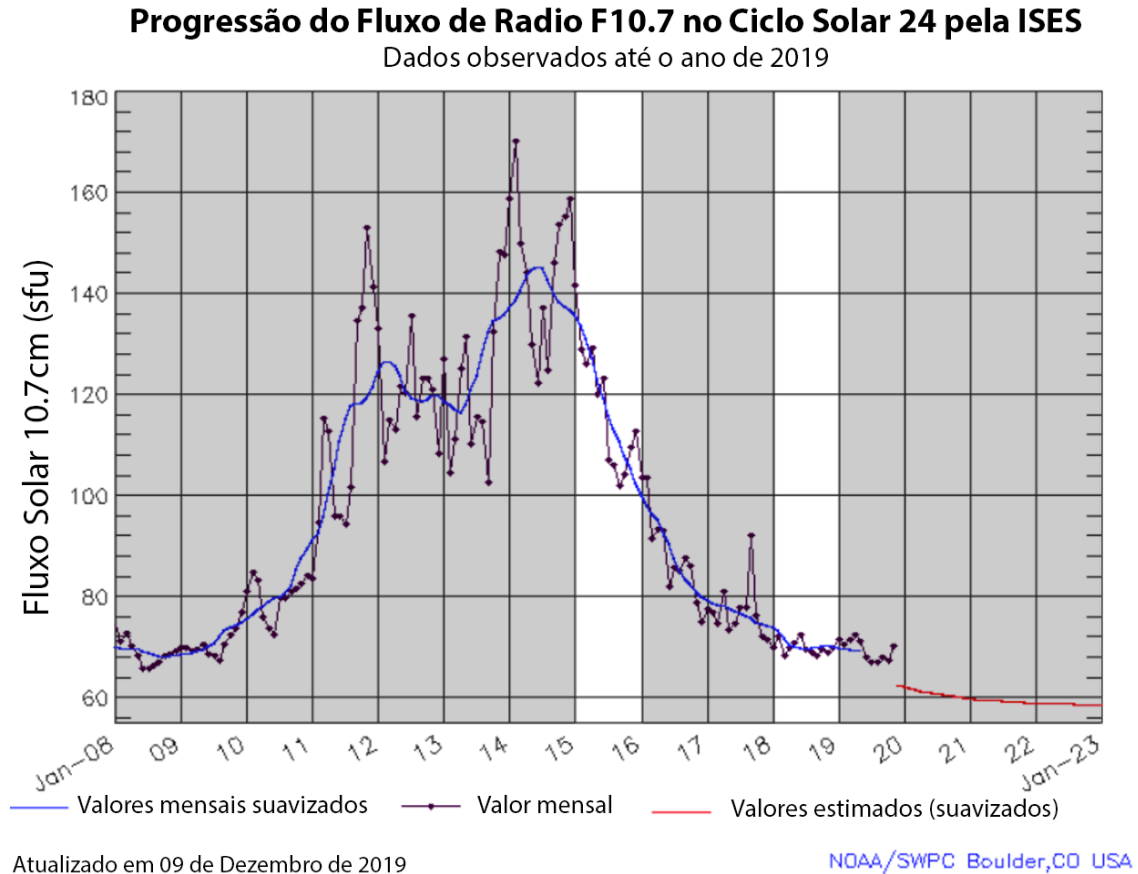


Fonte: Esta figura foi adaptada pelo autor a partir da figura preparada por Robert A. Rohde como parte do projeto Global Warming Art Project, sob a licença de Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0.

Além da contagem de manchas solares é possível verificar o nível de atividade solar por meio do fluxo solar 10,7 cm, que é um indicador definido pela emissão de ondas de rádio no comprimento de 10,7 cm (2800 MHz) proveniente da cromosfera superior da coroa solar. Assim como os registros de manchas solares, o fluxo solar 10,7 cm é um dos registros de atividade solar mais longos existentes, onde é possível obter dados a partir do ano de 1947. O fluxo solar 10,7 cm permite o monitoramento dos níveis de emissão de ultravioleta (*UV – Ultraviolet*) e extremo ultravioleta (*EUV – Extreme Ultraviolet*) e possui a vantagem de permitir a observação de pequenas variações na atividade solar durante os períodos de baixa atividade solar, mesmo na ausência de manchas solares (TAPPING, 1987; 2013).

A Figura 3 mostra os registros da emissão do fluxo solar 10,7 cm para o ciclo solar 24, entre os anos de 2008 e 2019. É possível observar que no ano de 2015 são registrados os maiores níveis de emissão solar de ondas de rádio em 10,7 cm, dentro deste período de onze anos, enquanto em 2018 os níveis de emissão caíram quase que pela metade. Estes dois anos, 2015 e 2018, são utilizados neste estudo, e são correspondentes a períodos de atividade solar alta e atividade solar baixa respectivamente.

Figura 3 - Valores mensais do fluxo solar 10.7 cm, para o período do ciclo solar 24, registrados pela Sociedade Internacional de Energia Solar (ISES).



Fonte: Adaptado de <https://services.swpc.noaa.gov/images/solar-cycle-10-cm-radio-flux.gif>

O clima espacial é fortemente influenciado pela atividade solar. O vento solar e a emissão de radiação ionizante em Raios-X, UV e EUV são alguns dos elementos que apresentam grande variação em suas características durante os diferentes períodos do ciclo solar. Por exemplo, durante períodos de atividade solar baixa o vento solar apresenta velocidade média de ~ 400 km/s e densidade de partículas de ~ 5 e ~ 10 partículas/ cm^{-3} , por outro lado em períodos de atividade solar alta a velocidade do vento solar pode variar entre ~ 800 km/s até ~ 1500 km/s e a densidade de partículas pode variar entre ~ 20 e ~ 40 partículas/ cm^{-3} (KIRCHHOFF, 1991). Grande parte das variações das características do vento solar, e da emissão de radiação ionizante, são associados a grandes explosões solares, que ocorrem com mais frequência em períodos de atividade solar alta, e podem causar eventos de *flares*, que emitem grandes níveis de radiação, e Ejeção de Massa Coronal (*CME – Coronal Mass Ejection*), que são responsáveis pelo lançamento de material solar no espaço (KIRCHHOFF, 1991).

As *CMEs* são grandes “nuvens” de matéria solar compostas por uma alta densidade de partículas energeticamente carregadas, geralmente originadas em explosões solares, que viajam pelo espaço a velocidades maiores que o vento solar circundante e possuem um campo magnético intrínseco. As *ICMEs*, nome dado a uma *CME* enquanto viaja pelo meio interplanetário, levam em média três dias para atingir a terra após deixarem a superfície solar, e podem causar intensas tempestades geomagnéticas alterando, drasticamente, a configuração da magnetosfera e da ionosfera terrestre. Geralmente, as tempestades geomagnéticas causadas por *ICME* estão associadas a diferença entre a orientação do campo magnético intrínseco à *ICME*, para o sul, e a orientação do campo magnético terrestre, para o norte, levando ao processo de reconexão de linhas de campo e a “abertura” parcial da magnetosfera terrestre, permitindo a penetração de partículas carregadas do vento solar em altitudes mais próximas ao planeta (FEDRIZZI, 2003; KIRCHHOFF, 1991).

A penetração destas partículas carregadas em altitudes mais baixas na atmosfera é responsável pela ocorrência de auroras nos polos do planeta Terra. As auroras boreais e austrais são os fenômenos naturais mais popularmente conhecidos cuja ocorrência é resultado da interação do vento solar e da magnetosfera terrestre, e sua intensidade é fortemente associada as condições do clima espacial (KELLEY, 2009; SISCOE, 1978).

2.2 Índices Geomagnéticos

O comportamento regular do campo magnético terrestre é resultado do sistema de correntes elétricas causados pela variação de incidência de radiação solar. Sistemas de correntes irregulares podem surgir por meio da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre e por meio da própria ionosfera. Os índices de atividade geomagnética foram projetados para descrever as variações que esses sistemas de corrente causam no campo magnético terrestre. Existem vários índices utilizados para medir variações destes sistemas de corrente, e estes índices são listados pelo Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (*ISGI – International Service of Geomagnetic Indices*). Contudo, a Associação Internacional de Aeronomia e Geomagnetismo (*IAGA – International Association of Geomagnetism and Aeronomy*) reconhece cinco destes índices como oficiais, que são: AA (sigla em inglês para 2 pontos antipodais – *antipodal*, realiza a medição da amplitude geomagnética global em intervalos de 3 horas), Am (mede a amplitude geomagnética global a partir de grupos de estações localizadas

em $+50^\circ$ e -50° de latitude magnética), Kp (*Planetary K-index*), Dst (*Disturbance storm time*) e AE (*Auroral Electrojet*) que também são os índices mais utilizados para observação dos efeitos de tempestades geomagnéticas sobre a magnetosfera e geoespaço (Home Page of IAGA Working Group V-DAT, 2016; MAYAUD, 1980). O índice geomagnético Dst é utilizado para classificar a intensidade da tempestade geomagnética, e seu catálogo histórico de dados é de fácil obtenção. Neste trabalho, o Dst foi utilizado como filtro para a seleção dos dias geomagneticamente calmos utilizados neste estudo.

2.2.1 O índice Dst – *Disturbance storm time*

O índice geomagnético Dst mede os distúrbios na componente horizontal do campo magnético, seu objetivo é monitorar a assinatura magnética da assimetria de eixo da componente horizontal causadas pelas correntes elétricas na magnetosfera, isso inclui o anel de corrente do equador magnético, a corrente de calda da magnetosfera e a corrente de Chapman-Ferraro da magnetopausa.

Os dados de Dst são obtidos por meio de quatro estações localizadas em baixa latitude geográfica, em uma distância suficiente das correntes de eletro jato equatorial e do eletro jato auroral para evitar interferência de ruído proveniente destas duas fontes. O intervalo de captação de dados é de uma hora e seu cálculo final é a média das quatro estações para aquela hora. A Tabela 1 mostra a localização magnética e os nomes das quatro estações utilizadas para obtenção dos dados de Dst e a Figura 4 mostra a posição geográfica destas estações sobre o mapa (ABREU, 2007; CHAPMAN, 1963).

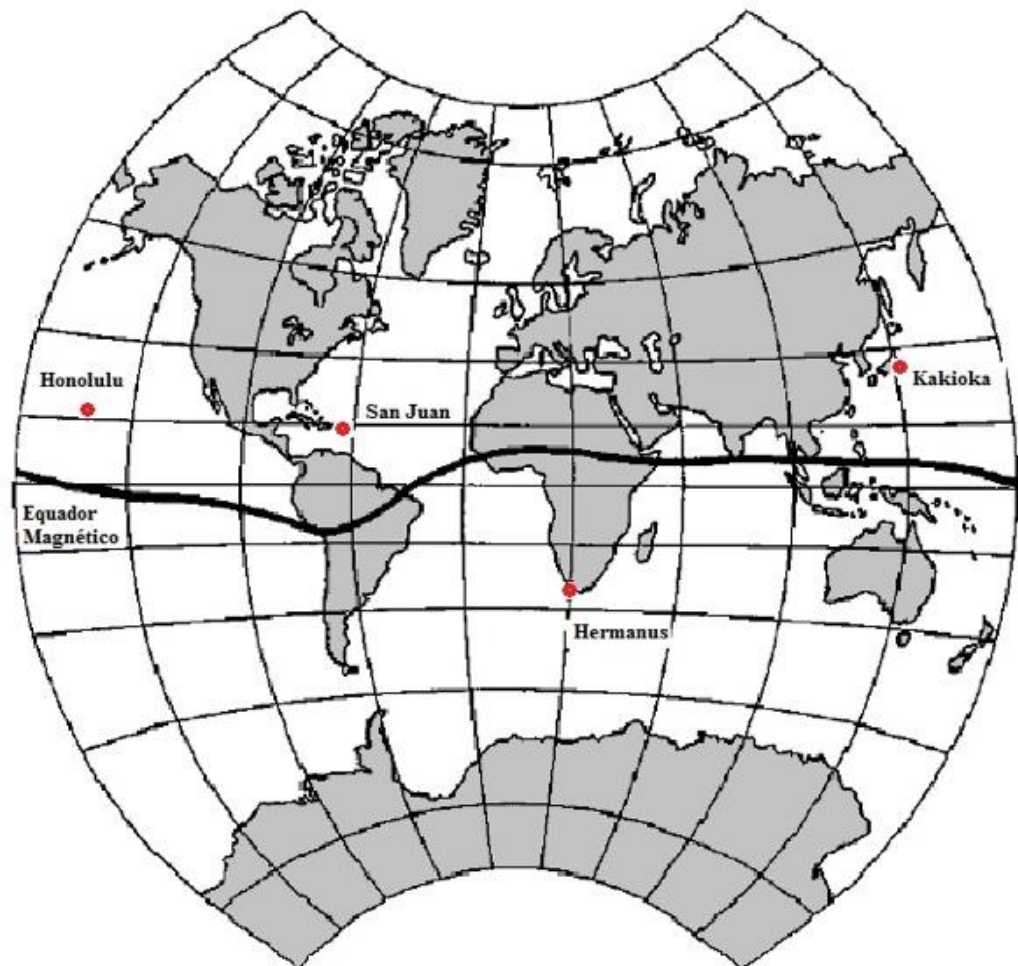
Tabela 1 - Denominação e localização da rede de observatório geomagnético responsável pelo índice Dst.

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

Fonte: Abreu (2007)

Os distúrbios do campo magnético registrados pelo índice Dst são medidos em unidade de nanotesla (**nT**), sua variação negativa é causada pelo aumento de intensidade dos sistemas de corrente citados anteriormente, enquanto sua variação positiva é causada pelo aumento da pressão do vento solar sobre a magnetosfera terrestre.

Figura 4 - Mapa contendo a rede de observatório geomagnético encarregado pelo índice DST.



Fonte: Adaptado de Abreu, (2007)

A Tabela 2 relaciona a classificação de tempestades geomagnéticas com os valores medidos por meio do índice Dst, assim quanto menor o valor do Dst maior é a intensidade da tempestade magnética.

Tabela 2 – Classificação das Tempestades geomagnéticas por meio dos valores do índice Dst.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Muito intensa	< - 250
Intensa	-100 a -249
Moderada	-50 a -99
Fraca	-30 a -49

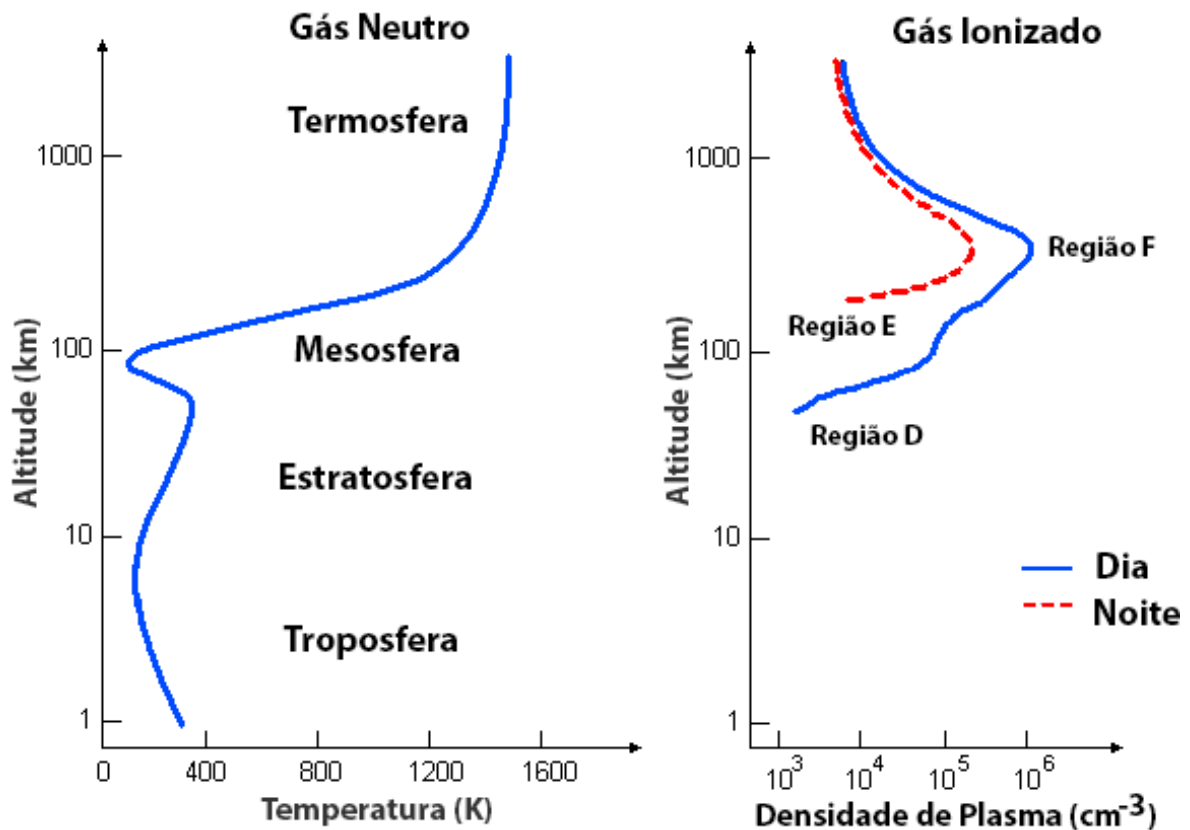
Fonte: Adaptado de Gonzalez (1994).

2.3 Ionosfera

As características da ionosfera terrestre são fortemente influenciadas pelas condições do clima espacial e pelo nível de atividade solar, devido aos níveis de radiação e partículas que incidem sobre os componentes químicos da atmosfera. Devido sua morfologia, a atmosfera apresenta diferentes características que correspondem a altitude na qual a observamos. Nesta seção vamos entender um pouco mais sobre estas diferenças e características.

O perfil vertical da atmosfera pode ser traçado levando em consideração a temperatura dos gases neutros, e a densidade de elétrons livres, em determinada altitude. Considerando estas duas características, é possível dividir a atmosfera terrestre em diferentes regiões, conforme a altitude. A Figura 5 mostra a classificação das regiões atmosféricas por temperatura dos gases neutros e por densidade eletrônica. A absorção de radiação de EUV e UV são os principais responsáveis pelo aumento de temperatura da atmosfera, enquanto a perda rápida de calor, na estratopausa, é causada, em maior parte, pelo resfriamento radioativo (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1997).

Figura 5 – Perfil da atmosfera terrestre por temperatura (esquerda) e por densidade eletrônica (direita). Para cada um dos perfis as camadas são designadas.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009).

Como mencionado anteriormente, a ionosfera pode ser dividida em regiões que são definidas por meio da quantidade de elétrons livres presentes no meio. O limite inferior da ionosfera encontra-se entre, aproximadamente, 50 e 70 km de altitude, enquanto o limite superior é dificilmente calculável, contudo, aceita-se a altitude de 2000 km para a maioria das finalidades. A fotoionização é a principal fonte de produção de íons na ionosfera, e ocorre quando os gases constituintes da atmosfera absorvem radiação solar no comprimento de onda de Raios-X e extremo ultravioleta. Além da fotoionização, a atmosfera pode ser ionizada pela precipitação de partículas de alta energia provenientes de outras galáxias, da magnetosfera e, também, do Sol (KELLEY, 2009; KIRCHHOFF, 1991).

Cada elemento constituinte da atmosfera é ionizado ao absorver um determinado nível de energia. O Ozônio (O₃), por exemplo, é ionizado por fótons com nível de energia de 12,8 eV, em comprimento de onda de 970 Å. Fótons com níveis de energia acima de 12 eV ionizam os constituintes da atmosfera e, também, são responsáveis pelo aquecimento da termosfera. A densidade de elétrons livres na ionosfera atinge um pico próximo entre 300 km e 350 km de

altitude, isso ocorre devido ao fato de o processo de produção iônica ser estritamente dependente da densidade da atmosfera neutra e da quantidade de fótons em uma certa altitude, contudo a densidade da atmosfera neutra diminui de forma exponencial conforme a altitude aumenta, e a linearidade da função de profundidade ótica fazem com que a densidade eletrônica atinja um máximo em uma determinada altitude diminuindo consideravelmente acima e abaixo deste ponto (KELLEY, 2009).

Durante a noite os íons positivos e os elétrons livres, gerados durante o dia, interagem e se recombinam diminuindo a densidade eletrônica da ionosfera. A recombinação pode ocorrer de duas formas distintas, por meio da combinação radiativa, quando um elétron e íons positivos interagem produzindo um átomo ou molécula neutra, e por meio da recombinação dissociativa, quando íons positivos originados da fotoionização interagem com as reações biomoleculares (PULINETS; BOYARCHUK, 2005).

2.3.1 Regiões ionosféricas

A variação vertical da densidade de elétrons na ionosfera terrestre permite que ela seja classificada em três regiões, que são as seguintes:

- **Região D**

Localizada entre, aproximadamente, 50 km e 100 km de altitude, a região D ionosférica é formada pela absorção de Raios-X, radiação ultravioleta e raios cósmicos. Qualquer incidência de radiação cuja seção transversal é menor que 10^{-19} cm^2 é capaz de ionizar a região D produzindo os íons N_2^+ e O_2^+ , a radiação Lyman- α ($\lambda=1216 \text{ \AA}$) é, também, um tipo de radiação importante nesta região e é responsável por produzir o íon NO^+ . A região D é caracterizada pela baixa densidade eletrônica, na ordem de 10^3 elétrons/ m^3 , pela alta taxa de colisão de elétrons e os íons (ν_{en}), na ordem de $\nu_{en} \approx 10^6 \text{ s}^{-1}$, e pela pressão atmosférica maior em relação as outras regiões ionosféricas, é uma região considerada muito complexa quando analisada quimicamente. Devido a rápida taxa de recombinação dos elétrons livres após o pôr do Sol, em taxa quadrática ($L(n+) = \alpha n^2 e$, onde α é o índice de recombinação efetiva), a região D é observada somente durante o dia (KIRCHHOFF, 1991).

- **Região E**

A região E localiza-se entre, aproximadamente, 100 km e 150 km de altitude, possui uma concentração de elétrons na ordem de 10^5 elétrons cm^{-3} , e é caracterizada pela máxima condutividade elétrica encontrada na ionosfera. As intensas correntes elétricas que circulam nesta região da ionosfera interagem fortemente com o campo magnético terrestre tornando sua existência de extrema importância (MITRA, 1952; RISHBETH; GARRIOTT, 1969). A máxima condutividade elétrica da região E é observada em cerca de 110 km de altitude. Na região E um efeito dínamo, causado pelo movimento dos ventos neutros da atmosfera transmite movimento para as regiões condutoras, que estão sob a presença do campo magnético, gerando assim as correntes elétricas.

A região E é ionizada por Raios-X, radiação EUV, partículas energéticas de baixa energia ($\sim\text{keV}$) e, em menor escala, meteoros (BAUER, 1973). Nesta região os íons predominantes são as moléculas NO^+ , O_2^+ , N_2^+ . A principal molécula ionizada na região E é o O_2^+ por meio da fotoionização, dado pela equação: $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O}_2^+ + e$, para $\lambda < 1027 \text{ \AA}$. A perda de elétrons livres na região E ocorre de maneira muito rápida por meio dos seguintes processos químicos: $\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$; $\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$ e, próximo ao limite superior da região E, o processo: $\text{O}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{photon}$ (KIRCHHOFF, 1991; KELLEY, 2009).

- **Região F**

A densidade de elétrons livres na região F é fortemente influenciada pelo ângulo de incidência solar e pelo nível de atividade solar. Durante o dia a região F apresenta dois picos de densidade eletrônica e durante a noite somente um pico de densidade eletrônica, esta característica permite que a ionosfera seja dividida em duas regiões durante o dia, chamadas de região F1 e região F2. Durante a noite somente a região F é considerada (WHITTEN e POPPOFF, 1971).

- **Região F1**

A região F1 está localizada aproximadamente entre 150 km e 200 km de altitude, logo acima da região E, e logo abaixo da região F2. A principal fonte de ionização desta região é a radiação EUV. Durante o dia, o pico de ionização da região F1 encontra-se em torno de 180 km de altitude, por volta de 170 km de altitude ocorre a transição entre os íons moleculares dos íons atômicos. É verificável que a região F1 acompanha o comportamento da região E, onde os íons são quase todos moleculares (NO^+ , O_2^+ , N_2^+) e a partir de 170 km todos os íons

moleculares se tornam íons atômicos (O^+ , e) (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; MITRA, 1952; KOHL; RUSTER; SCHLEGEL, 1996). A região F1 é capaz de defletir ondas de rádio dependendo de sua frequência. Ondas de rádio incidentes, que são capazes de atravessar a região E, também são capazes de atravessar a região F1, onde sofrem uma refração que altera o ângulo de incidência sobre a região F2 onde a reflexão total desta onda pode ocorrer.

○ **Região F2**

A região F2 localiza-se a partir de aproximadamente 200 km de altitude e se estende até o limite superior da ionosfera, seu pico de densidade de plasma está entre, aproximadamente, 200 km e 450 km de altitude. Entre 200 km e 250 km a taxa de produção de elétrons livres é maior que a taxa de recombinação, o que aumenta a taxa de elétrons livres nesta região. Após atingir um pico, por volta de 350 km de altitude, a densidade eletrônica diminui exponencialmente com o aumento da altitude devido a baixa densidade de átomos que podem ser ionizados e a predominância do vento solar sobre o limite superior da ionosfera (MITRA, 1952; RISHBETH; GARRIOTT, 1969; TASCIONE, 1998).

2.4 Dínamos Ionosféricos

O dínamo ionosférico é o mecanismo pelo qual a energia cinética, gerada pelo arrasto da termosfera com o plasma ionosférico, é transformada em energia eletrostática. Este processo também gera os sistemas de correntes que estão presentes na atmosfera. Durante a interação dos gases da termosfera com o plasma ionosférico, na presença do campo magnético terrestre, o arrasto gerado pela atmosfera neutra influencia o movimento de deriva do plasma, assim a diferença na velocidade de deriva dos elétrons e dos íons gera correntes elétricas neste meio, esse processo é chamado de dínamo de corrente. Os sistemas de correntes elétricas, não são uniformemente distribuídos pela atmosfera terrestre, assim a convergência ou a divergência de campos elétricos em certas regiões da ionosfera causa o acúmulo de cargas elétricas em determinadas regiões que, em certo momento, passam a influenciar na deriva dos íons e elétrons. Uma vez que a deriva dos íons e elétrons não são uniformes, um fluxo de corrente elétrica também é gerado. As correntes elétricas geradas pelos dínamos ionosféricos são os principais fatores que influenciam nos níveis de densidade eletrônica em baixas e médias latitudes ionosféricas, uma vez que o desenvolvimento da anomalia equatorial ionosférica (*EIA*)

é diretamente influenciada pelas intensidades destes sistemas de correntes (HIDEKATSU, 2009).

A movimentação da atmosfera neutra possui um papel fundamental no desenvolvimento da *EIA* na região F e na manutenção dos sistemas de correntes elétricas da ionosfera, já as movimentações na termosfera também acontecem em diferentes escalas temporais e espaciais e são produzidas pela ação de ondas gravitacionais, marés atmosféricas e ondas planetárias que se originam em regiões abaixo da termosfera e se propagam para as camadas superiores da atmosfera influenciando de forma significativa no dínamo ionosférico. As variações diárias da ionosfera próxima ao equador magnético e em baixas e médias latitudes magnéticas são fortemente influenciadas por ondas atmosféricas (HIDEKATSU, 2009). Apesar de não fazer parte do escopo deste estudo, a boa compreensão de fenômenos como as ondas atmosféricas são muito importantes para a melhor previsão do comportamento dia a dia da ionosfera.

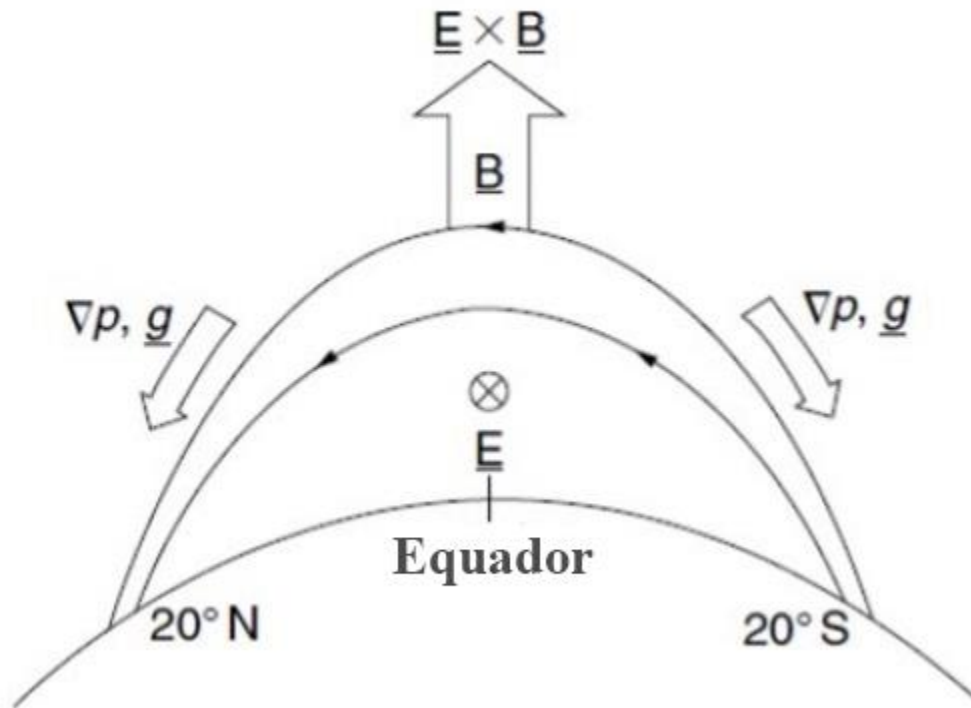
2.5 Anomalia da Ionização Equatorial

Uma das principais características da ionosfera é a diminuição da densidade eletrônica na região do equador ao decorrer do dia, e alta concentração de densidade eletrônica que é observada em regiões entre 15 e 20 graus de latitude magnética e entre ~14 e ~16 hora local (LT), esse fenômeno é consequência do processo denominado anomalia da ionização equatorial (*Equatorial Ionospheric Anomaly*) é responsável pelo transporte do plasma da região equatorial para a região de médias latitudes (TSURUTANI *et al.*, 2004; KELLEY, 2009).

Durante o período diurno, o plasma ionosférico gerado pelo processo de fotoionização sofre forte ação da deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, gerada pelo campo elétrico zonal \mathbf{E} que é perpendicular as linhas de campo magnético \mathbf{B} , horizontais em relação a superfície terrestre, que eleva o plasma a altas altitudes. Após atingirem grandes altitudes, o plasma ionosférico começa a sofrer ação da gravidade e do gradiente de pressão e difundindo-se pelas linhas de campo magnético até regiões de baixas latitudes em ambos os hemisférios norte e sul (KELLEY, 2009).

O processo que dá origem a anomalia da ionização equatorial faz com que o plasma ionosférico percorra um caminho similar ao trajeto que a água percorre quando jorra de uma fonte aquática, como mostra a Figura 6, este processo é conhecido na comunidade científica como efeito fonte (em inglês *fountain effect*).

Figura 6 – Representação do efeito fonte que dá origem a anomalia da ionização equatorial com a representação das forças e direções que agem sobre o plasma ionosférico durante o processo.



Fonte: Adaptado de Kelley (2009).

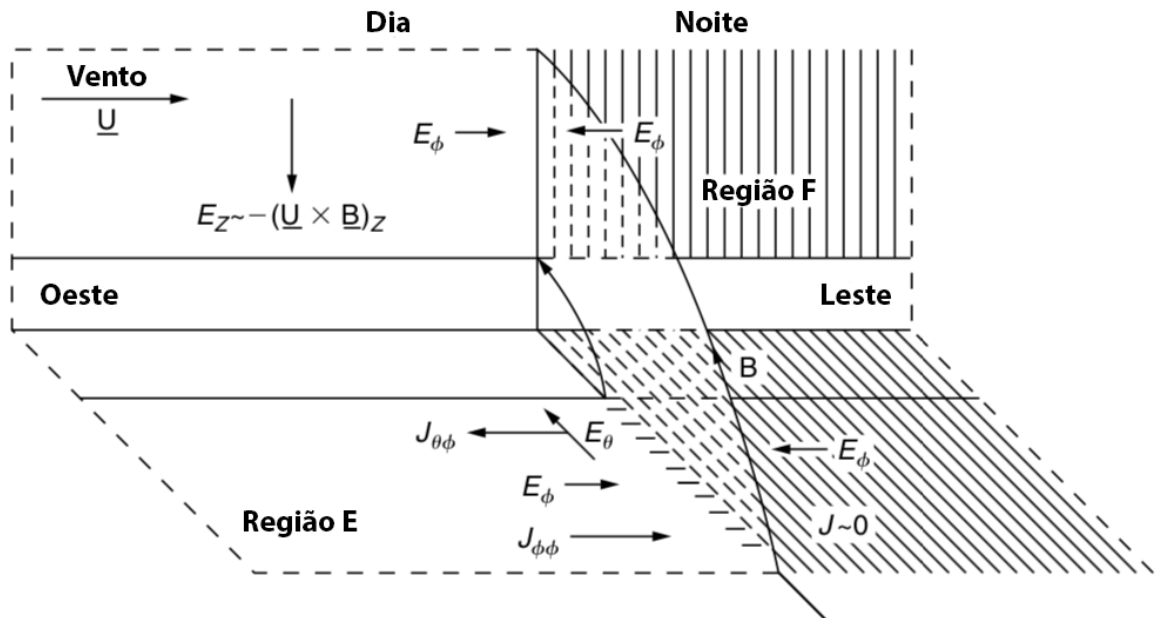
2.6 Pico Pré-Reverso

O pico pré-reversão (*PRE – Pre-Reversal Enhancement*) do campo elétrico zonal é uma característica muito importante da ionosfera equatorial. Esse fenômeno causa, em um curto espaço de tempo, a intensificação do campo elétrico, para leste, próximo ao terminador do entardecer, que causa a subida da ionosfera próxima a região do equador magnético e aumenta a taxa de crescimento da instabilidade de Rayleigh-Taylor. A instabilidade de Rayleigh-Taylor é o mecanismo que dá origem aos fenômenos de irregularidades ionosféricas apresentada mais a diante na dissertação. A magnitude do pico pré-reversão depende da época do ano, nível de atividade solar e longitude (FEJER, 1999; ABDU *et al.*, 2005).

A Figura 7 mostra um esquema das componentes que dão origem ao pico pré-reversão. Durante o dia os campos elétricos da região F, gerados pelos ventos neutros da termosfera, são cancelados pelas altas condutividades dos campos elétricos da região E, fazendo assim com que as derivas verticais e zonais do plasma ionosférico sejam controladas pelos campos elétricos da região E. Durante o pôr do sol, com o enfraquecimento do campo elétrico da região E no lado noturno do terminador do entardecer, os campos elétricos da região E e F atuam em conjunto

sobre a deriva vertical do plasma ionosférico, aumentando muito sua velocidade para cima, gerando o pico pré-reverso, e do lado noturno do terminador os campos elétricos da região F atuam na deriva vertical para baixo e para leste do plasma ionosférico (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; SILVA, 2018).

Figura 7 – Esquema das componentes que envolvem o fenômeno de pico de pré-reversão.

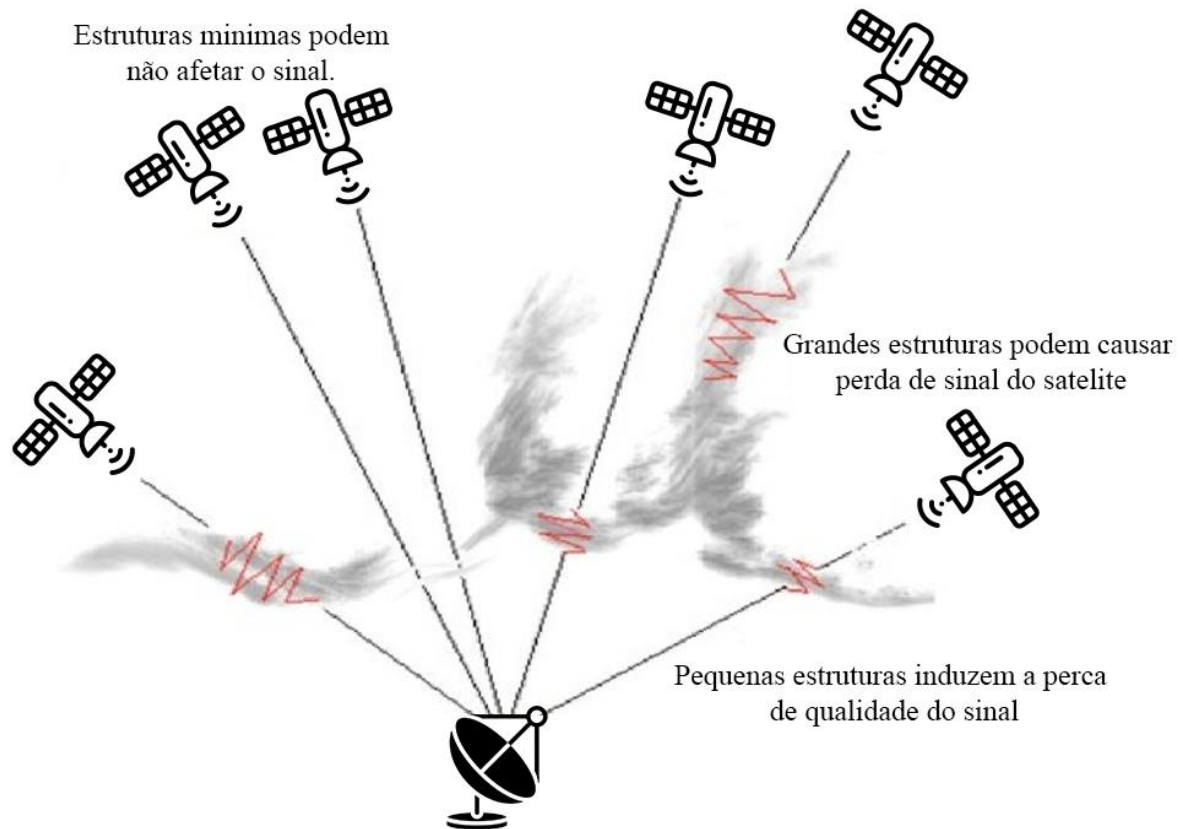


Fonte: Adaptado de Farley *et al.* (1986).

2.7 Irregularidades Ionosféricas

Ao longo de um dia o plasma ionosférico pode desenvolver irregularidades que podem causar flutuações em sinais eletromagnéticos como sinais de rádio ou sinais do próprio sistema GPS. As flutuações geradas por essas irregularidades na ionosfera são chamadas de cintilações ionosféricas. A Figura 8 mostra a representação das situações que podem ocorrer quando o sinal de satélite atravessa uma região de irregularidade ionosférica. Quando o sinal eletromagnético emitido pelo satélite atravessa uma região de irregularidade até o caminho do receptor ocorrem as cintilações que, dependendo do tamanho da irregularidade, podem fazer com que o sinal sofra desde uma leve instabilidade até perda total do travamento com o receptor durante o período em que a irregularidade estiver no caminho do sinal entre o satélite e o receptor.

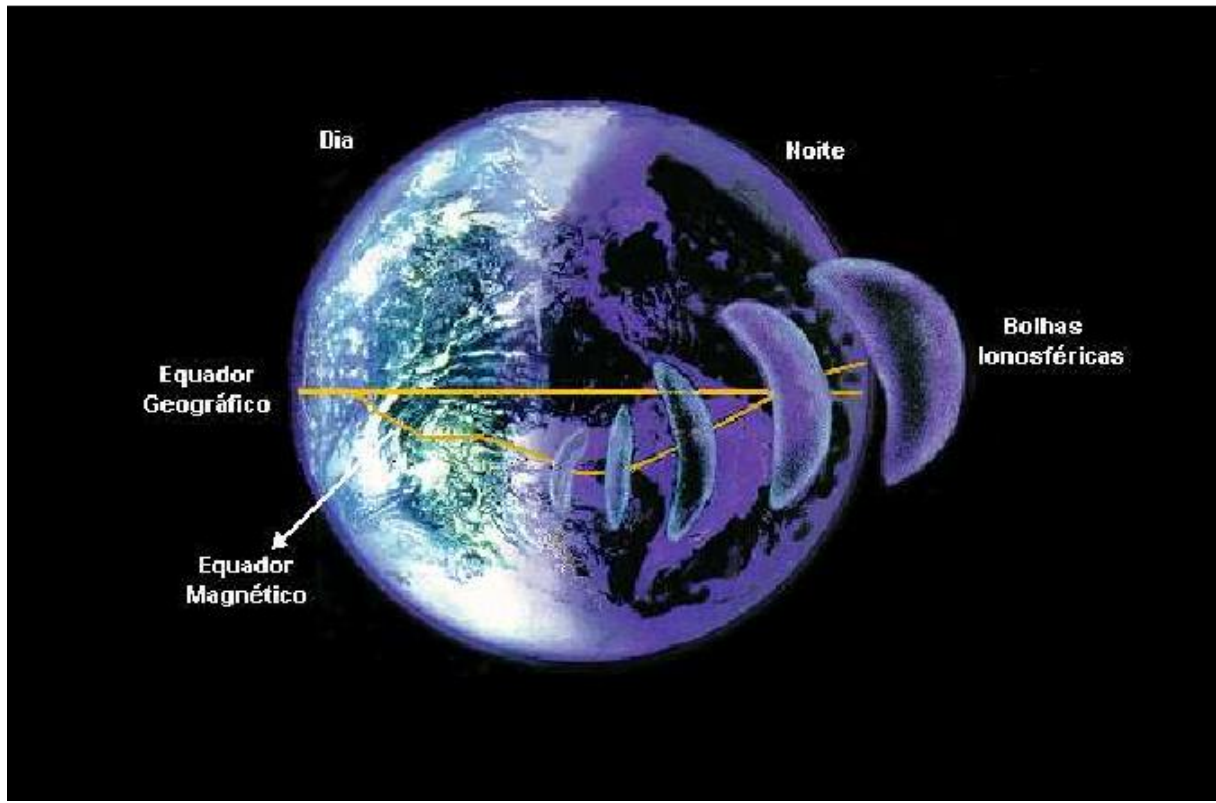
Figura 8 - Representação do caminho percorrido pelo sinal de satélite através de estruturas de irregularidades ionosféricas.



Fonte: O Autor.

Algumas das irregularidades ionosféricas mais comuns são as chamadas bolhas de plasma equatorial, são grandes estruturas que podem se estender ao longo das linhas de campo magnético por centenas, ou até milhares, de quilômetros, desde o equador magnético até médias latitudes, região onde ocorre a anomalia da ionização equatorial, geralmente derivam para leste acompanhando a deriva do plasma, e sua duração é de algumas horas uma vez que sua formação, evolução e manutenção dessas dependem de fatores que são fortemente afetados pela ação da incidência solar na atmosfera (KELLEY, 1989; 2009). A Figura 9 mostra uma representação da evolução das bolhas de plasma, na direção leste, a partir do terminador dia-noite acompanhando perpendicularmente o equador magnético.

Figura 9 - Representação artística do desenvolvimento de bolhas de plasma a partir do terminador dia-noite na direção leste. Em destaque o Equador geográfico e o equador magnético.



Fonte: Takahashi *et al.* (2008).

O mecanismo mais aceito para explicar a formação das bolhas de plasma é o processo de instabilidade Rayleigh-Taylor que se inicia na base da camada F e é causado pela alteração na eletrodinâmica da ionosfera durante a passagem do terminador solar. Durante a passagem do terminador solar o pico pré-reversão altera a eletrodinâmica do meio e causa a deriva vertical do plasma tornando o processo de instabilidade Rayleigh-Taylor, representado na Figura 10, favorável ao desenvolvimento de bolhas de plasma (KELLEY, 1989; MUELLA, 2008).

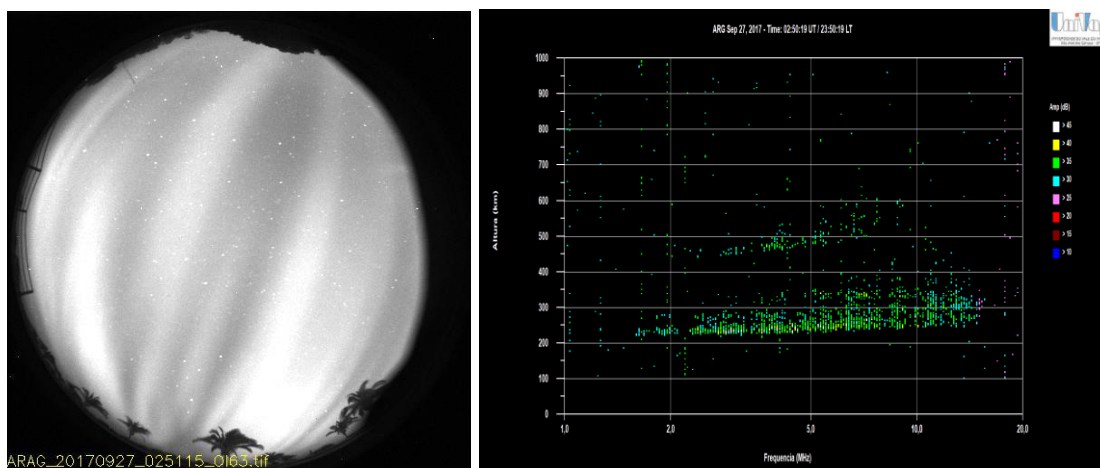
Figura 10 - Representação da evolução das bolhas de plasma no meio ionosférico. O plasma menos denso sofre deriva vertical em direção ao plasma mais denso.



Fonte: Adaptado de Harris *et al.* (2016).

O imageador all-sky é um equipamento capaz de observar o brilho da atmosfera (*airglow*) utilizando diversos comprimentos de onda. Quando irregularidades ionosféricas estão presentes no campo de visão do imageador é possível observar uma vasta região sem brilho semelhante a uma bolha, perpendicular ao equador magnético (MENDILLO; BAUMGARDNER; SPENCER, 1982). Na Figura 11 (painel esquerdo) é ilustrado o exemplo da ocorrência de uma bolha de plasma no comprimento de onda de 630 nm em Araguatins no dia 26 de setembro de 2017. Essas irregularidades também podem ser observadas através de ionossondas, em ionograma elas aparecem como um espalhamento do sinal de rádio emitido pela antena na base da camada F e por esse motivo são chamadas de espalhamento-F (*spread-F*), ver Figura 11 (painel direito) (MACDOUGALL; GRANT; SHEN, 1995; CADI, 1997).

Figura 11 - Exemplo de bolhas de plasma observadas através de imageador All-Sky (painel esquerdo) sobre a estação de Araguatins e exemplo de espalhamento F, observado por ionossonda (painel direito) sobre a estação de Araguatins para o dia 26 de setembro de 2017 no horário aproximado de 02:50 UT.

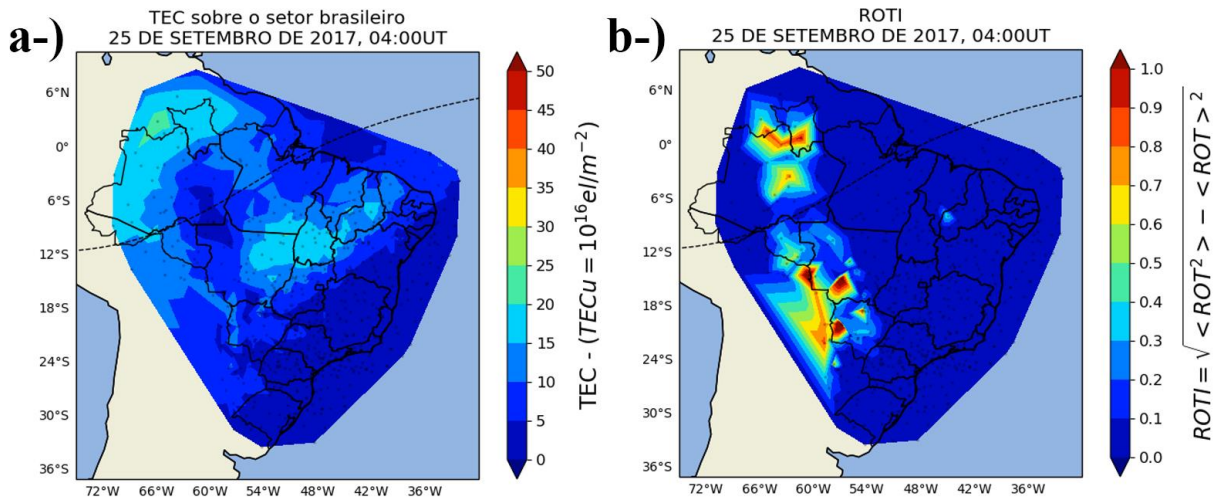


Fonte: O autor.

Em mapas de contorno que mostram a distribuição do TEC em uma região, Figura 12-a, as bolhas de plasma aparecem como uma região, quase perpendicular ao equador magnético, onde os valores de TEC diminuem evidenciando a região onde o sinal do satélite encontra uma região com menos densidade de eletrônica que o entorno. Quando observamos gráficos de contorno de ROTI (sigla em inglês para *Rate-of-TEC-index*), Figura 12-b, que em resumo mede a intensidade da flutuação do sinal emitido pelo satélite, vemos que a região da bolha de plasma apresenta grandes flutuações enquanto em regiões onde o plasma não foi perturbado o sinal do satélite não sofre flutuações significativas. A definição detalhada de ROTI será apresentada na seção 2.8.8.

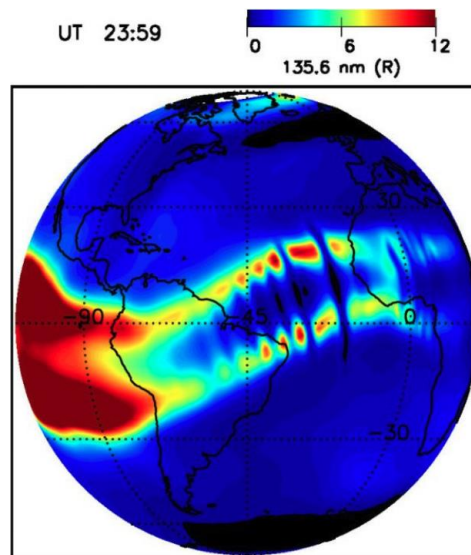
A Figura 13 mostra a representação de irregularidades ionosféricas geradas a partir de um modelo computacional utilizando dados de emissão 135,6 nm para o horário de 23:59 UT simulando as condições de março de 2019, onde é possível observar a formação de bolhas de plasma nos horários logo após o pôr do sol estendendo-se latitudinalmente pelas linhas de campo a partir do equador magnético (HUBA, 2020).

Figura 12 – Presença de bolha de plasma, em mapas de contorno da distribuição do TEC e ROTI sobre o setor brasileiro para o dia 25 de setembro de 2017 as 04h:00m, na região oeste do Brasil, perpendicular ao equador magnético entre 6°N e 24°S de latitude.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Modelo computacional de irregularidades ionosféricas a gerado a partir de dados de emissão 135,6 nm para o horário de 23:59 UT para março de 2019.

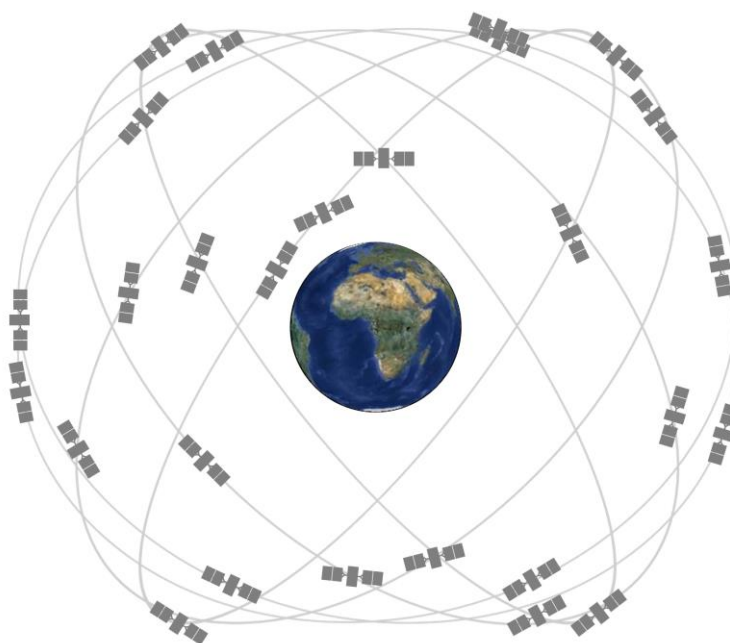


Fonte: Adaptado a partir de HUBA (2020).

2.8 Sistema de Posicionamento Global – GPS

O GPS (*Global Positioning System*) foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano com o objetivo de ser o meio de navegação primário das forças armadas norte americanas (MONICO, 2000). Declarado em pleno funcionamento em 1995, como representado na Figura 14, o GPS é composto por uma constelação de 24 satélites operacionais que orbitam o planeta Terra em um plano inclinado de 55° em relação ao equador, dentro de um período de 12 horas, à uma distância de aproximadamente 20.200 quilômetros, essas configurações permitem que ao menos 4 satélites sejam visíveis no céu em qualquer momento a partir de qualquer ponto terrestre. Desta forma qualquer aparelho receptor pode estabelecer seu posicionamento no globo terrestre em termos de latitude, longitude e altitude, assim como sua velocidade e direção de movimento a qualquer momento independente das condições atmosféricas (ROCHA, 2003). Os 24 satélites do sistema GPS emitem ondas eletromagnéticas de frequência ultra-alta (*Ultra-High Frequency – UHF*) em dois canais: entre 300 MHz 120 GHz e 120 - 150 MHz.

Figura 14 - Ilustração da constelação dos satélites do sistema GPS.

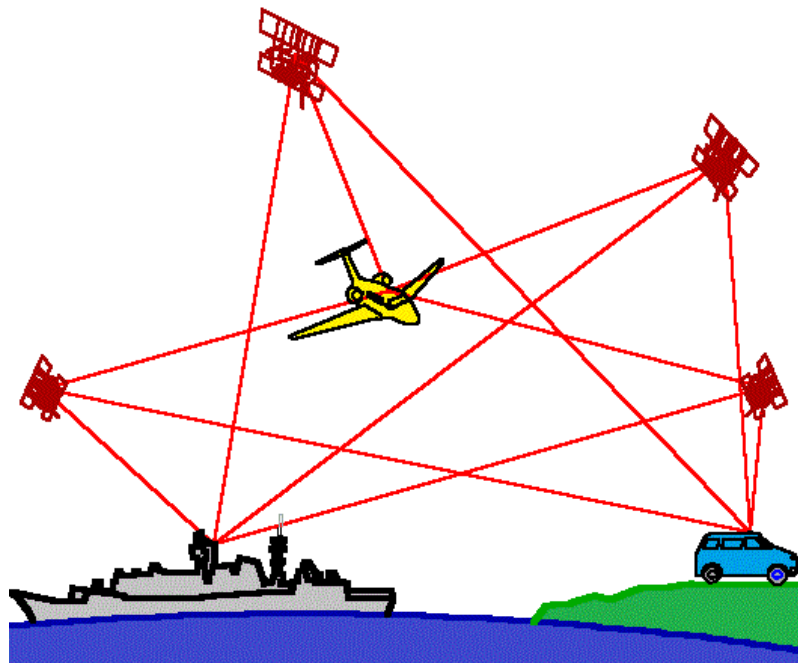


Fonte: GPS.gov(2021).

O GPS é aberto, livre e gratuito, e graças a essas características seu uso foi aplicado para as mais diversas finalidades, desde telefones inteligentes, caixas eletrônicos, até em contêineres de produtos que atravessam os oceanos em navios cargueiros. O emprego desta tecnologia na economia traz grande produtividade e eficiência em áreas como agricultura, construção, mineração, reconhecimento de território, entrega de encomendas e no gerenciamento da logística global de importação e exportação. É possível encontrar o uso de GPS até mesmo em

serviços financeiros, uma vez que esses dependem da sincronização precisa de tempo entre as transações para evitar erros e falhas. O uso da tecnologia GPS é extremamente importante para o salvamento de vidas, o emprego do GPS permite que acidentes de transporte sejam evitados, é de grande auxílio no resgate de vítimas de desastres naturais. A Figura 15 mostra uma representação das finalidades para as quais os satélites GPS podem ser utilizados.

Figura 15 - Representação gráfica da utilização de receptores GPS com usuários finais.

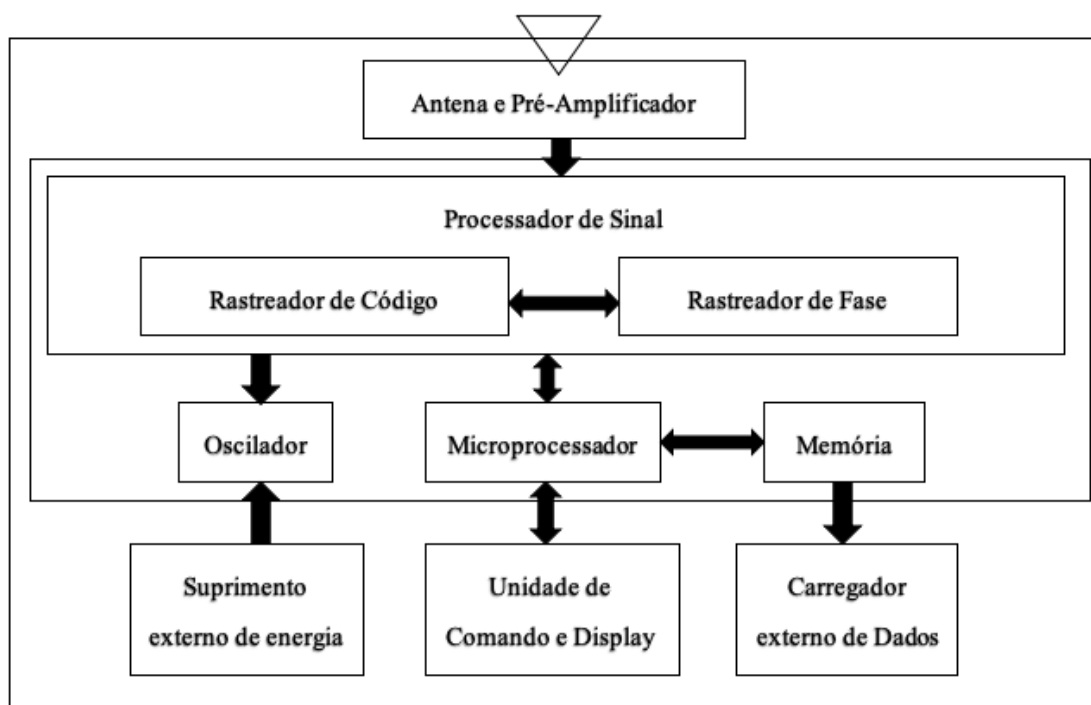


Fonte: adaptada de Dana (2015).

2.8.1 Receptor GPS

Os receptores GPS são praticamente iguais em sua composição de funcionalidades, embora para cada situação específica os receptores podem se diferenciar em qualidade de fabricação. A Figura 16 mostra, por meio de uma esquematização, os componentes básicos de um receptor GPS:

Figura 16 - Esquema de um receptor GPS.



Fonte: Adaptado de Fedrizzi (1999).

Os cálculos, decodificações e processamento dos dados recebidos pela antena do receptor GPS são processados por um microprocessador central. A sessão de memória permite que os dados sejam armazenados para a realização de novos processamentos. Assim ao identificar 4 ou mais satélites, um receptor GPS pode calcular sua distância para cada um desses e utilizar essa informação para determinar sua posição da superfície terrestre (MOOR, 2011).

2.8.2 Observáveis GPS

Quatro observáveis são identificáveis a partir dos dados obtidos pelos receptores GPS e que foram transmitidos pelos satélites (SEEBER, 1993):

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

A fase da onda portadora é a observável básica para quase todas as atividades geodésicas devido a sua precisão ser maior do que a pseudodistância (CAMARGO, 1999).

2.8.3 Observáveis e os erros relacionados

Como em qualquer sistema, erros são passíveis de ocorrer e por esse motivo é de suma importância que as fontes de erros sejam conhecidas e entendidas para evitar que os erros diminuam a qualidade do sinal GPS. Analisando todo o sistema que envolve o GPS podem separar os erros envolvidos em 3 partes, que são:

- **Erros aleatórios** – erros que não podem ser evitados, sendo assim uma propriedade característica da observação;
- **Erros grosseiros** – causados por falhas de equipamento ou por ação do operador;
- **Erros sistemáticos** – podem ser anulados por meio de técnicas de observação;

A Tabela 3 relaciona as fontes dos principais erros encontrados nos sistemas GPS.

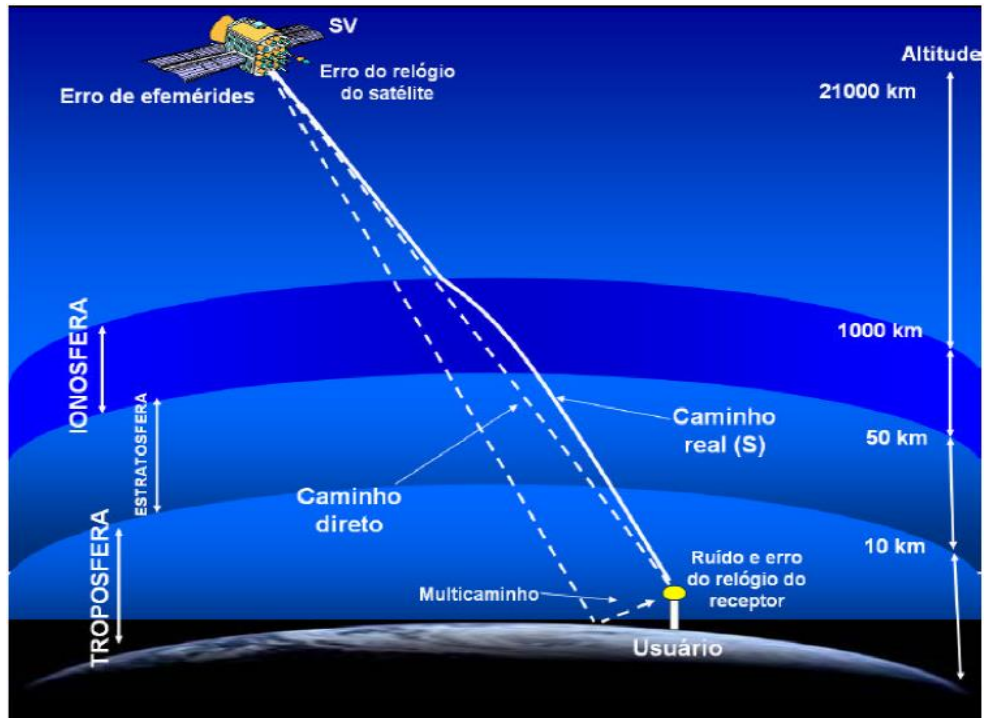
Tabela 3 - Relação das principais fontes de erros encontrados em sistemas GPS.

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

Fonte: Adaptado de Monico (2000); Oliveira (2003).

A Figura 17 representa os principais erros envolvidos no sistema GPS por meio da indicação de diferença entre o caminho direto e o caminho real.

Figura 17 - Erros envolvidos nas observáveis GPS.



Fonte: Oliveira, (2003).

2.8.4 Refração ionosférica

Refração ionosférica é uma das principais fontes de erro do sistema GPS. A variação do conteúdo eletrônico da ionosfera causa a refração das ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites GPS e como consequência tem sua direção e velocidades alteradas. Os índices da velocidade de fase v_f e da velocidade de grupo v_g , são fornecidos por Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001):

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

e

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

Onde:

N_e é a densidade de elétrons;

40,3 é uma constante.

A unidade de medida usada para N_e é dado em m^{-3} , e para a constante 40,3 em MHz^2 ($el\ m^{-2}$)⁻¹. Segundo as equações (1) e (2), à medida que acontece um aumento da v_f , ocorre um

retardo na v_g . Percebemos, também, que nas equações (1) e (2) 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 ρ entre o satélite e o receptor. Através de cálculos e deduções matemáticas podemos 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, Lichtenegger e Collins (2001):

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

e

$$I_{gR}^S = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (4)$$

Hofmann et al. (2001), Camargo (1999) e Monico (2000) apresentam mais detalhes a respeito das fontes e erros implicando nas observáveis GPS e métodos matemáticos das equações envolvidas.

2.8.5 Determinando o conteúdo eletrônico total (*TEC*)

O *TEC* é usado para estudos relacionados à ionosfera e é determinado a partir do atraso da propagação do sinal de rádio entre a antena, em solo, e o satélite GPS, que orbita o planeta. O *TEC* varia no tempo e no espaço e seu valor pode ser influenciado por inúmeras variáveis, por exemplo Matsuoka e Camargo (2004):

- Ciclo solar;
- Estação do ano;
- Hora do dia;
- Localização geográfica; e
- Atividade geomagnética.

Conseguimos determinar o *TEC* por meio 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 m² Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001):

$$TEC = \int_R^S N_e ds \quad (5)$$

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

2.8.6 Determinando o conteúdo total de elétrons na vertical (*VTEC*)

Para calcular o conteúdo total de elétrons na direção vertical é possível utilizar a seguinte equação fornecida por Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001):

$$VTEC = \cos(z') TEC \quad (6)$$

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 por meio da seguinte equação Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001):

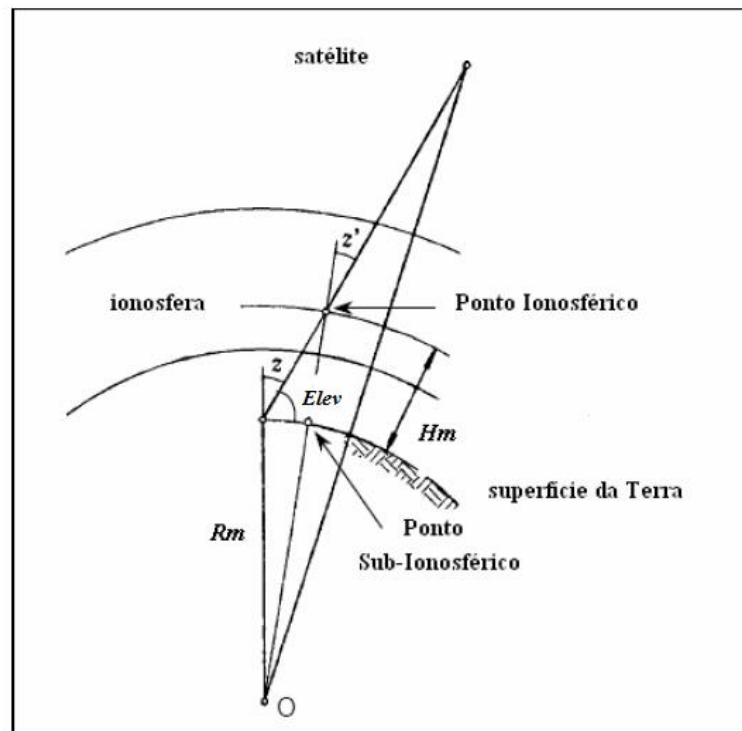
$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z \quad (7)$$

onde:

- R_m – Raio médio da Terra (~6371 km);
- H_m – Altura média do pico de densidade da ionosfera (~300 km); e
- z – Ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - elev$, o ângulo de elevação do satélite é representado por *elev*).

A Figura 18 mostra em detalhes as quantidades envolvidas na equação (7) 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: Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger E Collins, (2001).

2.8.7 Determinando a Taxa de Variação do TEC (ROT)

Através da medição dos sinais GPS é possível observar flutuações de curta escala no TEC no caminho entre o satélite e o receptor, estas flutuações são geralmente causadas pela existência de irregularidades no plasma ionosférico ao longo deste caminho. Então, desde os anos 90, vários pesquisadores utilizam a taxa de variação do TEC, chamado de ROT (sigla em inglês para rate-of-TEC), para medir estatisticamente a amplitude destas flutuações através da verificação das medidas da fase diferencial dos sinais de dupla frequência. O ROT é expresso em TECU/minuto através da seguinte equação:

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (8)$$

e acordo com Mendillo et al. (2000), geralmente, irregularidades do tipo bolha de plasma são associadas a flutuações de fase variando entre 0,5-1,0 $\Delta TEC/min$.

2.8.8 Determinando o Índice de Variação de TEC (ROTI)

Com a utilização cada vez mais frequente do método de ROT pela comunidade científica, verificou-se que através deste método é possível observar flutuações de sinal em escalas menores, assim, através da implementação de um método baseado no desvio padrão do ROT obteve-se um índice que fora denominado ROTI (sigla em inglês para *index rate-of-TEC*). A utilização do ROTI permite a análise estatística destas pequenas irregularidades ionosféricas e é sua expressão é dada pela seguinte equação (PI *et al.*, 1997):

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (9)$$

De acordo com Pereira 2013, através do ROTI, podemos classificar a intensidade das flutuações de sinais em três níveis que abrangem a maioria dos casos onde, $ROTI \leq 0,05$ significa nível de flutuação baixo, $0,05 \leq ROTI \leq 0,2$ significa nível de flutuação moderado e $0,2 \leq ROTI$ significa nível de flutuação muito forte. Contudo, é válido alterar os limites destes níveis para se adaptar melhor ao contexto da observação, uma vez que a ocorrência e intensidade das flutuações é influenciada de maneira significativa pela fase do ciclo solar e condições do clima espacial (PI *et al.*, 1997).

3 DADOS E METODOLOGIA

Este trabalho utiliza dados obtidos durante todo o ano de 2015 e 2018 para estudar a variação do *TEC* durante os períodos de atividade solar alta e baixa (ver Figura 3) para os respectivos anos dentro do período que abrange o ciclo solar 24, cujo período deu-se entre 2008 e 2019 (PHILLIPS, 2019).

Os dados utilizados neste trabalho são fornecidos pelo conjunto de receptores GPS de frequência dupla, pertencentes a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que podem ser obtidos por meio da página eletrônica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na internet. A RBMC possui mais de 100 estações GPS-TEC em seu catálogo, a Figura 19 mostra a distribuição de cada uma destas estações sobre o mapa do Brasil, como apresenta pela página do IBGE RBMC (2019).

Figura 19 - Distribuição das estações GPS-TEC pertencentes a RBMC em território brasileiro. Destaque para pontilhado branco que indica o caminho do equador magnético.



Fonte: RBMC (2019).

As estações GPS-TEC utilizadas neste trabalho estão localizadas dentro de uma estreita faixa de latitude magnética, a partir do equador magnético, distribuídas por toda extensão longitudinal do equador magnético que atravessa o território brasileiro. É importante notar que não há convenção formal sobre os limites que classificam as latitudes magnéticas em diferentes regiões como: equatorial, baixas-latitudes, médias-latitudes e altas-latitudes, contudo estudos

anteriores procuram definir a região equatorial magnética como uma faixa de $\pm 5^\circ$ de latitude magnética a partir da linha imaginária que demarca a latitude magnética de zero grau (equador magnético) (RIBEIRO *et al.*, 2019).

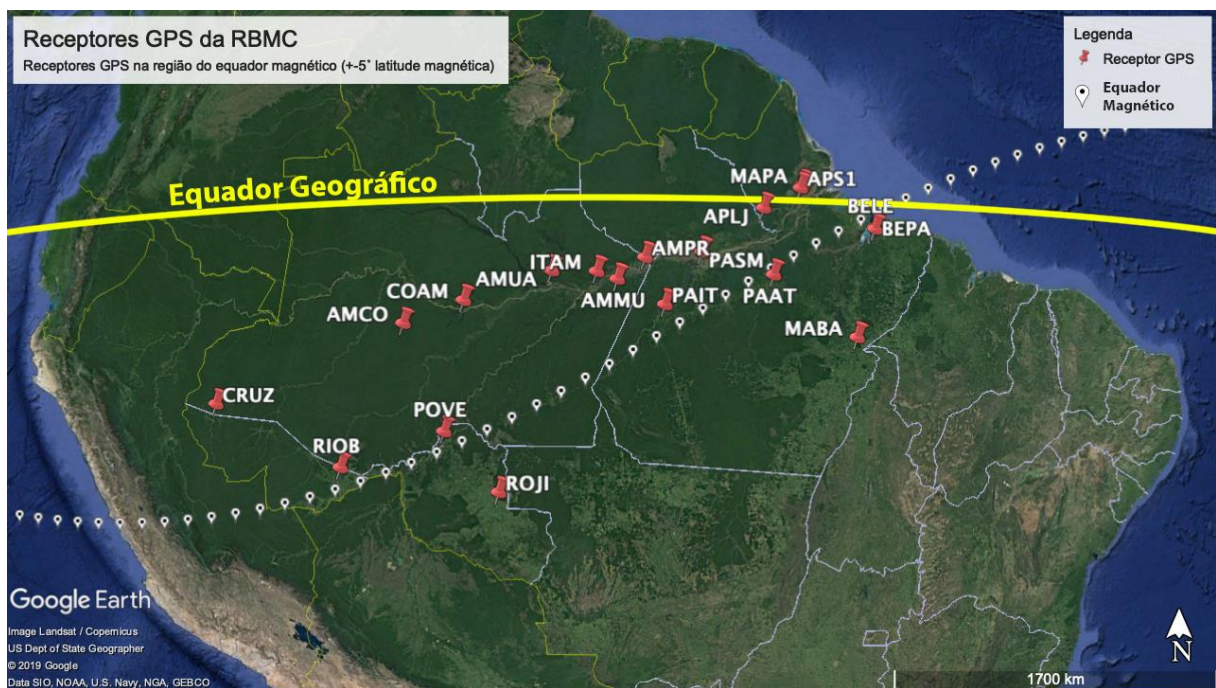
Neste estudo, selecionamos estações GPS-TEC localizadas em uma faixa de $\pm 5^\circ$ de latitude magnética, a partir de 0° de latitude magnética. Com esta definição e dependendo do dia e horário das análises, foi possível obter dados de no máximo 23, e no mínimo 17 estações GPS-TEC. A Tabela 4 lista as principais informações das estações GPS-TEC selecionados para este estudo, e a Figura 20 mostra a distribuição destas estações no território brasileiro ao longo da região do equador magnético.

Tabela 4 - Detalhes das estações GPS, da RBMC, utilizadas neste trabalho.

CIDADE	SIGLA	LATITUDE GEOGRÁFICA	LONGITUDE GEOGRÁFICA	LATITUDE MAGNÉTICA	
				2015	2018
Macapá	MAPA	0,046°	-51,097°	1,963°	1,390°
Santana – Docas	APS1	-0,059°	-51,166°	1,908°	1,335°
Laranjal do Jari	APLJ	-0,822°	-52,515°	1,992°	1,419°
Belém	BELE	-1,408°	-48,462°	-0,829°	-1,399°
Belém INPE	BEPA	-1,460°	-48,441°	-0,887°	-1,457°
Santarém – INCRA	PASM	-2,427°	-54,728°	1,785°	1,221°
Parintins	AMPR	-2,631°	-56,734°	2,655°	2,102°
Manaus	NAUS	-3,022°	-60,055°	3,914°	3,390°
Manaus - UEA	AMUA	-3,091°	-60,018°	3,836°	3,311°
Itacoatiara	ITAM	-3,125°	-58,431°	3,060°	2,521°
Altamira	PAAT	-3,200°	-52,181°	-0,287°	-0,859°
Altamira – UFPA	PAAR	-3,211°	-52,212°	-0,279°	-0,851°
Maués	AMMU	-3,396°	-57,708°	2,466°	1,921°
Coari UEA	COAM	-4,097°	-63,145°	5,49°	3,768°
Itaituba	PAIT	-4,287°	-56,036°	0,833°	0,279°
Coari	AMCO	-4,871°	-65,333°	4,77°	3,892°
Marabá	MABA	-5,362°	-49,122°	-3,881°	3,39°
Humaitá	AMHA	-7,516°	-63,028°	1,115°	0,638°

Cruzeiro do Sul	CRUZ	-7,611°	-72,672°	3,565°	3,244°
Porto Velho	POVE	-8,709°	-63,896°	0,351°	-0,108°
Rio Branco	RIOB	-9,965°	-67,802°	0,388°	-0,008°
Guajará-mirim	ROGM	-10,784°	-65,330°	-1,063°	-1,495°
Ji-Paraná	ROJI	-10,863°	-61,959°	-2,304°	-2,782°

Figura 20 – Estações GPS da RBMC utilizadas neste trabalho, distribuídas no mapa do território brasileiro. Destaque para pontilhado branco que indica o caminho do equador magnético.



Fonte: RBMC, (2019).

Por meio dos arquivos gerados pelos receptores GPS é possível obter dados brutos de navegação que podem ser utilizados para extrair informações sobre a ionosfera (SARDÓN; ZARRAOA, 1997).

A extração do TEC a partir de arquivos de navegação tipo RINEX, do receptor GPS foi feita utilizando a ferramenta computacional (*software*) chamada “GPS-TEC program”, desenvolvida por Gopi K. Seemala (SEEMALA, 2019). O “GPS-TEC program” é capaz de gerar seis diferentes tipos de arquivos de saída, para os dados de navegação que são utilizados como parâmetros de entrada, mas para o objetivo deste trabalho, utilizamos apenas dois destes arquivos de saída, que são:

- Arquivo de extensão “.STD”: Este arquivo contém a média do VTEC medido pelos satélites visíveis pelo receptor GPS correspondente, em um determinado horário do dia. A resolução dos dados neste arquivo é de um minuto, portanto 1440 medições em um dia com 24 horas (SEEMALA, 2019).
- Arquivo de extensão “.CMN”: Este arquivo contém a medição do TEC e do VTEC para cada satélite visível pelo receptor GPS correspondente, em um determinado horário do dia. Neste arquivo também é possível encontrar informações específicas de cada satélite, como: identificação, elevação, azimute e localização. Neste arquivo a resolução dos dados é da ordem de segundos, durante o período no qual o satélite está “visível” ao receptor (SEEMALA, 2019).

Para cada dia do ano em que o receptor GPS esteja ativo, e exista arquivos de navegação, o “*GPS-TEC program*” é capaz de gerar um par de arquivos **STD** e **CMN**. Assim, para o período de 2 anos (2015 e 2018) obteve-se cerca de 27.740 arquivos **STD** e **CMN** destinados a análises deste trabalho. Devido a grande quantidade de dados, fez-se necessária a construção de ferramentas computacionais que auxiliassem a organização e manipulação destes, com o objetivo de diminuir o tempo gasto nestes tipos de atividades e aumentar o tempo disponível para análise de dados e obtenção de resultados. Sem essas ferramentas computacionais não seria viável realizar este estudo em um espaço de tempo razoável.

As ferramentas computacionais criadas pelo autor para este estudo foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação Python, e são dedicadas a finalidades específicas, como:

- Descompactação de arquivos com extensão “.zip”, que contém os arquivos de navegação, tipo RINEX, com extensão “.o”, “.m”, “.n”, “.g”, obtidos a partir dos receptores GPS.
- No caso de arquivos de navegação gerados a partir de 2018, descompactar o arquivo de extensão “.d” no formato HATANAKA.
- Preparação do arquivo de navegação com extensão “.o” para utilização do programa *GPS-TEC program*.

- Organização dos dados de TEC para apresentação de gráficos de contorno de TEC, minuto a minuto, e assim possibilitar a visualização da variação temporal do TEC em formato de vídeo.
- Realização de operações aritméticas utilizando os dados de TEC, contido nos arquivos de tipo STD e CMN, obtidos por meio do programa *GPS-TEC program*.
- Automatização da coleta de índices de *Disturbance Storm Time (Dst)* diretamente da página eletrônica *DstIndex*, administrado pela Universidade de Kyoto, no Japão.

A popularidade da linguagem de programação Python no ambiente acadêmico, científico e profissional, torna possível a manutenção e evolução a longo prazo destas ferramentas, além de permitir a integração destas ferramentas em outros sistemas também desenvolvidos em Python (Stack Overflow - Developer Survey Results, 2019).

Durante períodos geomagneticamente perturbados o TEC pode apresentar valores que, normalmente, não são apresentados em períodos geomagneticamente calmos, isso acontece devido a uma série de fenômenos, físicos e químicos, que afetam diretamente a ionosfera e o conteúdo eletrônico total (ABREU, 2007; CHAPMAN e S., 1963; KELLEY, 2009). Por esse motivo, para o cálculo das médias de TEC, este trabalho utilizou somente dias considerados geomagneticamente calmos para os anos de 2015 e 2018, considerou-se dias geomagneticamente calmos aqueles cujo índice Dst não foi menor que -30 nT, nessas condições podemos considerar que a variação do TEC foi influenciada apenas pelas condições normais do clima espacial.

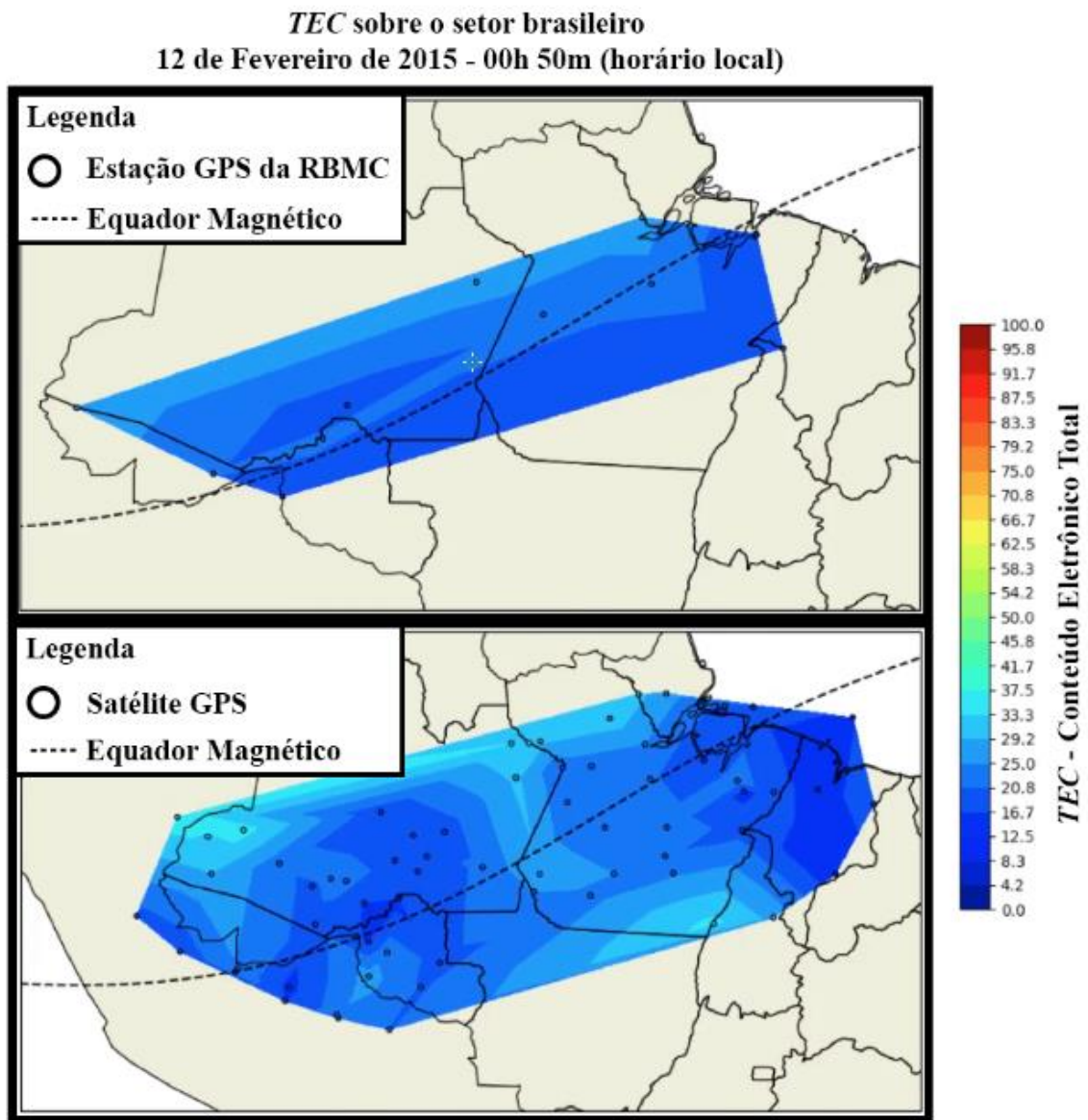
Inicialmente decidiu-se observar a variação do TEC na região do equador magnético utilizando apenas os arquivos do tipo STD para cada um dos receptores GPS selecionados, contudo os resultados desta abordagem não foram satisfatórios devido a pouca quantidade e grande distância entre os receptores ativos na região e período determinado. Devido a essas condições, os gráficos de contorno construídos utilizando os arquivos do tipo STD não apresentavam resolução suficiente sobre a variação do TEC entre grandes distâncias, o que não permitiu observar nada além da variação diária do TEC com o nascer e pôr do Sol.

A Figura 21 (painel superior) mostra o gráfico de contorno construído, para as 00:50 LT do dia 12 de fevereiro de 2015, utilizando somente os arquivos **STD** gerados pelas estações GPS-TEC ativas naquela data, onde os círculos de borda na cor preta representam as estações

GPS-TEC (pontos de medição). É possível observar que a grande distância geográfica entre as estações GPS-TEC prejudica a resolução do gráfico de contorno apresentado tornando impossível a visualização da evolução do *TEC* de forma detalhada, principalmente na região que abrange os espaços entre as estações. A Figura 21 (painel inferior), por sua vez, mostra o gráfico de contorno construído, para o mesmo dia e horário, utilizando somente os arquivos **CMN** gerados pelas estações GPS-TEC ativas naquela data, onde os círculos com borda na cor preta representam cada um dos satélites GPS visíveis, para cada uma das estações GPS-TEC, naquele horário. É possível notar o aumento na quantidade de pontos de medição, melhorando muito a resolução do gráfico de contorno, o que permite visualizar a evolução do *TEC* nas regiões que estão no espaço entre as estações GPS-TEC.

Chegamos à conclusão de que o problema em utilizar os arquivos **STD** para este trabalho em específico é a grande distância entre os receptores GPS na região do equador magnético no território brasileiro. Para resolver este problema, decidiu-se então utilizar os arquivos **CMN** que contém as medições de *TEC* para cada um dos satélites visíveis para o receptor GPS correspondente, dessa forma é possível preencher as regiões vazias entre os receptores com vários pontos de medição de *TEC*.

Figura 21 - Exemplo da apresentação dos valores de TEC, obtidos usando os arquivos STD (painel superior), e os arquivos CMN (painel inferior), para os receptores selecionados neste trabalho.



Fonte: O autor.

Utilizando as ferramentas computacionais citadas anteriormente, foi possível analisar os arquivos CMN e filtrar os satélites pelo valor da sua elevação em relação ao receptor GPS, quanto maior a elevação do satélite melhor é a precisão do valor de VTEC medido pelo receptor GPS, uma vez que o sinal eletromagnético percorre um caminho menor através da ionosfera, e portanto sofre menos interferência, assim, selecionou-se satélites que encontravam-se com elevação de 30° acima da linha do horizonte, em relação ao receptor GPS. Trinta graus de elevação em relação ao horizonte são dez graus acima do critério utilizado pelo “GPS-TEC

program” para selecionar os satélites que são usados para calcular os valores de TEC que são gravados nos arquivos do tipo STD gerados por ele, por este motivo acredita-se que este valor de elevação é suficiente para este trabalho (SEEMALA, 2019).

Na Figura 21 (painel inferior) pode-se perceber que existe um número grande de satélites no mapa, o que garante uma boa cobertura de dados para a região estudada, contudo, uma vez que os satélites estão em constante movimento, orbitando o globo terrestre, este tipo de análise pode favorecer o estudo da variação do TEC em uma escala diária de tempo. Espera-se que este tipo de visualização, através dos arquivos **CMN**, seja útil para análise de eventos específicos, como tempestades geomagnéticas ou fenômenos de escala de tempo menores que 24 horas.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é estudar a ionosfera na região do equador magnético em um período de meses, a fim de analisar a variação do TEC em diferentes estações do ano, e sob diferentes níveis de atividade solar, é necessário que os dados dos arquivos **CMN** sejam organizados de forma a permitir a análise em uma escala temporal maior que a diária.

Para resolver este problema, decidiu-se então obter a média mensal dos valores de TEC para todos os satélites que estivessem em um mesmo “quadrante”, em um mesmo horário, a fim de construir uma apresentação em gráfico de contorno, da média mensal do TEC para cada “quadrante” do mapa. Neste caso, define-se “quadrante” uma região de 1° de latitude geográfica por 1° de longitude geográfica na superfície do globo terrestre.

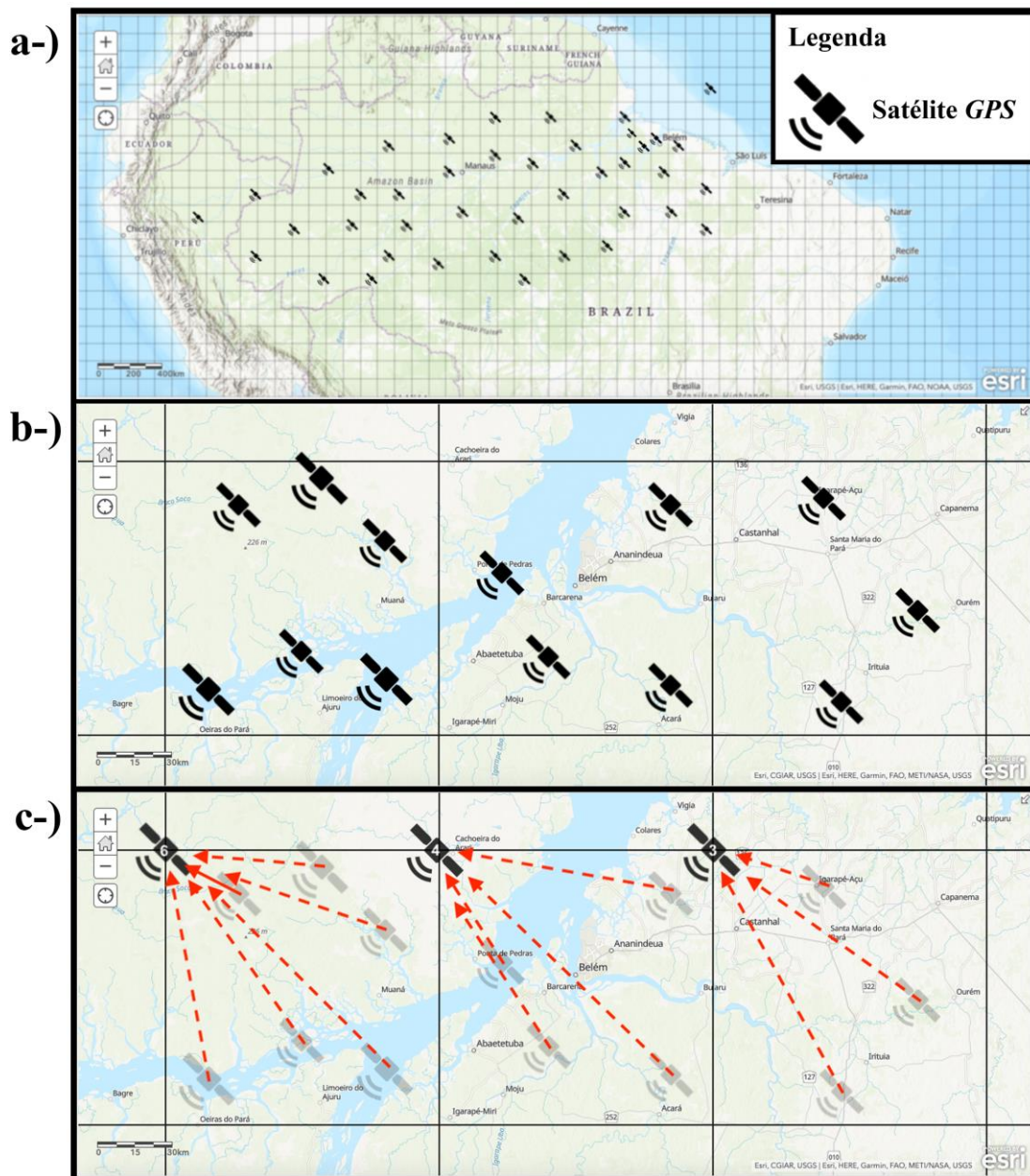
Para alcançar esse objetivo, foi desenvolvido um algoritmo, que faz parte das ferramentas computacionais citadas anteriormente, que agrupa os satélites dentro destes “quadrantes” e então calcula a média do valor de TEC para os satélites agrupados naquele horário, para todos os dias do mês nos quais os dados estejam disponíveis. Divididas em 2 partes e em 3 seções cada uma, as Figuras (Figura 22 e Figura 23) possuem a finalidade de auxiliar a compreensão do funcionamento do algoritmo que fora desenvolvido para obter a média das medições dos satélites visíveis pelos receptores.

Inicialmente, ao analisar os arquivos **CMN** das estações GPS-TEC selecionadas, cada um dos satélites visíveis pelas estações GPS-TEC estará disposto conforme suas localizações naquele dado momento, o que fornece o valor do TEC para aquele determinado ponto no espaço. A disposição dos satélites nessas condições iniciais podem ser verificadas na construção do gráfico de contorno na Figura 21(b), e são representadas de maneira ilustrativa na Figura

22(a). Na Figura 22(a) nota-se as delimitações dos quadrantes de 1° de latitude geográfica por 1° de longitude geográfica no mapa formadas pelas linhas na cor cinza claro e a existência de alguns satélites posicionados além das fronteiras geográficas do Brasil, isso era esperado devido ao raio de abrangência da área correspondente aos 30° de elevação do satélite acima da linha do horizonte. A Figura 22(b) mostra, também de maneira ilustrativa, a possível disposição de alguns satélites dentro dos quadrantes delimitados, nota-se que em um dado momento mais de um satélite está localizado dentro de um mesmo quadrante, esta configuração permite que as medições dos satélites que estão dentro de um mesmo quadrante sejam agrupadas e a fim de obter um valor específico que corresponda ao valor médio do TEC naquele dado momento para aquele quadrante. A Figura 22(b) mostra que os satélites são agrupados por meio da aproximação ou arredondamento, para baixo, do valor que representa as casas decimais da latitude e longitude geográfica do satélite naquele dado momento, agrupando os satélites na menor coordenada inteira mais próxima da sua coordenada atual. A Figura 23(a) mostra que a partir do agrupamento dos satélites calcula-se um único valor de TEC que representa a média de todos os valores de TEC medidos pelos satélites daquele quadrante. Após esta etapa, a fim de melhorar o resultado final apresentado em gráfico de contorno, a média calculada do TEC é vinculada ao centro do quadrante correspondente, como ilustrado da Figura 23(b). Com esta organização o resultado final, ilustrado na Figura 23(c), é a disposição alinhada das medições sobre o mapa do Brasil, o que oferece uma boa cobertura de área para os gráficos de contorno construídos neste trabalho.

Figura 22 - Parte 1 da representação visual do algoritmo usado para unificar as medições dos satélites GPS dentro da região deste estudo. (a) satélites dispostos sobre o mapa dividido em quadrantes de 1° de latitude por 1° de longitude geográfica, (b) detalhe dos satélites dentro do quadrante, (c) agrupamento dos satélites na coordenada, sem os décimos, correspondente.

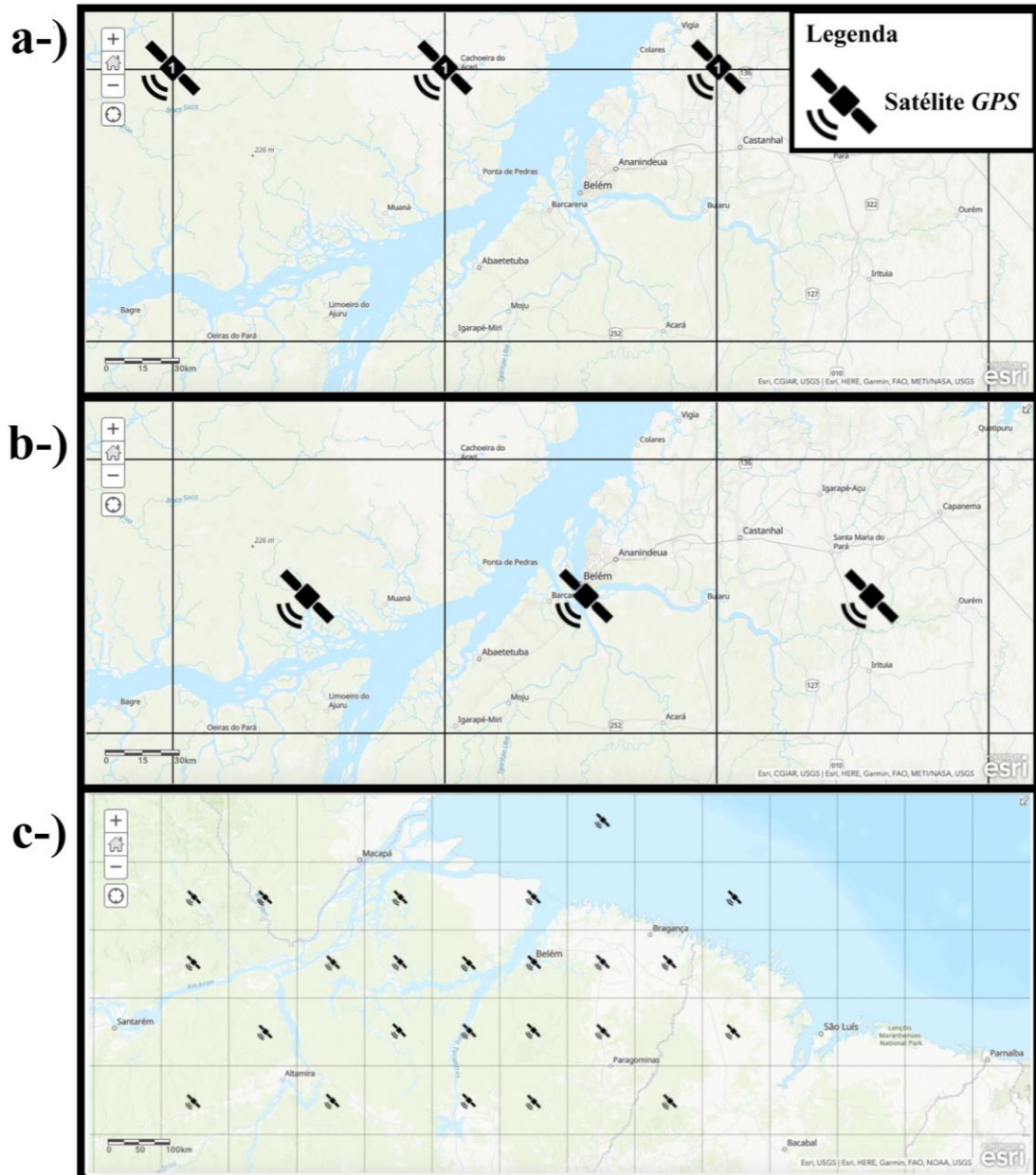
Representação visual do algoritmo usado para análise de dados de *VTEC*



Fonte: o Autor.

Figura 23 - Parte 2 da representação visual do algoritmo usado para unificar as medições dos satélites GPS dentro da região deste estudo. (a) todas as medições dentro de um quadrante são representadas por uma única média, (b) a média das medições então é considerada com uma medição feita no centro do quadrante, (c) visão geral de todas as médias já calculadas e dispostas no mapa na região de interesse.

Representação visual do algoritmo usado para análise de dados de *VTEC*

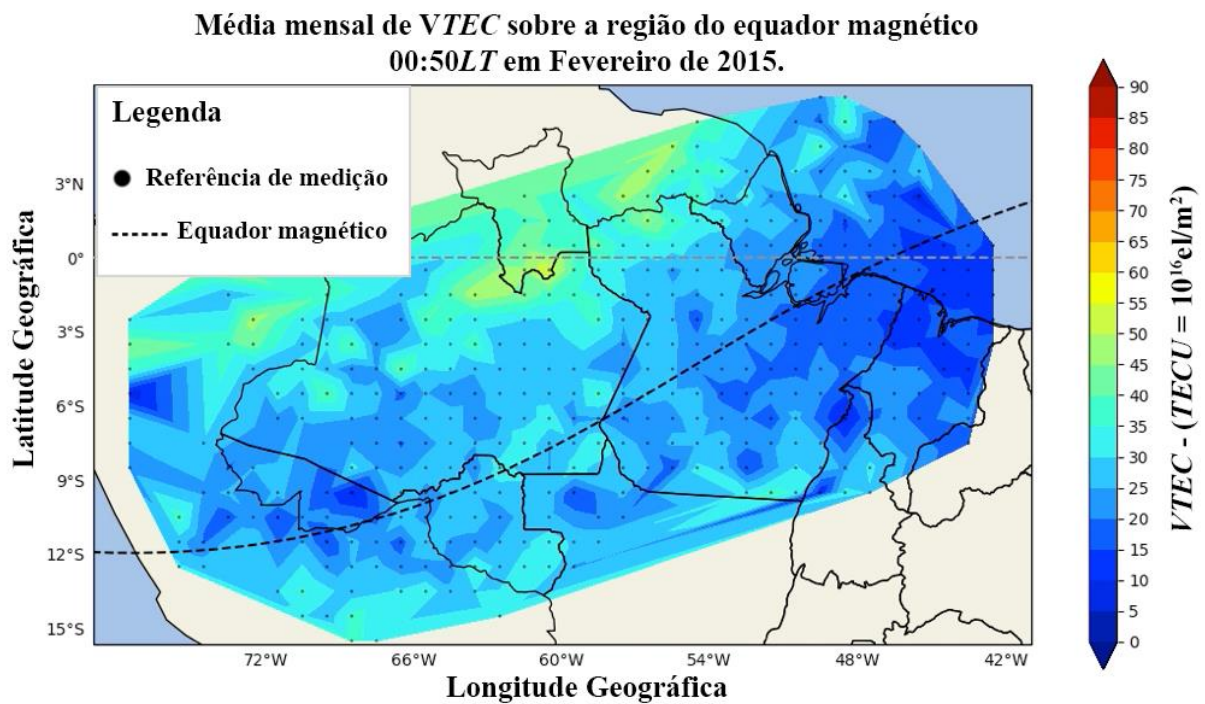


Fonte: O Autor.

A partir desta solução foi possível obter a média mensal da variação do TEC para todos os meses dos anos de 2015 e 2018 e assim viabilizar a obtenção de informações mais

significativas sobre a variação do TEC na região do equador magnético, como mostrado na Figura 24. A Figura 24 apresenta a média do TEC registrada em fevereiro de 2015 para o horário de 00:50 LT, é possível perceber o padrão alinhado dos pontos de medição ilustrado na Figura 23(c), cada ponto na cor preta representa uma média de TEC, que foi mantida como forma de referência visual.

Figura 24 - Exemplo da apresentação da média mensal do TEC, obtidos usando os arquivos CMN, para os satélites selecionados para cada receptor GPS usado neste trabalho.



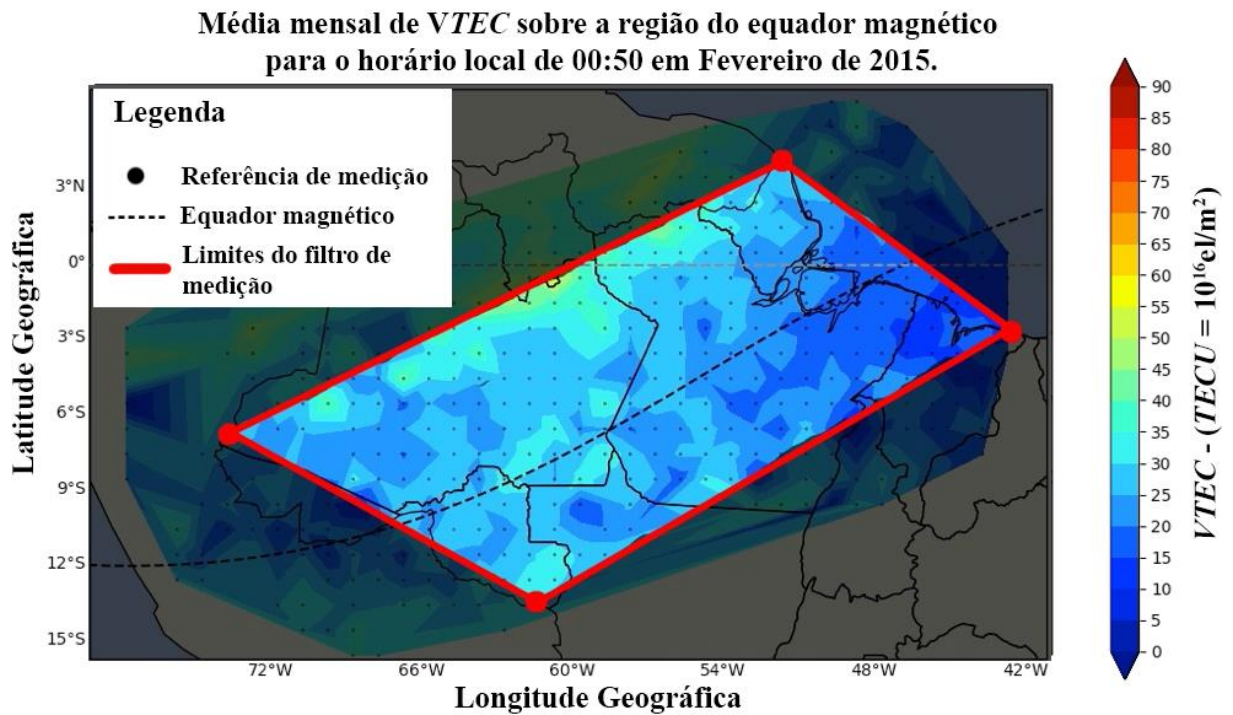
Fonte: O Autor.

Apesar de os receptores GPS serem limitados a $\pm 5^\circ$ de latitude magnética, nota-se que graças ao uso dos dados de satélite é possível obter informações do TEC para além dessas distâncias, como mostrado na Figura 24. Graças a isso é possível observar as variações do TEC em torno do equador magnético, e inclusive além do território brasileiro.

Contudo, para analisar mais especificamente a região sob o equador magnético, e permitir a visualização de todos os dados em um único gráfico de linha que represente a média mensal minuto a minuto, para o período de 24 horas, do TEC na região do equador magnético, decidiu-se aplicar um filtro espacial para selecionar somente satélites que estivessem “dentro” do território brasileiro, e assim, obter um único valor que represente a média mensal do TEC,

em um determinado horário, para toda a área do equador magnético que se estende sobre o setor brasileiro. A Figura 25 apresenta a localização estimada do filtro espacial que foi aplicado sobre os dados de média mensal do TEC para os grupos de satélites.

Figura 25 - Demonstração da região selecionada para o filtro espacial dos satélites que estão dentro do limite de $\pm 5^\circ$ de latitude magnética, para os receptores GPS selecionados.

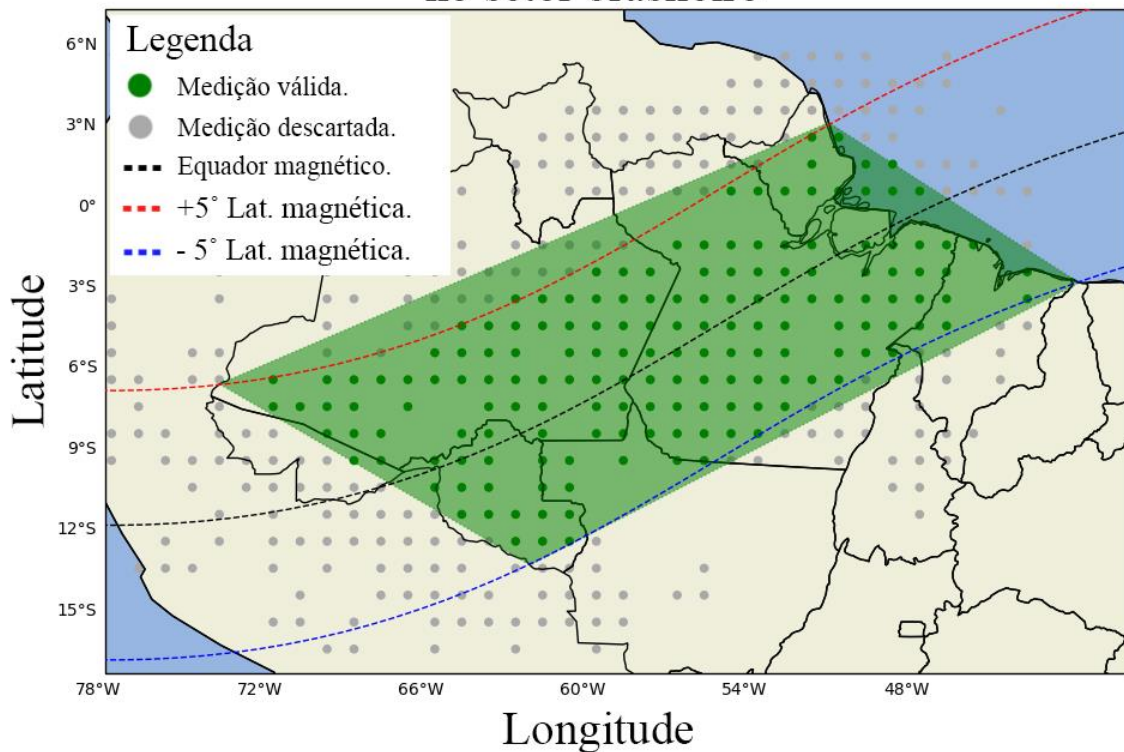


Fonte: O autor.

A Figura 26 mostra a aplicação final do filtro desenvolvido em cima dos dados reais dos arquivos CMN, os pontos na cor verde representam as médias cujas medições estão dentro do filtro espacial e foram contabilizadas para a confecção dos gráficos apresentados no seção de resultados deste trabalho. Observe que, apesar de abranger uma região retangular, o filtro respeita também os limites norte e sul da linha que delimita o equador magnético, desta forma a região do equador está bem definida neste trabalho.

Figura 26 – Aplicação final do filtro espacial (área em verde) na região do equador magnético (linha pontilhada preta), incluindo os limites superior (linha tracejada vermelha) e inferior (linha tracejada azul) na região do equador magnético que compreende $\pm 5^\circ$ de latitude magnética.

Filtro de medições VTEC sobre o equador magnético no setor brasileiro

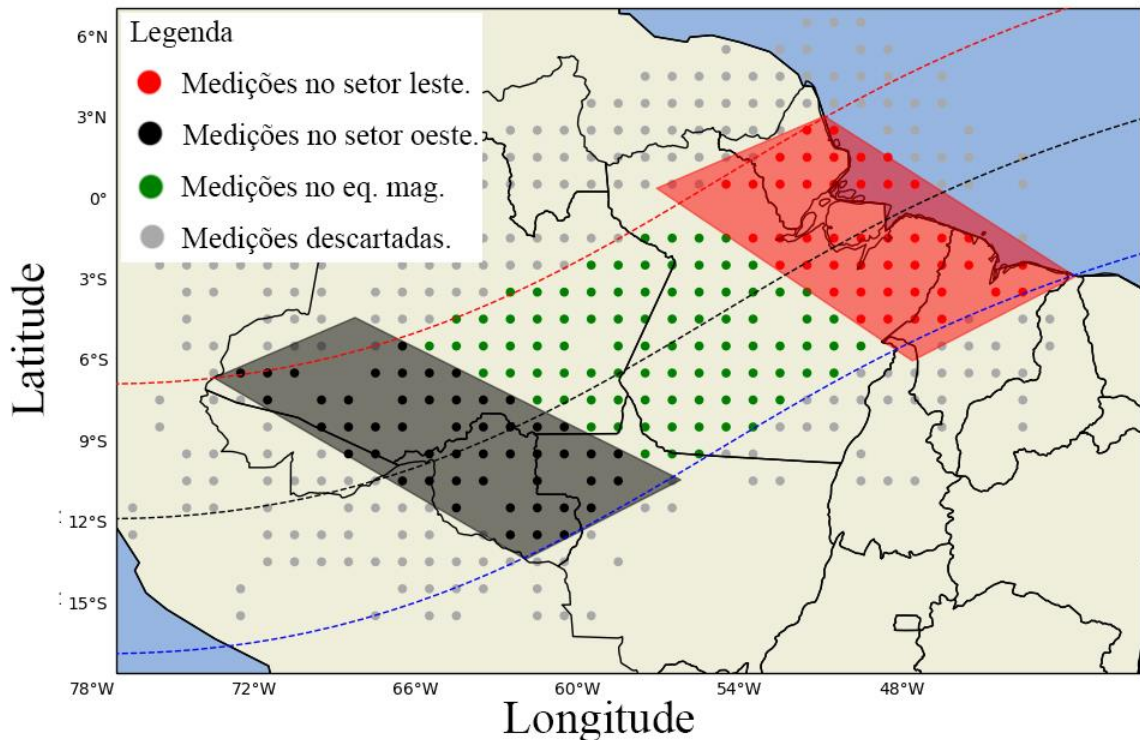


Fonte: O Autor.

Além do filtro apresentado na Figura 26, implementou-se um segundo filtro cujo objetivo é permitir a comparação das medições de satélite levando em consideração a posição longitudinal de cada medição, ainda dentro da faixa do limite latitudinal do equador magnético. A Figura 27 mostra a disposição do segundo filtro implementado que permite a separação das medições de TEC via satélite em dois setores que, neste trabalho, são denominadas o setor leste (em vermelho) e o setor oeste (em preto). O filtro garante que somente as medições que foram feitas dentro de ambos os setores e na região equatorial sejam contabilizadas, respeitando ambos os limites longitudinais e os limites latitudinais do equador magnético delimitado por este trabalho.

Figura 27 - Delimitação dos setores leste (vermelho) e oeste (preto) que correspondem aos filtros de medições de TEC via satélite nestas regiões do equador magnético sobre o setor brasileiro.

Filtro de medições VTEC sobre o equador magnético nos setores Leste e Oeste no setor brasileiro



Fonte: O Autor.

Obter informações sobre a variabilidade do TEC em diferentes longitudes do equador magnético mostra-se interessante uma vez que é conhecida a existência de uma estrutura de quatro picos de densidade de íons distribuídas longitudinalmente sobre o equador magnético que são atribuídas à deriva vertical para cima de marés não propagantes que modulam a região E, também, ao campo elétrico zonal da camada F. Nogueira *et al.* (2013), aponta que estes picos de densidade de íons são observados no sudeste da África, Índia e sudeste da Ásia, no Pacífico central e no oeste da América do Sul, durante o dia, próximo ao horário das 17:45 LT. Portanto, a análise longitudinal do TEC sobre o setor brasileiro, pode complementar estudos anteriores a cerca deste assunto.

Assim, em resumo, este trabalho oferece informação sobre o conteúdo eletrônico total da ionosfera sobre o equador magnético em três perspectivas diferentes, que são:

- Média mensal do *TEC*, minuto a minuto, para cada um dos quadrantes com dimensões de 1° latitude por 1° longitude limitados a região do equador magnético sobre o setor brasileiro. Esta perspectiva permite a análise simultânea da evolução do *TEC* de forma temporal e espacial sobre o mapa geográfico da região equatorial no setor brasileiro.
- Média mensal do *TEC*, minuto a minuto, de toda a região delimitada pelo filtro apresentado na Figura 26. Esta perspectiva permite a análise temporal da evolução média do *TEC* durante o mês.
- Média mensal do *TEC*, minuto a minuto, em cada um dos setores leste e oeste, dentro do limite da região equatorial delimitada pelo filtro apresentado na Figura 27. Esta perspectiva permite a análise temporal, comparativa, da evolução do *TEC* em regiões separadas longitudinalmente ao longo do equador magnético.

Os resultados obtidos utilizando essa abordagem serão apresentados na seção 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir da metodologia apresentada no Capítulo 3 para os anos de 2015 e 2018 (ver Figura 3 - Valores mensais do fluxo solar 10.7 cm, para o período do ciclo solar 24, registrados pela Sociedade Internacional de Energia Solar (ISES).). Além desta primeira análise, também se analisou um curto período geomagneticamente perturbado entre 27 e 28 de setembro de 2017, a fim de observar características comportamentais do plasma ionosférico que não são possíveis de serem observadas através da análise dos valores médios de TEC em longos períodos. Através da apresentação destes resultados será possível verificar a versatilidade da metodologia para a análise de dados nestas duas abordagens distintas.

4.1 Comparação da média mensal do VTEC para períodos de alta e baixa atividade solar

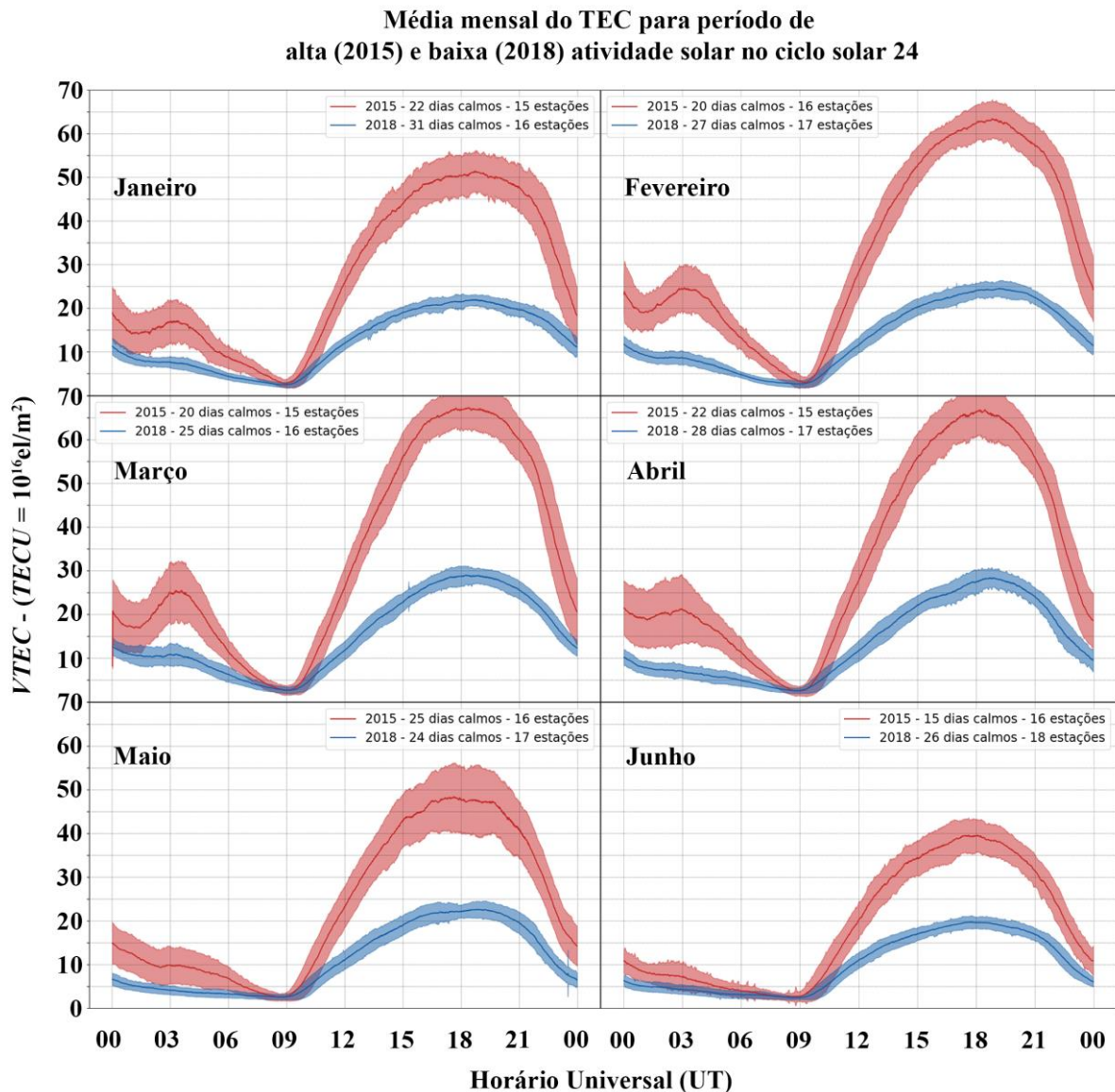
As Figuras Figura 28 e Figura 29 apresentam a comparação da média mensal, minuto a minuto, em um período de 24 horas, para os anos de 2015 (linha vermelha) e 2018 (linha azul). Note que as duas figuras mostram o desvio padrão intrínseco as medições, a legenda mostra o número de estações GPS-TEC selecionadas e o número de dias calmos ($Dst > -30$ nT) que compõe os valores das médias apresentadas. Nota-se que em todos os meses existe uma diferença média na densidade eletrônica para períodos de alta e baixa atividade solar. Em períodos de alta atividade solar o valor do TEC é aproximadamente o dobro do valor do TEC registrado em períodos de baixa atividade solar. O pico de densidade eletrônica em ambos os períodos de atividade solar alta e baixa acontece entre 17:00 UT e 19:00 UT, e a mínima densidade eletrônica ocorre exatamente no horário das 09:00 UT, logo antes do nascer do Sol.

O aumento do TEC médio durante períodos de alta atividade solar acontece devido ao aumento dos níveis de incidência de radiação ionizantes emitidas pelo Sol, como Raios-X, UV e EUV que podem ser monitorados através do índice F10,7 cm apresentado na Figura 3. No hemisfério sul as estações do ano são representadas por: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro). É possível notar que os maiores valores de TEC são obtidos nos meses correspondentes ao verão, quando o ângulo de incidência da luz solar é maior em relação ao

zênite, mantendo-se até o início do outono (Figura 28), nestes meses a média do TEC para o horário de pico atingiu valores acima de 50 TECUs.

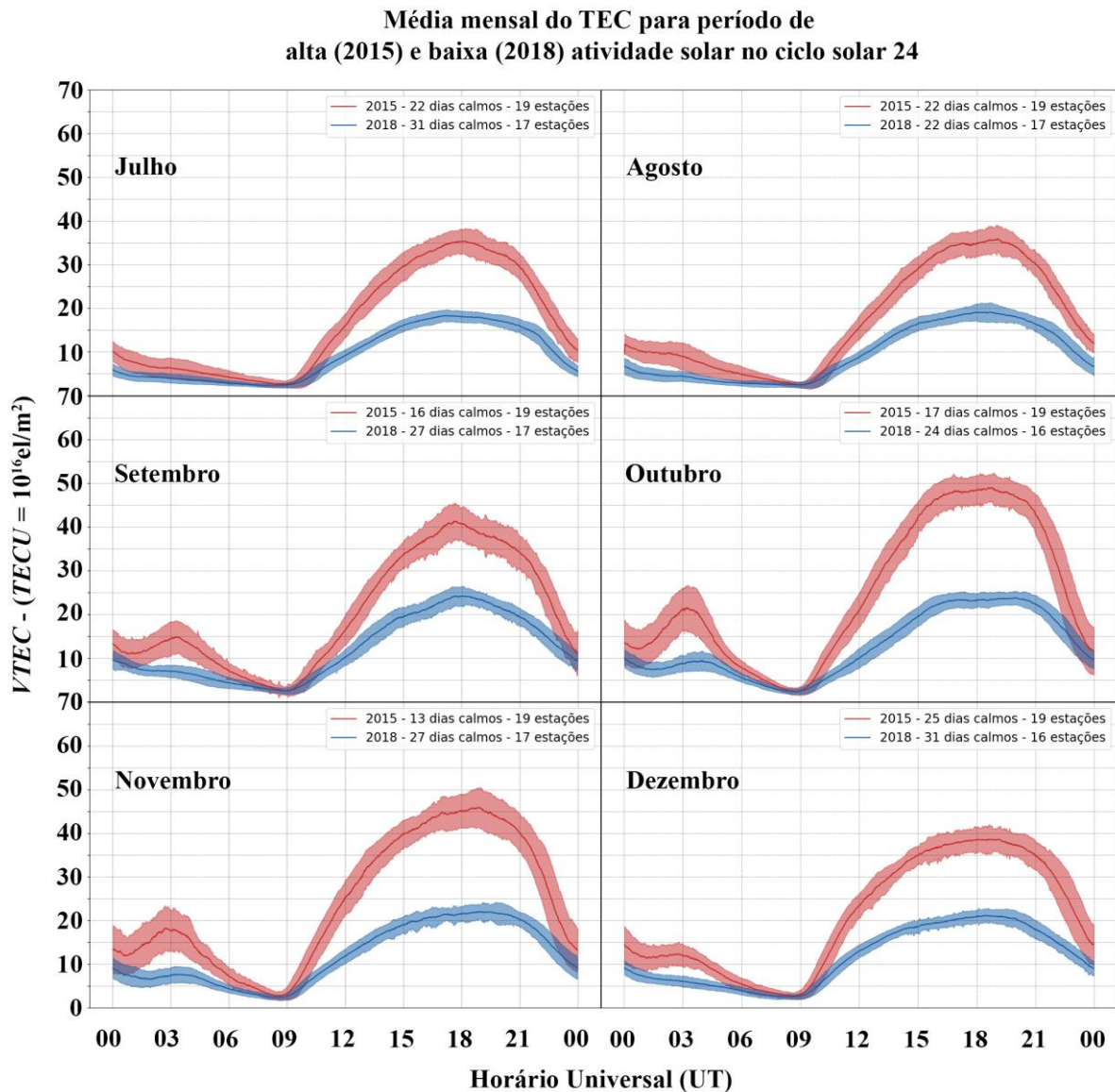
Durante o período de alta atividade solar, o valor de TEC apresenta um aumento próximo ao horário de 03:00 UT durante todo o ano, exceto nos meses de junho e julho. O maior valor registrado para o aumento do TEC próximo a meia noite foi de ~25 TECUs em março de 2015 (Figura 28). Balan *et al.* (1994), menciona que o aumento do TEC próximo a meia noite é mais frequente no hemisfério sul durante os meses de setembro e março para períodos de atividade solar moderada.

Figura 28 - Comparação da média mensal de VTEC para o primeiro semestre dos anos de 2015 (vermelho) e 2018 (azul), respectivamente alta e baixa atividade solar. Destaca-se o número de dias calmos e o número de estações analisadas para compor cada um dos gráficos apresentados na figura.



O aumento do TEC noturno pode ser desencadeado por alguns fatores conhecidos como a alta produção de elétrons livres durante o dia que pode levar a uma maior duração do processo de recombinação após o início da noite, além disso ventos termosféricos meridionais em direção ao equador podem atuar empurrando o plasma ionosférico, acumulado na região da crista da anomalia equatorial sul, para cima ao longo das linhas de campo magnético, este processo de subida mantém o plasma em altas altitudes aumentando o tempo de recombinação dos elétrons livres com a atmosfera neutra (SU; BAILEY; BALAN, 1995).

Figura 29 - Comparação da média mensal de VTEC para o segundo semestre dos anos de 2015 (vermelho) e 2018 (azul), respectivamente alta e baixa atividade solar. Destaca-se o número de dias calmos e o número de estações analisadas para compor cada um dos gráficos apresentados na figura.



É possível verificar que para os meses de outono e inverno, durante o período de atividade solar baixa, o TEC atinge um valor menor do que 5 TECUs próximo ao horário das 20:00 UT, enquanto para os meses de primavera e verão esse valor é atingido mais tarde por volta das 03:00 UT. Por sua vez, o valor mínimo de densidade eletrônica registrado em todos os meses estudados é por volta de 2,5 TECUs e ocorre às 09:00 UT em ambos os períodos de atividade solar e independente das estações do ano.

A partir da região destacada em verde na Figura 26, decidimos aplicar filtros nas medições de satélites nas extremidades leste e oeste do setor brasileiro ainda sob a linha do equador magnético, como é apresentado na Figura 27. A análise do TEC em setores longitudinalmente opostos é útil para verificar a evolução espacial do plasma ionosférico.

As Figuras Figura 30, Figura 31 e Figura 32, apresentam a média mensal do *TEC* nos setores leste (linha vermelha) e oeste (linha preta) para os meses de fevereiro - março, junho - julho, setembro - outubro de ambos os anos de 2015 e 2018 onde é possível observar que os valores de TEC são similares em ambos os setores durante o dia e diferem-se durante a noite onde é possível observar que nos meses de equinócio próximo ao horário de 03:00 UT o TEC é maior no setor oeste em comparação ao setor leste.

Figura 30 – Comparação da média mensal de *VTEC* nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do equinócio de março em ambos os anos de 2015 e 2018.

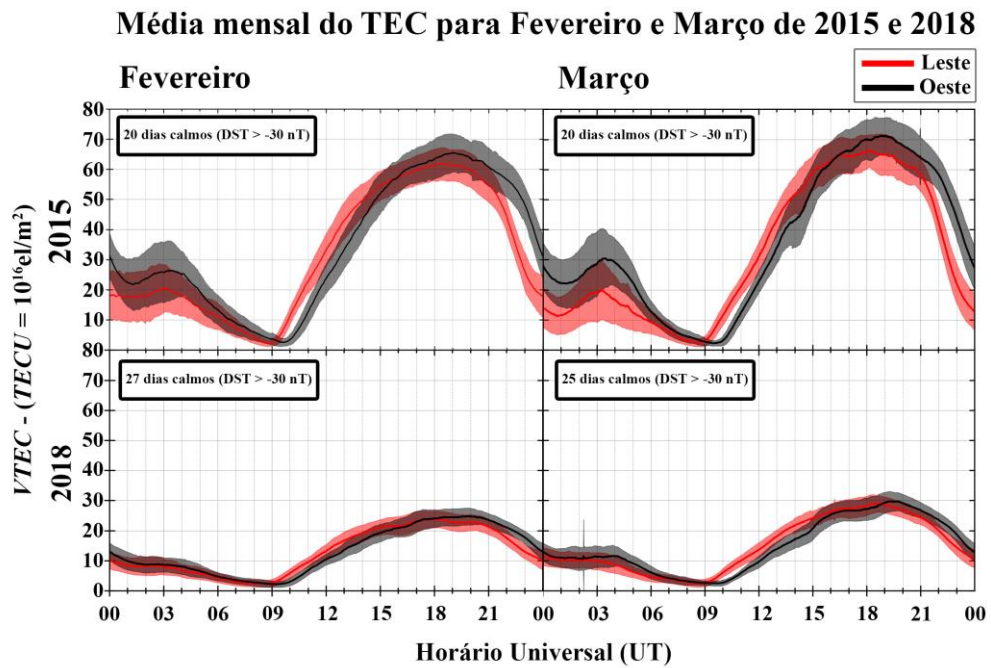


Figura 31 - Comparação da média mensal de *VTEC* nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do solstício de junho em ambos os anos de 2015 e 2018.

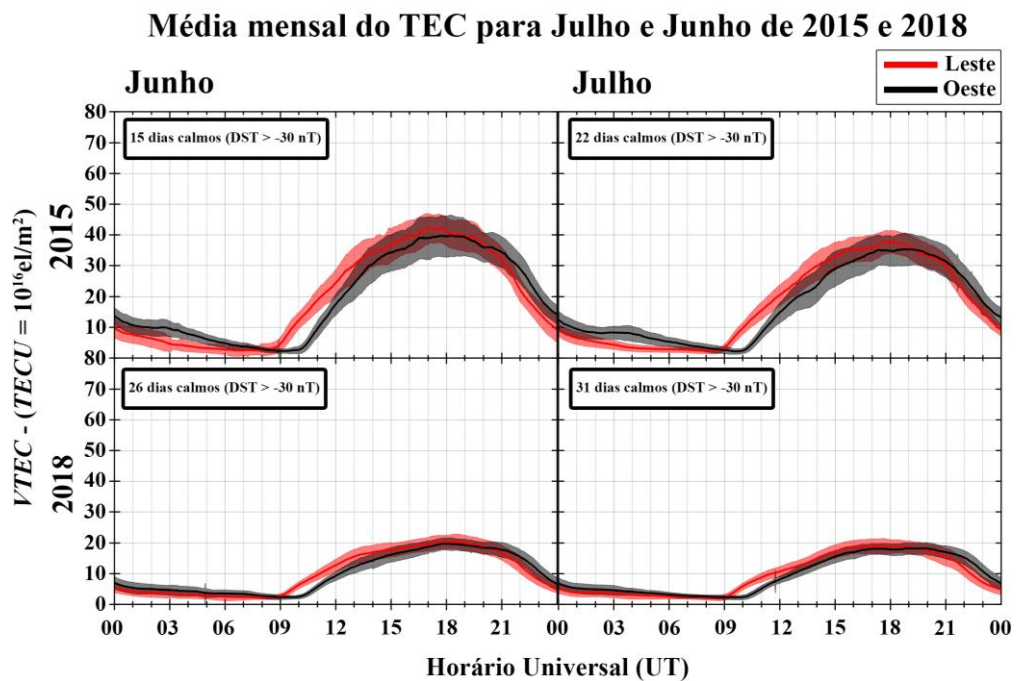
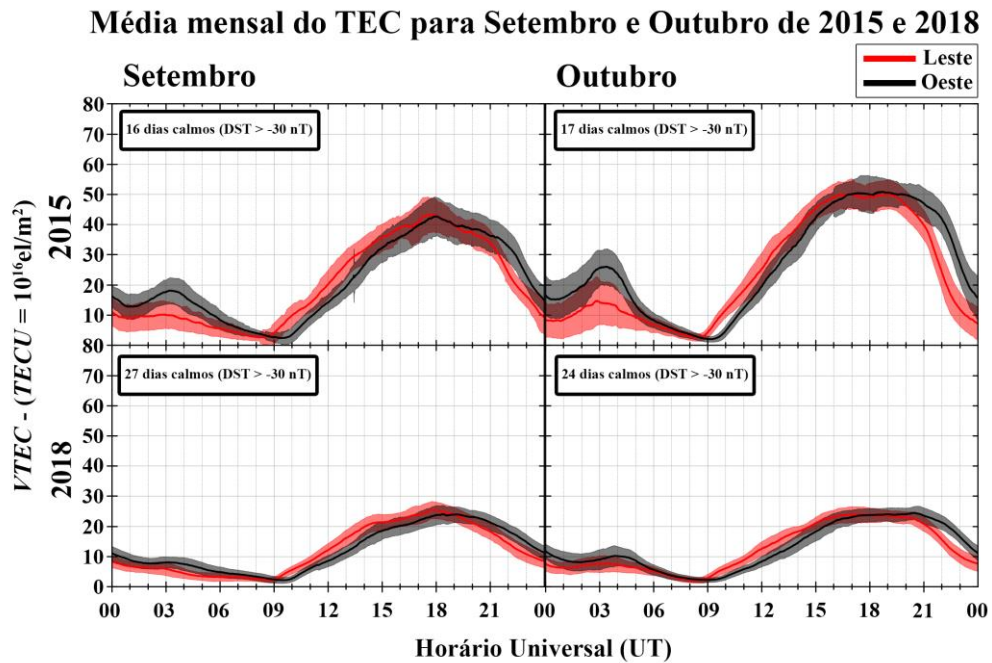


Figura 32 - Comparação da média mensal de VTEC nos setores leste (vermelho) e oeste (preto), ao longo do equador magnético, próximo ao período do equinócio de setembro em ambos os anos de 2015 e 2018.

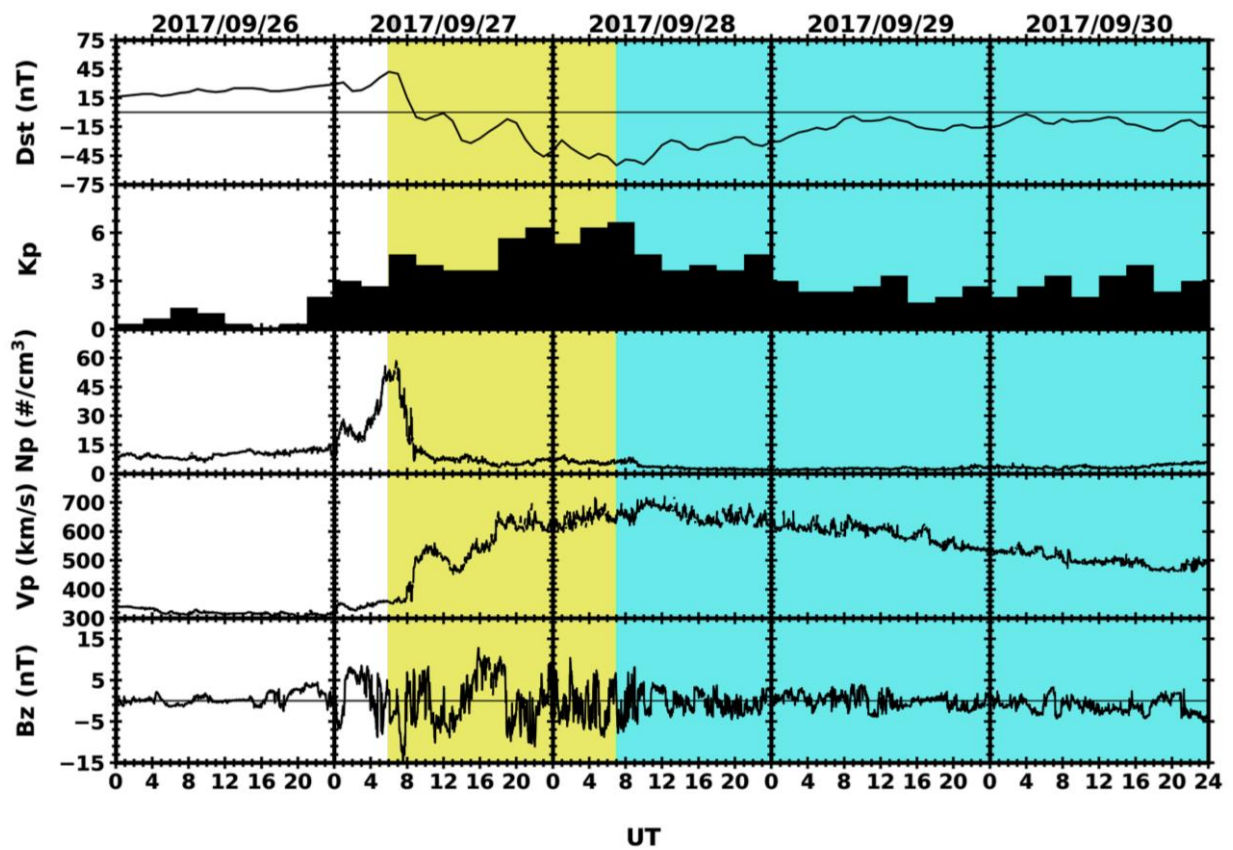


Os resultados apresentados até aqui mostraram que a utilização de arquivos CMN, obtidos através das estações GPS-TEC, podem trazer informações relevantes a cerca da dinâmica do TEC ionosférico, tanto do âmbito temporal quanto espacial. Contudo, a análise da média mensal do TEC não permite a observação de fenômenos ionosféricos que fazem parte da dinâmica do TEC em uma escala de tempo de dias ou horas. Aplicou-se então o método de obtenção do ROTI, definido na seção 2.8.8, sobre dados de TEC para um período geomagneticamente perturbado, que ocorreu entre 27 e 28 de setembro de 2017, a fim de verificar a viabilidade de obtenção de informações acerca da evolução de irregularidades sobre a região do equador magnético sob condições de tempestade geomagnética utilizando os dados disponíveis via arquivos CMN.

4.2 Análise do período geomagneticamente perturbado de 27 e 28 de setembro de 2017

A tempestade geomagnética de 27 e 28 de setembro de 2017 foi classificada como moderada, a Figura 33 mostra a variação dos índices geomagnéticos e interplanetários para aquele período destacando, em amarelo, a fase principal, e, em azul, a fase de recuperação desta tempestade. Durante a fase principal o índice Dst chegou a aproximadamente -50nT com fortes ondulações durante todo o período. A densidade de partículas carregadas N_p atinge o valor de $60\text{ partículas}/\text{cm}^3$ por volta das 6:00 UT do dia 27. A velocidade do vento solar cresce gradualmente durante toda a fase principal, partindo de 350 km/s atingindo a máxima de 700 km/s em um período de 27 horas. A orientação do campo interplanetário B_z sofre inversões de grande amplitude durante toda a fase principal que são refletidas nas variações do Dst.

Figura 33 - Índices geomagnéticos Dst, Kp e índices do meio interplanetário Vp e Bz. A fase principal e fase de recuperação são indicadas nas cores amarelo e azul respectivamente.

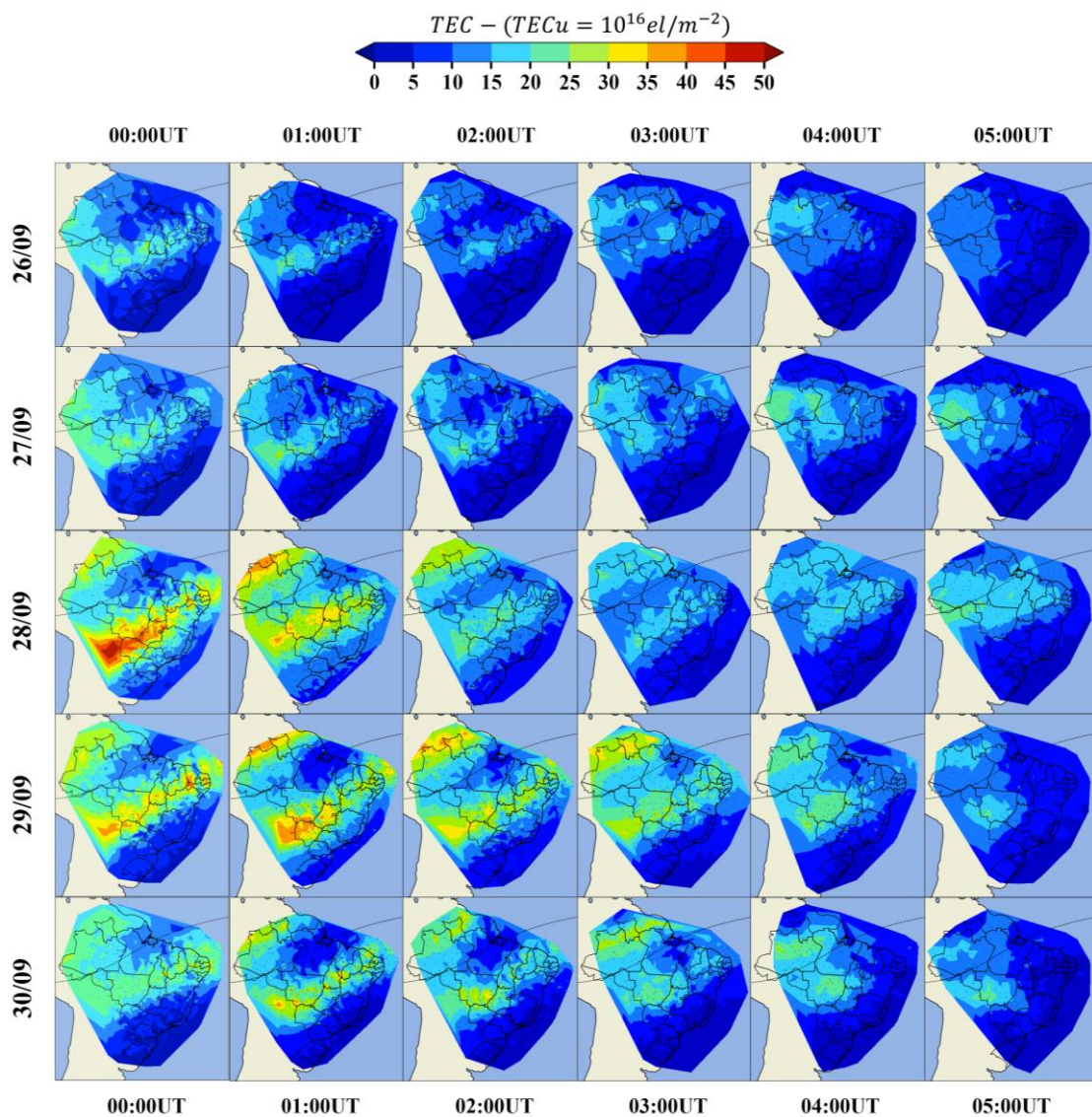


Fonte: O autor.

A Figura 34 mostra a evolução horária entre 00:00 UT e 05:00 UT do TEC para o período de 26 a 30 de setembro de 2017, que, respectivamente, correspondem ao dia anterior a tempestade (26), sua fase principal (27 e 28) e sua fase de recuperação (29 e 30). É possível

observar que, mesmo após o início da tempestade no dia 27, como mostra a Figura 33, o TEC sobre o setor brasileiro não sofre aumento significativo, isso porque o início da tempestade ocorreu as 06:00UT (~03:00 LT), noite sobre o setor brasileiro, a tempestade geomagnética ainda não havia se desenvolvido o suficiente para alterar o TEC naquela região, e o plasma ionosférico já estava em um estágio avançado do processo de recombinação com a atmosfera neutra.

Figura 34 - Variação horária de TEC entre 00:00UT e 05:00UT para os dias 26, 27, 28, 29 e 30 de setembro de 2017 sobre o setor brasileiro.



Fonte: O autor.

Durante a fase principal da tempestade, no dia 28, no horário das 00:00 UT, é possível observar uma alta concentração de TEC na crista sul da anomalia equatorial, na região oeste do setor brasileiro, com valores que estão entre 45 e 50 TECUs. Os valores de TEC permanecem elevados durante todo período da noite até o horário das 05:00 UT, onde ainda é possível observar o alto valor de TEC em comparação ao mesmo horário para os demais dias.

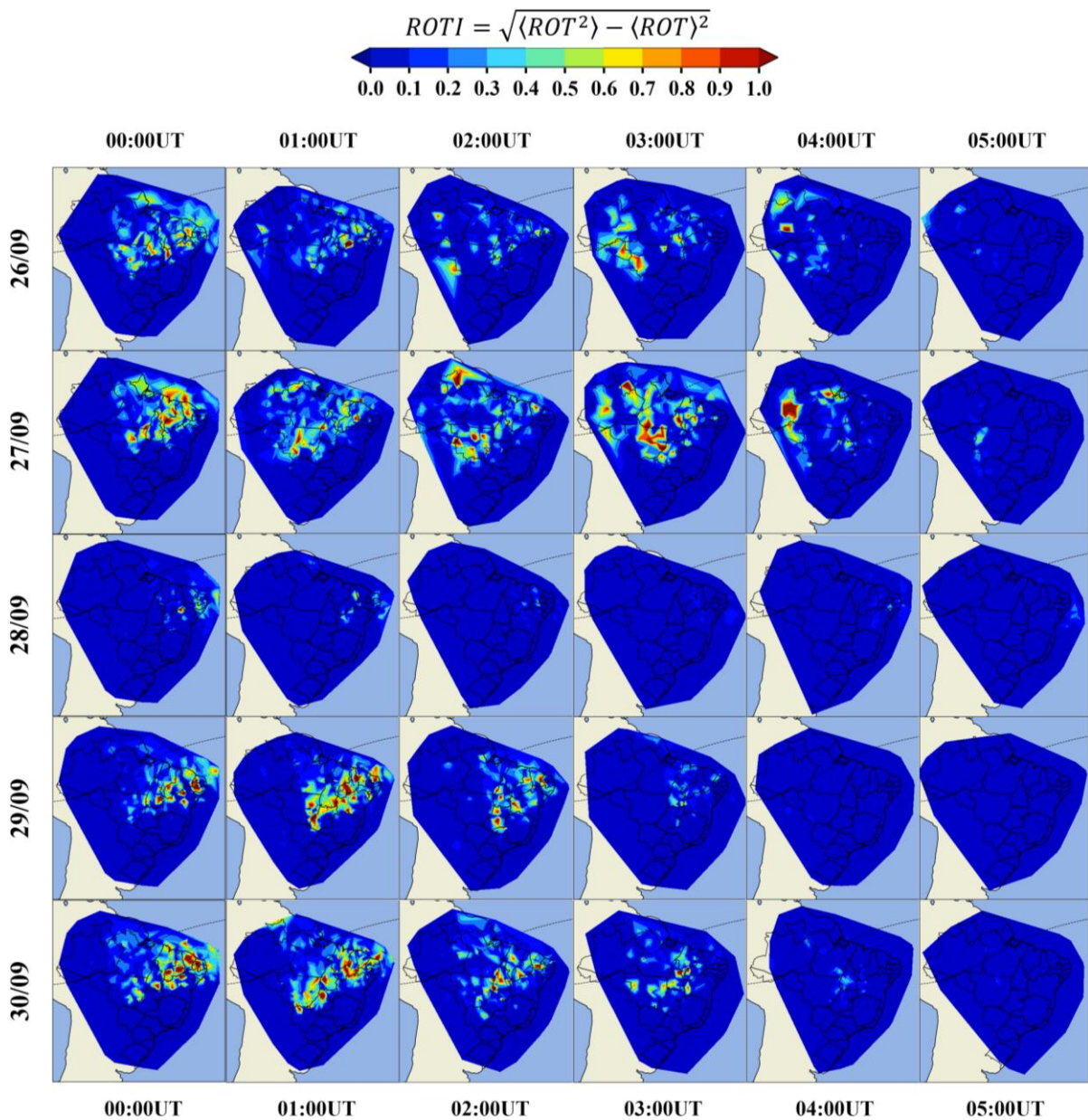
Shinbori et al. (2020), aponta que, durante o período diurno do dia 27, a ação de um campo elétrico local, na região de médias e baixas latitudes, elevou a ionosfera para altas altitudes onde a taxa de recombinação do plasma é menor, este movimento do plasma associado a alta produção de TEC em baixas altitudes durante o dia favoreceu o fortalecimento do fenômeno de EIA durante o dia 27 e contribuiu para a permanência de altos valores de TEC até próximo ao amanhecer na região do equador magnético. Seu estudo mostra, também, que o plasma apresentou uma deriva vertical negativa sobre a estação de ionossonda localizada em Jicamarca – Peru (dip latitude $-2,32^\circ$, $LT = UT - 04:00$) durante o período de uma hora entre os horários de 03:00 UT e 04:00 UT do dia 28, associado ao campo magnético interplanetário orientado na direção sul, ao aumento do índice AE e aos mínimos valores de Dst deste período perturbado. Na Figura 34 é possível observar que ocorre a diminuição do TEC no horário das 03:00 UT (00:00 LT) sobre o equador magnético, é provável que este fenômeno possa ter ocorrido devido a um campo elétrico na direção oeste, induzido a partir dos fatores descritos anteriormente por Shinbori et al. (2020), que causaram a deriva vertical para baixo do plasma ao longo das linhas de campo magnético aumentando o TEC em médias latitudes durante esse intervalo de tempo, uma vez que é notável a maior concentração de TEC sobre o equador magnético durante os dias anteriores e posteriores ao dia 28 neste mesmo horário.

Durante a fase de recuperação da tempestade, a partir do dia 29 até o dia 30, é possível observar a manutenção dos altos valores de TEC em ambas as cristas norte e sul da anomalia equatorial. Nestes dias o TEC manteve-se elevado durante boa parte da noite até o horário das 04:00 UT e, deste horário em diante, os valores de TEC voltam a ser mínimos, iniciando pela região leste do setor brasileiro, até o amanhecer.

A Figura 35, apresenta a visualização do ROTI sobre o setor brasileiro para o mesmo período apresentado na Figura 34, nela é claramente visível a grande diminuição, quase ausência, de irregularidades ionosféricas entre o período 00:00 UT e 05:00 UT no dia 28, enquanto é possível observar irregularidades nos demais dias deste período.

A evolução espacial e temporal do aumento da taxa de variação do TEC em relação a dias calmos, registrada por Shinbori et al. (2020), começa a acontecer a partir das 20:00 UT do dia 27 em altas latitudes no hemisfério norte e evoluiu em direção a médias e baixas latitudes, através do continente americano, chegando ao equador magnético as 00:00 UT, coincidindo com os horários de ausência de irregularidades ionosféricas sobre o setor brasileiro observadas através do ROTI na Figura 35.

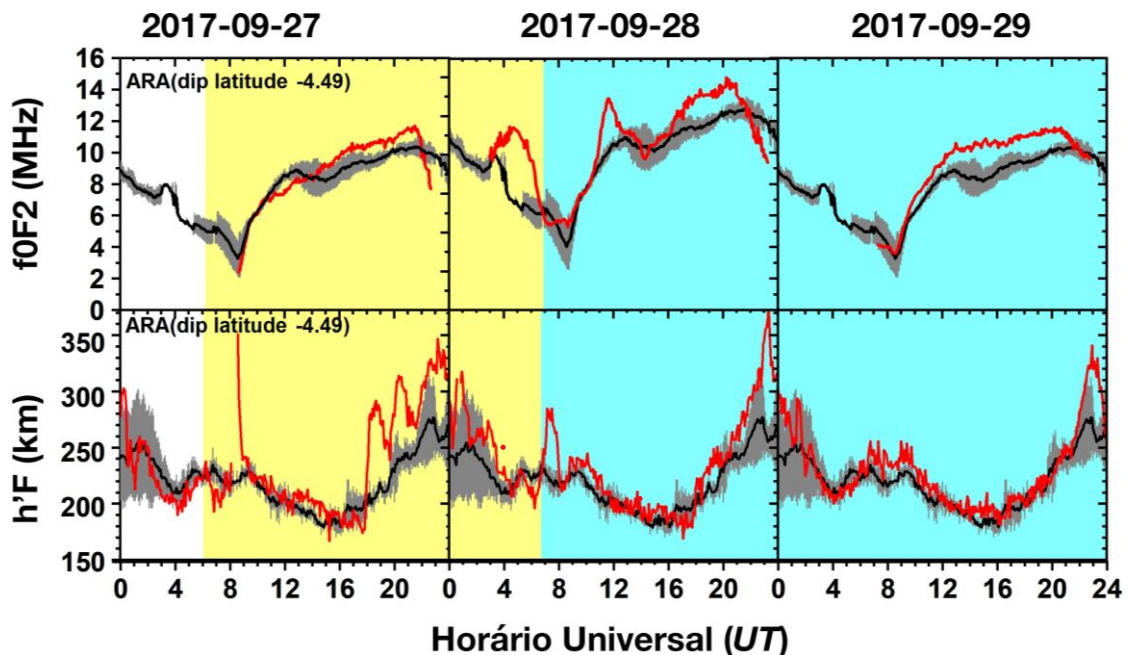
Figura 35 - Variação horária de ROTI entre 00:00 UT e 05:00 UT para os dias 26, 27, 28, 29 e 30 de setembro de 2017 sobre o setor brasileiro.



Fonte: O autor.

A Figura 36 mostra a variação da altitude da camada F ($h'F$) e da frequência crítica da camada F2 ($foF2$), para os dias 27, 28 e 29 de setembro, em comparação aos mesmos índices para cinco dias geomagneticamente calmos sobre a estação de Araguatins (ARA), localizada próxima ao equador magnético (dip latitude: $-4,49^\circ$) no setor leste do setor brasileiro. É possível observar que sobre Araguatins a camada F começa a sofrer uma forte variação de altitude a partir das 18:00 UT, quando parte de 180 km de altitude para aproximadamente 300 km de altitude dentro de um intervalo de poucos minutos, atingindo o maior valor, para o dia 27, próximo ao horário de 23:00 UT, o que contribui fortemente para a manutenção do plasma ionosférico em altas quantidades até próximo ao horário do amanhecer como mostra a Figura 34. É importante notar que houve, também, um aumento considerável na $foF2$ para o horário entre 02:00 UT e 06:00 UT, em relação ao mesmo valor para dias calmos, além de um segundo e terceiro pico, também de $foF2$, no dia 28 entre 10:00 UT - 13:00 UT e 16:00 UT - 22:00 UT respectivamente. Também nota-se uma forte, porém rápida elevação da camada F entre 21:00 UT, do dia 28, e 01:00 UT, do dia 29, até uma altitude de aproximadamente 370 km durante a fase de recuperação da tempestade, o que, também pode explicar a manutenção dos altos valores de TEC obtidos nas noites seguintes a fase principal.

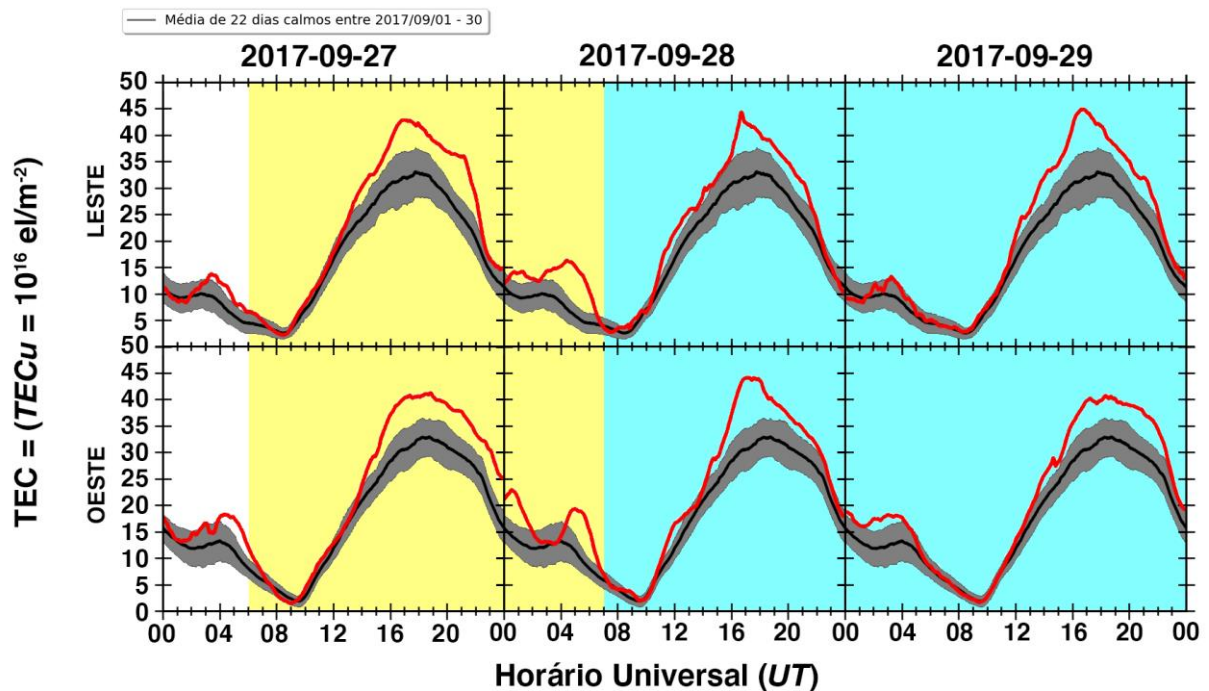
Figura 36 – Altitude da camada F ($h'F$) e frequência crítica da camada F2 ($foF2$) registrados através de ionossonda pela estação de Araguatins (ARA dip latitude: -4.49°) para os dias 27, 28 e 29 de setembro de 2017. Em destaque as fases principais (em amarelo) e de recuperação (em azul claro) e a média de 5 dias calmos (em preto) para o mesmo mês.



Fonte: O autor.

A Figura 37 apresenta a variação temporal do TEC minuto a minuto para os dias 27, 28 e 29, nos setores leste e oeste (em vermelho) definidos na Figura 27, sobre a região do equador magnético, em comparação com a média de TEC (em preto) para 22 dias geomagneticamente calmos entre 1 e 30 de setembro de 2017, também, sobre o setor oeste e leste, destacando o período correspondente a fase principal (em amarelo) e de recuperação (em azul) da tempestade. Para os horários diurnos, entre ~09:00 UT e ~22:00 UT, é notável o aumento do TEC em ambas as regiões leste e oeste, atingindo cerca de ~45 TECUs, valor além da margem superior do desvio padrão da média dos 22 dias geomagneticamente calmos registrados, cuja média se mantém entre 30 TECUs e 35 TECUs. Durante o período noturno é possível notar um aumento do TEC próximo ao horário das 03:00 UT (00:00 LT) para a média dos dias calmos, com valores entre 05 e 15 TECUs no setor leste e 10 e 20 TECUs no setor oeste. No dia 28 é possível observar que no setor leste o TEC manteve-se com valores próximos a 15 TECUs enquanto no setor oeste houve um aumento nos valores de TECU nos horários anteriores e posteriores ao horário das 03:00 UT, que atingiram ~23 TECUs as ~00:45 UT e ~18 TECUs as ~05:00 UT, enquanto registrou-se ~14 TECUs as ~03:00 UT.

Figura 37 - TEC para os setores leste (em vermelho) e oeste (em preto), definidos na Figura 27, comparado a 22 dias geomagneticamente calmos (em cinza) nos mesmos setores, para os dias 27, 28, e 29 de setembro de 2017. Em destaque a fase principal (em amarelo) e a fase de recuperação (em azul claro) do período perturbado.



Fonte: O autor.

Através da Figura 34 é possível observar a evolução temporal e espacial do TEC durante os intervalos de tempo descritos acima, onde nota-se que após concentra-se em ambas as cristas da anomalia equatorial, diminuindo o valor de TEC sobre o equador magnético, o plasma volta a se concentrar sobre a região do equador magnético aumentando os valores de TEC em ambos os setores oeste e leste.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por este trabalho ajudam a entender um pouco melhor o comportamento do plasma ionosférico na região do equador magnético sobre o setor brasileiro. Através das ferramentas e metodologia desenvolvidas para esse trabalho foi possível realizar uma análise da dinâmica da ionosfera sob a influência de diferentes condições do clima espacial, estações do ano e, também, sob a influência de um evento pontual de perturbação geomagnética.

Este estudo mostrou que o valor do TEC sobre o equador magnético foi cerca de duas vezes maior para períodos de alta atividade solar de 2015 em relação ao período de baixa atividade solar de 2018. Foi possível verificar, também, que o setor leste e oeste brasileiro, sobre o equador magnético, apresentam valores de TEC semelhantes para o período diurno em diferentes estações do ano, contudo, durante a noite, no período de alta atividade solar, o setor oeste apresentou maiores valores de TEC próximo ao horário da meia-noite, principalmente no mês de março de 2015.

Dias et al. (2020), realizou um estudo com objetivo de identificar o perfil médio, diário e mensal, de desenvolvimento da *EIA* sobre o território brasileiro durante o ano de 2016. De maneira diferente a utilizada neste trabalho, Dias também aborda a comparação do desenvolvimento da *EIA* em setores leste e oeste evidenciando que existe diferença entre os dois setores. É possível correlacionar os resultados obtidos por Dias et al. (2020) e neste trabalho que: existe a variação sazonal do plasma em ambos os setores; as cristas da *EIA* são melhor caracterizadas em ambos os setores durante os meses de fevereiro e março; para o mês de outubro (primavera) o TEC no setor oeste se mantém por mais tempo do que no setor leste; o aumento da ocorrência de *EIA* em dias geomagneticamente calmos durante o ano ocorre a partir do setor oeste e avança para o setor leste.

Dias et al. (2020) mostrou, também, que durante janeiro de 2016 o setor oeste apresentou maiores valores de TEC em relação ao setor leste, enquanto neste trabalho observou-se que para todos os meses de primavera, verão e outono de 2015 o setor oeste apresentou maiores valores de TEC, esta diferença pode ter ocorrido devido a vários aspectos que influenciam na dinâmica do plasma na ionosfera terrestre, como diferenças na composição da atmosfera ($[O]/[N_2]$), ventos termosféricos, marés e ondas de gravidade e campos elétricos (ROMERO-HERNANDEZ et al., 2018).

Através deste trabalho foi possível perceber que o estudo de uma determinada região por longos períodos de tempo podem revelar características específicas a respeito da região estudada, como é o caso a cerca da recorrência no aumento do TEC próximo as 00:00 LT para o setor oeste ser mais intenso em relação ao setor leste brasileiro. Através da metodologia apresentada neste trabalho é possível estender o período a ser estudado, especificando detalhadamente a região de estudo, e assim verificar a variabilidade do TEC em diferentes ciclos solares e comparando-os, ou por períodos maiores do que o de um ciclo solar (11 anos), e desta forma revelar padrões ou características ainda mais proeminentes em relação a variação do TEC sobre tais condições. Além disso, a metodologia aplicada neste trabalho mostrou-se bastante efetiva na obtenção e distribuição de dados para regiões onde a quantidade de estações GPS-TEC é escassa, o que pode auxiliar futuros trabalhos a superar problemas desta natureza para observar o perfil do TEC sobre uma região específica.

Este estudo estendeu-se a fim de verificar a viabilidade de utilizar os dados de GPS, e as ferramentas computacionais desenvolvidas para este trabalho, para observar a dinâmica do TEC e evolução de irregularidades ionosféricas durante o período geomagneticamente perturbado entre 27 e 28 de setembro de 2017. Através do índice ROTI foi possível observar que houve a inibição da evolução de irregularidades ionosféricas durante toda a noite do dia 28, durante a fase principal desta tempestade geomagnética.

A obtenção destes resultados foi possível graças as ferramentas computacionais desenvolvidas especificamente para este trabalho. Através destas ferramentas foi possível analisar os dados de várias maneiras diferentes, permitindo construir formas de visualização que foram fundamentais ao longo do estudo para a compreensão da dinâmica do plasma na ionosfera. Além das ferramentas que manipulam diretamente os dados de TEC, desenvolveu-se também ferramentas que auxiliam na preparação dos arquivos obtidos pelas estações de GPS-TEC, da RBMC, para obtenção do TEC pela ferramenta *GPS-TEC program*, substituindo assim a necessidade de trabalho manual e repetitivo do(a) pesquisador(a). A possibilidade de manipular os dados de forma rápida e eficiente é de grande importância para o(a) pesquisador(a) porque permite que ele(a) otimize seu tempo para o foco ao processo de pesquisa.

Os resultados obtidos por esse trabalho para o período geomagneticamente perturbado de 27 e 28 de setembro de 2017 podem ser comparados com dados obtidos a partir de outros equipamentos capazes de observar a ocorrência de irregularidades ionosféricas, como é o caso de imageadores e ionossondas (Imageadores All-Sky, 2021 ; Ionossondas, 2021). A utilização

destes equipamentos em conjunto com os mapas de ROTI podem fornecer um perfil completo das possíveis causas, intensidade, evolução e duração das irregularidades ionosféricas, permitindo uma apresentação visual do desenvolvimento deste fenômeno. Espera-se que seja possível avançar o estudo do período perturbado utilizado neste trabalho através análise de dados adicionais obtidos a partir de outros equipamentos e estações de monitoramento em diferentes localidades, a fim de obter mais detalhes a cerca do processo que inibiu a formação de irregularidades durante a fase principal desta tempestade geomagnética.

REFERENCIAS

ABDU, M. A. *et al.* South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [s.l.], v. 67, p. 1643-1657, 2 Novembro 2005.

ABREU, A. J. **Efeitos de supertempestades geomagnéticas na camada F ionosférica sobre o setor brasileiro estudados por GPS**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, São José dos Campos, 2006. São José dos Campos, 2007.

APPLETON, E. V. Two Anomalies in the Ionosphere. **Nature**, v. 157, n. 691, p. 691–691, 1946.

BALAN, N. *et al.* Nighttime enhancements in ionospheric electron content in the northern and southern hemispheres. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, n.1, p. 67-69, 1994.

BAUER, S. J. **Physics of Planetary Ionospheres**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1973. 230 p. (Physics and Chemistry in Space, v.6)

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A. **Basic Space Plasma Physics**. [S.l.]: World Scientific, 1997. 329 p.

BURLAGA, L. F. Intermittent turbulence in large-scale velocity fluctuation at 1 au nearsolar maximum. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 68, p. 55-65, 1995.

CADI Canadian Advanced Digital Ionosonde. **User's Manual**. Saskatoon: [s.n.], 1997.

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

CHAPMAN, S. The Development of the Main Phase of Magnetic Storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 1, p. 125-129, 1963.

CHULLIAT, A. *et al.* **The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020**: Technical Report. Boulder, CO: NOAA, 2015. doi:10.25923/ytk1-yx35

CLARK, R. **Sir Edward Appleton G.B.E., K.C.B., F.R.S.** Edinburgh: Pergamon, 2016.

CLIVER, E. W. Solar Activity and Geomagnetic Storms: The Corpuscular Hypothesis. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 75, p. 612-613, 1994b.

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

DIAS, M. A. L. *et al.* Daily and monthly variations of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) over the Brazilian sector during the descending phase of the solar cycle 24. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.125, p.e2020JA027906, 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA027906>.

FARLEY, D. T. *et al.* The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 13723–13728, 1986.

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

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

FEJER, B. G.; SCHERLISS, L; DE PAULA, E. R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A9, p. 19859-19869, 1999.

FRIAÇA, A. C. S. *et al.* **Astronomia: Uma Visão Geral do Universo**. São Paulo: SP: EDUSP, 2000.

GONZALEZ, W. D. *et al.* What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, April 1994.

GOODMAN, J. M. **Space Weather & Telecommunications**. [S.l.]: Springer US, 2005. (The Springer International Series in Engineering and Computer Science, v. 782).

GPS.gov. **Space Segment**, 2021. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
 Acesso em: 21 jan. 2021.

HARRIS, M. *et al.* **Operational mitigation practice to enable the use of gbas on areas influenced by harsh ionosphere phenomena**. SITRAER 2016. São Luiz do Maranhão: [s.n.]. 2016.

HAWKINS, C. Surface Temperature and Blackbodies Surface temperature: the temperature of the visible disk of the Sun (photosphere) blackbody: a perfect radiator. **SlidePlayer**, 2018. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/13602097/>. Acesso em: 30 dez. 2019.

HIDEKATSU, J. Ionospheric Dynamo Process. **Communications and Information of Institute National the of Journal**, v. 56, n. 1-4, p. 210-221, 2009.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System - Theory and Practice**. [S.l.]: Springer-Verlag Wien, 2001. 382 p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEOMAGNETISM AND AERONOMY. **Home Page of IAGA Working Group V-DAT. NOAA/National Centers for Environmental Information (NCEI)**, 2016. Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vdat/>. Acesso em: 30 dez. 2019.

HUBA, J. D. Simulating ionosphere bubbles in the equatorial ionosphere. **Open access government**, 29 Sep. 2020. Disponível em: <https://www.openaccessgovernment.org/equatorial-ionosphere/95192/>. Acesso em: 2 jan. 2021.

IMAGEADOR All-Sky. **Video Imagem Linear**. Embrace - estudo e monitoramento brasileiro do clima espacial. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 9 Fev. 2021. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/video-imagem-linear/>. Acesso em: 28 fev. 2021.

IMAGEADORES All-Sky. Embrace - estudo e monitoramento brasileiro do clima espacial. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 09 fev. 2021. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/imageadores-all-sky-sobre/>. Acesso em: 28 fev. 2021.

IONOSSONDAS. Embrace - estudo e monitoramento brasileiro do clima espacial. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 9 Fev. 2021. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/ionossondas-inicio/>. Acesso em: 28 fev. 2021.

KANE, R. P. Space Weather Prediction: Applications and Validation. **Advances in space research**, v. 37, p.1261-1264, 2006.

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere**: Plasma and electrodynamics. California: Academic Press, 1989.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere**: Plasma Physics and Electrodynamics. Amsterdam: Elsevier, 2009. (International geophysics series, v. 43).

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

KOHL, H.; RUSTER, R.; SCHLEGEL, K. **Modern Ionospheric Science**. Katlenburg-Lindau: European Geophysical Society, 1996.

MACDOUGALL, J. W.; GRANT, I. F.; SHEN, X. The canadian advanced digital ionosonde: design and results. **Upper Atmosphere Geophysics**, 1995.

MARCONI, G. Wireless Telegraphic Communication. **Nobel Lectures in Physics**, Amsterdam, 11 dez. 1909.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. 2003. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

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

- MAYAUD, P. N. **Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1980.
- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; SPENCER, H. **Airglow imaging studies of natural and artificially induced ionospheric disturbances**. Boston, Boston University, MA; Dept. of Astronomy, 1982. (Final Scientific Report, 1 Oct. 1979 - 30 Sep. 1981)
- MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The applications of GPS observations to equatorial anomaly. **Radio Science**, v. 35, p. 885-904, 2000.
- MITRA, S. K. Ionospheric Studies in India. **Nature**, v. 137, p. 503-504, 1936.
- MITRA, S. K. **The upper atmosphere**. Calcutta: University College of Science, 1952.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000.
- MOOR, L. P. **Estudo das irregularidades ionosféricas da região F durante um período de atividade solar mínima**. 2011. Dissertação (mestrado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.
- MUELLA, M. T. A. H. **Morfologia e Dinâmicas das Irregularidades Ionosféricas de Pequena Escala e Imageamento Ionosféricos por GPS**. 2008. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. 2020. Disponível em: <https://services.swpc.noaa.gov/images/solar-cycle-10-cm-radio-flux.gif>. Acesso em: 20 set. 2020.
- NOGUEIRA, P. A. B. *et al.* Longitudinal variation in Global Navigation Satellite Systems TEC and topside ion density over South American sector associated with the four-peaked wave structures. **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 118, p. 7940–7953, 2013.
- OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial**. 2003. Dissertação (mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.
- PEREIRA, V. A. M. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GPS de redes ativas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 19, n. 3, p. 374-390, 2013.
- PHILLIPS, T. **A Sunspot from the Next Solar Cycle**. 29 Agosto 2019. Disponível em: <https://spaceweatherarchive.com/2018/11/20/a-sunspot-from-the-next-solar-cycle/>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- PI, X. *et al.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, Pasadena, v. 24, n. 18, p. 2283-2286, 1997.
- PULINETS, S.; BOYARCHUK, K. **Ionospheric Precursors of Earthquakes**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 315 p.

RBMC. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, 2019. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC_2017.kmz. Acesso em: 26 mar. 2020.

RIBEIRO, B. A. G. *et al.* Equatorial and low-latitude positive ionospheric phases due to moderate geomagnetic storm during high solar activity in January 2013. **Advances In Space Research**, v. 64, n.4, , p. 995–1010, 2019.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. (International Geophysics Series, v. 14).

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

ROMERO-HERNANDEZ, E. *et al.* Daytime Ionospheric TEC Weather Study Over Latin America. **Geophys. Res. Space Physics.**, v. 123, n. 12, p. 10345-10357, 2018.

SARBANI, B.; ANTIA, H. M. Helioseismology and solar abundances. **Physics Reports**, v. 457, n. 5-6, p. 217-283, 2008.

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

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

SEEMALA, G. K. GPS-TEC analysis application. **Gopi Seemala**. 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0BzKakBf8mqOZNTUxNTAxNTktZTEyNi00NmVjLTk5YjAtMTA1MjFjYTdlYTl5/view?hl=en>. Acesso em: 17 out. 2020.

SHINBORI, A. *et al.* Temporal and Spatial Variations of Total Electron Content Enhancements During a Geomagnetic Storm on 27 and 28 September 2017. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, p. e2019JA026873, 2020.

SILVA, A. G. **Anomalia equatorial de ionização e a propagação de sinais de rádio**. 2018 Tese (Doutorado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

SILVA, A. V. R. **Nossa Estrela: O Sol**. São Paulo, SP: Sociedade Brasileira de Física; Livraria da Física, 2009.

SISCOE, G. L. An historical footnote on the origin of “Aurora Borealis”. *In*: Gillmor, C. Stewart. **History of Geophysics v.2**. [S.L.]: American Geophysical Union, 1978. p.11-14.

STACK Overflow - Developer Survey Results. **Stack Overflow**, 2019. Disponível em: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2019#most-popular-technologie>. Acesso em: 25 out. 2020.

SU, Y. Z.; BAILEY, G. J.; BALAN, N. Modeling studies of the longitudinal variations in TEC at equatorial-anomaly latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n.4, p. 433-442, 1995.

TAKAHASHI, H. *et al.* **The First Landmark of the Brazilian Space Weather Program.** In: BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY WORKSHOP., 2008, INPE. **Proceedings** [...]. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 155-160. IBI: <8JMKD3MGP8W/35LT3U8>. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP8W/35LT3U8>>..

TAPPING, K. F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelength: the temporal variability of the 10,7-cm flux. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 829–838, 1987.

TAPPING, K. F. The 10,7 cm solar radio flux (F10.7). **Space Weather**, v. 11, n. 7, p. 394-406, 2013.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment.** Malabar: Orbit Book, 1998.

TSURUTANI, B. *et al.* Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, p. 2156-2202, 2004.

WHITTEN, R. C.; POPPOFF, I. G. **Fundamentals of Aeronomy.** New York, NY : John Wiley, 1971.

CADE, William B.; CHAN-PARK, Christina The Origin of “Space Weather”. **Space Weather**, v. 13, p. 99-103, 2015.

WOOLFSON, M. The origin and evolution of the solar system. **Astronomy & Geophysics**, v. 41, p. 1.12 - 1.19, 2000.