

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

FRANCISCO VIEIRA

Estudo dos distúrbios ionosféricos no setor americano e africano em resposta a dois fortes eventos de aquecimento estratosférico súbito (SSW) para os anos 2017-2018 e 2018-2019

São José dos Campos, SP

2022

FRANCISCO VIEIRA

ESTUDO DOS DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS NO SETOR AMERICANO E AFRICANO  
EM RESPOSTA A DOIS FORTES EVENTOS DE AQUECIMENTO ESTRATOSFÉRICO  
SÚBITO (SSW) PARA OS ANOS 2017-2018 E 2018-2019.

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

Orientadores: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes  
Prof. Dr. Valdir Gil Pillat

São José dos Campos, SP

2022

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Vieira, Francisco

Estudo dos distúrbios ionosféricos no setor americano e africano em resposta a dois fortes eventos de aquecimento estratosférico súbito (SSW) para os anos 2017-2018 e 2018-2019 / Francisco Vieira; orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes; co-orientador Prof. Dr. Valdir Gil Pillat. - São José dos Campos, SP, 2022.

1 CD-ROM, 201 p.

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

Inclui referências

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

Eu, Francisco Vieira, 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 Dezembro de 2022.

Francisco Vieira

Autor(a) da Obra

---

FRANCISCO VIEIRA

**“ESTUDO DOS DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS NO SETOR AMERICANO E AFRICANO EM RESPOSTA A DOIS FORTES EVENTOS DE AQUECIMENTO ESTRATOSFÉRICO SÚBITO (SSW) PARA OS ANOS 2017-2018 E 2018-2019.”**

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

Prof. Dr. Marco Tadeu de Assis Honorato Mueller	<i>Marco Tadeu de A. H. Mueller</i>
Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes	<i>Paulo Roberto Fagundes</i>
Prof. Dr. Valdir Gil Pillat	<i>Valdir Gil Pillat</i>
Prof. Dr. Alexandre Tardelli	<i>Alexandre Tardelli</i>
Prof. Dr. Maurício José Alves Bolzani	<i>Maurício José Alves Bolzani</i>
Prof. Dr. Marlos Rockenbach da Silva	<i>Marlos Rockenbach da Silva</i>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lucia Vieira  
Diretora do IP&D – Univap  
São José dos Campos, 25 de agosto 2022.

## AGRADECIMENTOS:

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

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes e coorientador Dr. Valdir Gil Pillat pelo empenho dedicação à elaboração desta tese e pelo apoio e confiança.

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

A todos os professores, devo toda a minha gratidão. Obrigado por tudo que me ensinou e por nunca desistir de exercer a sua profissão.

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

A minha amável mãe, Maria da conceição Vieira, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A minha esposa Ediane Bispo da Silva pelo apoio ilimitado, compreensão, amor e incentivo, sempre. É para mim, um grande exemplo de garra e persistência.

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

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

.

# ESTUDO DOS DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS NO SETOR AMERICANO E AFRICANO EM RESPOSTA A DOIS FORTES EVENTOS DE AQUECIMENTO ESTRATOSFÉRICO SÚBITO (SSW) PARA OS ANOS 2017-2018 E 2018-2019.

## RESUMO

O evento de aquecimento estratosférico súbito (SSW) se caracteriza por um forte aumento da temperatura estratosférica polar durante o inverno. Neste estudo, investiga-se a ionosfera durante os SSW<sub>2017-2018</sub> e SSW<sub>2018-2019</sub> sobre os setores latino-americano e africano. Utilizou-se VTEC, ROT (inferidos através de dados de GPS-TEC), foF2, h'F e Spread-F (obtidos através da análise de ionogramas). Foram utilizadas 88 estações de GPS-TEC, sendo 68 no setor americano e 20 estações no setor africano e 3 estações de ionosonda. Os dados analisados de GPS-TEC cobrem uma ampla faixa do globo terrestre que vai desde medias latitudes do hemisfério norte até medias latitudes do hemisfério sul no setor Americano e baixas latitudes do hemisfério norte até baixas latitudes do hemisfério sul no setor Africano. Os dados analisados de foF2, h'F e Spread-F foram observados no setor Americano (Araguatins, Jataí e São José dos Campos). O período de estudo compreende o período de dezembro a março (DOY 335 a DOY 90), inverno-primavera no hemisfério norte. Notou-se que a ionosfera apresenta uma variação dia-a-dia significativa antes, durante e depois dos SSWs. Porém o VTEC se intensificou durante o SSW<sub>2017-2018</sub> e diminuiu durante o SSW<sub>2018-2019</sub>, tanto no setor americano como no setor africano. Durante o SSW<sub>2017-2018</sub> o foF2 apresentou valores maiores, o h'F teve uma forte variação e o Spread-F uma diminuição na ocorrência em comparação com o período antes e posterior ao SSW. Por outro lado, durante o SSW<sub>2018-2019</sub> notou-se uma forte diminuição do foF2, h'F e spread-F. É importante ressaltar que o ROT no setor africano foi fortemente suprimido em ambos os SSWs.

**Palavras-Chave:** GPS-TEC, SSW1, SSW2, Ionosfera, VTEC.

STUDY OF IONOSPHERIC DISTURBANCES IN THE AMERICAN AND AFRICAN  
SECTOR IN RESPONSE TO TWO STRONG SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING  
(SSW) EVENTS FOR THE YEARS 2017-2018 AND 2018-2019.

**ABSTRACT**

The sudden stratospheric warming (SSW) event is characterized by a strong increase in polar stratospheric temperature during the winter. In this study, we investigate if the ionosphere during  $SSW_{2017-2018}$  and  $SSW_{2018-2019}$  over the Latin American and African sectors. VTEC, ROT (inferred through GPS-TEC data), foF2, h'F and Spread-F (obtained through ionogram analysis) were used. A total of 88 GPS-TEC stations were used, 68 in the American sector and 20 stations in the African sector, and 3 ionosonde stations. The analyzed data from GPS-TEC covers a wide swath of the terrestrial globe, ranging from northern hemisphere mid-latitudes to southern hemisphere mid-latitudes in the American sector, and northern hemisphere low latitudes to southern hemisphere low latitudes in the African sector. The analyzed data of foF2, h'F and Spread-F were observed in the American sector (Araguain, Jataí and São José dos Campos). The study period comprises the period from December to March (DOY 335 to DOY 90), winter-spring in the northern hemisphere. It was noted that the ionosphere shows significant day-to-day variation before, during and after SSWs. However, VTEC intensified during  $SSW_{2017-2018}$  and decreased during  $SSW_{2018-2019}$ , in both in the American sector and in the African sector. During the  $SSW_{2017-2018}$  foF2 showed higher values, h'F had a strong variation and Spread-F a decrease in occurrence compared to the period before and after the SSW. On the other hand, during  $SSW_{2018-2019}$  it was noticed a strong decrease of the foF2, h'F and spread-F was noted. Importantly, the ROT in the African sector was heavily suppressed in both SSWs.

**Keywords:** GPS-TEC, SSW1, SSW2, Ionosphere and VTEC.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** A) Mostra mapa onde se localizam os observatórios geomagnéticos utilizados para calcular o índice Dst. B) Mostra mapa onde se localizam observatórios geomagnéticos para calcular o índice Kp. Os pontos vermelhos indicam a localização dos observatórios e a linha tracejada vermelha indica o equador geomagnético. .... 32
- Figura 2.** (A) O Fluxo solar (F10.7) entre 2010 e 2022 (ciclo de 24). As linhas azul e vermelha indicam quando ocorreu os eventos de SSW1 e SSW2. (B) O Fluxo solar (F10.7) entre 2017 e 2019, durante o mínimo do ciclo solar 24. As faixas azul e vermelha indicam o período em que ocorreu os eventos SSW1 e SSW2, respectivamente. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3.** Perfil vertical da temperatura atmosférica, indicando a troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera em função do ciclo solar. .... 35
- Figura 4.** A) Densidade eletrônica e as camadas ionosféricas D, E, F1 e F2 em função da atividade solar para o dia e noite B) Perfil vertical dos principais íons ionosféricos acima de 90 km:  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ ,  $H^+$  e  $N^+$ . .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5.** a) Perfil de densidade eletrônica durante o dia e os principais íons das camadas D, E, F1 e F2. b) Múltiplas estratificações da camada F (StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4) observada em Palmas-TO, em 2002. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.** A) Deriva vertical do plasma ionosférico no equador magnético e a formação das cristas em baixas latitudes. B) Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) calculada ( $\log_{10} ne$ ) em função da altitude e do dip latitude às 20:00 LT durante solstício de dezembro. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.** Ionogramas representativos de um período noturno em função da frequência (MHz) e altura (km). A) Ionograma sem espalhamento, B) Ionograma com espalhamento do tipo range. C) Ionograma com espalhamento do tipo frequência. Dados obtidos com uma ionossonda CADI localizada em Araguatins-TO (5,7°S e 48,1°O) em 01/12/2017 para os horários de 01:45:19 LT, 04:55:19 LT e 00:50:19 LT, respectivamente. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 8.** O mecanismo de movimento da onda planetária com base na conservação da vorticidade absoluta ao longo da trajetória de uma parcela de ar. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 9.** Representação do vórtice polar troposférico e estratosférico ..... 47
- Figura 10.** (a) A temperatura em 90°N a uma altura de 10 hPa durante o SSW (linha vermelha) (b) Vento zonal durante o SSW em 60° N a uma altura de 10 hPa (linha vermelha). As linhas pretas indicam a média histórica da temperatura e vento zonal e os círculos verdes indicam o início e fim do evento de SSW<sub>2012-2013</sub>. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11.** Exemplo de um SSW fraco. A temperatura estratosférica a 60°-90°N (linha vermelha) e vento zonal médio 70°-80° N (linha azul) em 10 hPa para o evento de SSW de 1991-1992. As linhas verticais pontilhadas indicam os dias que ocorre o maior valor da temperatura estratosférica. .... 51
- Figura 12.** Mostra os processos de acoplamento e variabilidade atmosférica que ocorrem durante os eventos de aquecimento estratosférico súbitos. Círculos vermelhos e azuis indicam regiões de aquecimento e resfriamento, respectivamente. .. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 13.** A) Observações do TEC a 75° W durante o SSW (2012/2013), B) A deriva vertical do plasma sobre Jicamarca durante o SSW (2007/2008), C) Estudo do TEC no setor brasileiro durante o SSW (2008/2009) e D) Estudo do parâmetro ionosférico h'F e foF2 durante o SSW (2008/2009). .... 55

- Figura 14.** O desenvolvimento da atividade das ondas planetárias para (A) onda 1 e (B) onda 2, e (C) temperatura em dezembro de 2008 a fevereiro de 2009 em 2 hPa. O aumento na atividade das ondas planetárias em altas latitudes induz um resfriamento nos trópicos. A linha vertical indica o dia 23 de janeiro de 2009 (o pico da temperatura estratosférica em 90° N em 10 hPa) durante o evento de SSW (2008/2009). **.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 15.** Variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal entre 01/07/2018 a 01/06/2019. A linha vermelha indica a variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal e linha preta indica a média histórica, a banda cinza (+/- desvio padrão). Além disso, as linhas verdes e vinho horizontais nos painéis superior e inferior representam as nuvens estratosféricas polares (em inglês PSC) e a inversão da velocidade do vento zonal a 60° N em 10 hPa para o SSW (2017-2018).  
.....**.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 16.** Variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal entre 01/07/2018 a 01/06/2019. A linha vermelha indica a variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal e linha preta indica a média histórica, a banda cinza (+/- desvio padrão). Além disso, as linhas verdes e vinho horizontais nos painéis superior e inferior representam as nuvens estratosféricas polares (em inglês PSC) e a inversão da velocidade do vento zonal a 60° N em 10 hPa para o SSW (2018-2019).  
..... 61
- Figura 17.** Mostra uma aproximação da coluna representativa do TEC entre o satélite o receptor de GPS..... 65
- Figura 18.** Mostra o esquema de propagação de ondas de rádio transionosféricas em duas frequências f1 e f2 na presença do campo geomagnético B..... 66
- Figura 19.** Mostra a geometria do mapeamento ionosférico por satélite GNSS. .... 69
- Figura 20.** Mostra a ocorrência da flutuação de fase do ROT em função do tempo UT de vários satélites com os PRN (lado direito) na estação de GPS-TEC YKRO (dip latitude -5,76) no setor africano para noite do dia 08/12/2018 indicado entre as duas linhas azul vertical, as quais indica o início e fim da irregularidade ionosférica. .... 71
- Figura 21.** Mapa do continente americano com as estações GPS-TEC desde média latitude HN (ícones verdes) a média latitude HS (ícones verdes) para o estudo dos SSW (2017-2018) e o SSW (2018-2019), respectivamente. Os ícones amarelos indicam as estações das latitudes baixas nos hemisférios HN e HS, e os ícones vermelho as estações da região equatorial. Além disso, o equador geomagnético é indicado pela linha sólida preta. .... 72
- Figura 22.** Tela inicial da interface gráfica do programa UTECDA utilizado para organização das estações de GPS-TEC..... 75
- Figura 23.** Tela inicial da interface gráfica e a tela de processamento de dados do GPS\_TEC, programa utilizado para o processamento de dados obtidos de arquivos Rinex de receptores (GPS)..... 75
- Figura 24.** A propagação das ondas de rádio na ionosfera terrestre..... 78
- Figura 25.** O sistema de antenas de transmissão (lado direito) e recepção (lado esquerdo) da ionossonda instalada na cidade de Araguatins-To com o sistema de transmissão e recepção, respectivamente..... 79
- Figura 26.** Ionograma obtido em 01 de janeiro de 2018 para a ionossonda da estação de Araguatins durante o período diurno. Os parâmetros h'E, h'F, hpF2 e foF2 são apresentados no ionograma e os traços ordinário e extraordinário da onda, respectivamente..... 81
- Figura 27.** Mostra a tela inicial do programa UDIDA desenvolvido pelo grupo de pesquisa em física espacial da UNIVAP-IP&D. A parte inferior da Figura 27 é apresentado as telas de seleção da estação (lado esquerdo) e redução de dados (lado direito com um ionograma).  
..... 82

- Figura 28.** Variação diária do índice F10,7 (sfu), valor médio do F10.7 e o desvio padrão para os períodos estudados. (A) Período de 01/12/2017-31/03/2018 (SSW1). (B) Período de 01/12/2018-31/03/2019 (SSW2). A linha vermelha e preta verticais tracejadas indicam o dia em que houve o máximo da temperatura estratosférica nos eventos de SSW1 e SSW2. .... 84
- Figura 29.** Mapa mostrando a localização das 20 estações de GPS-TEC utilizadas na investigação sazonal do VTEC nos eventos de SSW1 (2017-2018) e SSW2 (2018-2019). Os ícones vermelhos, amarelos e verdes representam as estações de GPS-TEC localizada na região equatorial, baixas latitudes e médias latitudes, respectivamente. Além disso, o equador geomagnético é indicado pela curva preta..... 87
- Figura 30.** Mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 a 24:00 UT em função do DOY para estações CASE, CHLL, P338 e P802 localizados em ML-HN, entre dezembro 01 (DOY 335) a março 31 (DOY 90). As curvas azul e preta indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km) e a média histórica da temperatura estratosférica, respectivamente. Além disso, as linhas verticais vermelha e preta indicam os dias em que ocorreram a temperatura máxima para os SSW1 e SSW2..... 89
- Figura 31.** O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de VERA, CN25, UXAL e CN15 localizadas em BL-HN..... 90
- Figura 32.** O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de POVE, BELE, AMUA e IMPZ localizadas em R-EQU..... 91
- Figura 33.** O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de SCCH, TOPL, POAL e BAVC localizadas em BL-HS..... 93
- Figura 34.** O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de SOG3, KEPA, FALK e SOG1 localizadas em ML-HS..... 95
- Figura 35.** (A) Mostra a variação dia-a-dia do foF2 em função da DOY (335-90) e LT (12:00 – 10:00) para a estação ARA, durante o SSW1 (2017-2018). A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW1 e a curva preta indica a temperatura média histórica. As linhas verticais contínuas vermelha e preta indicam o dia em que ocorreu o máximo da temperatura estratosférica do SSW1 e SSW2. (B) O mesmo que (A) mas para o parâmetro ionosférico h'F. (C) O mesmo que (A) mas para o parâmetro Spread-F, onde as linhas vermelha e preta mostram os Spread-F tipo range e do tipo frequência. A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW1 e SSW2..... 98
- Figura 36.** O mesmo da estação da Figura 35, porém, para a estação de JAT. .... 99
- Figura 37.** O mesmo da estação da Figura 35, porém, para a estação SJC. .... 100
- Figura 38.** Mostra as condições estratosféricas e os índices geomagnéticas para o evento de SSW1 (2017-2018) em função do dia do ano (DOY 20-80). A) mostra a temperatura estratosférica (linha azul a 90°N em 10 hPa) e a linha preta (média histórica da temperatura). B) apresenta o vento zonal (linha vermelha a 60°N em 10 hPa). C) mostra as atividades das ondas planetárias 1 (PW1) e 2 (PW2) em 10hPa. D) índice de fluxo solar F10.7, E) o índice Dst e F) o índice Kp. As linhas verticais pontilhadas indicam o início e fim do SSW1 (~26 dias) e a linha vertical sólida indica o dia em que ocorreu o valor máximo da temperatura estratosférica (~248 K). .... 103
- Figura 39.** (A) Mostra a variação diária do VTEC em função de UT entre 10:00 a 24:00 UT e DOY de 20 a 80 (20/01/2018 a 21/03/2018) para as estações de GPS-TEC chamadas LINH, SASK, SCH2 e NAIN, localizados em ML-HN. A curva sólida azul indica a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km) durante o SSW1 e a curva preta a média histórica da temperatura estratosférica. A linha preta e pontilhadas verticais indicam o início e fim do SSW1 e o dia em que ocorreu a temperatura máxima, respectivamente. (B) Comparação entre a variação diária do VTEC perturbados durante o evento de SSW1 para o DOY entre 44 e 49 e a variação diurna média dos dias calmos

	(linha preta) com os respectivos desvios padrão ( $\pm \sigma$ , faixa cinza). (C) O mesmo que a Figura 39B, porém para o DOY entre 49 e 54.....	106
<b>Figura 40.</b>	O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC chamadas CN25, RDLT, UXAL e VERA localizadas em BL-HN. ....	108
<b>Figura 41.</b>	O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de ROGM, POVE, BELE e MABA localizadas R-EQU. ....	110
<b>Figura 42.</b>	O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de MSPP, POAL RNNA e CESB localizadas em BL-HS.....	112
<b>Figura 43.</b>	O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de FALK, KEPA, RGDG e SOG3 localizadas em ML-HS.....	114
<b>Figura 44.</b>	Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 44 ao DOY 54, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 7 a 12. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW1. ....	117
<b>Figura 45.</b>	Mapa indicando as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste brasileiro. As estações utilizadas em baixas latitudes no HN e HS são indicadas por ícones amarelos e da região equatorial indicada por ícones vermelhos. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente. A distância de ~1760 km (~15,8°) entre o setor leste e oeste.....	118
<b>Figura 46.</b>	Gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW1, considerado como calmo de 08/03/2018 a 13/03/2018 (DOY 67 a 72), onde o VTEC varia de 0 a 30 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste. ....	120
<b>Figura 47.</b>	Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para mês fevereiro 11 a 25 de 2018 (DOY 42-56), o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 18 de fevereiro de 2018 (DOY-49). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste. ....	122
<b>Figura 48.</b>	Mostra as variações dos parâmetros ionosféricos de foF2, h'F e os espalhamentos da camada F para ionossonda (ARG) em função do tempo LT e para o dia do ano (DOY) 335-90, o qual corresponde ao período de 01 dezembro 2017 a 31 de março de 2018. As condições estratosféricas do SSW1 para temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (linha sólida azul) e média histórica (linha sólida preta) são plotados nos painéis de (foF2) e (h'F). No painel de espalhamento da camada F é plotado apenas curva da temperatura estratosférica indicada pela linha sólida azul. ....	124
<b>Figura 49.</b>	O mesmo da estação da Figura 48, porém, para a estação de JAT. ....	124
<b>Figura 50.</b>	O mesmo da estação da Figura 48, porém, para a estação de SJC.....	125
<b>Figura 51.</b>	Mostram as variações diárias de foF2 e h'F durante o período do DOY 44 ao DOY 54 em Araguatins (ARG). Os valores médios de foF2 e h'F dos dias calmos são mostrados pela média (linha preta) e faixa cinza escura (desvio padrão). A) O parâmetro foF2. B) O parâmetro h'F. ....	128
<b>Figura 52.</b>	O mesmo da Figura 51, porém, para a estação de JAT.....	128
<b>Figura 53.</b>	O mesmo da Figura 51, porém, para a estação de SJC.....	128
<b>Figura 54.</b>	O mapa com as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo do VTEC no território africano, onde as curvas amarela e preta indicam as linhas do equador geográfico e geomagnético.....	130
<b>Figura 55.</b>	A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (20 a 80), respectivamente 20/01/2018 a 21/03/2018, de 4 estações de GPS-TEC localizados em BL - HN no setor africano. As linhas azul, preta e a linha vermelha vertical indicam a	

	temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW1, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre a média dos dias calmos (linha preta), desvio padrão (faixa cinza escura) e 05 dias antes (linhas coloridas) do máximo da temperatura estratosférica (DOY-49) durante o SSW1. C) O mesmo que B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW1.....	133
<b>Figura 56.</b>	O mesmo da Figura 55, porém para a região equatorial (R-EQU) .....	135
<b>Figura 57.</b>	O mesmo da Figura 55, porém para a região de baixa latitude do hemisfério sul (BL-HS) .....	138
<b>Figura 58.</b>	Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 44 ao DOY 54, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores BL-HN, R-EQU e BL-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 15 a 17. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW1. ....	139
<b>Figura 59.</b>	Mapa mostra as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste africano. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente.....	140
<b>Figura 60.</b>	Os gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude apresentando a evolução espaço-tempo da EIA no setor africano. Os painéis A e B são referentes ao período considerado calmo do SSW1 (período anterior ao evento) nos setores leste e oeste, onde o VTEC varia de 0 a 28 VTECu.....	141
<b>Figura 61.</b>	Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para mês de fevereiro 11 a 25 (DOYs 42-56) de 2018, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 18 de fevereiro de 2018 (DOY- 49). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.....	142
<b>Figura 62.</b>	Ocorrências de flutuação de fase do ROT obtida por diferentes satélites em 12 estações receptoras durante o período de 20 janeiro de 2018 a 21 de março de 2018 no setor africano. (A) mostra flutuação de fase do ROT em 04 estações GPS-TEC para BL-HN no setor leste e oeste africano. (B) o mesmo de (A) sobre R-EQU. (C) o mesmo de (A) sobre BL-HS. ....	145
<b>Figura 63.</b>	As condições estratosféricas e geomagnéticas do evento de SSW (2018-2019) no Hemisfério Norte (HN) em função do dia do ano (DOY 335-30). A) mostra a temperatura estratosférica (linha azul a 90°N em 10 hPa) e a linha preta (média histórica da temperatura). B) o vento zonal (linha vermelha a 60°N em 10 hPa) e a linha preta horizontal é a linha de referência para o vento zonal nulo. C) as atividades das ondas planetárias 1 (PW1) e 2 (PW2) em 10 hPa. D) índice de fluxo solar F10.7, E) o índice Dst e F) o índice Kp. As linhas pontilhadas e contínua verticais indicam o tempo de duração do evento (~40 dias) e o valor máximo da temperatura estratosférica (~258 K). ....	147
<b>Figura 64.</b>	A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (335 a 31) de 4 estações de GPS-TEC localizados em ML - HN no setor americano. O VTEC é mostrado para o período de 01/12/2018 a 31/01/2019, onde, as linhas azul, preta e a linha preta vertical indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW2, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre os dias calmos (linha preta com a faixa cinza escura) e durante o SSW2 (linhas coloridas) para 05 dias antes do máximo da temperatura estratosférica (DOY-49). C) O mesmo que a Figura 64B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW2.....	150
<b>Figura 65.</b>	O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de CN25 RDLT, UXAL e VERA localizadas em BL-HN e além da crista da EIA no hemisfério norte HN. ....	153
<b>Figura 66.</b>	O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de AMUA, POVE, BELE e MABA localizadas na R-EQU. ....	155

- Figura 67.** O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de MSPP, POAL, RNNA e CESB localizadas em BL-HS e além da crista da EIA no hemisfério sul HS..... 157
- Figura 68.** O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de FALK, KEPA, RGDG e SOG3 localizadas em ML-HS e além da crista da EIA no hemisfério sul HS..... 159
- Figura 69.** Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 357 ao DOY 02, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 18 a 22. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW2. .... 162
- Figura 70.** O mapa indica as estações de GPS-TEC utilizadas para o estudo da EIA durante o evento de SSW2 nos setores leste e oeste brasileiro. As estações utilizadas em BL-HN e BL-HS são indicadas por ícones amarelos e da R-QUE são indicados por ícones vermelhos. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente. A distância de ~1760 (~15,8°) entre o setor leste e oeste. .... 163
- Figura 71.** Gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW2, considerado como calmo de 0/12/2018 a 06/12/2018 (DOY 335 a 340), onde o VTEC varia de 0 a 28 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste..... 166
- Figura 72.** Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para meses de dezembro e janeiro 21 a 04 (DOYs 355-04) entre os anos 2018-2019, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 28 de dezembro de 2018 (DOY- 362). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste. .... 167
- Figura 73.** (A) Mostra a variação dia-a-dia do foF2 em função da DOY (335-31) e LT (12:00 – 10:00) para a estação ARA, durante o SSW2. A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW e a curva preta indica a temperatura média histórica. As linhas verticais tracejadas indicam o início e fim do SSW2 e a linha vertical contínua vermelha indica o dia em que ocorreu o máximo da temperatura estratosférica do SSW. (B) O mesmo que (A) mas para o parâmetro ionosférico h'F. (C) O mesmo que (A) mas para o parâmetro Spread-F, onde as linhas verticais pretas indicam (RSF) e as linhas vermelhas e o (FSF). A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW2. .... 169
- Figura 74.** O mesmo da estação da Figura 73, porém, para a estação de JAT. .... 169
- Figura 75.** Mostram as variações diárias de foF2 e h'F durante o período do DOY 357 ao DOY 02 em Araguatins (ARG) e Jataí (JAT). Os valores médios de foF2 e h'F dos dias perturbado (linhas coloridas) e dias calmos são mostrados pela média (linha preta e faixa cinza escura desvio padrão). O parâmetro foF2 e h'F são mostrados nos painéis (A e C) e (B e D), respectivamente. .... 171
- Figura 76.** O mesmo da estação da Figura 75, porém, para a estação de JAT. .... 172
- Figura 77.** A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (335 a 31) de 4 estações de GPS-TEC localizados em BL - HN no setor africano. O VTEC é mostrado para o período de 01/12/2018 a 31/01/2019, onde, as linhas azul, preta e a linha vermelha vertical indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW2, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre os dias calmos (linha preta com a faixa cinza escura) e durante o SSW2 (linhas coloridas) para 05 dias antes do máximo da temperatura estratosférica (DOY-362). C) O mesmo que a Figura 77B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW2..... 174
- Figura 78.** O mesmo da Figura 77, mas para estações de GPS-TEC de DAKR, YKRO, DJIG e XTBI localizadas R-EQU..... 177

- Figura 79.** O mesmo da Figura 77, mas para estações de GPS-TEC de NKLG, ASCG, KYN3 e MBEY localizadas BL-HS. .... 179
- Figura 80.** Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 357 ao DOY 02, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores BL-HN, R-EQU e BL-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 27 a 29. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW2. .... 180
- Figura 81.** Os gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW2, considerado como calmo de 01/12/2018 a 06/12/2018 (DOY 335 a 340), onde o VTEC varia de 0 a 25 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste. .... 181
- Figura 82.** Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para meses de dezembro e janeiro 21 a 04 (DOY 355-04) entre os anos 2018-2019, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 28 de dezembro de 2018 (DOY- 362). (A) Painel referente ao setor leste. (B) Painel referente ao setor oeste. .... 181
- Figura 83.** Ocorrências de flutuação de fase do ROT obtida por diferentes satélites em 12 estações receptoras durante o período de 01 dezembro de 2018 a 31 de janeiro de 2019 no setor africano. (A) mostra flutuação de fase do ROT em 04 estações GPS-TEC para BL-HN no setor leste e oeste africano. (B) o mesmo de (A) sobre R-EQU. (C) o mesmo de (A) sobre BL-HS. .... 184

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Mostra a cidade, País, latitude e longitude dos observatórios magnéticos utilizados para cálculo do índice Dst. .... 32
- Tabela 2.** Classificação da atividade geomagnética baseada no índice Kp ..... 32
- Tabela 3.** As características dos sinais de GPS ..... 62
- Tabela 4.** Os critérios utilizados para classificar as estações de GPS-TEC no setor do continente americano. .... 74
- Tabela 5.** Mostra o nome, sigla, latitude, longitude e dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas nos gráficos de contorno do VTEC em ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS. .... 87
- Tabela 6.** Resumo das características do evento de SSW1. .... 103
- Tabela 7.** Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip-latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo VTEC para o período perturbado e calmo do SSW1..... 104
- Tabela 8.** Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo ML-HN, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações LINH, SASK, SCH2 e NAIN entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 21. .... 106
- Tabela 9.** Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HN, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações CN25, RDLT, UXAL e VERA entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22. .... 108
- Tabela 10.** Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo R-EQU, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações ROGM, POVE, BELE e MABA entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22. .... 110
- Tabela 11.** Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HS, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações MSPP, POAL, RNNA e CESP entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22. .... 112
- Tabela 12.** Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HS, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações FALK, KEPK, RGDG e SOG3 entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22. .... 115
- Tabela 13.** Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste brasileiro. .... 120
- Tabela 14.** Detalhes das estações GPS-TEC (localização, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) utilizadas para estudar a variação dia-a-dia do VTEC durante os eventos de SSW1 e SSW2 no setor africano. .... 131
- Tabela 15.** Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 55 como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (44 a 54). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY

mencionados antes no intervalo entre 00:00 UT e 24:00 UT utilizando a equação 22. .....	134
<b>Tabela 16.</b> O mesmo da Tabela 15, porém para a região equatorial (R-EQU).....	136
<b>Tabela 17.</b> O mesmo da Tabela 15, porém para a região de baixa latitude do hemisfério sul (BL-HS) .....	138
<b>Tabela 18.</b> Mostra detalhes da localização, a sigla da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste africano. ....	140
<b>Tabela 19.</b> Mostra um resumo das características do evento de SSW2. ....	147
<b>Tabela 20.</b> Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo VTEC para o período perturbado e calmo do SSW2.....	149
<b>Tabela 21.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 64A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22. .....	150
<b>Tabela 22.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 65A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22. .....	153
<b>Tabela 23.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 66A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22. .....	155
<b>Tabela 24.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 67A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22. .....	157
<b>Tabela 25.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 68A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22. .....	160
<b>Tabela 26.</b> Mostra detalhes das estações de GPS-TEC para o estudo da EIA no setor americano. Os detalhes indicam a cidade e o país de cada estação, além disso, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitudes. ....	165
<b>Tabela 27.</b> Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 77 como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02).	

Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 00:00 UT e 24:00 UT utilizando a equação 22.  
..... 175

**Tabela 28.** O mesmo da tabela 26, mas para estações de GPS-TEC de DAKR, YKRO, DJIG e XTBI localizadas R-EQU..... 177

Tabela 29. O mesmo da Tabele 26, mas para estações de GPS-TEC de NKLG, ASCG, KYN3 e MBEY localizadas BL-HS..... 179

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AIE -- Anomalia de Ionização Equatorial  
BL-HN -- Baixa Latitude do Hemisfério Norte  
BL-HS -- Baixa Latitude do Hemisfério Sul  
CADI -- Canadian Advanced Digital Ionosonde  
Dst -- Disturbance Storm Time  
EPB -- Bolha de plasma equatorial  
ESF -- Espalhamento da região F equatorial  
EUV -- Extrema ultravioleta  
GLONASS -- Global Navigation Satellite Systems  
GNSS -- Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite Systems)  
GPS -- Sistema de Posicionamento Global  
HN -- Hemisfério Norte  
HS -- Hemisfério Sul  
IBGE -- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ISGI -- Serviço Internacional de Índices Geomagnético  
INGV -- O Instituto Nacional de Geofísica e Vulcanologia  
Kp -- Índice planetário (Planetary Kennziffer)  
LT -- Hora local  
ML-HN -- Média Latitude Hemisfério Norte  
ML-HS -- Média Latitude Hemisfério Sul  
PPEF -- Penetração rápida de campos elétricos (Prompt penetration electric field)  
PRN -- Códigos de ruído falsamente aleatório (pseudo-random-noise)  
PV -- Potencial Vorticidade  
PW -- Ondas Planetárias  
RF-- Rádio frequências  
RBMC-- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS  
ROT—Taxa de Variação do Conteúdo Eletrônico Total  
SSW -- Aquecimento Estratosférico Súbito  
TEC -- Conteúdo Total de Elétrons (Total Electron Content)  
TECU -- Unidade de TEC (Electron Content Unit)  
UDIDA -- UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis

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

UNIVAP -- Universidade do Vale do Paraíba

UT -- Hora Universal

UV -- Ultravioleta

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

WMO -- Organização Meteorológica Mundial

## LISTA DE SIMBOLOS

AIE -- Anomalia de Ionização Equatorial  
BL-HN -- Baixa Latitude do Hemisfério Norte  
BL-HS -- Baixa Latitude do Hemisfério Sul  
CADI -- Canadian Advanced Digital Ionosonde  
CCD – Charge Coupled Device  
Dst – Disturbance Storm Time  
EPB -- Bolha de plasma equatorial  
ESF -- Espalhamento da região F equatorial  
EUV -- Extrema ultravioleta  
GLONASS -- Global Navigation Satellite Systems  
GNSS -- Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite Systems)  
GPS -- Sistema de Posicionamento Global  
HN -- Hemisfério Norte  
HS -- Hemisfério Sul  
IBGE -- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ISGI -- Serviço Internacional de Índices Geomagnético  
INGV -- O Instituto Nacional de Geofísica e Vulcanologia  
Kp -- Índice planetário (Planetarische Kennziffer)  
LT -- Hora local  
ML-HN -- Média Latitude Hemisferio Norte  
ML-HS -- Média Latitude Hemisfério Sul  
PPEF -- Penetração rápida de campos elétricos (Prompt penetration electric field)  
PRN -- Códigos de ruído falsamente aleatório (pseudo-random-noise)  
PV -- Potencial Vorticidade  
PW -- Ondas Planetárias  
RF-- Rádio frequências  
RBMC-- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS  
SSW -- Aquecimento Estratosférico Súbito  
TEC -- Conteúdo Total de Elétrons (Total Electron Content)  
TECU -- Unidade de TEC (Electron Content Unit)  
UDIDA -- UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis  
UHF -- Faixa de frequência ultra-alta (Ultra High Frequency)

UNIVAP -- Universidade do Vale do Paraíba

UT -- Hora Universal

UV – Ultravioleta

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

WMO – Organização Meteorológica Mundial

## **Latinos**

B -- Campo magnético

**B** -- Vetor campo geomagnético

$c$  -- Velocidade da luz,  $3,0 \times 10^8$  m/s

*DCB* -- Polarização de código diferencial

$dm_r^S$  -- efeito do múltiplo caminho

$dt_r$  -- Erro do receptor

$dt^S$  -- Erro do satélite

$\varepsilon_{\phi r}^S$  -- Erro da fase da onda portadora

$\varepsilon_{pDr}^S$  -- Outros erros

**E** -- Vetor campo elétrico

$\varepsilon_{L1L2}$  -- Efeitos ionosféricos

$f$  -- Frequência nominal, Hz

foF2 -- Frequência do pico da camada F2

$f_i$  -- Frequência da onda eletromagnética transmitida

$f_p$  -- Frequência do plasma

$f^s$  -- Frequência do sinal gerado no oscilador do satélite

$f_R$  -- Frequência do sinal gerado no oscilador do receptor

$f_1$  -- Frequência da portadora L1

$f_2$  -- Frequência da portadora L2

$g$  -- Aceleração da gravidade terrestre,  $m\ s^{-2}$

$h'$  -- Altura virtual da camada ionosférica

$h'f$  -- Altura mínima virtual da camada F

hpF2 -- Altura do pico da camada da região F2

$H_m$  -- Altura média do pico de densidade da ionosfera (300 km)

**H** -- Componente horizontal do campo geomagnético

$I_{fR}^S$  -- Refração ionosférica para a fase da onda portadora  
 $I_{gR}^S$  -- Refração ionosférica para o grupo  
L1 -- Onda portadora do sinal GPS, MHz  
L2 -- Onda portadora do sinal GPS, MHz  
 $N$  -- Ambiguidade  
 $n_f$  -- Velocidade de fase  
 $n_g$  -- Velocidade de grupo  
 $n$  -- Densidade numérica dos constituintes atmosféricos,  $m^{-3}$   
 $N_e$  -- Densidade de elétrons,  $el\ m^{-3}$   
 $p$  -- Pressão atmosférica,  $Kg\ m^{-2}$   
 $PD$  -- Pseudodistância  
 $\rho$  -- Distância geométrica entre o satélite e o receptor.  
 $R$  -- Antena receptora  
 $Rm$  -- Raio médio da Terra  
 $S$  -- Satélite  
STD -- Formatos dos arquivos  
 $T$  -- Temperatura absoluta, K  
 $T_r^S$  -- Efeitos da troposférico  
 $t$  -- Tempo, s  
 $t^S$  -- Instante de emissão do sinal  
 $t_R$  -- Instante de recepção do sinal  
 $z$  -- Ângulo zenital do satélite  
 $z'$  -- Ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico  
 $v$  -- Velocidade média de derivas das partículas ionizadas  
 $V_p$  -- velocidade do vento solar  
 $v_f$  -- Velocidade da fase portadora  
 $v_g$  -- Velocidade da fase de grupo  
 $\bar{u}$  -- Velocidade zonal média do vento

**Gregos**

$e_{\phi 21}$  -- Diferença das ondas portadoras  
 $\rho$  -- Distância geométrica  
 $\phi^S$  -- Fase da onda portadora gerada no satélite  
 $\phi_r$  -- Fase da onda portadora gerada no receptor

$\lambda$  -- Comprimento de onda  
 $\chi$  -- Ângulo zenital  
 $\zeta$  -- Vorticidade relativa  
 $\eta$  -- Vorticidade absoluta  
 $\omega$  -- Frequência angular  
 $\epsilon_0$  -- Permissividade elétrica do vácuo

### **Símbolos Especiais**

$\nabla$  -- Operador nabla  
 $\nabla_p$  -- Gradiente de pressão  
 $\sim$  -- Aproximadamente  
 $\mathbf{x}$  -- Produto Vetorial

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVO .....	27
1.2	OBJETIVO.....	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>30</b>
2.1	ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E SOLAR .....	31
2.1.2	OS ÍNDICES GEOMAGNÉTICO DST E KP.....	31
2.1.3	FLUXO SOLAR F10.7 .....	33
2.2	A ATMOSFERA NEUTRA .....	34
2.3	A IONOSFERA .....	35
2.3.1	A REGIÃO D.....	37
2.3.2	A REGIÃO E .....	37
2.3.3	A REGIÃO F .....	38
2.4	A ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) .....	39
2.5	IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS .....	40
2.6	AS ONDAS PLANETÁRIAS NA ESTRATOSFERA POLAR .....	42
2.6.1	PROPAGAÇÃO VERTICAL DA ONDA PLANETÁRIA .....	45
2.6.2	O VÓRTICE POLAR.....	47
2.7	O AQUECIMENTO ESTRATOSFÉRICO SÚBITO (SSW).....	48
2.7.1	CLASSIFICAÇÃO DOS SSWS .....	50
2.7.2	O SSW FORTE .....	50
2.7.3	O AQUECIMENTO FRACO.....	51
2.7.4	O AQUECIMENTO FINAL .....	52
2.7.5	O AQUECIMENTO CANADENSE.....	52
2.7.6	IMPACTO E ACOPLAMENTO DOS SSWs FORTES NA IONOSFERA.....	53
2.8	OS SSW <sub>2017-2018</sub> (SSW) E SSW <sub>2018-2019</sub> (SSW2) CONSIDERADO NESTE ESTUDO .....	59
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO</b> .....	<b>62</b>
3.1	SINAIS DE GPS .....	62
3.2	OBSERVÁVEIS DOS SISTEMAS DE GPS, GNSS .....	63
3.2.1	FASE DA ONDA PORTADORA .....	64
3.2.2	EFEITOS IONOSFÉRICOS E CÁLCULO DO TEC ASSOCIADOS AS OBSERVÁVEIS .....	65
3.2.3	CÁLCULO DO TEC E VTEC.....	67
3.2.4	TAXA DE VARIAÇÃO DO TEC (ROT).....	70

3.3	REDE DE DADOS DE GPS-TEC (RBMC E UNAVCO).....	71
3.3.1	UTECDA E GPS_TEC.....	74
3.4	A SONDAGEM IONOSFÉRICA E OS PROGRAMAS UTILIZADOS .....	76
3.4.1	PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RÁDIO NA IONOSFERA .....	76
3.4.2	IONOSSONDA CADI .....	79
3.4.3	UDIDA .....	81
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS.....</b>	<b>84</b>
4.1	O ÍNDICE F10.7 .....	84
4.2	VARIAÇÃO SAZONAL DO VTEC E DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS (h'F, foF2 E SPREAD-F) ENTRE DEZEMBRO E MARÇO (2017-2018 E 2018- 2019) .....	85
4.2.1	VARIAÇÃO SAZONAL DO VTEC.....	85
4.2.2	VARIAÇÃO SAZONAL DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS h'F, foF2 E Spread-F .....	97
4.3	O PRIMEIRO EVENTO DE SSW1 (2017-2018).....	102
4.3.1	ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW1 (2017-2018) DE MÉDIA LATITUDE DO HN ATÉ MÉDIA LATITUDE DO HS NO SETOR AMERICANO .....	104
4.3.2	ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW1 .....	117
4.3.3	ESTUDO DOS PARAMETROS IONOSFÉRICOS (h'F, Fof2) E OS (Spread-F) DURANTE O SSW1 .....	123
4.3.4	ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW1 (2017-2018) DE BAIXA LATITUDE DO HN ATÉ BAIXA LATITUDE DO HS NO SETOR AFRICANO .....	130
4.3.5	ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW1 NO SETOR AFRICANO.....	139
4.3.6	FLUTUAÇÃO DE FASE DO ROT DURANTE O SSW1.....	144
4.4	O SEGUNDO EVENTO DE SSW2 (2018-2019).....	146
4.4.1	ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW2 (2018-2019) DE MÉDIA LATITUDE DO HN A ATÉ MÉDIA LATITUDE DO HS NO SETOR AMERICANO .....	148
4.4.2	ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW2 NO SETOR AMERICANO .....	163
4.4.3	ESTUDOS DOS PARÂMETROS h'F, foF2 E OS SPREAD-F DURANTE O SSW2 .....	168
4.5	ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW2 (2018-2019) DE BAIXA LATITUDE DO HN ATÉ BAIXA LATITUDE DO HS NO SETOR AFRICANO .....	173

4.5.1 ESTUDOS DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW2 NO SETOR AFRICANO.....	180
4.5.2 FLUTUAÇÃO DE FASE DO ROT DURANTE O SSW2 .....	183
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>186</b>
5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	188
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>190</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A ionosfera é a porção ionizada da atmosfera terrestre. Onde a fotoionização da atmosfera neutra pela radiação solar (UV, EUV e Raio-X) é o principal processo de formação do plasma ionosférico (par elétron-íon livres). A ionosfera terrestre se localiza entre ~50-60 km e ~1500-2000 km de altitude e se caracteriza por ser um plasma fracamente ionizado, onde o pico de densidade eletrônica, localizado na camada F, há 1 elétron livre para cada 1000 partículas neutras. Uma onda eletromagnética quando se propaga pela ionosfera interage com o plasma ionosférico e pode sofrer absorção, atenuação, refração e reflexão. Por este motivo, as ondas de rádio que utilizamos no sistema de comunicação entre satélite-satélite e satélite-solo podem eventualmente ser fortemente afetadas pela ionosfera. Assim, existe um grande interesse tecnológico e científico nas propriedades e variabilidade ionosférica (TASCIONE, 1988).

Do ponto de vista tecnológico, existem duas aplicações nas quais a ionosfera desempenha um papel importante, o sistema de telecomunicações e o sistema de posicionamento (georreferenciamento). Ambas tecnologias dependem da transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas, na faixa de rádio frequência. E o sistema de posicionamento necessita da comunicação entre satélite-satélite e satélites-receptor de GPS (em solo) para calcular o posicionamento e possibilitar a navegação. No entanto, a ionosfera pode eventualmente apresentar uma significativa variabilidade espaço-temporal e isto pode induzir a erros ou falhas no sistema de posicionamento global e conseqüentemente navegação. Esta variabilidade ionosférica pode ocorrer em função da latitude, longitude, altitude, variação diária, dia-a-dia, estações do ano e ciclo solar (RISHBETH; GARRIOT, 1969; KELLEY, 2009; TASCIONE, 1994; SCHUNK; NAGY, 2000; MUELLA, 2008).

Em baixas latitudes e região equatorial a anomalia de ionização equatorial (EIA), irregularidades ionosféricas de grande, média e pequenas escalas, a camada esporádica E (Es) e as variações devido à períodos geomagneticamente perturbados são os fatores responsáveis pela variabilidade dia-a-dia e diária ionosférica. Os estudos destes fenômenos são realizados caso a caso, ou em função das estações do ano, ou em função do ciclo solar de 11 anos. Também houve avanços recentes no estudo do acoplamento vertical, latitudinal e longitudinal entre as diversas camadas da atmosfera e ionosfera terrestre. Um dos eventos mais interessantes e

intrigante de acoplamento vertical, latitudinal e longitudinal tem início durante os eventos de aquecimento estratosférico súbito (*SSW-Sudden Stratosphere Warming*).

Este fenômeno está associado à propagação das ondas de escalas planetárias (ondas de Rossby). Os processos dinâmicos das ondas planetárias durante o inverno podem provocar um aquecimento súbito da estratosfera e uma reversão ou diminuição do vento zonal. Este processo ocorre na estratosfera polar e pode se propagar para altitudes ionosféricas e modificar todo o sistema dinâmico da mesosfera e termosfera e o eletrodinâmico da ionosfera desde médias latitudes do hemisfério norte até médias latitudes do hemisfério sul, ou seja, uma modificação global da alta atmosfera e ionosfera.

O fenômeno de SSW é mais frequente no polo norte e ocorre desde latitudes de 60° até 90° a um nível de pressão de 10 hPa (~30 km de altitude). O SSW é um dos fenômenos dinâmicos mais espetaculares da estratosfera de inverno, e atrai a atenção dos pesquisadores desde sua descoberta na década de 1950 (CHAO, 1985; SCHOEBERL, 1978). Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO) os SSWs são caracterizados por uma reversão ou desaceleração do vento zonal, que sopra para oeste, e um aumento súbito da temperatura estratosférica por dezenas de graus (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987; LABITZKE, 1993). A intensidade e direção do vento zonal são utilizadas para classificar os SSWs como fortes ou fracos, onde os eventos fortes são caracterizados quando existe uma reversão do vento zonal ou fraco quando o vento zonal sofre uma desaceleração. As ondas planetárias de número zonal 1 e 2 durante a fase que antecede os SSWs desempenham um papel importante na reversão ou desaceleração dos ventos zonais. Essas ondas planetárias são geradas na troposfera e se propagam até a estratosfera e sofrem uma ruptura ao interagir com o fluxo zonal médio estratosférico (MATSUNO, 1971). Portanto, as ondas planetárias amplificadas depositam momento na direção leste na região da estratosfera polar, que passa a desacelerar o vento zonal médio e induzir uma circulação meridional média perturbada (HAYNES *et al.*, 1991). Essa circulação zonal média perturbada leva a um aumento da massa de ar na região polar e um aumento na temperatura estratosférica polar devido ao aquecimento adiabático. Como resultados dos SSWs, o vórtice polar é geralmente deslocado dos polos ou dividido em dois vórtices (CHARLTON; POLVANI, 2007).

As modificações causadas por SSWs na ionosfera podem ser observadas através dos parâmetros ionosféricos obtidos por ionossondas ( $h'F$ , foF2 e Spread-F), radares, conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) inferidos por GPS-TEC e experimentos a bordo de satélites (FAGUNDES *et al.*, 2009; UPADHAYAYA; MAHAJAN, 2013; PATRA *et al.*, 2014;

SHPYNEV *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2011; DE JESUS, 2017; GONCHARENKO *et al.*, 2010a; 2010b; LIU *et al.*, 2019; PANCHEVA; MUKHTAROV, 2011; VIEIRA *et al.*, 2017; YADAV, 2017).

## 1.2 OBJETIVO

O estudo tem como objetivo principal investigar e compreender a resposta espaço-temporal da ionosfera no continente americano e africano a dois fortes eventos de SSWs, que ocorreram na estratosfera do hemisfério norte (HN). Os eventos de SSWs que ocorreram nos períodos entre 20 /01/2018 a 21/03/2018 (DOY 20 a 80) e 01 /12/2018 a 31/01/2019 (DOY 335 a 30) serão chamados de SSW1 e SSW2, respectivamente.

Este estudo é realizado desde as médias latitudes do hemisfério norte até médias latitudes do hemisfério sul no setor americano e baixas latitudes do hemisfério norte até baixas latitudes do hemisfério sul no setor africano. Os SSW1 e o SSW2 ocorrem durante a fase de mínima atividade solar (LSA), durante ciclo solar 24. Antes de iniciar a investigação da resposta ionosférica ao SSW1 faremos um estudo detalhado de uma possível influência da transição de equinócio nos parâmetros ionosféricos visto que este evento ocorre no início da transição de equinócio.

Os parâmetros ionosféricos utilizados nesta investigação são o VTEC e ROT (utilizando uma rede de receptores de GPS-TEC) e a variação diária dos parâmetros ionosféricos  $h'F$  (altura virtual da camada F),  $foF2$  (frequência crítica da camada F2) e a ocorrência de Spread-F equatorial (ESF). A caracterização dos parâmetros geomagnéticos e interplanetário, durante os SSW1 e SSW2, é investigada utilizando os índices Dst, Kp e F10.7. Estes dados foram obtidos no site do Centro Dados Mundial de Geomagnetismo, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) e OmniWeb da NASA (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). A temperatura estratosférica em 10 hPa (~30 km) a 90°N, vento médio zonal em 10 hPa a 60°N e as atividades de ondas planetárias 1 e 2 em 10 hPa do HN foram obtidos no site da NASA ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html)). Nesta investigação se utiliza dados de receptores de GPS-TEC da rede de GPS do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmcest.php>) e da University Navstar Consortium-UNAVCO ([https://www.unavco.org/data/gps\\_gnss/data\\_access\\_methods.html](https://www.unavco.org/data/gps_gnss/data_access_methods.html)).

Foram utilizados dados de 88 receptores de GPS-TEC de dupla frequência, sendo que 68 estão no setor americano e 20 no setor africano. Os GPS-TEC estão distribuídos entre 52,2°N e 53,8°S de latitude e entre 35,2°W e 104,1°W de longitude, no setor americano e entre 41,2°N e 30,4°S de latitude e de 17,3°W a 50,2°E de longitude no setor africano. Os parâmetros ionosféricos foF2, h'F e ESF foram obtidos utilizando as ionossondas localizadas em Araguatins (5,7°S, 48,1°W e dip latitude -5,0), Jataí (17,9°S, 51,7°W e dip latitude -13,4) e S.J. Campos (23,2°S, 46,0°W e dip latitude -20,4).

A investigação dos distúrbios ionosféricos devido os SSWs estão organizados da seguinte forma. No Capítulo 2 faz-se uma introdução teórica dos assuntos abordados na pesquisa sobre Física da ionosfera e SSW. O Capítulo 3 apresenta-se uma breve descrição da instrumentação e dos programas de redução dos dados. No Capítulo 4 mostra-se os resultados, a análise e a discussão da variação espaço-temporal do VTEC, ROT, EIA, h'F, foF2 e ESF durante os eventos de SSW1 e SSW2. Finalmente o Capítulo 5 apresentam-se as conclusões dos distúrbios ionosféricos em respostas aos dois eventos de SSWs e propostas de futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo se faz uma descrição dos índices geomagnéticos e solar, da atmosfera neutra, ionosfera, da EIA, das irregularidades ionosféricas, das ondas planetárias (Ondas de ROSSBY) e dos SSWs.

### 2.1 ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E SOLAR

#### 2.1.2 OS ÍNDICES GEOMAGNÉTICO DST E KP

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) foi padronizado por Sugiura (1964), são utilizadas as componentes horizontais (BH) do campo geomagnético de quatro observatórios distribuídos longitudinalmente em baixas-médias latitudes (Veja a Figura 1A e Tabela 1 os detalhes destes 4 observatórios). Este índice é útil para caracterizar as variações do campo geomagnético terrestre durante períodos calmos e perturbados, além disso, a unidade do índice Dst é dado em nano Tesla (nT). Onde, a variação do campo geomagnético terrestre, está bem estabelecido que o principal mecanismo é a transferência de energia do vento solar para a magnetosfera da Terra por meio da reconexão magnética. Isso ocorre, se os campos magnéticos interplanetários forem dirigidos em sentido contrário ao campo magnético da Terra.

Uma explicação teórica para o fenômeno foi dada por (DUNGEY, 1961). Portanto, se os campos magnéticos interplanetários são direcionados opostamente ao campo da Terra, há reconexão magnética no lado diurno, além disso, o campo magnético se acumula na região da cauda magnética do lado noturno da Terra. Assim, reconexão magnética na cauda (lado noturno da terra) leva a entrada de plasma. Onde, partículas de baixa energia precipitam nas altas latitudes e causam auroras, enquanto prótons de alta energia derivam para oeste e elétrons para leste, formando uma “corrente em anel” centrada próximo ao equador ao redor da Terra, o que causa uma redução no campo geomagnético da Terra medida em estações magnéticas próximo a região equatorial. Portanto, o índice Dst define a intensidade da corrente de anel baseado no valor médio da componente horizontal (BH) do campo geomagnético medido pelos os observatórios distribuídos longitudinalmente em baixa latitudes (ver Figura 1A) de hora em hora.

O índice Kp (*planetarische Kennziffer*) é baseado no índice K de vários observatórios localizados em médias latitudes. O índice K é obtido para um dado observatório tomando como base um dia geomagneticamente calmo como referência, sendo calculado a cada 3 horas

utilizando uma escala quase logarítmico. Finalmente, o cálculo do índice planetário Kp é uma média dos índices K dos 13 observatórios (Figura 1B) que estão localizados entre 44° e 60° latitudes geomagnéticas (médias latitudes) nos hemisférios norte e sul. A escala varia de 0 a 9, com subdivisões de 1/3. A Tabela 2 apresenta a classificação da atividade geomagnética em função de valores do índice Kp.

Estes índices são muito utilizados para estudar períodos geomagneticamente perturbados. As tempestades geomagnéticas são fontes de distúrbios ionosféricos e levam a mudanças significativas na composição atmosférica neutra, densidade de elétrons e eletrodinâmica ionosférica (RIBEIRO, 2019). Nesta investigação será utilizado os índices Dst e Kp para caracterizar as condições geomagnéticas ao ser relacionada as perturbações ionosféricas em médias e baixas latitudes durante os eventos de SSW.

Figura 1. A) Mapa indicando a localização dos observatórios que são utilizados para calcular o índice Dst. B) Mapa indicando a localização dos observatórios geomagnéticos para calcular o índice Kp. Os pontos vermelhos indicam a localização dos observatórios e a linha tracejada vermelha indica o equador geomagnético



Fonte:

Retirada de INGV

Tabela 1. Mostra a cidade, País, latitude e longitude dos observatórios magnéticos utilizados para cálculo do índice Dst.

Nome	País	Latitude	Longitude
<b>Hermanus</b>	África do Sul	-34,40°	19,22°
<b>Kakioka</b>	Japão	36,23°	140,18°
<b>Honolulu</b>	Hawaí	21,32°	201,98°
<b>San Juan</b>	Porto Rico	18,38°	293,88°

Fonte: Autor

Tabela 2. Classificação da atividade geomagnética baseada no índice Kp

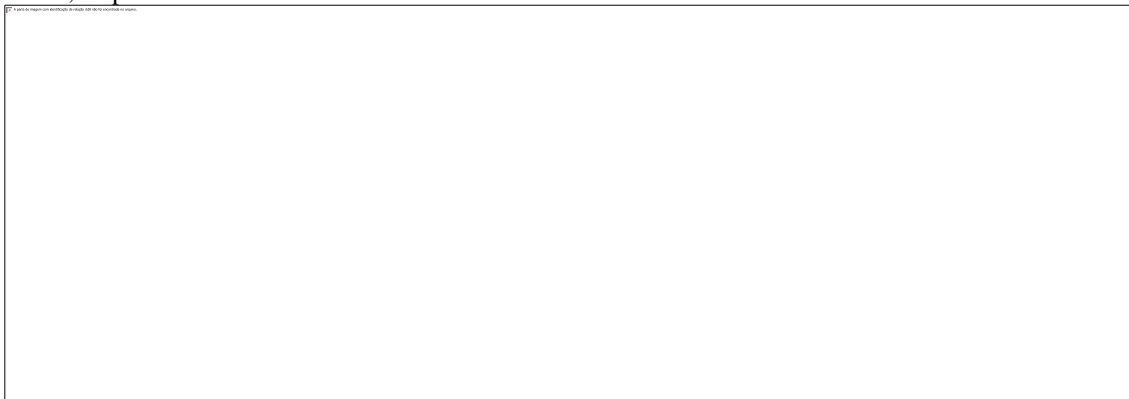
Atividade Geomagnética	Índice Kp
Calma	0-2
Transição	3
Ativo	4
Tempestade Fraca	5
Tempestade intermediaria	6
Tempestade Intensa	7-9

Fonte: Modificada Matsuoka. (2003)

### 2.1.3 FLUXO SOLAR F10.7

O fluxo de radiação solar no comprimento de onda 10.7 cm (2800 MHz) é um indicador do fluxo de radiação solar no ultravioleta (UV) e no extremo ultravioleta (EUV). A unidade do F10.7 é expressa em sfu (*solar flux units*), onde  $1\text{sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ . O F10.7 origina-se na alta cromosfera e baixa corona solar, tem uma boa correlação com número de manchas solares e é medido diariamente ao meio-dia e está sendo registrado durante os 6 últimos ciclos solares. A Figura 2A mostra a variação do índice F10.7 ao longo do ciclo solar 24 (2010 - 2022) e os SSW1 e SSW2 são indicados pelas linhas verticais azul e vermelha, respectivamente. A Figura 2B mostra a variação do F10.7 durante o mínimo do ciclo solar 24 (2017 – 2020), onde o retângulo azul e vermelho indica o período em que ocorreu o SSW1 e o SSW2.

Figura 2. (A) Mostra a variação do F10.7 entre 2010 e 2022 (ciclo de 24). As linhas azuis e vermelhas indicam o período em que ocorreu os eventos de SSW1 e SSW2. (B) Mostra a variação do F10.7 entre 2017 e 2019, durante o mínimo do ciclo solar 24. As faixas azul e vermelha indicam o período em que ocorreu os eventos SSW1 e SSW2, respectivamente.



Fonte:

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi> Acesso; 26/12/2020

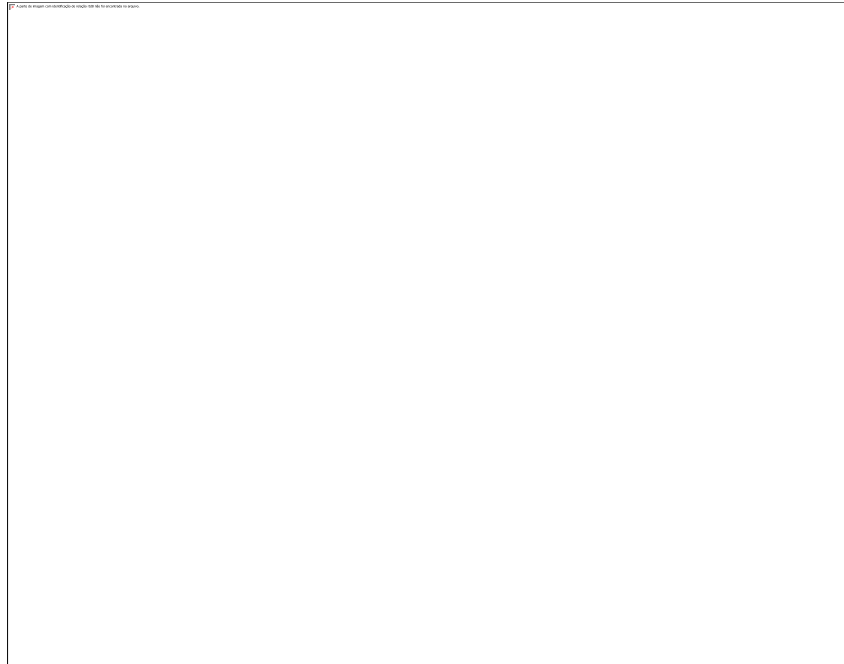
## 2.2 A ATMOSFERA NEUTRA

A atmosfera terrestre está continuamente em movimento devido ao gradiente de iluminação gerado entre o lado diurno e o noturno e gravidade. Em resposta aos gradientes de iluminação e gravidade são gerados gradientes horizontal e vertical de temperatura, de pressão e de densidade. A atmosfera terrestre é subdividida em camadas de acordo com o gradiente vertical de temperatura em troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera (ver Figura 3). Também pode ser subdividida considerando a composição química e processos físicos em função da altitude (CHAPMAN, 1950).

A troposfera se estende desde o solo até aproximadamente 10 km de altitude. Caracteriza-se por um gradiente negativo de temperatura ( $-7,0$  K/km), onde a temperatura decresce até atingir  $\sim 215$  K na tropopausa (região de transição entre a troposfera e estratosfera). A estratosfera se estende desde a tropopausa ( $\sim 10$  km) até aproximadamente 50 km de altitude. Nesta região o gradiente de temperatura torna-se positivo, devido à absorção da radiação ultravioleta (UV) pelo ozônio e por vapor de água. A temperatura atinge  $\sim 270$  K na estratopausa (região de transição entre estratosfera e mesosfera).

A mesosfera se estende desde  $\sim 50$  km até  $\sim 90$  km, nesta camada o gradiente de temperatura se inverte novamente devido ao resfriamento radiativo. A temperatura decresce até atingir a mínima temperatura atmosférica de  $\sim 180$  K na mesopausa. A termosfera se estende desde 90 km até 500-700 km de altitude, onde o limite superior se denomina termopausa. A temperatura apresenta um gradiente positivo e pode atingir uma temperatura de 1000 a 2000 K na termopausa, dependendo do ciclo solar. Principalmente, devido a absorção da radiação solar na faixa do EUV pelo oxigênio atômico (O), que é o constituinte dominante desta região da atmosfera. Na Figura 3 mostra-se a variação vertical da temperatura em função da pressão e temperatura e as camadas da atmosfera terrestre desde o solo até  $\sim 120$  km (KELLY, 2009).

Figura 3. Perfil vertical da temperatura atmosférica, indicando a troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera em função do ciclo solar.



Fonte: Tascione. (1988)

### 2.3 A IONOSFERA

A ionosfera é a porção ionizada da atmosfera, formada principalmente por elétrons e íons positivos. O limite inferior da ionosfera é aproximadamente 50-60 km e o limite superior pode variar entre 1000 e 2000 km, dependendo da atividade solar. A altitude de 2000 km é arbitrariamente definida como o limite superior para a maioria das aplicações tecnológicas e estudos científicos (TASCIONE, 1988; PULINETS; BOYARCHUK, 2004).

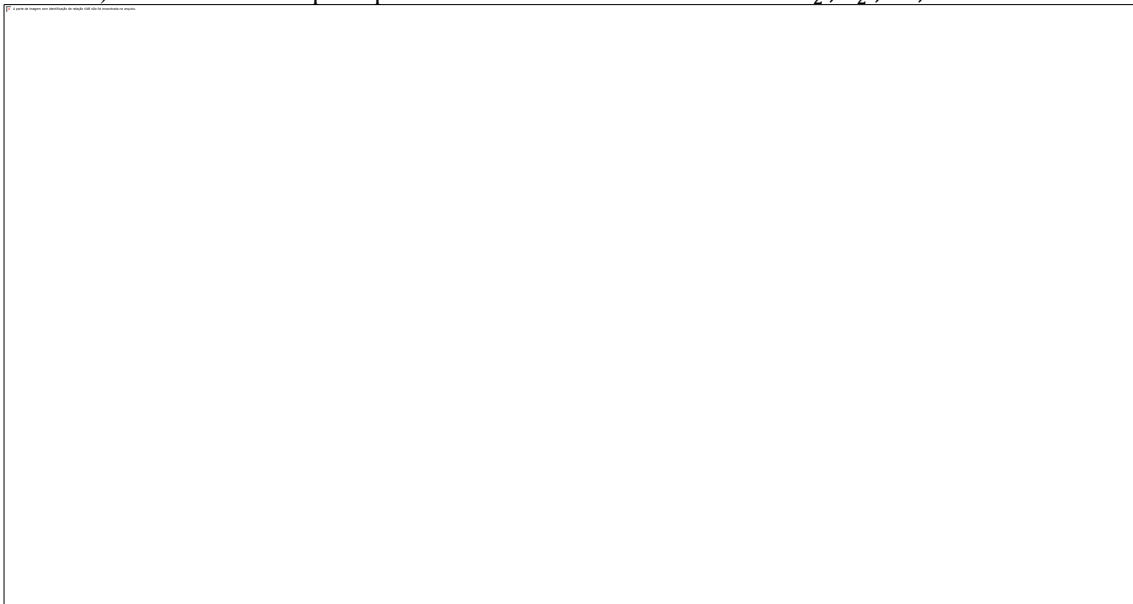
A ionosfera é formada pela produção do par elétron-íon, principalmente pela absorção de radiação solar na faixa de Raios-X, UV e EUV. Portanto, os fótons com energia acima de aproximadamente 12 eV são capazes de ionizar os constituintes atmosféricos, sendo ao mesmo tempo, responsáveis pelo aquecimento da termosfera (KIRCHHOFF, 1991). A densidade do plasma ionosférico apresenta uma variação latitudinal, longitudinal, sazonal e ciclo solar de 11 anos. Além disso, a eletrodinâmica e as propriedades físico-químicas ionosféricas fornecem informações sobre os fenômenos relacionados ao sistema Sol - Terra (clima espacial).

A Figura 4A mostra a variação vertical da densidade eletrônica ( $N_e$ ) e as camadas ionosféricas D, E, F1 e F2 durante o dia (linha contínua) e D, E, e F2 a noite (linha tracejada),

em função da atividade solar máxima e mínimo. A densidade eletrônica após atingir seu máximo na região F2 decresce suavemente com a altitude (Figura 4). À noite, o processo de fotoionização é interrompido e as perdas pela recombinação torna-se o mecanismo que controla a densidade eletrônica. As camadas F1 e D desaparecem logo após o início da noite (TASCIONE, 1988).

A Figura 4B mostra a número de íons e elétrons por  $m^3$  e a composição química ionosférica em função da altitude. É possível notar que os íons predominantes ao redor de 100 km são os íons  $O_2^+$  e  $NO^+$ , que corresponde à camada E (90 - 150 km). No pico da camada F2 (~250 km) o íon  $O^+$  é dominante, visto que nesta altitude o oxigênio atômico é o constituinte majoritário. Acima de 180 km, a química não é mais dominada pela recombinação e nesta altitude ocorre uma transição de íons moleculares para íons atômicos. Define-se a altitude de transição onde a concentração de íon molecular é igual à concentração de íons atômicos (YOHISUKE KAMIDE; ABRAHAM-CHIAN, 2007). A altitude de transição depende da iluminação solar zenital, essa altitude varia entre 180 km para baixos valores do ângulo zenital  $\chi$  e 200 km para altos valores do ângulo zenital  $\chi$ .

Figura 4. A) Densidade eletrônica e as camadas ionosféricas D, E, F1 e F2 em função da atividade solar para o dia e noite B) Perfil vertical dos principais íons ionosféricos acima de 90 km:  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ ,  $H^+$  e  $N^+$ .



Fonte: Modificada Tascione. (1988) e Yohsuke Kamide, Abraham Chian. (2007)

### 2.3.1 A REGIÃO D

A região D é a região da ionosfera que subsiste somente durante o dia e desaparece durante a noite. A região D se estendendo desde ~60 km até ~90–95 km (YIGIT, 2018). A densidade eletrônica é da ordem de  $10^2$ - $10^4$  [e/cm<sup>3</sup>] e apresenta uma alta frequência de colisão entre íons e moléculas neutras. Do ponto de vista químico é a região mais complexa da ionosfera, devido a presença de íons negativos  $O_2^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ , e  $CO_4^-$  e íons positivos complexos  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $H_3O^+$  e  $H_5O_2^+$  (HARGREAVES, 1992). Na região D o íon dominante é o  $NO^+$ , apesar do óxido nítrico (NO) ser minoritário.

O EUV ioniza o oxigênio molecular ( $O_2$ ) na faixa espectral entre 102,7-111,8 nm. O raio X duros na faixa espectral de 0,2 - 0,8 nm ioniza praticamente todos os constituintes neutros, e tem grande importância no processo de formação da camada D. Os raios cósmicos é a maior fonte de ionização abaixo dos 70 km. Os raios X é a principal fonte de ionização na região D no máximo solar, mas a radiação *Lyman- $\alpha$*  é importante no mínimo solar (POPPOFF *et al.*, 1964). A região D por apresentar características diferentes das outras regiões não deve ser estudada por métodos convencionais, como ionossonda devido à baixa concentração de elétrons ( $\sim 10^4$  [e/cm<sup>3</sup>]), e por apresentar alta frequência de colisão da ordem de  $10^6$  S<sup>-1</sup> (SILVA, 2013).

### 2.3.2 A REGIÃO E

A camada E foi nomeada por E.V. Appleton (Nobel de Física em 1947), o qual designa a região onde a condutividade elétrica e a corrente elétrica é máxima. Foi a primeira região da ionosfera a ser descoberta e recebeu essa denominação por representar uma região eletrificada (E) (PETER, 2017; BAYRU, 2007). A camada E está localizado aproximadamente entre 90 e 150 km de altitude. A região E é formada durante o dia e dependendo do seu grau de ionização pode permanecer durante à noite.

As fontes de ionização da camada E são Raio-X, EUV, partículas de baixa energia (~keV) e em menor quantidade os meteoros (BAUER, 1973). O plasma da região E sob ação do campo magnético e ventos neutros, produz campos elétricos de polarização que resultam em fortes correntes elétricas (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Na região equatorial estas correntes elétricas dão origem ao Eletrojato equatorial. Os íons dominantes da região E são as moléculas  $NO^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$  e os íons de maior concentração são  $NO^+$  e  $O_2^+$ . A maior concentração de  $NO^+$  e  $O_2^+$  é devida as reações químicas que dominam a formação iônica desta região

(BANKS; KOCKARTS, 1973). Sendo que estas reações químicas, podem ser descritos com uma boa aproximação por processos fotoquímicos, os quais são indicados por equações como:  $O_2 + hv \rightarrow O_2^+ + e$ ;  $NO + hv \rightarrow NO^+ + e$ .

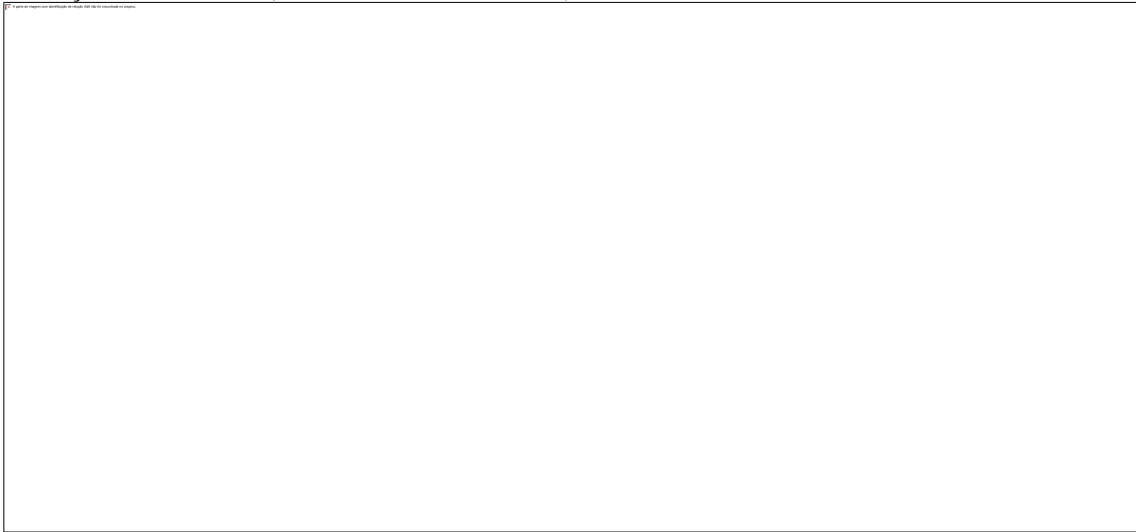
### 2.3.3 A REGIÃO F

A região F é a camada que se localiza acima da região E, sendo subdividida em F1 e F2. A camada F1 está localizada à aproximadamente entre 160 e 180 km de altitude e desaparece durante a noite e a camada F2 está localizada entre 180 e 500 km de altitude e permanece a noite. Na região F1 a radiação na faixa entre 20 e 90 nm é absorvida pelo oxigênio atômico. As reações iniciais dão origem ao  $O_2^+$ ,  $N_2^+$  e  $He^+$ , mas reações subsequentes da origem ao  $NO^+$  e  $O_2^+$  que são os constituintes principais (HARGREAVES, 1992).

A camada F2 localiza-se entre 180 km e 300 - 500 km de altitude, apresentando um pico de densidade eletrônica entre 250 e 270 km (RISHBETH; GARRIOTT, 1969), o principal íon é o  $O^+$ . A radiação responsável pela ionização do O é o EUV ( $\lambda < 91$  nm). Nesta altitude o constituinte neutro mais abundante é o O, porém, o  $N_2$  e  $O_2$  desempenham um papel importante nos processos de perda do  $O^+$  (BANKS; KOCARTS, 1973). A região F2 é conhecida por apresentar uma variação diária (variação ao longo de 24 horas) e dia-a-dia (variação de um dia para outro) relevante nos estudos ionosféricos, isto é, devido a presença de campos elétricos que induzem processos eletrodinâmicos e transporte.

A estratificação da camada F em F1/F2/F3 e F1/F2/F3/F4 foi investigada por diversos pesquisadores (MRIDULA; PANT, 2015; TARDELLI; FAGUNDES, 2015; BALAN; BAILEY, 1995; BALAN *et al.*, 1997, 1998; JEN KINS *et al.*, 1997; BATISTA *et al.*, 2000; RAMA RAO *et al.*, 2005; UEMOTO *et al.*, 2007; KLIMENKO *et al.*, 2011). A Figura 5A mostra o perfil de densidade eletrônica e os principais íons de cada camada e bem como as radiações ionizantes e a Figura 5B mostra uma camada F estratificada em F1/F2/F3/F4.

Figura 5. a) Perfil de densidade eletrônica durante o dia e os principais íons das camadas D, E, F1 e F2. b) Múltiplas estratificações da camada F (StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4) observada em Palmas-TO, em 2002.



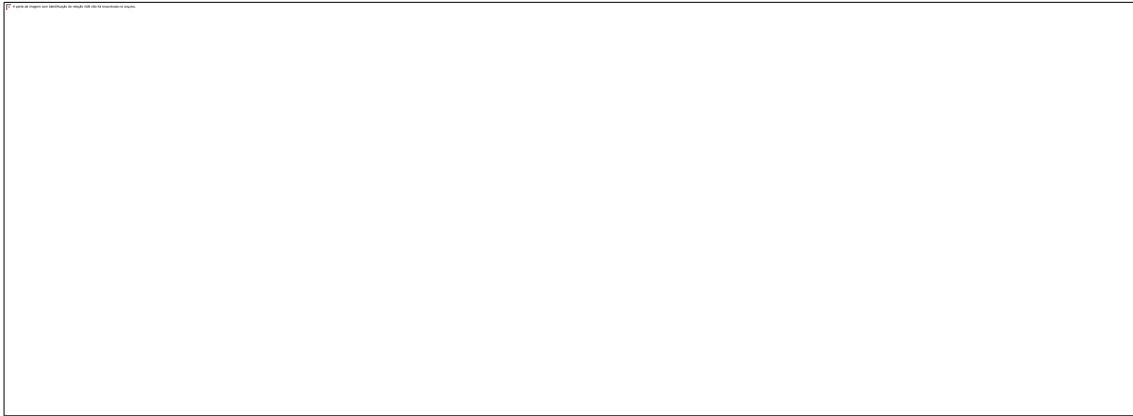
Fonte: Modificada de Conceição Santos (2019) de Banks e Kockarts (1973) e Tardelli. (2016)

## 2.4 A ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA)

Desde o primeiro trabalho sobre o estudo da EIA por Appleton. (1946), ela tem sido extensivamente estudada utilizando ionossondas terrestres e medições de satélite *in situ*. A anomalia de ionização equatorial, se caracteriza por duas cristas de densidade eletrônica entre  $\pm 15^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  de latitude e um mínimo na densidade eletrônica em torno do equador magnético (LIN *et al.*, 2007; DIAS *et al.*, 2020). Logo, essas duas cristas de densidade eletrônica são localizadas em baixas latitude nos hemisférios norte e sul. De acordo com (HARGREAVES, 1992) a EIA ocorre durante o dia e entardecer, sendo que a sua intensificação ocorre por volta das 14:00 LT - 15:00 LT. As Figuras 6A e 6B ilustram o processo da deriva vertical de plasma e a formação da anomalia de ionização equatorial (EIA).

Durante o dia um campo elétrico para leste é gerado na camada E equatorial devido a interação entre o plasma e os ventos termosféricos. Estes campos elétricos na região equatorial provocam uma deriva vertical  $\vec{E} \times \vec{B}$ , a qual desloca o plasma ionosférico para altas altitudes (ABREU, 2012; DIAS *et al.*, 2020). O plasma ionosférico equatorial sob a ação da ação da gravidade ( $\vec{g}$ ) e gradiente de pressão ( $\nabla p$ ) é transportado para baixas latitudes, formando assim as cristas e o mínimo de densidade eletrônica (este fenômeno é conhecido como efeito fonte).

Figura 6. A) Deriva vertical do plasma ionosférico no equador magnético e a formação das cristas em baixas latitudes. B) Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) calculada ( $\log_{10} ne$ ) em função o da altitude e do dip latitude às 20:00 LT durante solstício de dezembro.



Fonte: Pulinets e Boyarchuk (2014) e Schunk e Nagy (2000).

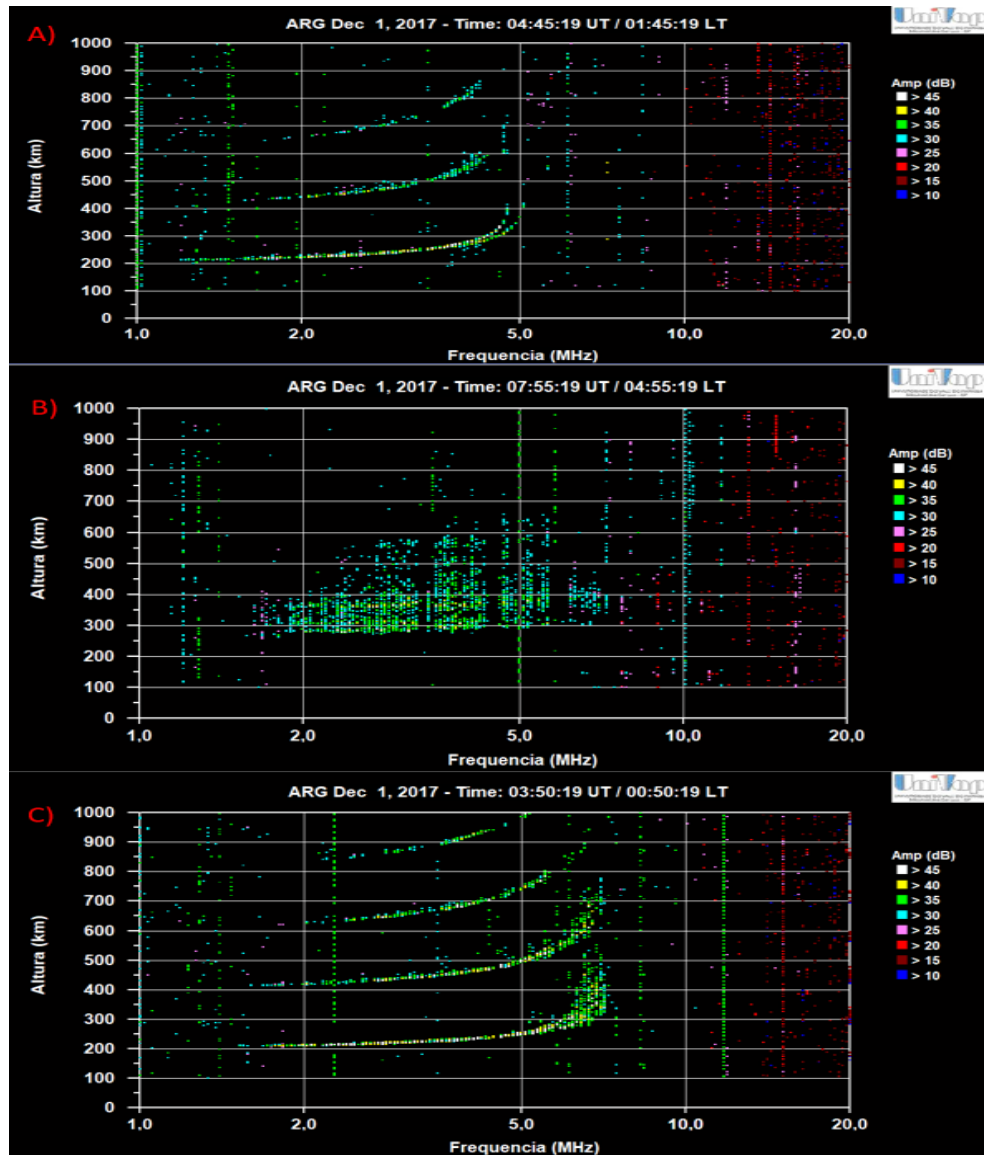
## 2.5 IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

As irregularidades ionosféricas da camada F são estruturas alinhadas ao campo magnético terrestre e tem densidade menor que o plasma ambiente, e apresentam uma forte variação espaço-temporal na densidade eletrônica, (ABALDE *et al.*, 2001; PIMENTA *et al.*, 2001, 2003; FAGUNDES *et al.*, 2009). A ocorrência das irregularidades ionosféricas depende do ciclo solar, da hora local, da estação do ano, da latitude e longitude e de perturbações geomagnéticas (ALFONSI *et al.*, 2013; BANOLA *et al.*, 2005; SPOGLI *et al.*, 2013; FAGUNDES *et al.*, 2020; FEJER *et al.*, 1979).

Assim, ao anoitecer, a região próxima ao terminador solar apresenta um gradiente abrupto de condutividade integrada ao longo do tubo de fluxo do campo magnético (CANDIDO, 2008). Logo após o pôr do sol o campo elétrico zonal de leste é intensificado. A ação do campo elétrico zonal intensificado (Leste) e o campo magnético (norte) produz uma deriva vertical para cima e a camada F tem rápida subida ( $\vec{U}_z = \vec{E}_{Leste} \times \vec{B}_{Norte}$ ), este fenômeno é chamado pico pré-reversão do campo elétrico. Esse fenômeno cria condições para a geração de irregularidades ionosféricas na região equatorial, estas irregularidades podem ou não se estender para as baixas latitudes. Quando as irregularidades se estendem para baixas latitudes, tornam-se irregularidades de grande escala (também chamadas de bolhas de plasma) ou quando ficam confinadas na região equatorial são chamadas de irregularidades de média/pequena escala. As irregularidades ionosféricas são geradas pela instabilidade Rayleigh-Taylor (maiores informações ver (KELLE, 2009; CÂNDIDO, 2008; SCHUNK; NAGU, 2000).

Quando as irregularidades de plasma entram no campo de visão de uma ionossonda elas produzem um ionograma característico do tipo “spread-F” (Veja Figura 7). Estes ionogramas apresentam um espalhamento que pode ser em classificado como em a “range” (Figura 7B) ou frequência (Figura 7C). Os instrumentos terrestres (óticos, ionossondas e radar) e plataformas espaciais (foguetes e satélites) têm sido empregados para estudar as irregularidades ionosféricas, nas últimas sete décadas (WANG *et al.*, 2018). Recentemente GPS-TEC tem sido utilizado para estudar as irregularidades ionosféricas de grande, média e pequena escala, utilizando os parâmetros calculados a partir do TEC (ROT, ROTI e S4) (JIN *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2009; KUMAR, 2020).

Figura 7. Ionogramas representativos de um período noturno em função da frequência (MHz) e altura (km). A) Ionograma sem espalhamento, B) Ionograma com espalhamento do tipo range. C) Ionograma com espalhamento do tipo frequência. Dados obtidos com uma ionossonda CADI localizada em Araguatins-TO (5,7°S e 48,1°O) em 01/12/2017 para os horários de 01:45:19 LT, 04:55:19 LT e 00:50:19 LT, respectivamente.



Fonte: Autor

## 2.6 AS ONDAS PLANETÁRIAS NA ESTRATOSFERA POLAR

As ondas planetárias PW1 e PW2 são importantes para a origem do SSW, por este motivo iremos abordar algumas das suas características. As PWs são perturbações atmosféricas com períodos de dias e comprimento de onda horizontal de escala global e são importantes na redistribuição de energia e momento na estratosfera polar. Outra característica importante

dessas ondas são as grandes amplitudes no inverno e amplitudes muito pequenas no verão (GAIGEROV, 1973).

Assim, além dessas características mencionadas anteriormente, as PWs são classificadas como propagantes ou estacionárias. As ondas propagantes são de modos normais da atmosfera (ondas livres), por outro lado, as ondas estacionárias são forçadas por características topográficas, principalmente grandes cadeias de montanhas. As ondas propagantes apresentam números de onda zonais  $s = 1$ ,  $s = 2$  e  $s = 3$ , onde, estes números de onda zonal indica períodos próximo de 5 dias, 8 dias e entorno de 16 dias (SCHRIJVER; SISCOE, 2010). Enquanto, as ondas estacionárias em escala planetária são característica da atmosfera média durante o período de inverno. Uma perturbação do tipo PW pode penetrar na atmosfera, dependendo do seu número de onda horizontal  $k$  ( $k = 2\pi / \lambda$ ).

Os distúrbios em escala planetária com  $k$  pequenos podem penetrar na atmosfera na forma de PW (KHOMICH *et al.*, 2008). Estas PWs são conhecidas como ondas de Rossby, e são as mais importantes para o transporte estratosférico. Portanto, o transporte estratosférico desloca massa de ar para a tropopausa e desempenha um papel importante na determinação da composição química e das propriedades radiativas, tanto da troposfera quanto da estratosfera.

A força restauradora dessas ondas é a variação do efeito Coriolis com a latitude, isto é, devido a dinâmica da geografia da Terra com sua forma quase esférica e sua paisagem de montanhas e elevações continentais (MOHANAKUMAR, 2008). Além disso, é considerado que as interações não lineares das marés atmosféricas com as ondas de gravidade favorecem o surgimento das ondas planetárias. Assim, a mudança do parâmetro de Coriolis ( $f = 2\Omega \sin\phi$ ) com a latitude é o gradiente isentrópico de vorticidade potencial (PV), onde  $\Omega$  é a velocidade angular da Terra e  $\phi$  é a latitude. Portanto, a vorticidade potencial é uma quantidade relacionada à vorticidade do fluido.

A vorticidade potencial é uma medida da razão da vorticidade absoluta para uma distância entre duas superfícies de temperatura potencial medida em unidades de pressão. Sendo que, a onda planetária estacionária conservam a vorticidade potencial (PV), no qual a essa vorticidade é a circulação absoluta de uma parcela de ar que está encerrada entre duas superfícies isentrópicas (MOHANAKUMAR, 2008). Portanto, na atmosfera se uma parcela de ar tem um movimento adiabático e sem atrito o PV é conservado Andrei, Pietrissi e Stefan. (2019). Assim, o PV pode ser representado pela equação 1 (ANDREI; PIETRISI; STEFAN, 2019).

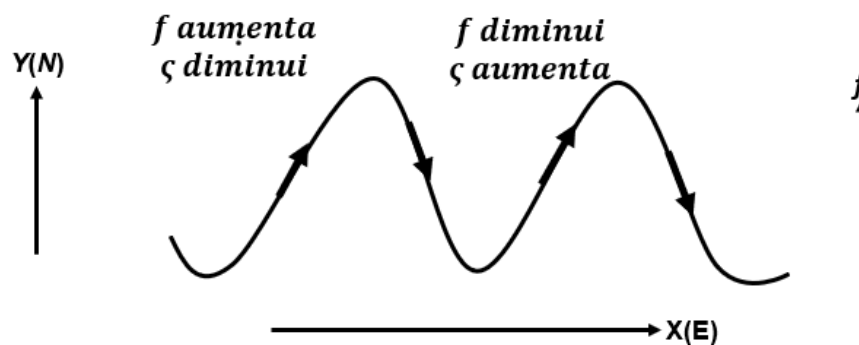
$$-g(\zeta_{\theta} + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} = \text{constante} \quad 1$$

onde,  $g$  é aceleração de gravidade,  $\zeta_{\theta} + f$  é a vorticidade absoluta e  $\frac{\partial \theta}{\partial p}$  é a variação vertical da temperatura potencial. A equação da vorticidade relativa ( $\zeta = \hat{k}(\vec{V} \times \vec{V})$ ) considera os ventos de grande escala principalmente horizontais, além disso, o principal interesse na equação do vetor de vorticidade é referente a componente vertical. Isso é devido apenas os movimentos em um plano horizontal contribuírem para o movimento com rotação em torno de um eixo vertical.

O vetor de rotação da Terra pode ser separado em um componente ao longo da direção vertical local e da direção ortogonal ao norte. Logo, a derivada da rotação em torno do componente vertical é definida de vorticidade planetária, na qual ela é considerada como parâmetro de Coriolis. Assim, vorticidade planetária é somada a relativa correspondendo matematicamente a vorticidade absoluta. Pode ser notado pela equação 2, a vorticidade absoluta expressa pela soma das duas vorticidades mencionadas anteriormente (SCHRIJVER; SISCOE, 2010).

$$\eta = \zeta + f \quad 2$$

Onde,  $\eta$  indica a vorticidade absoluta na atmosfera livre, que é aproximadamente conservada para pequenas escalas de tempo, o que permite discutir o mecanismo das ondas planetárias. A Figura 8 mostra o mecanismo do movimento das ondas planetárias com base na conservação da vorticidade absoluta ao longo da trajetória de uma parcela de ar.



Fonte: Schrijver e Siscoe. (2010)

A vorticidade relativa pode ser resolvida em um componente devido à curvatura ao longo do caminho e a mudança normal para o caminho. Apenas a interação entre curvatura e vorticidade planetária é considerado para a Figura 8, o qual é mostrado para o Hemisfério Norte. Uma parcela de ar que se move para o leste recebe um deslocamento para o norte em um ponto onde a vorticidade relativa é nula (um ponto de inflexão), portanto, à medida que se move para o norte, ela se move em direção a maiores valores de vorticidade planetária  $f$ . Assim, para conservar a vorticidade absoluta, a parcela que se move para o norte adquire vorticidade relativa negativa crescente até atingir um ponto de inflexão, onde começa a se mover para o sul em direção à vorticidade planetária ( $f$ ) decrescente. Logo, quando a parcela de ar se move para o sul, a curvatura de sua trajetória aumenta e adquire curvatura positiva após passar por um ponto de inflexão. Sendo que, após atingir um ponto de inflexão e começa a se mover para o norte, portanto, isso é repetido para dar movimento da onda.

### **2.6.1 PROPAGAÇÃO VERTICAL DA ONDA PLANETÁRIA**

As ondas de Rossby de escala planetária que se propagam para cima são a responsáveis pela variabilidade dia-a-dia na estratosfera extratropical no inverno (DOMEISEN; MARTIUS; JIMÉNEZ-ESTEVE, 2018). Assim, as ondas planetárias geradas na troposfera e que propagam verticalmente contribuem para o aquecimento dos ventos estratosférico e transferência de momento. Além disso, devido a propagação vertical das ondas planetárias, elas podem gerar o acoplamento dinâmico entre a baixa e a média atmosfera. Visto que em relação a estes distúrbios, a estratosfera pode ser considerada uma região livre de fontes geradoras de ondas (HOLTON, 1972).

Os ventos médios que sopram para leste também permitem propagação vertical de ondas planetárias com grandes comprimentos de onda (GOMES, 2013; CHARNEY; DRAZIN, 1961). No entanto, quando os ventos médios sopram para oeste, as ondas encontram níveis críticos e são absorvidas. Assim, para maiores informações sobre base teórica da influência das ondas planetárias para região da estratosfera é apresentada por (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987).

Na estratosfera as ondas planetárias que são bloqueadas apresentam um momento angular para leste, este momento angular é depositado na estratosfera. Este processo induz uma desaceleração dos ventos de oeste e uma circulação meridional em direção aos polos. Assim, o

vento médio de oeste (o jato polar noturno) é enfraquecido, permitindo que mais ondas de escala planetárias se propaguem para cima. Portanto, se este processo continuar, o vento eventualmente reverte, formando uma camada crítica onde o vento zonal médio corresponde à velocidade de fase da onda planetária (ou ondas de Rossby). Portanto, as ondas de Rossby em escala planetária, se propagam verticalmente, desde que suas velocidades de fase sejam para oeste (mas não muito fortemente para oeste) em relação ao fluxo médio. Como as ondas planetárias de maior amplitude são estacionárias em relação ao solo, apenas no hemisfério norte, onde os ventos médios são de oeste em toda a atmosfera média, as amplitudes das ondas planetárias são comparáveis à magnitude do vento zonal médio.

No entanto, no hemisfério sul, essas ondas não podem se propagar além do nível em que o fluxo zonal médio desaparece, portanto, são incapazes de penetrar além da estratosfera inferior. O principal fator que influencia a propagação das ondas planetárias para cima é a dependência das condições apresentada pela estratosfera, ou seja, a evolução lenta do vento e da temperatura na estratosférico (DOMEISEN; MARTIUS; JIMÉNEZ-ESTEVE, 2018). A propagação vertical das ondas de Rossby considerando que a velocidade zonal média do vento ( $\bar{u}$ ) e  $N$  (frequência Brunt Väisälä) sejam constantes, a velocidade de fase será  $c=0$ , sendo estacionária em relação ao solo.

Portanto, as ondas de Rossby (estacionárias) que se propagam verticalmente, logo só podem existir em ventos que são de oeste e não muito fortes como já mencionado. O critério para que uma onda de Rossby propague verticalmente com base na equação 3, é dado por  $0 < \bar{u} - c < \bar{u}_c$  quando os termos  $\beta$  (parâmetro de Rossby),  $k^2$  (número de onda zonal),  $l^2$  (número de onda meridional) e  $\varepsilon$  (constante do meio) são considerados todos positivos (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987). A equação 3, além de ser um modelo idealizado útil de uma onda planetária em propagação na estratosfera no período de inverno, faz parte da solução de uma equação para um critério da onda cuja fase é estacionária com relação ao solo com  $c = 0$ .

$$0 < \bar{u} - c < \bar{u}_c = \beta \left[ k^2 + l^2 + \varepsilon \left( \frac{1}{4H^2} \right) \right]^{-1} \quad 3$$

A propagação vertical das ondas estacionárias na estratosfera é sensível à estrutura do vento médio zonal e, especialmente, sua curvatura latitudinal e a latitude do jato noturno polar (MATSUNO, 1970). Portanto, é considerado que apenas os componentes  $s = 1$  e  $2$  (número de onda) podem se propagar para a estratosfera. Para comprimentos de onda mais longos, a velocidade da fase ( $c$ ) da onda de Rossby para o oeste pode ser grande o suficiente para

equilibrar a advecção para o leste pelo vento zonal médio, de modo que a perturbação resultante seja estacionária em relação à superfície da Terra. Normalmente, as ondas planetárias (PW) não são capazes de penetrar em altitudes acima da termosfera, por outro lado, se verifica sua presença em regiões mais baixa (LASTOVICKA, 2006). Assim, uma interação importante na propagação das ondas PW entre a ionosfera e estratosfera pode ser um indicador para o acoplamento vertical entre a atmosfera média e o sistema termosfera e ionosfera.

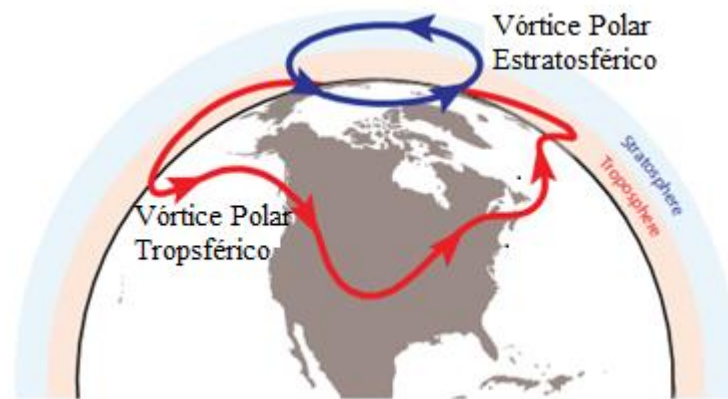
### **2.6.2 O VÓRTICE POLAR**

Na literatura da ciência atmosférica, o termo vórtice polar é mais comumente utilizado como uma abreviatura para vórtice circumpolar e refere-se a um fluxo de oeste (oeste para leste) em escala planetária que circunda o polo em latitudes médias ou altas (WAUGH *et al.*, 2016). Além disso, o vórtice polar é considerado como um sistema de massa de ar ciclônico em grande escala persistente nas regiões polares geográficas da Terra. Assim, o vórtice polar está localizado na parte superior da troposfera e na estratosfera, sendo que sua origem é caracterizada pela ausência dos aquecimentos solares das regiões polares (RESMI, 2012).

Na atmosfera da Terra estão presentes dois vórtices polares bem diferentes, eles são caracterizados como vórtice troposférico e o estratosférico, que são apresentados na Figura 9, pode ser notar que o vórtice na troposfera é muito maior do que o vórtice na estratosfera e que os dois não estão diretamente conectados. O vórtice polar estratosférico é formado pela circulação estratosférica, sendo caracterizada por forte fluxo de oeste (ventos de oeste) em baixa latitude nos polos durante o inverno do Hemisfério Norte (NH).

Assim, o vórtice polar é geralmente formado no início do inverno em consequência do resfriamento da atmosfera polar norte (BALDWIN; DUNKERTON, 2001). Além disso, é considerado que o processo de resfriamento por emissões radiativas no infravermelho é predominante, provocando a redução da temperatura com o fluxo do jato polar transcorrendo simultaneamente (PAES, 2012). Os intensos ventos que circundam no Polo escoando na direção de oeste - leste, nas regiões mais externas do vórtice polar, apresentam-se com intenso contraste com os fracos ventos de leste - oeste observado no hemisfério sul, apresentando pouca variabilidade. É também mostrado que a velocidade ao redor do vórtice chega aos  $100 \text{ ms}^{-1}$ , no entanto, o ar no centro do vórtice na ausência de luz solar torna-se muito frio, chegando à temperatura abaixo de  $-80^\circ \text{ C}$  (MOHANAKUMA, 2008). A parte inferior do vórtice polar está entre 15 e 20 km de altura na região inferior da estratosfera, e a parte principal do vórtice polar é localizada entre 20 km e aproximadamente 50 km de altura.

Figura 9. Representação do vórtice polar troposférico e estratosférico



Fonte: Waugh *et al.* (2016)

A formação da estrutura dinâmica do vórtice polar domina a circulação da estratosfera polar no período das estações de inverno e primavera. Logo, essa circulação na estratosfera polar proporciona um acoplamento entre a estratosfera com as camadas troposfera e mesosfera. No entanto, todas as perturbações em grande escala do vórtice polar que podem ser de interesse nas discussões sobre o tempo e o estado do clima podem ser descritas em termos das ondas Rossby. Apenas as ondas de Rossby de grande escala espacial são capazes de se propagar para cima na estratosfera, além disso, a propagação de tais ondas na estratosfera varia com as condições da própria estratosfera (CHARNEY; DRAZIN, 1961).

Assim, a mais importante das ondas Rossby são as estacionárias, as quais propagam para cima a partir da troposfera e são fortes e variáveis no inverno (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987). Portanto, estas ondas ao deslocar para a estratosfera são dissipadas, e vão produzir o aquecimento por desaceleração o fluxo médio (MATSUNO, 1971).

## 2.7 O AQUECIMENTO ESTRATOSFÉRICO SÚBITO (SSW)

A circulação polar ao ser perturbada por atividades de ondas planetárias (PWs) de propagação ascendente de origem troposférica que se dissipam na estratosfera, resulta no Aquecimento Estratosférico Súbito (SSW) (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987; MATSUNO, 1971). As PWs que contribui para o processo de formação do fenômeno de SSW, são classificadas em ondas de número zonal 1 e 2 (LABITZIKE, 1978, 1981).

Uma das características importantes das PWs, é sua intensidade de propagação. Assim, ondas planetárias de forte intensidade são capazes de se propagar para a estratosfera de alta latitude, em contraste com ondas constantes de intensidade pequena ou moderada que são refratadas em direção à estratosfera de baixa latitude (MATSUNO, 1970). Portanto, os SSWs são fenômenos meteorológicos de grande escala que ocorre no hemisfério norte ou no hemisfério sul, que estão associados a um rápido aumento da temperatura estratosférica polar.

O conhecimento inicial do fenômeno de SSW apresentando na literatura científica, é dado pelo estudo realizado por (SCHERHAG, 1952). Neste estudo observou-se um aumento repentino na temperatura medida por uma radiossonda em 10-mbar sobre Berlim em 30 de janeiro de 1952 (SCHOEBERL, 1978). O estudo sobre Berlin foi complementado por observações de foguetes até a mesosfera. Após este trabalho, uma proposta de explicação teórica do fenômeno do SSW foi desenvolvida por Matsuno, (1971). Portanto, estas contribuições no estudo dos eventos de SSWs permitiu estabelecer a interação entre SSWs e a ionosfera.

Assim, trabalhos foram publicados nas últimas 2 décadas sobre a relação entre SSW e perturbações ionosféricas, como exemplo (CHAU *et al.*, 2009). Além destes trabalhos, investigações científicas com aplicação de novas técnicas, ampliou a compreensão da resposta ionosférica referente aos SSWs de forma local e global. Como por exemplo, estudos realizados por (FAGUNDES *et al.*, 2015; GONCHARENKO *et al.*, 2010a, 2010b; DE JESUS *et al.*, 2017; UPADHAYARA; MAHAJAN, 2013; CHAU *et al.*, 2010, 2012; LIU *et al.*, 2011). Os SSWs são fenômenos que apresentam maior ocorrência no período de inverno no Hemisfério Norte (HN). Por outro lado, estes fenômenos no Hemisfério Sul (HS), mostram uma baixa ocorrência, embora um único SSW forte no HS tenha sido observado em setembro de 2002. Portanto, os eventos de SSW são originados nas regiões polar, mas perturbações na dinâmica global da mesosfera e baixa termosfera são observados e vários artigos estudaram estas perturbações. Por exemplo, devido ao efeito dinâmico além da estratosfera, e que se estende desde a superfície da Terra até a mesosfera e ionosfera (HOFFMANN *et al.*, 2007; GONCHARENKO *et al.*, 2010).

Assim, outros trabalhos científicos se concentraram em compreender a variabilidade ionosférica e as mudanças na atmosfera inferior durante os eventos de SSW. Portanto, existe muitos trabalhos que exploram detalhes da resposta ionosférica em baixas latitudes, equatorial e médias latitudes devido a interação do SSW e a ionosfera (GONCHARENKO; ZHANG, 2008; GONCHARENKO *et al.*, 2013a, 2013b; VINEETH *et al.*, 2009; CHAU *et al.*, 2010, 2012; LIU *et al.*, 2011; BESSARAB *et al.*, 2012; FANG *et al.*, 2012). Além disso, a

investigação do conteúdo eletrônico total (TEC) e a resposta da camada F nas latitudes equatorial, baixa e média no setor americano (FAGUNDES *et al.*, 2015; VIEIRA *et al.*, 2017; DE JESUS *et al.*, 2017). Sendo que, outras propostas de trabalhos mostraram também que, durante os SSWs ocorrem mudanças significativas em parâmetros ionosféricos como, frequência crítica da região F (foF2) (PANCHEVA; MUKHTAROV, 2011; YUE *et al.*, 2010). Estudo da variabilidade da região F2 durante eventos de SSWs de 2007, 2008 e 2009 (UPADHAYAYA; MAHAJAN, 2013). Além disso, estudos mostraram a influência do SSW na frequência de ocorrência das irregularidades ionosféricas, utilizando dados de GPS-TEC e ionossondas em baixa latitude no setor brasileiro (DE PAULA *et al.*, 2015).

### 2.7.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SSWs

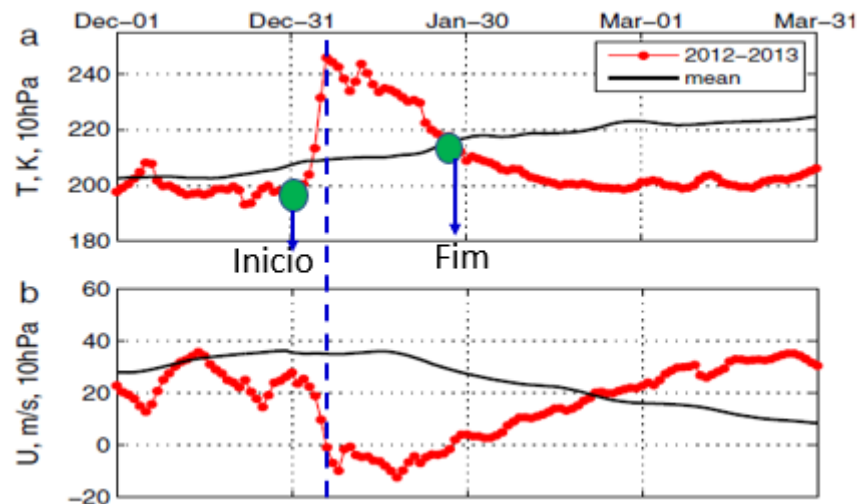
Diferentes critérios são usados para classificar os distintos tipos de SSW. A magnitude da temperatura atingida, direção do vento zonal e época do ano em que ocorre. Baseado nestes critérios os eventos SSWs são classificados em forte, fracos, canadenses e final.

### 2.7.2 O SSW FORTE

Os SSWs classificados como forte ocorrem a aproximadamente a cada dois anos no Hemisfério Norte (HN). Geralmente, durante o SSW forte a temperatura pode atingir ~40K - 60K acima da média histórica e o vento zonal reverte de oeste para leste em 60°N à um nível de pressão de 10 hPa (30km). Uma forte atividade das ondas planetárias é responsável pela reversão do vento zonal (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987; DE JESUS *et al.*, 2017; ALEXANDER; SHEPHERD, 2010; KUTTIPURATH; NIKULIN, 2012; TAO *et al.*, 2015; BUTLER *et al.*, 2015; YADAV *et al.*, 2017).

A Figura 12 mostra um exemplo da variação dos parâmetros temperatura (T) e vento zonal (u) durante um SSW forte que ocorreu entre dezembro de 2012 a março de 2013. Neste SSW pode-se notar que ocorreu um rápido crescimento da temperatura estratosférica (~50K) a 90°N (Figura 12a). Onde as linhas vermelha e preta indicam a variação da temperatura durante o SSW e a média histórica da temperatura, respectivamente. Além disso, na Figura 12b mostra-se a mudança da direção do vento zonal a 60° N em 10hPa, indicada pela linha vermelha. A linha preta indica a média histórica do vento zonal médio ( $\bar{u}$  em m/s).

Figura 10. (a) A temperatura em 90°N a uma altura de 10 hPa durante o SSW (linha vermelha) (b) Vento zonal durante o SSW em 60° N a uma altura de 10 hPa (linha vermelha). As linhas pretas indicam a média histórica da temperatura e vento zonal e os círculos verdes indicam o início e fim do evento de SSW<sub>2012-2013</sub>.

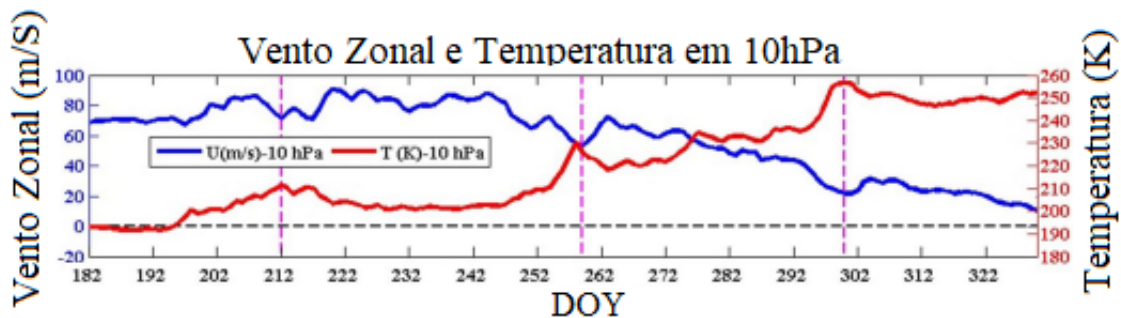


Fonte: Modifica de Goncharenko *et al.* (2013)

### 2.7.3 O AQUECIMENTO FRACO

No SSW fraco a temperatura a 90°N pode atingir entre ~20K e 30K acima da média histórica. Durante estes eventos a velocidade zonal não reverte, apenas diminui a sua magnitude (O'NEILL, 2003). A Figura 13 mostra a variação do vento zonal e temperatura durante o SSW que ocorreu entre 1991 e 1992, estes parâmetros estratosféricos são indicados pela linha azul e vermelha, respectivamente.

Figura 11. Exemplo de um SSW fraco. A temperatura estratosférica a 60°-90°N (linha vermelha) e vento zonal médio 70°-80° N (linha azul) em 10 hPa para o evento de SSW de 1991-1992. As linhas verticais pontilhadas indicam os dias que ocorre o maior valor da temperatura estratosférica.



Fonte: Modificada de Eswaraiah *et al.*, 2017

#### 2.7.4 O AQUECIMENTO FINAL

O vórtice polar estratosférico é caracterizado por um ciclo anual que termina com uma ruptura relativamente rápida conhecida como aquecimento final estratosférico, o qual ocorre tipicamente na primavera (BLACK *et al.*, 2006). Especificamente, os aquecimentos finais no início da primavera que ocorrem em média no início de março tendem a ser precedido por invernos sem o SSW. No entanto, os aquecimentos finais no final da primavera que ocorrem em média até o início de maio são precedidos por eventos de SSW que ocorre no meio do inverno. Segundo (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987; BLACK *et al.*, 2006) em cada primavera quando o vórtice polar estratosférico se divide, a transição dos vórtices circumpolares do oeste para os ventos de leste é geralmente acompanhado por um rápido aquecimento polar semelhante e enfraquecimento do jato polar, que é conhecido como aquecimento final estratosférico.

Assim, essa transição ocorre de forma perturbada por não ser conduzida somente pelo aquecimento radiativo, mas também, por influência do aquecimento estratosférico súbito de uma forma mais esporádica. Os aquecimentos finais são de maiores intensidades no polo sul, onde há também um enfraquecimento do vórtice polar de forma gradativa. Assim, o vórtice é originado de regiões superiores da estratosfera com orientação de cima para baixo, onde o ar frio nos polos é substituído por uma massa de ar quente de forma progressiva. O aquecimento final ainda permite ser classificado de baixa e alta intensidade e para o período de ocorrência se classifica como precoce ou tardio (LABITZKE; NAUJOKAT, 2000). Os Aquecimentos Finais marcam a transição do vórtice ciclônico frio no inverno para o anticiclone quente centrado no polo no verão. Sua intensidade varia muito e eles podem ser divididos em aquecimentos finais maiores e menores. O momento em que a Final Os aquecimentos ocorrem - quando os ventos de oeste do inverno são substituídos pelos de leste de verão - também varia bastante, por isso são divididos em primeiros e tardios Aquecimentos Finais. Naturalmente, também existem Aquecimentos Finais no Hemisfério Sul (LABITZKE; VAN LOON, 1999).

#### 2.7.5 O AQUECIMENTO CANADENSE

O evento de SSW denominado de Aquecimento Canadense (*Canadian Warming*) ocorre no início do inverno entre os meses de novembro e dezembro. O aquecimento canadense pode

reverter o gradiente meridional de temperatura e, em alguns casos alterar brevemente a direção do vento zonal sobre a calota polar. O vórtice polar pode ser deslocado e distorcido, mas não sofre uma ruptura (O'NEILL, 2003). Isso, gera uma mudança nas condições meteorológicas da troposfera, já que o aquecimento canadense está associado a uma intensificação do anticiclone (*Aleutian High*), a qual se movem em direção ao polo norte. O aquecimento canadense gera um aquecimento menor da estratosfera quando comparamos com os eventos de SSW fortes (LABITZKE; NAUJOKAT, 2000).

## 2.7.6 IMPACTO E ACOPLAMENTO DOS SSWs FORTES NA IONOSFERA

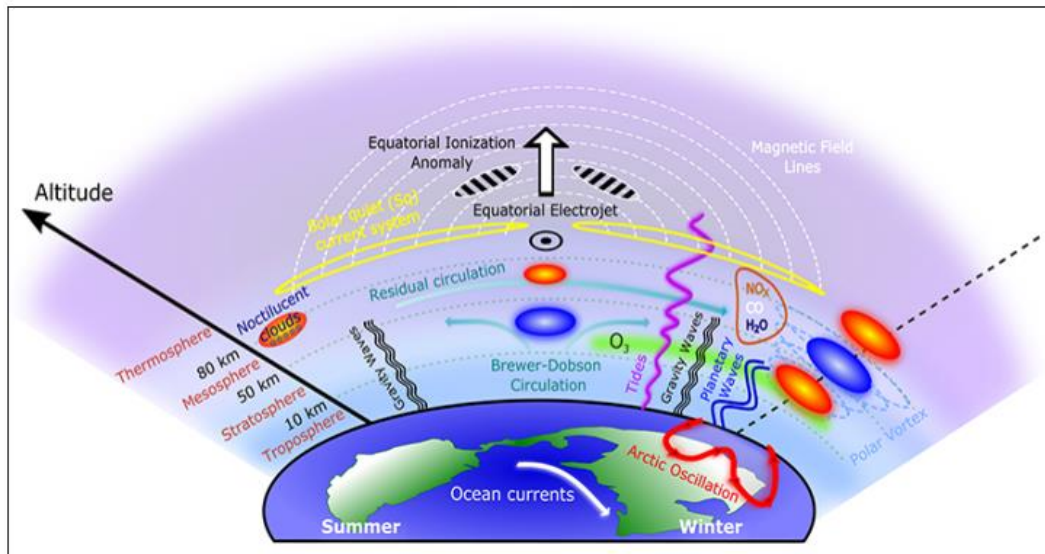
As perturbações ionosféricas devido ao SSW fortes ou fracos tem sido investigada nas últimas décadas, os estudos indicam que o VTEC, EIA, deriva de plasma e ocorrência de Spread-F são modificados durante o SSW (GONCHARENKO *et al.*, 2010b; YUE *et al.*, 2010; FEJER, 2011; FAGUNDES *et al.*, 2015; CHAU *et al.*, 2012; PANCHEVA; MUKHTAROV, 2011; BUTLER *et al.*, 2015; TAO *et al.*, 2015); YIGIT *et al.*, 2016; YADAV *et al.*, 2017).

As observações dos fenômenos ionosféricos associados aos fortes eventos de SSWs, ocorrem principalmente durante períodos geomagnéticas e solares calmos. Isso sugere que as alterações observadas no eletrojato equatorial, deriva do plasma, conteúdo eletrônico total são causadas pelos os SSWs. Além disso, acredita-se que as perturbações originadas na baixa atmosfera durante eventos SSW, são acopladas à ionosfera por meio de interação não linear entre ondas planetárias quase-estacionárias e marés migratórias. Logo, esta interação gera uma modulação do o dínamo da região E, o qual transfere energia e momento para a ionosfera.

O SSW de 2008/2009 é um dos eventos extensamente estudado, com o qual foi feito vários trabalhos científicos mostrando grande perturbações ionosféricas. Por exemplo, o estudo do campo magnético induzido na superfície pelo Eletrojato Equatorial (EEJ), as medições do Conteúdo Eletrônico Total (TEC), em janeiro de 2009, na eletrodinâmica equatorial e na ionosfera de baixa latitude ao longo das longitudes indianas identificando perturbações significativas durante e após o pico do SSW (YADAV *et al.*, 2017). As mudanças nos ventos da estratosfera-mesosfera durante SSWs levam a uma alteração nas marés atmosféricas nos hemisférios Norte e Sul, demonstrando a influência global dos SSWs na mesosfera (PEDATELLA *et al.*, 2018). Outras mudanças são também identificadas como nas marés atmosféricas que, chegam a ter interações não lineares, portanto se compreende que o processo de acoplamento com ondas planetárias acontece durante SSW (DOMEISEN, 2012). A Figura

14 mostra a existência da forte conexão entre os SSWs (ocorrência) e grandes mudanças em toda a atmosfera da Terra. Portanto, essas alterações podem afetar a química atmosférica, temperaturas, ventos, partículas neutras (partículas não ionizadas) e elétrons, e campos elétricos, e se estendem da superfície à termosfera.

Figura 12. Mostra os processos de acoplamento e variabilidade atmosférica que ocorrem durante os eventos de aquecimento estratosférico súbitos. Círculos vermelhos e azuis indicam regiões de aquecimento e resfriamento, respectivamente.



Fonte: Pedatella *et al.* (2018)

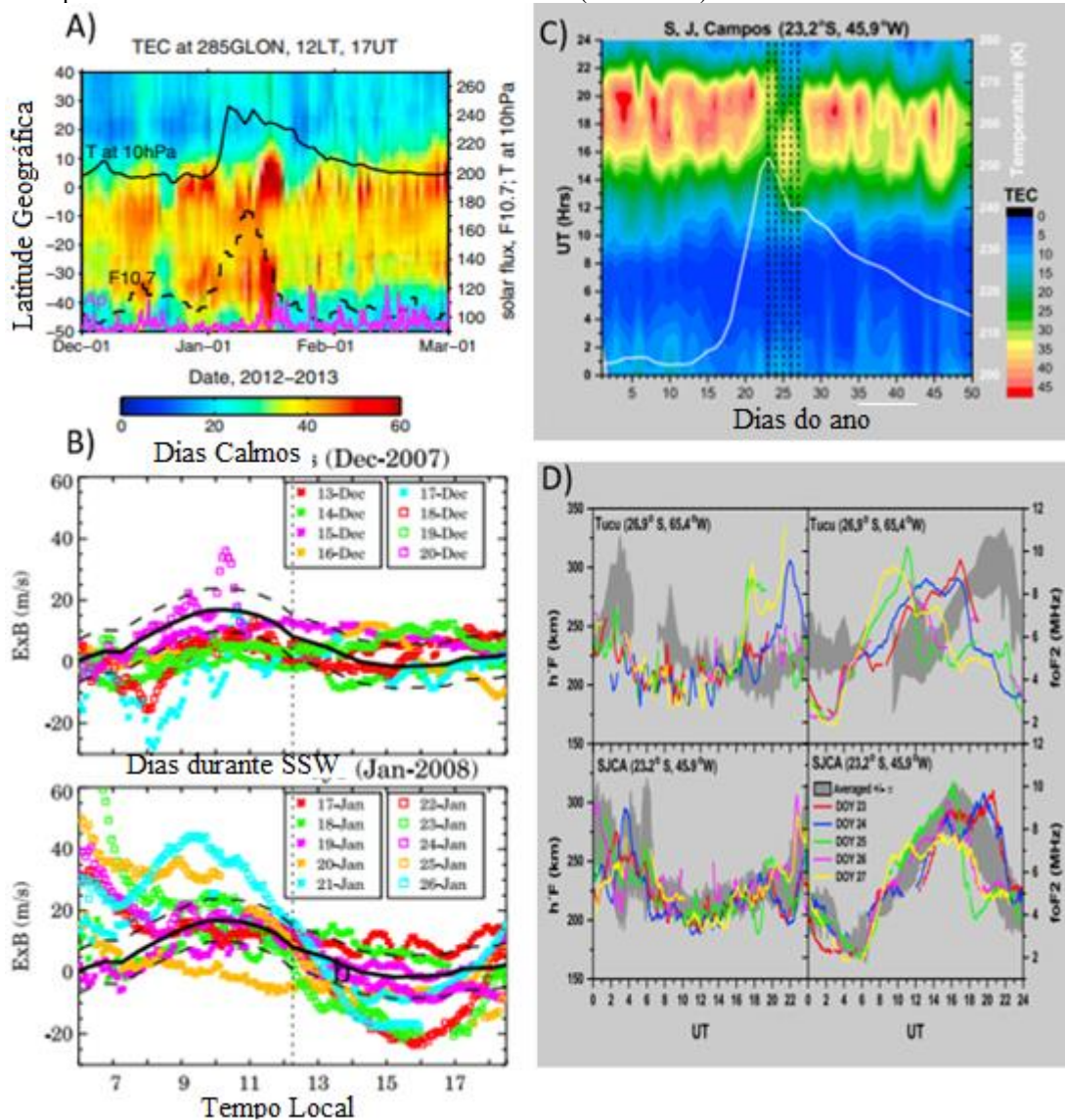
A ionosfera em baixa latitude, apresenta um acoplamento que continua ainda muito difícil de ser compreendido, onde as mudanças externas estão relacionadas com regiões superiores da atmosfera. Estudos mostram em condições de mínima atividade solar que, os eventos de SSWs associados a intensificação das ondas planetárias impulsionam novas causas de perturbações na ionosfera. Assim, durante um forte evento de SSW é observado que as grandes variações na ionosfera de baixa latitude vão ocorrer dias depois do evento. O fato é que durante estes fortes eventos, a atividade geomagnética e o fluxo da radiação solar não são as causas das grandes perturbações ionosféricas. Sendo que, é observado durante ocorrência dos SSW baixa atividade geomagnética e fluxo de radiação solar.

Além disso, em aquecimentos que se originam de perturbações na troposfera são observados alguns efeitos anômalos, como ocorrência da mudança no clima local, tomando como base, evidências que possam relacionar com os SSWs. Por exemplo, uma redução da temperatura na região da mesosfera do hemisfério norte, em oposição ao que acontece na região da estratosfera (LABITZKE, 1972). Assim, a queda da temperatura em regiões de baixas e altas latitudes se observa no início, durante e fim dos eventos de aquecimentos súbitos estratosféricos

(PAES, 2012). No entanto, tem-se observado que a queda da temperatura não é limitada apenas à mesosfera, ela também foi verificada na baixa termosfera (FULLER; ROWELL *et al.*, 2010). Os estudos atualmente para compreender o sistema de acoplamento da estratosfera–ionosfera–termosfera tem-se feito de forma intensiva.

O modelo desenvolvido que caracteriza o acoplamento desse sistema é o TIMEGCM (*NCAR Thermosphere–Ionosphere–Mesosphere Electrodynamics General Circulation Model*) (LIU *et al.*, 2011). Além disso, numerosos estudos observacionais e de modelagem realizados nos últimos anos demonstram uma variabilidade ionosféricas significativa em associação com os eventos meteorológicos de grande escala (fortes SSW). Assim, é visto na Figura 13 alguns dos resultados de estudo realizados associado a dois fortes fenômenos de SSWs, os quais apresentam as respostas ionosféricas durante suas ocorrências. Portanto, a Figura 13 mostra no lado esquerdo a deriva vertical do plasma tirada de medidas realizada em Jicamarca para o SSW (2008/2009), as observações do TEC a 75° W durante evento do SSW (2012/2013) e no lado direito o estudo do VTEC e as variações de h'F e foF2 para o evento de SSW (2008/2009). Para maiores informações ver os trabalhos de (FAGUNDES *et al.*, 2015; GONCHARENKO *et al.*, 2013; CHAU *et al.*, 2009).

Figura 13. A) Observações do TEC a 75° W durante o SSW (2012/2013), B) A deriva vertical do plasma sobre Jicamarca durante o SSW (2007/2008), C) Estudo do TEC no setor brasileiro durante o SSW (2008/2009) e D) Estudo do parâmetro ionosférico h'F e foF2 durante o SSW (2008/2009).



Fonte: Chau *et al.* (2009), Fagundes *et al.* (2009) e Goncharenko *et al.* (2013).

Os principais fatores que agem sobre a variabilidade da anomalia de ionização (EIA), são a atividade solar e os distúrbios do campo geomagnético (VIEIRA, 2015). Então, para o período de baixa atividade solar e geomagnético calmo, o agente principal da deriva vertical de plasma é o campo elétrico zonal. Portanto, estes fenômenos são considerados de baixa latitude, onde os ventos neutros de marés é o controlador do campo elétrico zonal por meio do dínamo ionosférico. Assim, estes fenômenos acompanhados da ocorrência de (SSW), pode causar alguma irregularidade na distribuição do (TEC) na região do equador magnético terrestre. A variação do conteúdo total de elétrons percebe-se uma elevação significativa da anomalia de ionização equatorial EIA com valores variando de 20 TECu relativo ao período que ocorre a

elevação da deriva seguida de uma redução no período da tarde com valores entre 10 e 15 TECu (GONCHARENKO *et al.*, 2010a).

A recente descoberta de grandes distúrbios ionosféricos associado aos SSW tem desafiado a compreensão atual sobre os mecanismos de acoplamento da estratosfera e ionosfera (GONCHARENKO *et al.*, 2012). É bem conhecido que as ondas responsáveis por causar os SSWs são originadas na camada da troposfera, as quais se propagam para camada da estratosfera. As ondas estacionárias de Rossby são causadas principalmente pela topografia da superfície e pelos padrões de aquecimento na baixa troposfera. Além disso, ondas de Rossby em grande escala podem ser causadas por instabilidade baroclínica na troposfera superior. No entanto, é muito difícil ligar a variabilidade estratosférica as estruturas das ondas troposféricas, sendo que atualmente não é possível prever aquecimentos súbitos na troposfera, isso é devido à forte variabilidade interna da troposfera.

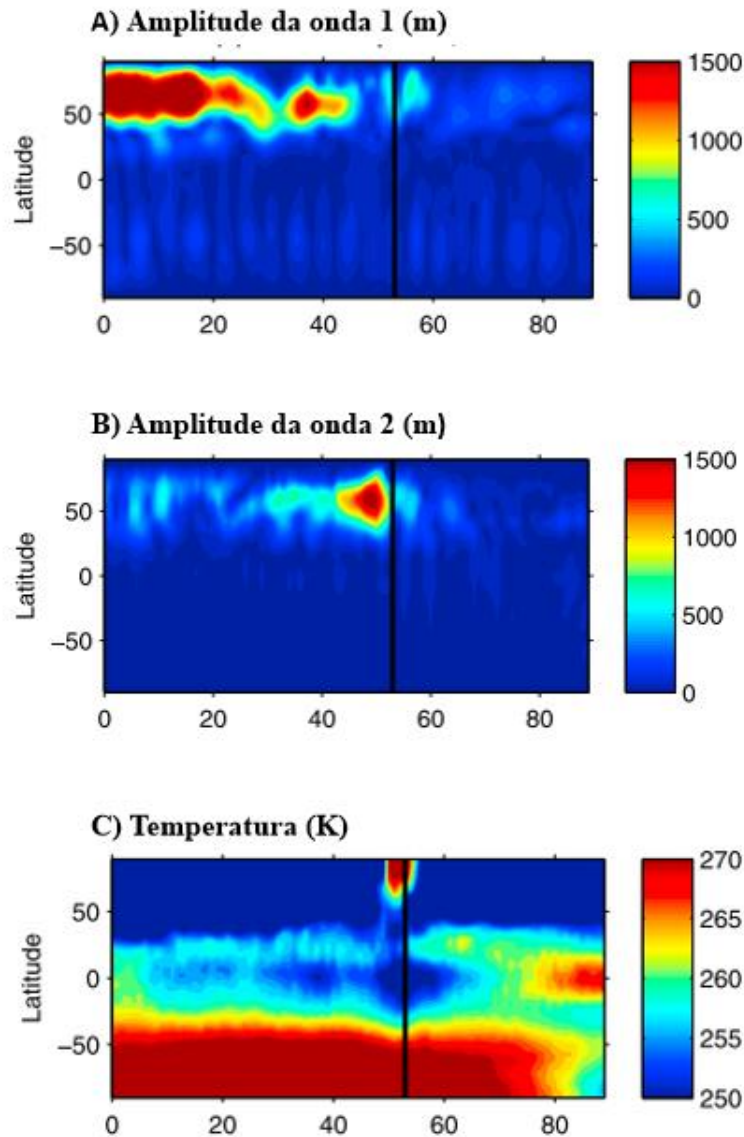
O bloqueio atmosférico (corrente de ar que ocorrem na atmosfera da Terra-*Jet stream*) tem sido frequentemente induzido como uma possível conexão entre a variabilidade da troposfera e o aquecimento estratosférico súbito. As ondas estacionárias de Rossby se propagam para estratosfera apenas no inverno, período em que os ventos de oeste apresentam predominância, não ocorrendo durante o verão apesar da predominância dos ventos de oeste (RESMI, 2012). Estas perturbações de grandes amplitudes na troposfera se manifestam na baixa estratosfera como anomalias que excitam os distúrbios das ondas de Rossby (NISHII; NAKAMURA, 2004; PETERS *et al.*, 2007). Assim, todo esse mecanismo envolvendo as interações não lineares de ondas planetárias e marés, sendo considerado como agente principal para o acoplamento durante a ocorrência dos SSWs em diferentes níveis da atmosfera. Portanto, vários trabalhos científicos recentes apresentaram fortes evidência de grandes variações na alta atmosfera (acima de 100 km) durante eventos de SSWs.

A variação de aquecimento na termosfera inferior entre ~120 km e 140 km e um resfriamento na ionosfera acima de ~150 foram registrados nas latitudes médias por (GONCHARENKO; ZHANG, 2008). Fortes variações iônicas verticais foram observadas durante a ocorrência de SSW em baixa latitude ionosféricas por (CHAU *et al.*, 2009). Perturbações nas variações da deriva de íons no equador magnético, os quais gerando mudanças intensas na densidade eletrônica de baixa latitude e contribuindo significativamente para a variabilidade da anomalia de ionização equatorial (GONCHARENKO *et al.*, 2010a; PANCHEVA; MUKHTAROV, 2011; LIU *et al.*, 2011). Portanto, todos estes trabalhos verificaram a influência do evento de SSW nos fenômenos que estavam sendo investigado.

Além disso, mostraram um resfriamento mesosférico, o qual foi observado no momento do aquecimento estratosférico nos trópicos, correlativo aos eventos de aquecimento estratosférico em latitudes médias e altas (SHEPHERD *et al.*, 2007). A Figura 14 mostra o desenvolvimento temporal e espacial de atividade das ondas planetárias 1 (painel A) com forte amplitude da onda nos primeiros 40 dias e um aumento moderado durante o evento SSW (indicado pela linha preta vertical).

A amplitude da onda planetária 2 (no painel B) atinge um máximo entre o dia 40 e a linha preta vertical e diminui à medida que o SSW se desenvolve. O painel C mostra o resfriamento estratosférico observados nos trópicos, o qual exemplifica um acoplamento durante a ocorrência do evento de SSW (2008/2009).

Figura 14. O desenvolvimento da atividade das ondas planetárias para (A) onda 1 e (B) onda 2, e (C) temperatura em dezembro de 2008 a fevereiro de 2009 em 2 hPa. O aumento na atividade das ondas planetárias em altas latitudes induz um resfriamento nos trópicos. A linha vertical indica o dia 23 de janeiro de 2009 (o pico da temperatura estratosférica em 90° N em 10 hPa) durante o evento de SSW (2008/2009).



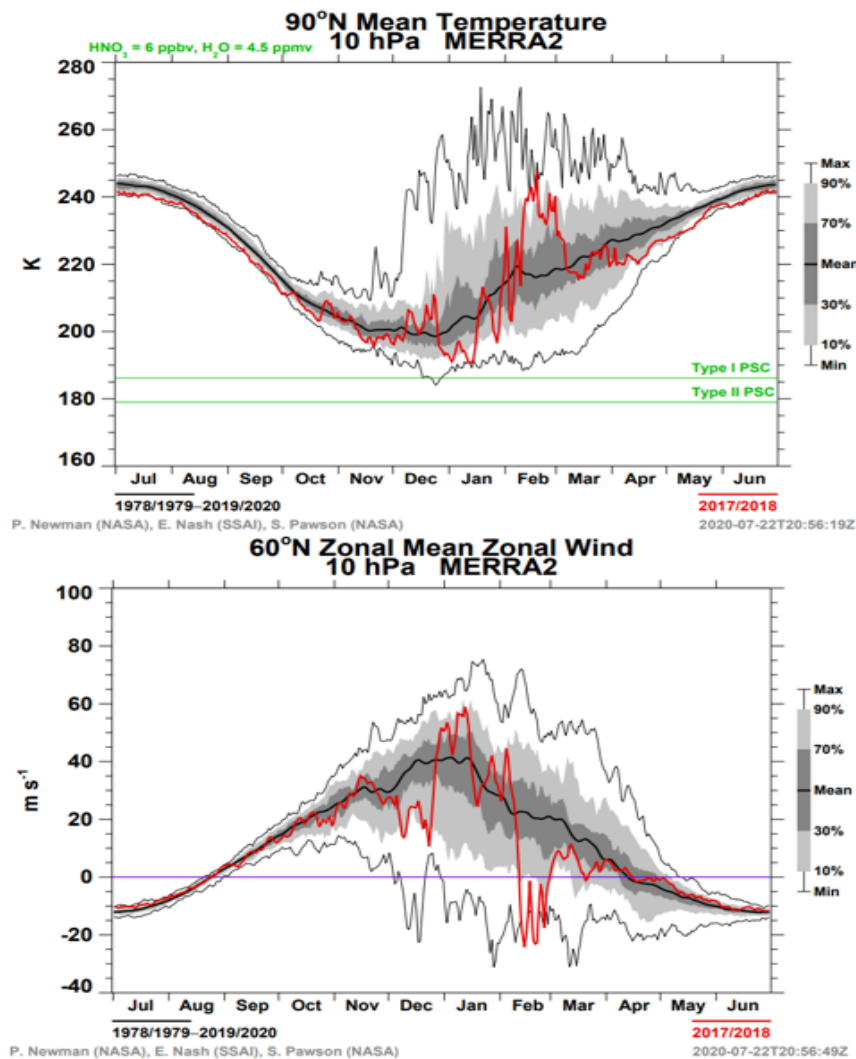
Fonte: Modificada Gocharenko *et al.* (2012)

## 2.8 OS SSW<sub>2017-2018</sub> (SSW) E SSW<sub>2018-2019</sub> (SSW2) CONSIDERADO NESTE ESTUDO

Neste trabalho foi investigado a resposta ionosférica, nos setores americano e africano, devido aos SSWs fortes que ocorreram entre 20/01/2018 a 21/03/2018 (SSW1-DOY 20 a 80) e 01/12/2018 a 31/01/2019 (SSW2-DOY 335 a 30). O comportamento dos parâmetros temperatura e vento zonal são mostrados nas Figuras 15 e 16. A variação diária da temperatura a 90°N e vento zonal a 60°N entre os meses de julho de 2017 a junho 2018 e julho de 2018 a

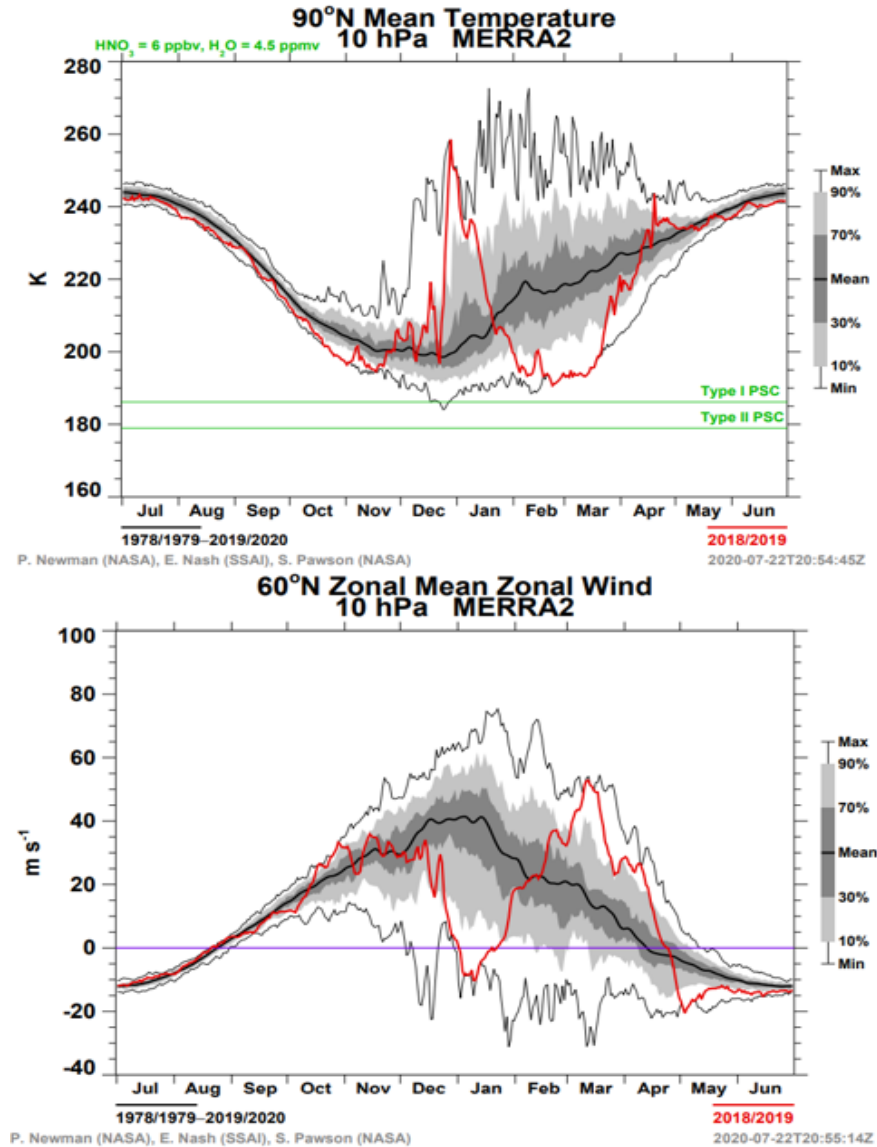
junho de 2019 (linha vermelha), ambos a 10 hPa (~32 km), respectivamente. As linhas pretas e as bandas cinzas escuras indicam as médias históricas e os desvios padrões (+/-) da temperatura e vento zonal. Na Figura 15 entre os meses de janeiro e março a temperatura estratosférica apresenta um aumento brusco e o vento zonal sofre uma reversão, indicando que o evento SSW1 é um evento forte. A Figura 16 indica que SSW2 ocorreu entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019 e o vento zonal reverteu no final de dezembro e início de janeiro, caracterizando também como um evento forte.

Figura 15. Variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal entre 01/07/2018 a 01/06/2019. A linha vermelha indica a variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal e linha preta indica a média histórica, a banda cinza +/- 1 desvio padrão. Além disso, as linhas verdes e vinho horizontais nos painéis superior e inferior representam as nuvens estratosféricas polares (em inglês PSC) e a inversão da velocidade do vento zonal a 60° N em 10 hPa para o SSW (2017-2018).



Fonte: [http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/data_services/met/ann_data.html) (01/01/2021)

Figura 16. Variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal entre 01/07/2018 a 01/06/2019. A linha vermelha indica a variação da temperatura estratosférica e da velocidade do vento zonal e linha preta indica a média histórica, a banda cinza (+/- desvio padrão). Além disso, as linhas verdes e vinho horizontais nos painéis superior e inferior representam as nuvens estratosféricas polares (em inglês PSC) e a inversão da velocidade do vento zonal a 60° N em 10 hPa para o SSW (2018-2019).



Fonte: [http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/data\\_services/met/ann\\_data.html](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/data_services/met/ann_data.html) (01/01/2021)

### 3. INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se uma breve descrição dos instrumentos e programas de redução de dados utilizados para investigar o comportamento da ionosfera durante os SSW1 (2017-2018) e SSW2 (2018-2019).

#### 3.1 SINAIS DE GPS

Os sinais de satélites de GPS são transmitidos continuamente com polarização circular à direita, onde estão as mensagens de navegação e esses códigos são transmitidos em duas frequências nas frequências L1 em  $f_1 = 1,57542$  GHz,  $\lambda_1 \approx 19,0$  cm) e L2 em  $f_2 = 1,2276$  GHz,  $\lambda_2 \approx 24,4$  cm (JIN et al., 2014). As duas frequências são múltiplas de uma frequência básica (ou fundamental) definida por  $f_0$ , cujo valor corresponde 1.023 MHz. As duas frequências são geradas simultaneamente pelos satélites, e assim permite que se faça correção dos efeitos gerados pela atmosfera e ionosférica. Além dessas duas frequências geradas, existe uma terceira frequência de onda portadora denominada de L5. Assim, a partir de 2006, a portadora L5 ( $L5=1,17645$  GHz,  $\lambda \approx 25,5$  cm) passou ser transmitida para usuários civis.

Assim, esses sinais devem fornecer uma maneira para determinar as posições em tempo real, no qual é feito modulando as portadoras com códigos (PRN), e estes códigos modulam em fase sobre as portadoras L1 e L2. Portanto, essa modulação sobre as portadoras oferece condições de efetuar medidas de distancias, a partir do tempo de propagação da modulação. Os dois códigos diferentes utilizado são os códigos P e o código C/A, onde o código P significa precisão ou protegido e código C/A significa aquisição. O código P tem uma frequência de 10,23 MHz, ou seja, uma sequência de 10,23 milhões de dígitos binários. A Tabela 3 apresenta um resumo das frequências das ondas portadoras de GPS. Além disso, a tabela apresenta as características do fator de multiplicação e o comprimento de onda  $\lambda$ (cm).

Tabela 3. As características dos sinais de GPS

Banda	Fator Multiplicador (f0)	Frequência (MHz)	Comprimento de Onda (cm)
L1	154	1575,42	19,0
L2	120	1227,6	24,4
L5	115	1176,45	25,5

Fonte: Autor

### 3.2 OBSERVÁVEIS DOS SISTEMAS DE GPS, GNSS

As observáveis básicas do GPS são pseudodistância e fase da onda portadora, bem como medições Doppler (XU, 2007). De acordo com (MONICO, 2000) as observáveis básicas do GPS/GNSS podem ser identificadas como pseudodistância a partir do código e fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora. As medidas de distâncias entre o satélite e o receptor baseiam-se nos códigos gerados nos satélites e no receptor. Sendo que, cada satélite de GPS transmite dois sinais nas portadoras L1 e L2 com frequências de 1575,42 MHz e 1227,60 MHz, respectivamente. Portanto, a portadora L1 está associada aos códigos C/A e Y (referente ao código P criptografado). No entanto, é importante mencionar que esse procedimento é similar para outros sistemas.

O atraso entre a chegada de uma transição particular do código, gerado no satélite e no receptor, corresponde o intervalo de tempo de propagação do sinal entre satélite e receptor. O receptor realiza essa medida usando a técnica de correlação do código, onde essa correlação considera o comprimento total do código de 1023 bits para o C/A. Portanto, a pseudodistância é obtida pela multiplicação do intervalo de tempo da propagação do sinal, resultante do processo de correlação, pela velocidade da luz.

A pseudodistância usa quatro ou mais satélites para determinar a posição do usuário após a posição dos satélites GPS ter sido obtida usando as efemérides da mensagem de navegação. Segundo (MONICO, 2000) a determinação da pseudodistância pode ser obtida da correlação do código P (correlação do código Y) sobre as portadoras L1 e L2. Assim, o modelo matemático da pseudodistância é apresentado pela equação 8.

$$PD_r^S = \rho_r^S + c(dt_r - dt^S + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PDr}^S) \quad (4)$$

Os termos desta equação no lado direito representam distância geométrica ( $\rho_r^S$ ), os erros nos relógios do satélite e receptor em relação ao sistema de tempo do GPS ( $dt_r, dt^S$ ), os efeitos

da refração ionosférica ( $I_r^s$ ), efeitos da troposfera ( $T_r^s$ ), o efeito do múltiplo caminho ( $dm_r^s$ ) e outros erros ( $\varepsilon_{PDr}^s$ ) associados.

### 3.2.1 FASE DA ONDA PORTADORA

A fase da onda portadora (observável básica) é a diferença entre a fase do sinal transmitido pelo satélite que chega ao receptor e a fase do sinal gerado pelo receptor. Isto, isso significa que estes estados de fase dos sinais recebidos são idênticos aos estados de fase dos sinais transmitidos. Além disso, está observável é básica para a maioria das atividades geodésicas e considerada de maior precisão comparada com a pseudodistância. Portanto, medir a fase da portadora é medir a fase fracionária e acompanhar as mudanças nos ciclos, onde os receptores realizam a contagem do número de ciclos que entram no receptor.

No entanto, os dados da fase da portadora são influenciados por um número inteiro de comprimentos de onda que devem ser estimados a partir dos dados (REMONDI, 1985). Sendo que, a onda portadora fracionária pode ser medida por sistemas eletrônicos com precisão melhor do que 1% do comprimento de onda, que corresponde à precisão milimétrica. Este é também o motivo pelo qual a medição da fase é mais precisa do que a do código (XU, 2007). Portanto, uma onda portadora completa é chamada de cíclico e o número inteiro ambíguo de ciclos na medição da fase da portadora é chamado de ambiguidade. A equação 9 demonstra a fase de onda portadora observada em ciclos.

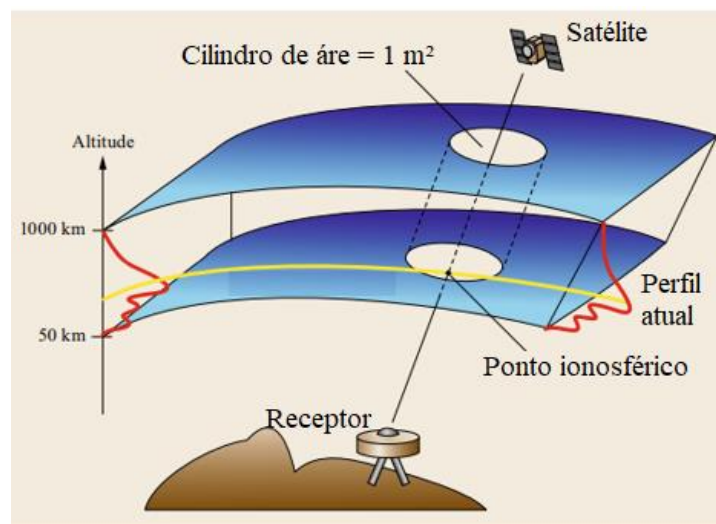
$$\phi_r^s(t_r) = \phi^s(t_r) - \phi_r(t_r) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^s \quad (5)$$

Onde, os subscritos r e s correspondem ao receptor e ao satélite, respectivamente. Além disso, os termos no lado direito da equação indicam o tempo do sinal de GPS no receptor ( $t_r$ ), a fase gerada no receptor ( $\phi_r$ ) no tempo de recepção, a fase portadora gerada no satélite ( $\phi^s$ ), a ambiguidade das fases ( $N_r^s$ ) e o erro da fase da onda portadora ( $\varepsilon_{\phi_r}^s$ ).

### 3.2.2 EFEITOS IONOSFÉRICOS E CÁLCULO DO TEC ASSOCIADOS AS OBSERVÁVEIS

A ionosfera desempenha um papel muito importante ao interagir com as ondas eletromagnéticas, sinais dos satélites enviado para os receptores localizados na superfície terrestre. Assim, a densidade eletrônica ao longo do caminho que representa a distância entre o satélite e o receptor é definida de Conteúdo Eletrônico Total (TEC). Onde, o TEC é representado por uma coluna cilíndrica de aproximadamente a área unitária ( $A = 1 \text{ m}^2$ ). Essa configuração pode ser vista na Figura 17, a qual apresenta uma aproximação da ionosfera, assumindo que a ionosfera corresponde uma fina camada, onde todo conteúdo eletrônico ocorre em uma camada de determinada altitude acima da superfície da Terra. Sendo considerado uma altura da camada de  $\sim 350 \text{ km}$ .

Figura 17. Mostra uma aproximação da coluna representativa do TEC entre o satélite o receptor de GPS.



Fonte modificada: Peter J.G. (2017)

Os sinais dos sistemas globais de navegação por satélite (GNSS) devem viajar pela ionosfera até os respectivos receptores de sinais na superfície terrestre. No entanto, a ionosfera terrestre por ser um meio dispersivo é uma importante fonte de erros do sistema GPS devido os efeitos ionosféricos gerados nestes sinais. Isso ocorre porque a densidade de elétrons ( $N_e$ ) livres nesta região é grande o suficiente para perturbar a propagação de ondas de rádio entre o satélite e receptor (RIBEIRO, 2020). Sendo que, o atraso ionosférico do sinal GPS pode variar de alguns metros a mais de vinte metros no espaço de um dia.

A influência da ionosfera na propagação do sinal de radiofrequência, a qual é caracterizada principalmente pela dispersão da onda gera, atraso e avanço na fase portadora e no grupo de ondas, respectivamente. Portanto, esse atraso e avanço é devido a variação do índice de refração do seu valor unitário. Os índices de refração para velocidade de fase ( $n_f$ ) e velocidade de grupo ( $n_g$ ) são apresentados pelas equações 10 e 11, respectivamente (HOFMANN-WELLENHOF, 2007; MONICO, 2000; SEEBER, 1993).

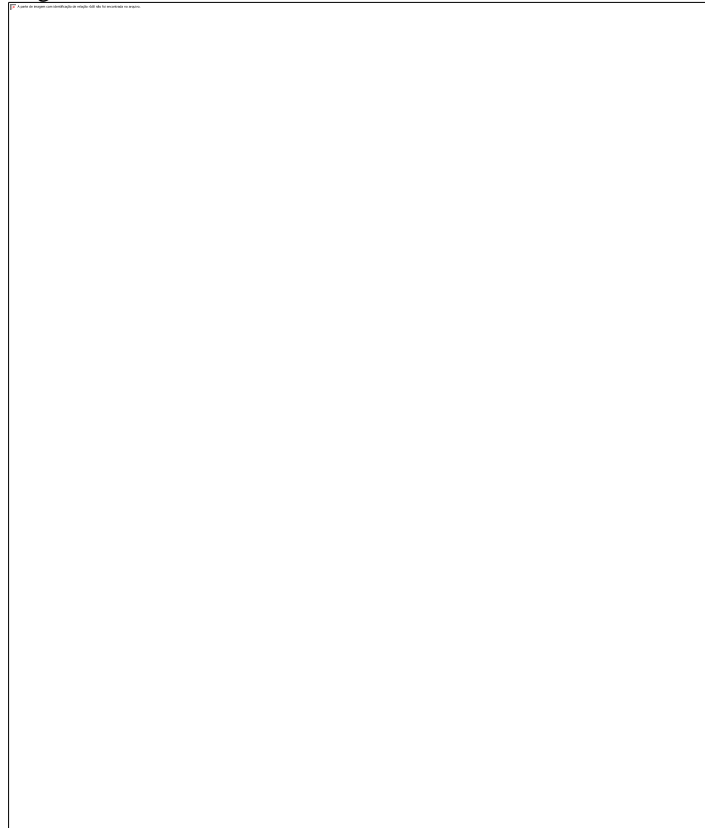
$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (6)$$

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (7)$$

Portanto, os índices de refração de fase e de grupo apresentam uma diferenciação pelo sinal do coeficiente  $c_2$ . Onde, este coeficiente é dado por  $c_2 = -40,3n_e$ , no qual  $n_e$  corresponde a densidade de elétrons. As medidas de  $n_e$  e da constante 40,3 no Sistema Internacional de Medidas é apresentado por elétrons/m<sup>3</sup> e em  $mHz^2(\text{elétron}/m^2)^{-1}$ , respectivamente. A Figura 18 mostra o caminho entre o satélite e o receptor dos sinais do (GNSS) ao passar pela ionosfera. Além disso, é apresentado na Figura 18 o ângulo entre o caminho do sinal da onda e campo geomagnético  $\vec{B}$  (linha pontilhada curva), o raio de caminho (s) e a distância geométrica ( $\rho$ ). Onde,  $\rho$  é distância real entre o satélite e o receptor terrestre ao longo da linha de visão. Então, a diferença entre a distância medida e a distância geométrica entre o satélite e o receptor terrestre corresponde a refração ionosférica. Assim, a refração ionosférica representa o erro sistemático (ou atraso ionosférico) da onda portadora. O conteúdo eletrônico total (TEC) da ionosfera pode ser calculado com a integração da densidade de elétrons  $n_e$  ao longo do caminho do sinal entre o satélite e o receptor na superfície da Terra, onde, o cálculo é dado pela equação 12. A unidade de medida do TEC é dada por TECU, onde 1 TECU= 10<sup>16</sup> elétrons/m<sup>2</sup>.

$$TEC = \int_s^r n_e ds \quad (8)$$

Figura 18. Mostra o esquema de propagação de ondas de rádio transionosféricas em duas frequências  $f_1$  e  $f_2$  na presença do campo geomagnético  $B$ .



Fonte: Modificada de Peter, (2017)

### 3.2.3 CÁLCULO DO TEC E VTEC

O cálculo do TEC com uso das observáveis de fase da onda portadora e de pseudodistância associadas com os efeitos da ionosfera podem ser escritas quando se tem disponíveis receptores de dupla frequência. Sendo possível realizar a combinação linear a partir dos sinais L1 e L2, os quais experimentam diferentes atrasos ao passar pela ionosfera. O TEC entre o receptor e o satélite pode ser calculado usando as medidas de pseudodistâncias de GPS (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Portanto, esse cálculo pode ser realizado com base na equação 13 que corresponde o código da pseudodistância para duas frequências  $f_1$  e  $f_2$ .

$$TEC = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} X[PD_{L1} - PD_{L2} - c(DCB_r + DCB^s) + \varepsilon_{L1L2}] \quad (9)$$

Onde,  $f_{L1}$  e  $f_{L2}$  são os feitos da ionosfera nas frequências dos sinais das ondas portadoras  $L1$  e  $L2$ ,  $PD_{L1}$  e  $PD_{L2}$  são as pseudodistâncias na banda  $L1$  associados com os efeitos da ionosfera. Além disso, os  $DCB_r, DCB^s$  são os (*Differential Code Bias*) em unidades de segundos,  $c$  velocidade da luz no vácuo e  $\varepsilon_{L1L2}$  correspondem aos efeitos não modelados e aleatórios da pseudodistância. Onde, os efeitos ionosféricos afetam de forma diferente cada frequência dos sinais de ondas. No entanto, o cálculo do TEC também pode ser obtido a partir da observável da onda portadora para uma combinação linear entre as medidas das fases. Segundo (MATSUOKA, 2004) o TEC é determinado na direção do satélite ao receptor a partir da combinação linear entre as medidas de fase das portadoras  $L1$  e  $L2$  ( $\varphi_{1r}^s, \varphi_{2r}^s$ ). Portanto, o cálculo do TEC utilizando a fase da portadora é dada pela equação 14,

$$TEC = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} [(\lambda_2 \varphi_{2r}^s - \lambda_1 \varphi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) + e_{\varphi 21}] \quad (10)$$

Os termos na equação 14 são representados por ( $f_1$  e  $f_2$ ) e ( $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) indicando as frequências e os comprimentos de ondas das portadoras em ( $L1$  e  $L2$ ), respectivamente. Por outro lado, o termo  $e_{\varphi 21}$  representa a diferença entre as portadoras  $L1$  e  $L2$  dos erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as fases e os erros aleatórios. Segundo (MATSUOKA, 2004) os erros presentes neste termo ( $e_{\varphi 21}$ ) correspondem o atraso instrumental interfrequência do satélite e receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor.

Além disso, o cálculo do TEC tem a influência dos termos ( $N_{1r}^s$  e  $N_{2r}^s$ ) os quais correspondem as ambiguidades nas portadoras. Como o GPS basicamente fornece medições do atraso ionosférico (ou avanço) entre o satélite e o receptor, devido ao TEC inclinado, é importante formular a relação entre o atraso ionosférico. Portanto, a quantidade da densidade de elétrons (TEC) ao longo do caminho entre o satélite e o receptor na direção vertical (VTEC) indicado pela expressão  $VTEC = \cos(z')TEC$ , o efeito da refração é calculado pelas equações 15 e 16, as quais são correspondente fase portadora e para código.

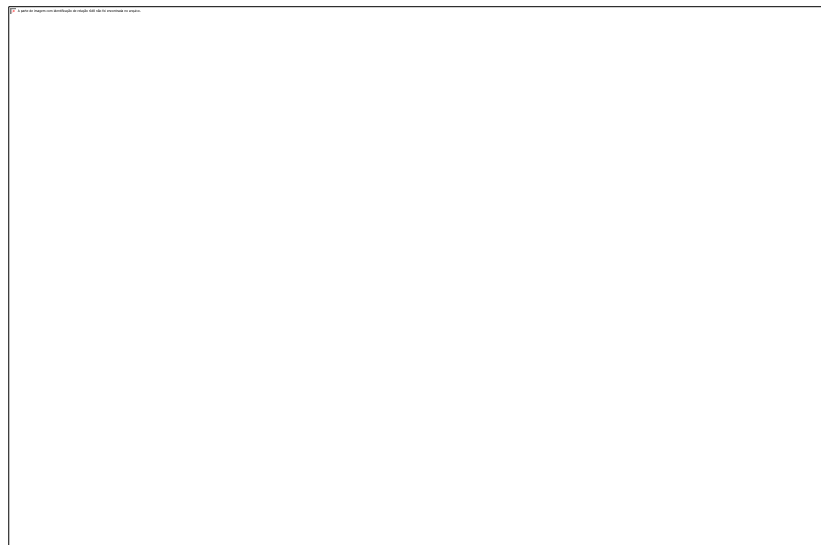
$$I_{fr}^s = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (11)$$

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC, \quad (12)$$

O termo  $z'$  nas equações 15 e 16, corresponde ao ângulo zenital do caminho do sinal em relação a um plano de altitude média  $H_m$ . Segundo (HOFMANN; WELLENHOF, 2007) plano de altitude média  $H_m$  corresponde o ponto ionosférico, o qual pode ser obtido pela seguinte equação  $\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z$ . E nesta mesma equação os termos  $R_m$ ,  $z$  e  $H_m$  correspondem o raio média da Terra, o ângulo zenital do satélite na estação de observação e a altura média da ionosfera variando entre 300 e 400 km de altitude, respectivamente. Além disso, o TEC Vertical (VTEC), que é o conteúdo total de elétrons no zênite, pode ser obtido do STEC usando uma função de mapeamento apropriada (JIN *et al.*, 2014).

O Slant TEC (STEC) é geralmente usado para designar o número total de elétrons em um caminho do raio diferente da direção zenital local (TUNA *et al.*, 2014). Segundo (MATSUOKA; CAMARGO, 2004) o VTEC pode ser obtido a partir da multiplicação entre o TEC e a função de mapeamento geométrica padrão ( $\cos(z')$ ), sendo o  $\text{VTEC} = \cos(z') \text{TEC}$ , como já mencionado anteriormente. A Figura 19 representa a geometria de um mapeamento ionosférico GNSS da camada ionosférica na propagação do sinal no campo de visão do satélite e o receptor com base no solo.

Figura 19. Mostra a geometria do mapeamento ionosférico por satélite GNSS.



Fonte: Modificada Jin *et al.* (2014).

### 3.2.4 TAXA DE VARIAÇÃO DO TEC (ROT)

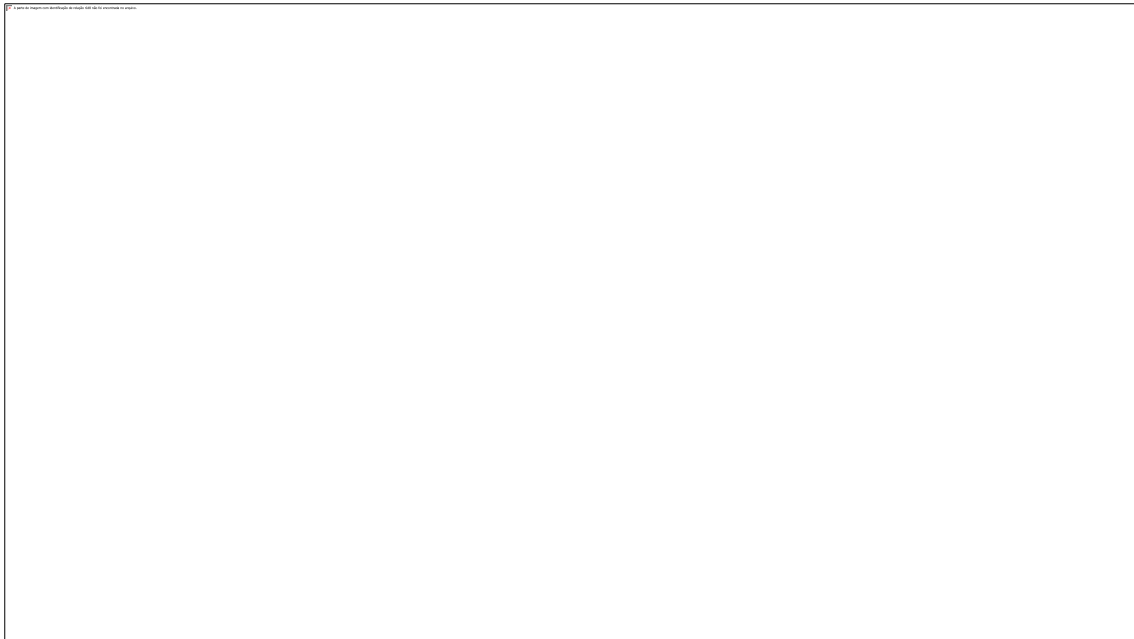
As flutuações de fase ou taxa de variação do TEC (ROT) indicam que há presença de irregularidades ionosféricas nos dados de sinais dos satélites recebidos pelos receptores de GPS-TEC. Os distúrbios da densidade do plasma ionosférico são detectados por seus efeitos no sinal GNSS por meio da estimativa do atraso ionosférico instantâneo e sua variação no tempo (ROT), o qual considera que as ocorrências de irregularidades ionosféricas são identificadas com altos valores de ROT (RODRÍGUEZ-BILBAO *et al.*, 2015). Assim, as flutuações de fase ( $\Delta TEC$ ) é dado em TECU/min (ABREU, 2012). Portanto, o cálculo da flutuação fase é feito utilizando a equação 13.

$$ROT = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (13)$$

Os termos na equação 17 são o  $\Delta TEC$ , o qual indica uma variação entre o TEC (inicial) e TEC (final) e  $\Delta t$  indicando o intervalo de tempo (em segundos). A Figura 20 apresenta o ROT utilizando os dados da estação de GPS-TEC (YKRO dip latitude -5,76) no setor africano para os satélites com diferentes latitudes. Os dados foram obtidos na noite do dia 08 de dezembro de 2018 utilizando o programa UTECDA.

Nota-se na Figura 20 que as curvas horizontais coloridas e seus comprimentos indicam o número do satélite (PRN) e o tempo que um determinado satélite ficou no campo de visão do receptor GPS-TEC. Portanto, nesta figura a ausência de irregularidades ionosféricas da flutuação de fase (ROT) é indicada por uma curva horizontal suave (elipse verde), por outro lado quando existe a presença de irregularidade o ROT apresenta variações bruscas (curva com elipse azul entre as linhas verticais), ou seja, o gráfico apresenta um traço espalhado.

Figura 20. Mostra a ocorrência da flutuação de fase do ROT em função do tempo UT de vários satélites com os PRN (lado direito) na estação de GPS-TEC YKRO (dip latitude -5,76) no setor africano para noite do dia 08/12/2018 indicado entre as duas linhas azul vertical, as quais indica o início e fim da irregularidade ionosférica.



Fonte:

Autor

### 3.3 REDE DE DADOS DE GPS-TEC (RBMC E UNAVCO)

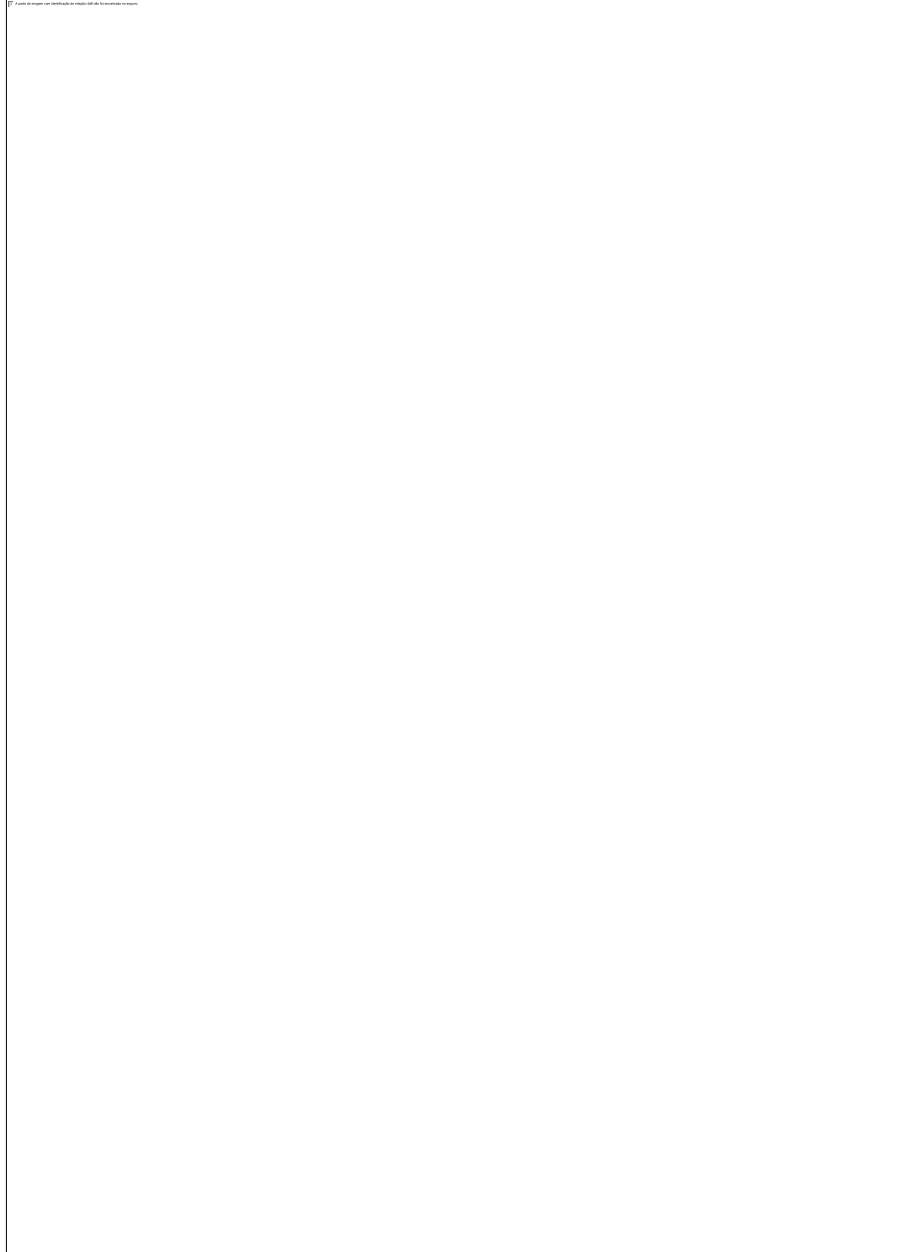
Os dados de GPS-TEC utilizado neste estudo foram obtidos dos bancos de dados das Rede de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Sistema GNSS e o Consórcio da Universidade NAVSTAR (UNAVCO). Onde, a RBMC é a principal agência geodésica de referência no Brasil, a qual opera atualmente com 150 estações de GPS. Os dados obtidos de GPS no setor brasileiro são disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que é responsável pelo Sistemas GNSS–RBMC (<http://www.ibge.gov.br/>). Por outro lado, a UNAVCO é uma organização sem fins lucrativos governada por uma universidade que facilita a pesquisa e a educação em geociências utilizando a geodésia. Assim, os dados das estações de GPS-TEC não localizada no setor brasileiro foram obtidos da rede de dados em geociência UNAVCO disponível em (<http://www.unavco.org/>).

Além disso, esse consórcio se originou da Universidade NAVSTAR em 1984 dentro do Instituto Cooperativo de Pesquisa em Ciências Ambientais (CIRES) da Universidade do Colorado (Boulder). Então, em 2001 a UNAVCO, incorporou como uma empresa independente sem fins lucrativos com 3 organizações e 501 corporações. Portanto, a partir de 2019, a UNAVCO e a IRIS (Instituições de pesquisa incorporadas para sismologia) iniciaram

discussões focadas em como as duas organizações podiam trabalhar juntas para promover o apoio geofísico à comunidade.

Após as discussões iniciais, os conselhos da IRIS e da UNAVCO chegaram a um consenso de que a união da IRIS e da UNAVCO seria importante para a comunidade de pesquisa continuar a conduzir e desenvolver geofísica de ponta. A Figura 21 mostra os receptores de GPS-TEC para duas redes de GPS-TEC mencionada anteriormente no setor americano para os períodos compreendidos de 01/12/2017 a 31/03/2018 e 01/12/ 2018 a 31/30/2019. Também é mostrado na Figura 21 os ícones em cor branca indicando as ionossondas e os imageadores utilizados neste estudo associado aos eventos de SSWs mencionados anteriormente.

Figura 21. Mapa do continente americano com as estações GPS-TEC desde média latitude HN (ícones verdes) a média latitude HS (ícones verdes) para o estudo dos SSW (2017-2018) e o SSW (2018-2019), respectivamente. Os ícones amarelos indicam as estações das latitudes baixas nos hemisférios HN e HS, e os ícones vermelho as estações da região equatorial. Além disso, o equador geomagnético é indicado pela linha sólida preta.



Fonte: Autor

Os critérios utilizados para classificar as estações de GPS-TEC desde média latitude do HN a média latitude do HS são aqueles definidos por (FAGUNDES et al., 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019 e VIEIRA *et al.*, 2017). Os critérios são tomados como referência os valores do dip latitude indicando cada faixa latitudinal das estações de GPS-TEC. Assim, os critérios utilizados das faixas latitudinais mencionadas antes são apresentados na Tabela 4. A distribuição das estações de GPS-TEC obedecendo os critérios são indicadas na Figura 20 pelos

ícones verdes (média latitude), amarelo (baixa latitude), vermelho (região equatorial). Portanto, as estações de GPS-TEC em sua classificação são tomadas como referência o equador geomagnético indicado na Figura 21 pela linha preta. Além disso, as ionossondas são referenciadas também ao equador magnético como sendo do hemisfério norte, sul ou equador.

Tabela 4. Os critérios utilizados para classificar as estações de GPS-TEC no setor do continente americano.

Regiões	Critério da classificação das estações de GPS-TEC referentes as regiões	Hemisférios
Média Latitude	$30^\circ \text{ N} < \text{dip latitude} < 62^\circ \text{ N}$	HN
Baixa Latitude	$5^\circ \text{ N} < \text{dip latitude} \leq 30^\circ \text{ N}$	HN
Região equatorial	$5^\circ \text{ N} \leq \text{dip latitude} \leq 5^\circ \text{ S}$	
Baixa Latitude	$5^\circ \text{ S} < \text{dip latitude} \leq 30^\circ \text{ S}$	HS
Média Latitude	$30^\circ \text{ S} < \text{dip latitude} < 62^\circ \text{ S}$	HS

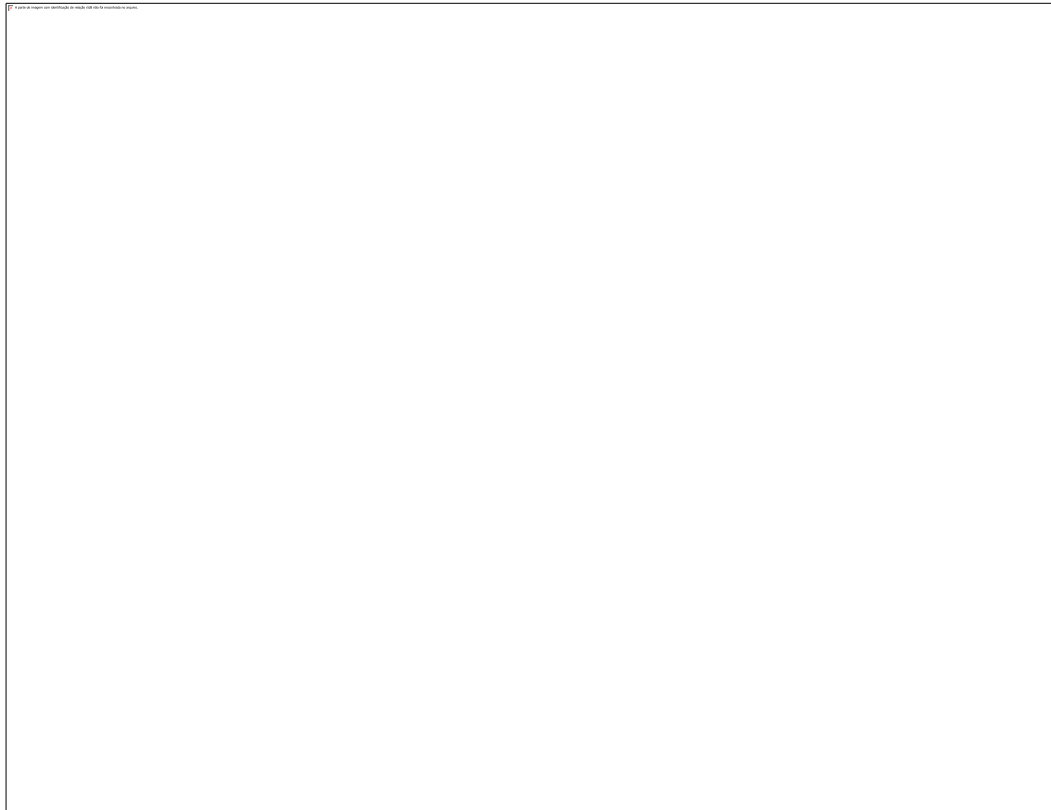
Fonte: Autor

### 3.3.1 UTECDA E GPS\_TEC

O programa UTECDA (*Univap Total Eletronic Content Data Analysis*) é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo grupo de pesquisa em Física Espacial da UNIVAP para auxiliar no processo de organização, visualização, análise e interpretação dos dados processados pelo GPS\_TEC. Onde, o GPS\_TEC é outro programa que foi desenvolvido por (SEEMALA; VALLADARES, 2011), o qual tem a capacidade de processar as informações armazenadas em arquivos no formato Rinex. Assim, no processamento dos arquivos Rinex é também preciso o arquivo de navegação Rinex para os dados de observação de qualquer estação de (GPS-TEC).

Além disso, os arquivos de código diferencial (DCB) do satélite também são necessários para o programa GPS\_TEC gerar o (TEC), estes dados são armazenados em arquivos no formato STD. Portanto, os arquivos no formato STD são utilizados para gerar os gráficos associados ao VTEC no estudo de interesse do pesquisador. Além disso, para auxiliar o uso do GPS\_TEC foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa do laboratório de física e astronomia da Univap uma interface gráfica que permite selecionar a estação de GPS de interesse para gerar os arquivos no formato STD. Portanto, a interface inicia dos programas UTECDA e GPS\_TEC são apresentadas nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22. Tela inicial da interface gráfica do programa UTECDA utilizado para organização das estações de GPS-TEC.



Fonte: Autor

Figura 23. Tela inicial da interface gráfica e a tela de processamento de dados do GPS\_TEC, programa utilizado para o processamento de dados obtidos de arquivos Rinex de receptores (GPS).



Fonte: Autor

### **3.4 A SONDAGEM IONOSFÉRICA E OS PROGRAMAS UTILIZADOS**

#### **3.4.1 PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RÁDIO NA IONOSFERA**

A ionossonda é o equipamento mais antigo e é muito usado em estudos ionosféricos. O trabalho feito por (BREIT; TURVE, 1925, apud ABREU, 2012), eles desenvolveram a tecnologia básica da ionossonda. Então, por volta desta data é dado o passo fundamental da tecnologia para propagação das ondas de rádio, que passaram a ter aplicações práticas em

termos da pesquisa ionosférica e os efeitos da ionosfera na radioastronomia. Portanto, a estrutura das ionossondas desse período funcionava com base nos sistemas analógicos com uso de válvulas, onde as estruturas dos componentes da ionossonda ocupava grande espaço.

Isso é compreensivo pela tecnologia existente da época, onde, esse conhecimento tecnológico estava dando seus primeiros passos de seu desenvolvimento. Isso só foi melhorado com o passar dos anos, em que novos estudos foram realizados dando condições de gerar tecnologias mais avançadas, e assim novos e melhores instrumentos são desenvolvidos. Portanto, com o avanço da ciência e da tecnologia, as ionossondas sofreram melhorias e começaram a ser desenvolvidas usando C.I. (circuito integrado), tornando mais compactas e possibilitando o armazenamento dos ionogramas em computadores (RIBEIRO, 2020). As ionossondas por ser um equipamento que transmitia pulsos de rádio, é importante mencionar a teoria associada na interação desses pulsos com plasma ionosférico. Onde, a teoria no estudo do plasma mostra que a presença dos íons gera os modos de ondas, e esta teoria é conhecida como teoria magneto-iônica.

A teoria magneto-iônica, que historicamente está associada a E. V. Appleton, na qual trata da propagação de ondas eletromagnéticas em gases ionizados. Sendo, portanto, necessário algumas das fórmulas da teoria magneto-iônica na discussão para estudar a propagação de ondas de rádio na ionosfera. As equações segundo (RISHBETH; GARRIOT, 1969) e que também informa que as derivações são fornecidas em outras referências bibliográfica como os livros de (RATCLIFFE, 1959; BUDDEN, 1988; DAVIES, 1965). Entretanto, desconsiderando a influência dos íons positivos e negativos na propagação das ondas, as duas frequências particulares são definidas pelas equações 14 e 15.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \right)^2 \quad (14)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \frac{Be}{m} \quad (15)$$

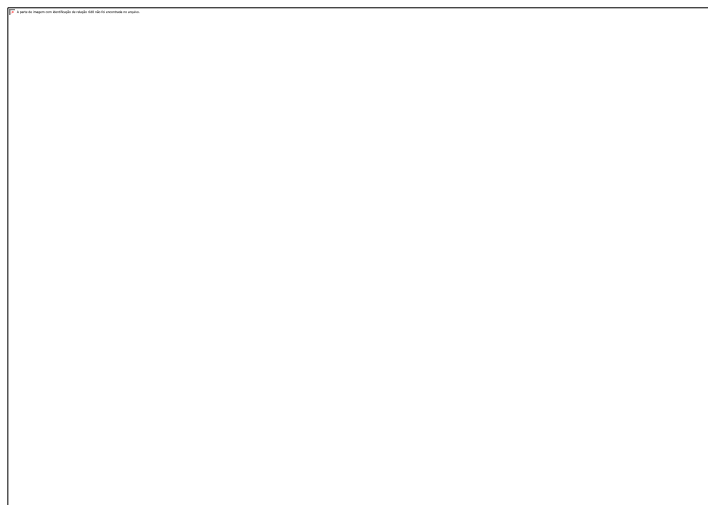
Nestas equações os termos  $f_p$  e  $f_H$  correspondem as frequências do plasma e giro frequência, respectivamente. Os outros termos nas equações correspondem densidade de elétrons livres ( $N$ ), massa ( $m$ ), carga do elétron ( $e$ ) e a permissividade elétrica no vácuo ( $\epsilon_0$ ). Além disso, o termo  $B$  é correspondente a densidade de fluxo do campo magnético da Terra. Os três parâmetros magneto-iônicos usuais são definidos como  $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}$ ,  $Y = \frac{\omega_H}{\omega}$  e  $Z = \frac{v}{\omega}$ , onde

( $\nu$ ) é a frequência de colisão de elétrons com partículas energéticas e ( $\omega$ ) é frequência angular do plasma. A onda eletromagnética (onda de rádio) ao interagir com a ionosfera é dividida em duas ondas definidas como ordinária e extraordinária. Essa divisão da onda para faixa de rádio ocorre pelo fato de a ionosfera ser considerado um meio birrefringente. A relação de dispersão para a região F é dada pela equação 20, o qual é representado pelo índice de refração ( $\mu$ ) do plasma ionosférico.

$$\mu^2 = 1 - \frac{X(1 - X)}{(1 - X) - \frac{1}{2}Y_T^2 \pm [\frac{1}{4}Y_T^4 + Y_L^2(1 - X)^2]^{1/2}} \quad (16)$$

Uma onda de rádio incidente verticalmente na ionosfera, assumindo a camada ionosférica estratificada e horizontal, a onda é refletida em um nível onde índice de refração é dado por  $\mu^2 = 0$ . Assim, a onda ordinária apresenta o modo correspondente o parâmetro  $X = 1$ . Isso caracteriza que o campo magnético não apresenta influência na onda, ou seja, é como não existisse a presença do campo magnético. Segundo (RISHBETH; GARRIOT, 1969) para a onda no modo extraordinária, verifica-se que a reflexão ocorre ao nível em que os parâmetros são representados por  $X = 1 - Y$  se  $Y < 1$  onde  $f > f_H$ , e quando  $X = 1 + Y$ , neste caso o valor de se  $Y > 1$  e  $f < f_H$ . A Figura 24 mostra alguns caminhos de raios com os ângulos de incidência da onda de rádio na ionosfera.

Figura 24. A propagação das ondas de rádio na ionosfera terrestre.



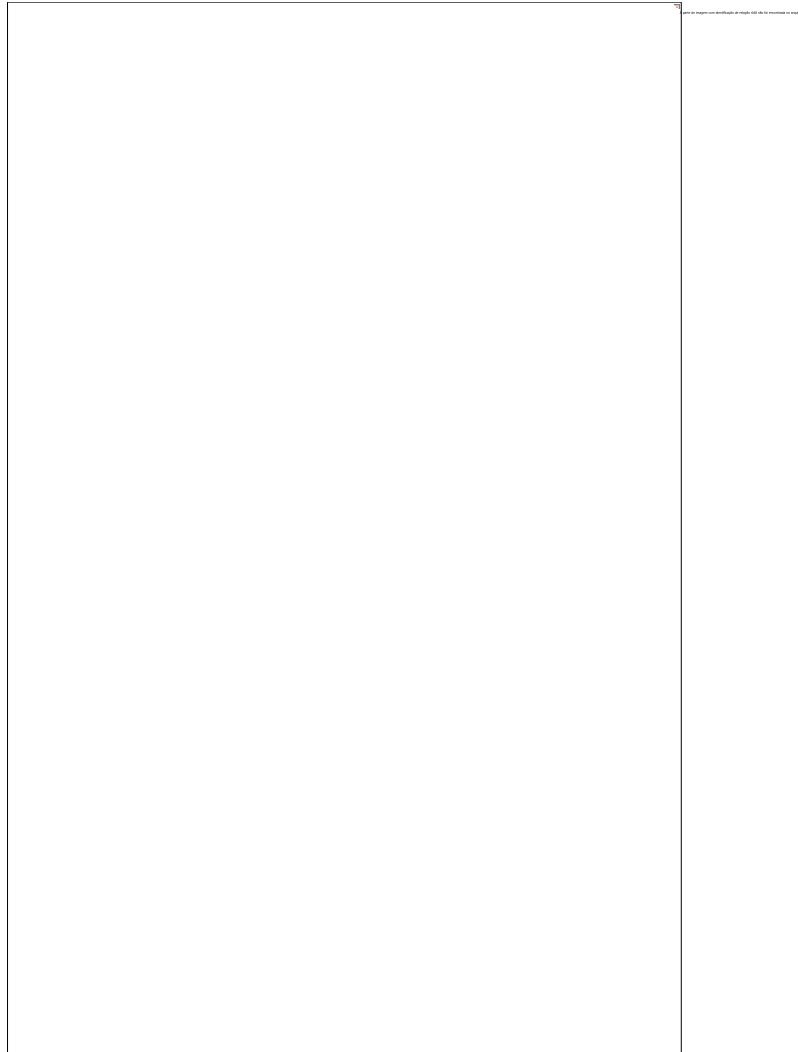
Fonte: Carozzi. (2000)

### 3.4.2 IONOSSONDA CADI

A ionossonda é um tipo de radar que transmite pulsos de rádio frequência na faixa de 1 a 20 MHz. Os pulsos são transmitidos em uma determinada frequência e propaga-se verticalmente até atingir uma região da ionosfera onde a frequência transmitida ( $f_i$ ) é igual a frequência natural do plasma ionosférico ( $f_{\text{plasma}}$ ). O pulso de rádio frequência é refletido e retorna em direção a terra. A ionossonda mede o tempo decorrido entre a transmissão e recepção do pulso e supondo que este pulso se propagou com a velocidade da luz é calculado a altura onde ocorreu a reflexão, esta altura é denominada de altura virtual, visto que o pulso caminha com uma velocidade aproximadamente igual a velocidade da luz (Figura 25). Geralmente as ionossondas realizam uma varredura de 150 a 180 diferentes frequências (1 a 20 MHz). Assim, cada uma das frequências transmitida será refletida em uma altura diferente, finalmente temos um par ordenado  $f_i \times$  altura virtual e utilizando este conjunto de pares ordenados constrói-se um gráfico chamado de ionograma (PIGGOTT; RAWER, 1978, PILLAT, 2012).

As ionossondas utilizadas nesta investigação são do tipo CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) e são operadas em São José dos Campos-SP (23,2° S e 45,8° O), Jatai-GO (17,9° S e 51,7° O) e Araguatins-TO (05,7° S e 48,1° O). Estas ionossondas operam em dois modos de varredura de frequências. No primeiro modo são transmitidas 180 frequências, varrendo de 1 a 20 MHz, este modo realiza uma varredura completa a cada 300 s. O segundo modo varre apenas 6 frequências (3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz), mas com uma resolução temporal de 100 s (FAGUNDES *et al.*, 2007; RIBEIRO, 2020).

Figura 25. O sistema de antenas de transmissão (lado direito) e recepção (lado esquerdo) da ionossonda instalada na cidade de Araguatins-To com o sistema de transmissão e recepção, respectivamente.



Fonte: Autor

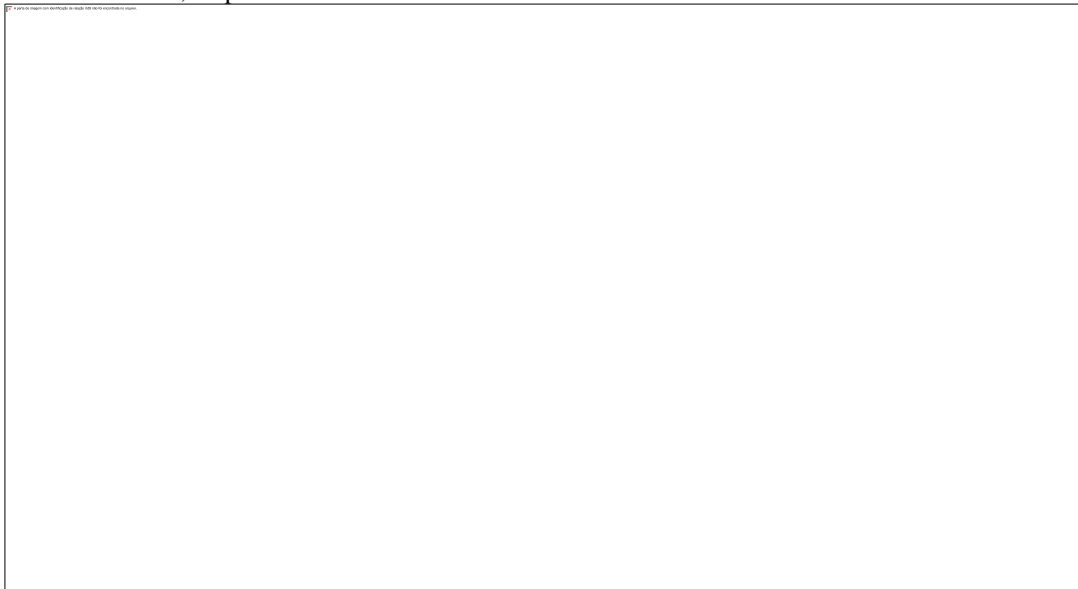
Assim, considerando uma incidência vertical da onda de rádio, os dados dos ionogramas, é feito dividindo-se o intervalo de tempo entre o envio e a recepção do sinal da onda. Portanto, a distância percorrida pelo pulso da onda entre a transmissão e recepção é relacionado uma altura, essa altura é denominada de altura virtual da camada ( $h'$ ). Segundo (DAVIES, 1990; BUDDEN, 1988) a altura virtual mínima pode ser obtida pela equação 21,

$$h' = c \int_0^{h_r} \frac{dh}{u} = \int_0^{h_r} u' dh \quad (17)$$

Nesta equação  $c$  corresponde a velocidade da luz no vácuo,  $u$  a velocidade de grupo da onda,  $u'$  é o índice refrativo do grupo e  $h_r$  é a altura real de reflexão da onda. De acordo com

(CANDIDO, 2008) ao variar tanto a frequência de transmissão como a de recepção das frequências entre 1 e 20 MHz, obtém-se gráficos da frequência versus altura virtual das camadas da ionosfera. Onde, estes gráficos são denominados de ionogramas, os quais são obtidos com a sondagem dos pulsos de radiofrequência incidentes na ionosfera. A Figura 26 mostra o gráfico de um ionograma gerado pela ionossonda tipo CADI na estação de Araguatins em 01 de janeiro de 2018. Neste gráfico é caracterizado os parâmetros de alturas das camadas E e F, onde  $h'E$  corresponde a altura virtual da camada E,  $h'F$  altura virtual da camada F e  $h'F_2$  a altura virtual da camada F2. Além disso, são apresentados os modos ordinários e extraordinário da onda de rádio enviada pelo sistema da ionossonda até a região da ionosfera.

Figura 26. Ionograma obtido em 01 de janeiro de 2018 para a ionossonda da estação de Araguatins durante o período diurno. Os parâmetros  $h'E$ ,  $h'F$ ,  $h_pF_2$  e  $f_oF_2$  são apresentados no ionograma e os traços ordinário e extraordinário da onda, respectivamente.



Fonte: Programa UDIDA

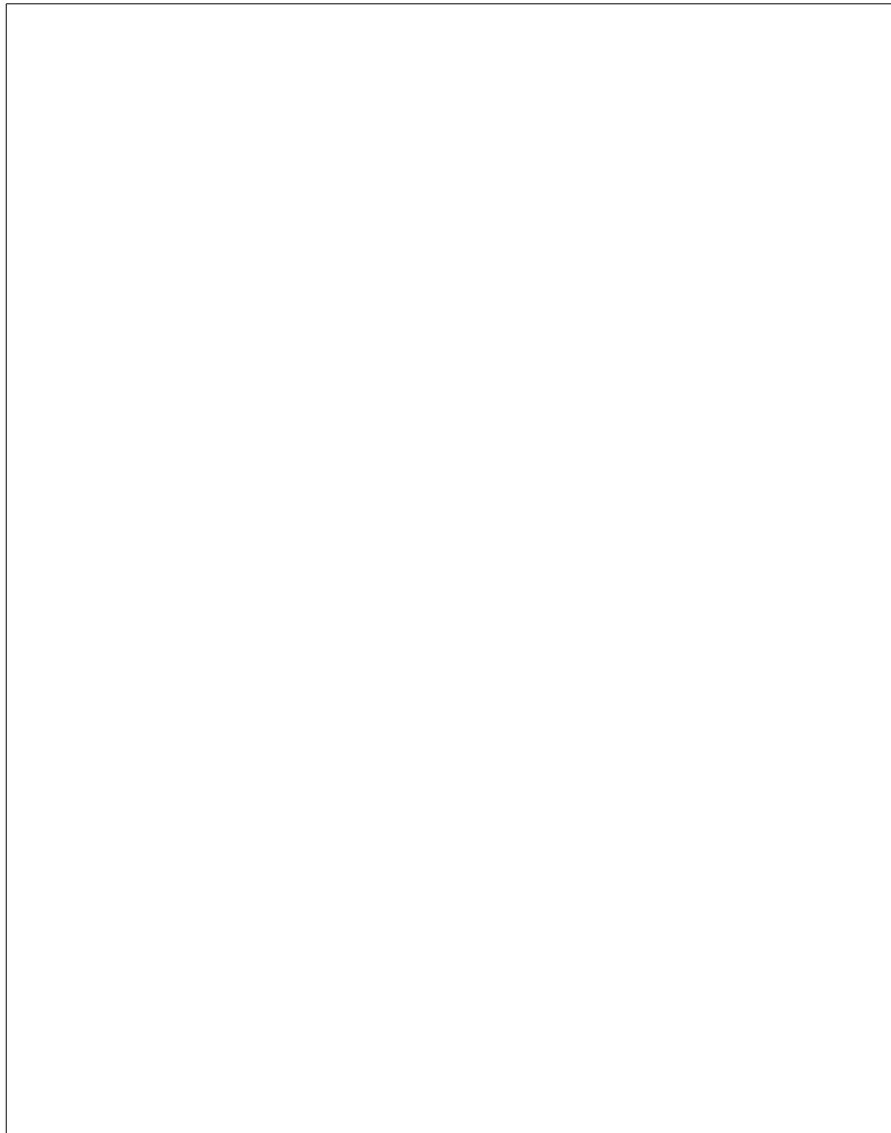
### 3.4.3 UDIDA

A ferramenta computacional chamada UDIDA (UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis) foi desenvolvida pelo grupo de ionosfera da UNIVAP e é útil para visualizar, interpretar e analisar ionogramas. Os ionogramas são espectros de frequência x altura virtual, veja Figuras 26 e 27. Utilizando o UDIDA é possível extrair e armazenar em um arquivo digital os parâmetros  $f_oF_2$  (frequência crítica da ionosfera),  $h'F$  (mínima altura virtual da camada F),  $h_pF_2$  (altura do pico da camada F) e Spread-F. Segundo (PILLAT *et al.*, 2012) a extração dos parâmetros  $f_oF_2$ ,  $h'F$  e  $h_pF_2$  dos ionogramas exige a identificação do traço das regiões

ionosféricas E e F. Além disso, os ionogramas apresentam ruídos, segunda reflexão e algumas vezes spread-F que exige experiência na interpretação de ionogramas.

O programa o UDIDA tem aplicativos que permitem realizar pesquisa ionosféricas em função da hora, dia, estação do ano e atividade solar. No entanto, entre todas as funções, a principal é a redução de dados, no qual o programa permite obter os parâmetros ionosféricos em um processo manual. Para maiores detalhes sobre as funcionalidades do programa e instruções da operação dele veja (PILLAT, 2006; PILLAT *et al.*, 2012). A Figura 27 mostra o ícone e a tela inicial do programa UDIDA, o qual é utilizado na redução dos dados dos ionogramas, que foram obtidos pela rede de ionossonda da UNIVAP. As telas de seleção e redução dos dados é apresenta na parte inferior da Figura 27. A ferramenta computacional UDIDA permite realizar a redução de dados de forma manual e automática. Os parâmetros ionosféricos utilizados nesta pesquisa são  $h'F$ , foF2 e Spread-F do tipo range e frequência e foram reduzidos manualmente.

Figura 27. Mostra a tela inicial do programa UDIDA desenvolvido pelo grupo de pesquisa em física espacial da UNIVAP-IP&D. A parte inferior da Figura 27 é apresentado as telas de seleção da estação (lado esquerdo) e redução de dados (lado direito com um ionograma).



Fonte :Autor

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS

Neste Capítulo será apresentado e discutido os distúrbios ionosféricos que ocorreram durante dois SSWs fortes. No setor brasileiro foi utilizando dados de GPS-TEC e ionossondas e no setor africano foi utilizado apenas os dados de GPS-TEC. Os dados de GPS-TEC e ionossondas são analisados para os períodos de 01/12/2017 a 31/03/2018 (SSW1, DOY 335-90) e 01/12/2018 a 31/03/2019 (SSW2, DOY 335-90). Nestes períodos será analisado a variação dia-a-dia do VTEC no setor brasileiro desde o HN altas latitudes até o HS altas latitudes e o setor africano desde baixas latitude do HN até baixas latitude do HS. Também será estudado o comportamento da Anomalia de Ionização Equatorial (EIA), variação dos parâmetros ( $h'F$  e  $foF2$ ), ocorrência de Spread-F (setor americano) e ROT (setor africano) durante cada um dos SSWs.

### 4.1 O ÍNDICE F10.7

A Figura 28 mostra a variação dia-a-dia do índice F10.7 entre 01/12/2017-31/03/2018 e 01/12/2018-31/03/2019 (DOY 335-90), nota-se que nestes 2 períodos o F10.7 variou entre 65 e 80 (sfu), onde 1 sfu corresponde a  $10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ . As linhas tracejadas na Figura 28 indicam os dias em que a temperatura estratosférica durante os SSWs foi máxima.

O F10.7 médios dos dois períodos são dados por  $\overline{F10.7}_{2017-2018} = 68,7 \pm 2,5$  e  $\overline{F10.7}_{2018-2019} = 69,2 \pm 2,4$ , ambos os períodos possuem o F10.7 médios muito semelhantes e desvio padrão pequenos. Portanto, os 2 períodos são classificados como períodos de atividade solar mínima. Segundo (KAWAMURA *et al.*, 2002) o valor de  $F10.7 \leq 120$  sfu e  $F10.7 \geq 150$  sfu são típicos de baixa e alta atividade solar, respectivamente.

Como sabemos o F10.7 fornece uma boa aproximação do fluxo de radiação solar na faixa de UV e EUV (radiação ionizante), logo podemos comparar os valores de VTEC nos períodos de 2017-2018 e 2018-2019 considerando que a radiação UV e EUV são semelhantes em ambos os períodos estudados.

Figura 28. Variação diária do índice F10,7 (sfu), valor médio do F10.7 e o desvio padrão para os períodos estudados. (A) Período de 01/12/2017-31/03/2018 (SSW1). (B) Período de 01/12/2018-31/03/2019 (SSW2). A linha vermelha e preta verticais tracejadas indicam o dia em que houve o máximo da temperatura estratosférica nos eventos de SSW1 e SSW2.



Fonte: Autor

## 4.2 VARIAÇÃO SAZONAL DO VTEC E DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS ( $h'F$ , $f_oF2$ E SPREAD-F) ENTRE DEZEMBRO E MARÇO (2017-2018 E 2018-2019)

### 4.2.1 VARIAÇÃO SAZONAL DO VTEC

O Conteúdo Eletrônico Total (TEC) é amplamente utilizado para investigar a eletrodinâmica ionosférica, o acoplamento atmosfera neutra-ionosfera e a variabilidade espaço-temporal da camada-F durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados, explosão solar (solar flare), estudo sobre a anomalia ionosférica equatorial (EIA), irregularidades ionosféricas, e distúrbios ionosféricos causados pelo aquecimento estratosférico súbito (SSW) (VIEIRA *et al.*, 2017; BARBOSA *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2019; DE JESUS *et al.*, 2020; DIAS *et al.*, 2020; FAGUNDES *et al.*, 2020). As variações diárias, dia-a-dia e sazonal do VTEC podem ser influenciadas pelo fluxo de radiação solar, clima espacial, processos termosféricos tais como: ventos, ondas, mudanças na composição, e taxa de fotoionização que é controlada pela posição do ponto sub-solar. Logo, os fenômenos acima citados são controlados pelo ciclo solar de 11 anos (ROMERO-HERNANDEZ *et al.*, 2018).

No entanto, nos equinócios o VTEC tem valores maiores que os de solstícios, este fenômeno é chamado de anomalia de equinócio (ROMERO-HERNANDEZ *et al.*, 2018). Esta anomalia é importante no contexto desta investigação, visto que o primeiro SSW estudado (2017-2018, SSW1) ocorre exatamente durante a fase de transição da anomalia de equinócio (solstício para equinócio). Por outro lado, o segundo SSW (2018-2019, SSW2) ocorre durante o solstício e, portanto, não é afetado pela anomalia de equinócio. Assim, um cuidado especial tem que ser tomado no estudo do evento de SSW1, pois a anomalia de equinócio tem que ser levada em consideração na variação dia-a-dia do VTEC. Portanto, um estudo detalhado do VTEC em médias latitudes, baixas latitudes e região equatorial é realizada para investigar a transição sazonal do VTEC (anomalia de equinócio) em diferentes latitudes durante os períodos compreendidos entre 01/12/2017-31/03/2018 e 01/12/2018-31/03/2019 (DOY 335-90).

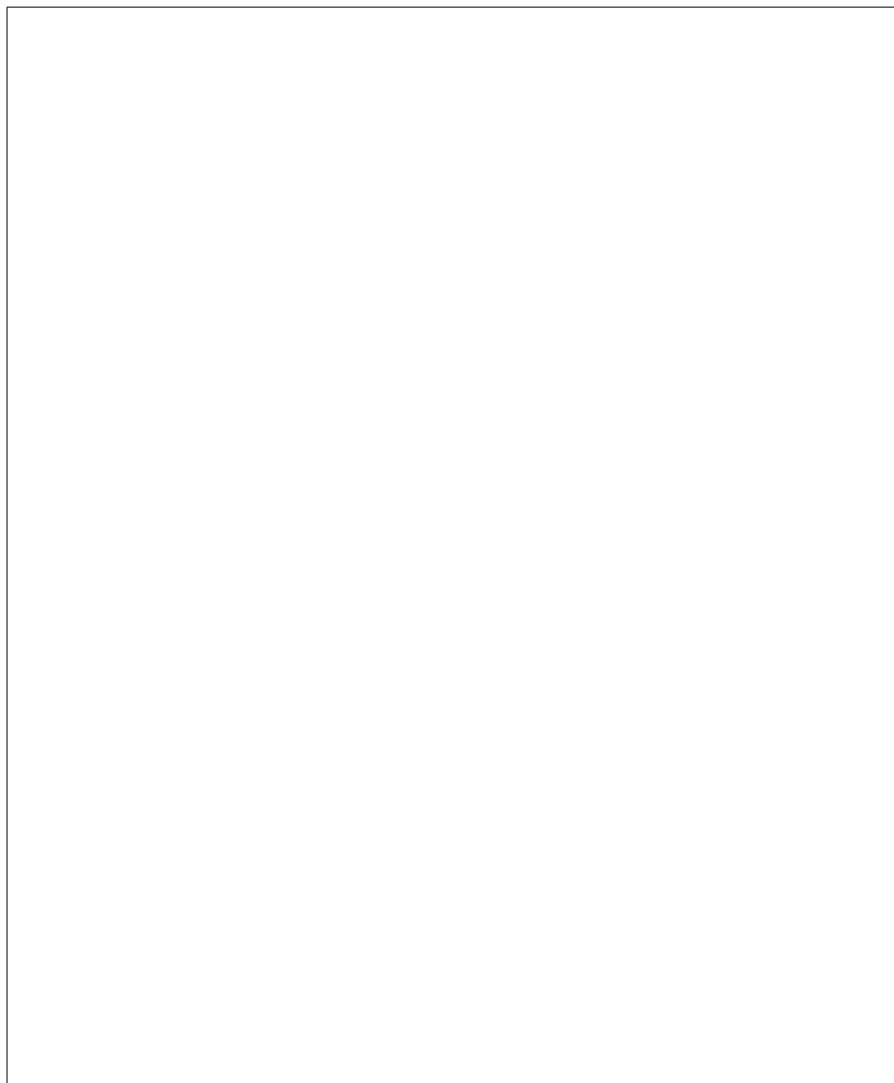
Nesta investigação foram escolhidas 20 estações de GPS-TEC distribuídas desde médias latitudes do hemisfério norte (HN) até médias latitudes do hemisfério sul (HS) no setor americano. No entanto, no setor africano dos 20 receptores GPS-TEC utilizados na investigação do VTEC não foi feito o estudo da transição do solstício para o equinócio, considerando que o estudo no setor americano foi o suficiente para distinguir a variação dia-a-dia do VTEC para esta transição. Em cada faixa latitudinal utilizou-se 4 estações conforme estão denominadas, a seguir, médias latitudes HN (ML-HN), baixas latitudes a além da crista da EIA do HN (BL-HN), região equatorial (R-EQU), baixas latitudes a além da crista da EIA do HS (BL-HS) e médias latitudes HS (ML-HS) (Veja Figura 29 e Tabela 5).

Os dados de VTEC das estações CASE, CHLL, P338 e P802 (ícones verdes na Figura 29 e variação dia-a-dia do VTEC Figura 30), VERA, CN25, UXAL e CN15 (ícones amarelos na Figura 29 e 31), POVE, BELE, AMUA e IMPZ (ícones vermelhos na Figura 29 e 32), SCCH, TOPL, POAL e BAVC (ícones amarelos na Figura 29 e 33) e SOG3, KEPA, FALK e SOG1 (ícones verdes na Figura 29 e 34) são utilizadas nos setores ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS, respectivamente.

Nas Figuras de 30 a 34 foram adicionados a variação da temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30km de altitude) e a temperatura média histórica, linhas sólidas azul e preta, respectivamente. Além disso, nos gráficos são indicados por linhas verticais vermelhas e pretas os dias em que ocorreu a temperatura estratosférica máxima para os eventos SSW1<sub>2017-2018</sub> (DOY 49) e SSW2<sub>2018-2019</sub> (DOY 362). Portanto, faremos um estudo da variação diária do VTEC desde o solstício até o início do equinócio para os períodos de 2017-2018 e 2018-2019 (DOY 335 a 90). Neste estudo a variação diária do VTEC durante o solstício ocorre entre o

DOY 335 até DOY 30 e o período de transição do solstício para o equinócio ocorre entre o DOY 30 até o DOY 90. Assim, uma comparação da variação dia-a-dia do VTEC nos períodos de 2017-2018 e 2018-2019 permite avaliar se qualquer alteração dia-a-dia do VTEC é uma combinação entre os fenômenos da transição do solstício-equinócio e o SSW1. Visto que o índice F10.7 para ambos os períodos é muito semelhante.

Figura 29. Mapa mostrando a localização das 20 estações de GPS-TEC utilizadas na investigação sazonal do VTEC nos eventos de SSW1 (2017-2018) e SSW2 (2018-2019). Os ícones vermelhos, amarelos e verdes representam as estações de GPS-TEC localizada na região equatorial, baixas latitudes e médias latitudes, respectivamente. Além disso, o equador geomagnético é indicado pela curva preta.



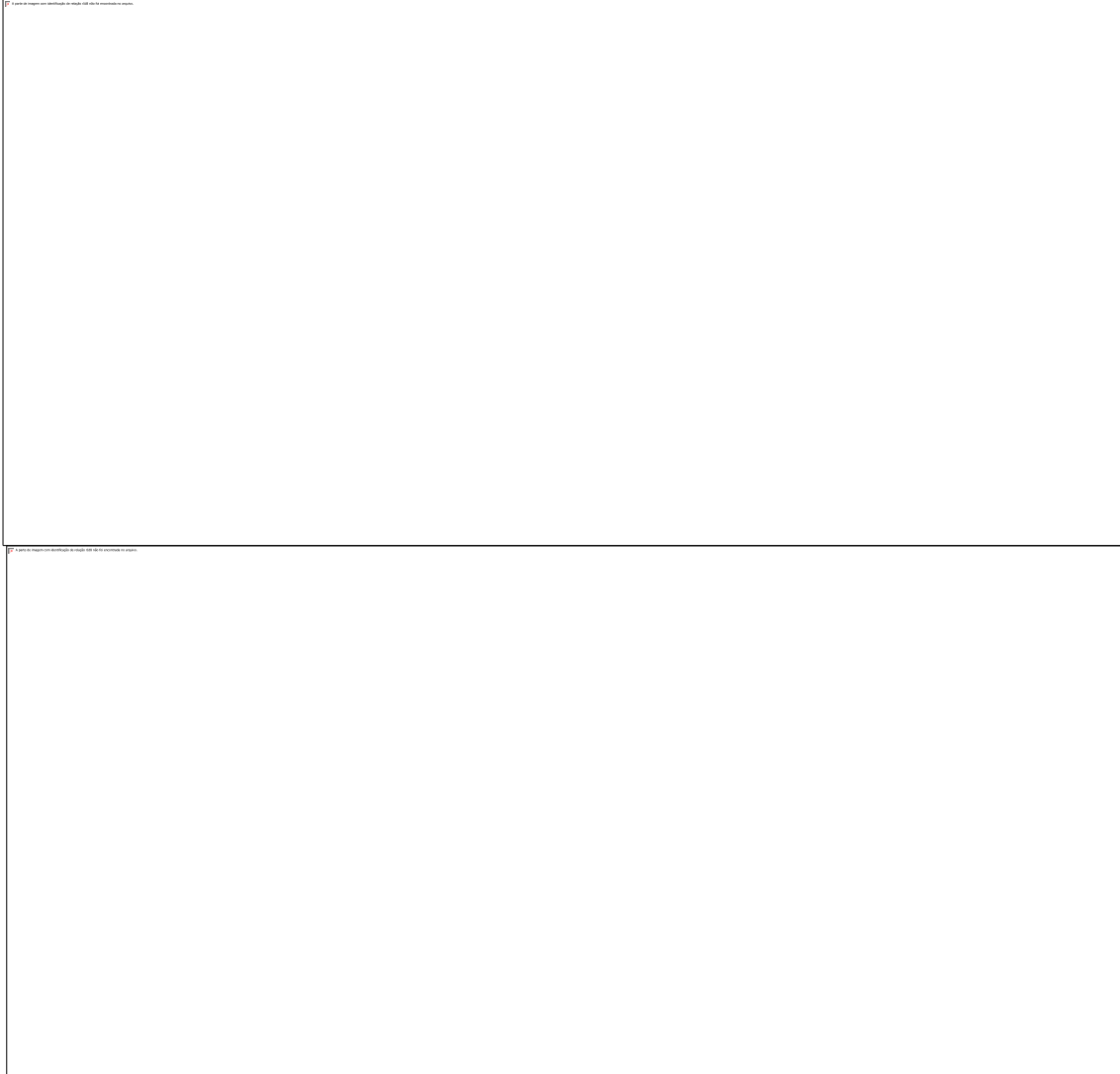
Fonte: Autor

Tabela 5. Mostra o nome, sigla, latitude, longitude e dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas nos gráficos de contorno do VTEC em ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS.

<b>Cidade (Localização)</b>	<b>Sigla da Estação</b>	<b>Latitude (+N)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Dip latitude (+N)</b>
<b>Estações de Média latitude do Hemisfério Norte (HN)</b>				
Greely (Estados Unidos)	CHLL	40,5	-104,6	49,4
Mellen (Estados Unidos)	P338	40,8	-112,9	47,8
N/A (Estados Unidos)	CASE	33,5	-117,4	39,4
Bismarck (Estados Unidos)	P802	46,5	-100,6	33,0
<b>Estação de baixa latitude e além da crista da EIA do Hemisfério Norte (HN)</b>				
Jalapa (México)	UXAL	19,5	-96,9	28,8
Freeport (Bahamas)	CN25	16,2	-74,5	25,9
Cano Negro (Costa Rica)	VERA	10,9	-84,9	21,1
Freeport (Bahamas)	CN15	26,6	-78,7	13,7
<b>Estação da região Equatorial</b>				
Amua (Brasil)	AMUA	-3,1	-60,0	3,5
Rondônia (Brasil)	POVE	-8,7	-63,9	-0,1
Belém (Brasil)	BELE	-1,4	-48,5	-0,8
Imperatriz (Brasil)	IMPZ	-5,4	-47,5	-5,9
<b>Estação de baixa latitude e além da crista da EIA do Hemisfério Sul (HS)</b>				
Palmas (Brasil)	TOPL	-10,2	-48,3	-8,8
Vitória da Conquista (Brasil)	BAVC	-14,9	-40,8	-17,3
Chapecó (Brasil)	SCCH	-27,1	-52,6	-20,1
Porto Velho (Brasil)	POAL	-30,1	-51,1	-22,8
<b>Estações de média latitude do Hemisfério Sul (HS)</b>				
Stanley (Ilhas Falkland)	FALK	-51,7	-57,9	-32,0
Robertson Island (Antartica)	SOG3	-54,3	-37,2	-37,2
Robertson Island (Antartica)	KEPA	-54,3	-36,5	-37,3
Robertson Island (Antartica)	SOG1	-54,9	-36,0	-37,5

Fonte: Autor

Figura 30. Mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 a 24:00 UT em função do DOY para estações CASE, CHLL, P338 e P802 localizados em ML-HN, entre dezembro 01 (DOY 335) a março 31 (DOY 90). As curvas azul e preta indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km) e a média histórica da temperatura estratosférica, respectivamente. Além disso, as linhas verticais vermelha e preta indicam os dias em que ocorreram a temperatura máxima para os SSW1 e SSW2, respectivamente.



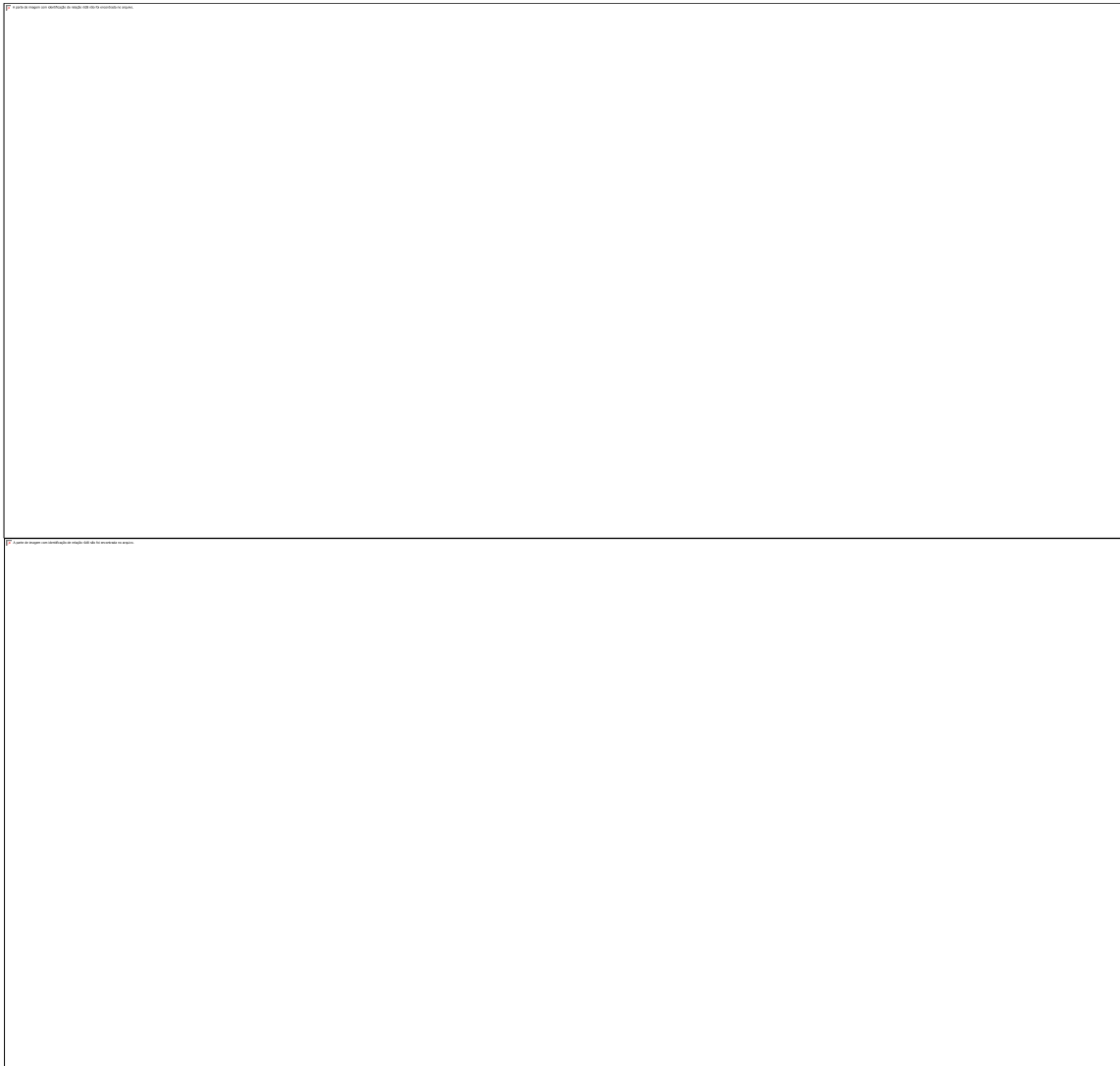
Fonte:

Autor

A Figura 30 apresenta a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 e 24:00 UT em função do DOY para o setor ML-HN, referente aos períodos 2017-2018 e 2018-2019. Nota-se que a variação dia-a-dia dos valores de VTEC no solstício (DOY: 335 a 30, inverno-HN) apresenta a maioria dos dias com valores de VTEC entre 5 e 9 VTECu (padrão esverdeado). No entanto, em alguns dias nota-se que entre às 17:00 e 22:00 UT há um aumento dos valores VTEC para 10 e 13 VTECu (padrão amarelado e avermelhado). Após o DOY 30, quando temos a transição do solstício para o equinócio, nota-se uma intensificação do VTEC, o qual é mais evidente no período de 2017-2018. Pode ser notado também que a variação dia-a-dia do VTEC após o DOY 30 apresenta um maior número de dias com o VTECu entre 11 a 13 (padrão avermelhado).

Também o tempo de duração da intensificação do VTEC durante a transição entre solstício para equinócio ocorre entre 16:00 e 24:00 UT e, portanto, o tempo de duração da intensificação é maior que a observada durante o solstício. Nota-se que cada estação de GPS-TEC apesar de apresentar as características acima descrita, as estações GPS-TEC de CASE e CHLL a intensificação do VTEC é maior do que a observada nas estações P338 e P802. É importante mencionar que a comparação visual entre os períodos 2017-2018 e 2018-2019 sugere fortemente que o VTEC se intensifica mesmo após o evento SSW1, por outro lado, o VTEC após o SSW2 não sofre alterações significativas.

Figura 31. O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de VERA, CN25, UXAL e CN15 localizadas em BL-HN.



Fonte:

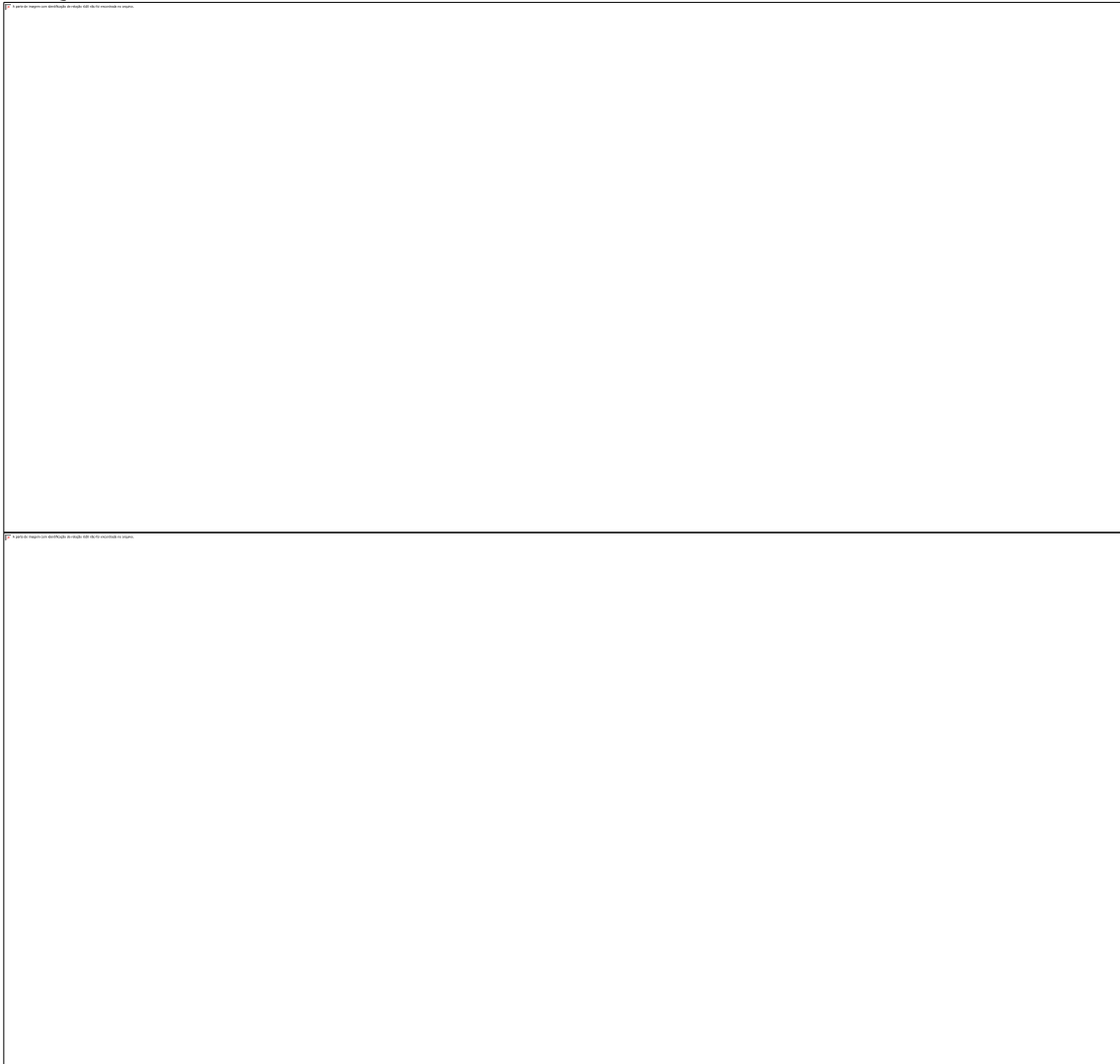
Autor

A Figura 31 mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 e 24:00 UT em função do DOY (335 a 90) para o setor BL-HN, referente aos períodos de 2017-2018 e 2018-2019. A variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício durante o período compreendido entre DOY 335 e DOY 30 (inverno-HN) e entre 14:00 UT e 24:00 UT, apresentam valores que variam de 3 a 20 VTECu (padrões de cores azul e verde). Além disso, nota-se que o padrão esverdeado (13 a 20 VTECu) durante 2017-2018 tem um tempo de duração ligeiramente maior que o período de 2018-2019.

Após o DOY 30, quando temos a transição do solstício para o equinócio, é verificado uma intensificação do VTEC tanto em 2017-2018 como em 2018-2019, indicando que esta intensificação do VTEC está associada a uma variação sazonal do VTEC, visto que ocorre em ambos os períodos. A variação dia-a-dia do VTEC apresenta um maior número de dias com o VTECu entre 25 e 30 (padrão avermelhado). Além disso, o tempo de duração da intensificação do VTEC (padrão esverdeado e avermelhado) durante a transição para equinócio ocorre entre 14:00 e 24:00 UT é, portanto, é maior que a observada durante o solstício.

Nota-se que as estações de GPS-TEC apesar de apresentar as características acima discutidas, a estação VERA apresenta a maior intensificação do VTEC. As estações de CN25 e UXAL a intensificação do VTEC não é tão intensa como na estação VERA, mas pode ser facilmente visualizada na Figura 31. Por outro lado, a estação CN15 é que apresenta uma intensificação menor durante a transição de solstício para equinócio. Vale a pena ressaltar que no período de 2017-2018 a intensificação e a duração é maior que a notada no período de 2018-2019.

Figura 32. O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de POVE, BELE, AMUA e IMPZ localizadas em R-EQU.



Fonte: Autor

A Figura 32 mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 e 24:00 UT em função do DOY (335 a 90) para região equatorial, referente aos períodos de 2017-2018 e 2018-2019. A variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício período compreendido entre o DOY 335 e DOY 30 (inverno-HN) de 12:00 UT as 23:00 UT apresentam valores que variam entre 12 a 23 VTECu (padrão esverdeado). No entanto, nota-se que em alguns dias apresentam uma intensificação do VTEC entre às 15:00 e 22:00 UT, onde são apresentados valores de 29 VTECu e 26 VTECu (padrões avermelhados e amarelo) nos períodos de 2017-2018 e 2018-2019, respectivamente. Além disso, pode ser notado que o padrão amarelo (26 VTECu) durante 2017-2018 tem um tempo de duração ligeiramente maior que o período de 2018-2019.

Após o DOY 30, quando temos a transição do solstício para o equinócio, é verificado uma intensificação do VTEC tanto em 2017-2018 como em 2018-2019. Portanto, indicando

que esta intensificação ocorrida no VTEC está associada a variação sazonal do VTEC, visto que ocorre em ambos os períodos. Além disso, pode ser notado que a intensificação na variação dia-a-dia do VTEC do solstício para o equinócio apresenta um maior número de dias com valores entre 23 e 35 VTECu (padrão esverdeado e avermelhado) entre às 14:00 e 22:00 UT. No entanto, os valores da variação dia-a-dia do VTEC em 35 VTECu entre as 14:00 e 22:00 UT, é observado apenas no período de 2017-2018.

Por outro lado, os valores da variação dia-a-dia do VTEC no período de 2018-2019 atingiram um máximo de 29 VTECu (padrão avermelhado) entre 14:00 e 22:00 UT. É também observado que o tempo de duração da intensificação do VTEC (padrão esverdeado e avermelhado) durante a transição para equinócio, é maior que a observado durante o solstício. Pode ser notado que após o DOY 49 (linha vermelha vertical), que a intensificação do VTEC é maior no período de 2017-2018 quando comparado com período de 2018-2019. Além disso, a diferença da intensificação da variação dia-a-dia do VTEC do solstício para transição do equinócio, entre os períodos de 2017-2018 e 2018-2019 apresentam um valor de  $\sim 5$  VTECu ( $\sim 14,5\%$ ).

Figura 33. O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de SCCH, TOPL, POAL e BAVC localizadas em BL-HS.



Fonte: Autor

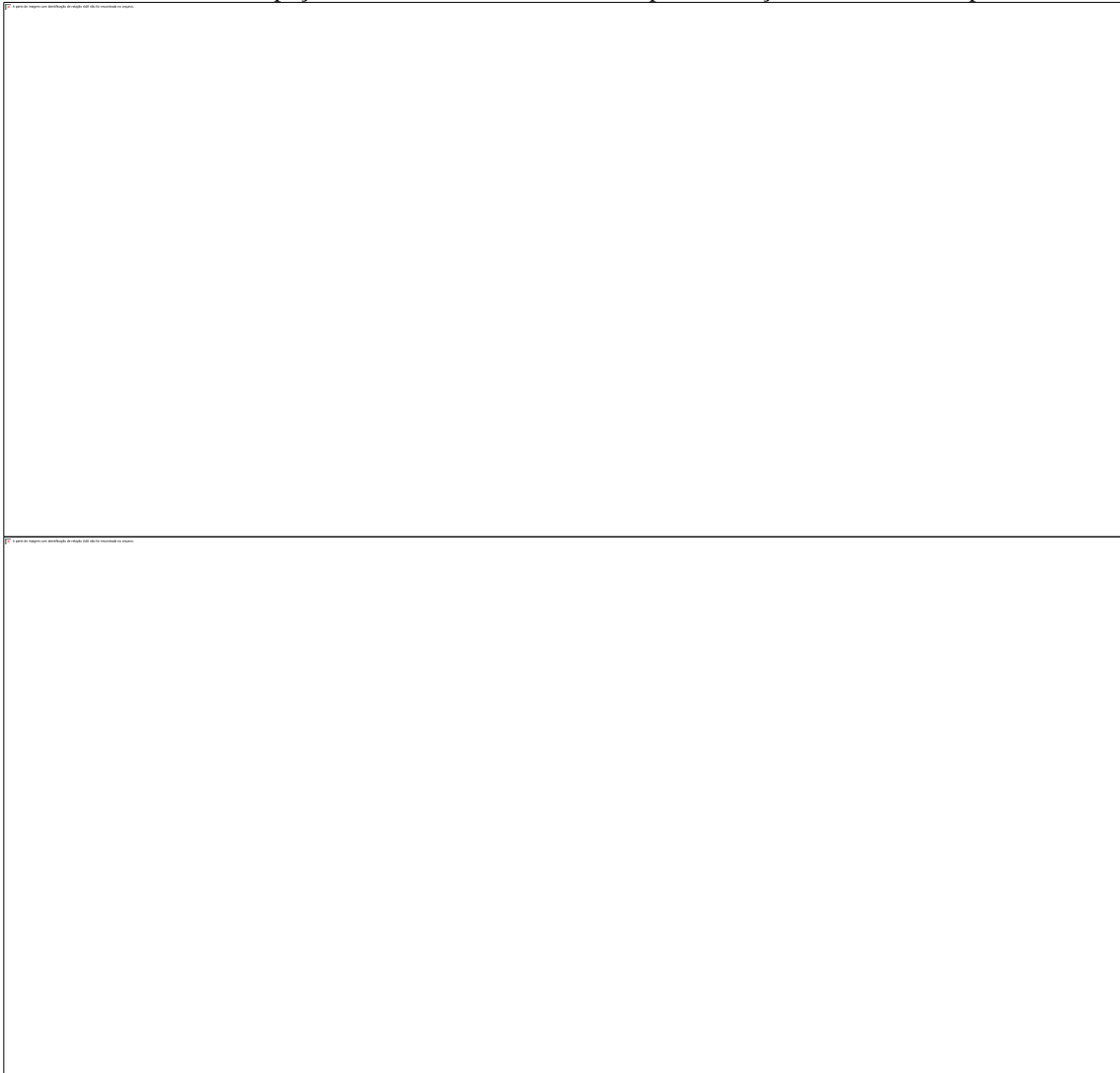
A Figura 33 mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 e 24:00 UT em função do DOY (335 a 90) em baixa latitudes e além da crista da EIA no HS, referente aos períodos de 2017-2018 e 2018-2019. A variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício período compreendido entre o DOY 335 e DOY 30 (inverno-HN) entre as 12:00 e 22:00 UT apresentam na maioria dos dias valores de 15 a 23 VTECu (padrões de cores esverdeado e amarelo). No entanto, em alguns dias nota-se que entre às 12:00 e 22:00 UT há valores do VTEC entre 26 e 35 VTECu (padrão amarelo e avermelhado) para os períodos de 2017-2018 e 2018-2019. Após o DOY 30, quando temos a transição do solstício para o equinócio, é mostrado que a variação dia-a-dia do VTEC fica intensificada nas estações de GPS-TEC denominada TOPL e BAVC.

É notado que nestas estações de GPS-TEC, a intensificação da variação dia-a-dia do VTEC apresenta valores entre 15 e 35 VTECu (padrão esverdeado e avermelhado) entre às

12:00 e 22:00 UT. Por outro lado, nas estações de GPS-TEC denominadas SCCH e POAL, a intensificação do VTEC mostram valores de VTEC de 15 a 29 VTECu (padrão esverdeado e vermelho claro) entre as 14:00 e 22:00 UT. Assim, além do que já foi discutido acima, a variação dia-a-dia do VTEC nas estações de GPS-TEC denominados (SCCH e BAVC) mostram maior intensificação desde o solstício a transição do equinócio no período de 2017-2018.

No entanto, após o DOY (365) a intensificação do VTEC nas estações de GPS-TEC denominadas (SCCH e POAL) no período de 2018-2019 é menor do que no período de 2017-2018. Além disso, é importante mencionar da variação dia-a-dia do VTEC na fase de transição, existe uma maior intensificação do VTEC, a qual ocorre em torno do DOY (50 e da linha vermelha vertical) no período de 2017-2018. No entanto, é verificado que essa intensificação do VTEC entorno do DOY (50 e da linha vertical pontilhada), é sempre menor no período de 2018-2019.

Figura 34. O mesmo da Figura 30, mas para estações de GPS-TEC de SOG3, KEPA, FALK e SOG1 localizadas em ML-HS. Além disso, o espaço branco indica a falta de dados para a estação GPS-FALK no painel inferior.



Fonte: Autor

A Figura 34 mostra a variação dia-a-dia do VTEC entre 10:00 e 24:00 UT em função do DOY (335 a 90) em média latitudes no HS, referente aos períodos de 2017-2018 e 2018-2019. Nota-se que a variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício (DOY: 335 a 30, inverno-HN) em um número maior de dias apresentam-se com valores de VTEC variando entre 5 e 9 VTECu (padrão esverdeado) entre as 10:00 UT e 24:00 UT. No entanto, a intensificação da variação dia-a-dia do VTEC em um número menor de dias, é apresentada por picos com valores entre 11 a 13 VTECu (padrões de cores amarelo e avermelhado) entre 10:00 UT e 24:00 UT. É notado também que, a variação dia-a-dia do VTEC mostra uma intensificação ligeiramente maior no período de 2017-2018 ao comparar com a intensificação ocorrida do VTEC no período de 2018-2019.

Após o DOY 30, quando temos a transição do solstício para o equinócio, nota-se que a variação dia-a-dia do VTEC mostra os valores variando entre 7 a 13 VTECu (padrões esverdeado e avermelhado) entre as 10:00 e 24:00 UT. Além disso, nota-se durante o equinócio que a variação dia-a-dia do VTEC é apresentado por picos com tempo de duração maior do que ocorreu durante o solstício para os valores entre 10 a 13 VTECu (padrões amarelo e avermelhado) variando entre 12:00 e 19:00 UT.

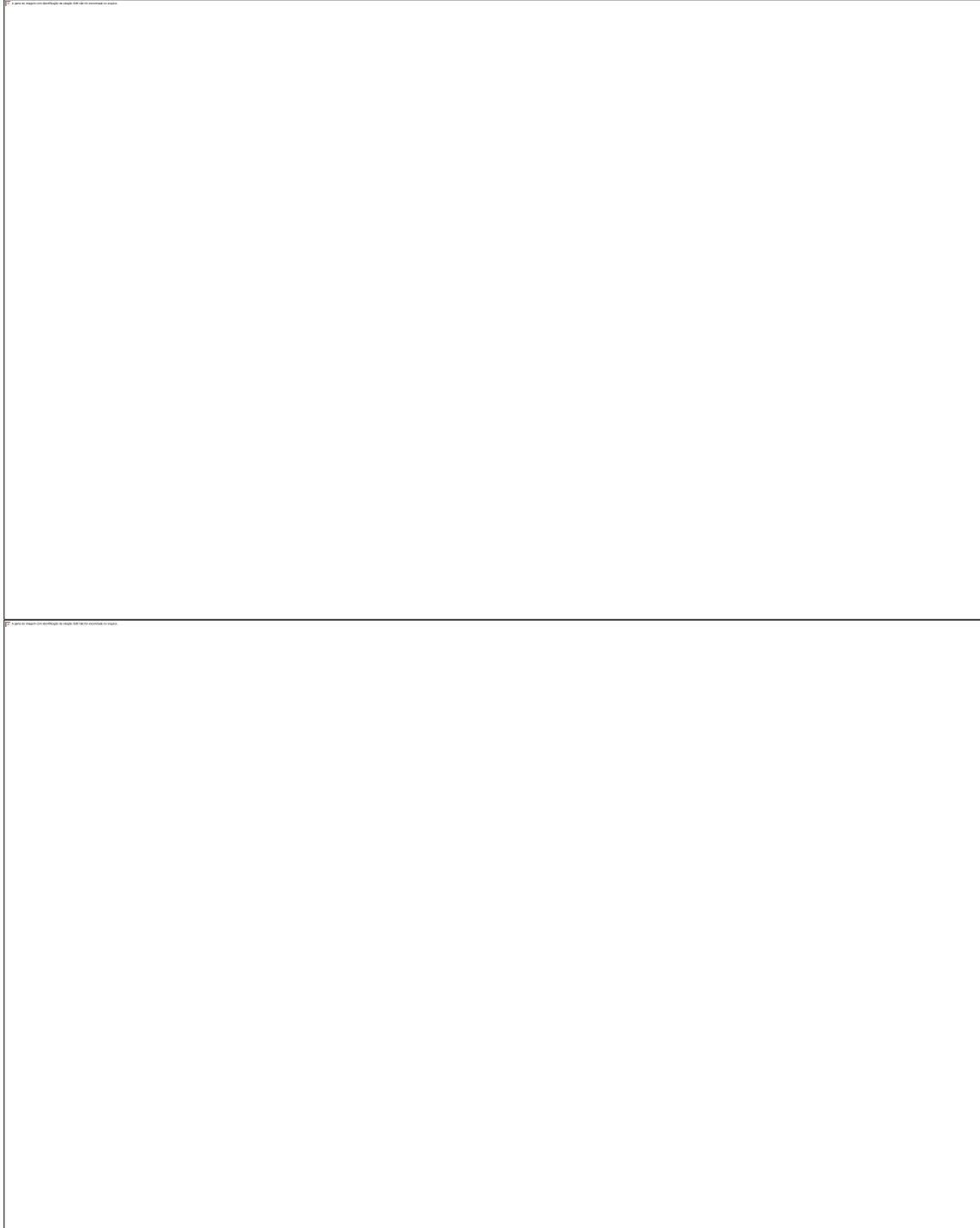
A intensificação do VTEC apesar de apresentar as características acima descrita, é maior no período de 2017-2018 ao comparar com o período 2018-2019. Outra informação importante, é a intensificação do VTEC ocorrida entorno do DOY (50 e da linha vermelha vertical) no período de 2017-2018 ao comparar com a intensificação do VTEC no período de 2018-2019. Além disso, o espaço em branco mostrado na estação de GPS-TEC denominada (FALK), é devido à falta de dados nesta estação de GPS-TEC, o qual corresponde ao período de 2018-2019.

#### **4.2.2 VARIAÇÃO SAZONAL DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS $h'F$ , $foF2$ E Spread-F**

De forma análoga ao realizado para o VTEC, faz-se uma comparação da variação dia-a-dia dos parâmetros ionosféricos  $h'F$ ,  $foF2$  e os Spread-F tipo altura (RSF linha vermelha) e tipo frequência (FSF linha preta) nos períodos de 2017-2018 (SSW1) e 2018-2019 (SSW2). O objetivo é investigar se houve alguma variação dia-a-dia dos parâmetros ionosféricos relacionado com a combinação entre o SSW1 e o fenômenos da transição do solstício-equinócio. Nesta seção apresenta-se o estudo da variação dia-a-dia dos parâmetros  $foF2$ ,  $h'F$  e Spread-F do tipo altura (*range* -RSF) e frequência (FSF) utilizando dados das ionossondas de Araguatins (ARA dip latitude -5,0), Jataí (JAT dip latitude -13,5) e São José dos Campos (SJC dip latitude -20,4).

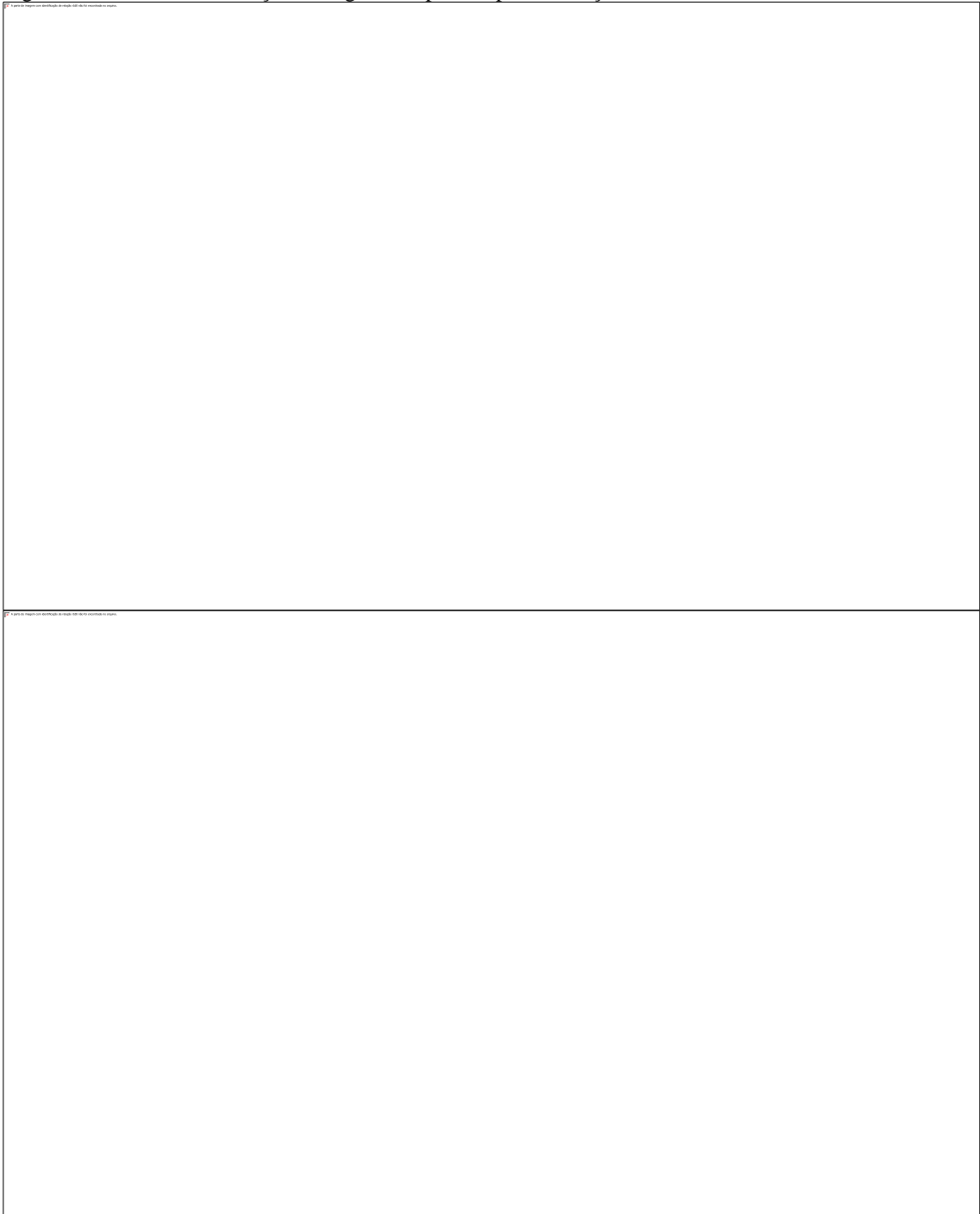
As Figuras 35, 36 e 37 mostram a variação dia-a-dia da  $foF2$ ,  $h'F$  e os Spread-F (RSF e FSF) em função dos DOY (335 a 90) e LT, durante o SSW1 (2017-2018) e SSW2 (2018-2019). Nestas figuras são usados os dados referentes a temperatura estratosférica a 90° N em 10 hPa (~30km) e a média histórica indicadas pelas linhas azul e preta nos gráficos de contornos. No entanto, nos painéis (C) não é usado a média histórica (linha preta), isso porque a curva referente a média histórica dificulta a observação de alguns pontos da ocorrência dos espalhamentos (ESF).

Figura 35. (A) Mostra a variação dia-a-dia do foF2 em função da DOY (335-90) e LT (12:00 – 10:00) para a estação ARA, durante o SSW1 (2017-2018). A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW1 e a curva preta indica a temperatura média histórica. As linhas verticais contínuas vermelha e preta indicam o dia em que ocorreu o máximo da temperatura estratosférica do SSW1 e SSW2. (B) O mesmo que (A) mas para o parâmetro ionosférico h'F. (C) O mesmo que (A) mas para o parâmetro Spread-F, onde as linhas vermelha e preta mostram os Spread-F tipo range e do tipo frequência. A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW1 e SSW2.



Fonte: Autor

Figura 36. O mesmo da estação da Figura 35, porém, para a estação de JAT.



Fonte: Autor

Figura 37. O mesmo da estação da Figura 35, porém, para a estação SJC.



Fonte: Autor

As Figuras de 35 a 37 nos painéis (A, B e C) mostram a variação dia-a-dia dos valores de  $f_oF2$ ,  $h'F$  e as ocorrências dos Spread-F (RSF e FSF) das estações de ionossondas (ARG, JAT e SJC) em função de LT e dos DOY (335 a 90). Nota-se que a variação dia-a-dia dos valores de  $f_oF2$  em ARG variam de 4 a 9 MHz (padrões do esverdeado ao vermelho claro) entre as 11:00 LT e 22:00 LT durante o solstício (DOY: 335 a 30) no período de 2017-2018 e 2018-

2019. No entanto, em JAT e SJC os valores de foF2 variam de 4 a 11 MHz (padrão esverdeado e avermelhado) entre as 11:00 LT e 22:00 LT. Assim, após as 22:00 LT os valores de foF2 diminuí variando de 1 a 9 MHz, o qual as intensidades de foF2 indicam similaridades para cada estação nesse intervalo de tempo. Pode ser notado também que entre os DOY (355 a 20) a intensidade de foF2 é menor no período de 2018-2019 ao comparar com 2017-2018.

O período após o DOY 30, o qual indica a fase de transição do solstício para o equinócio há uma intensificação da variação de foF2 em ARG, JAT e SJC com valores variando de 6 a 11 MHz (padrão esverdeado e vermelho) entre as 11:00 LT e 22:00 LT. Por outro lado, em JAT e SJC indica maior intensificação nos valores de foF2 do que os valores apresentados por ARG no período após o DOY 30. Além disso, na estação ARG, os valores de foF2 mostra uma maior intensidade após o DOY-30 no período de 2017-2018 comparado com 2018-2019. Pode ser notado também que a intensificação de foF2 ocorrida em ARG e JAT é similar nos períodos 2017-2018 e 2018-2019 entorno do DOY (49-linha vermelha vertical).

Além disso, os pontos brancos nos gráficos de contorno de foF2 entre as 22:00 LT e 04:00 LT indicam as ocorrências dos Spread-F. No entanto, as faixas em branco verticais indicam a falta de dados para os valores de foF2 nas estações ARG, JAT e SJC no período de 2017-2018 e 2018-2019. A falta de dados na Figura 37A de foF2 (coluna branca) para o período de 2018-2019, pode ser notado que não compromete por completo a análises dos dados. Isso pode ser visto ao tomar como referência os gráficos de ARG e JAT neste mesmo período de estudo, o qual mostra uma diminuição dos parâmetros ionosféricos e dos Spread-F.

A variação dia-a-dia de h'F mostrado nas Figuras 35B, 36B e 37B ocorre entre 11:00 LT (dia anterior) e 11:00 LT (dia seguinte) variando de 140 km a 320 km (padrão azul e vermelho). Nota-se que no período do solstício durante os DOY (335 a 30) os valores de h'F de 320 km (padrão vermelho) indicam uma maior quantidade de dias em ARG e JAT comparada com SJC entre as 14:00 LT e 04:00 LT. Por outro lado, durante a fase de transição do solstício para o equinócio no período após o DOY 30, os valores de h'F de 320 km apresentam com maior número de dias em SJC do que em ARG e JAT.

Além disso, é observado na variação dia-a-dia de h'F para os valores de 266 km (padrão amarelo) a 320 km em ARG e JAT ocorre entre 14:00 LT e 04:00 LT, porém, em SJC ocorre entre 18:00 LT 04:00 LT. Portanto, é visto que entorno do DOY (49 e linha vermelha vertical) que os valores de h'F atinge altitude de 320 km em JAT e SJC, porém, em ARG o valor fica entorno de 284 km para o período de 2017-2018. Assim, como foi mencionado para os valores

de foF2 sobre a falta de dados, é também verificado para os valores de h'F na Figura 37B referente ao período de 2018-2019.

As Figuras de 35C, 36C e 37C mostram as ocorrências dia-a-dia dos spread-F tipo altura (RSF-linhas vermelhas verticais) e tipo frequência (FSF-linhas preta verticais) durante os DOY (335 a 90) entre 18:00 LT e 12:00 LT. Nota-se que há uma maior ocorrência dos Spread-F (RSF e FSF) durante os DOY (335 a 30 solstício) para a estação de ARG do que nas estações JAT e SJC nos períodos de 2017-2018 e 2018-2019.

Outra observação importante na ocorrência das irregularidades em ARG no solstício, é que o tempo de duração dos Spread-F tipo range é levemente maior no período de 2018-2019 em comparação com 2017-2018. No entanto, após o DOY 30 (período de transição do solstício para equinócio) é observado que há uma menor ocorrências dos Spread-F em ARG e JAT no período referente a 2017-2018. Além disso, fica claro a baixa ocorrência dos (ESF) entorno da linha vermelha e preta vertical para os períodos de 2017-2018 e 2018-2019 nas estações ARG, JAT e SJC.

#### 4.3 O PRIMEIRO EVENTO DE SSW1 (2017-2018)

Na investigação do SSW1 utiliza-se a mesma metodologia utilizada por Fagundes *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2017). A Figura 38 mostra os parâmetros estratosféricos (temperatura, vento e amplitude das ondas planetárias PW1 e PW2) em função do dia do ano DOY 20-80 (20/01/2018 a 21/03/2018). Os dias compreendido entre as linhas pretas tracejadas indica o início e fim do evento SSW de 2017-2018 (SSW1).

A linha preta indica o dia em que ocorreu a temperatura máxima estratosférica deste evento. Na Figura 38A a linha azul indica a variação da temperatura estratosférica a 90° N (10 hPa, ~30km) e a linha preta indica a variação da média histórica da temperatura estratosférica entre 1979 e 2018. Figura 38B mostra a variação do vento zonal a 60° N, note que o vento zonal reverteu para leste durante o SSW1. A Figura 38C mostra a variação da amplitude das ondas planetárias PW1 e PW2 a 10 hPa. Nas Figuras 38D, 38E e 38F mostram a variação dos índices geomagnéticos F10.7, Dst e Kp, respectivamente.

Portanto, é observado que a temperatura estratosférica aumenta ~213 K para ~248 K entre o DOY 40 e DOY 49 (09/02/2018 - 18/02/2018). Após a temperatura estratosférica atingir o seu máximo (~248 K) ela diminui gradualmente até atingir valores da média histórica no DOY 66 (~200K) em 07/03/2018. A tabela 6 mostra um resumo das características do SSW1

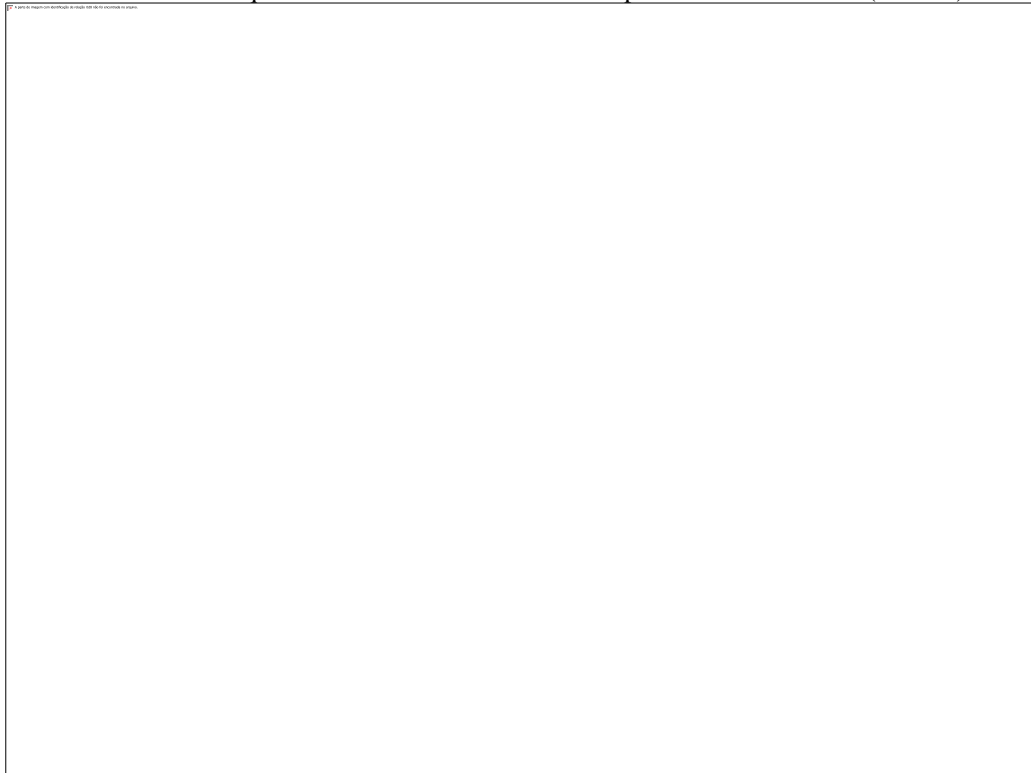
(inverno no HN): o período em que ocorre o evento, duração do evento (em dia), a temperatura máxima na estratosférica (90° N) e o valor mínimo da velocidade do vento zonal em 60° N.

Tabela 6. Resumo das características do evento de SSW1.

O inverno HN	Período do evento	Tempo de duração do evento	T (K-90°N) 10hPa máxima do SSW1	U (m/s) 10hPa (60°N) Pico-SSW
<b>DOY 40 a DOY 66</b>				
<b>2017-2018</b>	<b>(09/02/2018-07/03/2018)</b>	<b>(~26 dias)</b>	<b>~248</b>	<b>-11,7</b>

Fonte: Autor

Figura 38. Mostra as condições estratosféricas e os índices geomagnéticas para o evento de SSW1 (2017-2018) em função do dia do ano (DOY 20-80). A) mostra a temperatura estratosférica (linha azul a 90°N em 10 hPa) e a linha preta (média histórica da temperatura). B) apresenta o vento zonal (linha vermelha a 60°N em 10 hPa). C) mostra as atividades das ondas planetárias 1 (PW1) e 2 (PW2) em 10hPa. D) índice de fluxo solar F10.7, E) o índice Dst e F) o índice Kp. As linhas verticais pontilhadas indicam o início e fim do SSW1 (~26 dias) e a linha vertical sólida indica o dia em que ocorreu o valor máximo da temperatura estratosférica (~248 K).



Fonte: Autor

#### **4.3.1 ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW1 (2017-2018) DE MÉDIA LATITUDE DO HN ATÉ MÉDIA LATITUDE DO HS NO SETOR AMERICANO**

As Figuras 39A a 43A mostram a variação diária do VTEC em função do DOY e UT, entre as 10:00 e 24:00 UT (7:00 a 21:00 LT), para estações desde médias latitudes do HN até médias latitudes do HS. O período de estudo do evento de SSW1 corresponde ao DOY 20-80 (20/01/2018 a 21/03/2018). As Figuras 39B a 43B e 39C a 43C apresentam uma comparação entre a variação diária do VTEC para os dias perturbados pelo SSW1 (DOY 44 a 54) e a variação média diária do VTEC dos 10 dias que antecederam o SSW1 (denominado período calmo), entre 10:00 e 24:00 UT. A linha preta e a faixa cinza indicam a variação diária da média do VTEC e o desvio padrão dos dias calmos e as linhas coloridas indicam a variação diária do VTEC referente os 5 dias antes e 5 dias posterior a temperatura máxima do SSW1 (DOY 44 a 54). Nesta investigação foram escolhidas 20 estações de GPS-TEC distribuídas desde médias latitudes do hemisfério norte (HN) até médias latitudes do hemisfério sul (HS), as quais são indicadas na Tabela 7 e Figura 20.

Tabela 7. Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip-latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo VTEC para o período perturbado e calmo do SSW1.

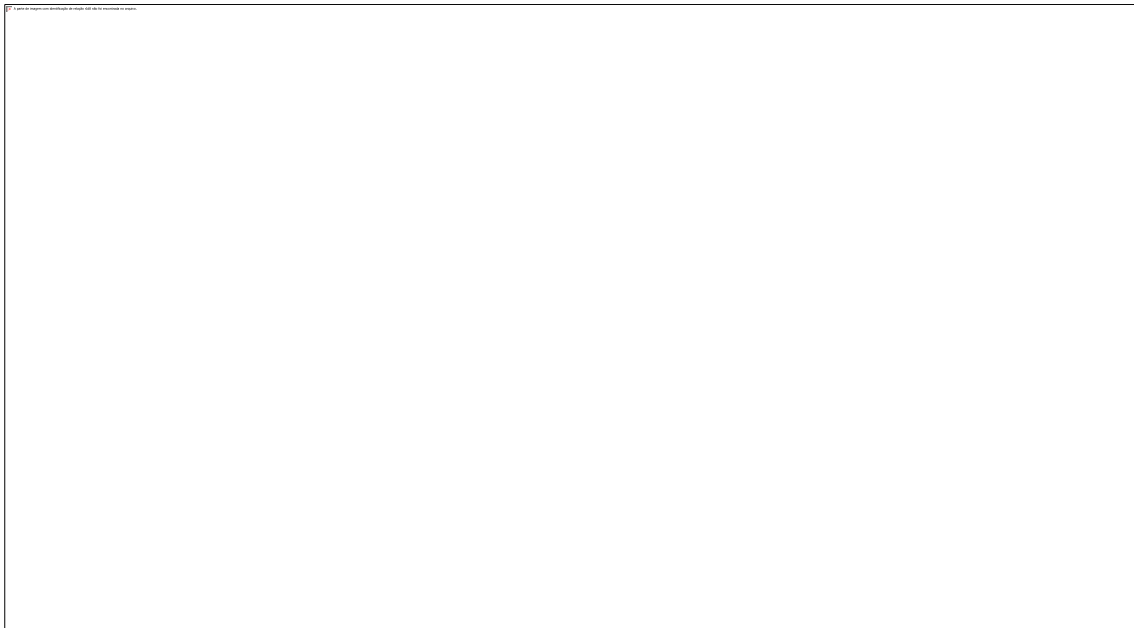
<b>Cidades (Localização)</b>	<b>Sigla da Estação</b>	<b>Latitude (+N)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Dip latitude (+N)</b>
<b>Estações de média latitude do Hemisfério Norte (HN)</b>				
Nain (Canadá)	NAIN	56,6	-61,7	62,1
Schefferville (Canadá)	SASK	52,2	-106,4	61,9
Tumwater (Estados Unidos)	SCH2	48,5	-66,8	61,8
Ellensburg (Estados Unidos)	LINH	47,0	-120,5	38,6
<b>Estações de baixa latitude do Hemisfério Norte (HN)</b>				
Jalapa (México)	UXAL	19,5	-96,9	28,8
Cabrera (República Dominicana)	RDLT	19,3	-69,6	26,8
Freeport (Bahamas)	CN25	16,2	-74,5	25,9
Cano Negro (Costa Rica)	VERA	10,9	-84,9	21,1
<b>Estações da região Equatorial</b>				
Belém (Brasil)	BELE	-1,4	-48,5	-0,83
Porto Velho (Brasil)	POVE	-8,7	-63,9	-0,01
Guajará-Mirim (Brasil)	ROGM	-10,5	-65,2	-1,37
Bacabal (Brasil)	MABA	-4,2	-44,8	-5,48
<b>Estações de baixa latitude dos Hemisfério Sul (HS)</b>				
Sobral (Brasil)	CESB	-3,7	-40,3	-7,5
Natal (Brasil)	RNNA	-5,8	-35,2	-12,4
Ponta Porã (Brasil)	MSPP	-22,4	-55,4	-15,3
Porto Alegre (Brasil)	POAL	-30,1	-51,1	-22,8
<b>Estações de média latitude do Hemisfério Sul (HS)</b>				
Stanly (United Kindom)	FALK	-51,7	-57,9	-32,0
Rio Grande (Argentina)	RGDG	-53,8	-67,8	-32,4
Robertson Island (Antartica)	SOG3	-54,3	-37,2	-37,2
Roertson Island (Antartica)	KEPA	-54,3	-36,5	-37,3

Fonte: Autor

Para ilustrar o efeito do SSW1 no VTEC, a temperatura estratosférica a 90° N em 10 hPa (~30 km, linha sólida azul) e média histórica (linha sólida preta) foram inseridas nas Figuras 39A a 43A. A Equação 22 foi utilizada para calcular a variação percentual do VTEC (%) de cada estação e setor longitudinal (média global para cada setor longitudinal) para os DOY 44, 45, 46, 47, 48 49, 50, 51, 52, 53 e 54. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 8 a 12 e Figura 44. Os resultados positivos e negativos indicam que os valores de VTEC para um determinado setor e DOY apresenta uma variação percentual relativa maior ou menor que a média dos dias calmos, respectivamente.

$$VTEC(\%) = \frac{(VTEC_{DOY} - VTEC_{calmo}) \times 100}{VTEC_{calmo}} \quad (18)$$

Figura 39. (A) Mostra a variação diária do VTEC em função de UT entre 10:00 a 24:00 UT e DOY de 20 a 80 (20/01/2018 a 21/03/2018) para as estações de GPS-TEC chamadas LINH, SASK, SCH2 e NAIN, localizados em ML-HN. A curva sólida azul indica a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km) durante o SSW1 e a curva preta a média histórica da temperatura estratosférica. A linha preta e pontilhadas verticais indicam o início e fim do SSW1 e o dia em que ocorreu a temperatura máxima, respectivamente. (B) Comparação entre a variação diária do VTEC perturbados durante o evento de SSW1 para o DOY entre 44 e 49 e a variação diurna média dos dias calmos (linha preta) com os respectivos desvios padrão ( $\pm \sigma$ , faixa cinza). (C) O mesmo que a Figura 39B, porém para o DOY entre 49 e 54.



Fonte:

Autor

Tabela 8. Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo ML-HN, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações LINH, SASK, SCH2 e NAIN entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 21.

Fonte: Autor

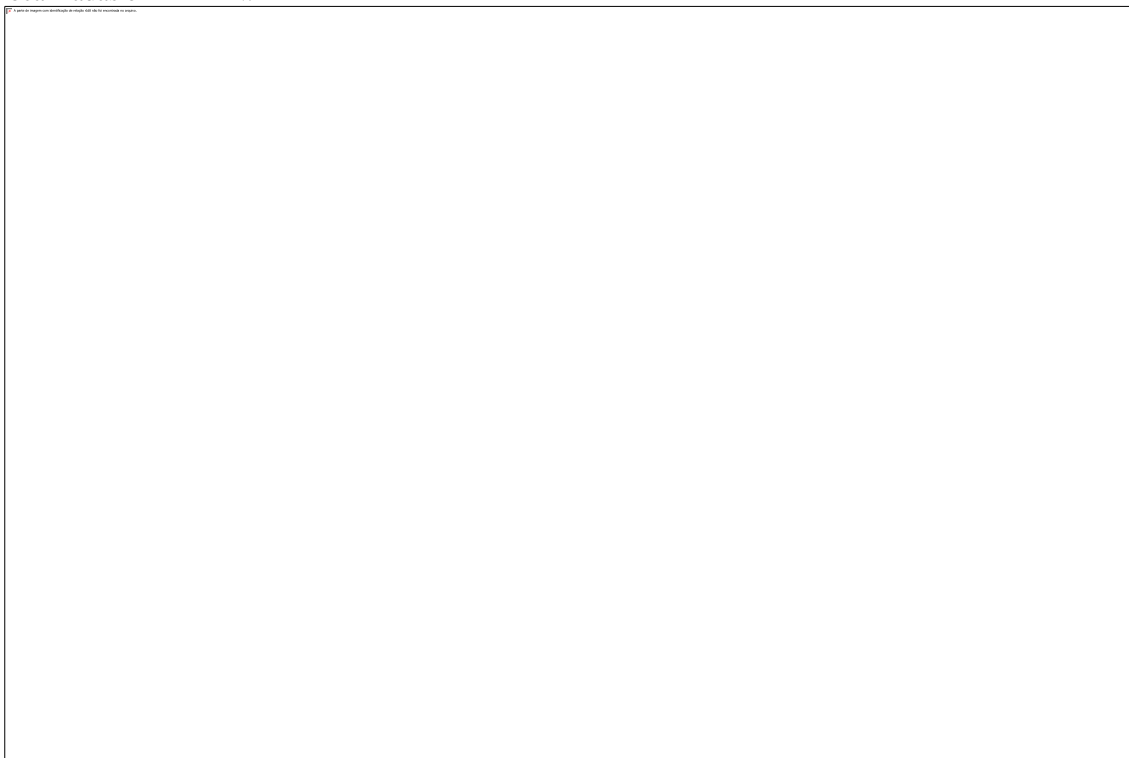
A Figura 39A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC em ML-HN em função do UT (10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 20 a 80), durante o evento de SSW1. Os valores do VTEC indicados pelos padrões de cor vermelha é de ~11-13 VTECu, de cor amarela é de ~9,0 VTECu, de cor verde é de ~5,0-8,0 VTECu e de cor azul é de 0 a 4. Nota-se na Figura 39A que o VTEC nas estações de LINH e SASK apresenta os maiores valores entre 16:00 UT e 24:00 UT e as estações SCH2 e NAIN os maiores valores de VTEC ocorre entre as 12:00 UT e 22:00 UT. Porém, antes do evento SSW1 (DOY 20 a 40) nas 4 estações de ML-HN apresenta menor valores de VTEC entre 12:00 e 24:00 UT.

Na fase ascendente da temperatura estratosférica do SSW1 (DOY 40 a 49) as estações LINH e SASK mostra um maior número de dias com padrão vermelho e amarelo (9 a 13 VTECu) em relação as estações SCH2 e NAIN. Além disso, nota-se uma maior duração do padrão verde (~5 a 8 VTECu) nas estações SCH2 e NAIN. Na fase descendente da temperatura estratosférica do SSW1 (DOY 50 a 65) a estação LINH é a que apresenta uma maior intensificação (padrão amarelo e vermelho escuro, VTECu 9 a 13). As estações SASK, SCH2 e NAIN a intensificação foi um pouco menor, o VTEC ficou entre 9 e 11 VTECu (padrão amarelo e vermelho claro). No entanto, após o DOY 70 as 4 estações apresentam uma intensificação VTECu (padrão vermelho), indicando uma intensificação do VTEC na transição do solstício para o equinócio, após o SSW1.

As Figuras 39B e 39C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Uma comparação da variação diária dos dias perturbados com a média dos dias calmos mostra uma variabilidade dia-a-dia grande. No entanto, chama a atenção a fase positiva do VTEC para o DOY 46 nas estações SASC, SCH2 e NAIN, para o DOY 53 nas 4 estações do ML-HN e para DOY 50 para estações SCH2 e NAIN. Durante o máximo de temperatura do SSW1 (DOY 49) o VTEC apresentou uma fase negativa do VTEC em LINH e uma fraca fase positiva do VTEC em SASK, SCH2 e NAIN.

Uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22), este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 8). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de ML-HN, estes resultados são apresentados na Figura 44, onde nota-se claramente que na média o SSW1 causou fase positiva do VTEC em ML-HN.

Figura 40. O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC chamadas CN25, RDLT, UXAL e VERA localizadas em BL-HN.



Fonte:

Autor.

Tabela 9. Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HN, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações CN25, RDLT, UXAL e VERA entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22.

Fonte: Autor

A Figura 40A mostra a variação diária do VTEC referente as quatro estações de GPS-TEC em BL-HN em função do UT (10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 20 a 80) durante o evento de SSW1. A variação do VTEC entre as 10:00 UT e 24:00 UT são indicados pelos padrões de cores que variam do azul ao avermelhado. Portanto, os valores do VTEC variam de ~25 a 30

VTECu (padrão avermelhado), ~23,0 VTECu (padrão amarelo), ~12,0 a 20,0 VTECu (padrão esverdeado) e de 0 a 10 (padrão azul).

Nota-se que os valores do VTEC para o período antecedente o valor máximo da temperatura estratosférica varia de ~3 a 15 VTEC nas 4 estações de GPS-TEC. Pode ser notado que após o DOY (65) os valores do VTEC de 25 a 30 VTECu (padrão avermelhado) apresentam-se com maior frequência nas estações UXAL e VERA (setor leste) entre as 14:00 UT e 22:00 UT. Por outro lado, nas estações CN25 e RDLT o VTEC com intensidade indicando maiores valores variam de ~13 a 25 VTECu entre as 16:00 UT e 24:00 UT. Portanto, as variações do VTEC nas estações de BL-HN indicaram maior intensidades a partir do início do SSW1, qual passou a se intensificar para os dias posteriores.

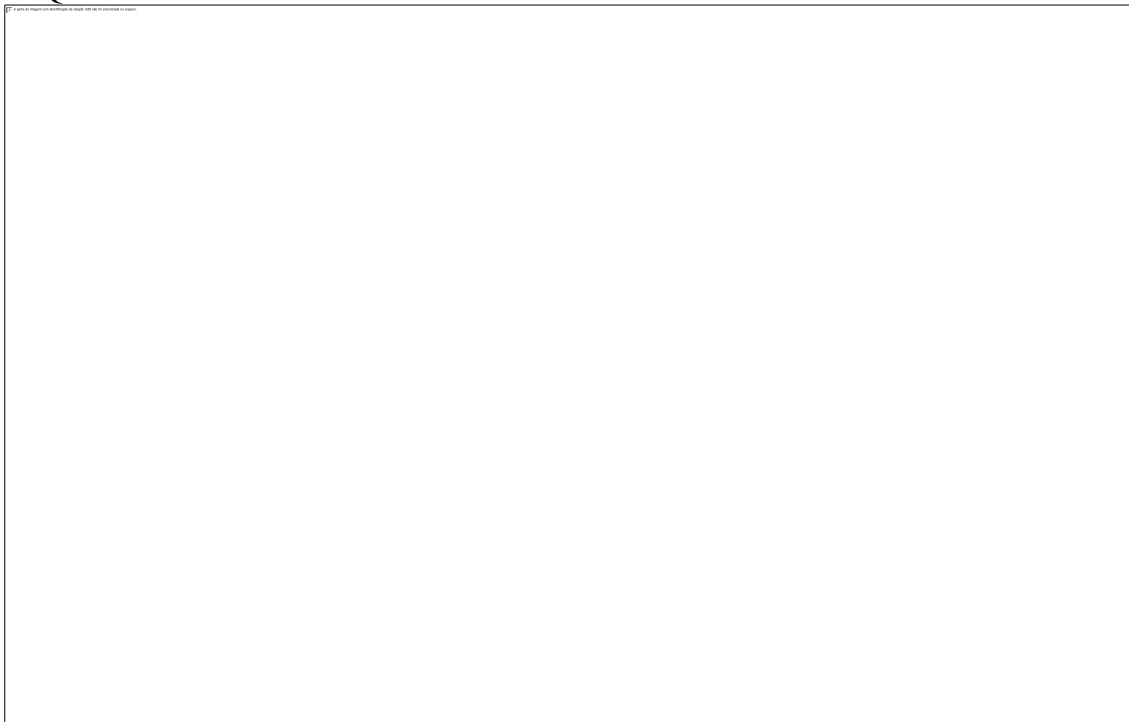
As Figuras 40B e 40C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Estes dias são distribuídos em 5 dias (antes) e 5 dias após o (DOY 49), os quais são indicados pelas linhas coloridas. Nota-se que as variações do VTEC entre as 10:00 UT e 24:00 UT indicam fortes alterações comparado a média dos dias calmos. Por outro lado, os valores médios do VTEC (dias calmos) mostram uma variação de ~2 a 15 VTECu. As variações do VTEC referente aos DOY (44 a 54) indicam uma variação de ~2 a ~28 VTECu entre 10:00 UT e 24:00 UT ao comparar a média dos dias calmos nas estações CN25, RDLT, VERA e UXAL. Por outro lado, a estação RDLT e VERA apresentam uma variação do VTEC para o DOY (49) superior aos valores das estações CN25 e UXAL entre 12:00 UT e 22:00 UT.

De modo a comparar a variação do VTEC do período perturbado com o período calmo dos DOY (44 a 48) e DOY (50 a 54) entre Figura 40B e 40C, é visto que a variação do VTEC indica maior fase positiva em 48C. Além disso, nota-se na Figura 40C entre as 12:00 UT e 22:00UT que os valores do VTEC para os dias perturbados variaram de ~5 a 28 VTECu. Pode ser notado que o maior destaque da variação do VTEC ocorre na estação (VERA), a qual mostra os maiores valores referente a média dos dias calmos indicando forte fase positiva. A investigação do efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizada pelo cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação referente aos DOY (44 a 54) utilizando a Equação 22, onde, este cálculo foi realizado entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 9).

Nota-se que há valores positivos e negativos para o VTEC, no entanto, os valores positivos são apresentados em maiores quantidades. Isso faz-se que a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de BL-HN apresentados

na Figura 44, onde nota-se claramente que na média durante o SSW1 causou fase positiva do VTEC.

Figura 41. O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de ROGM, POVE, BELE e MABA localizadas R-EQU.



Fonte:

Autor.

Tabela 10. Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo R-EQU, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações ROGM, POVE, BELE e MABA entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22.

Fonte: Autor

A Figura 41A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC em R-EQU em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) durante os dias do ano (DOY 20 a 80) para o evento de SSW1. As variações diárias do VTEC são mostradas para quatro estações de GPS-

TEC denominadas ROGM, POVE, BELE e MABA da R-EQU. Nota-se na Figura 41A que a variação diária do VTEC mostra um crescimento entre os DOY (20 a 80), o qual é representado pelas alterações dos padrões de cores esverdeado ao avermelhado indicando maiores intensidades entre as 13:00 e 22:00 UT. Portanto, os valores do VTEC indicados pelos padrões mencionados antes variam de ~29-35 VTECu (avermelhado), ~26 VTECu (amarelo) e ~15-23 VTECu (esverdeado).

No entanto, nota-se que o VTEC entre os DOY (20-40) representativos dos valores de maior intensidade correspondem de ~15 a ~29 VTECu (padrão esverdeado e vermelho claro) entre as 12:00 UT e 23:00 UT. Nesse período foi observado uma diminuição de ~10,0 (VTECu) correspondendo uma queda de ~24% de sua intensidade máxima (padrão avermelhado) comparado ao período após o evento. No período durante o evento indicado pelas linhas tracejadas verticais entre os DOY (40 e 65), o VTEC mostra maior intensidade comparado ao período antecedente entre os DOY (20 e 40) com valores que variam de ~15 a ~29 VTECu (padrão esverdeado ao vermelho claro) entre 12:00 UT e 23:00 UT. Assim, como pode ser visto, a intensificação do VTEC passa ser maior após o período do SSW1 correspondendo o período após o DOY-65.

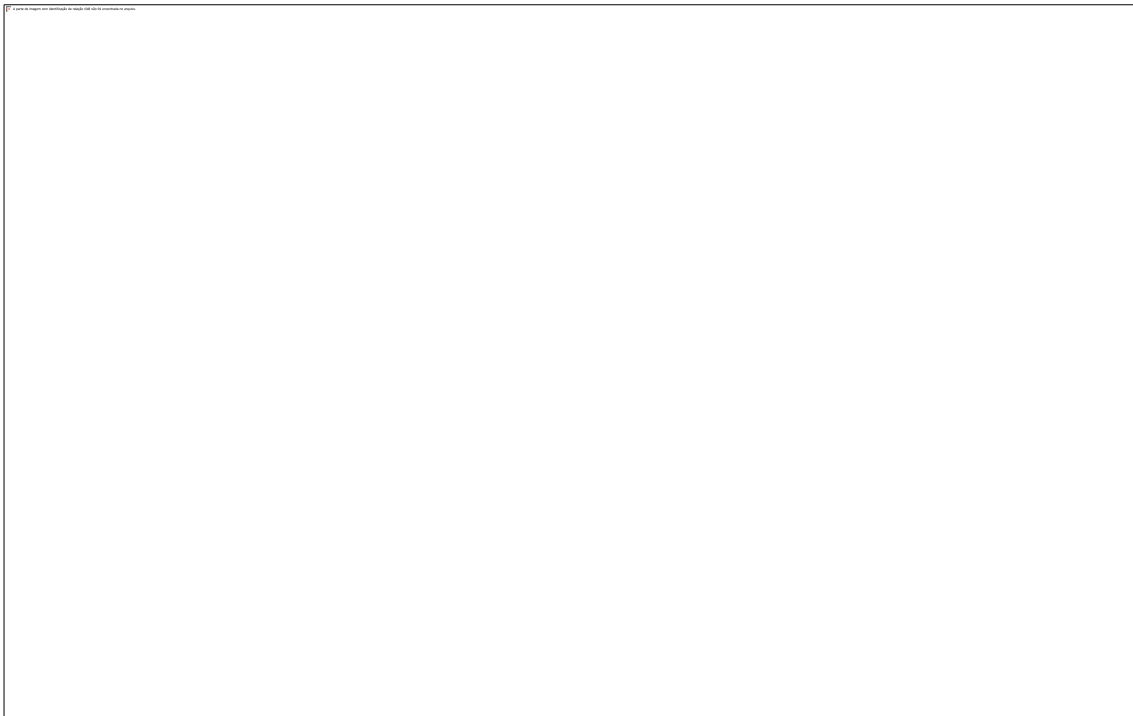
Assim, o que se nota, é uma diminuição antes, um aumento entorno do valor máximo da temperatura estratosférica (DOY-49) e uma intensificação maior do VTEC após o valor máximo da temperatura estratosférica nas estações de GPS-TEC da R-EQU. Outra característica importante da variação do VTEC na R-EQU é a similaridade apresentada pelas estações no setor leste (BELE e MABA) comparada as do setor oeste (ROGM e POVE).

As Figuras 41B e 41C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Uma comparação da variação diária dos dias perturbados com a média dos dias calmos mostra uma variabilidade dos valores do VTEC perturbado acompanhar os valores do período calmo. Portanto, o período perturbado é indicado pelas linhas coloridas referente a 5 dias antes e 5 após o DOY (49-linha grossa vermelha), o qual indica o dia do valor máximo da temperatura estratosférica. Pode ser notado que o VTEC dos dias perturbados nas estações (ROGM e POVE) e (BELE e MABA) fica ligeiramente maior comparado a média dos dias calmos entre (14:00 UT e 22:00 UT) e (12:00 UT e 22:00 UT), respectivamente. Logo, é possível verificar que o VTEC dos dias calmos variou de ~2 a 25 VTECu nas estações ROGM e POVE e ~2 a ~23 VTECu nas estações BELE e MABA.

No entanto, os valores do VTEC durante o evento de SSW1 (DOY 44 a 54) variaram de ~2 a 30 VTECu para as estações ROGM e POVE e de ~2 a ~33 VTECu para as estações BELE e MABA entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Uma característica importante observada na variação diária do VTEC na R-EQU é uma fase positiva do DOY (49) similar em todas as estações de GPS-TEC comparado a média dos dias calmos. Assim, a partir das variações discutidas do VTEC uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22).

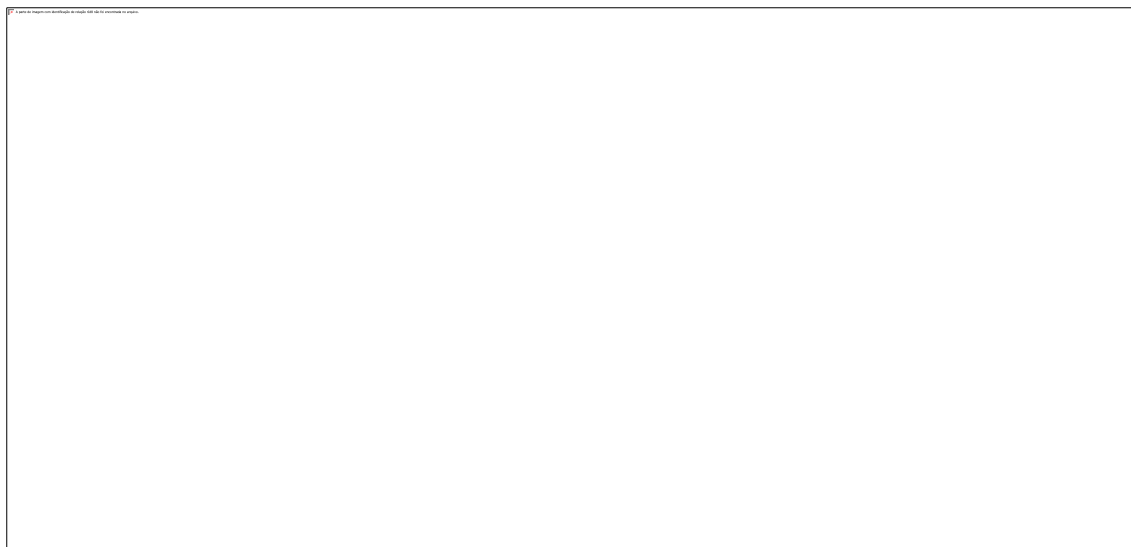
Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT como mencionada anteriormente e apresentado na Tabela 10. Assim, é finalmente feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (44 a 54) das 4 estações que foram tomadas como representativas da R-EQU, estes resultados são apresentados na Figura 44, onde nota-se claramente que na média global durante o SSW1 causou fase positiva do VTEC na R-EQU.

Figura 42. O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de MSPP, POAL RNNA e CESB localizadas em BL-HS.



Fonte: Autor

Tabela 11. Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HS, cidade (pais), sigla da estação, média da variação diária das estações MSPP, POAL, RNNA e CESP entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22.



Fonte:

Autor

A Figura 42A mostra a variação diária do VTEC referente as quatro estações de GPS-TEC em BL-HS em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 20 a 80) durante o evento de SSW1. A variação do VTEC indicado pelos padrões de cores azul ao avermelhado variam entre as 14:00 e 24:00 UT para as estações do setor oeste e 12:00 UT as 24:00 UT para as estações do setor leste. Portanto, os valores do VTEC referente a cada padrão variam de ~20 a 35 (avermelhado), ~26 VTECu (amarelo), ~15 a 23 VTECu (esverdeado) e 0 a ~12 VTECu (azul).

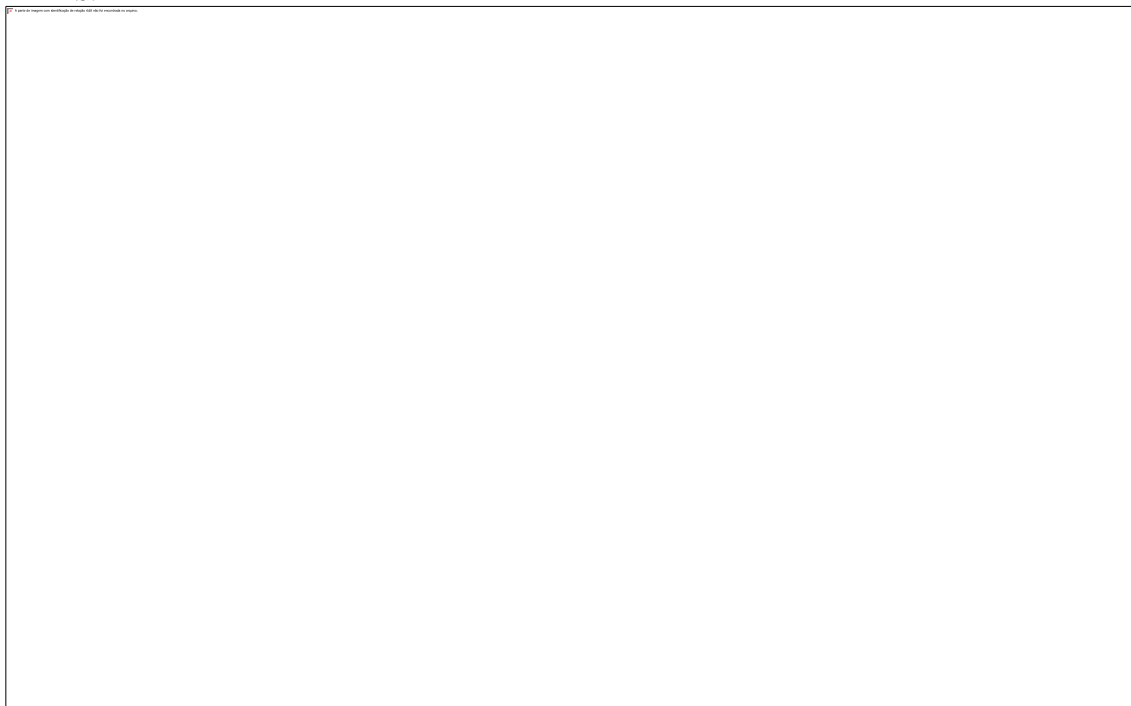
Além disso, nota-se que a intensidade do VTEC (padrão avermelhado) nas estações do setor leste entre os DOY (45 e 80) indica uma duração maior comparado com as estações do setor oeste entre as 14:00 UT e 22:00 UT. Outra observação na variação diária do VTEC é a diminuição que ocorre entre os DOY (20-45) maior nas estações do setor leste. No entanto, o VTEC entorno do DOY (49) e da linha preta vertical indica maior intensidade para as 4 estações de GPS-TEC. Essa intensificação do VTEC (padrão vermelho) na Figura 42A entorno do DOY (49) é muito claro na transição do solstício para o equinócio, o qual é intensificado após o SSW1. Além disso, a intensificação do VTEC nas estações MSPP e POAL é inferior comparado com o VTEC das estações RNNA e CESB.

As Figuras 42B e 42C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Pode ser visto que os valores médios do VTEC na Figura 50 nos painéis

(B e C) mostram uma variação de 3 a ~30 VTECu. No entanto, as variações diárias do VTEC indicados pelos DOY de (44 a 54) apresentam uma boa similaridade às variações do período dos dias calmo, principalmente para o período antecedente indicado pelos DOY (44 a 48). Portanto, os valores da variação do VTEC durante o período perturbado variam de ~3 a 36 VTECu nas estações MSPP e POAL, por outro lado, nas estações RNNA e CESB variam de ~6 a 36 VTECu entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Durante o máximo de temperatura do SSW1 (DOY 49, linha vermelha) o VTEC apresentou uma fase positiva em MSPP e POAL entre as 15:00 UT e 17:00 UT, no entanto, em RNNA e CESB a fase positiva ocorre entre as 12:00 UT e 20:00 UT. Nota-se que a fase negativa é presente após as 20:00 UT nas quatro estações para o DOY 49, no entanto, os demais dias indicam tanto fase positiva como negativa após as 20:00 UT.

O efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizado com o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação referente aos DOY (44 a 54) utilizando a Equação 22 para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 11). Assim, é finalmente feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (44 a 54) das 4 estações que foram tomadas como representativas de BL-HS, estes resultados são apresentados na Figura 44, onde nota-se claramente que na média durante o SSW1 causou fase positiva do VTEC em BL-HS.

Figura 43. O mesmo da Figura 39, mas para estações de GPS-TEC de FALK, KEP A, RGDG e SOG3 localizadas em ML-HS.



Fonte: Autor.

Tabela 12. Estações de GPS-TEC utilizadas no estudo BL-HS, cidade (país), sigla da estação, média da variação diária das estações FALK, KEP A, RGDG e SOG3 entre 13:00 UT e 22:00 UT ( $\mu$ ) para os DOY 44 a 54 e a média global das 4 estações. Onde a porcentagem (%) foi calculada utilizando a fórmula 22.

Fonte: Autor

A Figura 43A mostra a variação diária do VTEC referente as quatro estações de GPS-TEC em ML-HS em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 20 a 80) durante o evento de SSW1. Nota-se que variação diária do VTEC entre os DOY (20 e 40) mostra intensificações com tempo de duração menor entre as 10:00 e 24:00 UT comparado com o período a após o DOY 40. Os valores do VTEC apresentado pelas estações FALK, KEP A,

RGDG e SOG3 são indicados por padrões que variam de ~11 a 13 VTECu (padrão avermelhado), ~9,0 VTECu (padrão amarelo), ~6,0 a 8,0 VTECu (padrão esverdeado) e 0 a 5,0 VTECu (padrão azul).

Pode ser notado que durante o evento de SSW1, indicado pelo período entre as linhas tracejadas, o VTEC mostra maior intensidade e principalmente entorno da linha preta vertical entre os DOY (45 e 53) para o horário de 12:00 UT a 17:00 UT. É também observado que essa intensificação do VTEC durante o SSW1 permanece após o período do evento. O estudo da variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício (DOY: 335 a 30) e após o DOY 30, quando ocorre a transição do solstício para o equinócio, foi possível verificar um aumento do VTEC entorno do DOY (50 e da linha vermelha). Portanto, a intensificação do VTEC como já mencionado entorno da linha vertical vermelha tem uma parcela de contribuição do SSW1. Isso fica muito claro quando foi feita a comparações do período de 2017-2018 com o período de 2018-2019 no estudo da sazonalidade do VTEC.

As Figuras 43B e 43C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Nota-se que os valores do VTEC representativos dos dias calmo mostra uma forte variação entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Assim, como pode ser notado, a variação diária do VTEC dos DOY (44 a 54) indica também uma forte variação, os quais apresentam tanto fase positiva como fase negativa entre as 10:00 UT e 24:00 UT. O VTEC apresentado pelas estações FALK, KEPA e SOG3, é ligeiramente maior comparado a estação RGDG, a exceção fica para os DOY (47 e 50) para todas as estações, os quais mostra forte aumento entre as 10:00 UT e 18:00 UT. Portanto, os valores do VTEC entre as 10:00 UT e 18:00 UT apresentados para os DOY 47 e 50 variaram de ~4 a 18 VTECu e ~4 a 17 VTECu, respectivamente. Os valores do VTEC (padrões esverdeado e avermelhado) referente ao DOY 49 variam de ~5 a 14 VTECu (FALK), ~5 a 13 VTECu (KEPA), ~5 a 10 VTECu (RGDG) e ~4 a 11 VTECu (SOG3) apresentando uma fase positiva nas 4 estações entre as 12:00 UT e 20:00 UT.

Uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22), este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 12). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de ML-HS, estes resultados são apresentados na Figura 44, onde nota-se claramente que na média o SSW1 causou fase positiva do VTEC em ML-HS. Apesar de ser

verificados valores de fase negativa referente aos DOY, porém, muito inferior comparado com os valores de fase positiva.

Figura 44. Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 44 ao DOY 54, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 7 a 12. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW1.



Fonte: Autor

#### 4.3.2 ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW1

A anomalia de ionização equatorial (EIA) tem sido estudada há várias décadas e se caracteriza por ser um fenômeno que se estende desde a região equatorial até baixas latitudes e ocorre no período diurno. De acordo com (JAYACHANDRAN *et al.*, 1997) a EIA é o resultado de uma geometria particular entre o campo magnético terrestre ( $\vec{B}$ ) e a componente zonal do campo elétrico zonal ( $\vec{E}$ ) na ionosfera equatorial e regiões próximas a região equatorial. No equador geomagnético e nas latitudes próximas ao equador geomagnético, o campo magnético terrestre (direção Norte-Sul) é paralelo ou quase paralelo à superfície da terra e a interação com o campo elétrico perpendicular para leste ( $\vec{E}_{leste}$ ) produz uma deriva vertical ascendente da

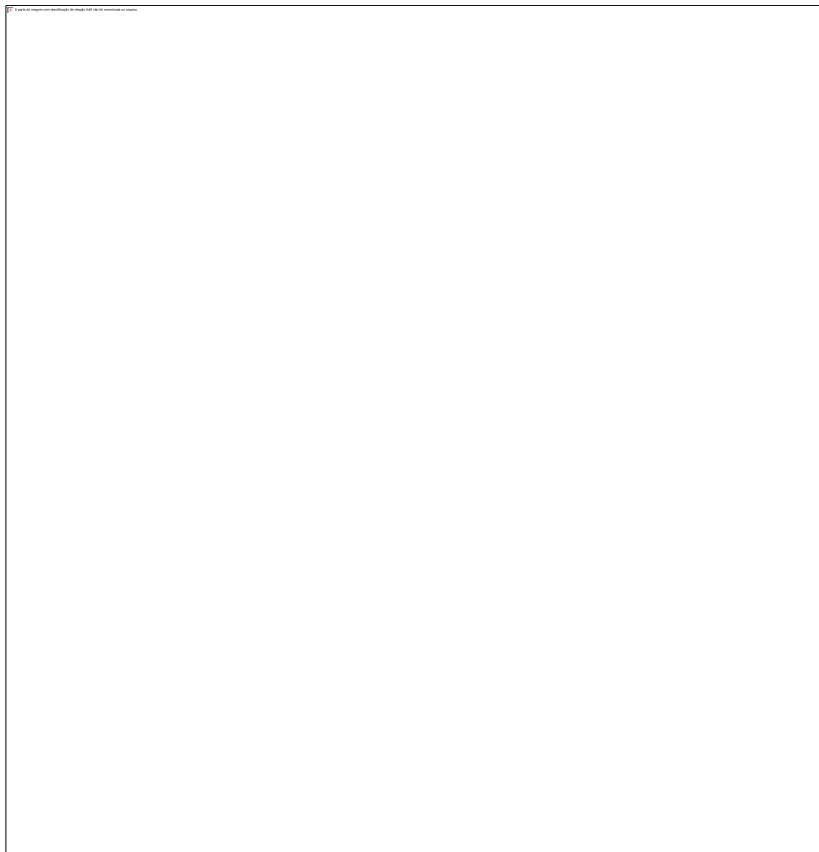
camada F que é dada por  $V_{Z_{ascendente}} \hat{k} = \frac{\vec{E}_{leste} \hat{i} \times \vec{B}_{morte} \hat{j}}{B^2}$  (KELLEY, 2009; DIAS *et al.*, 2020).

Assim, a deriva vertical ascendente do plasma da região-F diurna desloca o plasma ionosférico da base da camada-F para altas altitudes em torno do equador magnético. Posteriormente, este plasma sob ação da força da gravidade e gradientes de pressão se desloca para baixas altitudes, mas seguindo as linhas de campo. Esse deslocamento resulta na formação de duas cristas de densidade eletrônica em baixas latitudes, localizadas entre  $\pm 15^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  de dip latitude (ambos os hemisférios) (VIEIRA *et al.*, 2017; DIAS *et al.*, 2020). Este fenômeno é chamado de efeito fonte o qual uma porção considerável do plasma é removida da região do equador magnético e depositada em latitudes baixas. Resultando em um vale no equador magnético e cristas de densidade eletrônica em baixas latitudes (DIAS *et al.*, 2020).

A Figura 45 mostra o mapa com duas linhas brancas, quase perpendiculares ao equador geomagnético, e próximo a estas linhas temos uma rede de 28 estações GPS-TEC que se estende desde o HN até o HS. Sendo 14 estações representativas do setor leste e as outras 14 do setor oeste brasileiro. Onde os ícones amarelos indicam as estações de baixa latitude nos (HN e HS) e os ícones vermelhos as estações equatoriais. Os setores leste e oeste estão separados por  $\sim 1760$  km ( $\sim 15,8^\circ$ ) indicada pela linha sólida laranja.

A Tabela 13 apresentam localização, sigla da estação, latitude, longitude e dip latitude das estações de GPS-TEC utilizada nesta investigação.

Figura 45. Mapa indicando as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste brasileiro. As estações utilizadas em baixas latitudes no HN e HS são indicadas por ícones amarelos e da região equatorial indicada por ícones vermelhos. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente. A distância de ~1760 km (~15,8°) entre o setor leste e oeste.



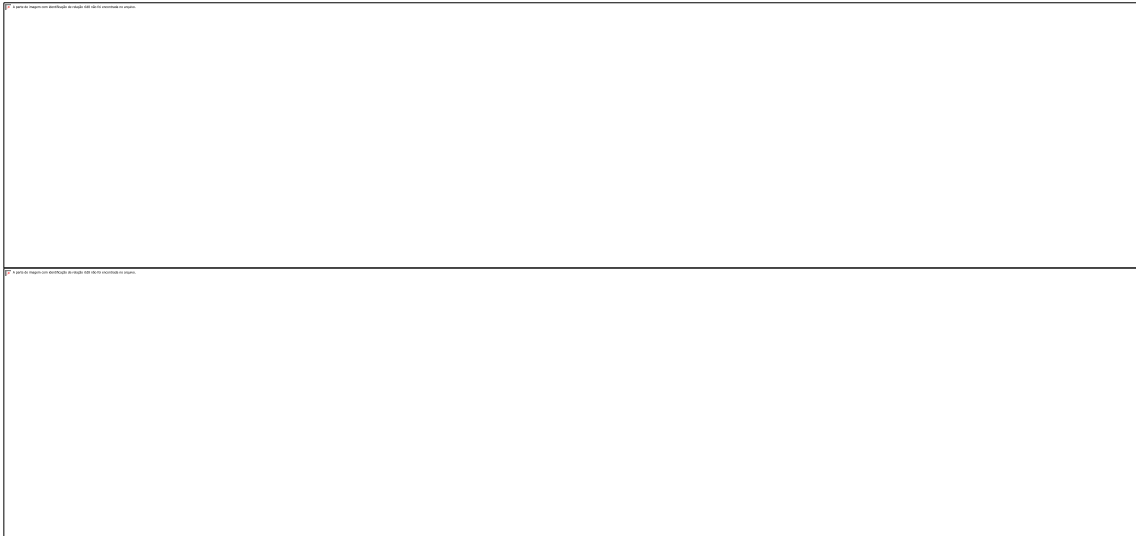
Fonte: Autor

Tabela 13. Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste brasileiro.

<b>Cidades (Localização)</b>	<b>Sigla da Estação</b>	<b>Latitude (+N)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Dip Latitude (+N)</b>
<b>Setor Leste</b>				
Camaguev (Cuba)	CN16	21,4	-77,5	35,8
Cabrera (República Dominicana)	RDLT	19,3	-69,6	26,8
Freeport (Bahamas)	CN25	16,2	-74,5	25,9
Quebrada (Venezuela)	CN39	10,2	70,5	18,9
Arriba (Venezuela)	CN41	8,9	-68,0	18,5
Altamira (Brasil)	PAAR	-3,2	-52,2	-0,44
Santarém (Brasil)	PASM	-2,3	-54,4	-1,6
Imperatriz (Brasil)	IMPZ	-5,5	-47,5	-5,1
Balsas (Brasil)	MABS	-7,3	-46,0	-7,5
Petrolina (Brasil)	PEPE	-9,2	-40,1	-12,6
Corrente (Brasil)	PICR	-10,3	-40,1	-13,6
Salvador (Brasil)	SSA1	-12,6	-38,3	-16,7
Ilhéus (Brasil)	BAIL	-14,5	-39,0	-18,0
<b>Setor Oeste</b>				
Jalapa (México)	UXAL	19,5	-96,9	28,8
Cano Negro (Costa Rica)	VERA	10,9	-84,9	21,1
Bocas Island (Panama)	CN20	9,35	-82,3	21,1
Bogota (Colômbia)	BOGT	4,6	-74,1	13,7
Coari (Brasil)	AMCO	-4,5	-65,2	4,3
Achotines (Panamá)	ACHO	7,4	-80,1	4,0
Cruzeiro do Sul (Acre)	CRUZ	-7,4	72,4	3,7
Guajará-Mirim (Brasil)	ROGM	-10,5	-65,2	-1,4
Cáceres (Brasil)	MTCA	-16,1	-57,4	-9,0
Itiquira (Brasil)	MTIT	-17,1	-54,0	-11,5
Ilha Solteira (Brasil)	ILHA	-20,3	-51,2	-15,5
Campinas (Brasil)	SPC1	-22,5	-47,0	-19,5
Chapecó (Brasil)	SCCH	-27,1	-52,6	-20,1
Porto Alegre (Brasil)	POAL	-30,1	-51,1	-22,8

Fonte:  
Autor

Figura 46. Gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW1, considerado como calmo de 08/03/2018 a 13/03/2018 (DOY 67 a 72), onde o VTEC varia de 0 a 30 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

Como discutido anteriormente após o SSW1 houve uma intensificação do VTEC durante a transição entre solstício para equinócio, por este motivo não podemos considerar os dias posteriores ao SSW1 como representativos de período calmo. Portanto, no estudo de EIA serão considerados como dias calmos (não perturbado pelo SSW1) os dias que antecederam o SSW1. A Figura 46 mostra as variações do VTEC em função do tempo UT e dip latitude indicando a evolução da EIA para o período de 01 a 06 de fevereiro (DOYs 32-37) como representativo dos dias calmo nos setores leste e oeste.

Na Figura 46 pode se notar que a crista da EIA do HS é mais intensa que a crista do HN (~13:00 as 21:00 UT). As cristas do HS no setor leste são mais intensas que as do HN. A posição do vale equatorial apresenta uma grande variabilidade dia-a-dia e se localiza entre -5 e -10. Esta variabilidade e diferença entre os setores leste e oeste brasileiro estão de acordo com estudos realizados anteriormente (VIEIRA *et al.*, 2017; FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019; DIAS *et al.*, 2020).

Figura 47. Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para mês fevereiro 11 a 25 de 2018 (DOY 42-56), o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 18 de fevereiro de 2018 (DOY-49). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

A Figura 47 mostra os gráficos de contorno do VTEC onde pode notar o comportamento da EIA entre ~13:00 e 21:00 UT para os setores leste e oeste. No setor leste no início do SSW1 a crista do HS é mais intensa do que a crista do HN (DOY 42 a 45). No entanto, ao passo que se aproxima do máximo da temperatura do SSW1 ambas as cristas se intensificam (DOY 46 a 53) e passam a ter praticamente a mesma intensidade. Posteriormente, ambas as cristas diminuem sua magnitude, mas mantem a mesma intensidade (DOY 54 a 56). A depleção da EIA equatorial é bem nítida na maioria dos dias durante o SSW1. No entanto, durante e um dia após o máximo da temperatura do SSW1 a depleção da EIA equatorial não é tão nítida. No setor

oeste no início do SSW1 as cristas do HS e HN (DOY 42 a 46) não são bem definidos (supressão total ou parcial da EIA). Entre o DOY 47 até o DOY 53 ambos as cristas da EIA são claramente visualizados e tornam-se mais intensas. Por outro lado, no DOY 54 a EIA é parcialmente suprimida e entre os DOY 55 e 56 a crista do HN torna-se mais intensa do que o do HS e a depleção fica mais nítida.

O aumento da variação dia-a-dia do VTEC entorno do DOY (49-pico do SSW1) mostrado nos resultados desde média latitude do HN a média latitude do HS nas Figuras 39A a 43A é visto na intensificação das cristas da EIA nos dois hemisférios Norte e Sul na Figura 47. Assim, caracterizando o aumento do VTEC durante a ocorrência do evento de SSW1 discutida no estudo da transição sazonal e da variação diária do VTEC nas Figuras 39A a 43A. Além disso, as perturbações no fenômeno da anomalia de ionização equatorial durante o SSW1 também já foram registradas em outros trabalhos científicos. Segundo (LIU *et al.*, 2011) notaram um aumento da intensidade da EIA pela manhã, seguido de uma diminuição à tarde durante o SSW.

De acordo com (GONCHARENKO *et al.*, 2010a) demonstraram que após o pico da temperatura estratosférica, observa-se um aumento da EIA no período da manhã e uma depleção da EIA no período da tarde. Os resultados aqui apresentados, nota-se aumento e depleção da EIA, onde, é visto que a variabilidade da EIA ocorre no período da tarde com extensão para o período noturno, tanto no setor leste como o setor oeste.

### **4.3.3 ESTUDO DOS PARAMETROS IONOSFÉRICOS ( $h'F$ , Fof2) E OS (Spread-F) DURANTE O SSW1**

Nesta seção apresenta o estudo dos parâmetros  $h'F$ , foF2 e as ocorrências das irregularidades ionosféricas referente aos Spread-F tipo altura (RSF) e tipo frequência (FSF) das ionossondas utilizadas de Araguatins (ARG dip latitude -5,0), Jataí (JAT dip latitude -13,5) e de São José Campos (SJC dip latitude -20,4) pertencente ao grupo de pesquisa do IP&D-UNIVAP. As Figuras 48, 49 e 50 mostram a variação dia-a-dia de foF2,  $h'F$  e as ocorrências dos Spread-F (RSF e FSF) em função dos DOY (20 a 80) e LT investigados durante o SSW1 (2017-2018).

Nas Figuras 48, 49 e 50, são usados os dados do Laboratório de Química Atmosférica e Dinâmica da NASA ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.htm](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.htm)) para mostrar as condições estratosférica durante o SSW1 como utilizada no estudo do VTEC. Portanto, os dados são referentes a temperatura estratosférica a 90° N em um nível de pressão

de 10 hPa (~30km) e a média histórica indicadas pelas linhas azul e preta nos gráficos de contornos e nos painéis (C- apenas linha azul), respectivamente. Além disso, os números 1 e 2 indica o tempo de início e fim do SSW1.

As perturbações diárias dos parâmetros ionosféricos h'F e foF2 durante os dias calmos e perturbado associadas ao SSW1 são investigados. Assim nas Figuras 51, 52 e 53 nos painéis (A e B) é feita uma comparação entre a variação diária de foF2 e h'F para os dias perturbados pelo SSW1 (DOY 44 a 54) e a variação média diária de foF2 e h'F referente a 10 dias que antecederam o SSW1 (denominado período calmo) em função de UT.

A linha preta e a faixa cinza indicam a variação diária da média de foF2 e h'F e o desvio padrão dos dias calmos e as linhas coloridas indicam a variação diária de foF2 e h'F referente os 5 dias antes e 5 dias posterior a temperatura máxima do SSW1. O objetivo do estudo da variação dia-a-dia e diária de foF2, h'F e dos Spread-F é compreender o impacto e comparar a variabilidade dos parâmetros entre as estações de ionossondas durante o evento de SSW1.

Figura 48. Mostra as variações dos parâmetros ionosféricos de foF2, h'F e os espalhamentos da camada F para ionossonda (ARG) em função do tempo LT e para o dia do ano (DOY) 335-90, o qual corresponde ao período de 01 dezembro 2017 a 31 de março de 2018. As condições estratosféricas do SSW1 para temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (linha sólida azul) e média histórica (linha sólida preta) são plotados nos painéis de (foF2) e (h'F). No painel de espalhamento da camada F é plotado apenas curva da temperatura estratosférica indicada pela linha sólida azul.



Fonte: Autor

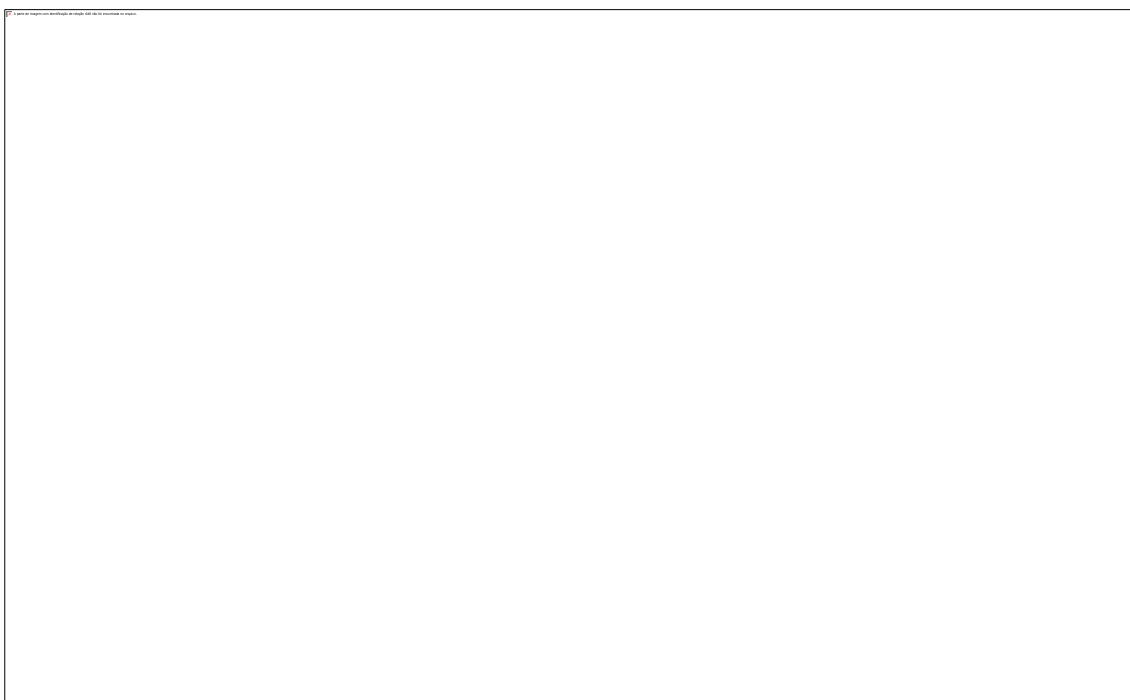
Figura 49. O mesmo da estação da Figura 48, porém, para a estação de JAT.



Fonte:

Autor

Figura 50. O mesmo da estação da Figura 48, porém, para a estação de SJC.



Fonte:

Autor

Os gráficos de contorno das Figuras 48, 49 e 50 nos painéis (A e B) indicam que as variações dia-a-dia de  $f_oF_2$  e  $h'F$  são levemente diferentes durante os DOY (20 a 80). Essa

diferença é observada pela intensificação apresentadas pelos padrões de cores (azul ao vermelho) que indica os valores de mínimo e máximo destes parâmetros antes, durante e após o SSW1. Assim, os valores de foF2 referente cada estação de ionossondas (ARG, JAT e SJC) variam de ~10,0 a 11,0 MHz (padrão avermelhado), ~9,0 MHz (padrão amarelo), ~6,0 a 8,0 MHz (padrão esverdeado) e 1,0 a ~4,0 MHz (padrão azul).

Nota-se na Figura 48A que foF2 mostra maior intensidade entre as 16:00 e 20:00 LT com valores variando de ~7,0 a 9,0 (MHz) para o período dos DOY (20 a 40). No entanto, durante o evento de SSW1 indicado pelo período entre os círculos sólidos 1 e 2 (DOY 40 a 66), é observado que os valores de foF2 indica os mesmos valores que antecede o evento, porém com duração maior entre as 12:00 LT e 22:00 LT. Por outro lado, o valor de foF2 após o DOY (65-ponto 2 em amarelo) passa mostrar a intensidade máxima de 11,0 MHz entre 12:00 LT e 00:00 LT.

A Figura 49A mostra as variações de foF2 em JAT, onde pode ser notado que os valores de foF2 representativos do período dos DOY (20 a 40) indicam uma intensidade menor comparado ao período posterior ao DOY 40. Sendo que os valores de foF2 referente ao período dos DOY (20 a 40) variaram de ~7,0 MHz a 11,0 MHz entre as 12:00 LT e 22:00 LT, porém, os valores representativos de 11,0 MHz, nesse período indicam uma quantidade menores de dias ao comparar com ocorrido durante o SSW1. Sendo que durante o evento nota-se claramente uma intensificação nos valores de foF2 (11,0 MHz) tanto em tempo como em dias entre 11:00 LT a 22:00 LT. Além disso, pode ser notado que os valores de foF2 (11,0 MHz) após o evento (indicado pelo ponto 2) passam indicar maior duração e magnitude comparadas aos períodos antes e durante o SSW1.

A variação de foF2 em SJC (Figura 50A) mostra forte intensidade entre os DOY (20 a 40), no qual os valores de 11,0 MHz indicam maior duração e magnitude ao comparar com o período durante o SSW1 entre as 11:00 LT e 20:00 LT. Assim, logo após o período do evento, os valores de foF2 passam indicar um aumento comparado o período do evento.

Portanto, os valores de foF2 entre os DOY (20 e 80) em SJC apresenta intensificação antes do SSW1 maior ao comparar com os valores em ARG e JAT. Pode ser notado também que, a intensidade de foF2 em JAT é similar com os valores em SJC. Esta maior intensificação em SJC e JAT, isso possivelmente seja porque estas estações estejam mais próximo da crista da anomalia de ionização equatorial (EIA). No entanto, uma característica análoga a investigação do VTEC do período de transição do solstício para o equinócio foi observada no valor de foF2 nestas estações de ionossondas. Assim, pode ser notado que os valores de foF2

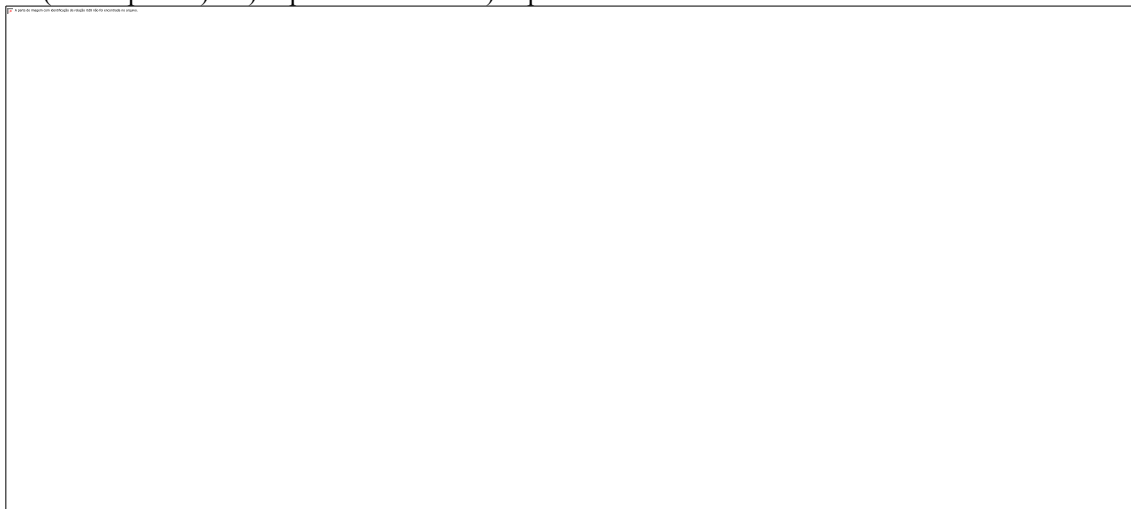
apresentam um aumento durante e passam a se intensificar após o SSW1, isso mostra de forma clara que existe a contribuição deste evento no aumento dos valores de foF2.

A variação diária da altura virtual ( $h'F$ ) nas Figuras 48B, 49B e 50B são mostradas em função dos DOY (20 a 80) e de LT. Nota-se que nestas figuras o parâmetro ionosférico  $h'F$  no período mencionado anteriormente para altitude de 320 km indica uma baixa ocorrência nas estações ARG, JAT entre 18:00 LT e 04:00 LT. No entanto, na estação de SJC o parâmetro ionosférico  $h'F$  indica uma ocorrência maior ao comparar com as estações ARG e JAT.

Além disso, pode ser notado que durante o evento de SSW1 indicados pelos círculos sólidos de números 1 (início) e 2 (fim) do evento, o valor de 320 km é intensificado nas três estações entre 18:00 LT e 04:00 LT. Nota-se que após o fim (círculo sólido 2) do evento, o valor de 320 km permanece com maior quantidade de dias referente as três estações de ionossondas. Portanto, a base da camada F indicada para altitude mencionada anteriormente nos dias durante o SSW1, mostra que houve uma quantidade de vezes maior comparado ao período antes do evento, porém devido a ocorrência de Spread-F entre 18:00 LT e 04:00 LT em ARG impossibilitou a visualização dos valores que indica altitude da camada F. Assim, nossos resultados sobre os parâmetros ionosféricos foF2 e  $h'F$  mostraram ocorrências de variações durante o período do evento de SSW1. Neste contexto, as perturbações nestes parâmetros ionosféricos relacionadas com SSW foram investigadas em outros trabalhos científicos. Por exemplo, as variações de frequências críticas e alturas do pico da camada F2 (FAGUNDES *et al.*, 2009; PANCHEVA, MUKHTAROV, 2011; SUMOD *et al.*, 2012; SHPYNEV *et al.*, 2015a; CHERNIGOVSAYA *et al.*, 2018).

As Figuras 48C, 49C e 50C mostram as ocorrências dia-a-dia dos Spread-F tipo altura (RSF-linhas vermelhas verticais) e tipo frequência (FSF-linhas pretas verticais) durante os DOY (20 a 80) entre 18:00 LT e 12:00 LT. Nota-se que há uma maior ocorrência dos Spread-F (RSF e FSF) durante os DOY (20 a 40) em ARG e JAT quando comparado as ocorrências para a estação SJC. A ocorrência dos Spread-F durante o SSW1 (período entre círculos sólidos amarelo 1 e 2) indica com clareza uma diminuição das irregularidades nas três estações de ionossondas. Nota-se que o Spread-F (RSF) indica maior ocorrência entre 20:00 LT e 04:00 LT nas três estações, no entanto, durante o SSW1 a ocorrência do espalhamento (FSF) mostra um leve aumento na ocorrência entre 20:00 LT e 02:00 LT comparado com o período antes e depois do evento. Além disso, é visto que o Spread-F tipo altura (RSF linhas vermelhas verticais) mostra uma forte ocorrência em ARG, JAT e SJC antes do evento de SSW2.

Figura 51. Mostram as variações diárias de foF2 e h'F durante o período do DOY 44 ao DOY 54 em Araguatins (ARG). Os valores médios de foF2 e h'F dos dias calmos são mostrados pela média (linha preta) e faixa cinza escura (desvio padrão). A) O parâmetro foF2. B) O parâmetro h'F.



Fonte: Autor.

Figura 52. O mesmo da Figura 51, porém, para a estação de JAT.



Fonte: Autor

Figura 53. O mesmo da Figura 51, porém, para a estação de SJC.



Fonte: Autor

As Figuras 51A, 52A e 53A mostram as variações diárias de foF2 durante o período perturbado do SSW1 (linhas coloridas) em comparação ao valor médio  $\overline{foF2}$  (período calmo linha preta e  $\pm$  desvio padrão faixa cinza escura) em função de UT. A variação de foF2 entre 00:00 UT e 08:00 UT referente ao período perturbado (linhas coloridas) em ARG (apesar da maior presença dos Spread-F) em ARG, JAT e SJC não segue a média dos dias calmos. Assim, neste horário os valores de foF2 em cada estação indicam a uma diminuição em comparação com as variações médias na maioria dos dias calmos. No entanto, para o período após as 08:00 UT os valores (dias perturbados) indicam aumento comparado ao período calmo, principalmente nas estações ARG e JAT.

Portanto, entre as 00:00 UT e 08:00 UT os valores de foF2 referentes aos períodos calmo em ARG, JAT e SJC variam de ~2,0 a ~9,0 MHz, ~3,0 a 8,0 MHz e ~2,0 a ~7,0 MHz, respectivamente. No entanto, para os dias perturbados (linhas coloridas) em ARG e JAT indicam uma variação de foF2 entre as 00:00 UT e 08,00 UT de ~2,0 a 9,0MHz, porém, em SJC variaram ~2,0 a 5,0 MHz. Os valores de foF2 representativos do período calmo após as 08:00 UT variam de ~2,0 a 12,0 MHz, no entanto, referente ao período perturbado os valores variando de ~2,0 a ~14,0 MHz. Nota-se que a variação de foF2 referente ao DOY (49-linha vermelha) em SJC mostra fase negativa após as 10:00 UT, por outro lado, nas estações de ARG e JAT indica fase positiva ao comparar a  $\overline{foF2}$ . Além disso, pode ser notado após as 08:00 UT em ARG que os valores de foF2 referente ao período perturbado antes e após o DOY (49) indicam maior fase positivas do que em JAT e SJC.

A variação diária de h'F referente ao período perturbado apresentado nas Figuras 51B, 52B e 53B indicam um maior valor entre 00:00 UT e 08:00 UT, onde, os valores atingiram

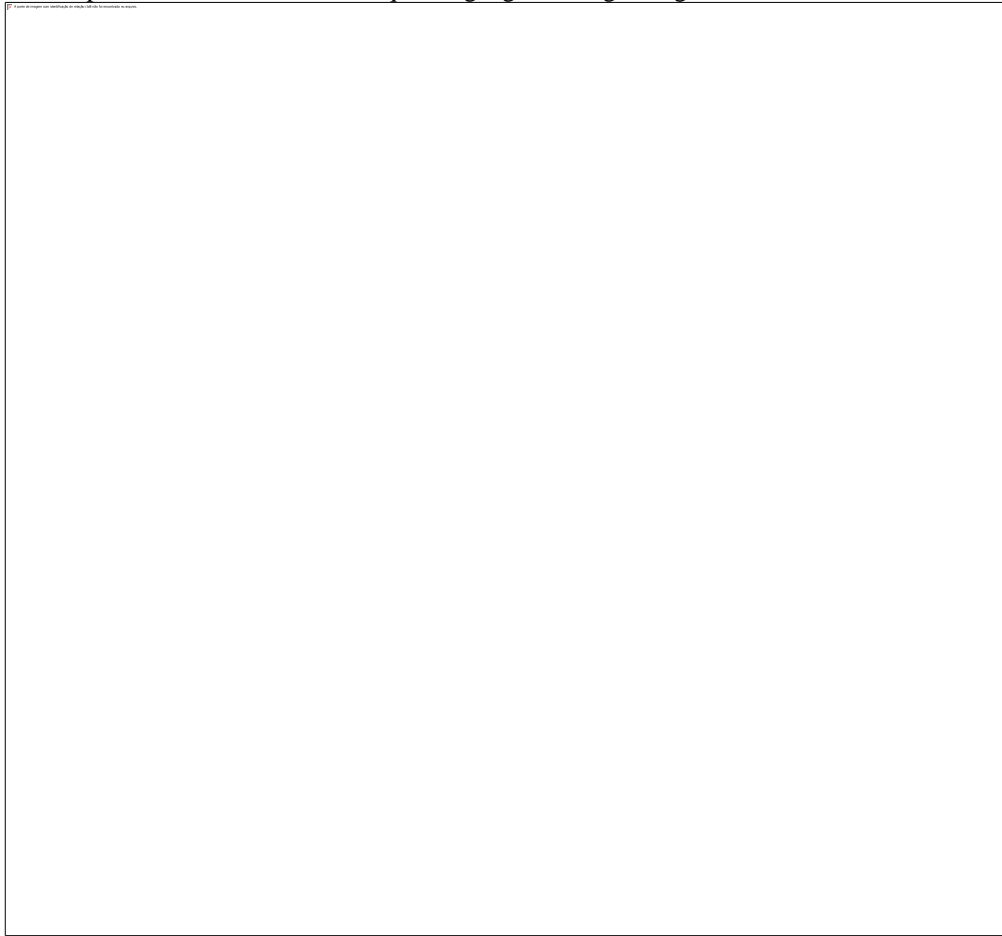
altitude máxima de ~300 km (ARG), ~325 km (JAT) e 350 km (SJC), respectivamente. Nota-se que após as 08:00 UT os valores de  $h'F$  para o período perturbado mostram acompanhar a média dos dias calmos ( $\overline{h'F}$ ), no entanto, entre 11:00 UT e 18:00 UT indica uma fase negativa. Por outro lado, as variações indicadas pelos valores de  $h'F$  referente ao período perturbado em ARG após as 08:00 UT mostram ser maiores do que em JAT e SJC. Além disso, nesse período pode ser notado que o valor de  $h'F$  para o DOY (49-linha vermelha) em todas as estações indicam uma fase negativa comparado ao período calmo. Estes nossos resultados apresentam uma similaridade com estudos realizados anteriormente sobre a variação de  $h'F$  durante os eventos de SSW. De acordo com Fagundes *et al.* (2015) e Sumod *et al.* (2012) apresentaram aumento de  $h'F$  durante o período noturno nos setores americano e indiano associado aos eventos de SSWs estudados.

#### **4.3.4 ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW1 (2017-2018) DE BAIXA LATITUDE DO HN ATÉ BAIXA LATITUDE DO HS NO SETOR AFRICANO**

O estudo do Conteúdo Eletrônico Total (TEC) utilizando estações de GPS-TEC para investigar o comportamento espaço-temporal da camada-F ionosférica durante os períodos calmos e perturbados dos eventos de SSW1 e SSW2 no setor africano segue a metodologia da investigação no setor americano. O objetivo desta investigação, é proporcionar uma comparação entre a variação do VTEC no setor americano e africano referente aos eventos SSWs mencionados. Nesta investigação são utilizadas 15 estações de GPS-TEC que se distribuem desde baixa latitudes do HN até baixa latitude do HS (ver Figura 54 e Tabela 14).

Nas Figuras de 55 a 57 foram adicionados a variação da temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30km de altitude) e a temperatura média histórica, linhas sólidas azul e preta, respectivamente. Neste contexto, também é indicado nos gráficos de contorno da variação dia-a-dia do VTEC o início e fim do SSW<sub>2017-2018</sub> (DOY 43) e SSW<sub>2018-2019</sub> (DOY 362) por linhas pontilhadas verticais, por outro lado, a linha vertical contínua vermelha indica o valor máximo da temperatura estratosférica referentes aos dias 18 de março (DOY-49) e 28 de dezembro (DOY-362) de 2018.

Figura 54. O mapa com as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo do VTEC no território africano, onde as curvas amarela e preta indicam as linhas do equador geográfico e geomagnético.



Fonte: Autor

Tabela 14. Detalhes das estações GPS-TEC (localização, códigos, latitudes geográficas, longitudes geográficas e dip latitudes) utilizadas para estudar a variação dia-a-dia do VTEC durante os eventos de SSW1 e SSW2 no setor africano.



Fonte: Autor

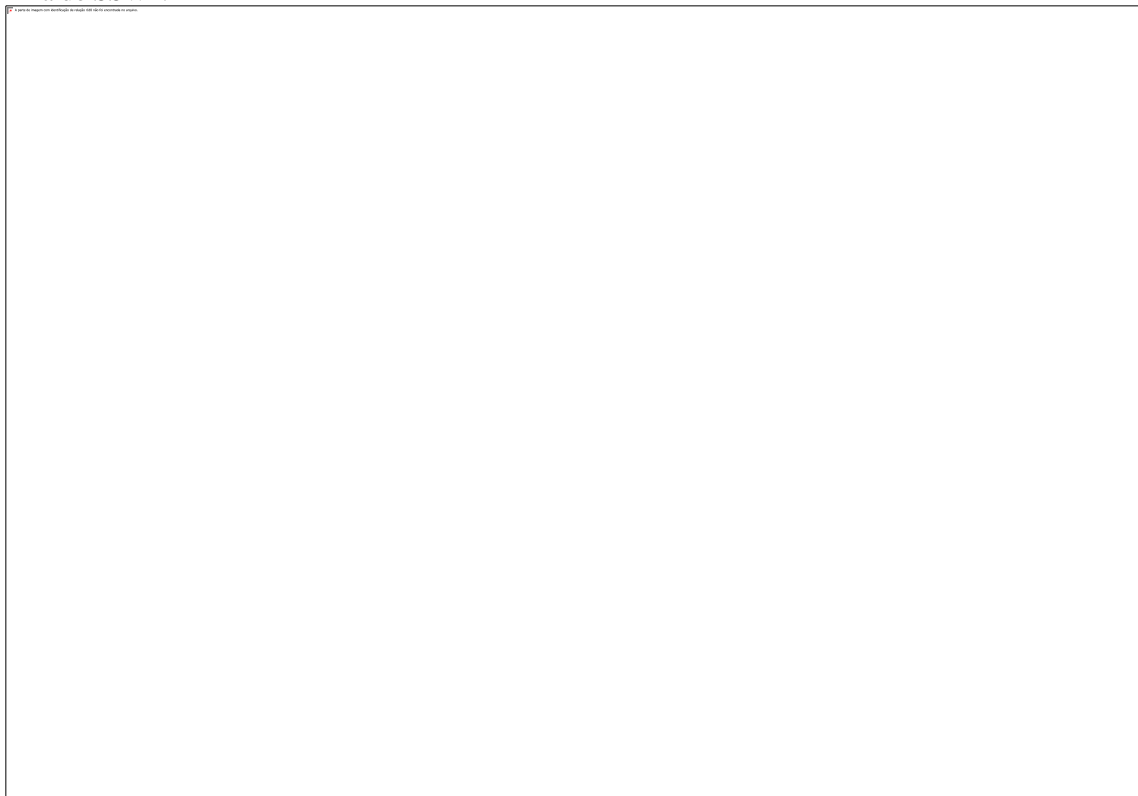
A Figura 55A mostra a variação dia-a-dia do VTEC no intervalo de 24:00 UT em função dos DOY (20 a 80) referente a quatro estações de GPS-TEC em BL-HN no setor africano. Pode ser notado na Figura 55A que o VTEC apresenta maiores intensificações entre 10:00 UT e 22:00UT no setor oeste entre 04:00 UT e 14:00 UT no setor leste. Assim, as intensificações com maiores valores do VTEC são indicadas pelo padrão vermelho, os quais variam ~14-18 (VTECu). Nota-se entre as linhas tracejadas (período do SSW<sub>2017-2018</sub>) que os valores do VTEC passam a ser intensificado quando comparado ao período que antecede o evento. Esse aumento é mantido após o evento, ficando claro que o fenômeno gera essa intensificação no VTEC e conseqüentemente contribui para maiores valores após a sua ocorrência. Portanto, uma resposta semelhante do VTEC ao evento de SSW1 no setor africano foi verificado no setor americano.

As Figuras 55B e 55C mostram uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados e a variação da média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura) das estações MAS1 e IFR1 (setor oeste) e ISBA e KUWT (setor leste). Os dias perturbados são indicados por 5 dias antes (44, 45, 46, 47 e 48) e 5 dias após (50, 51, 52, 53 e 54) o valor máximo da temperatura estratosférica do SSW (18 de fevereiro-DOY-49). Nota-se um aumento do VTEC dos dias perturbados (linhas coloridas) comparado com os dias calmos (faixa cinza escura) entre 06:00 UT e 18:00 UT (setor oeste) e 03:00 UT e 14:00 UT (setor

leste). Portanto, os aumentos nos valores do VTEC no período perturbado (linhas coloridas) reafirmam o efeito do evento observado no painel (A).

Assim, a partir das variações discutidas do VTEC nas Figuras 55B e 55C o efeito acumulado da variabilidade é realizado com o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22). Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 00:00 UT e 24:00 UT apresentado na Tabela 15. Assim, é realizada a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (44 a 54) das 4 estações que foram tomadas como representativas da BL-HN no setor Africano. Portanto, estes resultados são apresentados na Figura 58, onde nota-se na média global durante o SSW1 causou fase negativa e positiva do VTEC.

Figura 55. A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (20 a 80), respectivamente 20/01/2018 a 21/03/2018, de 4 estações de GPS-TEC localizados em BL - HN no setor africano. As linhas azul, preta e a linha vermelha vertical indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW1, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre a média dos dias calmos (linha preta), desvio padrão (faixa cinza escura) e 05 dias antes (linhas coloridas) do máximo da temperatura estratosférica (DOY-49) durante o SSW1. C) O mesmo que B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW1.



Fonte: Autor

Tabela 15. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 55 como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (44 a 54). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 00:00 UT e 24:00 UT utilizando a equação 22.

Fonte:

Autor

A Figura 56A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC (YKRO, BJCO, DJIG e ALPL) na região equatorial (R-EQU) em função do tempo UT (00:00 a 24:00) durante os dias do ano (DOY 20 a 80) para o evento de SSW1. Nota-se na Figura 56A que a variação dia-a-dia do VTEC mostra um crescimento entre os DOY (20 a 80). Onde, esse crescimento é indicado pelas alterações dos padrões de cores esverdeado ao avermelhado com maiores intensidades entre as 08:00 e 22:00 UT (setor oeste) e 05:00 UT e 18:00 UT (setor leste).

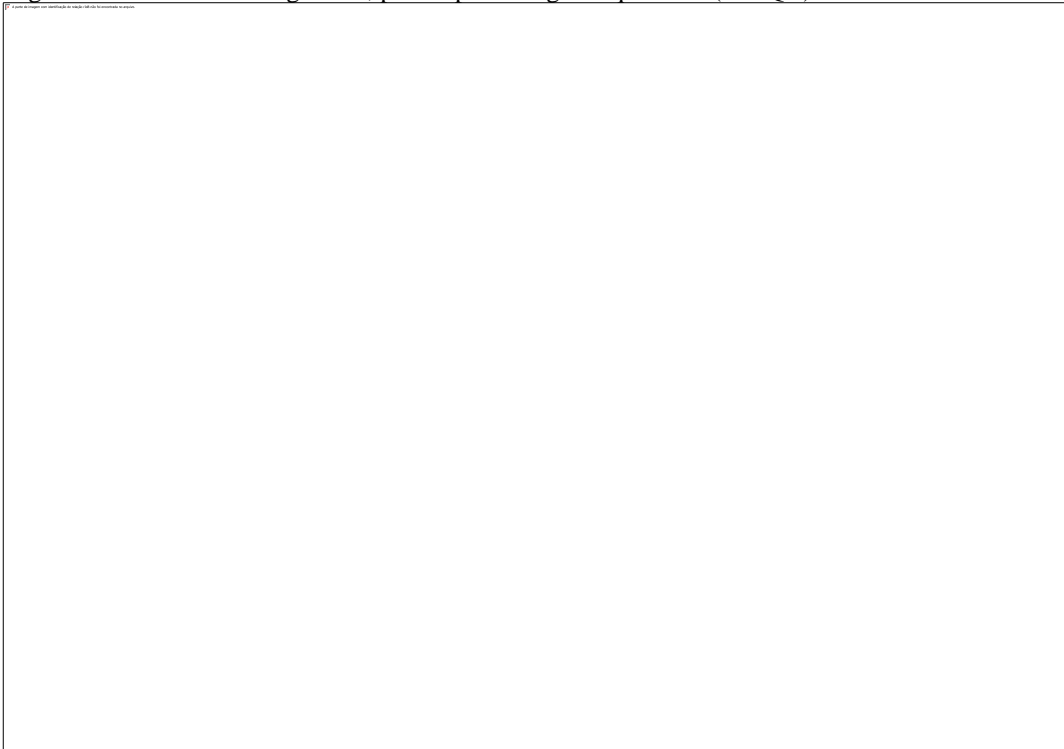
Assim, a variação dia-a-dia do VTEC indica claramente uma diminuição antes e um aumento durante o SSW1 nas estações da R-EQU, além disso, esses valores são claramente intensificados durante e após este evento. Portanto, os valores do VTEC indicados pelos padrões mencionados antes variam de ~24-30 VTECu (avermelhado), ~21,0 VTECu (amarelo) e ~12,0-18,0 VTECu (esverdeado). Além disso, a variação dia-a-dia do VTEC indica uma similaridade ao comparar os valores das estações no setor oeste (YKRO e BJCO) com as do setor leste (DJIG e ALPL) referente aos períodos antes, durante e após o SSW1.

As Figuras 56B e 56C mostram uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados (linhas coloridas) pelo SSW1 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Uma comparação da variação diária dos dias perturbados com a média dos dias calmos mostra uma variabilidade dos valores do VTEC perturbado acompanhar os valores do período calmo 00:00 UT às 09:00 UT (setor oeste) e

00:00 UT às 05:00 UT (setor leste). Logo, após estes intervalos de tempo pode ser notado que o VTEC (dias perturbados) indica aumento comparado a média dos dias calmos em ambos os setores. Esse aumento do VTEC mostrado nas estações da R-EQU indica com clareza a contribuição gerada pelo evento SSW1 na densidade eletrônica.

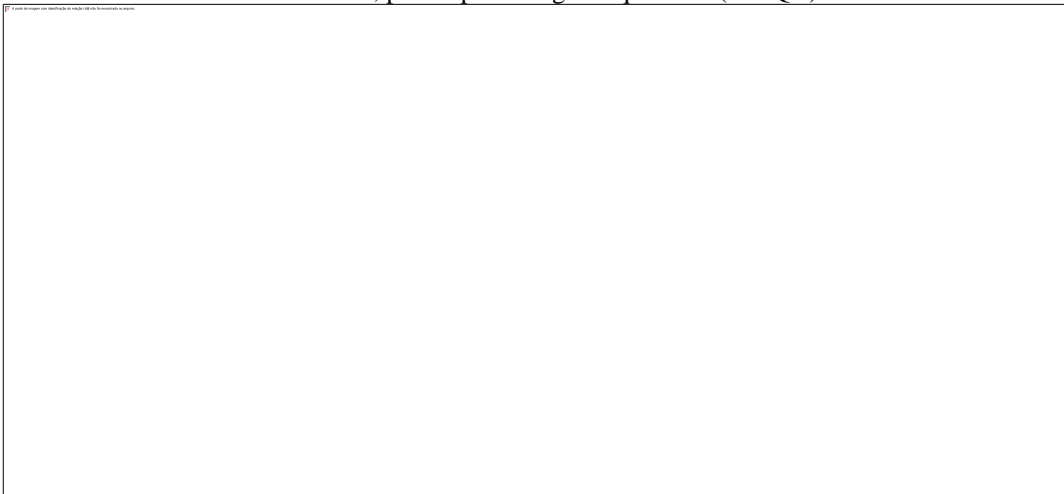
Nota que o VTEC dos dias calmos variou de  $\sim 2,0$  a  $23,0$  VTECu (setor oeste) e  $\sim 2,0$  a  $\sim 25,0$  VTECu (setor leste). No entanto, para os dias perturbados há uma variação de  $\sim 2,0$  a  $26,0$  VTECu (setor oeste) e  $\sim 2,0$  a  $29,0$  VTECu (setor leste). Além disso, o valor do VTEC referente ao DOY-49 (linha vermelha) na estação YKRO não é mostrado pela falta de dados neste dia. Portanto, a partir das variações discutidas do VTEC do período perturbado comparando com período calmo, uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22). Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 00:00 UT e 24:00 UT apresentado na Tabela 24. E finalmente é feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (44 a 54) das quatro estações de GPS-TEC tomadas como representativas da R-EQU. Assim, estes resultados são apresentados na Figura 58, onde nota-se claramente que na média global durante o SSW1 causou fase positiva do VTEC.

Figura 56. O mesmo da Figura 55, porém para a região equatorial (R-EQU)



Fonte: Autor

Tabela 16. O mesmo da Tabela 15, porém para a região equatorial (R-EQU)



Fonte: Autor

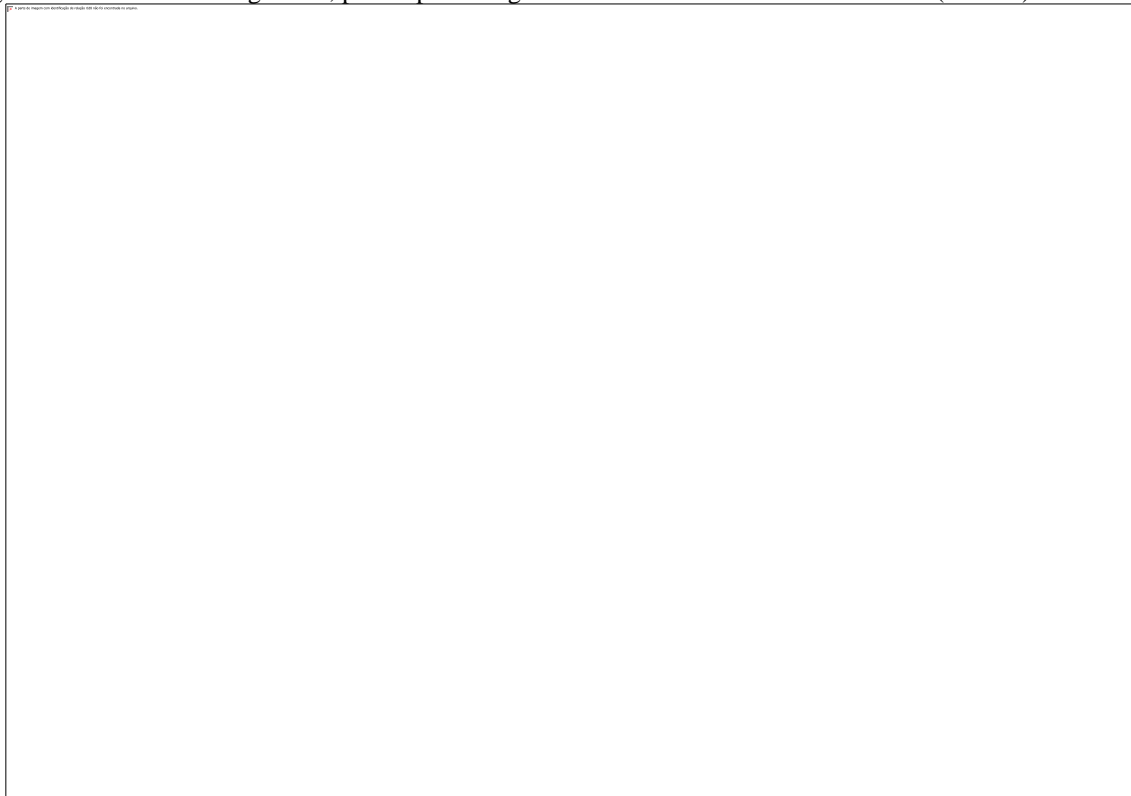
A Figura 57A mostra a variação dia-a-dia do VTEC referente as quatro estações de GPS-TEC (BL-HS) em função do UT (00:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 335 a 30) durante o evento de SSW1. A variação do VTEC entre as 00:00 UT e 24:00 UT são indicados pelos padrões de cores que variam do azul (VTEC-menor) ao avermelhado (VTEC-maior). Onde, os valores do VTEC variam de ~27,0 a 30,0 VTECu (padrão avermelhado), ~24,0 VTECu (padrão amarelo), ~11,0 a 21,0 VTECu (padrão esverdeado) e de 0,0 a ~12,0 VTECu (padrão azul). Pode ser notado que o valor de 30,0 VTECu para as estações de BL-HS permanecem com

duração maior ao comparar com os valores indicados pelas estações da R-EQU. Além disso, nota-se que as alterações dos padrões de cores esverdeado ao avermelhado com maiores intensidades ocorrem entre as 08:00 e 22:00 UT (setor oeste) e 05:00 UT e 18:00 UT (setor leste).

A comparação da variação diária dos perturbados (linhas coloridas) pelo SSW1 e dos dias calmos (linha preta e faixa cinza escura) são mostradas nas Figuras 57B e 57C, assim como discutido nas Figuras 56B e 56C. Nota-se que as variações do VTEC (dias perturbados) indicam aumento comparado a média dos dias calmos das 08:00 UT às 18:00 UT e das 06:00 UT às 21:00 UT nos setores oeste e leste, respectivamente. Os valores médios do VTEC (dias calmos) mostram uma variação de  $\sim 2,0$  a  $30,0$  VTECu (NKLG) e  $\sim 2,0$  a  $35,0$  VTECu (ASCG) e de  $\sim 2,0$  a  $\sim 25,0$  VTECu (MOIU e MBEY) nos setores oeste e leste, respectivamente. Por outro lado, a variação diária referente os dias perturbados é de  $\sim 2,0$  a  $43,0$  VTECu (setor oeste) e  $\sim 2,0$  a  $350$  VTECu (setor leste).

Portanto, a partir das variações discutidas do VTEC do período perturbado comparando com período calmo, uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 21). Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 00:00 UT e 24:00 UT apresentado na Tabela 17. E finalmente é feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (44 a 54) das quatro estações de GPS-TEC tomadas como representativas da BL-HS. Logo, estes resultados são apresentados na Figura 58, onde nota-se que na média global durante o SSW1 causou fase positiva e negativa do VTEC.

Figura 57. O mesmo da Figura 55, porém para a região de baixa latitude do hemisfério sul (BL-HS)



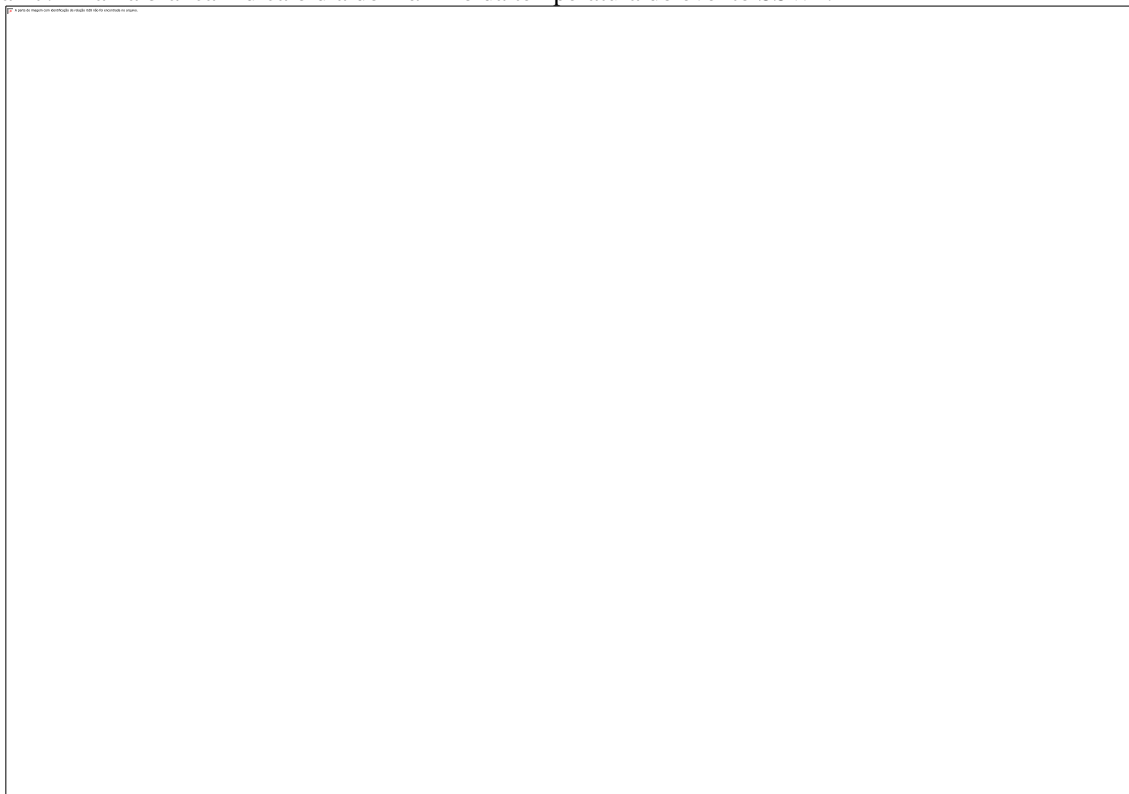
Fonte: Autor

Tabela 17. O mesmo da Tabela 15, porém para a região de baixa latitude do hemisfério sul (BL-HS)

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the content of Tabela 17. The box is currently blank.

Fonte: Autor

Figura 58. Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 44 ao DOY 54, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores BL-HN, R-EQU e BL-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 15 a 17. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW1.

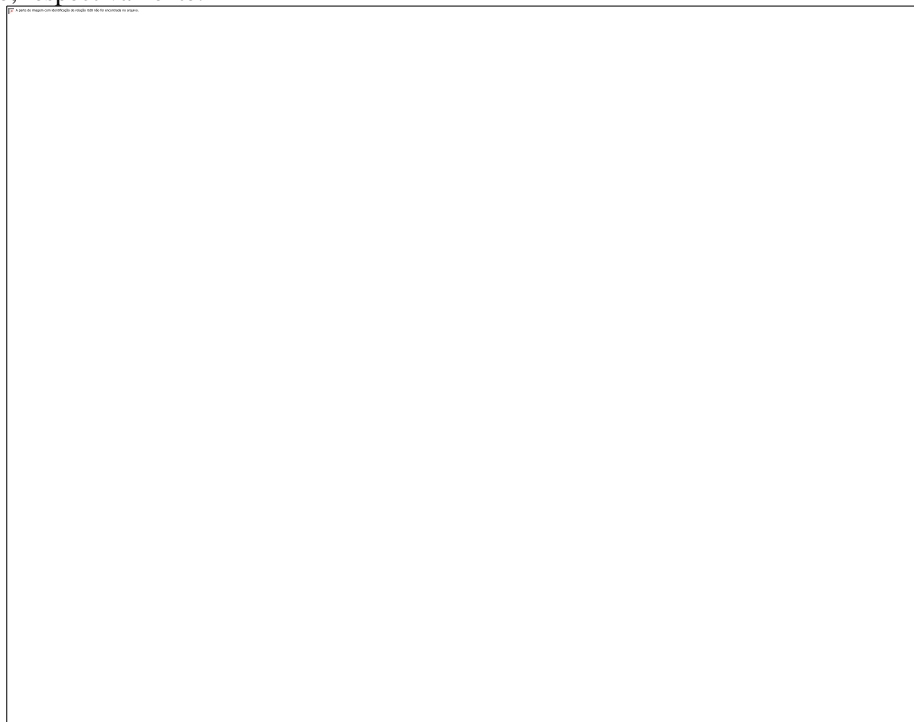


Fonte: Autor

#### **4.3.5 ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW1 NO SETOR AFRICANO**

A Figura 59 mostra as localizações de duas redes de estações GPS-TEC utilizadas para estudar a dinâmica da EIA nos setores leste e oeste sobre o território africano durante o evento de SSW1. A metodologia aplicada é a mesma utilizada para estudar a EIA no território brasileiro. Usando duas linhas brancas quase perpendiculares ao equador geomagnético como referência, são utilizadas estações GPS-TEC próxima ao meridiano magnético, onde 14 estações são representativas do setor leste e 8 estações do setor oeste. Assim, as estações utilizadas cobrem  $\pm 35^\circ$  de dip latitude no setor africano, possibilitando investigar e compreender o comportamento da EIA durante o período calmo e perturbado do evento de aquecimento estratosférico súbito mencionado anteriormente.

Figura 59. Mapa mostra as estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste africano. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente.



Fonte: Autor

Tabela 18. Mostra detalhes da localização, a sigla da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo da EIA nos setores leste e oeste africano.

Fonte: Autor

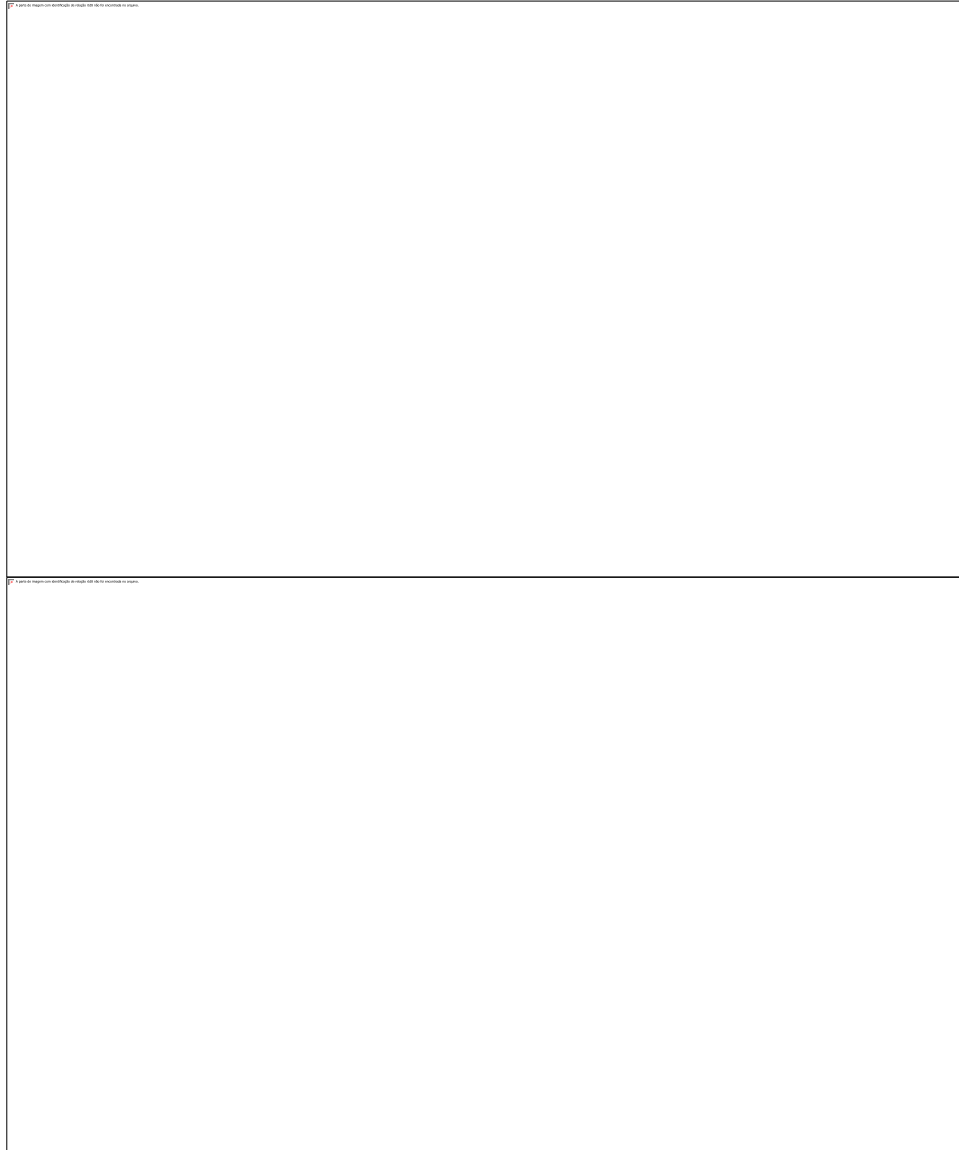
Figura 60. Os gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude apresentando a evolução espaço-tempo da EIA no setor africano. Os painéis A e B são referentes ao período considerado calmo do SSW1 (período anterior ao evento) nos setores leste e oeste, onde o VTEC varia de 0 a 28 VTECu.



Fonte: Autor

Como discutido anteriormente no estudo da EIA para o setor americano serão considerados como dias calmos (não perturbado pelo SSW1) os dias que antecederam o SSW1. A Figura 60A e 60B mostram as variações do VTEC em função do tempo UT e dip-latitude indicando a evolução da EIA para o período de 01 a 06 de fevereiro (DOYs 32-37) como representativo dos dias calmos nos setores leste e oeste africano. Nos painéis A e B da Figura 60 pode se notar que a crista da EIA do HS é mais intensa que a crista do HN entre ~07:00 e 16:00 UT e ~10:00 e 21:00 UT nos setores leste e oeste, respectivamente. Além disso, as cristas do HS no setor oeste indicam maior intensidade que as cristas do setor leste. Outra característica importante é a posição do vale equatorial, o qual apresenta uma grande variabilidade dia-a-dia e se localiza entre (-5 e 5) e (-10 e 5) dip latitude nos painéis A e B. Além disso, a crista da EIA no HS são localizadas entre os dip latitude -10 e -20 (setor leste) e -10 e -35 (setor oeste), respectivamente.

Figura 61. Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para mês de fevereiro 11 a 25 (DOYs 42-56) de 2018, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 18 de fevereiro de 2018 (DOY- 49). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

A Figura 61A e 61B mostram os gráficos de contorno do VTEC (período perturbado do SSW1), onde pode notar o comportamento da EIA entre ~07:00 e ~16:00 UT setor leste e entre ~10:00 e 21:00 UT para setor oeste. Nota-se que a crista do HS é mais intensa do que a crista do HN nos painéis A e B. No entanto, durante o valor máximo da temperatura do SSW1 (DOY 49) ambas as cristas se intensificam na Figura 61A. Posteriormente, ambas as cristas diminuem sua magnitude indicando forte variabilidade, além disso o DOY-56 apresenta uma forte supressão da EIA dos painéis A e B da Figura 61. A depleção da EIA equatorial apresenta uma maior nitidez na maioria dos dias que antecede e posterior ao valor máximo da temperatura estratosférica (DOY-49) nos setores leste e oeste.

No entanto, durante e um dia após o máximo da temperatura do SSW1 a depleção da EIA equatorial não é tão nítida no setor oeste. Neste mesmo setor do DOY 47 até o DOY 51 ambas as cristas da EIA são claramente visualizadas e tornam-se mais intensas do que no setor leste. Por outro lado, no DOY 54 a EIA é parcialmente suprimida e entre os DOY 55 e 56 a crista do HS torna-se mais intensa do que o do HN e a depleção fica mais nítida no DOY 56. O aumento da variação dia-a-dia do VTEC entorno do DOY (49-pico do SSW1) mostrado nos resultados de baixa latitude do HN, região equatorial e baixa latitude do HS nas Figuras 55A a 57A é visto uma intensificação das cristas da EIA nos dois hemisférios Norte e Sul na Figura 61. Isso, caracteriza o aumento do VTEC durante a ocorrência do evento de SSW1 discutida no estudo da variação diária do VTEC nas Figuras 55A a 57A no setor africano. Como o período do SSW1 é referente a transição dos solstícios para o equinócio como foi investigado no setor americano, seria natural esperar um aumento do VTEC no estudo da EIA, no entanto, esse aumento é intensificado, mostrando claramente o efeito SSW1 na EIA. Além disso, nota-se que as cristas da EIA no período perturbado é intensificada comparado com o período calmo em ambos os setores da Figura 61.

Portanto, as perturbações no fenômeno da anomalia de ionização equatorial durante os eventos SSW no setor africano também já foram registradas. Assim, como foram feitas observações das variações nos padrões diurna e semidiurna indicando valores máximos de TEC das 12:00 UT (15:00 LT) às 17:00 UT (20:00 LT) e o valor mínimo de TEC das 17:00 UT (20:00 LT) no NH e similarmente, valores máximos de TEC das 13:00 UT (16:00 LT) às 19:00 UT (22:00 LT) e um valor mínimo de TEC das 17:00 UT (20:00 LT) no HS no setor africano (IDOLOR *et al.*, 2021). Os resultados aqui apresentados, nota-se aumento e depleção da EIA, onde, é visto que a variabilidade da EIA ocorre no período da manhã com extensão para o período tarde, tanto no setor leste como o setor oeste africano. Além disso, durante a SSW1 nota-se que o EIA é perturbado nos setores americano e africano e muda sua forma, intensidade e simetria em relação ao período calmo. Onde, ambos os setores mostram as cristas sul mais fortes que a crista norte. No entanto, a crista sul da EIA no setor africano é mais forte do que no setor americano durante o período calmo. Pode ser notado também que o vale entorno do equador magnético é mais largo no setor africano do que no setor americano. Uma similaridade entre os setores durante o período perturbado, é a intensificação do VTEC entorno do DOY 49 (valor máximo da temperatura estratosférica). Portanto, as cristas do setor americano são mais separadas do que no setor africano.

#### 4.3.6 FLUTUAÇÃO DE FASE DO ROT DURANTE O SSW1

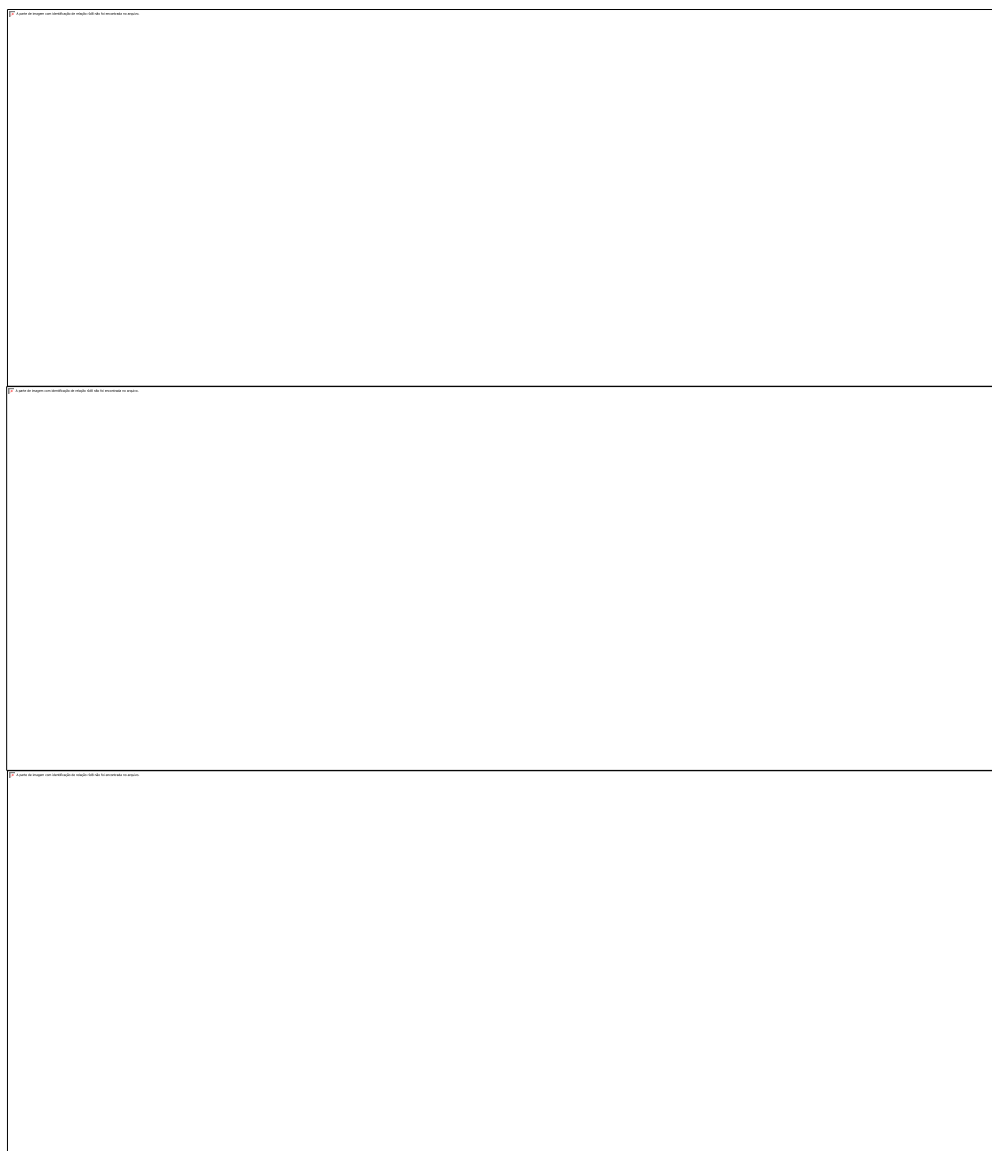
Observações do perfil vertical de densidade eletrônico utilizando ionossondas é possível notar nos ionogramas irregularidades como os Spread-F. Por outro lado, utilizando dados de GPS-TEC consegue-se detectar também irregularidades de menor escala como flutuação de fase do ROT. De acordo Aarons *et al.* (1996), a ocorrência de flutuação de fase nos sinais recebidos pelos satélites é um bom indicador de irregularidades ionosféricas. Onde, este tipo de irregularidade ionosférica que permanece confinada na região equatorial é conhecido de irregularidades ionosféricas de média escala ou bottom side spread-F (ABREU *et al.*, 2014). Portanto, a escala representativa do tamanho das irregularidades (flutuação de fase do ROT) é de alguns quilômetros para ângulos de alta elevação e de dezenas de quilômetros para ângulos de baixa elevação (AARONS, 1997). Além disso, estudo realizado por Fagundes *et al.* (1995), levam a acreditar que o pico de pré-reversão (PRE) sejam uma condição necessária que favorece o surgimento de irregularidades ionosféricas equatoriais. Assim, como é muito conhecido que durante o dia, o campo elétrico zonal direcionado para leste interage com o campo magnético terrestre, portanto essa interação cria uma deriva vertical  $\vec{E} \times \vec{B}$  do plasma, a qual eleva o plasma a maiores altitudes.

Sendo que ao entardecer, antes de ocorrer inversão da deriva vertical, o campo elétrico zonal se intensifica, gerando um rápido movimento vertical da ionosfera para cima na região equatorial (PRE). Portanto, sabendo que as irregularidades ionosféricas estudadas podem estar associadas ao PRE, e dependendo das condições, essas irregularidades podem iniciar após o pôr-do-sol com duração até a manhã do dia seguinte. Diante disso, vamos estudar as irregularidades considerando o período do entardecer do dia e todo período da noite até a manhã do dia seguinte. Nesta seção, será discutida a variabilidade da flutuação de fase do ROT utilizando 12 estações de GPS-TEC nas regiões BL-HN, R-EQU e BL-HS durante o evento de SSW1, no setor Africano. A Figura 62 mostra a flutuação de fase do ROT, onde cada traço vertical (cor vermelha) indica o tempo de duração da irregularidade nas respectivas estações e latitudes.

Assim, como foi visto na Figura 20, quando não existe a presença da flutuação de fase do ROT, a curva é horizontal suave, no entanto, ocorrendo a irregularidades é visto que apresenta um traço espalhado. Sendo que, na ausência de irregularidades ionosféricas, o ROT varia ligeiramente próximo ao valor zero dentro de uma faixa estreita de  $\pm 0,5-1,0$  TECU/min

(1 TECU =  $10^{16}$  el/m<sup>2</sup>) no gráfico parece uma linha horizontal suave ao longo de todo um período em que o satélite GPS estava visível (OVODENKO *et al.*, 2020). O principal objetivo aqui é mostrar como estas irregularidades são influenciadas durante ocorrência do evento de SSW1 no setor africano. Assim, as alterações apresentadas na flutuação de fase poderemos compreender melhor as mudanças no comportamento da ionosfera no setor africano durante o período perturbado pelo evento de SSW1 em relação ao período calmo associado as irregularidades ionosféricas.

Figura 62. Ocorrências de flutuação de fase do ROT obtida por diferentes satélites em 12 estações receptoras durante o período de 20 janeiro de 2018 a 21 de março de 2018 no setor africano. (A) mostra flutuação de fase do ROT em 04 estações GPS-TEC para BL-HN no setor leste e oeste africano. (B) o mesmo de (A) sobre R-EQU. (C) o mesmo de (A) sobre BL-HS.



Fonte: Autor

As Figuras 62A, 62B e 62C apresentam a ocorrência dia-a-dia e o tempo de duração da flutuação de fase do ROT entre 20 de janeiro de 2018 à 21 de março de 2018 no setor Africano referente a ocorrência do evento de SSW1. Nota-se que a flutuação de fase do ROT entre 20 de janeiro e 21 de março de 2018 DOY (20 a 80) na Figura 62A apresenta uma baixa ocorrência, no entanto, nas Figuras 62B e 62C as ocorrências da flutuação de fase são intensificadas. Por outro lado, na estação MBEY (BL-HS), indica baixa ocorrência da flutuação do ROT no período mencionado anteriormente. Pode ser notado na Figura 62B (R-EQU) a forte ocorrência da flutuação de fase do ROT ser intensificada antes e após o SSW1.

Pode ser notado que nas três latitudes é claro a influência do evento de SSW1 na ocorrência da flutuação de fase indicando que há uma supressão durante sua ocorrência. Ainda nas Figuras 62B e 62C percebe-se que na maioria dos dias entre (20 e 80) a flutuação de fase do ROT é intensificada na região equatorial e baixa latitude (BL-HS) comparado a região de baixa latitude HN. Além disso, a ocorrência das irregularidades ionosféricas de grande escala durante este período indica frequência de ocorrência maior no setor oeste quando comparado com o setor leste.

Um trabalho recente no estudo das irregularidades ionosféricas nos setores americano e africano também relataram uma perturbação durante o SSW. As irregularidades ionosféricas de grande escala foram afetadas no setor brasileiro e africano durante o evento de SSW (2012) considerado fraco, onde observaram um aumento e uma diminuição no período médio de duração das irregularidades (DE JESUS *et al.*, 2017). Portanto, a nossa investigação nas ocorrências das irregularidades ionosféricas fica claro que o SSW1 inibe a geração das irregularidades ionosféricas no setor brasileiro (Spread-F) e africano (ROT).

#### **4.4 O SEGUNDO EVENTO DE SSW2 (2018-2019)**

A investigação do SSW2 (2018-2019) neta seção utiliza-se a mesma metodologia para o estudo do evento de SSW1 (2017-2018). A Figura 63 mostra os parâmetros estratosféricos (temperatura, vento e amplitude das ondas planetárias PW1 e PW2) em função do dia do ano DOY 335-30 (01 /12/2018 a 31/01/2019). Os dias compreendido entre as linhas pretas tracejadas indica o início e fim do evento de SSW2 ocorrido no período mencionada

anteriormente. A linha preta continua vertical mostra o dia em que ocorreu a temperatura máxima estratosférica deste evento. Na Figura 63A a linha azul indica a variação da temperatura estratosférica a 90° N (10 hPa, ~30km) e a linha preta indica a variação da média histórica da temperatura estratosférica desde 1979 a 2019.

A média histórica da temperatura estratosférica, é calculado utilizando dados do site OmniWeb da NASA (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) entre os anos de 1979 e 2019. Figura 63B mostra a variação do vento zonal a 60° N (10 hPa), pode ser notado que o vento zonal reverteu para leste após o máximo da temperatura estratosférica para o SSW2. A Figura 63C mostra a variação da amplitude das ondas planetárias PW1 e PW2 a 10 hPa. Nas Figuras 63D, 63E e 63F mostram a variação dos índices geomagnéticos F10.7, Dst e Kp, respectivamente.

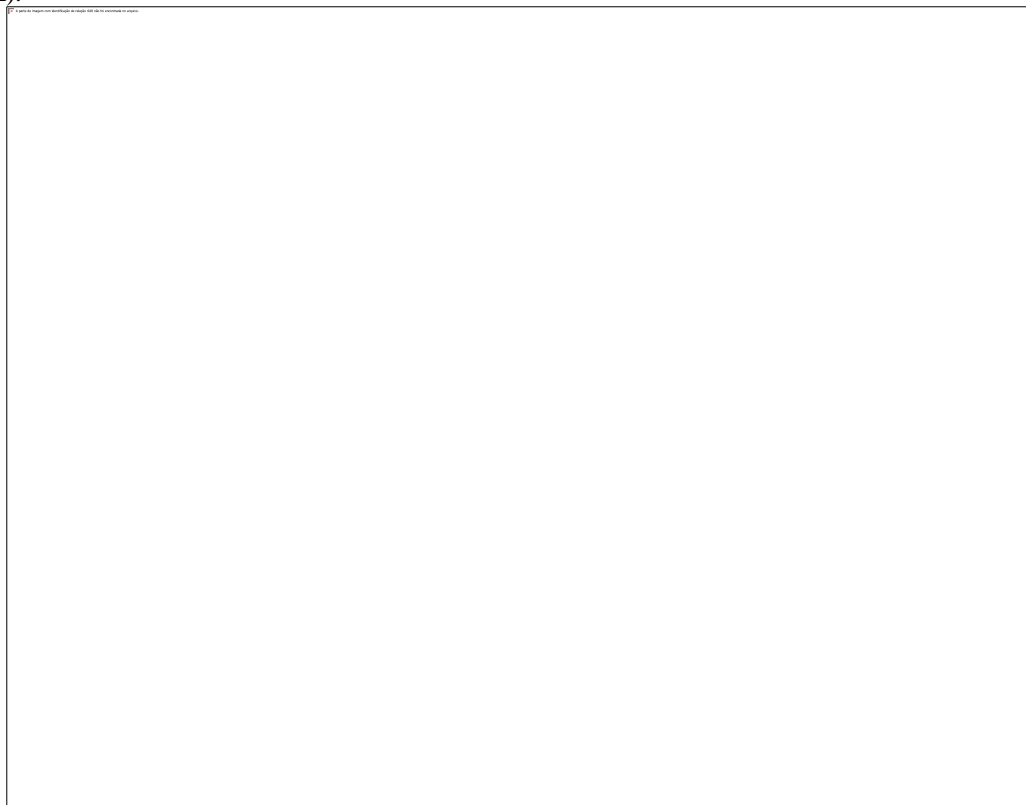
Portanto, é observado que a temperatura estratosférica aumenta ~208 K para ~258 K entre o DOY 356 e DOY 362 (22/12/2018 - 28/12/2018). Após a temperatura estratosférica atingir o seu máximo (~258 K) ela diminui gradualmente até atingir valores da média histórica no DOY 20 (~200K) em 20/01/2019. A Tabela 18 mostra um resumo das características do SSW2 (inverno no HN): o período em que ocorre o evento, duração do evento (em dia), a temperatura máxima na estratosférica (90° N) e o valor mínimo da velocidade do vento zonal em 60° N.

Tabela 19. Mostra um resumo das características do evento de SSW2.

O inverno HN	Período do evento	Tempo de duração do evento	T(K-90°N) 10hPa Máxima do SSW22	U (m/s) 10hPa (60°N) Pico-SSW
	<b>DOY 356 ao DOY 20</b>			
	<b>(22/12/2018-</b>			
<b>2018-2019</b>	<b>20/01/2019)</b>	<b>(~40 dias)</b>	<b>258</b>	<b>4,4</b>

Fonte: Autor

Figura 63. As condições estratosféricas e geomagnéticas do evento de SSW (2018-2019) no Hemisfério Norte (HN) em função do dia do ano (DOY 335-30). A) mostra a temperatura estratosférica (linha azul a 90°N em 10 hPa) e a linha preta (média histórica da temperatura). B) o vento zonal (linha vermelha a 60°N em 10 hPa) e a linha preta horizontal é a linha de referência para o vento zonal nulo. C) as atividades das ondas planetárias 1 (PW1) e 2 (PW2) em 10 hPa. D) índice de fluxo solar F10.7, E) o índice Dst e F) o índice Kp. As linhas pontilhadas e contínua verticais indicam o tempo de duração do evento (~40 dias) e o valor máximo da temperatura estratosférica (~258 K).



Fonte: Autor

#### **4.4.1 ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW2 (2018-2019) DE MÉDIA LATITUDE DO HN A ATÉ MÉDIA LATITUDE DO HS NO SETOR AMERICANO**

As Figuras de 64A a 68A mostram variação diária do VTEC em função do DOY (335 a 31) e o UT entre 10:00 e 24:00 UT das estações de GPS-TEC distribuídas desde médias latitudes do hemisfério norte (HN) até médias latitudes do hemisfério sul (HS). Assim, foram utilizadas 20 estações (ver tabela 19 e Figura 20), sendo distribuída quatro estações para cada faixa latitudinal para o estudo da variação diária do VTEC no período perturbado e calmo associado ao SSW2. Portanto, como feito para o estudo do SSW1 é indicado cada faixa latitudinal como: médias latitudes HN (ML-HN), baixas latitudes a além da crista da EIA do HN (BL-HN), região equatorial (R-EQU), baixas latitudes a além da crista da EIA do HS (BL-HS) e médias latitudes HS (ML-HS) (Veja Tabela 16, 17, 18, 19 e 20).

Tabela 20. Mostra detalhes da localização, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitude das estações de GPS-TEC utilizadas no estudo VTEC para o período perturbado e calmo do SSW2.

<b>Cidades (Localização)</b>	<b>Sigla da Estação</b>	<b>Latitude (+N)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Dip latitude (+N)</b>
<b>Estações de média latitude do Hemisfério Norte (HN)</b>				
Nain (Canadá)	NAIN	56,6	-61,7	62,1
Schefferville (Canadá)	SASK	52,2	-106,4	61,9
Tumwater (Estados Unidos)	SCH2	48,5	-66,8	61,8
Williams Lake (Canadá)	WILL	52,2	-122,2	57,9
<b>Estações de baixa latitude dos Hemisfério Norte (HN)</b>				
Cano Negro (Costa Rica)	VERA	10,9	-84,9	28,8
Cabrera (República Dominicana)	RDLT	19,3	-69,6	26,8
Jalapa (México)	UXAL	19,5	-96,9	25,9
Freeport (Bahamas)	CN25	16,2	-74,5	21,1
<b>Estações da região Equatorial</b>				
Amua (Brasil)	AMUA	-3,1	-60,0	4,5
Porto Velho (Brasil)	POVE	-8,7	-63,9	-0,1
Belém (Brasil)	BELE	-1,4	-48,5	-0,8
Bacabal (Brasil)	MABA	-4,2	-44,8	-5,5
<b>Estações de baixa latitude dos Hemisfério Sul (HS)</b>				
Sobral (Brasil)	MSPP	-3,7	-40,3	-7,5
Natal (Brasil)	RNNA	-5,8	-35,2	-12,4
Ponta Porã (Brasil)	MSPP	-22,4	-55,4	-15,3
Porto Alegre (Brasil)	POAL	-30,1	-51,1	-22,8
<b>Estações de média latitude do Hemisfério Sul (HS)</b>				
Stanly (Ilhas Falkland)	FALK	-51,7	-57,9	-32,0
Rio Grande (Argentina)	RGDG	-53,8	-67,8	-32,4
Robertson Island (Antártica)	SOG3	-54,3	-37,2	-37,2
Roertson Island (Antártica)	KEPA	-54,3	-36,5	-37,3

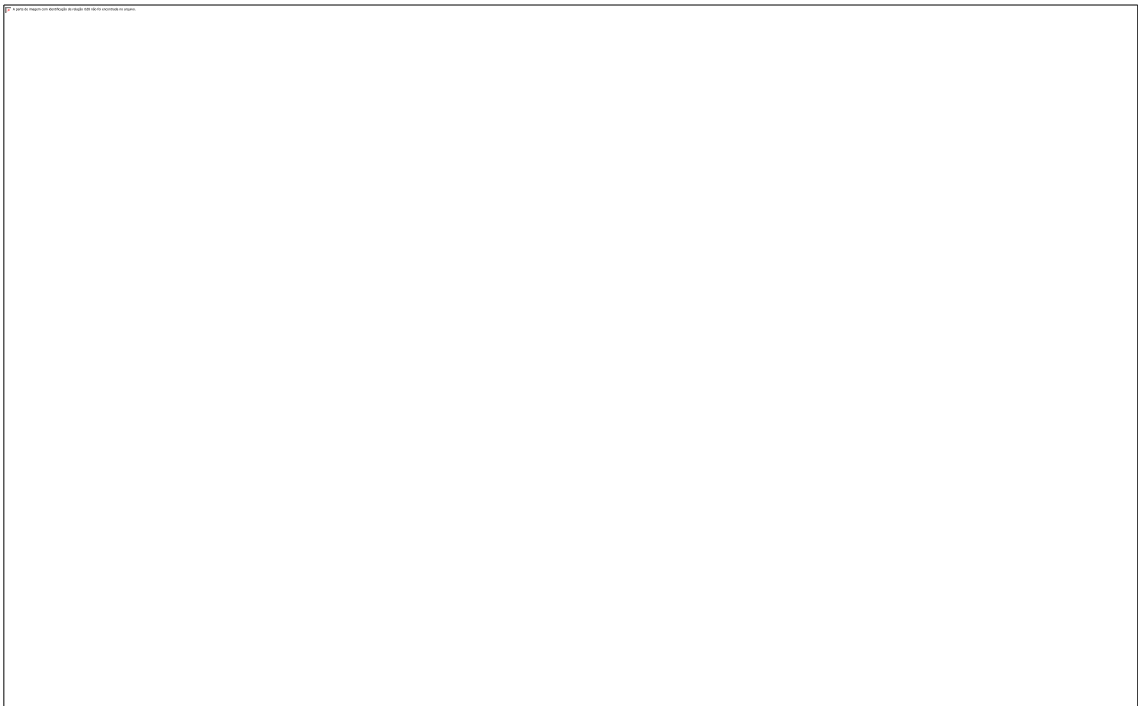
Fonte: Autor

Os gráficos de contornos das Figuras 64A a 68A é mostrado a evolução temporal da temperatura estratosférica a 90° N em 10 hPa (~30 km, linha azul) e a média histórica da temperatura (linha preta), respectivamente. As linhas pretas tracejadas verticais adicionadas nos gráficos indicam o início e o fim da variação da temperatura estratosférica do evento de SSW, além disso, é inserida a linha preta continua vertical indicando o valor máximo da temperatura estratosférica. As Figuras de 64 a 68 nos painéis (B e C) apresentam uma comparação entre a variação VTEC dos dias perturbados pelo SSW2 (DOY 357 a 02) e a variação média do VTEC dos 10 dias que antecederam o evento (denominado período calmo).

A média (linha preta) com a faixa cinza escura (desvio padrão  $\pm 1$ ) representa o período calmo, por outro lado, os dias durante o evento de SSW2 correspondem 5 dias antes (357, 358, 359, 360 e 361) e 5 dias após (363, 364, 365, 01 e 02) do valor máximo da temperatura estratosférica DOY (362). Além disso, é colocado em destaque a variação do VTEC correspondente ao DOY (362) indicado pela linha vermelha grossa nos painéis B e C de cada

figura. É também feito o cálculo da variação percentual do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02 período perturbado) para cada estação de GPS-TEC utilizado a equação 22. Portanto, os valores são apresentados nas tabelas de 20 a 24 e Figura 68.

Figura 64. A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (335 a 31) de 4 estações de GPS-TEC localizados em ML - HN no setor americano. O VTEC é mostrado para o período de 01/12/2018 a 31/01/2019, onde, as linhas azul, preta e a linha preta vertical indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW2, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre os dias calmos (linha preta com a faixa cinza escura) e durante o SSW2 (linhas coloridas) para 05 dias antes do máximo da temperatura estratosférica (DOY-49). C) O mesmo que a Figura 64B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW2.



Fonte: Autor

Tabela 21. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 64A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22.

Fonte: Autor

A Figura 64A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC em ML-HN em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 335 a 31), durante o evento de SSW2. Nota-se que a variação do VTEC nos gráficos de contornos apresenta os valores de maior intensidade indicados pelos padrões (esverdeado ao avermelhado) em intervalos de tempos diferente entre as estações do setor oeste e leste. Assim, os valores do VTEC indicados pelos padrões de cor vermelha é de ~11-12 VTECu, de cor amarela é de ~9,0 VTECu, de cor verde é de ~4,0-8,0 VTECu e de cor azul é de 0 a 3.

Nota-se na Figura 64A que o VTEC nas estações de WILL e SASK apresenta os maiores valores entre 17:00 UT e 24:00 UT e as estações SCH2 e NAIN os maiores valores de VTEC ocorre entre as 12:00 UT e 22:00 UT. Porém, antes do evento SSW2 (DOY 335 e 355) nas 4 estações de ML-HN apresenta maior valores de VTEC entre 17:00 e 24:00 UT e 12:00 UT e 22:00 UT em (WILL e SASK) e (SCH2 e NAIN), respectivamente. Na fase ascendente da temperatura estratosférica do SSW2 (DOY 355 a 362) nas 4 estações mostra uma diminuição significativa do VTEC comparado ao período antes do evento.

Os valores da variação diária do VTEC de maior intensidade neste período variam de ~4 VTECu (padrão esverdeado) a ~9 VTECu (padrão amarelo). No entanto, o período após o DOY 362 os valores do VTEC variam de ~4 a 10 VTECu (padrão esverdeado e vermelho claro), porém, indicando uma maior quantidade de dias maior para o padrão esverdeado. Os valores de 12 VTECu para esse é apresentado apenas por picos com pequeno tempo de duração entre as 18:00 UT e 22:00 UT nas estações WILL e SASK, e nas estações SCH2 e NAIN ficam entre

as 16:00 UT e 20:00 UT. Diferentemente do que ocorreu para variação diária do VTEC associado ao SSW1, no qual é observado a existência de aumento do VTEC, porém, durante o evento de SSW2 mostra uma diminuição do VTEC. Logo, essa diminuição torna mais evidente quando é tomado como referência as investigações realizadas da variação dia-a-dia do VTEC do solstício para o equinócio ao comparar o período de 2017-2018 com de 2018-2019.

As Figuras 64B e 64C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Uma comparação da variação diária dos dias perturbados mostra uma tendência em acompanhar a média dos dias calmos. No entanto, chama a atenção a fase negativa do VTEC dos DOY (363 a 02) nas estações WILL, SASK, SCH2 e NAIN ser maior comparado aos DOY (357 a 361). A exceção ocorre para DOY-362 (linha vermelha) nas estações SASK, SCH2 e NAIN, o qual indica valores do VTEC acima da média (linha preta) entre 16:00 UT e 22:00 UT. Portanto, os valores do VTEC para DOY-362 nesse intervalo de tempo atingem um máximo de  $\sim 10,0$  VTECu nas três estações de GPS-TEC mencionada anteriormente.

Pode ser notado que os valores do VTEC do período calmo variaram de um mínimo a um máximo de  $\sim 2,0$  VTEC e  $\sim 11,0$  VTECu entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Além disso, é observado nas estações WILL e SASK a diminuição do VTEC ocorre entre 16:00 UT e 22:00, por outro lado, nas estações SCH2 e NAIN a diminuição ocorre entre as 14:00 UT e 21:00 UT. Outra característica importante na variação do VTEC do período calmo nas WILL e SASK é um rápido aumento entre 18:00 UT e 21:00 UT. No entanto, esse rápido aumento do VTEC referente ao período calmo em SCH2 e NAIN ocorre entre 16:00 UT e 18:00. Nota-se que esse mesmo fenômeno é indicado pelo DOY-362 (linha vermelha) nas 4 estações entre as  $\sim 18:00$  UT e  $\sim 20:00$  UT.

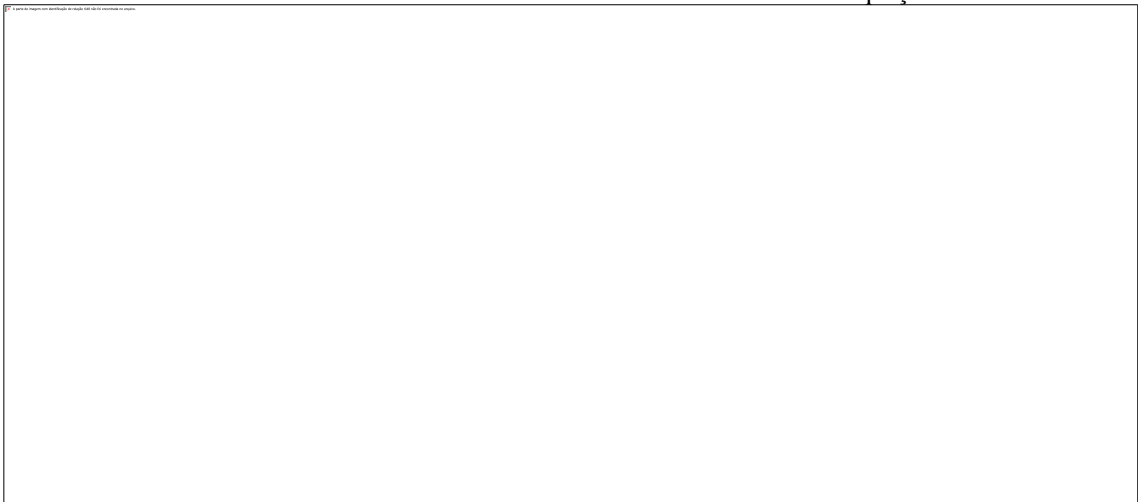
Esse aumento do VTEC demonstrado nestas estações antes de iniciar sua queda, caracteriza a presença do pico de pré-reversão gerados pelos campos elétricos nas regiões E e F logo após o pôr do sol. Uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22), este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 20). Finalmente faz-se a média global utilizando os valores percentuais dos DOY (357 a 02) das 4 estações que foram tomadas como representativas de ML-HN, estes resultados são apresentados na Figura 69, onde nota-se claramente que na média o SSW2 causou fase negativa do VTEC em ML-HN.

Figura 65. O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de CN25 RDLT, UXAL e VERA localizadas em BL-HN e além da crista da EIA no hemisfério norte HN.



Fonte: Autor

Tabela 22. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 65A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22.



Fonte: Autor

A Figura 65A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC em BL-HN em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 335 a 31), durante o evento de SSW2. Nota-se que a variação diária do VTEC em cada gráfico de contorno mostra maior intensidade para os períodos de (DOY 335 a 345) e (DOY 20 a 31) indicado para os períodos

antes e após o evento de SSW2 entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Onde, os valores do VTEC entre as 10:00 UT e 24:00 UT variam de 0 a 18 VTECu (padrão azul ao avermelhado escuro). No entanto, os valores diários do VTEC de maiores intensidades são representados pelos padrões (esverdeado e avermelhado) entre as 12:00 UT e 24:00 UT.

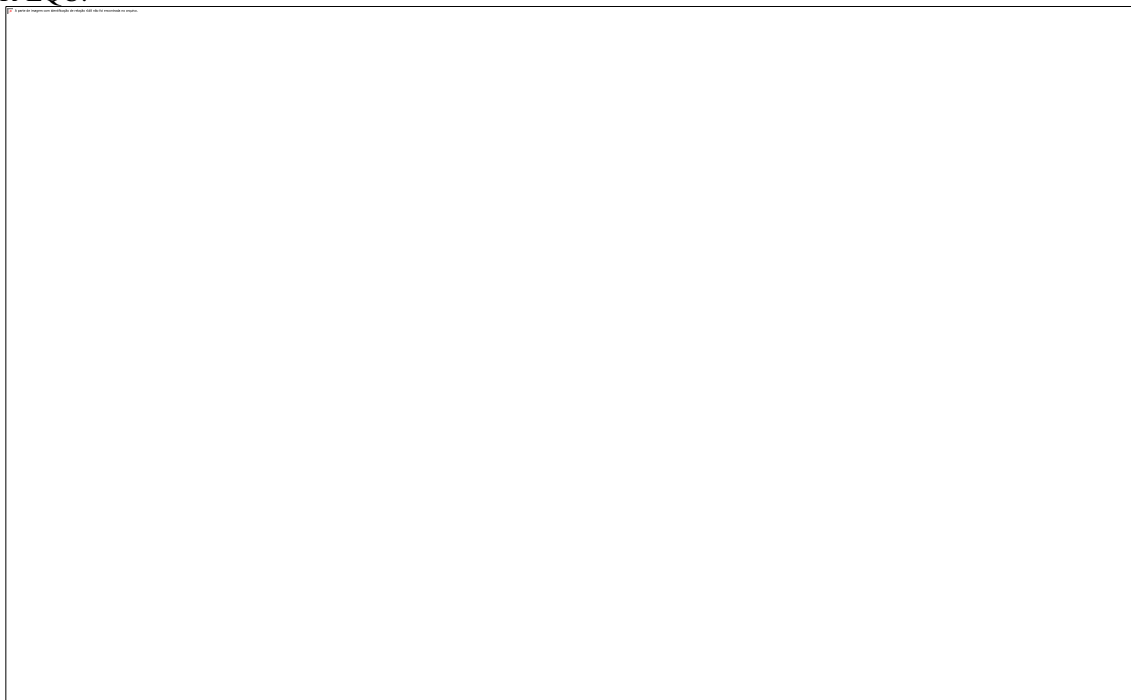
Assim, os valores do VTEC indicado pelos padrões de cor avermelhada variam de ~14 a 18 VTECu, amarelo ~14 VTECu e esverdeado de ~8,0 a 12 VTECu. É também verificado que o VTEC máximo (padrão avermelhado) nas estações CN25, RDLT e UXAL) apresentam-se por valores de curta duração entre as 12:00 UT e 24:00 UT. No entanto, o VTEC máximo (padrão avermelhado) na estação VERA) mostra maior intensidade, além disso, com tempo de duração maior comparado com as outras estações entre as 12:00 UT e 24:00 UT. Fica claro que o VTEC nestas estações de GPS-TEC apresenta maior diminuição durante o evento de SSW2, o qual é indicado pelo período entre as linhas pontilhadas. No entanto, após o DOY 20 as 4 estações apresentam uma intensificação VTECu (padrão vermelho), indicando uma intensificação do VTEC na transição do solstício para o equinócio, após o SSW2.

As Figuras 65B e 65C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). A comparação da variação diária dos dias perturbados com a média dos dias calmos mostra uma variabilidade dia-a-dia grande entre as 10:00 UT e 24:00 UT. No entanto, chama a atenção a fase negativa do VTEC nas 4 estações para os dias perturbado comparado com a média dos dias calmos. Nota-se também que os dias perturbados após o valor máximo indica uma fase negativa levemente maior comparado aos DOY (357 a 361). Os valores do DOY (362-linha vermelha) apresentam grandes variações do VTEC entre as 10:00 UT e 24:00 UT nas estações CN25, RDLT, UXAL e VERA. Assim, como pode ser visto nestas estações, os valores do DOY (362) indicam fase negativa e positiva comparado a média dos dias calmo (linha preta).

No entanto, a fase positiva se verifica com maior intensidade entre 15:00 UT e 22:00 UT em todas as estações. Os valores do VTEC para o período calmo (média e faixa cinza escura) nos painéis (B e C) variam em torno de ~2 a ~14 VTECu nas estações CN25, RDLT e UXAL entre as 10:00 UT e 22:00 UT. Por outro lado, os valores do VTEC (período calmo) na estação VERA variam de ~2 a ~17 VTECu entre 10:00 UT e 22:00 UT. Portanto, os valores do VTEC durante o período perturbado pelo evento do SSW2 (linhas coloridas) variam de ~2 a ~17 VTECu. Uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação

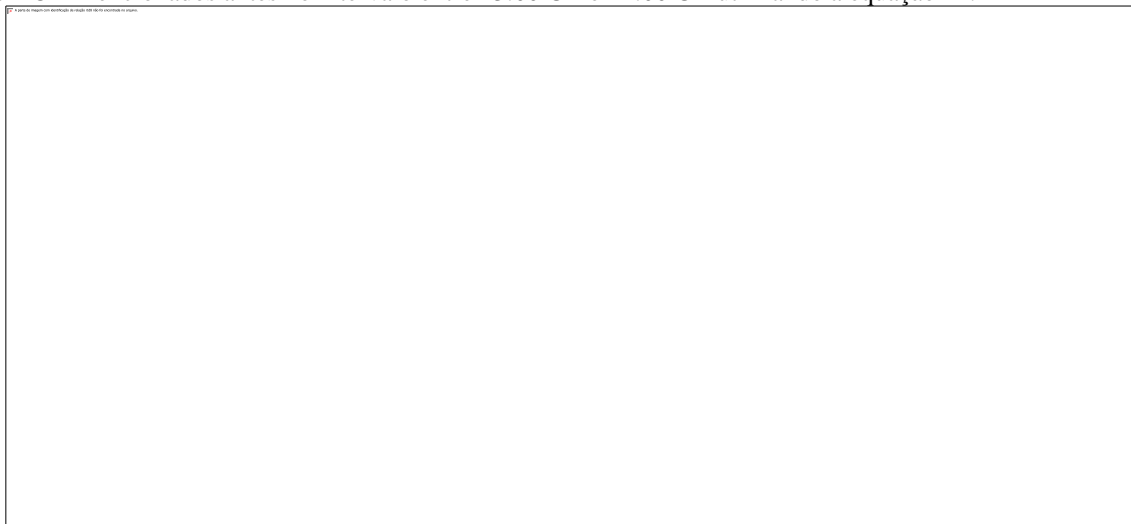
22), este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 21). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de BL-HN, estes resultados são apresentados na Figura 69, onde nota-se claramente que na média o SSW2 causou fase negativa do VTEC em BL-HN.

Figura 66. O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de AMUA, POVE, BELE e MABA localizadas na R-EQU.



Fonte: Autor

Tabela 23. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 66A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22.



Fonte: Autor

A Figura 66A apresenta a variação diária do VTEC entre as 10:00 e 24:00 UT em função do dia do ano (DOY) para o estudo do evento de SSW2 período compreendido de 01/12/2018 a 31/01/2019 (DOY 335-31). As alterações do VTEC de maiores valores para os períodos antes, durante e após a temperatura máxima estratosférica, é indicado pelas mudanças dos padrões (esverdeado ao avermelhado) entre as 12:00 UT e 22:00 UT. Portanto, os valores do VTEC referente aos padrões de cor avermelhada variam de (~21 a 25 VTECu), amarelo (~19 VTECu) e esverdeado (~10 a 17 VTECu).

Nota-se que a variação diária do VTEC nos gráficos de contornos das 4 estações de GPS-TEC da R-EQU, mostram uma maior intensidade para o período que antecede o evento de SSW2 (DOY 335-355). No entanto, durante o evento, o período indicado entre as linhas tracejadas verticais e durante os DOY (355 e 20), apresenta maior diminuição do VTEC. É notado também, que diminuição se torna maior logo após o pico da temperatura máxima estratosférica entre os DOY (365 e 20).

Assim, nesse período o padrão do VTEC fica entorno do amarelo ao vermelho-claro variando de ~18 a 21 VTECu. Portanto, pode ser visto que após o DOY (20) o VTEC volta a ter maior intensidade entre 12:00 UT e 22:00 UT, onde, os valores variam de ~10 a 25 VTECu. A diminuição do VTEC verificado nos gráficos da Figura 66A durante o evento de SSW2, é confirmado ao associarmos a variação dia-a-dia dos valores do VTEC investigado no período de solstício compreendido entre o DOY 335 e DOY 30 (inverno-HN) mostrado na Figura 31. Assim, como foi observado na Figura 31, o VTEC no período de 2018-2019 há uma diminuição quando comparado com 2017-2018 (período sem o SSW2).

As Figuras 66B e 66C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura) para as estações de GPS-TEC da R-EQU. Os dias durante o evento são mostrados pelas linhas coloridas (já mencionado) indicando 5 dias antes e 5 dias após o valor máximo da temperatura estratosférica indicado pelo DOY-362 (linha vermelha). Nota que os valores médios do VTEC mostrados nas Figuras 56B e 56C durante as 10:00 UT às 24:00 UT variam em torno de ~2,5 a ~25 VTECu.

Nota-se no período que corresponde os dias perturbados pelo SSW2 (linhas coloridas), a variação do VTEC mostra acompanhar a variação da média dos dias calmos. Os valores indicados pelos DOY perturbado variam de ~2,5 a ~23 VTECu nas estações AMUA e POVE, no entanto, nas estações BELE e MABA os valores do VTEC variaram de ~5,0 a 20 VTECu.

Além disso, a variação do VTEC associado aos DOY (357 a 2) mostram valores menores comparado aos valores dos DOY (357 a 361).

Uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22), este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 22). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de R-EQU, estes resultados são apresentados na Figura 69, onde nota-se claramente que na média o SSW2 causou fase negativa do VTEC em R-EQU.

Figura 67. O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de MSPP, POAL, RNNA e CESB localizadas em BL-HS e além da crista da EIA no hemisfério sul HS.



Fonte: Autor

Tabela 24. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 67A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22.

Fonte: Autor

A Figura 67A mostra as variações diária do VTEC entre as 10:00 e 24:00 UT de quatro estações de GPS-TEC em BL-HS localizadas no setor americano no Hemisfério Sul (HS) em função do dia ano (DOY). A resposta da variação diária do VTEC associado ao SSW2 ocorre durante o período de 01/12/2018 a 31/01/2019 (DOY 335-31). Nota-se que a variação diária do VTEC apresentada na Figura 67A indica maior intensidade no período que antecede o evento de SSW2 entre as 13:00 UT e 22:00 UT. Por outro lado, quando a temperatura estratosférica inicia sua ascendência ao valor máximo entre os DOYs (355-362), o VTEC mostra uma leve diminuição, a qual permanece após o valor máximo da temperatura estratosférica DOY (362) até aproximadamente o DOY 20. Logo, a partir do DOY (20) o VTEC volta a mostrar uma forte intensificação.

Assim, os valores do VTEC que variam entre as 10:00 e 24:00 UT são indicados pelos padrões de cores do azul ao avermelhado. Portanto, os valores do VTEC variam de ~21 a 25 VTECu (padrão avermelhado), ~19 VTECu (padrão amarelo), ~10 a 17 VTECu (padrão esverdeado) e 2 a 8 VTECu (padrão azul). A diminuição do VTEC durante o SSW2 (período entre as linhas pontilhadas) é bem caracterizada quando tomado como referência o estudo realizado da variação dia-a-dia dos valores do VTEC no solstício período compreendido entre o DOY 335 e DOY 30 (inverno-HN) entre as 12:00 e 22:00 UT. Portanto, é importante mencionar que a referência tomada da variação dia-a-dia do VTEC do solstício, é porque

quando foi comparado o período de 2018-2019 com o período de 2017-2018, verificou-se uma diminuição do VTEC em 2018-2019.

As Figuras 67B e 67C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura) para as estações de GPS-TEC de BL-HS. Nota-se que o VTEC dos dias perturbado pelo SSW2 acompanham os valores da média dos dias calmo, no entanto, o período perturbado indica uma fase negativa comparado ao período dos dias calmos. Os valores médios do VTEC mostrados nas Figuras 67B e 67C durante o período das 10:00 UT às 24:00 UT varia em torno de 4 a 35 VTECu.

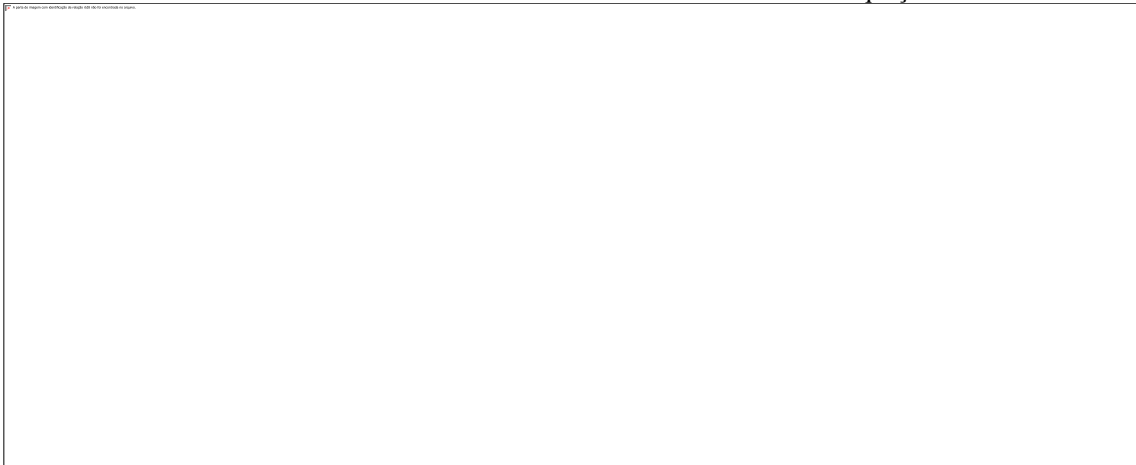
No entanto, o VTEC dos dias durante o evento (linhas coloridas) das estações MSPP, POAL, RNNA e CESB variam de  $\sim 4,0$  a  $\sim 29$  VTECu entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Nota-se também que os valores do VTEC para o período após o DOY (362) indicam uma diminuição maior do que o período antecedente. Assim, uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY é utilizado a Equação 22. Portanto, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 23). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de BL-HS, estes resultados são apresentados na Figura 69, onde nota-se claramente que na média o SSW2 causou fase negativa do VTEC em BL-HS.

Figura 68. O mesmo da Figura 64, mas para estações de GPS-TEC de FALK, KEPK, RGDG e SOG3 localizadas em ML-HS e além da crista da EIA no hemisfério sul HS.



Fonte: Autor

Tabela 25. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 68A como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 13:00 UT e 22:00 UT utilizando a equação 22.



Fonte: Autor

A Figura 68A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC em ML-HS em função do tempo (UT 10:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 335 a 31), durante o evento de SSW2. Nota-se que a variação diária do VTEC mostra forte perturbação entre as 10:00 e 24:00 UT, no qual a variação do VTEC é indicada pelos padrões de cores variando do azul ao avermelhado. Portanto, os valores mostrados pelos padrões variam de ~10 a 12 VTECu (avermelhado), ~9 VTECu (amarelo), ~5 a 8 VTECu (esverdeado) e 1 a 4 VTECu (azul) entre

10:00 UT e 24:00 UT. Onde, os valores de maior intensidade (padrão avermelhado) mostram-se por picos indicando um tempo de duração curto durante os DOY (335 a 31) entre as 10:00 UT e 24:00 UT.

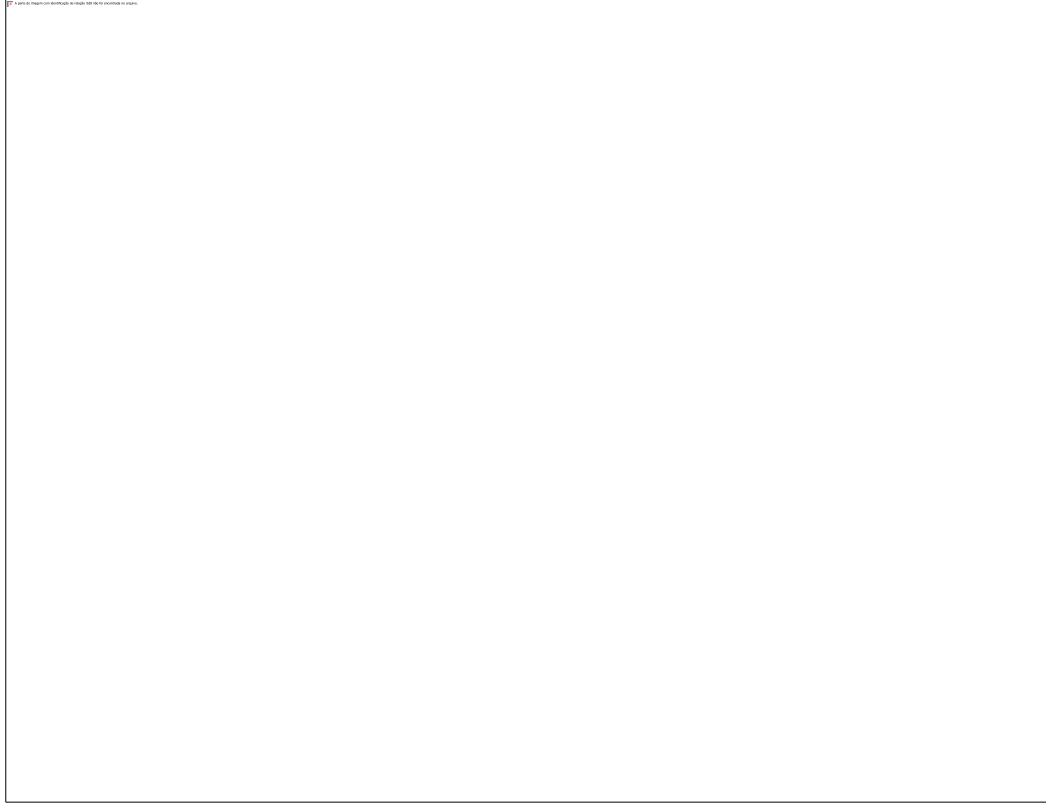
No entanto, há um leve aumento dos valores mostrados pelo padrão avermelhado entre as linhas tracejadas (período de ocorrência do SSW2). Por outro lado, a diminuição do VTEC durante o evento de SSW2 mostrada pela Figura 68A é difícil de ser observado. Porém ao considerar o estudo realizado do período de transição sazonal da variação dia-a-dia dos valores de VTEC no solstício (DOY: 335 a 30, inverno-HN) é possível ver que ocorre essa diminuição no valor do VTEC durante o SSW2. Portanto, essa diminuição do VTEC pode ser vista ao fazer a comparação entre os períodos 2017-2018 e 2018-2019 durante o solstício.

As Figuras 68B e 68C mostra uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos (linha preta e faixa cinza escura) para as estações de GPS-TEC de ML-HS. Nota-se que os períodos dos dias calmos do VTEC apresentam fortes variações diárias entre as 10:00 UT e 24:00 UT. Portanto, os valores médios do VTEC entre 10:00 UT e 24:00 UT variam de 5 e 12 VTECu nas estações FALK e KEPA, porém, em RGDG e SOG3 variam entre 3 e 10 VTECu. A variação do VTEC referente aos DOY (357 a 2 linhas coloridas) para o período perturbado pelo evento de SSW2, apresentam valores que variam de 3 a ~16 VTECu, os quais indicam fases positivas e negativas referente ao período calmo.

No entanto, nota-se uma leve diminuição do VTEC para os DOY posteriores ao DOY-362 (linha vermelha) com exceção do DOY-1 em KEPA, o qual o valor do VTEC mostra uma grande fase positiva. Além disso, na Figura 68 (painel B e C) a variação diária do VTEC apresenta forte oscilação em relação a outros setores, então os valores VTEC são maiores e menores que o período calmo do VTEC. Portanto, nota-se que a variação diária do VTEC em latitude média (SH) tem uma variação diária completamente diferenciada em comparação com outros setores.

Assim, uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY é utilizado a Equação 22. Portanto, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 13:00 UT e 22:00 UT (tabela 20). Finalmente faz-se a média global para cada DOY utilizando as 4 estações que foram tomadas como representativas de ML-HS, estes resultados são apresentados na Figura 69, onde nota-se claramente que na média o SSW2 causou fase negativa e positiva do VTEC em ML-HS.

Figura 69. Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 357 ao DOY 02, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 18 a 22. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW2.



Fonte: Autor

A diminuição observada no VTEC mostrou um fator de  $\sim 2,4$  nas estações de BL-HS comparada com as estações de ML-HS durante o SSW2 no setor americano. Além disso, é importante mencionar que as estações localizadas no hemisfério norte (HN) apresentaram menor valores de VTEC do que as estações localizadas no hemisfério sul (HS). Portanto, se observa que os distúrbios ionosféricos devido ao evento SSW2 são também associados a dependência latitudinal nas estações de GPS-TEC nos dois hemisférios. Assim, as estações de BL-HN com dip latitude ( $5^{\circ}\text{N}$ - $30^{\circ}\text{N}$ ) e, em BL-HS com dip latitude ( $5^{\circ}\text{S}$ - $30^{\circ}\text{S}$ ) experimenta uma diminuição e aumento no VTEC durante esse evento.

Além disso, as respostas ionosféricas ao SSW nas variações do VTEC das estações de BL-HS, apresentam forte diferença no período semidiurno. Isto pode ser atribuído às variações da dinâmica equatorial durante os SSWs, que podem levar à ocorrência de um máximo nas variações do TEC sobre as localizações das cristas da anomalia (FAGUNDES *et al.*, 2015). As observações simultâneas feitas das ML-HN para ML-HS revelam que durante o evento SSW2, o VTEC máxima (padrão vermelho) diminui após o pico correspondente ao DOY-362 mostrado nos gráficos de contorno. Essa diminuição fica mais evidente nas estações da R-EQU e BL-HS, já nas demais latitude fica menos perceptível essa influência do evento. Outra característica

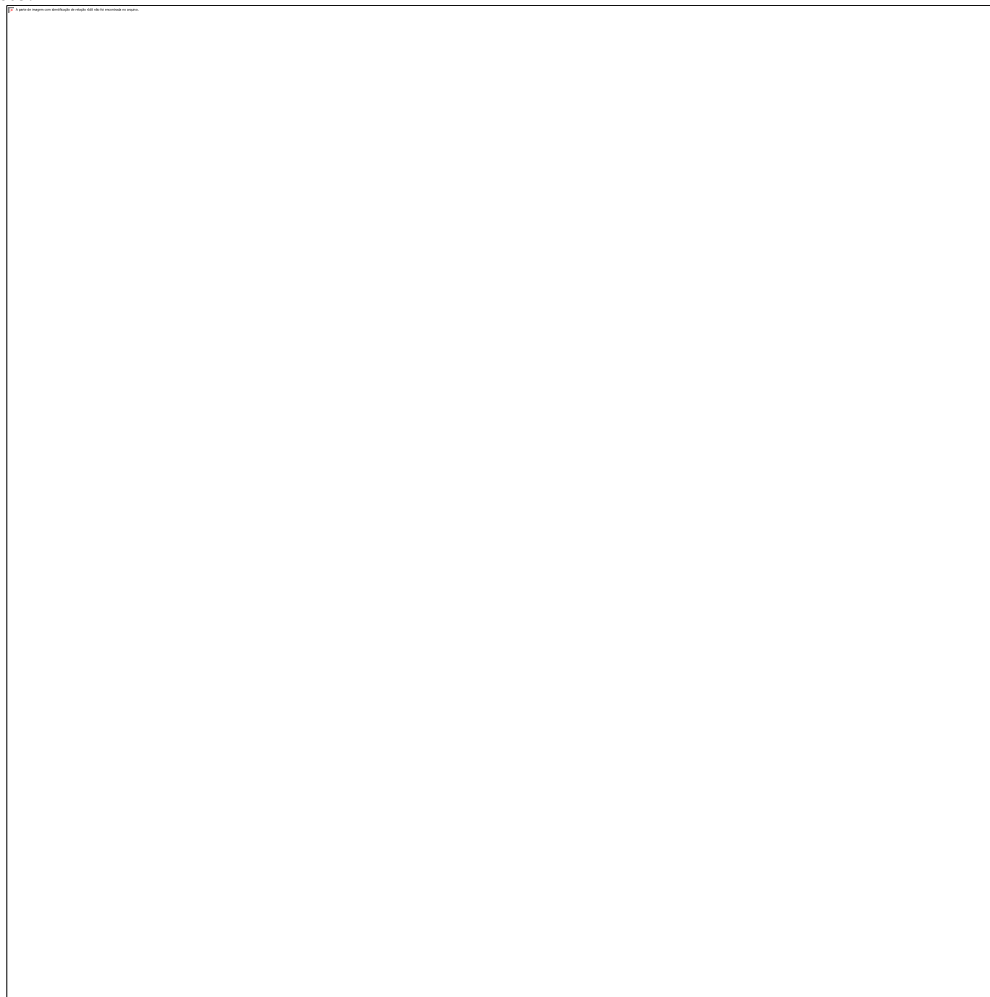
importante apresentada na variação do VTEC, é que ocorre um aumento do HN para HS se intensificando na R-EQU e BL-HS. Além disso, em ML-HS para o período diurno, o VTEC mostra um comportamento misto na variação quando comparado ao comportamento médio do período calmo.

#### **4.4.2 ESTUDO DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW2 NO SETOR AMERICANO**

Nesta seção o fenômeno da anomalia de ionização equatorial (EIA) será discutido para o evento de SSW2, onde será possível investigar a variação do VTEC durante o período calmo e perturbado referente ao fenômeno mencionado anteriormente. Assim, como realizado para o evento de SSW1 foi escolhido uma cadeia de estações de GPS-TEC quase perpendicular ao equador geomagnético entre os dois Hemisférios Norte (HN) e Sul (HS) no setor americano.

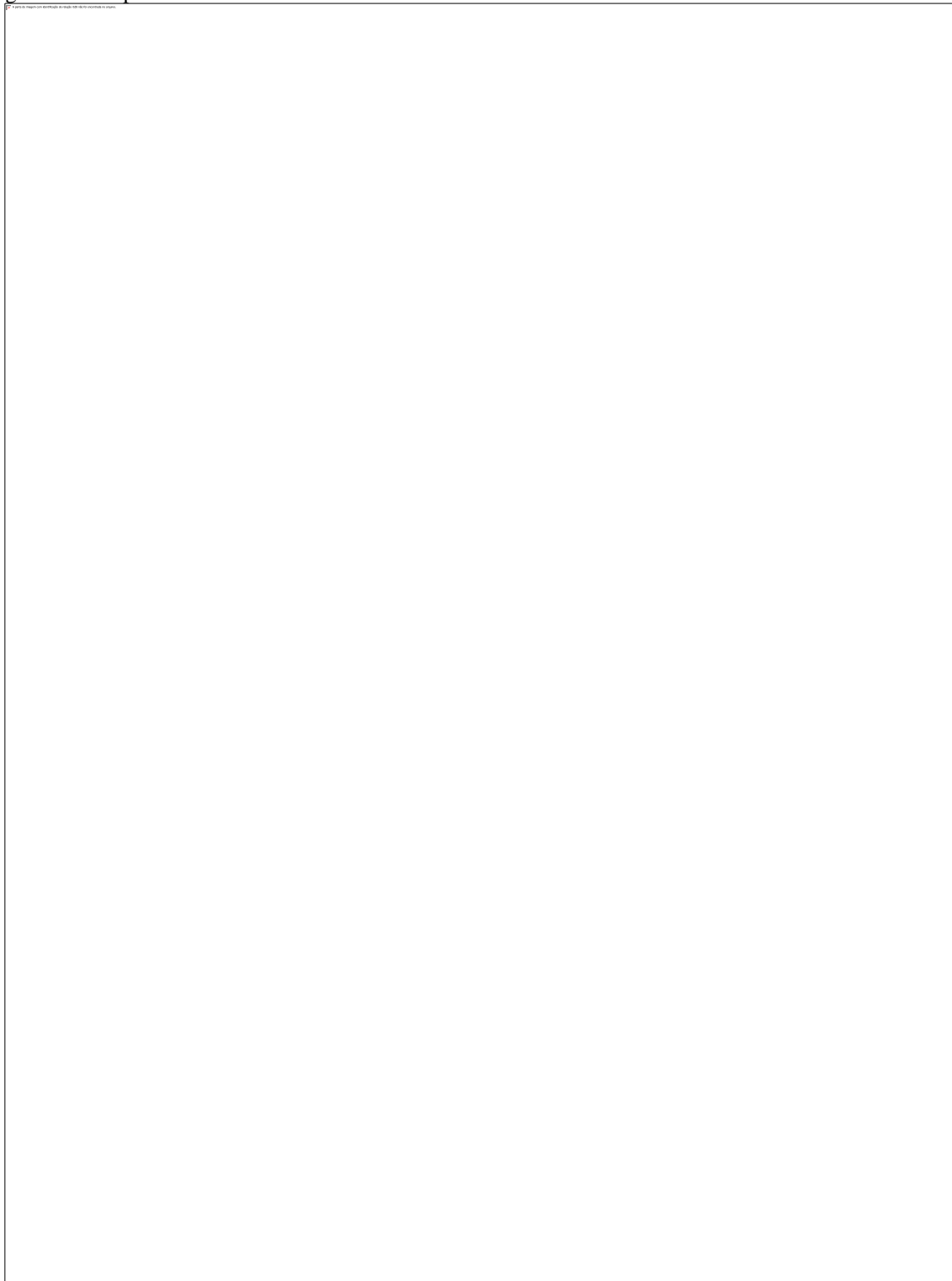
A Figura 70 mostra o mapa com duas linhas brancas, quase perpendicular ao equador geomagnético, e próximo a estas linhas temos uma rede de 43 estações GPS-TEC que se estende desde o HN até o HS. Sendo 19 estações representativas do setor leste e as outras 24 do setor oeste brasileiro. Onde os ícones verdes e amarelos indicam as estações de baixa latitude nos (HN e HS) e os ícones vermelhos as estações equatoriais. Além disso, o setor leste (ícones verdes) e oeste (ícones amarelos) estão separados por ~1631 km (~14,7°) indicada pela linha sólida laranja. A Tabela 25 apresentam localização, sigla da estação, latitude, longitude e dip latitude das estações de GPS-TEC utilizada nesta investigação.

Figura 70. O mapa indica as estações de GPS-TEC utilizadas para o estudo da EIA durante o evento de SSW2 nos setores leste e oeste brasileiro. As estações utilizadas em BL-HN e BL-HS são indicadas por ícones amarelos e da R-EQU são indicados por ícones vermelhos. As curvas brancas e a curva preta indicam as linhas perpendicular ao equador geomagnético e o equador geomagnético, respectivamente. A distância de ~1760 (~15,8°) entre o setor leste e oeste.



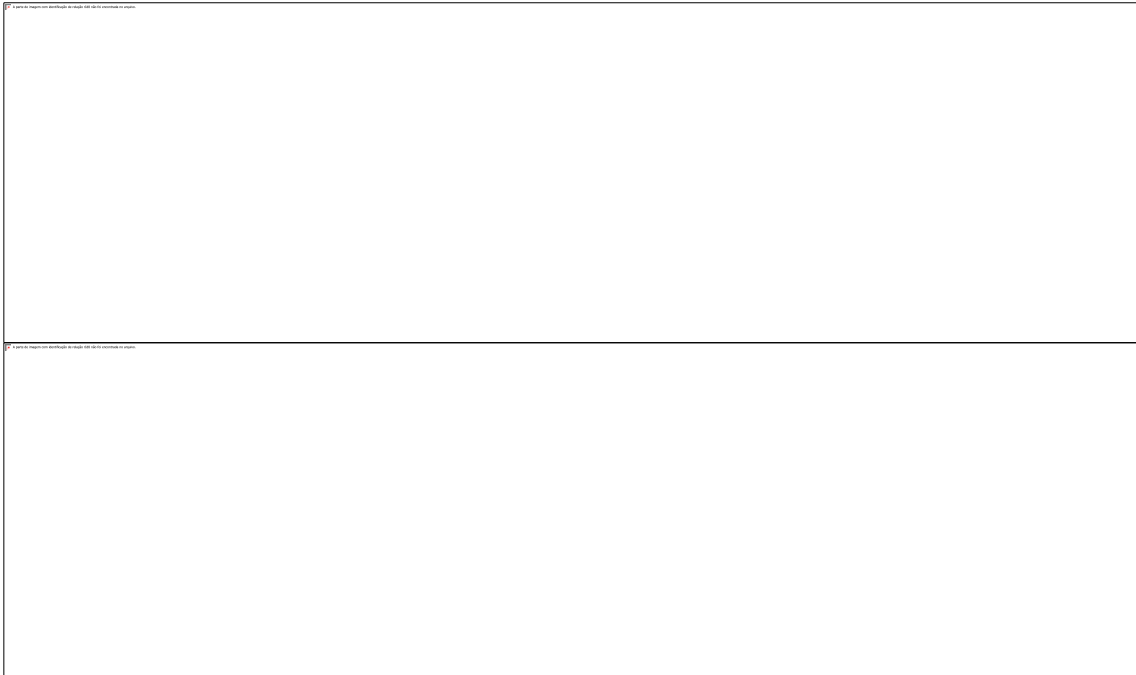
Fonte: Autor

Tabela 26. Mostra detalhes das estações de GPS-TEC para o estudo da EIA no setor americano. Os detalhes indicam a cidade e o país de cada estação, além disso, o símbolo da estação, a latitude geográfica, longitude geográfica e o dip latitudes.



Fonte: Autor

Figura 71. Gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW2, considerado como calmo de 01/12/2018 a 06/12/2018 (DOY 335 a 340), onde o VTEC varia de 0 a 28 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

As Figuras 71A e 71B mostra as variações do VTEC em função do tempo UT e dip latitude, as quais apresentam a evolução espacial e temporal da EIA entre 01 e 06 de dezembro (DOY 335-340) como representativo dos dias calmo nos setores leste e oeste, respectivamente. Nas Figuras 71A e 71B pode ser notado que a crista da EIA do HS é mais intensa que a crista do HN (~13:00 as 22:00 UT). As cristas no HS no setor oeste são mais intensas que as do setor leste entre ~13:00 UT e 22:00 UT. A posição do vale equatorial apresenta uma grande variabilidade dia-a-dia e se localiza entre 0 e -10 (dip latitude). Esta variabilidade e diferença entre os setores leste e oeste brasileiro estão de acordo com estudos realizados anteriormente (VIEIRA *et al.*, 2017; FAGUNDES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2019; DIAS *et al.*, 2020). Nota que a evolução da EIA nestes dois períodos, a intensidade do VTEC apresenta uma variação nos os padrões de cores que variam do azul ao vermelho. Portanto, os valores indicados pelos padrões de cores passam a corresponder para o azul (~2,0-9,0 VTECu), verde (~12-16 VTECu), amarelo (~21 VTECu), laranja (~23 VTECu) e vermelho (~26-28 VTECu).

Assim, a variabilidade diária da anomalia é observada em ambos os setores, a qual mostra ser mais intensa no setor leste do que no setor oeste. O aumento no VTEC devido ao pré-reverso (PRE) do campo elétrico a leste que ocorre logo após o pôr do sol e causa uma intensificação do efeito de fonte equatorial, e em consequência o fortalecimento da crista de EIA (RIBEIRO *et al.*, 2019). Além disso, a variação da EIA durante o período calmo, mostra

uma extensão da região equatorial para além da crista entre 15:00 UT e 21:00 UT nos setores leste e oeste. Portanto, as fortes estruturas vermelhas vistas durante o período calmo com VTEC em torno de  $\sim 25-28$  desaparecem após 20:00 UT. Sendo substituídas por padrões verde e amarelo ( $\sim 14$  VTECu a 21 VTECu) no setor leste, por outro lado, no setor oeste é observado os padrões de verde ao vermelho claro indicando valores de  $\sim 14$  VTEu a 23 VTECu.

Figura 72. Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para meses de dezembro e janeiro 21 a 04 (DOYs 355-04) entre os anos 2018-2019, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 28 de dezembro de 2018 (DOY- 362). (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

As Figuras 72A e 72B mostram os gráficos de contorno do VTEC, onde pode ser notado o comportamento da EIA entre  $\sim 13:00$  e 21:00 UT para os setores leste e oeste. Nota-se setor leste durante os dias perturbados pelo SSW2 a crista do HS é mais intensa do que a crista do

HN (DOY 355 a 04). No entanto, ao passo que se aproxima do máximo da temperatura do SSW2 (DOY 362), as cristas apresentam uma inversão de suas intensidades, ou seja, a crista no HS diminui a intensidade, por outro lado, no HN se intensifica (DOY 359 a 365). Assim, posteriormente ambas as cristas diminuem sua magnitude, mas mantem a mesma intensidade (DOY 01 a 04).

A depleção da EIA equatorial é bem nítida na maioria dos dias durante o SSW2. No setor oeste no início do SSW2 as cristas do HS e HN (DOY 355 a 358) não são bem definidas (supressão total ou parcial da EIA). A crista da EIA para os DOY (359 e 360) são claramente visualizadas e tornam-se mais intensas. Por outro lado, o DOY 361 a EIA é totalmente suprimida e durante os DOY (362 e 364) a crista em ambos os HN e HS torna-se mais intensa, além disso, no HS a crista fica mais nítida indicando maior intensidade do que no HN. Os DOY (365 a 03) mostra também uma forte supressão nas cristas do HN e HS com supressão total da crista HN. Portanto, o DOY 04 mostra uma maior intensidade no VTEC, porém, as cristas do HN e HS não são bem definidas entre 16:00 UT e 23:00 UT. Portanto, era de esperar essa supressão da EIA porque o evento de SSW2 diminui significativamente o valor do VTEC durante sua ocorrência.

#### **4.4.3 ESTUDOS DOS PARÂMETROS $h'F$ , $f_oF_2$ E OS SPREAD-F DURANTE O SSW2**

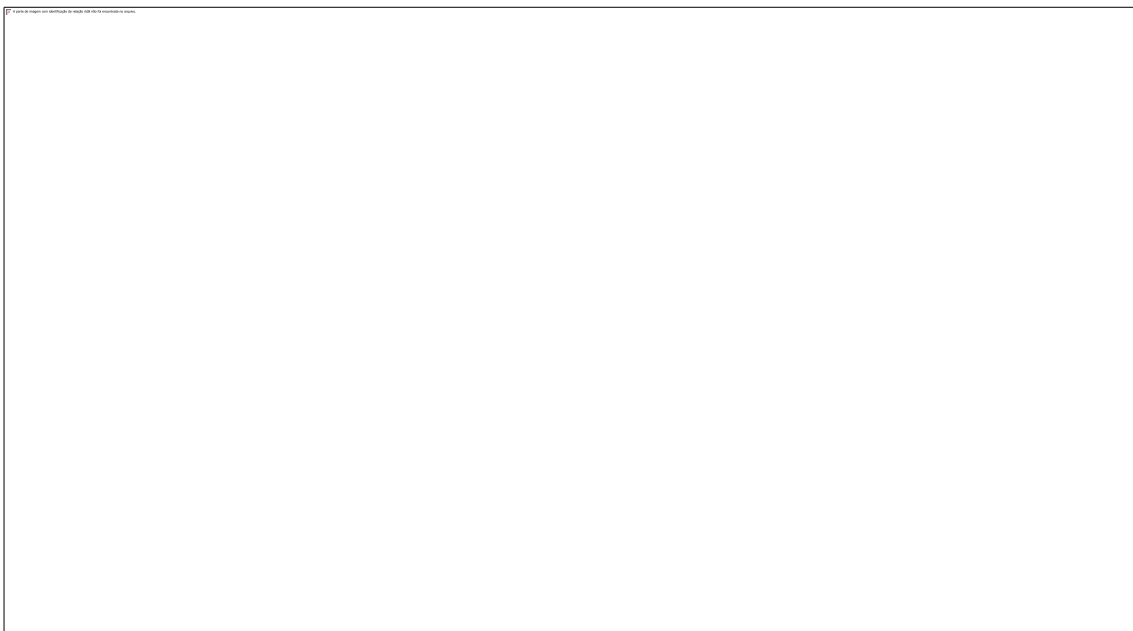
Nesta seção é apresentado o estudo dos parâmetros ionosféricos  $h'F$ ,  $f_oF_2$  e as ocorrências das irregularidades como os Spread-F (RSF e FSF) referente as ionossondas utilizadas de Araguatins (ARG dip latitude -5) e Jataí (JAT dip latitude -13,5) do grupo de pesquisa do IP&D-UNIVAP. As Figuras 73 e 74 nos painéis (A, B e C) mostram as variações dia-a-dia de  $f_oF_2$ ,  $h'F$  e os Spread-F (RSF-range) e frequência (FSF) no setor brasileiro durante o SSW2 em função de LT e dos DOY (335 a 31) correspondendo ao período de 01/12/2018 a 31/01/2019. Nestas figuras são usados os dados do Laboratório de Química Atmosférica e Dinâmica da NASA ([http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/ann\\_data.htm](http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.htm)) para mostrar as condições estratosférica durante o SSW2 como utilizada no estudo do VTEC. No entanto, o gráfico referente aos dados da ionossonda de São José dos Campos para o evento de SSW2 não foi feito pela falta de dados no período de ocorrência deste evento.

Portanto, os dados são referentes a temperatura estratosférica a  $90^\circ$  N em 10 hPa (~30km) e a média histórica indicadas pelas linhas azul e preta nos gráficos de contornos e nos painéis (C- apenas linha azul), respectivamente. Com intuito de uma análise detalhada do

comportamento da variação diária de foF2 e do h'F durante o evento de SSW2, o qual é indicado pelo período entre os círculos sólidos 1 (início) e 2 (fim) do evento. Assim, vamos comparar a variação de foF2 e h'F dos dias perturbados e as respectivas médias dos dias calmos para 10 dias antecedente ao evento de SSW2. Portanto, essas comparações são apresentadas nas Figuras 75 e 76 nos painéis (A e B), onde o período perturbado e a média dos dias calmos são indicados pelas linhas coloridas e a linha preta mais a faixa cinza, respectivamente.

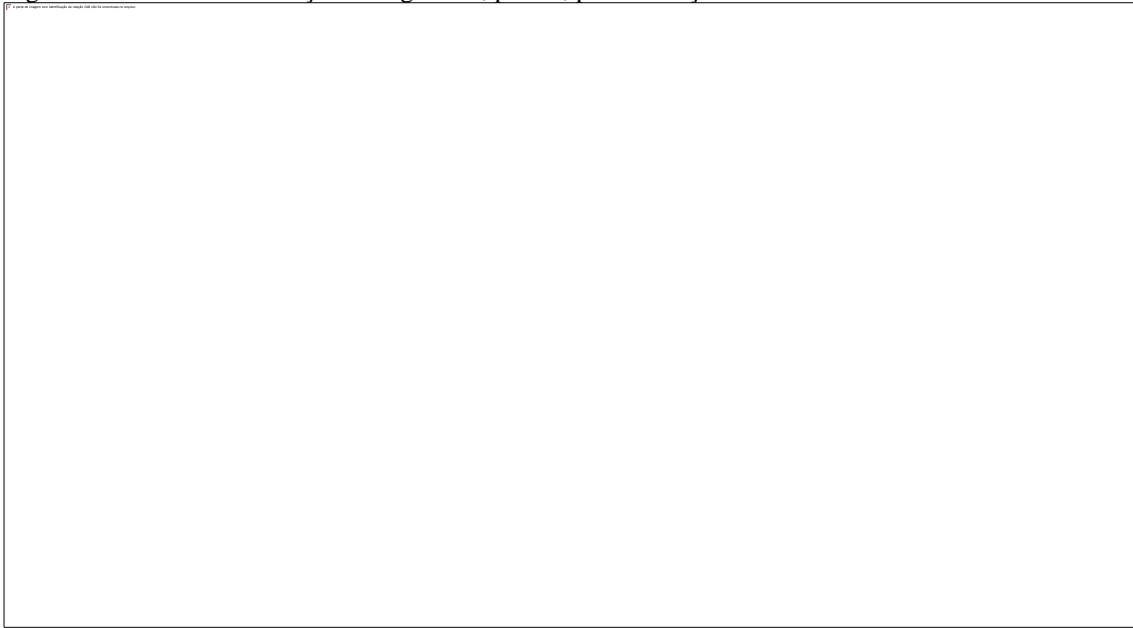
A metodologia aplicada para calcular os valores médios e realizar comparações entre os períodos perturbado segue as mesmas aplicadas no estudo do VTEC. Os dias durante o evento de SSW2 utilizados foram 5 dias antes e 5 dias após o valor máximo da temperatura estratosférica (DOY 362). Portanto, o objetivo da investigação da variação dia-a-dia e diária dos parâmetros mencionado anteriormente e dos espalhamentos durante o evento de SSW2 é verificar a influência e comparar a variabilidade entre as estações durante o evento.

Figura 73. (A) Mostra a variação dia-a-dia do foF2 em função da DOY (335-31) e LT (12:00 – 10:00) para a estação ARA, durante o SSW2. A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW2 e a curva preta indica a temperatura média histórica. As linhas verticais tracejadas indicam o início e fim do SSW2 e a linha vertical contínua vermelha indica o dia em que ocorreu o máximo da temperatura estratosférica do SSW. (B) O mesmo que (A) mas para o parâmetro ionosférico h'F. (C) O mesmo que (A) mas para o parâmetro Spread-F, onde as linhas verticais pretas indicam (RSF) e as linhas vermelhas e o (FSF). A curva azul indica a temperatura estratosférica (90° N em 10 hPa) durante SSW2.



Fonte: Autor

Figura 74. O mesmo da estação da Figura 73, porém, para a estação de JAT.



Fonte: Autor

A Figura 73A, 73B, 73C, 74A, 75B e 75C mostra a variação dia-a-dia de foF2, h'F e as ocorrências dos espalhamentos (RSF e FSF) da região F nas estações de ARG e JAT durante o SSW2 em função de LT e dos DOY (335 a 31). Nota-se que os valores de foF2 nas estações de ionossondas variam de ~9,0 a 10 MHz (padrão vermelho), ~8,0 MHz (padrão amarelo), ~5,0 a 7,0 MHz (padrão verde) e ~2,0 a 4,0 (padrão azul) entre as 12:00 LT e 10:00 LT. A intensificação de foF2 é evidente para o período entre os DOY (335 a 355) que antecede o valor máximo da temperatura estratosférica do SSW2 entre as 12:00 LT e 20:00 LT.

Durante a ocorrência do vento de SSW2 entre os círculos sólido 1 e 2, os valores de foF2 mostram menor intensidade ao se comparar os dias antecedentes. Onde, os valores nesse período variam de ~4,0 a 9,0 MHz em ARG e na estação JAT os valores de foF2 variam de ~5,0 a 10 MHz entre as 12:00 LT e 20:00 LT. Portanto, é evidente que foF2 nas estações ARG e JAT foi significativamente diminuída a densidade eletrônica durante a ocorrência do SSW2. Portanto, durante a investigação do período sazonal dos parâmetros ionosféricos, este evento ocorre exatamente durante a fase do solstício (período de menor densidade eletrônica), no entanto, pode ser notado que ocorre uma diminuição de foF2 ao comparar os períodos de 2018-2019 e 2017-2018.

A variação dia-a-dia dos valores do parâmetro ionosférico h'F nas Figura 73B e 74B são apresentados em função dos DOY (335 a 31) e LT. Nota-se que os valores representativos de 320 km (cor vermelha) indicam ser mais frequente em ARG ao comparar com os valores em

JAT entre 18:00 LT e 00:00 LT no período durante o SSW2 (entre os círculos sólidos 1 e 2) e depois deste período. A frequência do valor (320 km) é mais comprometida sua visualização em JAT do que em ARG entre as 00:00 LT e 06:00, isso é pelo fato da ocorrência dos espalhamentos nas duas estações, no entanto, em JAT ocorre maior falta de dados. Portanto, os valores do parâmetro  $h'F$  nas duas estações indica claramente altitude menores (entre os círculos sólidos 1 e 2) ao comparar com os períodos antes e após a ocorrência do SSW2. Outra comparação importante é referente ao período de transição do solstício para o equinócio, onde pode ser notado que o valor de  $h'F$  é significativamente diminuída exatamente durante o SSW2 na comparação entre os períodos de 2018-2019 e 2017-2018.

As Figuras 73C e 73F mostram a ocorrência dia-a-dia dos spread-F tipo altura (RSF-linhas verticais vermelhas) e tipo frequência (FSF-linhas verticais pretas) entre 18:00 - 08:00 LT durante os DOY (335 a 31) associado ao SSW2. Pode-se perceber que o período (DOY 335 a 355) que antecede o evento do SSW2, os Spread-F (RSF e FSF) indicam maior ocorrência tanto em ARG como em JAT. No entanto, considerando a ocorrência dos Spread-F em ARG, é verificado que o RSF mostra maior ocorrência comparado ao FSF durante o período dos DOY (335 a 31). Outra característica importante do RSF em ARG é referente seu tempo de duração entre 18:00 LT e 00:00 LT, o qual mostra ser maior ao comparar com o FSF.

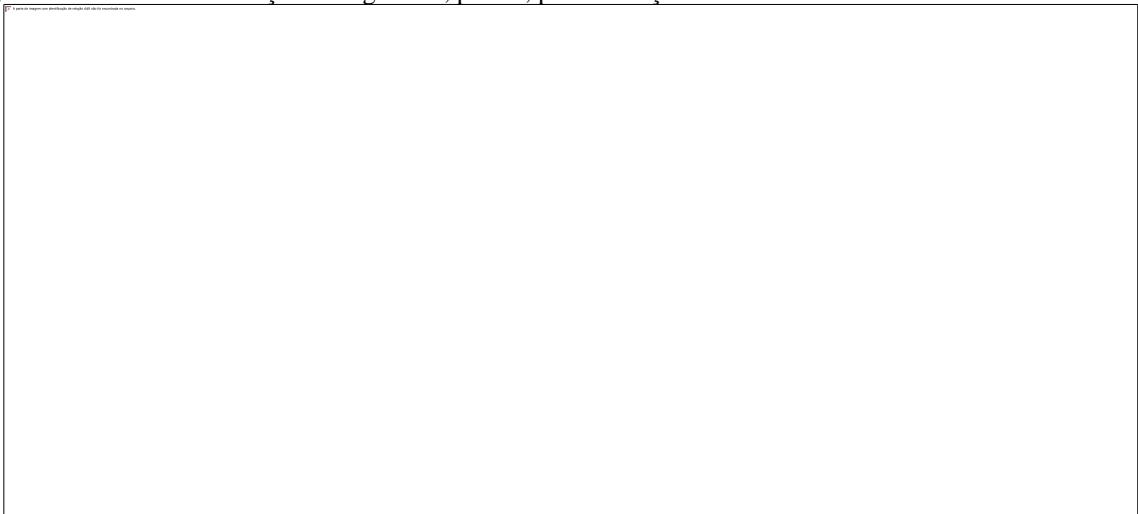
Assim, mesmo com maior ocorrência dos ESF em ARG, nota-se que há uma diminuição durante o SSW2, logo, quando se refere a ocorrência do ESF em JAT, é evidente a diminuição na ocorrência dos ESF durante o SSW2. Além disso, em JAT a diminuição da ocorrência dos ESF permanece muito baixa após o evento de SSW2 correspondendo ao período dos DOY (20 a 30). Assim, como feitos para os parâmetros anteriores a comparação referente ao período de transição do solstício para o equinócio, onde pode ser notado que os Spread-F é significativamente diminuída na comparação entre os períodos de 2018-2019 e 2017-2018.

Figura 75. Mostram as variações diárias de foF2 e h'F durante o período do DOY 357 ao DOY 02 em Araguatins (ARG) e Jataí (JAT). Os valores médios de foF2 e h'F dos dias perturbado (linhas coloridas) e dias calmos são mostrados pela média (linha preta e faixa cinza escura desvio padrão). O parâmetro foF2 e h'F são mostrados nos painéis (A e C) e (B e D), respectivamente.



Fonte: Autor

Figura 76. O mesmo da estação da Figura 75, porém, para a estação de JAT.



Fonte: Autor

As Figuras 75A, 75B, 76A e 76B mostram as variações diárias de foF2 e h'F durante o período perturbado e calmo em função do tempo UT, respectivamente. Os valores de foF2 na Figura 75A referente ao período perturbado DOY (357 a 02) mostra para grande maioria dos dias fases negativas ao comparar com as variações do período calmo indicado pela média (linha preta) e faixa cinza (desvio padrão). Nota que os valores com fase positivas de foF2 indicada pelos DOY (358 e 362) ocorre em curto intervalo de tempos após as 09:00 UT, além disso, após o DOY 362 é menor esses picos com fase positiva. Os valores de foF2 mostrado na Figura 76A

(JAT) indicam grande variação entre 00:00 UT e 24:00 UT, ocorrendo fase positiva e negativa comparado a média dos dias calmos. Nota-se que os valores de foF2 referente aos DOY (363, 364, 365, 01 e 02) indicam fase negativa maior ao comparar com os DOY (357, 358, 359, 360 e 361) entre as 12:00 UT e 22:00 UT.

Os valores de h'F (período perturbado) apresentado nas Figuras 75B e 76B indicam fortes variações entre 00:00 UT e 08:00 UT, apesar da dificuldade em ser observado pelas ocorrências dos Spread-F. Portanto, neste horário os valores de h'F referente ao período perturbado variam de ~150 km a ~350 km Figura 75B (ARG) e de ~175 km a ~325 km na Figura 76B (JAT). O valor de h'F apresentado pelo DOY 362 (linha vermelha) indica fase positiva e negativa entre 00:00 e 08:00 UT, porém, na estação de JAT indica maior tempo com fase negativa comparado com ARG. Por outro lado, é observado que no período diurno após as 08:00 UT o comportamento da variação de h'F em ambas as estações demonstram uma diminuição, a qual apresenta uma tendência em acompanhar a média dos dias calmos. Além disso, os valores de h'F a partir de 08:00 UT até as 21:00 UT comparado a média (linha preta) mostram fases positivas e negativas variando de ~180 a ~225 km (JAT) e ~175 a ~240 km (ARG). As perturbações dinâmicas associadas ao SSW são muito grandes, seria de esperar um efeito sobre a altura da base da região F ionosférica (SUMOD *et al.*, 2012).

#### **4.5. ESTUDO DO VTEC ASSOCIADO AO SSW2 (2018-2019) DE BAIXA LATITUDE DO HN ATÉ BAIXA LATITUDE DO HS NO SETOR AFRICANO**

O estudo do Conteúdo Eletrônico Total (TEC) utilizando estações de GPS-TEC para investigar o comportamento espaço-temporal da camada-F ionosférica durante os períodos calmos e perturbados do SSW2 no setor africano segue a metodologia da investigação no setor americano. O objetivo desta investigação, é proporcionar uma comparação entre a variação do VTEC no setor americano e africano referente ao evento mencionado. Nesta investigação são utilizadas 15 estações de GPS-TEC que se distribuem desde baixa latitudes do HN até baixa latitude do HS (ver Figura 77 e Tabela 26). Nas Figuras de 77 a 79 foram adicionados a variação da temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30km de altitude) e a temperatura média histórica, linhas sólidas azul e preta, respectivamente. Neste contexto, também é indicado nos gráficos de contorno da variação dia-a-dia do VTEC o início e fim do SSW<sub>2017-2018</sub> (DOY 43) e SSW<sub>2018-2019</sub> (DOY 362) por linhas pontilhadas verticais, por outro lado, a linha vertical

contínua vermelha indica o valor máximo da temperatura estratosférica referentes aos dias 18 de março (DOY-49) e 28 de dezembro (DOY-362) de 2018.

A Figura 77 mostra variação dia-a-dia do VTEC entre 00:00 e 24:00 UT em função dos DOY (335 a 30). Pode-se notar na Figura 77A (setor oeste), que durante o dia o VTEC apresenta os maiores valores do que no setor leste. Os maiores valores do VTEC são indicados pelo padrão vermelho (VTECu ~ 11-12) entre 10:00 UT e 20:00 UT nas estações de GPS-TEC MAS1 e OUCA (setor oeste), por outro lado nas estações ISBA e KUWT (setor leste) ocorre entre as 06:00 UT e 14:00 UT. No entanto, entre as linhas tracejadas (período que ocorre o evento de SSW<sub>2018-2019</sub>) nota-se que os valores do VTEC passam a ser menores quando comparado ao período que antecede o evento. Assim, pode ser notado após o DOY-20 que o VTEC indica uma maior intensificação comparado ao período perturbado do SSW2. Além disso, isso é notado com maior intensificação nas estações de GPS-TEC do setor leste.

As Figuras 77B e 77C mostram uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados e a variação da média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura) das estações (MAS1 e OUCA-setor Oeste) e (ISBA e KUWT-setor Leste). Nestas Figuras, mostram 5 dias antes e 5 dias após o máximo da temperatura estratosférica do SSW (28 de dezembro-DOY-362), respectivamente. Nota-se que a variação do VTEC dos dias perturbados (linhas coloridas) comparado com os dias calmos (faixa cinza escura) ocorre um aumento. Esse aumento é intensificado entre 06:00 UT e 18:00 UT (setor oeste) e 03:00 UT e 14:00 UT (setor leste).

Assim, a partir das variações discutidas do VTEC nas Figuras 77B e 77C uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22). Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 00:00 UT e 24:00 UT apresentado na Tabela 26. Assim, é finalmente feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (357 a 02) das 4 estações que foram tomadas como representativas da BL-HN no setor Africano. Portanto, estes resultados são apresentados na Figura 80, onde nota-se na média global durante o SSW2 causou fase negativa e positiva do VTEC.

Figura 77. A) Mostra a variação diária do VTEC em função do tempo UT e dos DOY (335 a 31) de 4 estações de GPS-TEC localizados em BL - HN no setor africano. O VTEC é mostrado para o período de 01/12/2018 a 31/01/2019, onde, as linhas azul, preta e a linha vermelha vertical indicam a temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30 km), a média histórica da temperatura estratosférica e os dias em que ocorreram a temperatura máxima em cada gráfico de contorno durante o evento de SSW2, respectivamente. B) A comparação do VTEC entre os dias calmos (linha preta com a faixa cinza escura) e durante o SSW2 (linhas coloridas) para 05 dias antes do máximo da temperatura estratosférica (DOY-362). C) O mesmo que a Figura 77B, porém durante os 05 dias posteriores da temperatura máxima do SSW2.



Fonte: Autor

Tabela 27. Mostra os detalhes das estações de GPS-TEC utilizada na Figura 77 como os nomes das cidades, países, sigla da estação e média global. É mostrado também os valores das médias e dos valores percentuais do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02). Assim, os valores do VTEC (%) são referentes ao cálculo dos dados dos DOY mencionados antes no intervalo entre 00:00 UT e 24:00 UT utilizando a equação 22.

Fonte: Autor

A Figura 78A mostra a variação diária do VTEC para quatro estações de GPS-TEC (R-EQU) em função do tempo (UT 00:00 a 24:00) durante os dias do ano (DOY 335 a 30) para o evento de SSW2. Onde, as variações diárias do VTEC são mostradas nas estações de GPS-TEC denominadas DARK, YKRO, DJIG e XTBI. Nota-se na Figura 78A que a variação dia-a-dia do VTEC mostra uma intensificação nos dias que antecede e posteriores ao evento de SSW2. Assim, essa variação dia-a-dia do VTEC são representadas pelas alterações dos padrões de cores esverdeado ao avermelhado entre as 08:00 e 22:00 UT (setor Oeste) e 04:00 UT e 17:00 UT (setor leste). Portanto, os valores do VTEC indicados pelos padrões mencionados antes variam de ~22-25 VTECu (avermelhado), ~19 VTECu (amarelo) e ~9-19 VTECu (esverdeado).

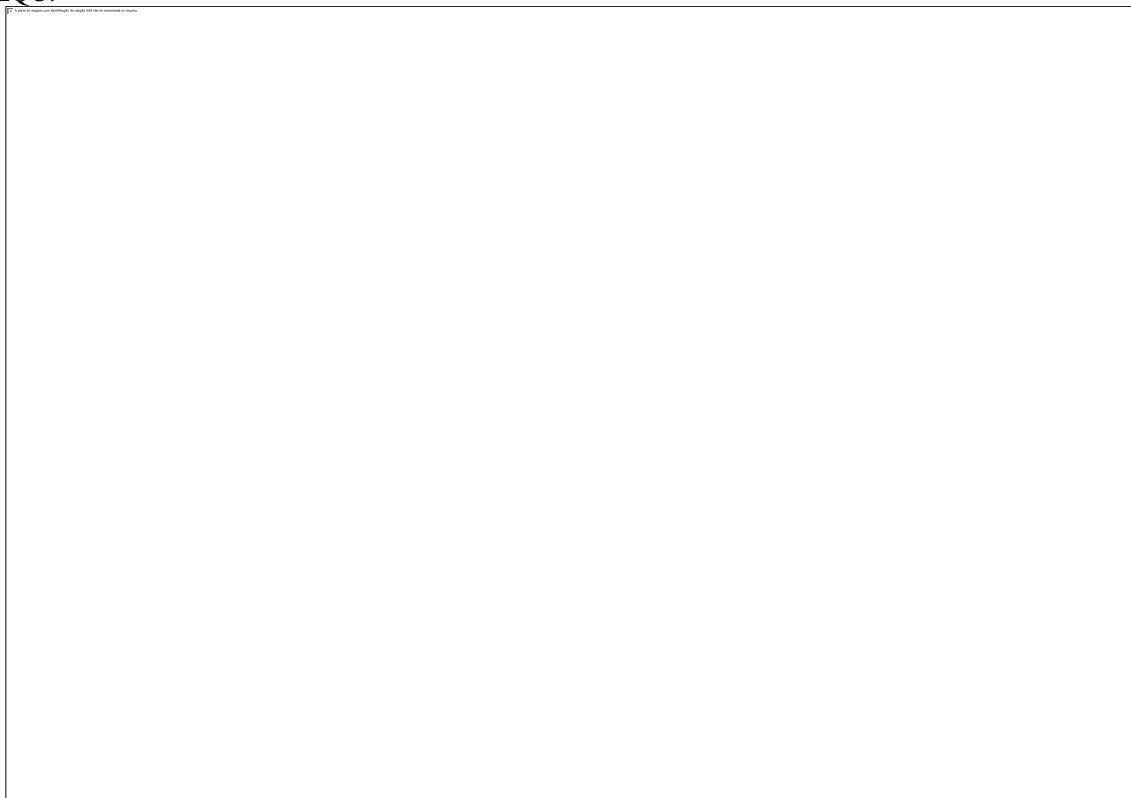
No período durante o evento, o qual é indicado pelas linhas tracejadas verticais entre os DOY (355 e 20), o VTEC mostra menor intensidade comparado ao período que antecede e posterior do evento. Onde, os valores do VTEC variam de ~9 a ~22 VTECu (padrão esverdeado ao vermelho claro). Outra característica importante da variação dia-a-dia do VTEC na R-EQU é a similaridade apresentada pelas estações no setor leste (DJIL e XTBI) comparada as do setor oeste (DARK e YKRO). Portanto, esta região como foi investigado para o evento no setor Americano, mostra com maior clareza a resposta da densidade eletrônica da região F ao SSW2 para o setor Africano.

As Figuras 78B e 78C mostram uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Pode ser notado que a variação diária do VTEC dos dias perturbados apresenta uma tendência em acompanhar a média dos dias calmos entre as 00:00 UT e 10:00 UT (DARK e YKRO) e 00:00 e 06:00 UT (DJIL e XTBI). No entanto, é observado uma diminuição do VTEC em todas as estações após as 10:00 UT (setor oeste) e 06:00 UT (setor leste). Portanto, o período perturbado é indicado pelas linhas coloridas referente a 5 dias antes e 5 após o DOY (362-linha grossa vermelha), o qual indica o dia do valor máximo da temperatura estratosférica.

Nota-se que o VTEC dos dias calmos variou de ~2 a 25 VTECu nas estações DARK e YKRO e ~2 a ~29 VTECu nas estações DJIL e XTBI. Os valores do VTEC durante o período perturbado (DOY 357 a 02) variaram de ~2 a ~23 VTECu para as estações de ambos os setores, porém, o DOY-359, o VTEC atinge valor de 28 VTECu na estação XTBI. Outra característica importante observada na variação diária do VTEC na R-EQU, é uma fase negativa indicado pelo VTEC do DOY (362) comparado a média dos dias calmos.

Assim, a partir das variações discutidas do VTEC do período perturbado comparando com período calmo, uma maneira de investigar o efeito acumulado da variabilidade é realizar o cálculo da variação percentual do VTEC (%) para cada estação e DOY (Equação 22). Onde, este cálculo foi realizado para o intervalo de tempo entre 00:00 UT e 24:00 UT apresentado na Tabela 27. Portanto, é finalmente feito a média global utilizando VTEC (%) dos DOY (357 a 02) das quatro estações de GPS-TEC tomadas como representativas da R-EQU. Assim, estes resultados são apresentados na Figura 80, onde nota-se claramente que na média global durante o SSW2 causou fase negativa do VTEC na R-EQU.

Figura 78. O mesmo da Figura 77, mas para estações de GPS-TEC de DAKR, YKRO, DJIG e XTBI localizadas R-EQU.



Fonte: Autor

Tabela 28. O mesmo da tabela 26, mas para estações de GPS-TEC de DAKR, YKRO, DJIG e XTBI localizadas R-EQU.

Cidades (Localização)	Dakar (África)	Yamussucro (África)	Djibouti (África)	Quênia (África)	
Sigla da Estação	DAKR	YKRO	DJIL	XTBI	Média Global
Média dias Calmos	12,4	12,05	11,56	11,73	11,94
DOY357 $\mu$ (%)	11,00 (-11,3)	10,04 (-16,7)	10,66 (-7,8)	10,99 (-6,3)	10,67 (-10,5)
DOY358 $\mu$ (%)	9,91 (-20,1)	9,00 (-25,3)	10,27 (-11,2)	10,78 (-8,1)	9,99 (-16,2)
DOY359 $\mu$ (%)	10,28 (-17,1)	10,80 (-10,4)	10,44 (-9,7)	13,07 (11,4)	11,15 (-6,4)
DOY 360 $\mu$ (%)	10,93 (-11,9)	11,15 (-7,5)	10,00 (-13,5)	11,13 (-5,1)	10,80 (-9,5)
DOY 361 $\mu$ (%)	9,76 (-21,3)	9,36 (-22,3)	11,71 (1,3)	11,47 (-2,2)	10,57 (-11,1)
DOY 362 $\mu$ (%)	11,73 (-5,4)	11,95 (-0,8)	9,31 (-19,5)	10,11 (-13,8)	10,78 (-9,9)
DOY 363 $\mu$ (%)	11,91 (-4,0)	11,26 (-6,6)	10,78 (-6,7)	11,16 (-4,9)	11,28 (-5,5)
DOY 364 $\mu$ (%)	10,97 (-11,5)	10,49 (-12,9)	10,74 (-7,1)	11,00 (-6,2)	10,80 (-9,4)
DOY365 $\mu$ (%)	11,01(-11,2)	10,03(-16,8)	9,55(-17,4)	10,99(-6,3)	10,40 (-12,9)
DOY01 $\mu$ (%)	10,88 (-12,3)	10,21 (-15,3)	9,88 (-14,5)	10,66 (-9,1)	10,41 (-12,8)
DOY02 $\mu$ (%)	9,80 (-21,0)	9,38 (-22,2)	9,33 (-19,3)	10,58 (-9,8)	9,77 (-18,1)

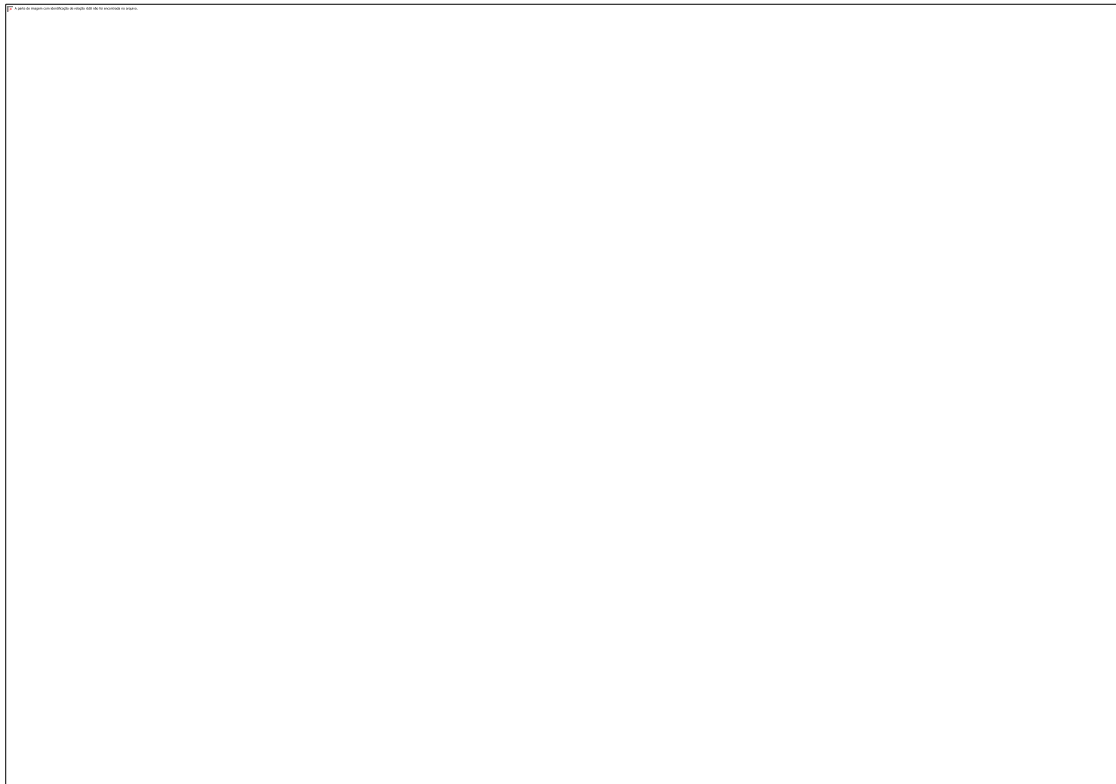
Fonte: Autor

A Figura 79A mostra a variação diária do VTEC referente as quatro estações de GPS-TEC em BL-HN em função do UT (00:00 a 24:00) e dia do ano (DOY 335 a 30) durante o evento de SSW2. A variação do VTEC entre as 00:00 UT e 24:00 UT são indicados pelos padrões de cores que variam do azul (VTEC-menor) ao avermelhado (VTEC-maior). Portanto, os valores do VTEC variam de ~25,0 a 28,0 VTECu (padrão avermelhado), ~21,0 VTECu (padrão amarelo), ~11,0 a 18,0 VTECu (padrão esverdeado) e de 0,0 a ~11,0 VTECu (padrão azul). Pode ser notado que os valores do VTEC para o período que antecede o evento indicam maior intensidade comparado com os períodos durante e após o evento, respectivamente.

As Figuras 79B e 79C mostram uma comparação da variação diária entre 11 dias perturbados pelo SSW2 e a variação diária média dos dias calmos e desvio padrão (linha preta e faixa cinza escura). Os dias perturbados são distribuídos em 5 dias (antes) e 5 dias após o (DOY 362), os quais são indicados pelas linhas coloridas. Nota-se que as variações do VTEC dos dias perturbados indicam diminuição comparado a média dos dias calmos após as 08:00 UT e 06:00 UT nas estações de GPS-TEC dos setores oeste e leste, respectivamente. Os valores médios do VTEC (dias calmos) mostram uma variação de ~2,0 a 30,0 VTECu (NKLG) e ~2,0 a 34 VTECu (ASCG) no setor oeste. Por outro lado, as variações do VTEC no período calmo no setor leste são indicadas por valores de ~2,0 a ~26,0 VTECu (KYN3) e ~2,0 a 28,0 VTECu (MBEY). A investigação do efeito acumulado da variabilidade diária do VTEC é realizada pelo cálculo da variação percentual do VTEC (%) referente aos DOY (357 a 02) utilizando a Equação 22, onde, este cálculo foi realizado entre 00:00 UT e 24:00 UT (ver tabela 28). Nota-se que há valores positivos e negativos para o VTEC, no entanto, os valores negativos são apresentados em maiores quantidades. Isso faz-se que a média global para cada DOY utilizando

as 4 estações (NKLG, ASCG, KYN3 e MBEY) que foram tomadas como representativas de BL-HS apresentados na Figura 80 no setor Africano, possa ser notado claramente que na média global (Figura 80) durante o SSW2 causou fase negativa do VTEC.

Figura 79. O mesmo da Figura 77, mas para estações de GPS-TEC de NKLG, ASCG, KYN3 e MBEY localizadas BL-HS.



Fonte: Autor

Tabela 29. O mesmo da Tabela 26, mas para estações de GPS-TEC de NKLG, ASCG, KYN3 e MBEY localizadas BL-HS.

Cidades (Localização)	Libreville (África)	Georgetown (Guiana)	Garba Tula (África)	Mbeya (África)	
Sigla da Estação	NKLG	ASCG	KYN3	MBEY	Média Global
Média dias Calmos	13,57	14,65	10,77	11,82	12,7
DOY357 $\mu$ (%)	13,10 (-3,5)	15,46 (5,5)	10,03 (-6,9)	11,80 (-0,2)	12,60 (-1,2)
DOY358 $\mu$ (%)	10,13 (-25,4)	13,96 (-4,7)	9,53 (-11,5)	11,01 (-6,9)	11,16 (-12,1)
DOY359 $\mu$ (%)	11,84 (-12,7)	12,78 (-12,8)	10,06 (-6,6)	10,83 (-8,4)	11,38 (-10,1)
DOY 360 $\mu$ (%)	11,45 (-15,6)	15,02 (2,5)	10,16 (-5,7)	9,90 (-16,2)	11,63 (-8,8)
DOY 361 $\mu$ (%)	11,65 (-14,1)	12,47 (-14,9)	11,68 (8,4)	10,91 (-7,7)	11,68 (-7,1)
DOY 362 $\mu$ (%)	13,41 (-1,2)	14,15 (-3,4)	9,07 (-15,8)	9,47 (-19,9)	11,52 (-10,1)
DOY 363 $\mu$ (%)	13,38 (-1,4)	12,83 (-12,4)	9,72 (-9,7)	9,35 (-20,9)	11,32 (-11,1)
DOY 364 $\mu$ (%)	11,37 (-16,2)	12,86 (-12,2)	9,74 (-9,7)	9,12 (-22,8)	10,78 (-15,2)
DOY365 $\mu$ (%)	11,06(-18,5)	11,86(-22,5)	9,53(-11,5)	9,33(-21,1)	10,32 (-18,4)
DOY01 $\mu$ (%)	11,88 (-12,5)	12,73 (-13,1)	9,75 (-9,5)	9,37 (-20,7)	10,93 (-13,9)
DOY02 $\mu$ (%)	9,86 (-27,3)	12,84 (-12,4)	8,56 (-20,5)	7,56 (-36,0)	9,71 (-24,1)

Fonte: Autor

Figura 80. Variação percentual da média global do VTEC em função do DOY 357 ao DOY 02, utilizados nas estações de GPS-TEC dos setores BL-HN, R-EQU e BL-HS. Utilizando a Equação 22 e apresentadas nas Tabelas 27 a 29. A faixa branca indica o dia do máximo da temperatura do evento SSW2.



Fonte: Autor

#### **4.5.1 ESTUDOS DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL (EIA) DURANTE O SSW2 NO SETOR AFRICANO**

A metodologia aplicada para investigar a dinâmica da EIA durante o evento de SSW2 é a mesma utilizada para estudar a EIA durante o evento SSW1, além disso, é similar à utilizada por (FAGUNDES et al., 2016 e RIBEIRO et al., 2019). As estações de GPS-TEC são as mesmas utilizadas para investigar a evolução da EIA referente ao primeiro evento de SSW. Portanto, sendo 14 estações representativas do setor leste e 08 do setor oeste Africano (ver Tabela 18).

As Figuras 81B e 81C mostram as variações do VTEC em função do tempo UT e dip latitude indicando a evolução da EIA para o período de 01 a 06 de dezembro (DOY 335-340) como representativo dos dias calmo nos setores leste e oeste africano, respectivamente. Nas Figuras 81B e 81C pode se notar que a crista da EIA do HS no setor oeste são mais intensas que as do setor leste entre ~08:00 UT e 20:00 UT. Nota que a evolução da EIA nestes dois setores indicada pela variação dos padrões de cores, o qual apresenta a intensidade do VTEC variam do azul ao vermelho. Assim, os valores indicados pelos padrões azul (~3,0-8,0 VTECu),

verde (~10-18 VTECu), amarelo (~20 VTECu) e vermelho (~23-25 VTECu). Portanto, as fortes estruturas vermelhas vistas durante o período calmo com VTEC em torno de ~23-25 desaparecem após 16:00 UT no setor leste e as 20:00 UT no setor oeste, sendo substituídas por padrões verde e azul.

Figura 81. Os gráficos de contorno da variação do VTEC em função do tempo UT e dip latitude evidenciando a evolução espaço-temporal da EIA. Período anterior ao SSW2, considerado como calmo de 01/12/2018 a 06/12/2018 (DOY 335 a 340), onde o VTEC varia de 0 a 25 VTECu. (A) Painéis referente ao setor leste. (B) Painéis referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

Figura 82. Gráficos de contorno da variação diária do VTEC em função de UT e dip latitude para meses de dezembro e janeiro 21 a 04 (DOY 355-04) entre os anos 2018-2019, o pico da temperatura estratosférica atinge seu máximo em 28 de dezembro de 2018 (DOY- 362). (A) Painel referente ao setor leste. (B) Painel referente ao setor oeste.



Fonte: Autor

As Figuras 82A e 82B mostram os gráficos de contorno do VTEC, onde pode ser notado a evolução da EIA de ~08:00 às 16:00 UT e ~10:00 às 20:00 UT para os setores leste e oeste do período perturbado pelo SSW2 no setor africano. No setor leste, a maioria dos dias perturbados pelo SSW2 indica que, a crista do HS é mais intensa do que a crista do HN. No

entanto, durante o valor máximo da temperatura estratosférica do SSW2 e após, ambas as cristas diminuí sua intensificação (DOY 362 a 04) e passam a ter praticamente a mesma intensidade.

A depleção da EIA equatorial é bem nítida na maioria dos dias durante o SSW2. No setor oeste durante o SSW2 as cristas dos HN e HS (DOY 355 a 361) não são bem definidos (supressão total ou parcial da EIA). Isso é devido à falta de estações GPS-TEC próximo a linha branca traçada perpendicular ao equador magnético no setor oeste (ver Figura 73). No entanto, na grande maioria dos dias a crista da EIA do HS indica claramente tornar-se mais intensas. Por outro lado, no DOY 362 a EIA é intensificada, o que pode ser notado as cristas em ambos os hemisférios. A diminuição da variação dia-a-dia do VTEC entorno do DOY (362-pico do SSW2) mostrado nos resultados desde baixa latitude do HN a baixa latitude do HS nas Figuras 77A a 79A é visto nas cristas da EIA no HN e HS setor leste (Figura 82A). Assim, caracterizando a diminuição do VTEC durante a ocorrência do evento de SSW2 discutida na variação diária do VTEC.

As cristas da EIA durante o SSW2 nos setores americano e africano, nota-se que foram localizadas com dip latitude mais baixo no período perturbado do que o período calmo. Além disso, nos dois setores, muda sua forma, intensidade e simetria em relação ao período calmo. Portanto, ambos os setores mostram as cristas sul mais fortes que a crista norte.

#### **4.5.2 FLUTUAÇÃO DE FASE DO ROT DURANTE O SSW2**

Nesta seção, será discutida a variabilidade da flutuação de fase do ROT utilizando 12 estações de GPS-TEC nas regiões BL-HN, R-EQU e BL-HS durante o evento de SSW2 no setor Africano. Como já discutido para o evento de SSW1 e mostrado na Figura 20, as curvas horizontais coloridas (ROT) e seus comprimentos indicam o número do satélite (PRN) e o tempo que um determinado satélite ficou no campo de visão do receptor GPS-TEC. Portanto, a metodologia utilizada na construção da Figura 83 (A, B e C), é a mesma utilizada para o estudo da ocorrência das irregularidades durante o SSW1.

As Figuras 83A, 83B e 83C mostram as ocorrências de flutuação de fase do ROT obtida por diferentes satélites em 12 estações receptoras de GPS-TEC sobre os setores leste e oeste da África nas regiões de BL-HN, R-QUE e BL-HS, respectivamente. A flutuação de fase do ROT é apresentada nestas figuras durante o período calmo (DOY 335 a 345) e perturbado (DOY 355 a 25) referente ao SSW2 das regiões mencionadas anteriormente. Nas Figuras 83A, 83B e 83C

é adicionado a variação da temperatura estratosférica a 90°N em 10 hPa (~30km de altitude) linha sólida azul. Além disso, nos gráficos as linhas verticais pontilhadas e os círculos indicam o dia em que ocorreu o valor máximo da temperatura estratosférica (DOY-362) e tempo de duração do evento SSW<sub>2018-2019</sub>, respectivamente. Portanto, o objetivo principal investigar a variação dia-a-dia da flutuação de fase (taxa de variação do TEC- ROT) durante os DOY 335 até DOY 31 nas regiões de BL-HN, R-EQU e BL-HS no setor africano.

Figura 83. Ocorrências de flutuação de fase do ROT obtida por diferentes satélites em 12 estações receptoras durante o período de 01 dezembro de 2018 a 31 de janeiro de 2019 no setor africano. (A) mostra flutuação de fase do ROT em 04 estações GPS-TEC para BL-HN no setor leste e oeste africano. (B) o mesmo de (A) sobre R-EQU. (C) o mesmo de (A) sobre BL-HS.



Fonte: Autor

As figuras 83A, 83B e 83C apresentam as ocorrências dia-a-dia e o tempo de duração da flutuação de fase do ROT durante os meses de dezembro de 2018 e janeiro de 2019 no setor Africano referente ao SSW2. Nota-se na Figura 83A baixa ocorrência da flutuação de fase durante os meses mencionados anteriormente associado ao período calmo e perturbado do evento de SSW2, além disso, a ocorrência do ROT fica ainda menor durante o evento indicado entre os DOY (355 e 25). No entanto, nas Figuras 83B e 83C apresenta uma forte ocorrência da flutuação de fase do ROT e o tempo médio de duração são maiores no setor oeste quando comparado com o setor leste no painel B. Além disso, a forte ocorrência do ROT é intensificada no período calmo (DOY 335-345) nas regiões de R-EQU e BL-HS mostrando uma clara diferença na frequência de ocorrência e tempo de duração dessas irregularidades ionosféricas nos setores leste e oeste.

Pode ser notado, que durante o período perturbado do evento (DOY 355 a 25), as ocorrências das flutuações de fase do ROT foram suprimidas nas três latitudes consideradas. Isso é também observado na investigação feita com a utilização de dados das ionossondas (ARG e JAT) no setor americano. Portanto, o evento de SSW2 indica claramente efeitos na flutuação de fase do ROT, assim como observado nos gráficos referentes aos dados das ionossondas. Uma explicação para as diminuições das irregularidades ionosféricas durante o SSW2, podem ser os ventos meridional/transequatorial termosféricos que podem aumentar a condutividade integrada da linha de campo do tubo de fluxo instável, resultando na redução do crescimento da instabilidade do plasma (DE PAULA *et al.*, 2015). Além disso, foi registrado que durante o período dos eventos de SSW as ondas planetárias quase estacionárias desempenharam papel crucial nas pré-condições essenciais de formação de irregularidades ionosféricas (GONCHARENKO *et al.*, 2010).

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente trabalho foi investigar a variação dia-a-dia e diária do VTEC e das irregularidades ionosféricas de grande e média escala durante períodos perturbados e calmos dos eventos de SSW1 e SSW2 no setor americano e africano, onde estes dois eventos ocorreram no período de inverno do HN em condições geomagneticamente calmo.

Assim, para variação dia-a-dia do VTEC no setor americano foi investigado a variação sazonal. Sendo que, nos equinócios o VTEC tem valores maiores que os de solstícios, este fenômeno é chamado de anomalia de equinócio (ROMERO-HERNANDEZ *et al.*, 2018). Portanto, este fenômeno foi importante no contexto deste estudo, porque o SSW1 ocorre exatamente no período da fase de transição da anomalia (solstício para o equinócio). No entanto, o SSW2 ocorre durante o solstício e, portanto, não é afetado pela anomalia de equinócio. De forma análoga ao realizado para o VTEC, faz-se uma comparação da variação dia-a-dia dos parâmetros ionosféricos  $h'F$ , foF2 e os Spread-F tipo altura (RSF linha vermelha) e tipo frequência (FSF linha preta) nos períodos de 2017-2018 (SSW1) e 2018-2019 (SSW2).

Portanto, foram feitas comparações entre os períodos perturbados e calmos utilizando os dados de GPS-TEC e dos ionogramas nos períodos de: 13 a 23 de fevereiro de 2018, 26 de dezembro de 2018 a 04 de janeiro de 2019 (período perturbado), 27 de janeiro a 05 de fevereiro de 2018, e 01 de dezembro a 10 de dezembro de 2018 (período calmo). Desde a região de média latitude e além da crista da EIA do HN até média latitude e além da crista da EIA do HS setor americano. Para o setor africano é feito um estudo do VTEC análogo ao setor americano, no entanto, o estudo das irregularidades ionosféricas foi utilizado dados de GPS-TEC para a investigação da flutuação de fase do ROT em baixa latitude do HN até baixa latitude do HS. Portanto, utilizando as investigações mencionadas é possível apresentar as principais conclusões deste trabalho:

1. Os eventos de SSW1 e SSW2 perturba significativamente a variação dia-a-dia e diária do VTEC nas regiões latitudinais ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS setor americano e BL-HN, R-EQU e BL-HS setor africano. Assim o aumento do  $\overline{VTEC}\%$  representativos dos dias perturbados comparado aos dias calmos durante o SSW1 correspondendo aos valores, 11,54% (ML-HN), 35,41% (BL-HN), 14,53% (R-EQU), 10,37% (BL-HS) e 18,75% (ML-HS) setor americano e 11,85% (BL-HN), 9,40% (R-EQU) e 3,76% (BL-HS) no setor africano. Por outro lado, a diminuição do  $\overline{VTEC}\%$

referente aos dias perturbados comparado aos dias calmos durante o SSW2 nas mesmas regiões latitudinais mencionadas anteriormente correspondem a -9,67%, -16,87%, -15,00%, -10,30% e 16,84% setor americano e 6,05%, -11,12% e -12,00% setor africano.

2. Durante o primeiro evento (SSW1), a variação dia-a-dia do VTEC da fase de transição dos solstícios para o equinócio no setor americano sugere fortemente que o VTEC se intensifica durante e após o evento SSW1. Assim, foi possível observar que este evento causa um aumento do VTEC durante sua ocorrência gerando uma fase positiva desde ML-HN até ML-HS. Isso fica claro quando comparamos a variação dia-a-dia do VTEC entre os períodos 2017-2018 e 2018-2019. A investigação referente ao SSW2 mostra que há uma diminuição do VTEC para as mesmas regiões latitudinais investigadas do primeiro evento, assim gerando uma fase negativa no setor americano e africano.
3. A evolução no espaço e tempo da EIA apresenta uma grande variabilidade dia-a-dia com diferença entre os setores leste e oeste brasileiro, no entanto, ao passo que se aproxima do máximo da temperatura do SSW1 ambos as cristas HN e HS se intensificam e passam a ter praticamente a mesma intensidade. No setor africano os valores da EIA no período perturbado (entre os dias 11 e 25 de fevereiro de 2018) indica um resultado similar aos resultados no setor americano.
4. As regiões de investigação da variação dia-a-dia e diária do VTEC tanto no setor americano como no africano, as quais são indicadas por ML-HN, BL-HN, R-EQU, BL-HS e ML-HS, a que caracteriza com maior clareza a resposta ionosférica da região F com os eventos de SSWs é R-EQU.
5. A variação diária do parâmetro ionosférico foF2 em ARG observou-se que durante o período perturbado pelo SSW1 e SSW2 apresentam uma boa correlação entre o aumento e diminuição do VTEC ao comparar com os dias calmos. No entanto, nas estações de JAT e SJC os valores de foF2 apresentam uma variabilidade maior com fase positiva e negativa para os dias perturbados comparados com os dias calmos em ambos os eventos. Os valores do parâmetro ionosférico do h'F em cada estação de ionossondas indicam maiores varrições no período noturno ao comparar com os dias calmos durante os ventos. É importante mencionar que o estudo dos parâmetros ionosféricos em SJC associado ao período perturbado por SSW2 não foi possível pela falta de dados.

6. Neste trabalho, também foi investigado as irregularidades ionosféricas de múltiplas escalas como resposta ionosférica a perturbação associada aos fenômenos do SSW1 e SSW2 no setor americano e africano. Para tanto, foram utilizados neste estudo dados de 15 receptores GPS e 3 ionossondas. As ocorrências das irregularidades ionosféricas investigados no setor americano (Spread-F) e africano (ROT) indicaram uma significativa perturbação durante o período dos eventos SSWs. Portanto, os eventos SSWs causaram uma diminuição das ocorrências das irregularidades ionosféricas nos setores brasileiro e africano, respectivamente, em relação aos períodos anterior e posterior de cada SSW. Além disso, as irregularidades ionosféricas referentes aos dados das ionossondas durante os dias perturbados pelos eventos apresentaram uma mudança, ou seja, os espalhamentos (RSF e FSF) ante e após os dias perturbados dos eventos tem como ocorrência maior os RSF, no entanto, para os dias perturbados há uma maior intensificação nas ocorrências dos SFS.

## 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

As respostas ionosféricas dos resultados apresentado neste trabalho nos setores Latino-Americano e Africano permitiram um avanço para compreensão das interações da região F ionosférica com dois fortes eventos de SSWs ocorridos no Hemisfério Norte (HN) durante período geomagneticamente calmo.

No entanto, a investigação do VTEC referente aos dois fortes eventos de SSWs ocorrido no (HN) no período de inverno dos anos 2017-2018 e 2018-2019 foi bastante detalhado as suas características, entretanto, algo precisam ser compreendidas na ocorrência destes eventos, o que poderia ser a causa do SSW<sub>2017-2018</sub> gerar um acréscimo no valor do VTEC e SSW<sub>2018-2019</sub> desenvolver uma depleção nesse parâmetro ionosférico. No entanto, consideramos que o aumento e diminuição do VTEC para os SSW1 e SSW2, possivelmente seja devido um ocorrer no período de solstício e outro no período de transição da anomalia de equinócio. Portanto, maiores esforços serão feitos para a melhor compreensão da influência dos eventos de SSWs associado com ondas planetárias e marés na variação dia-a-dia do VTEC desde média latitude do HN até média latitude do HS nos setores latino-americano e africano. Além disso, investigar as estruturas e dinâmicas das bolhas de plasmas durante os eventos de SSWs com os

imageadores All-Sky em mais setores da região global com a finalidade de explorar outros detalhes que não foram investigados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARONS, J. *et al.* GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26851-26862, 1996.

AARONS, J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A8, p. 17219-17231, 1997.

ABALDE, J. R. *et al.* Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging: New results. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 106, n. A12, p. 30331-30336, 2001.

ABREU A. J. **Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais**. 193f. Tese (Doutorado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012.

DE ABREU, A. J. *et al.* Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS–TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 9, p. 1313-1328, 2014.

DE ABREU, A. J. *et al.* The role of the traveling planetary wave ionospheric disturbances on the equatorial F region post-sunset height rise during the last extreme low solar activity and comparison with high solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 113, p. 47-57, 2014.

AIR FORCE SPACE COMMAND (ARCHIVED), Disponível em : <https://www.afspc.af.mil/News/Article-Display/Article/249755/50-sw-completes-gps-constellation-expansion/>, Acesso em: 30 Jul. 2020.

ALEXANDER, S. P.; SHEPHERD, M. G. Planetary wave activity in the polar lower stratosphere. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 2, p. 707-718, 2010.

ALFONSI, Lu *et al.* Comparative analysis of spread-F signature and GPS scintillation occurrences at Tucumán, Argentina. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 7, p. 4483-4502, 2013.

ANDREI, M. D.; PIETRISI, M.; STEFAN, S. Potential vorticity dynamics and tropopause fold. **Romanian Journal of Physics**, v. 64, p. 807, 2019.

ANDREWS, David G.; HOLTON, James R.; LEOVY, Conway B. **Middle atmosphere dynamics**. New York: Academic press, 1987.

APPLETON, Edward V. Two anomalies in the ionosphere. **Nature**, v. 157, n. 3995, p. 691-691, 1946.

BALDWIN, Mark P.; DUNKERTON, Timothy J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. **Science**, v. 294, n. 5542, p. 581-584, 2001.

BALAN, N. *et al.* Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F 3 layer. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A2, p. 2047-2056, 1997.

BALAN, N.; BAILEY, G. J. Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 100, n. A11, p. 21421-21432, 1995.

BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy: Part A**. New York: Academic Press, 1973.

BANOLA, S. *et al.* Spectral characteristics of scintillations producing ionospheric irregularities in the Indian region. **Earth, planets and space**, v. 57, n. 1, p. 47-59, 2005.

BARBOSA, F. R. E. *et al.* Multi-scale ionospheric irregularities occurrence over South America during the St. Patrick's day storm on March 17, 2015. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 174, p. 32-45, 2018.

BATISTA, I. S. *et al.* F 3 layer observations at low and equatorial latitudes in Brazil. **Geofísica Internacional**, v. 39, n. 1, 2000.

BAYRU, Kibrom. **Numerical Investigation of Sporadic-E Layer Formation in Midlatitude**. 2007. Tese (Doutorado). Department of Physics, Addis Ababa University, Ethiopia, 2007.

BESSARAB, F. S. *et al.* Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere–ionosphere system. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, v. 90, p. 77-85, 2012.

BLACK, Robert X.; MCDANIEL, Brent A. The Polar Annular Mode: Submonthly Stratosphere-Troposphere coupling in the Arctic. **Geophys. Res. Lett.** (submitted), 2006.

BUDDEN, Kenneth George. **The propagation of radio waves: the theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere**. Cambridge : Cambridge University Press, 1988.

BUTLER, Amy H. *et al.* Defining sudden stratospheric warmings. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 11, p. 1913-1928, 2015.

CÂNDIDO, C. M. N. **Estudos de irregularidades no plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor longitudinal brasileiro**. Tese (Doutorado em Física e Astronomia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008.

CAROZZI, Tobia. **Radio waves in the ionosphere: Propagation, generation and detection**. 2000. Tese (Doutorado) Uppsala University, Department of Astronomy and Space Physics, Uppsala, 2000.

CHAO, Winston C. Sudden stratospheric warmings as catastrophes. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 15, p. 1631-1646, 1985.

CHAPMAN, Sydney. Upper atmospheric nomenclature. **Journal of Geophysical Research**, v. 55, n. 4, p. 395-399, 1950.

CHARLTON, Andrew J.; POLVANI, Lorenzo M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. **Journal of climate**, v. 20, n. 3, p. 449-469, 2007.

CHARNEY, J. G.; DRAZIN, P. G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere, **J. Geophys. Res.**, 66, 83–109, 1961.

CHAU, Jorge L. *et al.* Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A9, 2010.

CHAU, Jorge L. *et al.* Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events. **Space Science Reviews**, v. 168, n. 1, p. 385-417, 2012.

CHEN, Yiding *et al.* Solar activity dependence of the topside ionosphere at low latitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A8, 2009.

CHERNIGOVSAYA, M. A. *et al.* Ionospheric response to winter stratosphere/lower mesosphere jet stream in the Northern Hemisphere as derived from vertical radio sounding data. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 180, p. 126-136, 2018.

DAVIES, Kenneth. **Ionospheric radio propagation**. Washington: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1965.

DAVIES, Kenneth. **Ionospheric radio**. London: IET, 1990.

DE JESUS, R. *et al.* An investigation of the ionospheric disturbances due to the 2014 sudden stratospheric warming events over Brazilian sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 11, p. 11,698-11,715, 2017.

DE JESUS, R. *et al.* Morphological features of ionospheric scintillations during high solar activity using GPS observations over the South American sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, n. 3, 2020.

DE PAULA, E. R. *et al.* Low-latitude scintillation weakening during sudden stratospheric warming events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 3, p. 2212-2221,

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, n. 9, p. e2020JA027906, 2020.

DOMEISEN, Daniela IV; MARTIUS, Olivia; JIMÉNEZ-ESTEVE, Bernat. Rossby wave propagation into the Northern Hemisphere stratosphere: The role of zonal phase speed. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 4, p. 2064-2071, 2018.

DOMEISEN, D.I.V. **Stratosphere- Troposphere Interaction during Stratospheric Sudden Warming**. Tese (Atmosphere and Planetary Sciences) - Massachusetts Institute of Technology, 2012.

GOMES, E. F. **Efeitos das ondas planetárias na aeroluminescência**. Tese (Doutorado Geofísica Espacial e Ciências Atmosféricas), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2013.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Observations of daytime F2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 112, n. A4, 2007.

FAGUNDES, P. R. *et al.* F layer postsunset height rise due to electric field prereversal enhancement: 2. Traveling planetary wave ionospheric disturbances and their role on the generation of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A12, 2009.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming over the equatorial, low, and middle latitudes in the South American sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 9, p. 7889-7902, 2015.

FAGUNDES, Paulo Roberto *et al.* Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 6, p. 5613-5625, 2016.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric disturbances in a large area of the terrestrial globe by two strong solar flares of September 6, 2017, the strongest space weather events in the last decade. **Advances in Space Research**, v. 66, n. 7, p. 1775-1791, 2020.

FANG, Tzu-Wei *et al.* Longitudinal variation of ionospheric vertical drifts during the 2009 sudden stratospheric warming. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. A3, 2012.

FEJER, Bela G. *et al.* Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 84, n. A10, p. 5792-5796, 1979.

FEJER, Bela G. *et al.* Enhanced lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 21, 2011.

FULLER-ROWELL, Tim *et al.* A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A10, 2010.

GAIGEROV, S. S. **Investigation of synoptic processes in the upper layers of the atmosphere**. Leningrad: Gidrometizdat, 1973.

GONCHARENKO, L. *et al.* Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 19, p. 4982-4986, 2013.

GONCHARENKO, L. P. *et al.* Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A10, 2010.

GONCHARENKO, L. P. *et al.* Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 10, 2010.

GONCHARENKO, Larisa; ZHANG, Shun-Rong. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 21, 2008.

GREWAL, Mohinder S.; ANDREWS, Angus P.; BARTONE, Chris G. **Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration**. John Wiley & Sons, 2020.

HARGREAVES, John Keith. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. Cambridge : Cambridge university press, 1992.

HAYNES, P. H. et al. On the “downward control” of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 4, p. 651-678, 1991.

HOFFMANN, P. et al. Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n. 17-18, p. 2355-2366, 2007.

HOLTON, James R.; COLTON, Donald E. A diagnostic study of the vorticity balance at 200 mb in the tropics during the northern summer. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 6, p. 1124-1128, 1972.

HUANG, Cheryl Y. et al. Broad plasma decreases in the equatorial ionosphere. **Geophysical research letters**, v. 36, n. 18, 2009.

IDOLOR, O. R.; AKALA, A. O.; BOLAJI, O. S. Responses of the African and American Equatorial Ionization Anomaly (EIA) to 2014 arctic SSW events. **Space Weather**, v. 19, n. 11, p. e2021SW002812, 2021.

JAYACHANDRAN, P. T. et al. Effect of equatorial ionization anomaly on the occurrence of spread-F. **Annales Geophysicae**, v. 15, n. 2, p. 255-262, 1997.

JENKINS, B. et al. Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil. In: **Annales Geophysicae**, v. 15, n. 6, p. 753-759, 1997.

JIN, S.; CARDELLACH, E.; XIE, F. GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications. **Remote Sensing and Digital Image Processing**, v. 19, 2013.

JIN, S.; CARDELLACH, E.; XIE, F. **GNSS remote sensing**. Dordrecht: Springer, 2014.

JIN, Yaqi; XIONG, Chao. Interhemispheric asymmetry of large-scale electron density gradients in the polar cap ionosphere: UT and seasonal variations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, n. 2, p. e2019JA027601, 2020.

KAMIDE, Yohsuke; CHIAN, Abraham (Ed.). **Handbook of the solar-terrestrial environment**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

KAWAMURA, S. et al. Annual and semiannual variations of the midlatitude ionosphere under low solar activity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 107, n. A8, p. SIA 8-1-SIA 8-10, 2002.

KELLEY, Michael C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. [S.l.]: Academic press, 2009.

KELLY, Albert Victor. **The curriculum: Theory and practice**. [S.l.]: Sage, 2009.

KHOMICH, Vladislav Yu; SEMENOV, Anatoly I.; SHEFOV, Nicolay N. **Airglow as an indicator of upper atmospheric structure and dynamics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.

KIL, Hyosub. The morphology of equatorial plasma bubbles-a review. **Journal of Astronomy and Space Sciences**, v. 32, n. 1, p. 13-19, 2015.

KIRCHHOFF, V.W.J.H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Edusp, 1991.

KLIMENKO, M. V. et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle-and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005. **Radio Science**, v. 46, n. 03, p. 1-18, 2011.

KREUTER, Axel et al. All-sky imaging: a simple, versatile system for atmospheric research. **Applied optics**, v. 48, n. 6, p. 1091-1097, 2009.

KUMAR, Sushil; KUMAR, Sarvesh. Equatorial ionospheric TEC and scintillations under the space weather events of 4–9 September 2017: M-class solar flares and a G4 geomagnetic storm. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 209, p. 105421, 2020.

KUTTIPPURATH, Jayanarayanan; NIKULIN, Grigory. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 17, p. 8115-8129, 2012.

LABITZKE, K.; VAN LOON, H. Some recent studies of probable connections between solar and atmospheric variability. *Annales Geophysicae*, v. 11, p. 1084-1094, 1993.

LABITZKE, Karin. Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 6, p. 762-770, 1977.

LABITZKE, Karin. The amplification of height wave 1 in January 1979: A characteristic precondition for the major warming in February. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 5, p. 983-989, 1981.

LABITZKE, Karin; NAUJOKAT, Barbara. Stratospheric processes and their role in climate. **Sigma**, v. 3, n. 5.6, p. 9.1, 2000.

LAŠTOVIČKA, JAN. Forcing of the ionosphere by waves from below. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 3-5, p. 479-497, 2006.

LESTER, M. Ionospheric convection and its relevance for space weather. **Advances in Space Research**, v. 31, n. 4, p. 941-950, 2003.

LIN, C. H. et al. Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 19, 2007.

LIU, Guoqi et al. Ionospheric response to the 2018 sudden stratospheric warming event at middle-and low-latitude stations over China sector. **Space Weather**, v. 17, n. 8, p. 1230-1240, 2019.

LIU, Huixin et al. Equatorial electrodynamics and neutral background in the Asian sector during the 2009 stratospheric sudden warming. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A8, 2011.

MARTINIS, C. et al. All-sky-imaging capabilities for ionospheric space weather research using geomagnetic conjugate point observing sites. **Advances in Space Research**, v. 61, n. 7, p. 1636-1651, 2018.

MARUYAMA, Takashi; MATUURA, Nobuo. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles. **Journal Of Geophysical Research: Space Physics**, v. 89, n. A12, p. 10903-10912, 1984.

MATSUNO, Taroh. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 28, n. 8, p. 1479-1494, 1971.

MATSUNO, Taroh. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 27, n. 6, p. 871-883, 1970.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 1, 2004.

MENDILLO, Michael; TYLER, Ann. Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 88, n. A7, p. 5778-5782, 1983.

MOHANAKUMAR, K. **Stratosphere troposphere interactions: an introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.

MONICO, Joao Francisco Galera. **Posicionamento pelo Navstar-GPS**. São Paulo: EdUnesp, 2000.

MRIDULA, N.; PANT, Tarun Kumar. On the possible role of zonal dynamics in the formation and evolution of F3 layers over equator. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 134, 2015.

MUELLA, M. T. A. H. **Morfologia e dinâmica das irregularidades ionosféricas de pequenas escalas e imageamento ionosférico por gps**. 2008. 215 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

NICOLET, M. Ratcliffe, JA-The Magneto-Ionic Theory and its Applications to the Ionosphere. **Ciel et Terre**, v. 75, 1959.

NISHII, Kazuaki; NAKAMURA, Hisashi. Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002. **Geophysical research letters**, v. 31, n. 16, 2004.

O'NEILL, A. Stratospheric sudden warmings. *In*: NORTH, Gerald R.; PYLE, John A.; ZHANG, Fuqing (Ed.). **Encyclopedia of atmospheric sciences**. [S.l.]: Elsevier, 2003.

OVODENKO, V. B. et al. Spatial and temporal evolution of different-scale ionospheric irregularities in Central and East Siberia during the 27–28 May 2017 geomagnetic storm. **Space Weather**, v. 18, n. 6, p. e2019SW002378, 2020.

PANCHEVA, Dora; MUKHTAROV, Plamen. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 13, p. 1697-1702, 2011.

PATRA, A. K. et al. Ionospheric variability over Indian low latitude linked with the 2009 sudden stratospheric warming. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 5, p. 4044-4061, 2014.

PAES, R.R. **Estudo da influência do aquecimento estratosférico súbito (ssw) sobre a anomalia de ionização equatorial na região brasileira**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial); Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012

PEDATELLA, N. M. et al. How Sudden stratospheric warmings affect the whole atmosphere. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 99, p. 35-38, 2018.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2018EO092441>

PEDATELLA, N. M.; FORBES, J. M. Evidence for stratosphere sudden warming-ionosphere coupling due to vertically propagating tides. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 11, 2010.

PETERS, Dieter; VARGIN, Pawel; KÖRNICH, Heiner. A study of the zonally asymmetric tropospheric forcing of the austral vortex splitting during September 2002. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 59, n. 3, p. 384-394, 2007.

PI, X. et al. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 18, p. 2283-2286, 1997.

PIGGOTT, W. R.; RAWER, K. **Revision of chapters 1–4 of the URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction**. Boulder, Colorado: NOAA, 1978 (Report UAG–23A). <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/1013>

PILLAT, Valdir Gil et al. A computational tool for ionosonde CADI's ionogram analysis. **Computers & geosciences**, v. 52, p. 372-378, 2013.

PILLAT, V. G.; GUIMARÃES, L. N. F. Identificação de traços ionosféricos em ionogramas para ionossondas localizadas em baixas latitudes e região equatorial utilizando lógica nebulosa. *In*: WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, 12. (WORCAP)., 2012, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2012. On-line. IBI: <8JMKD3MGP8W/3DBGBCE>. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP8W/3DBGBCE>>..

PILLAT, Valdir Gil; FAGUNDES, Paulo Roberto; BITTENCOURT, José Augusto. Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional LION e comparação com parâmetros ionosféricos observados. *In*: ENCONTRO LATINOAMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2006, São José dos Campos, SP. **Anais eletrônico [...]**. São

José dos Campos: Univap, 2006. Disponível em:

[https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2006/epg/04/EPG00000282\\_ok.pdf](https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2006/epg/04/EPG00000282_ok.pdf)

PIMENTA, A. A. et al. Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations. **Annales Geophysicae**, v. 21, n. 12, p. 2315-2322, 2003.

PIMENTA, A. A. et al. Ionospheric plasma bubble zonal drift: A methodology using OI 630 nm all-sky imaging systems. **Advances in Space Research**, v. 27, n. 6-7, p. 1219-1224, 2001.

POPPOFF, I. G.; WHITTEN, R. C.; EDMONDS, R. S. The role of nonflare X radiation in the D region. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 19, p. 4081-4085, 1964.

PULINETS, Sergey; BOYARCHUK, Kyrill. **Ionospheric precursors of earthquakes**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004.

RAGHAVAN, Srinu H.; SHANE, Mark; YOWELL, Robert. Spread spectrum codes for GPS L5. In: 2006 IEEE AEROSPACE CONFERENCE. **Proceeding ...** [s.l.]: IEEE, 2006.

RATCLIFFE, E. H. Thermal conductivities of fused and crystalline quartz. **British Journal of Applied Physics**, v. 10, n. 1, p. 22, 1959.

RAMA RAO, P. V. S. *et al.* Features of additional stratification in ionospheric F2 layer observed for half a solar cycle over Indian low latitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 110, n. A4, 2005.

REMONDI, Benjamin W. Global Positioning System carrier phase: description and use. **Bulletin géodésique**, v. 59, n. 4, p. 361-377, 1985.

RESENDE, Laysa CA et al. Study of sporadic E layers based on GPS radio occultation measurements and digisonde data over the Brazilian region. **Annales Geophysicae**, v. 36, n. 2, p. 587-593, 2018.

RESMI, E. A. **Sudden Stratospheric Warming and its Influence on the Tropical Atmosphere**. 2012. Tese (Doutorado) Cochin University Of Science And Technology, Kochi, Kerala, 2012.

RIBEIRO, B. A. G, **estudo do sistema ionosfera-termosfera durante eventos extremos de clima espacial (tempestades geomagnéticas), no decorrer da fase descendente do ciclo solar 24 (2013, 2015 e 2017)**. Tese (Doutorado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 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.; GARRIOT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969.

RODRÍGUEZ-BILBAO, I. et al. Precise point positioning performance in the presence of the 28 October 2003 sudden increase in total electron content. **Space Weather**, v. 13, n. 10, p. 698-708, 2015.

- ROMERO-HERNANDEZ, E. et al. Daytime ionospheric TEC weather study over Latin America. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 12, p. 10,345-10,357, 2018.
- SAHAI, Y. et al. OI 630 nm imaging observations of equatorial plasma depletions at 16 S dip latitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, n. 11, p. 1461-1475, 1994.
- SCHOEBERL, Mark R. Stratospheric warmings: Observations and theory. **Reviews of Geophysics**, v. 16, n. 4, p. 521-538, 1978.
- SCHRIJVER, Carolus J.; SISCOE, George L. (Ed.). **Heliophysics: space storms and radiation: causes and effects**. Cambridge University Press, 2010.
- SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- SCHUNK, R. W.; NAGY, A.F. **Ionospheres: physics, plasma physics and chemistry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- SEEMALA, G. K.; VALLADARES, C. E. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008. **Radio Science**, v. 46, n. 5, 2011.
- SHARMA, A. K. et al. Study of equatorial plasma bubbles using all sky imager and scintillation technique from Kolhapur station: a case study. **Astrophysics and Space Science**, v. 363, n. 4, p. 1-11, 2018.
- SHEPHERD, M. G. et al. Stratospheric warming effects on the tropical mesospheric temperature field. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n. 17-18, p. 2309-2337, 2007.
- SHERHAG, R. Die explosionsartigen Stratosphärenwärmungen des Spätwinters 1951-1952. **Ber. Deut. Wetterd.**, v. 6, p. 51-63, 1952.
- SHPYNEV, Boris G. et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming. **Earth, Planets and Space**, v. 67, n. 1, p. 1-10, 2015.
- SILVA, M. H. D. **Estudo da espesura equivalente ionosférica durante um ano de baixa atividade solar**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2013.
- SPOGLI, L. et al. Comparative analysis of spread-F signature and GPS scintillation occurrences at Tucumán, Argentina. **AGU Fall Meeting Abstracts**, v. 2013. p. SA13A-1951, 2013.
- SUGIURA, Masahisa; WILSON, Charles R. Oscillation of the geomagnetic field lines and associated magnetic perturbations at conjugate points. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 7, p. 1211-1216, 1964.
- SUMOD, S. G. et al. Signatures of sudden stratospheric warming on the equatorial ionosphere-thermosphere system. **Planetary and Space Science**, v. 63, p. 49-55, 2012.

TAO, Mengchu et al. Impact of the 2009 major sudden stratospheric warming on the composition of the stratosphere. **Atmospheric chemistry and physics**, v. 15, n. 15, p. 8695-8715, 2015.

TAPPING, K. F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). **Space Weather**, v. 11, n. 7, p. 394-406, 2013.

TARDELLI, A.; FAGUNDES, P. R. Observations of ionospheric F layer quadruple stratification near equatorial region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 1, p. 834-840, 2015.

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

TARDELLI-COELHO, F. et al. Plasma blobs associated with plasma bubbles observed in the Brazilian sector. **Advances in Space Research**, v. 60, n. 8, p. 1716-1724, 2017.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment**. Malabar, FL : Orbit, 1988

TASCIONE, T. F. **Introduction to the Space Environment**. 2. ed. Flórida: Krieger Publishing Company, 1994.

TEUNISSEN, Peter JG; MONTENBRUCK, Oliver (Ed.). **Springer handbook of global navigation satellite systems**. New York, NY: Springer International Publishing, 2017.

THOMPSON, David WJ; BALDWIN, Mark P.; WALLACE, John M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. **Journal of Climate**, v. 15, n. 12, p. 1421-1428, 2002.

THOMSEN, M. F. Why Kp is such a good measure of magnetospheric convection. **Space Weather**, v. 2, n. 11, 2004.

TINSLEY, B. A. et al. Excitation of oxygen permitted line emissions in the tropical nightglow. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 7, p. 1174-1186, 1973.

TUNA, Hakan et al. Online user-friendly slant total electron content computation from IRI-Plas: IRI-Plas-STEAC. **Space weather**, v. 12, n. 1, p. 64-75, 2014.

UEMOTO, Jyunpei et al. Observations and model calculations of the F3 layer in the Southeast Asian equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A3, 2011.

UPADHAYAYA, A. K.; MAHAJAN, K. K. Ionospheric F2 region: Variability and sudden stratospheric warmings. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 10, p. 6736-6750, 2013.

VIEIRA, F. et al. Total electron content disturbances during minor sudden stratospheric warming, over the Brazilian region: A case study during January 2012. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 2, p. 2119-2135, 2017.

VINEETH, C.; KUMAR PANT, T.; SRIDHARAN, R. Equatorial counter electrojets and polar stratospheric sudden warmings—a classical example of high latitude-low latitude coupling?. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 8, p. 3147-3153, 2009.

WANNINGER, Lambert; SEEBER, Günter; CAMPOS, Milton A. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. **Recent Geodetic and Gravimetric Research in Latin America**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993.

WANG, Ruobing et al. The global distribution and spread of the mobilized colistin resistance gene *mcr-1*. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2018.

WAUGH, D. W. et al. Martian polar vortices: Comparison of reanalyses. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 121, n. 9, p. 1770-1785, 2016.

WEBER, E. J. et al. North-south aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 83, n. A2, p. 712-716, 1978.

XIONG, Chao et al. Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity. **Annales Geophysicae**, v. 28, n. 9, p. 1647-1658, 2010.

XU, Guochang; XU, Yan. **GPS**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

Y KAMIDE; A. CHIAN, **Handbook of the Solar-Terrestrial Environment**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

YADAV, Sneha et al. Impact of sudden stratospheric warming of 2009 on the equatorial and low-latitude ionosphere of the Indian longitudes: A case study. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 10, p. 10,486-10,501, 2017.

YIĞIT, Erdal et al. A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 141, p. 1-12, 2016.

YIĞIT, Erdal. Transport processes in plasma. In: YIĞIT, Erdal **Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments**. [s.l.]: Springer, Cham, 2018. p. 41-66. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62006-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62006-0_3)

YUE, Xinan et al. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A11, 2010.