



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.03.21.04-TDI

## **ESTUDO DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS USANDO MAPAS DE ROTI SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA**

Carolina de Sousa do Carmo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo, aprovada em 24 de fevereiro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46ET2BS>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.03.21.04-TDI

## **ESTUDO DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS USANDO MAPAS DE ROTI SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA**

Carolina de Sousa do Carmo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo, aprovada em 24 de fevereiro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46ET2BS>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Carmo, Carolina de Sousa do.

C213e      Estudo de irregularidades ionosféricas usando mapas de ROTI sobre a região brasileira / Carolina de Sousa do Carmo. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxii + 114 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.03.21.04-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientadores : Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo.

1. Aeronomia equatorial. 2. Conteúdo eletrônico total. 3. Clima espacial. 4. Irregularidades de plasma. 5. Efeito da atividade solar. I.Título.

CDU 523.4-853

---



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

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



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE TESE DE CAROLINA DE SOUSA DO CARMO**  
**BANCA Nº 034/2022, REG 134937/2018**

No dia 24 de fevereiro de 2022, às 14h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: “ESTUDO DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS USANDO MAPAS DE ROTI SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA”**

**Observações da banca:** A aluna precisa incorporar a tese as pequenas sugestões/correções dos membros da banca e revisão final dos orientadores.

**Membros da banca:**

Dr. Alexandre Alvares Pimenta - Presidente - INPE  
Dr. Clezio Marcos De Nardin - Orientador - INPE  
Dr. Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo - Orientador - INPE  
Dr. Hisao Takahashi - Membro Interno - INPE  
Dr. Paulo Roberto Fagundes - Membro Externo - UNIVAP  
Dr. Paulo Alexandre Bronzato Nogueira - Membro Externo - IFSP



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Alvares Pimenta, Pesquisador**, em 02/03/2022, às 18:39 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **hisao takahashi (E), Usuário Externo**, em 03/03/2022, às 08:36 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Fagundes (E), Usuário Externo**, em 03/03/2022, às 10:40 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo (E), Usuário Externo**, em 03/03/2022, às 13:46 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Clezio Marcos De Nardin, Diretor do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, em 04/03/2022, às 13:54 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Paulo alexandre bronzato nogueira (E), Usuário Externo**, em 06/04/2022, às 18:50 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9492331** e o código CRC **DB124C33**.

---

*“ A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

*ALBERT EINSTEIN*





*À minha mãe, **Angela Maria***



## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à Deus, à minha mãe, Angela Maria, meu pai, Plínio, minha irmã, Camila e meu companheiro, André que sempre me deram suporte e apoio. Também, agradeço aos meus orientadores, Clezio Marcos De Nardin e Cosme Alexandre C. O. B. Figueiredo, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao financiamento recebido pela Capes/MEC (88882.330725/2019-01) e CNPq/MCTIC (141935/2020-0), os quais foram de extrema importância para a realização desta tese de doutorado.

Agradeço também os professores e colegas do INPE que de alguma forma contribuíram para minha aprendizagem. A todos os meus amigos (as), aos que fazem parte do grupo APOENA pelo apoio e parceria, em especial à Laysa Resende que incentiva e está sempre disposta a ajudar.

Um agradecimento especial aos pesquisadores Xiaoqing Pi e a Olga Verkhoglyadova pelos ensinamentos e receptividade mesmo que virtualmente na JPL-NASA. Agradeço à JPL pela grande oportunidade de interagir com os pesquisadores.



## RESUMO

A ionosfera sobre o setor sul-americano, tal qual nos demais setores do globo, apresenta processos eletrodinâmicos complexos devido à interação da atmosfera neutra com a ionosfera condutora, que produz campos elétricos e correntes elétricas, afetando a sua dinâmica. No entanto, a declinação magnética do equador de  $-20^\circ$  confere a esta região características peculiares, tal como a modificação da ocorrência das bolhas de plasma. Adicionalmente, temos a Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS) cuja presença e influência nos fenômenos ionosféricos ainda é pouco estudada. Quanto às irregularidades, as linhas de campo geomagnético que acoplam as regiões E e F equatoriais são responsáveis por diversos fenômenos, entre eles a sua geração, que geralmente é associada com as bolhas de plasma. Estas irregularidades quando ocorrem após o pôr do sol, são bem conhecidas, diferentemente daquelas que ocorrem no período pré-amanhecer. Portanto, este trabalho de tese visa a realizar estudos de casos sobre as irregularidades ionosféricas pré-amanhecer. E também, fazer um estudo estatístico das ocorrências das bolhas de plasma que ocorreram no período de julho de 2014 a julho de 2015 (máximo solar) e entre julho de 2019 a julho de 2020 (mínimo solar). O objetivo é detectar e caracterizar irregularidades ionosféricas no setor Brasileiro. A metodologia aplicada é baseada no uso de mapas do índice da taxa de variação do TEC (ROTI) com Multi-Global Sistema de navegação por satélite (GNSS), englobando dados de Sistema de Posicionamento Global (GPS) e do Sistema de Navegação Global via Satélite Russo (GLONASS) e via satélite da União Europeia (Galileo).

Palavras-chave: Aeronomia equatorial. Conteúdo Eletrônico Total. Clima espacial. Irregularidades de plasma. Efeito da atividade solar.



# STUDY OF IONOSPHERIC IRREGULARITIES USING ROTI MAPS ON THE BRAZILIAN REGION

## ABSTRACT

The ionosphere over the South American sector, as in other sectors of the globe, presents complex electrodynamic processes due to the interaction of the neutral atmosphere with the conductive ionosphere, which produces electric fields and electric currents, affecting its dynamics. However, the magnetic declination of the equator of  $-20^\circ$  gives this region peculiar characteristics, such as modifying the occurrence of plasma bubbles. Additionally, the South American Magnetic Anomaly (AMAS) lies in this region, and its influence on ionospheric phenomena is still poorly studied. As for irregularities, the geomagnetic field lines that couple the equatorial E and F regions are responsible for several phenomena, including their generation, which are generally associated with plasma bubbles. These irregularities are well known when they occur after sunset, unlike those observed in the pre-dawn period. Therefore, this thesis aims to conduct case studies on pre-dawn ionospheric irregularities. Furthermore, we made a statistical study of the occurrences of plasma bubbles that occurred from July 2014 to July 2015 (solar maximum) and from July 2019 to July 2020 (solar minimum). The objective is to detect and characterize ionospheric irregularities in the Brazilian sector. The methodology applied is based on ROTI maps with Multi-Global Navigation Satellite System (GNSS), including data from GPS, GLONASS, and Galileo.

Keywords: Equatorial aeronomy. Total Electron Content. Space weather. Plasma irregularities. Effect of solar activity.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Dínamo da região E. . . . .	9
2.2 Dínamo da região F. . . . .	11
2.3 Mecanismo de geração do pico pré-reversão. . . . .	12
2.4 Três tipos de irregularidades causadas por fenômenos na ionosfera equatorial: (A) Bolha de Plasma Equatorial, (B) Spread-F na base da camada, (C) intensificação da Anomalia de Ionização Equatorial. . . . .	14
2.5 Anomalia de Ionização Equatorial. . . . .	15
2.6 Mecanismo da instabilidade Rayleigh-Taylor. . . . .	16
2.7 Índice S4 e elevação, TEC, dTEC e ROTI para (a) PRN 13, (b) PRN 7 e (c) PRN 3 para o dia 29 de março de 2011. . . . .	18
2.8 Mapas de ROTI com intervalo de 30 minutos de 12:30 UT a 15:00 UT em 29 de março de 2011. . . . .	20
2.9 Mapa de contorno da densidade eletrônica em função de MLT. . . . .	21
2.10 Distribuição da densidade do plasma em um plano equatorial magnético em $T = 3000$ s para diferentes forças do vento latitudinal vertical, conforme indicado no topo de cada painel. . . . .	23
2.11 Ocorrências das EPBs separadas em setores que compreende a África, Índia, Pacífico, América e Atlântico, respectivamente em função dos meses do ano. . . . .	24
2.12 Ocorrências das bolhas de plasma distribuídas em mapas de contorno de latitude geomagnética versus hora local, separadas por região, América, Ásia, África e Pacífico e distribuída conforme a sazonalidade. . . . .	26
2.13 Ocorrências das bolhas de plasma conforme os meses dos anos, do período de Novembro de 2012 a Janeiro de 2016. . . . .	27
2.14 Fases da tempestade geomagnética. . . . .	28
2.15 Penetração direta de campos elétricos. . . . .	31
2.16 Variações diurnas do VTEC para o leste (a) e oeste (b) brasileiro. . . . .	33
2.17 Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado. . . . .	35
2.18 Mapas de ROTI na Europa com intervalo de 1 h, entre 18:00 UT e 05:00 UT de 22 a 23 de junho de 2015. . . . .	36
2.19 Dst (a), o índice ROTI sobre SGOC (b), IISC (c) e o desvio padrão do gradiente latitudinal do VTEC para IISC-SGOC (d), entre 15 a 22 de março de 2015 (onde $LT = UT+5$ ). . . . .	39
2.20 FAI observadas pelo radar Gadanki durante 1-10 de julho de 2008. . . . .	41

2.21	Mapa de ROTI das 19:20 UT a 02:20 UT no dia 21 de março de 2001, no Japão. . . . .	43
3.1	Localização dos receptores GNSS (azul) no (a) setor brasileiro e (b) no setor da América Latina. A linha vermelha é o equador magnético referente ao ano de 2015. . . . .	46
3.2	Localização das digissondas (quadrado roxo), magnetômetro (triângulo laranja) e interferômetro de Fabry-Perot (FPI) (estrela amarela) no setor brasileiro e peruano. A linha vermelha é o equador magnético referente ao ano de 2015. . . . .	47
3.3	(a) Unidade de controle, (b) uma antena receptora e (c) antena transmissora da ionossonda. . . . .	48
3.4	Fotos (a) do núcleo do sensor e (b) invólucro de PVC dos sensores do magnetômetro, que fazem parte da rede de magnetômetros do Embrace MagNet. . . . .	49
3.5	Fotos da (a) unidade de controle do interferômetro de Fabry-Pérot e (b) é a cúpula com os espelhos e lente de observação. . . . .	50
3.6	Fluxograma da obtenção do índice ROTI. . . . .	51
3.7	Exemplo de arquivo RINEX para a estação de São José dos Campos, no dia 13 de março de 2015. . . . .	52
3.8	Exemplo de arquivo de órbita (MGEX) no dia 31 de outubro de 2019. . . . .	54
3.9	Órbitas dos satélites GPS (a), GLONASS (b) e Galileo (c) em 24h. . . . .	55
3.10	Localização da estação (círculo vermelho), passagem do satélite (preto), início da medição (asterisco preto), ângulo de elevação (verde), STEC (azul), ROT (vermelha) e ROTI (pontos pretos), na estação MGBJ para GPS PRN=2 (a) e GPS PRN=24 (b), no dia 11 de maio de 2015. . . . .	56
3.11	Mapa de ROTI no IPP (a), mesmo mapa utilizando interpolação (b), às 23:40 UT do dia 25 de dezembro de 2015. . . . .	57
3.12	Keograma de ROTI com latitude versus tempo universal. Para o dia 14 de janeiro de 2015. Para latitude geográfica fixa de 0°, -5°, -10°, -15°, -20°, -25°, -30° e -35° respectivamente. . . . .	58
3.13	Mapa de ROTI (a), mapa de TEC (b), Imageador All-Sky em São João do Cariri (c), em Cachoeira Paulista (d), Ionossonda em Fortaleza (e) e em Cachoeira Paulista (f), no dia 17 de Janeiro de 2015, às 01:30 UT. . . . .	60

4.1	Ocorrência de bolhas de plasma no período de máximo solar em vermelho (de julho de 2014 a julho de 2015) e mínimo solar em azul (de julho de 2019 a julho de 2020), em que os painéis (a) e (b) são períodos calmos, (c) e (d) são períodos perturbados. A linha pontilhada é o terminador solar em 350 km de altitude. . . . .	62
4.2	Os painéis (a) e (b) mostram a quantidade de ocorrência de bolhas de plasma e de medidas feitas, respectivamente. Os painéis (c) e (d) mostram a velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma por latitude fixa (0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S) e correspondem ao período calmo, no máximo (vermelho) e mínimo solar (azul), em período calmo. . . . .	66
4.3	Os painéis (a) e (b) mostram a velocidade e distância entre estruturas de bolhas de plasma, respectivamente, nas latitudes de 0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S, entre novembro de 2012 a janeiro de 2016. . . . .	67
4.4	Os painéis (a) e (b) mostram a quantidade de ocorrência de bolhas de plasma e de medidas feitas, respectivamente. Os painéis (c) e (d) mostram a velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma por latitude fixa (0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S) e correspondem ao período calmo, no máximo (vermelho) e mínimo solar (azul), em períodos perturbados. . . . .	69
4.5	Mapas de TEC (coluna a), mapas de ROTI (coluna b), ionogramas em SALU (coluna c) e ionogramas em JICA (coluna d) às 07:00 UT, 08:00 UT, 10:00 UT, e 11:50 UT durante 18 de março de 2015. A linha vermelha sólida indica o equador magnético, e a linha branca pontilhada mostra o terminador solar. . . . .	71
4.6	IMF $B_z$ e $B_y$ (painel a, em roxo e laranja, respectivamente), o índice AE (painel b, em laranja), o índice Dst (painel c, em azul) e ROTI para SALU e Ancon (estação próxima a JICA) (painéis d e e, na marinha, respectivamente), $h'F$ e o dia calmo de referências (painéis d e e, em vermelho e preto, respectivamente) para SALU e JICA. A linha vermelha marca o SSC e a linha laranja marca o horário do nascer do sol em cada estação. . . . .	73
4.7	Componente zonal e meridional do vento (em vermelho e azul respectivamente) obtido pelo interferômetro Fabry-Perot em JICA, juntamente com a média de cinco dias calmos de referência (em cinza, os dias são 10, 30, 5, e 14 de março de 2015). . . . .	75

4.8	Variações temporais de TEC (laranja) e ROTI (pontos azuis) nas estações SALU, MABB, PITN, LANC, LHYO e LPUC (painéis a, b, c, d, e, e f, respectivamente) durante o dia 18 de março de 2015. . . . .	77
4.9	Índice S4 (em vermelho), ROTI (pontos azuis) e TEC (curva verde) para as estações de MGBH (painel a) e de SALU (painel b), respectivamente. . . . .	78
4.10	Mapas bidimensionais multi-GNSS do TEC (coluna a), ROTI (coluna b), ionograma em BOAV (coluna c) e ionograma em MSCG (coluna d) para 08:00 UT, 08:30 UT, 09:20 UT e 10:10 UT no dia 18 de fevereiro de 2015. Os mapas mostram o equador magnético para o ano de 2015 (linha vermelha) e o terminador solar (linha pontilhada amarela). . . . .	80
4.11	Parâmetros da tempestade geomagnética moderada que ocorreu de 17 a 18 de fevereiro de 2015: (a) o campo magnético interplanetário $B_z$ , (b) índice AE, (c) Índice Dst, (d) $\Delta H_{EEJ}$ ( $\Delta H_{SALU} - \Delta H_{Eusébio}$ ) durante a tempestade geomagnética (linha preta) e o período calmo (linha cinza), (e) $hmF2$ , $hmF2_q$ , e $\Delta hmF2$ para SALU nas linhas vermelha, azul e preta, respectivamente. . . . .	81
4.12	A altura virtual ( $h'F$ ) em 18 de fevereiro de 2015 (linha vermelha) e o dia calmo de referência (Qd) (linha preta) em BOAV (a) e MSCG (c), e o índice ROTI para as mesmas regiões nos painéis b e d. A área hachurada é o período em estudo e a linha pontilhada amarela é o terminador solar. Os blocos verdes são as ocorrências de Spread F. . . . .	83
4.13	Mapas bidimensionais multi-GNSS do ROTI, ionograma em BOAV e ionograma em JICA às 08:00 UT, 09:00 UT e 11:00 UT, respectivamente, no dia 1 de março de 2015. Os mapas mostram o equador magnético para o ano de 2015 (linha vermelha) e o terminador solar (linha pontilhada branca). . . . .	86
4.14	IMF $B_z$ (roxo), $V_x$ (verde), $E_y$ (rosa), índice AE (laranja), Dst (azul), ROTI em BOAV e JICA, respectivamente (pontos azuis) e a altura virtual ( $h'F$ , linha vermelha) e o dia calmo de referência (Qd) (linha preta) em BOAV (d) e LANC (e). . . . .	87
4.15	Velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma para os dias 18 de março (vermelho), 18 de fevereiro (laranja) e 01 de março (amarelo). . . . .	88
4.16	Campo elétrico zonal em Jicamarca e São Luís, para os eventos de 18 de março, 18 de fevereiro de 1 de março de 2015. . . . .	90

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Classificação das tempestades segundo índice Dst. . . . .	29
3.1 Frequência das ondas portadoras. . . . .	45
3.2 Canais de referência (R) para cada PRN da constelação de satélites GLO- NASS. . . . .	53
4.1 Quantidade de dias analisados no máximo solar. . . . .	63
4.2 Quantidade de dias analisados no mínimo solar. . . . .	64
4.3 Valores de entrada utilizados no modelo TIE-GCM. . . . .	89



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	2
1.1.1 Objetivo geral . . . . .	2
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	2
1.1.3 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho . . . . .	3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Ventos neutros termosféricos . . . . .	7
2.2 Dínamo das regiões E e F . . . . .	8
2.3 Pico Pré-Reversão . . . . .	11
2.4 Irregularidade ionosférica . . . . .	13
2.4.1 Anomalia de Ionização Equatorial . . . . .	15
2.4.2 Bolha de plasma equatorial . . . . .	15
2.4.3 EPB após o pôr do sol . . . . .	17
2.5 Tempestades geomagnéticas . . . . .	27
2.5.1 Penetração de campo elétrico . . . . .	30
2.5.2 Dínamo perturbado . . . . .	34
2.5.3 Geração de EPB durante tempestades geomagnéticas . . . . .	35
2.5.4 Supressão de EPB . . . . .	37
2.5.5 EPB após a meia-noite . . . . .	40
2.5.6 EPB pré/pós-amanhecer . . . . .	41
<b>3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>45</b>
3.1 Instrumentação . . . . .	45
3.1.1 Informações sobre as redes GNSS usadas nesse trabalho . . . . .	45
3.1.2 Descrição sucinta da instrumentação usada para estudos de casos . . . . .	46
3.2 Metodologia . . . . .	50
3.2.1 Cálculo e geração de mapas de ROTI . . . . .	50
3.2.2 Técnica de Keograma aplicada a mapas de ROTI . . . . .	57
3.2.3 Avaliação e limitação do método de ROTI para identificar características das EPBs . . . . .	59
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>61</b>

4.1	Ocorrência de irregularidades de plasma com ciclo solar e atividade magnética . . . . .	61
4.1.1	Ocorrência de irregularidades no máximo solar . . . . .	63
4.1.2	Ocorrência de irregularidades no mínimo solar . . . . .	64
4.1.3	Características das irregularidades em período calmo versus período perturbado . . . . .	65
4.1.3.1	Características das irregularidades observadas no período calmo . . . . .	65
4.1.3.2	Características das irregularidades observadas no período perturbado . . . . .	68
4.2	Detecções de EPBs atípicas durante tempestades geomagnéticas . . . . .	70
4.2.1	Detecção de evento de EPBs durante tempestade intensa - 18 de Março de 2015 . . . . .	70
4.2.2	Detecção de evento de EPBs durante tempestade moderada - 18 de Fevereiro de 2015 . . . . .	79
4.2.3	Detecção de evento de EPBs durante tempestade fraca - 1 de Março de 2015 . . . . .	85
4.2.4	Análise comparativa das características dos eventos com os diferentes níveis de tempestade . . . . .	88
4.2.5	Análise da RTI utilizando o modelo TIE-GCM . . . . .	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>93</b>
5.1	Achados científicos não reportados na literatura . . . . .	94
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	95
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO A - TAXA DE CRESCIMENTO DA INSTABILIDADE RAYLEIGH-TAYLOR. . . . .</b>	<b>113</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Na ionosfera terrestre existem processos eletrodinâmicos que podem gerar perturbações, denominadas irregularidades do plasma. Estas irregularidades podem variar de tamanho, podendo medir de centímetros a centenas de quilômetros (KELLEY et al., 1979). O estudo das irregularidades ionosféricas torna-se importante, pois elas podem interferir drasticamente na propagação dos sinais de rádio, empregados nas telecomunicações e no Sistema de Navegação Global por Satélite (do inglês, “Global Navigation Satellite System” - GNSS) (FARLEY et al., 1970; TSUNODA, 1981; AARONS et al., 1996; PI et al., 1997; ABDU et al., 2009b).

As irregularidades de diferentes tipos de escala são amplamente estudadas utilizando diversos equipamentos, como ionossonda (ABDU et al., 2003; ABDU et al., 2012; RESENDE et al., 2018; MORO et al., 2021), Radars de Alta Frequência (do inglês, “Very High Frequency” - VHF) (ABDU et al., 2009b; DENARDINI et al., 2006; DENARDINI et al., 2004), imageadores All Sky (PIMENTA et al., 2003; PAULINO et al., 2011), receptores de GNSS (TAKAHASHI et al., 2014; TAKAHASHI et al., 2015), dentre outros. No entanto, a maioria destes instrumentos não possui cobertura espacial suficiente para cobrir todo o setor brasileiro. A exceção são os receptores GNSS, que vêm sendo muito utilizados para o cálculo do mapa do Conteúdo Eletrônico Total (do inglês, “Total Electron Content” - TEC). Tal cobertura facilita a observação das irregularidades, sendo possível medir tamanho, velocidade de propagação, entre outros parâmetros (BARROS et al., 2018).

Uma das maneiras de se obter os efeitos nos sinais GNSS é utilizando índices de variações do TEC (vide tabela 1 de (DENARDINI et al., 2020)) dentre os quais existe o cálculo das flutuações de fase que ocorrem devido à presença das irregularidades. Assim, com a diferença de fase, é possível produzir com precisão o TEC. Uma vez calculado o TEC, pode-se extrair o índice baseado na taxa de tempo da fase nos sinais de dupla frequência, chamada de taxa de TEC (do inglês, “Rate of TEC” - ROT), na unidade de TECU/min ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elétrons}/m^2$ ), que é capaz de descrever irregularidades em diferentes escalas de comprimento (PI et al., 1997).

Outro índice usado para identificar as irregularidades ionosféricas, derivado da variação do TEC e com base no desvio padrão do ROT, é o ROTI (do inglês, “Rate of change of TEC index”). Um dos primeiros estudos utilizando ROTI foi feito por Pi et al. (1997). Os autores mostraram que o ROTI permite estudar a geração e evolução de irregularidades ionosféricas continuamente ao redor do globo, dependendo da disponibilidade e cobertura de receptores de GNSS. Ainda, com a distribuição

do ROTI foi possível construir mapas que puderam realizar uma melhor análise da dinâmica das irregularidades ionosféricas (CHERNIAK et al., 2015; CARMO et al., 2021).

Uma das irregularidades ionosféricas mais estudadas são as Bolhas de Plasma Equatoriais (do inglês, “Equatorial Plasma Bubble” - EPB), que ocorrem, frequentemente, após o pôr do sol, e cuja dinâmica e geração já são bem conhecidas (SOBRAL et al., 2002; ABDU et al., 2009b; KOGA et al., 2011; TAKAHASHI et al., 2016; BARROS et al., 2018; SILVA et al., 2019; DENARDINI et al., 2020). Contudo, os mecanismos de geração e desenvolvimento destas bolhas de plasma após a meia noite e pré-amanhecer ainda são pouco conhecidos. Alguns estudos sugerem que as EPBs pré-amanhecer poderiam ser geradas em períodos de tempestade magnética por Penetração Imediata de Campos Elétricos (do inglês, “Prompt Penetration Electric Fields” - PPEF) ou por Campos Elétricos do Dínamo Perturbado (do inglês, “Disturbance Dynamo Electric Fields” - DDEF)(HUANG et al., 2013; RAM et al., 2015; ZAKHARENKOVA et al., 2019). Entretanto, ainda não há estudos suficientes na literatura que comprovem essas possibilidades.

Finalmente, a ocorrência dessas irregularidades, além de rara, também é pouco conhecida. Portanto, pretende-se contribuir para aumentar a compreensão dos fenômenos físicos relacionados a essas irregularidades de plasma, bem como determinar a ocorrência das EPBs em períodos de máxima e mínima atividade solar com base na metodologia desse trabalho.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho de doutorado é estudar irregularidades ionosféricas utilizando mapas de ROTI, no setor brasileiro.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

a) Criar um banco de dados dos receptores do Sistema de Posicionamento Global (do inglês, “Global Positioning System” - GPS), do Sistema de Navegação Global via Satélite (em russo, “Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema” - GLO-NASS) e do Sistema de Navegação Europeu (Galileo), disponíveis no setor brasileiro, para os períodos de julho de 2014 a julho de 2015 (máximo solar) e julho de 2019 a

julho de 2020 (mínimo solar);

- b) Estudar e implementar a metodologia de cálculo do ROTI e geração de mapas de ROTI sobre o setor brasileiro. Estes mapas serão empregados na investigação da ocorrência de irregularidades;
- c) Classificar e caracterizar as irregularidades ionosféricas observadas nos mapas de ROTI com relação a velocidade de propagação e a distância entre estruturas;
- d) Investigar as causas de geração das irregularidades observadas nos mapas de ROTI;
- e) Realizar um estudo comparativo da ocorrência das irregularidades observadas nos mapas de ROTI, durante período de máxima e mínima atividade solar, dentro da disponibilidade de dados;
- f) Detectar irregularidades de plasma no pré-amanhecer;
- g) Estudar a geração dessas irregularidades de plasma pré-amanhecer;
- h) Comparar as irregularidades observadas no Brasil, com observações em diferentes locais a partir de estudos de publicações relacionados.

Neste contexto, o presente trabalho de doutorado possui o intuito de abordar os objetivos propostos, contribuindo para uma melhor compreensão das irregularidades ionosféricas no setor brasileiro. Assim, pretende-se utilizar os sinais dos satélites GPS, GLONASS e Galileo, bem como todos os receptores disponíveis neste setor, para calcular os mapas de ROTI.

### **1.1.3 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho**

Na década de 90, vários grupos de pesquisa começaram a medir os efeitos de irregularidades nos sinais de GNSS (WANNINGER, 1993; DOHERTY et al., 1994; AARONS et al., 1996; PI et al., 1997). Woodman et al. (1985), Chau e Woodman (2001) observaram irregularidades em Jicamarca durante o período diurno (14:00 e 16:00 LT). Ambos os estudos ocorreram em período calmo. Shume et al. (2013) observaram irregularidades no plasma no período diurno (12:30 e 13:15 LT) por ecos em radar de espalhamento em São Luís também em período calmo. Jiang et al. (2016), Li et al. (2012), Luo et al. (2020) estudaram o aparecimento de irregularidade no amanhecer em tempestades magnéticas intensas ( $-150 > \text{dst} > -100$ ) na China, Japão e Peru, respectivamente. Park et al. (2016) relataram o aparecimento de irregularidade cau-

sada pela exaustão do foguete. Wu et al. (2020) realizaram um estudo usando seis anos de observação em Airglow no sul da China e encontraram apenas um caso de EPBs próximo ao nascer do sol.

O surgimento de EPBs em tempestade magnética no amanhecer no setor brasileiro foi pouco estudado, ainda não há um consenso sobre o fator que desencadeou as irregularidades e como elas duram após a passagem do terminador solar. Existem questões que não foram completamente solucionadas, como, por exemplo:

- a) Quais os mecanismos de geração das irregularidades ionosféricas em horários não usuais?
- b) Qual o parâmetro ionosférico é o responsável pela variabilidade dia a dia?
- c) Qual a influência quantitativa do ciclo solar na ocorrência e nas características físicas das irregularidades?
- d) Usando o ROTI, com que grau de precisão é possível quantificar a perturbação causada na ionosfera por uma irregularidade?
- e) Quais características das irregularidades pré-amanhecer são observadas pelo ROTI?
- f) É possível detectar irregularidades de baixa escala a partir de um índice ionosférico?

Desta forma, o presente trabalho visa a melhorar a compreensão dos efeitos provocados por irregularidades na ionosfera, contribuindo para a persecução da resposta para uma ou mais das perguntas acima. Isso porque o uso dos mapas de ROTI, principalmente quando os equipamentos como imageador All-Sky e ionossonda não estão disponíveis, torna este trabalho de doutorado um diferencial quando comparado com pesquisas realizadas anteriormente.

O índice ROTI é obtido através do TEC, porém, com a vantagem de não ser necessário o cálculo da tendência diferencial devido ao atraso do código (do inglês, “Differential Code Bias” - DCB), que é o principal fator de propagação de erro do TEC. O índice ROTI vem sendo utilizado por diversos pesquisadores. Liu et al. (2019) calcularam o índice ROTI para estudar irregularidades no plasma, quando, pela primeira vez, o cálculo foi feito com base em mais de uma constelação de satélites do sistema GNSS. Além deste, Pi et al. (1997) e Cherniak et al. (2015)

utilizaram mapas de ROTI no estudo de irregularidades ionosféricas. Entretanto, nenhum estudo foi realizado sobre o setor brasileiro, com exceção do trabalho de [Souza e Camargo \(2019\)](#), que utilizaram o ROTI na região brasileira para detectar irregularidades ionosféricas. Porém, o trabalho levou em consideração apenas uma estação e não foi feito o uso de mapas, não sendo possível observar a direção de propagação, geração e evolução das irregularidades.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ionosfera está situada na atmosfera superior da Terra, entre 60 km até  $\sim 1500$  km. Esta região é caracterizada pela sua ionização, devida, principalmente, à radiação solar. Nela encontram-se elétrons e íons livres, que influenciam na propagação de ondas de rádio. Ademais, ela é subdividida em três regiões: D, E e F. Cada uma dessas regiões possui características próprias. A região D compreende 60 a 80 km de altitude, a região E está localizada entre 80 e 150 km e, a partir disso, a região F pode chegar até  $\sim 1500$  km (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). A região F é a de maior interesse para este estudo, pois é a região mais ionizada da ionosfera e nela está presente a ionização atômica, devido à radiação ultravioleta, predominando a formação do  $O^+$ . Nesta região, a ionização está presente durante o dia e também à noite, em menores proporções (KELLEY, 2009).

A ionosfera é foco de muitos estudos em todo o globo (CHAPMAN, 1956; BALAN et al., 2000; FORBES; ZHANG, 2019). No setor brasileiro, ela vem sendo estudada ao longo dos anos com a utilização de modelos teóricos e de alguns equipamentos, como ionossondas, imageadores All-Sky, interferômetros, radares, entre outros (BATISTA et al., 1996; ANDERSON, 1981; ABDU et al., 2005; RESENDE et al., 2018; MORO et al., 2021; DENARDINI et al., 2020).

A partir dessa introdução serão apresentados, nesse capítulo, os processos físicos que ocorrem na ionosfera em períodos calmos e, na sequência, em períodos perturbados. Inicialmente, consideraremos os ventos neutros termosféricos; em seguida, discorreremos sobre o dínamo nas regiões E e F, o pico pré-reversão e irregularidades ionosféricas, que incluem a Anomalia de Ionização Equatorial (do inglês, “Equatorial Ionization Anomaly” - EIA), EPBs e EPBs após o pôr do sol.

### 2.1 Ventos neutros termosféricos

A incidência da radiação solar devido à emissão do Extremo Ultravioleta (do inglês, “Extreme Ultra Violet” - EUV) gera expansão térmica na atmosfera terrestre. No entanto, a distribuição da temperatura no perfil vertical é desigual, ocasionando movimentos para tentar atingir o equilíbrio termodinâmico. Esta variação de temperatura e densidade gera os ventos neutros, que se movimentam horizontalmente a partir de 120 km, de regiões de altas para baixas pressões. Os gradientes de pressão criados pela expansão térmica geram movimentos do plasma para elevadas altitudes à noite (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Os ventos termosféricos também são influenciados pela força de Coriolis, devido ao movimento da Terra, por forças de atrito

devido à viscosidade do ar e pelo arrasto iônico. O movimento gerado pelos ventos termosféricos pode ser obtido pela Equação 2.1 (RISHBETH, 1972):

$$\frac{d\vec{U}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{U} = \vec{F} - \nu_{ni}(\vec{U} - \vec{V}) + \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \nabla^2 \vec{U} + \vec{g}, \quad (2.1)$$

Os termos da Equação 2.1 referem-se a:

(Aceleração) + (termo de Coriolis) = (Força do gradiente de pressão) - (Arrasto de íons) + (Arrasto de viscosidade) + (Gravidade),

em que  $\vec{U}$  é a velocidade do vento,  $\vec{V}$  a velocidade de deriva do íon,  $\vec{\Omega}$  a velocidade angular da Terra,  $\vec{F}$  é a força motriz por unidade de massa devido aos gradientes de pressão,  $\nu_{ni}$  é a frequência de colisão de íons com partículas neutras,  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$  a viscosidade cinemática e  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade.

## 2.2 Dínamo das regiões E e F

O dínamo das regiões E e F é gerado por ventos, mas age de formas diferentes em cada uma delas. A principal diferença é a condutividade em cada região (RISHBETH, 1997). Na região E, os ventos de marés deslocam os íons e elétrons através das linhas de campo geomagnéticas. Contudo, os íons e elétrons possuem velocidades diferentes e, na presença de um campo magnético, realizam movimentos ciclotrônicos. A velocidade dos íons é maior que a velocidade dos elétrons ( $\vec{V}_i > \vec{V}_e$ ), pois a frequência de colisão dos íons é maior que a girofrequência. Essa diferença entre elétrons e íons gera um campo elétrico induzido ( $\vec{U} \times \vec{B}$ ), produzindo corrente. Como as regiões possuem baixa condutividade em seus limiares, produz, por sua vez, um acúmulo de cargas nas bordas. Em consequência disso, um novo campo elétrico de polarização é criado; o campo elétrico total é dado pela Equação 2.2 (RISHBETH; GARRIOTT, 1969):

$$\vec{E} = \vec{E}_p + \vec{U} \times \vec{B}, \quad (2.2)$$

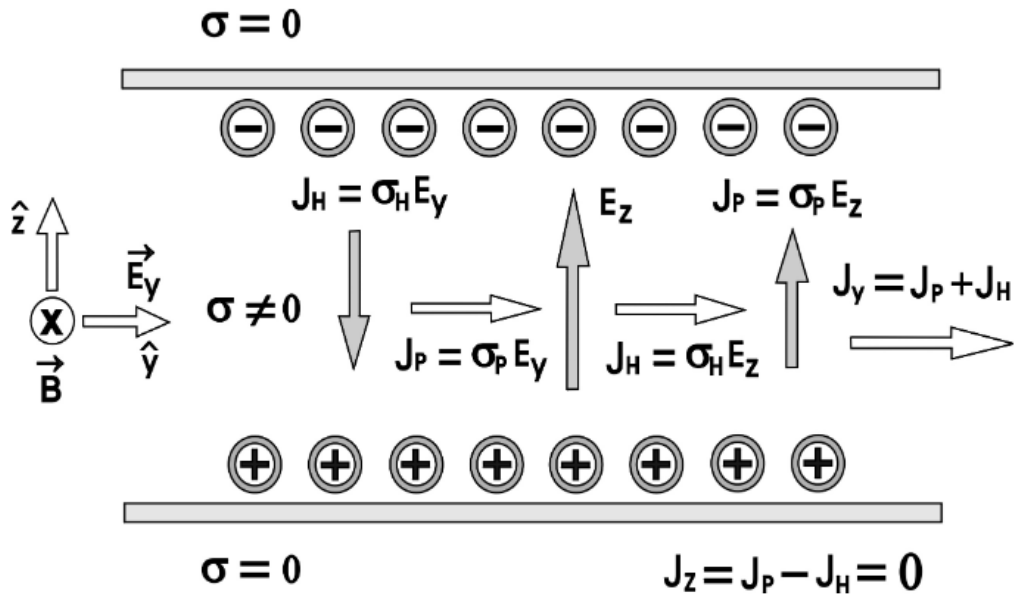
em que  $\vec{E}_p$  é o campo elétrico de polarização,  $\vec{U}$  é o vento de maré e  $\vec{B}$  é o campo magnético.

A Figura 2.1 ilustra o dínamo da região E, na qual o campo magnético  $B$  está na direção  $x$  ( $B_x$ ) e o campo elétrico  $E$  zonal na direção de  $y$  ( $E_y$ ). Por conta da quase



horizontalidade das linhas de campo magnéticas no setor equatorial, considera-se que a condutividade nas bordas superior e inferior da região E é aproximadamente zero ( $\sigma \simeq 0$ ). O campo elétrico zonal cria uma corrente Pedersen ( $J_p = \sigma_P E_y$ ) e uma corrente Hall ( $J_H = \sigma_H E_y$ ). A corrente Hall gera um acúmulo de carga nas bordas, criando um campo elétrico de polarização na direção  $z$  ( $E_z$ ). Então, este campo  $E_z$  gera novas correntes Pedersen ( $J_p = \sigma_P E_z$ ) e Hall ( $J_H = \sigma_H E_z$ ). Na direção  $z$ , as correntes Hall, criada pelo  $E_y$ , e Pedersen, criada pelo  $E_z$ , se anularão, pois possuem sentidos opostos (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

Figura 2.1 - Dínamo da região E.



Fonte: Carrasco (2005).

Já as correntes restantes se somarão, conforme as equações a seguir:

$$J_z = \sigma_P E_z - \sigma_H E_y = 0 \quad (2.3)$$

e

$$J_y = \sigma_P E_y + \sigma_H E_z. \quad (2.4)$$

Isolando  $E_z$  na Equação 2.3 e substituindo na Equação 2.4, obtemos:

$$J_y = \sigma_P E_y + \sigma_H \left( \frac{\sigma_H E_y}{\sigma_P} \right). \quad (2.5)$$

Reorganizando a Equação 2.5:

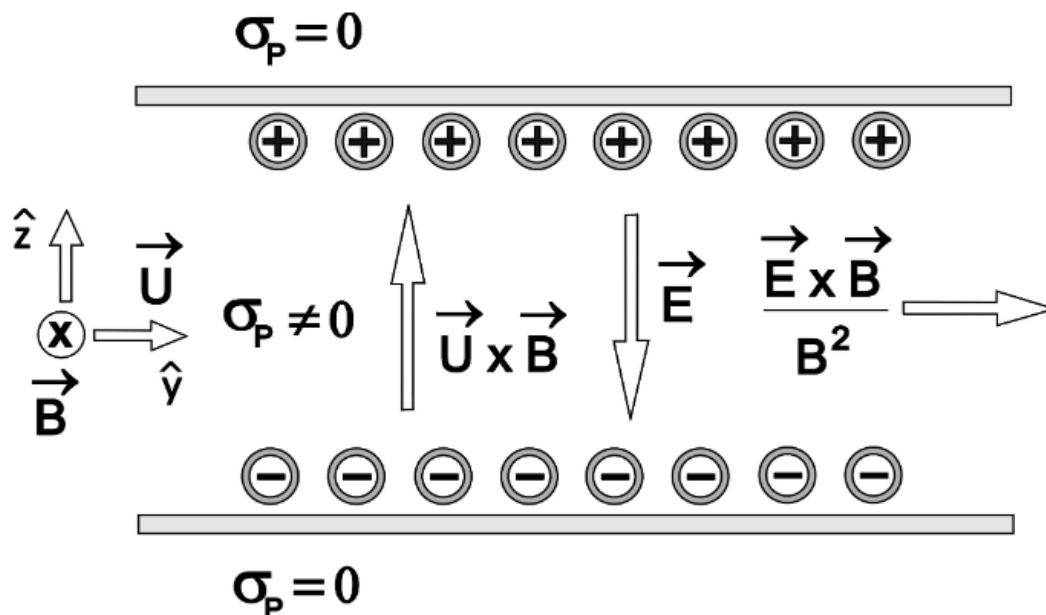
$$J_y = \sigma_P E_y \left( 1 + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P^2} \right) = \sigma_C E_y, \quad (2.6)$$

em que  $\sigma_C$  é a condutividade Cowling, dada por  $\sigma_P \left( 1 + \frac{\sigma_H^2}{\sigma_P^2} \right)$ .

Assim, na região E equatorial forma-se uma corrente intensificada que é denominada Eletrojato Equatorial (do inglês, “Equatorial Electrojet” - EEJ), esta corrente possui direção leste (oeste) de dia (noite). É importante mencionar que, na região E, o dínamo predomina no período diurno.

O dínamo da região F pode ser explicado conforme a eletrodinâmica apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Dínamo da região F.



Fonte: Carrasco (2005).

Nesta região, considera-se uma fina camada com condutividade diferente de zero e, em seu limiar, a condutividade é praticamente zero. Há a presença do vento zonal para leste ( $U_y$ ) e do campo magnético na direção  $x$  ( $B_x$ ). Os ventos, na presença do campo magnético, criam uma deriva ( $\vec{U} \times \vec{B}$ ) que acumula as cargas nas bordas. Essas cargas, por sua vez, geram um campo elétrico de polarização ( $E_z$ ), que leva a uma deriva para leste (RISHBETH; GARRIOTT, 1969):

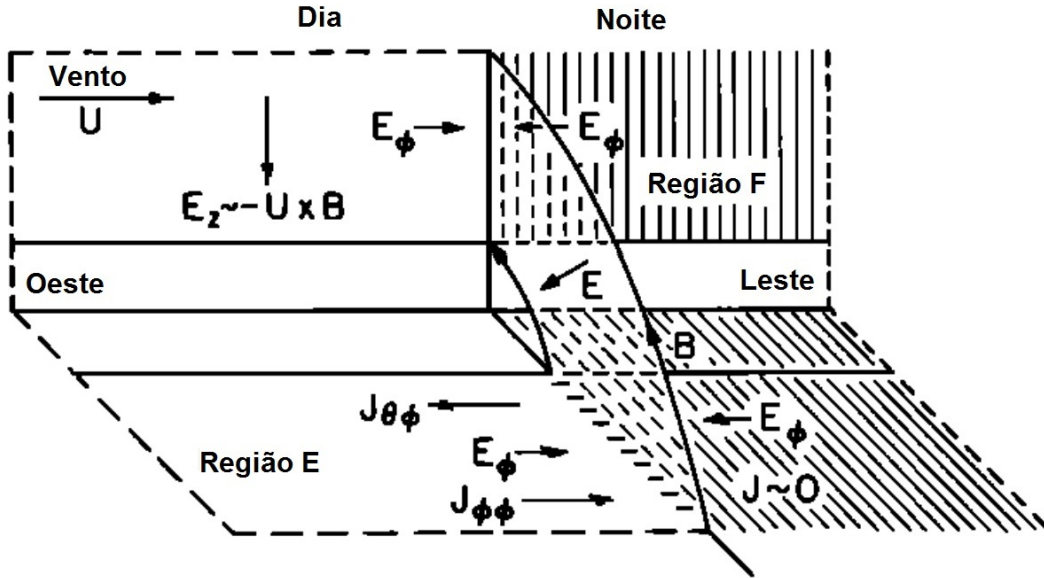
$$\vec{V} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (2.7)$$

### 2.3 Pico Pré-Reversão

Na região F da ionosfera ocorre um fenômeno denominado Pico Pré-Reversão (do inglês, “Pre-Reversal Enhancement” - PRE), que ocorre nas horas que antecedem o pôr do sol.

A Figura 2.3 contribui para o entendimento do mecanismo do PRE.

Figura 2.3 - Mecanismo de geração do pico pré-reversão.



Fonte: Adaptada de Farley et al. (1986).

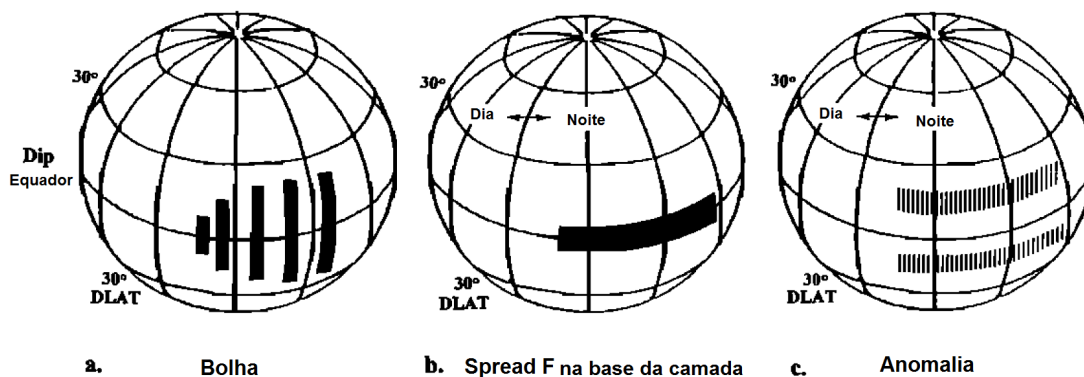
A área hachurada denota a porção noturna da Figura 2.3, enquanto a área não hachurada denota a porção diurna. A linha de separação entre dia e noite é denominada terminador solar. O vento termosférico  $\vec{U}$  dirige-se para leste, do lado diurno, em direção ao terminador. Na presença do campo magnético ( $\vec{B}$ ) é gerado um campo elétrico  $E_z$  ( $-\vec{U} \times \vec{B}$ ). Este campo elétrico é mapeado da região F para a região E, através das linhas de campo geomagnético  $B$ , e se dirigem para o equador. Assim, é gerado um campo elétrico  $E_\phi$ , criando uma corrente Hall para oeste ( $J_{\theta\phi}$ ). Ao anoitecer, a condutividade na região E reduz significativamente, fazendo com que se acumulem cargas na linha do terminador. Essas cargas geram um campo elétrico para leste ( $E_\phi$ ) criando uma corrente Pederson ( $J_{\phi\phi}$ ) que anulará a corrente  $J_{\theta\phi}$ . O campo elétrico  $E_\phi$  é mapeado de volta para a região F e este retorno provoca uma rápida subida na deriva vertical do plasma no entardecer (FARLEY et al., 1986). Esta subida é o PRE, que causa um aumento na deriva vertical do plasma ( $\vec{E} \times \vec{B}$ ), podendo afetar a geração de bolhas de plasma ao levar o plasma para altitudes mais elevadas, onde a taxa do crescimento da Instabilidade Rayleigh-Taylor (do inglês, “Rayleigh Taylor instability” - RTI) é suficientemente grande devido a pequenas colisões íon-neutron (FEJER et al., 1999).

## 2.4 Irregularidade ionosférica

A ionosfera apresenta processos eletrodinâmicos complexos devido à interação da atmosfera neutra com a ionosfera condutora, que produz campos elétricos e correntes elétricas, afetando sua dinâmica e levando à geração de irregularidades no plasma (WHALEN, 2000). A escala das irregularidades ionosféricas pode variar de alguns metros (DENARDINI et al., 2004) até vários quilômetros (ABDU, 2001). Existem muitos estudos sobre estas irregularidades de plasma ao redor do globo (AARONS et al., 1971; NISHIOKA et al., 2008; BURKE et al., 2004; BARROS et al., 2018; KEPKAR et al., 2020). Portanto, as irregularidades foram estudadas na região F auroral e na calota polar, onde a sua ocorrência é bem frequente (AARONS, 1973). Na região E auroral, em períodos de tempestade geomagnética, há o aparecimento de irregularidades (GREENWALD et al., 1973). Além disso, na região E equatorial (FARLEY; BALSLEY, 1973) e na região F equatorial à noite (FARLEY et al., 1970; DENARDINI et al., 2006) há a observação de irregularidades. A ocorrência de irregularidades na região F é denominada “Spread-F”, quando observada com ionossonda (ABDU et al., 2009a).

Algumas irregularidades são alinhadas ou alongadas ao longo do campo magnético da Terra. Spencer (1955) parece ter sido o primeiro a sugerir tal alinhamento de campo. Na região equatorial, a ionosfera sofre mudanças após o pôr do sol, quando a condutividade desta camada diminui, conforme mostrado anteriormente. Nesta região se originam três importantes fenômenos (RISHBETH, 1971; FARLEY et al., 1986): a EPB, o Spread-F na base da camada F e a intensificação da EIA, como mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Três tipos de irregularidades causadas por fenômenos na ionosfera equatorial: (A) Bolha de Plasma Equatorial, (B) Spread-F na base da camada, (C) intensificação da Anomalia de Ionização Equatorial.



Fonte: Adaptada de Whalen (2000).

A EPB (Figura 2.4-a), normalmente, ocorre após o pôr do sol, dirige-se para leste e cresce em altitude. Barros et al. (2018) mostraram as características das bolhas de plasmas equatoriais observadas no mapa de TEC, utilizando mais de 220 receptores GNSS no setor sul-americano. Eles também observaram que, em muitos, casos as distâncias interbolha atingiram mais de 2000 km.

Outro tipo de irregularidade é o Spread-F, que ocorre na base da camada F (do inglês, “Bottomside Spread F” - BSSF)(Figura 2.4-b) e se estende através do campo magnético até uma faixa estreita de latitude (WOODMAN; HOZ, 1976; AARONS, 1993).

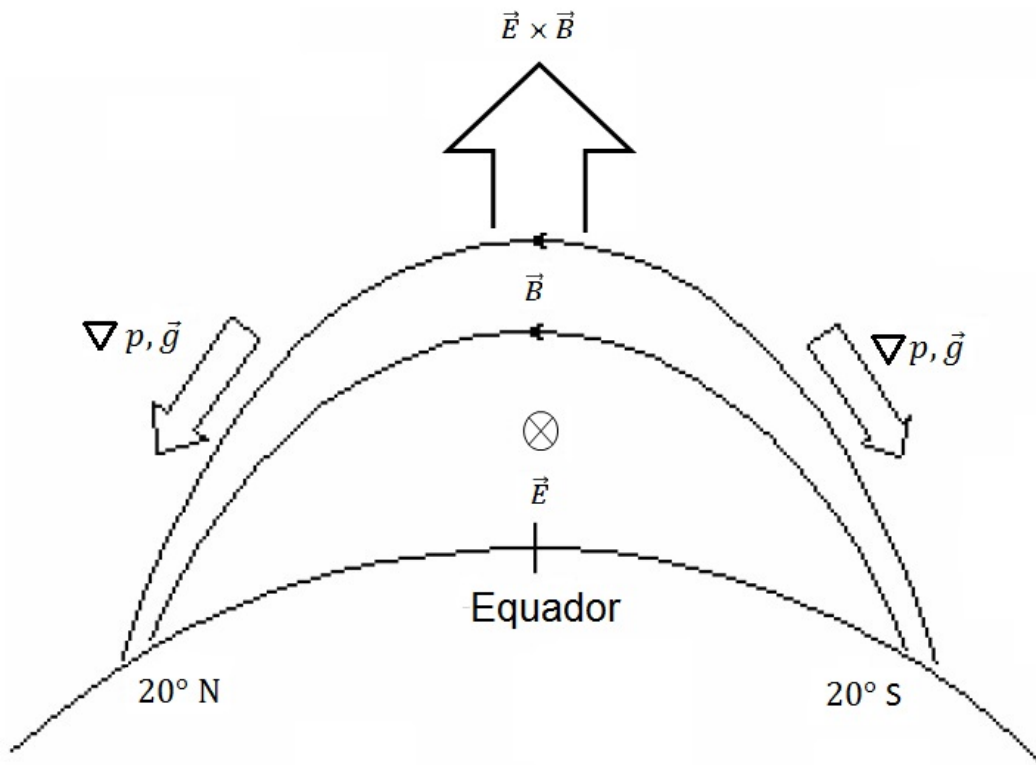
A intensificação da EIA (Figura 2.4-c) é mais comum no máximo solar após o pôr do sol, quando a deriva do plasma  $\vec{E} \times \vec{B}$  aumenta o transporte deste, produzindo regiões com densidade eletrônica mais elevada que o normal para os horários noturnos (KLOBUCHAR et al., 1991).

Estudos também foram feitos sobre a ocorrência de irregularidades devido ao ciclo solar. Sahai et al. (2000) verificaram que, no período do mínimo solar, o número de bolhas era menor que no máximo. Os autores também observaram que as maiores ocorrências dessas irregularidades foi durante o período de outubro a março no setor brasileiro. Padrões de bolhas durante meses de verão também foram observados em períodos de máximo e mínimo solar. Maiores detalhes são fornecidos nas seções seguintes.

### 2.4.1 Anomalia de Ionização Equatorial

A Figura 2.5 mostra o mecanismo do fenômeno denominado EIA ou Anomalia de Appleton. Na Figura 2.5, estão indicados o equador magnético, o campo elétrico  $\vec{E}$  e as linhas de campo magnéticas  $\vec{B}$ . Os campos elétrico e magnético resultam em uma deriva vertical do plasma ( $\vec{E} \times \vec{B}$ ) que o leva para altitudes elevadas durante o dia. A presença do gradiente de pressão e da gravidade faz com que este plasma percorra as linhas de campo magnético até atingir  $\sim 20^\circ$  norte/sul. A intensificação do plasma nesta região é o que denomina este fenômeno (KELLEY, 2009).

Figura 2.5 - Anomalia de Ionização Equatorial.



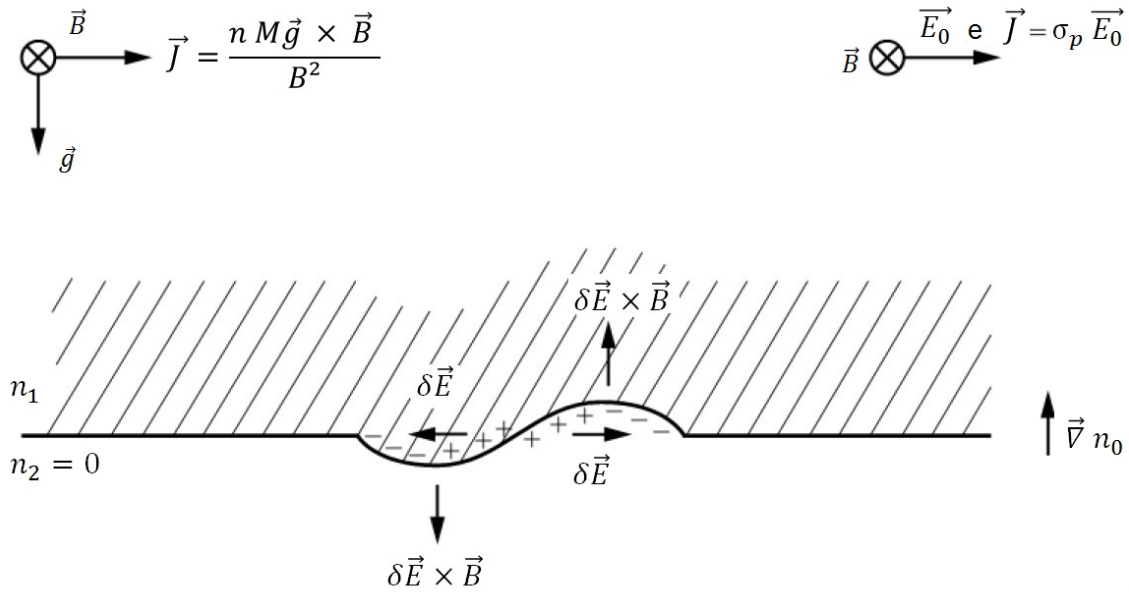
Fonte: Adaptada de Kelley (2009).

### 2.4.2 Bolha de plasma equatorial

Como mencionado anteriormente, as bolhas de plasma após o pôr do sol possuem características próprias e já foram exaustivamente estudadas por diversos autores (NISHIOKA et al., 2008; BURKE et al., 2004; BARROS et al., 2018; KEPKAR et al.,

2020). Contudo, os mecanismos de geração das bolhas de plasma pós-meia noite e pré-amanhecer ainda são pouco conhecidos (OTSUKA, 2018; ZAKHARENKOVA et al., 2019). A explicação física mais aceita para a formação dessas irregularidades é o mecanismo da instabilidade Rayleigh-Taylor mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Mecanismo da instabilidade Rayleigh-Taylor.



Fonte: Adaptada de Kelley (2009).

Considera-se o campo magnético  $\vec{B}$  e um gradiente de densidade direcionado para cima, onde observam-se dois fluidos de densidade  $n_1$  e  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ). Supondo que haja qualquer perturbação entre as fronteiras que separam estes dois fluidos, o campo magnético, juntamente com os efeitos da gravidade, faz fluir uma corrente na direção  $x$ , conforme a Equação 2.8:

$$\vec{J}_x = \frac{nm \vec{g} \times \vec{B}}{B^2}, \quad (2.8)$$

em que  $n$  é a densidade do plasma,  $m$  é a massa,  $g$  é a gravidade e  $\vec{B}$  o campo magnético.

A perturbação nas fronteiras faz divergir esta corrente, em consequência, ocorre



um acúmulo de cargas nas bordas entre as fronteiras dos fluidos. Esta separação de cargas cria um campo elétrico de polarização ( $\vec{\delta E}$ ) que, na presença do campo magnético  $\vec{B}$ , gera a deriva do plasma ( $\vec{\delta E} \times \vec{B}$ ). Esta deriva forma as bolhas de plasma (KELLEY, 2009). A taxa de crescimento da instabilidade RTI é calculada no Anexo I.

### 2.4.3 EPB após o pôr do sol

As EPBs após o pôr do sol foram estudadas por diversos autores ao longo dos anos e utilizando diferentes técnicas para sua detecção, tais como radares VHF (TSUNODA, 1981; ABDU et al., 2009b), ionossondas (ABDU et al., 2003; ABDU et al., 2012), imageadores (PIMENTA et al., 2003; PAULINO et al., 2011), receptores GNSS (TAKAHASHI et al., 2014; TAKAHASHI et al., 2015), entre outros.

Deng et al. (2015) investigaram as distribuições temporais e espaciais de depleções no TEC com cintilações e ROTI na China. Os dados foram coletados de duas estações receptoras de GPS no sul da China de 2011 a 2012. Os resultados revelaram que máximos de distribuição de depleções no TEC foram observados nos meses de equinócio de primavera e de outono. Durante as horas que antecedem a meia-noite e na região da crista norte da EIA, as depleções no TEC atingiram aproximadamente 20 TECU e coincidiram com as ocorrências de cintilações intensas ( $S4 > 0,5$ ), bem como com valores de ROTI em torno de 2 TECU/min. Já na borda externa da crista da EIA, somente valores de TEC  $< 10$  TECU foram registrados com um pequeno ROTI  $< 1$  TECU/min e sem cintilação. Os resultados sugerem que a variabilidade temporal e espacial das depleções do TEC durante os meses do equinócio sobre o sul da China poderia ser considerada como representante da fase de evolução das bolhas de plasma durante as horas após o pôr do sol.

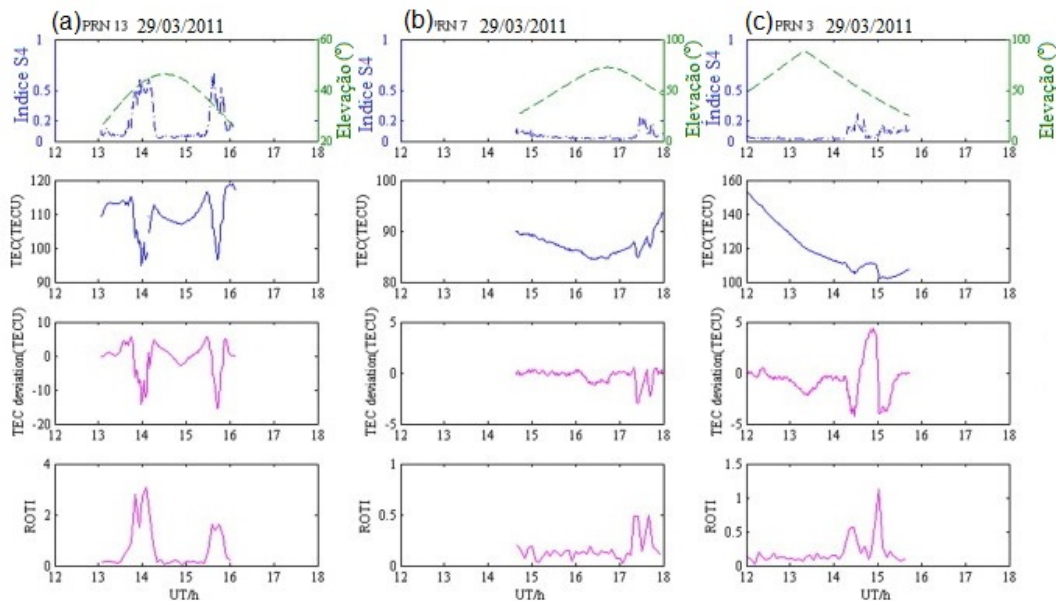
No trabalho de Deng et al. (2015), o índice S4 foi utilizado para monitorar as cintilações e foi definido como o desvio padrão normalizado da intensidade de potência do sinal recebido. Considerou-se a cintilação fraca quando o índice S4 estava entre 0,2 e 0,5 ( $0,2 < S4 < 0,5$ ) e intensa quando  $S4 \geq 0,5$ . Cintilações de  $S4 \leq 0,2$  foram desprezadas. Foram considerados apenas ângulos de elevação maiores que  $30^\circ$  para excluir quaisquer dados de efeitos de cintilação não-ionosféricos como multicaminho.

A Figura 2.7 mostra exemplos dos resultados obtidos por Deng et al. (2015) entre as 12 e 18:00 UT (eixo horizontal), no dia 29 de março de 2011, relativos aos satélites com PRN (do inglês, “Pseudo-Random Code”) 13, 7, e 3. O painel do topo na Figura 2.7-a mostra a elevação e o índice S4 relativo ao PRN 13. Duas partes com

intensa cintilação ( $S4 > 0,5$ ) foram registradas às 13:30-14:15 UT e às 15:30-16:00 UT, cerca de  $30^\circ$  acima do horizonte. Os desvios padrão do TEC e valores de TEC estão descritos no segundo e terceiro painéis (de cima para baixo) da Figura 2.7-a. Nestes dois painéis, duas depleções no TEC bem separadas são identificadas e correspondem a duas intensas cintilações. Os valores de TEC e duração das duas depleções excederam 20 TECU e 30 min, respectivamente.

As séries temporais de ROTI mostradas no quarto painel (inferior) da Figura 2.7-a indicam que os dois grandes valores de ROTI são aproximadamente 3 TECU/min e 2 TECU/min. A Figura 2.7-a sugeriu que depleções no TEC coincidiram, bem como as ocorrências de cintilações intensas ( $S4 > 0,5$ ) e grandes valores de ROTI ( $> 2$  TECU/min).

Figura 2.7 - Índice S4 e elevação, TEC, dTEC e ROTI para (a) PRN 13, (b) PRN 7 e (c) PRN 3 para o dia 29 de março de 2011.



Fonte: Adaptada de Deng et al. (2015).

Semelhante ao disposto na Figura 2.7-a, a Figura 2.7-b mostra os resultados em 29 de março de 2011 relativos ao PRN 7. Como é evidente a partir do segundo e terceiro painéis da Figura 2.7-b, houve duas depleções consecutivas do TEC com valores de aproximadamente 5 TECU entre 17:20-17:50 UT (após a meia noite 01:20-

01:50 LT), quando não ocorreu cintilação. Além disso, houve dois pequenos picos de ROTI durante o mesmo período de tempo, com valores próximos a 0,6 TECU/min (Figura 2.7-b no painel inferior).

Finalmente, a Figura 2.7-c mostra os resultados do PRN 3 às 14:10-15:40 UT (antes da meia noite 22:10-23:40 LT). Uma depleção do TEC com duas pequenas flutuações do TEC foi detectada, com valor de aproximadamente 5 TECU. Nenhuma cintilação foi detectada, mas houve dois picos de ROTI com valores em 0,5 TECU/min e 1 TECU/min.

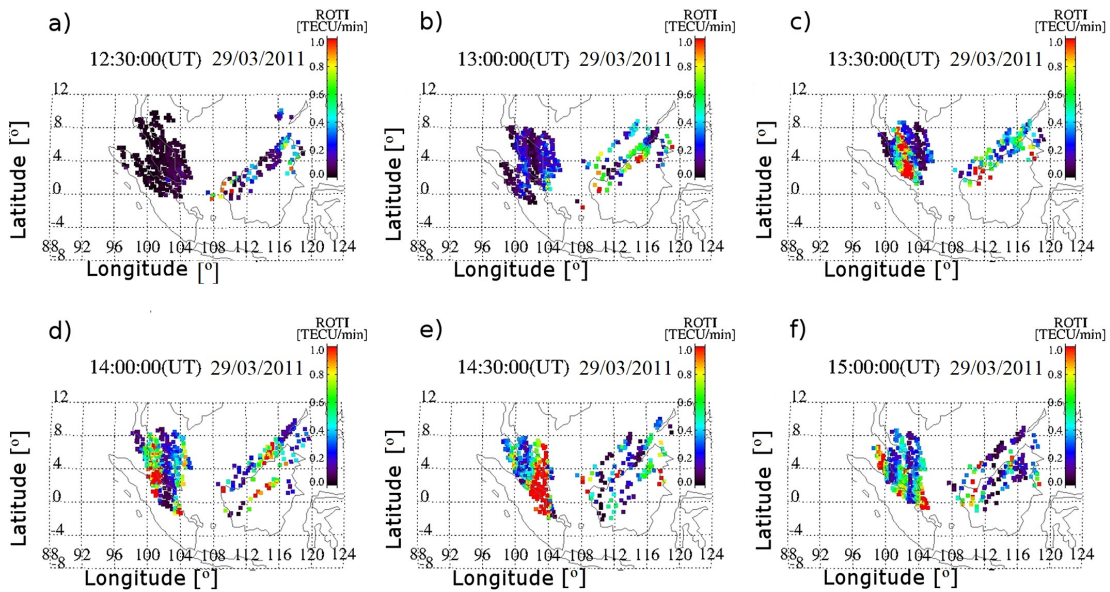
Em resumo, o trabalho de Deng et al. (2015) apresentou sistematicamente as distribuições temporais e espaciais das depleções do TEC com cintilações de banda L e ROTI no sul da China. Foram analisadas as dependências sazonais e latitudinais das depleções do TEC. Entre suas conclusões, os máximos de distribuição das depleções de TEC foram observados nos meses de equinócio de primavera e de outono (março, abril, setembro e outubro) e a maior parte das depleções do TEC estava confinada na região com latitudes geográficas de 17° a 27° N (crista norte da EIA).

Além disso, durante as horas antes da meia noite, os valores de TEC coincidiram com as ocorrências de cintilações intensas e grandes valores de ROTI nos meses de equinócio. Mas, em torno de meia-noite, ou na borda externa da crista norte da EIA (variando de 24,0° a 27,0° N), as depleções de TEC foram registradas com pequenos valores de ROTI e sem cintilação nos meses de equinócio, e em poucos dias durante os meses do solstício. Além disso, durante os equinócios em 2011-2012 houve algumas depleções do TEC, coincidindo com intensas cintilações e ROTI variando de 0,4 a 2,2 TECU/min.

Do estudo de Deng et al. (2015), descobriu-se que a relação entre depleção do TEC, ROTI e cintilação variava com a latitude e o tempo de início das depleções de TEC. Depleções no TEC que coincidiram com as ocorrências de cintilações intensas e grandes valores de ROTI nos meses de equinócio foram atribuídos a bolhas de plasma.

Buhari et al. (2017) mostraram a ocorrência de bolhas de plasma na região da Malásia. Neste trabalho foi apresentada a dependência das EPBs com a atividade solar e condições geomagnéticas.

Figura 2.8 - Mapas de ROTI com intervalo de 30 minutos de 12:30 UT a 15:00 UT em 29 de março de 2011.



Fonte: Adaptada de Buhari et al. (2017).

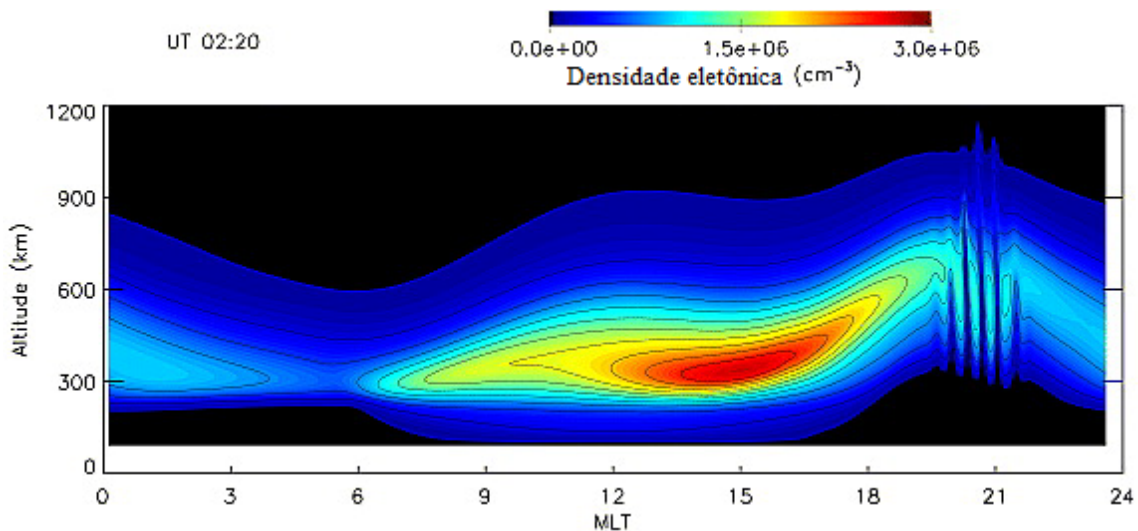
Na Figura 2.8 está apresentada uma sequência de mapas de ROTI, cobrindo a faixa latitudinal de  $-8$  a  $12^\circ$  e faixa longitudinal  $88^\circ$  a  $124^\circ$ , com intervalo de 30 minutos, de 12:30 UT a 15:00 UT, no dia 29 de março de 2011, mostrando a evolução no tempo dos mapas de ROTI. Nesta, destaca-se o aumento do ROTI no lado direito da Figura 2.8-a, o qual está associado a irregularidades do plasma. Após 30 min, a Figura 2.8-b revela um ligeiro aumento do ROTI de aproximadamente  $0,2$  TECU/min, no lado esquerdo do mapa. O mapa na Figura 2.8-c mostra um alongamento nas direções norte-sul com valores elevados de ROTI. Na Figura 2.8-d e Figura 2.8-e aparecem duas estruturas de EPB com uma distância entre bordas menor que 200 km que se propagam para leste. Na Figura 2.8-f aparecem três estruturas de EPB, de aproximadamente 200 km de distância entre elas.

Em resumo, o trabalho de Buhari et al. (2017) mostrou que as EPBs tendem a ocorrer no equinócio, durante anos de alta atividade solar, sobre a região da Malásia. Os resultados indicaram que uma forte perturbação é um pré-requisito para o desenvolvimento dos EPBs durante anos de baixa atividade solar.

As bolhas de plasma também são estudadas via simulação numérica ou modelagem. Um exemplo é o SAMI3, que é um modelo tridimensional da ionosfera, sendo possível

extrair a densidade eletrônica, como observado na Figura 2.9 (HUBA; JOYCE, 2010). A Figura 2.9 mostra a variação temporal do perfil de densidade eletrônico na forma de um mapa de altitude por hora local magnética. O modelo é consistente com o comportamento geral da ionosfera, em que a densidade eletrônica começa a se elevar nas horas subsequentes ao nascer do sol e o máximo ocorre em 15 MLT (do inglês, “Magnetic Local Time”). As depleções do plasma também são observadas na Figura 2.9 após as 20 MLT, depois do pôr do sol. Neste horário, a ionosfera é levada para altas altitudes nos horários do PRE e, conseqüentemente, há o desenvolvimento da RTI, gerando as bolhas de plasma (HUBA; JOYCE, 2010).

Figura 2.9 - Mapa de contorno da densidade eletrônica em função de MLT.



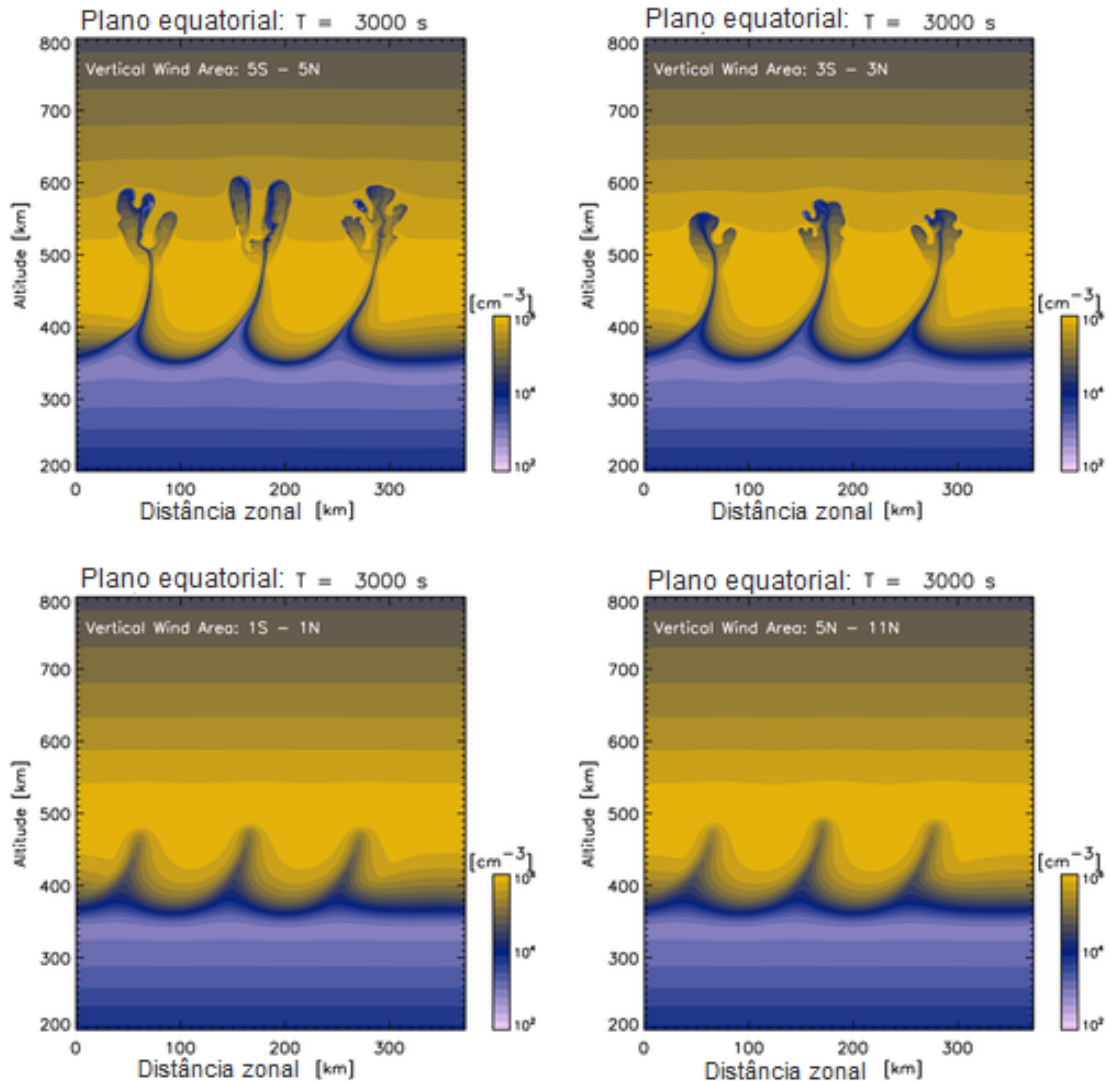
Fonte: Adaptada de Huba e Joyce (2010).

Huba e Joyce (2010) apresentaram o primeiro estudo com simulação envolvendo a evolução global das EPBs usando um modelo 3D ionosférico. O intuito deste modelo é simular bolhas de plasma incluindo o campo elétrico do dínamo proveniente do vento neutro e o campo elétrico associado as EPBs. Os autores mostraram resultados consistentes com os dados observacionais, mostrando que bolhas podem ser geradas após o pôr do sol por perturbações no plasma ionosférico.

Ademais, Yokoyama et al. (2014) desenvolveram um modelo 3D de alta resolução (do inglês, “High-Resolution Bubble” - HIRB) para investigar o desenvolvimento das bolhas de plasma. Yokoyama et al. (2019) usaram este modelo e mostraram a dependência do crescimento de EPBs com o vento vertical latitudinal. A Figura 2.10

mostra a evolução das EPBs com o uso do modelo HIRB em mapas de altitude (km) por distância zonal (km), a escala de cores está à direita de cada painel. Estes autores mostraram que os ventos verticais podem desenvolver EPBs. De fato, o trabalho de [Yokoyama et al. \(2019\)](#) obteve como principal resultado que as perturbações do vento vertical podem resultar em ondas de gravidade na termosfera e esta desencadeia o mecanismo RTI, que gera as bolhas de plasma.

Figura 2.10 - Distribuição da densidade do plasma em um plano equatorial magnético em  $T = 3000$  s para diferentes forças do vento latitudinal vertical, conforme indicado no topo de cada painel.



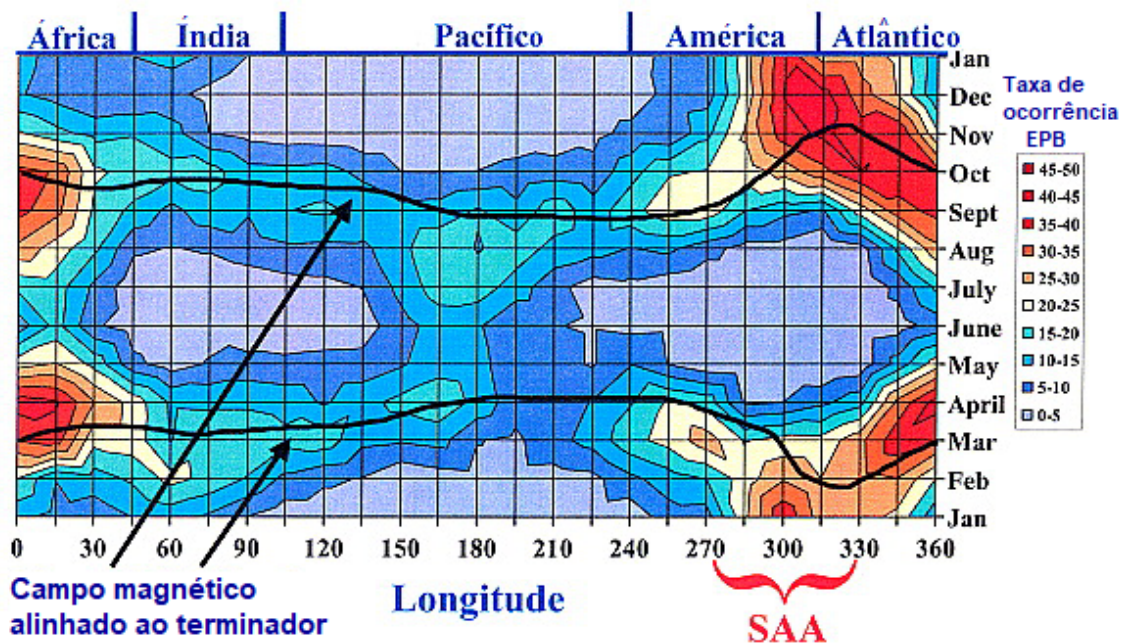
Fonte: Adaptada de Yokoyama et al. (2019).

Nishioka et al. (2008) realizaram um estudo de ocorrência das bolhas de plasma com a utilização de dados de receptores GPS. Este possui uma vantagem com relação aos demais instrumentos, pois abrange áreas extensas. Este estudo utilizou as taxas de ocorrência semestrais de 2000 a 2006 para estudar a variação ano a ano dos períodos de alta e baixa atividade solar. Os autores destacaram que, na África e na Ásia, as taxas de ocorrência no solstício de junho foram maiores que as do solstício de

dezembro. No Pacífico Oriental e Atlântico, as ocorrências do solstício de dezembro foram maiores do que as de junho. Na configuração deste trabalho, o Brasil está compreendido nas regiões do Leste do Pacífico e Atlântico.

Adicionalmente, Burke et al. (2004) também estudaram a taxa de ocorrência das bolhas de plasma de forma global, utilizando satélites de órbitas polares (do inglês, “Defense Meteorological Satellite Program” - DMSP) e o satélite Chinês (do inglês, “Republic of China Satellite” - ROCSAT-1). Os autores observaram que a Anomalia Magnética da América do Sul (do inglês, “South America Magnetic Anomaly” - SAMA), que, à época, denominava-se Anomalia do Atlântico Sul (do inglês, “South Atlantic Anomaly” - SAA) possui influência na taxa de crescimento RTI. A Figura 2.11 mostra a ocorrência das bolhas de plasma feitas utilizando o DMSP em função da longitude e meses do ano entre 1989 e 2002.

Figura 2.11 - Ocorrências das EPBs separadas em setores que compreende a África, Índia, Pacífico, América e Atlântico, respectivamente em função dos meses do ano.



Fonte: Adaptada de Burke et al. (2004).

A Figura 2.11 mostra claramente a variabilidade longitudinal nas taxas de ocorrência das EPBs. De acordo com Burke et al. (2004), nenhuma EPB foi detectada pelo DMSP durante os anos de mínimo solar (1996 e 1997). Observaram-se baixas taxas

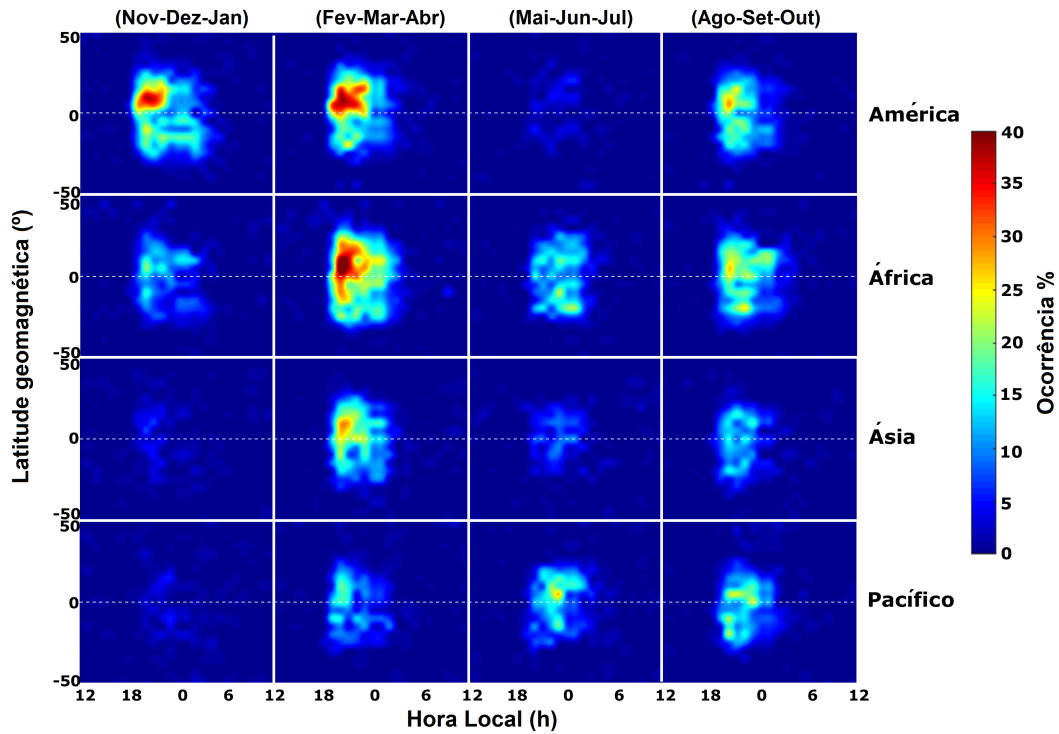


de ocorrência, detectadas por DMSP e no ROCSAT-1, no oeste da América do Sul, os autores sugerem que forças ainda não explicadas atuam nessas longitudes interferem na ocorrência das EPB. Também destacaram que 40% dessas EPBs podem estar relacionadas a eventos de PPEF.

[Kepkar et al. \(2020\)](#) mostraram as ocorrências de bolha de plasma utilizando rádio ocultação (RO). Eles analisaram a ocorrência em mapas de contorno dividido por continentes, e separadas por sazonalidade.

A [Figura 2.12](#) mostra a ocorrência das bolhas de plasma entre os anos de 2012 a 2016, em diferentes regiões em hora local (LT) por latitude geomagnética, em que a linha branca pontilhada é o equador magnético. Para os meses de novembro a janeiro, fevereiro a abril, maio a julho e agosto a outubro, para as regiões da América, África, Ásia e Pacífico, cuja escala de cores representa a ocorrência percentual. Os autores mostraram que há forte dependência com o PRE, que apresenta magnitude maior na deriva vertical do plasma em períodos de alta atividade solar em comparação com baixa atividade solar.

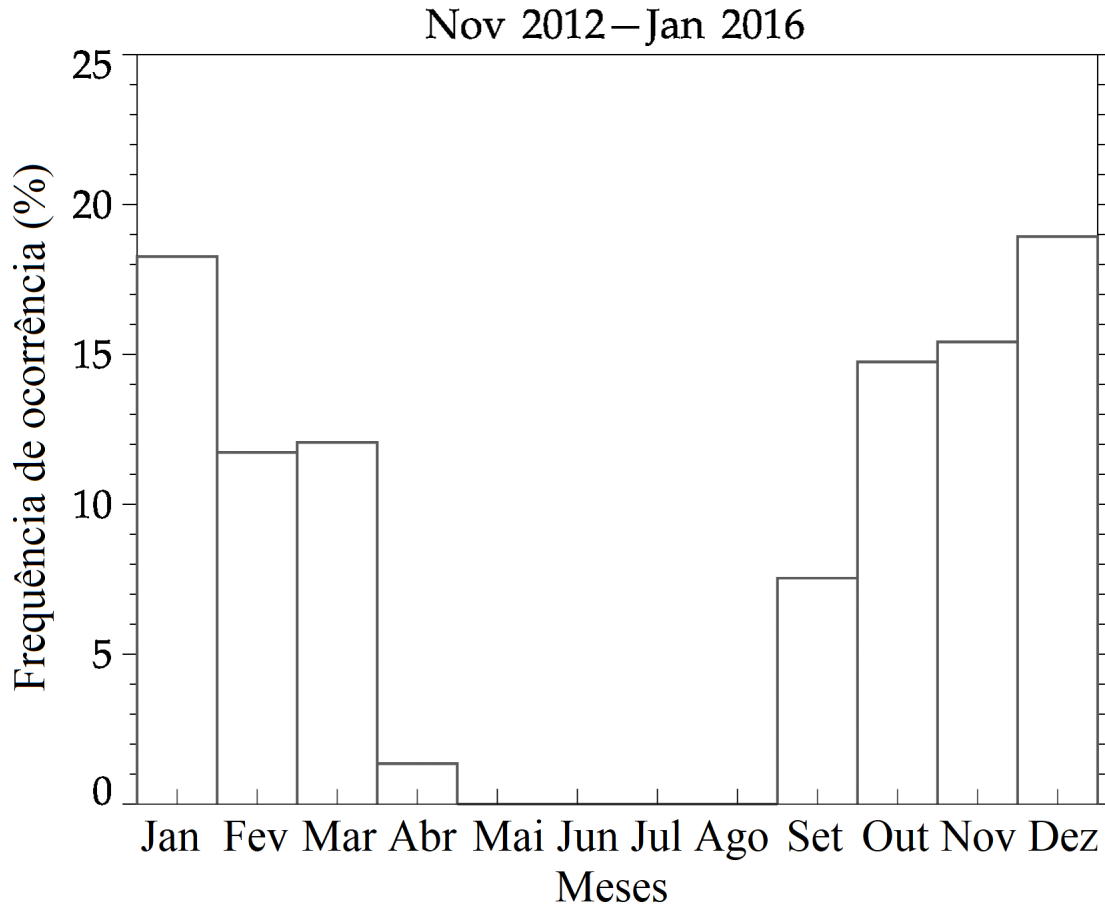
Figura 2.12 - Ocorrências das bolhas de plasma distribuídas em mapas de contorno de latitude geomagnética versus hora local, separadas por região, América, Ásia, África e Pacífico e distribuída conforme a sazonalidade.



Fonte: Adaptada de Kepkar et al. (2020).

Alguns trabalhos de ocorrência de bolhas também foram desenvolvidos em estações locais no Brasil utilizando imageador All-sky (e.g. em São João do Cariri (AGYEI-YEBOAH et al., 2019)). Barros et al. (2018) analisaram mapas de TEC na região brasileira, evidenciando que os meses entre abril e agosto tiveram menores ocorrências de bolha entre 2012 a 2016, como mostra a Figura 2.13. Esta figura apresenta a frequência de ocorrência mês a mês para o conjunto de observações realizadas entre novembro de 2012 a janeiro de 2016.

Figura 2.13 - Ocorrências das bolhas de plasma conforme os meses dos anos, do período de Novembro de 2012 a Janeiro de 2016.



Fonte: Adaptada de Barros et al. (2018).

Finalmente, é importante salientar que, além da ocorrência de bolhas de plasma, Barros et al. (2018) observaram que, em média, as distâncias entre as bolhas foram de  $920km$  no equador, e as maiores distâncias observadas foram de  $\sim 2000km$ , a velocidade de deriva zonal dessas bolhas foi  $\sim 123m/s$  no equador.

## 2.5 Tempestades geomagnéticas

Tempestades geomagnéticas são, geralmente, marcadas pelo aumento súbito (do inglês, “Storm Sudden Commencement” - SSC) da intensidade do campo geomagnético devido ao impacto do vento solar com a magnetosfera, a qual comprime suas linhas de campo e gera um aumento da pressão dinâmica do vento solar. Essa fase é conhecida como a fase inicial da tempestade. O impacto do vento solar faz com que

haja penetração de grande quantidade de energia no sistema ionosfera-termosfera de latitudes mais altas. Essa energia na atmosfera superior ocasiona a precipitação de partículas, gerando correntes e campos elétricos intensificados (GONZALEZ et al., 1994). Em seguida, há uma intensificação na corrente anelar, em consequência da penetração de partículas na cauda magnetosférica, que produz uma depressão na componente H do campo geomagnético. Essa fase é denominada como fase principal da tempestade e pode possuir duração variável de meia hora até várias horas (GONZALEZ et al., 1994). A fase de recuperação é caracterizada pelo decaimento da corrente de anel (perda das partículas energéticas) devido a alguns fatores, tais como: troca de carga, colisões de Coulomb, interações onda-partícula e convecção de partículas energéticas da corrente de anel fora da magnetopausa (GOSLING et al., 1991). As fases de uma tempestade geomagnética são mostradas na Figura 2.14, em um gráfico de variação na intensidade de H por tempo.

Figura 2.14 - Fases da tempestade geomagnética.



Fonte: Adaptada de Paula (1987).

O resultado da interação entre o vento solar e a magnetosfera depositando energia na ionosfera e na magnetosfera na região auroral pelo lado noturno é conhecido como subtempestade. Em alguns estudos as tempestades magnéticas são associadas a várias subtempestades geomagnéticas (GONZALEZ et al., 1994).

A Tabela 2.1 mostra a classificação da tempestade segundo o índice Dst (do inglês, “Disturbance storm time”) (GONZALEZ et al., 1994):

Tabela 2.1 - Classificação das tempestades segundo índice Dst.

Tempestade	Dst (nT)
Fraca	$-50 < Dst \leq -30$
Moderada	$-100 < Dst \leq -50$
Intensa	$Dst \leq -100$

Outro índice também utilizado é o índice SYM-H (do inglês, “Symmetric H”) que é similar ao índice Dst, ou seja, uma medida da intensidade da corrente anelar simétrica. Contudo, este índice possui resolução temporal de 1 min (IYEMORI et al., 2010. Disponível em: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>).

Ademais, há o índice Kp (do inglês, “Planetary Index”), que representa a média do índice K (do alemão, “Kennziffer” e do inglês, “characteristic digit”). Este possui uma escala logarítmica e é obtido em 13 observatórios subaurorais nos intervalos de 3 horas (BARTELS et al., 1939). O índice Kp possibilita a quantificação das perturbações devido à obtenção de um número inteiro que varia de 0 a 9, sendo que os valores acima de 5 representam tempestades geomagnéticas e, abaixo de 3 está relacionado a períodos calmos. Outro índice que notifica tempestades geomagnéticas é o Ap, que possui uma escala de 0 a 400 e resolução temporal de 3 horas.

Finalmente, o índice AE representa a atividade global dos eletrojetos aurorais. Este possui medidas realizadas nos laboratórios do hemisfério norte e é proveniente das variações da componente horizontal do campo geomagnético (DAVIS; SUGIURA, 1966). É calculado um valor base para cada mês, obtido pela média dos dados coletados nas estações para os cinco dias mais calmos (SAROSO et al., 1992. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/43F627H>). O índice AU corresponde aos maiores valores selecionados, representando a mais intensa corrente dos eletrojetos aurorais para leste e AL dos eletrojetos aurorais para oeste, correspondendo aos menores valores selecionados. Pode-se obter o valor do índice AE segundo a Equação 2.9:

$$AE = AU - AL. \quad (2.9)$$

A resposta de uma tempestade geomagnética na ionosfera pode causar diversos efeitos, tais como: penetração de campos elétricos (HUANG et al., 2005) e perturbação nos ventos, que causa o dínamo perturbado (BLANC; RICHMOND, 1980). Além disso, estas tempestades podem afetar a composição da atmosfera neutra, interferir na EIA e nos ventos neutros (PRÖLSS, 2017).

### 2.5.1 Penetração de campo elétrico

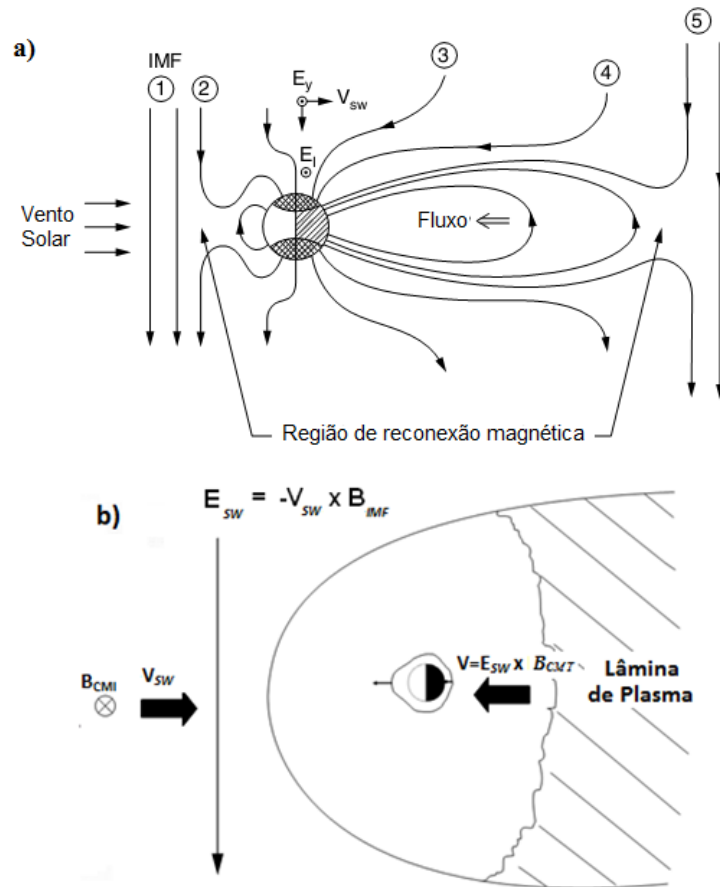
As principais fontes de mudanças na eletrodinâmica da ionosfera são provenientes de campos elétricos perturbados. Existem dois mecanismos importantes que provocam essas mudanças, a saber o dínamo magnetosférico, que faz com que penetre campos elétricos para baixas latitudes devido a mudanças na região polar (SPIRO et al., 1988), e o dínamo perturbado ionosférico, que é gerado devido ao aquecimento Joule na região auroral (BLANC; RICHMOND, 1980). A geração desses campos será explicada a seguir. O campo elétrico gerado devido ao impacto do vento solar com a magnetosfera terrestre pode ser dado por (KELLEY, 2009):

$$\vec{E}_{sw} = -\vec{V}_{sw} \times \vec{B}_{IMF}, \quad (2.10)$$

em que  $\vec{E}_{sw}$  é o campo elétrico interplanetário,  $\vec{V}_{sw}$  é a velocidade do vento solar e  $\vec{B}_{IMF}$  é o campo magnético interplanetário.

Considerando o Campo Magnético Interplanetário (do inglês, “Interplanetary Magnetic Field” - IMF) voltado para sul, na região polar desenvolve-se um campo elétrico amanhecer-anoitecer, facilitando sua penetração nas latitudes equatoriais (SOBRAL et al., 1997). A Figura 2.15 apresenta ilustrações das reconexões magnéticas, contendo seus campos elétricos, campo magnético terrestre e ventos pertencentes ao sistema. A reconexão magnética, como mostra a Figura 2.15(a), gera o transporte do plasma através das linhas de campo magnético. Este transporte é dado por  $\vec{E} \times \vec{B}$ . Nesta equação,  $\vec{E}$  é o campo elétrico conhecido como “undershielding”, o qual é direcionado para leste durante o dia. Ele penetra na região equatorial do lado diurno, fazendo com que o plasma atinja elevadas altitudes. Esse processo ocorre devido à deriva ( $\vec{E}_{sw} \times \vec{B}_{EMF}$ ), onde  $\vec{B}_{EMF}$  é o campo magnético da Terra. De forma similar, durante a noite o campo elétrico “undershielding” é para oeste, penetra na ionosfera equatorial do lado noturno, e a deriva faz o plasma atingir baixas altitudes (TSURUTANI et al., 2008), como mostrado na Figura 2.15(b).

Figura 2.15 - Penetração direta de campos elétricos.



Fonte: Adaptada de Tsurutani et al. (2008).

O campo elétrico “overshielding” é devido a uma abrupta invertida para norte a componente  $z$  do  $\vec{B}_{IMF}$  (IMF  $B_z$ ), fazendo com que o campo elétrico de blindagem penetre no equador para oeste no lado diurno, e para leste do lado noturno (KELLEY et al., 1979). A penetração de campo elétrico é conhecida também como penetração instantânea de campo elétrico (do inglês, “Prompt Penetration Electric Fields” - PPEF) (WEI et al., 2015).

Portanto, as respostas das perturbações provenientes das tempestades geomagnéticas, ocasionadas devido à grande quantidade de energia que é inserida na atmosfera superior, podem ser denominadas tempestades ionosféricas. Estas produzem mudanças no comportamento da dinâmica da ionosfera, principalmente na densidade eletrônica (FULLER-ROWELL et al., 1994).

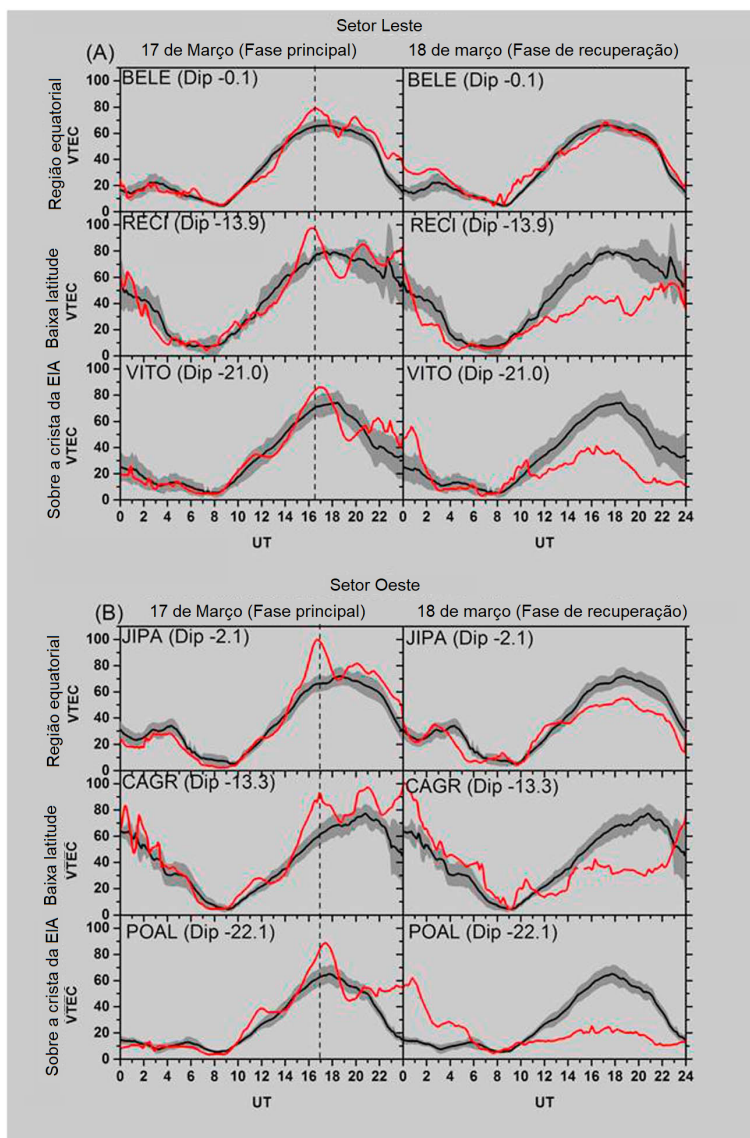
As tempestades ionosféricas podem ser divididas em fases positiva e negativa. A

fase positiva é definida com um acréscimo na densidade eletrônica, comparado a dias geomagneticamente calmos. A fase negativa, de forma similar, está associada ao decréscimo na densidade eletrônica. A fase positiva é comumente observada em altas e médias latitudes, já a fase negativa predomina em baixas latitudes (MATSUSHITA, 1959).

Fagundes et al. (2016) estudaram os efeitos ionosféricos na região brasileira para a tempestade ocorrida no dia 17 de março de 2015 (St. Patrick). Eles observaram um forte efeito ionosférico positivo durante a fase principal da tempestade e um efeito negativo ionosférico durante a fase de recuperação, que pode ser visto na [Figura 2.16](#). De fato, a [Figura 2.16](#) mostra as variações diurnas do VTEC (linhas sólidas vermelhas) para o setor leste brasileiro (a) e para o setor oeste brasileiro (b) durante as fases principais (17 de março) e de recuperação (18 de março), ao longo das horas do dia em UT. A média de dias calmos do VTEC e o desvio padrão da média de  $\pm 1$  são mostrados como linhas sólidas pretas e como faixas cinzas, respectivamente. As linhas tracejadas verticais indicam a primeira tempestade ionosférica positiva do VTEC, por volta das 17:00 UT.



Figura 2.16 - Variações diurnas do VTEC para o leste (a) e oeste (b) brasileiro.



Fonte: Adaptada de Fagundes et al. (2016).

Ainda na Figura 2.16, o primeiro máximo diurno ocorreu em 17 de março, às 17:00 UT, e é caracterizado por um pico positivo indicado por linhas tracejadas verticais. Este primeiro máximo diurno aconteceu quase ao mesmo tempo do equador, para além da crista da EIA, e do setor leste-oeste brasileiro, com diferentes intensidades. Isto indica que esta primeira perturbação do pico da tempestade ionosférica positiva foi claramente produzida por PPEF e não por quaisquer outras fontes. Fagundes et al. (2016) sugeriram que um campo elétrico para leste penetrou em regiões equatoriais e de baixa latitude elevando a região F onde as taxas de recombinação são mais baixas e, assim, ocorreu uma tempestade ionosférica positiva.

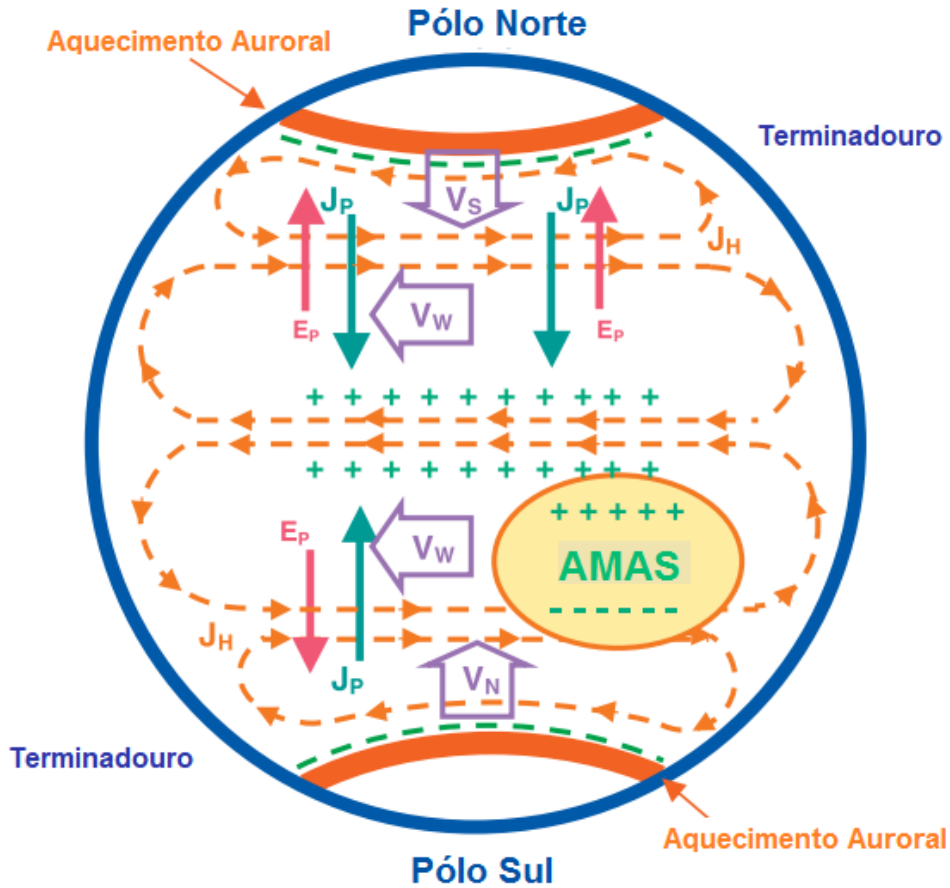
Segundo Lima et al. (2004), para distinguir se a tempestade ionosférica positiva foi produzida por Distúrbios Ionosféricos Propagantes (do inglês, “Traveling Ionospheric Disturbance” - TID) ou PPEF é importante observar as mudanças ao longo do sentido meridional. No caso de TIDs, uma propagação meridional da onda com uma velocidade de cerca de 100 a 400 m/s deve ser observada. Portanto, a perturbação ocorre, primeiro, além da crista da EIA e, algum tempo depois, nas baixas latitudes e, finalmente, na região equatorial (LIMA et al., 2004; ABREU et al., 2010).

Esse estudo de Lima et al. (2004) também mostrou que as tempestades ionosféricas positivas têm três picos e, provavelmente, estão relacionadas com uma penetração de campo elétrico orientada para o leste (PPEF) que eleva a região F, onde as taxas de recombinação são mais baixas. A tempestade ionosférica positiva perturbou uma extensa amplitude longitudinal ( $\sim 30^\circ$ ) e latitudinal (do equador para além da crista da EIA).

### 2.5.2 Dínamo perturbado

O dínamo perturbado ocorre em períodos perturbados e pode ser explicado conforme a Figura 2.17, a qual mostra um esquema ilustrativo do processo. Quando a tempestade magnética atinge a Terra, há o aquecimento auroral nos polos, este aquecimento cria ventos termosféricos perturbados que se direcionam para o equador (BLANC; RICHMOND, 1980). E, devido ao efeito de rotação da Terra, denominado efeito de Coriolis, os ventos adquirem uma velocidade para oeste. Em médias latitudes, o vento termosférico para oeste criará uma corrente Pedersen ( $\vec{J}_P$ ) em direção ao equador, o que resulta em uma separação de cargas, e essa separação cria um campo elétrico de polarização ( $\vec{E}_P$ ), direcionado para os pólos. O  $E_P$  na presença do campo magnético da Terra ( $\vec{B}$ ) produzirá uma deriva do plasma para oeste e corrente do tipo Hall ( $\vec{J}_H$ ) para leste. No terminador solar a corrente Hall é interrompida, formando, assim, dois vórtices de corrente. Essa interrupção produz um campo elétrico no amanhecer que possui polaridade contrária ao campo elétrico em períodos calmos (ABDU et al., 2006).

Figura 2.17 - Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.



Fonte: Adaptada de Abdu et al. (2006).

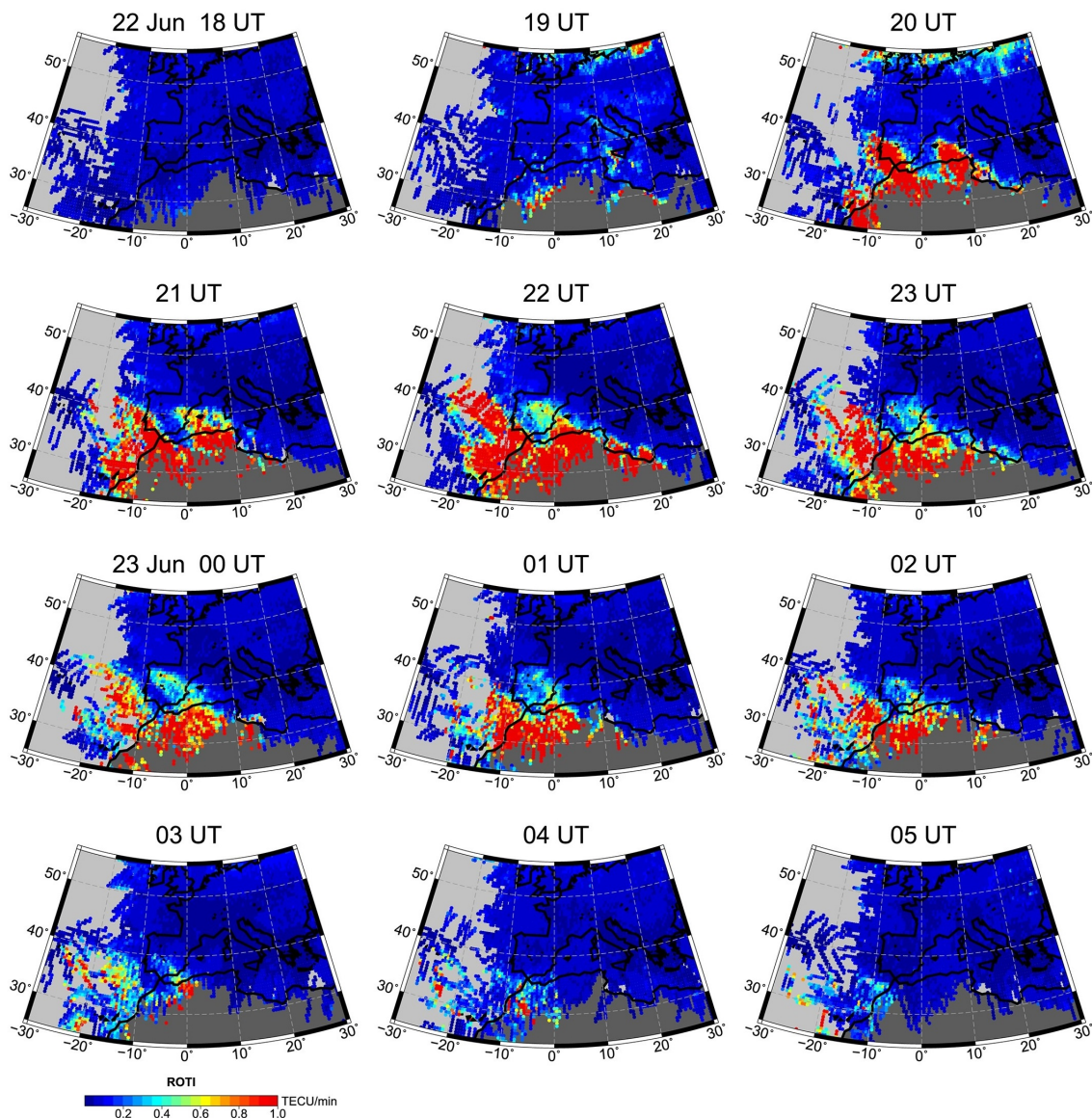
Os campos elétricos modificados devido à superposição de campos elétricos da magnetosfera ou a alteração do campo elétrico do dínamo pelos ventos perturbados, podem gerar perturbações na EIA (PRÖLSS, 2017).

### 2.5.3 Geração de EPB durante tempestades geomagnéticas

As bolhas de plasma podem ser geradas em períodos de tempestades magnéticas. Existem, na literatura, alguns estudos sobre o aparecimento de irregularidades/EPBs em diferentes regiões do globo durante tempestades magnéticas. Cherniak e Zakharenkova (2016) mostraram EPBs registradas em latitudes médias na Europa, nunca antes detectadas. Este estudo foi feito durante uma tempestade geomagnética ocorrida entre os dias 22 e 23 de junho de 2015. Os PPEF causaram o aumento significativo no plasma após o pôr do sol em baixas latitudes da África Ocidental e bolhas

de plasma de larga escala estendidas em direção à Europa. A Figura 2.18 mostra mapas de ROTI na região da Europa, entre 18:00 UT e 05:00 UT, com intervalos de 1 h, de 22 a 23 de junho de 2015.

Figura 2.18 - Mapas de ROTI na Europa com intervalo de 1 h, entre 18:00 UT e 05:00 UT de 22 a 23 de junho de 2015.



Fonte: Adaptada de Cherniak e Zakharenkova (2016).

A Figura 2.18 mostra a evolução das irregularidades ionosféricas em um quadro de coordenadas geográficas. Os valores de ROTI abaixo de 0,2 TECU/min (azul es-

curo) representam irregularidades ionosféricas ausentes ou muito fracas. Os valores de ROTI maiores que 0,8 TECU/min (laranja e vermelho) correspondem à intensa ocorrência de irregularidades ionosféricas. O primeiro mapa, às 18:00 UT, mostra uma situação normal para latitudes médias na Europa, com irregularidades ionosféricas extremamente fracas (ou ausentes) em toda a área. Após o SSC, às 18:33 UT, há uma intensificação da atividade auroral. As estações GNSS europeias registraram a ocorrência de intensas irregularidades ionosféricas de origem auroral entre 18:40 UT e 20:20 UT. As assinaturas dessas irregularidades foram identificadas no ROTI, entre 19:00 UT e 20:00 UT. Além disso, foi vista no mapa de ROTI, às 19:00 UT, a ocorrência das primeiras assinaturas de irregularidades originárias da direção equatorial. No mapa de ROTI, às 20:00 UT, essas irregularidades ionosféricas atravessaram a costa africana e se alongaram em direção a Espanha, Portugal e Ilhas Canárias (CHERNIAK; ZAKHARENKOVA, 2016).

Adicionalmente, em períodos de tempestades magnéticas há a geração de ventos termosféricos perturbados na ionosfera. Nesse sentido, existem alguns estudos sobre a influência do vento perturbado na geração de irregularidades ionosféricas, como nas bolhas de plasma. De fato, Yokoyama et al. (2019) realizaram simulação numérica para investigar o efeito do vento neutro vertical na geração de EPBs. Eles concluíram que o vento vertical no equador com baixa amplitude ( $\sim 5$  m/s) é capaz de gerar bolhas de plasma efetivamente e que as perturbações verticais do vento devido às ondas de gravidade também possuem um papel importante na geração dessas EPBs. Fagundes et al. (1995) afirmaram que os ventos perturbados possuem contribuição na geração das bolhas de plasma. Porém, essa contribuição é secundária, sendo o principal fator desempenhado por ondas de gravidade.

Os ventos perturbados também podem interferir na velocidade das irregularidades. Santos et al. (2016), com utilização de modelo, mostraram uma competição entre o campo elétrico Hall vertical e os ventos perturbados zonais nas variações da velocidade zonal das EPBs. Abdu et al. (2003) também mostraram que há uma contribuição significativa da deriva da bolha de plasma para oeste atribuída aos efeitos do dínamo perturbado, que é causado pelos ventos perturbados.

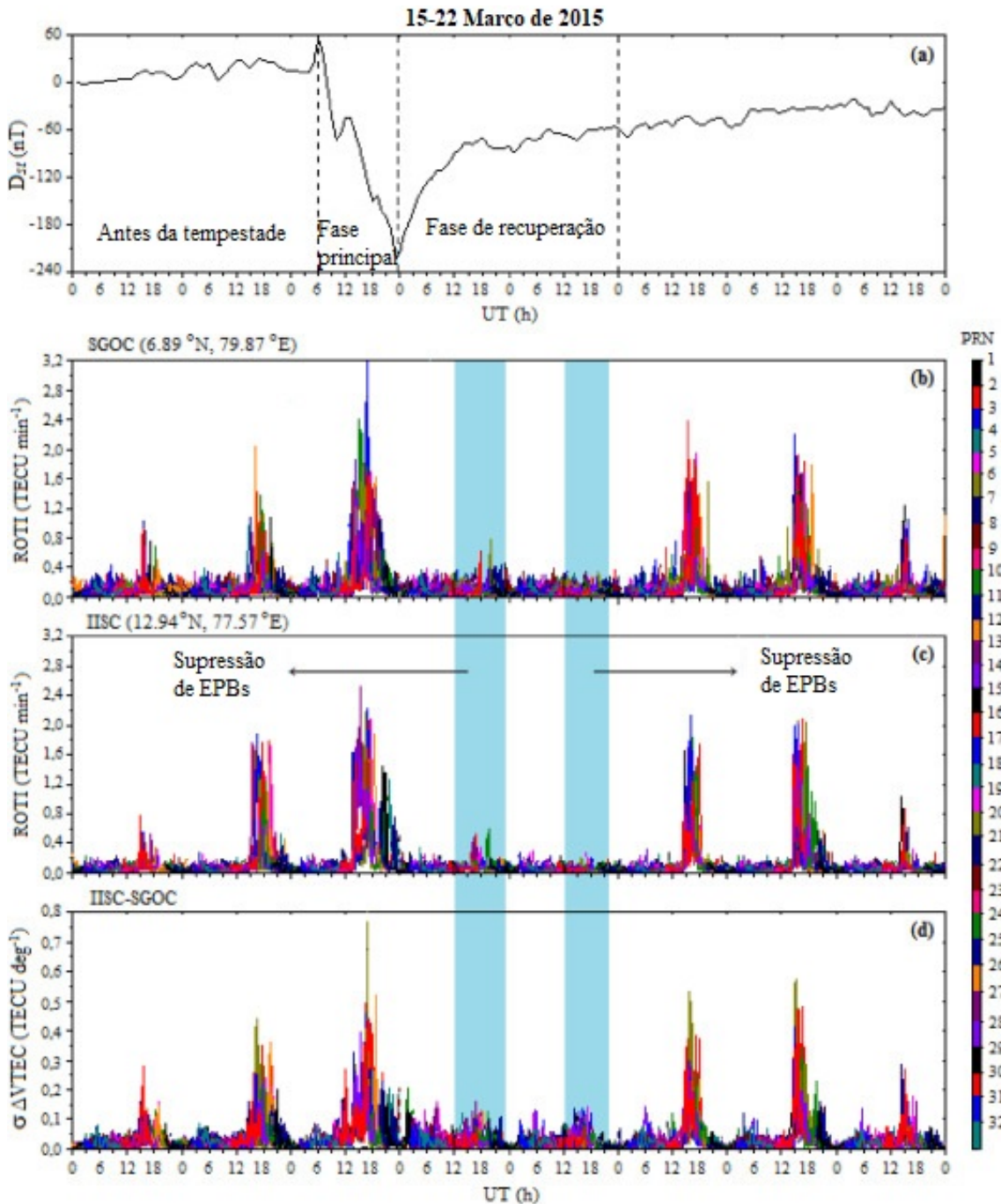
#### **2.5.4 Supressão de EPB**

Em períodos de tempestade geomagnética é possível a ocorrência da supressão de bolhas de plasma. Como visto anteriormente, dependendo da sazonalidade, há uma alta ocorrência dessas EPBs de acordo com cada região do globo. Essas, por sua vez, podem sofrer efeitos da tempestade geomagnética, criando condições para sua su-

pressão. Tempestades geomagnéticas podem causar penetração de campos elétricos perturbados na ionosfera equatorial e podem levar à supressão ou intensificação de EPBs (FEJER, 1991; AARONS, 1991; ABDU et al., 2003; HUANG et al., 2005; SASTRI et al., 2002; RAM et al., 2008).

A tempestade de St. Patrick, ocorrida no dia 17 de março de 2015, foi extensivamente estudada por diversos pesquisadores, tanto localmente como globalmente (ZAKHARENKOVA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2016; VENKATESH et al., 2017; ASTAFYEVA et al., 2015; FIGUEIREDO et al., 2017; DENARDINI et al., 2020). Zakharenkova et al. (2019) realizaram um estudo global desta tempestade, no qual foi observada a supressão de bolhas de plasma na região da África e América do Sul na noite do dia 17 março. Os autores explicaram que o campo elétrico do dínamo perturbado de longa duração causou uma diminuição na deriva do plasma no pôr do sol, levando à supressão das EPBs. Timoçin et al. (2020) também estudaram esta tempestade no sul da Índia. Os autores utilizaram o ROTI e afirmaram que este índice possui boa representação das flutuações ionosféricas e pode ser usado para descrever características das irregularidades das bolhas de plasma. A Figura 2.19 mostra a variação diária do Dst (a), o índice ROTI sobre SGOC (b), sobre IISC (c) e o desvio padrão do gradiente latitudinal do VTEC para IISC-SGOC (d), durante 15 a 22 de março de 2015, em que a hora local (LT) é  $UT + 5$  h.

Figura 2.19 - Dst (a), o índice ROTI sobre SGOC (b), IISC (c) e o desvio padrão do gradiente latitudinal do VTEC para IISC-SGOC (d), entre 15 a 22 de março de 2015 (onde LT = UT+5).



Fonte: Adaptada de Timogin et al. (2020).

A Figura 2.19 mostra claramente a supressão de bolhas de plasma. Nas áreas destacadas com barras azuis não há o aparecimento de altos valores de ROTI, como

mostrado nas outras noites. [Timochin et al. \(2020\)](#) atribuíram a supressão das irregularidades a dois fatores. Um deles seria devido aos campos elétricos do dínamo para oeste. Este campo elétrico faz com que a região F equatorial no setor crepuscular se mova para baixo, inibindo a ocorrência da instabilidade Rayleigh-Taylor. O segundo fator seria devido aos campos elétricos de penetração para o oeste. Estes campos fazem com que a região F equatorial no setor crepuscular também se desloque para baixo, inibindo a ocorrência da RTI. Portanto, os autores atribuíram a supressão a ambos os mecanismos.

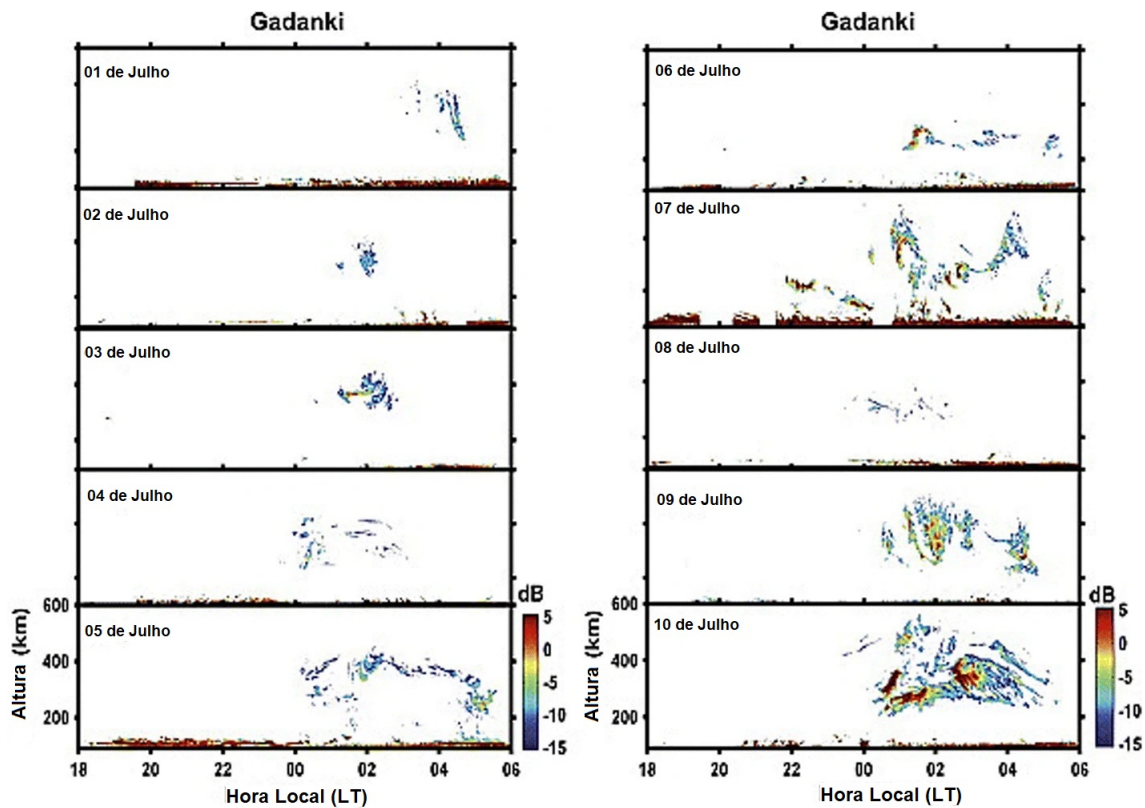
[Abdu et al. \(2009a\)](#), por outro lado, observaram a supressão de bolhas devido à penetração de campos elétricos de polaridade oeste. Os autores também afirmam que, quando a polaridade do campo elétrico está para leste, há uma melhora nas condições para o PRE. Conseqüentemente, as EPBs ou ESF (do inglês, “Equatorial Spread F”) podem ocorrer ou se fortalecer.

### **2.5.5 EPB após a meia-noite**

Irregularidades alinhadas ao campo (do inglês, “Field-Aligned Irregularities” - FAI) foram observadas após à meia-noite em condições de baixa atividade solar por meio de radares VHF e, também, com a utilização de satélites C/NOFS ([OTSUKA, 2018](#); [GUOZHU et al., 2012](#); [YIZENGAW et al., 2013](#); [YOKOYAMA et al., 2010](#), Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/43F627H.>; [DAO et al., 2011](#)). Os mecanismos de geração dessas irregularidades ainda estão sendo estudados. [Otsuka \(2018\)](#) observou essas irregularidades após a meia noite. A [Figura 2.20](#) mostra a intensidade do eco das FAI em mapas de altura versus hora local, observado pelo radar Gadanki no período de 1 a 10 de julho de 2008. A detecção dos ecos FAI foi feita após a meia-noite das noites em análise.



Figura 2.20 - FAI observadas pelo radar Gadanki durante 1-10 de julho de 2008.



Fonte: Adaptada de Otsuka (2018).

Otsuka (2018) atribuiu a geração das FAI a dois possíveis fatores. O primeiro deles seriam as ondas de gravidade propagando-se da atmosfera mais baixa para a ionosfera. Alternativamente, poderiam surgir ventos neutros meridionais que elevam a camada F. Estes ventos podem estar associados a temperaturas elevadas à meia noite na termosfera.

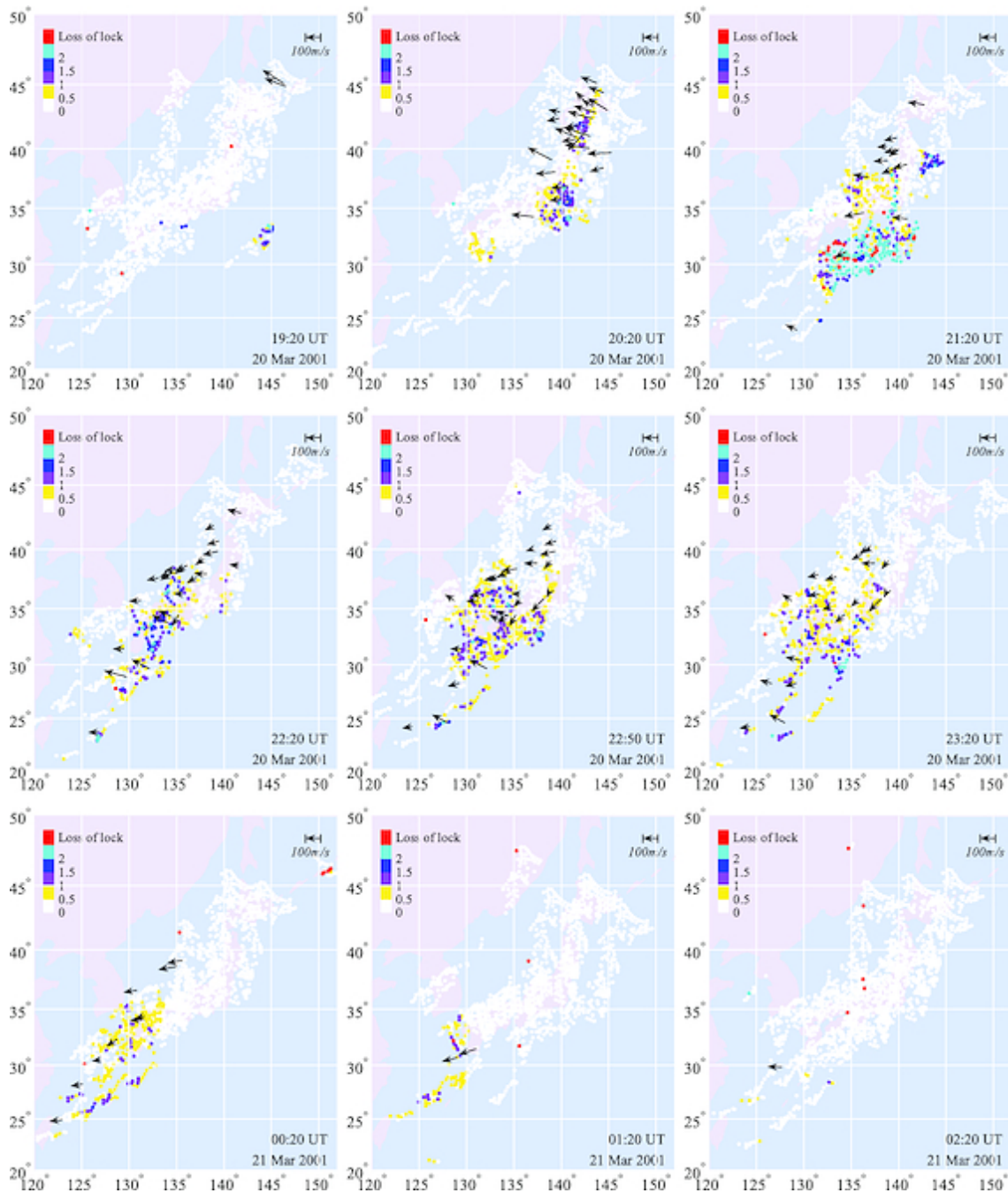
### 2.5.6 EPB pré/pós-amanhecer

As bolhas de plasma pré e pós-amanhecer são eventos raros, pois precisam de vários fatores simultâneos para desencadear o seu surgimento. Os registros que foram feitos até os dias atuais somente detectaram essas EPBs durante tempestades magnéticas. A ocorrência das EPBs pré-amanhecer poderia ser gerada em períodos de tempestade magnética por PPEF ou por DDEF (HUANG et al., 2013; RAM et al., 2015; ZAKHARENKOVA et al., 2019). Entretanto, ainda não há estudos suficientes na literatura que comprovem essas possibilidades.

Huang et al. (2013) estudaram bolhas de plasma diurnas de longa duração no setor africano. Os autores acreditam que essas EPBs foram geradas devido a um campo elétrico perturbado produzido por um campo elétrico de dínamo de perturbação. A análise feita por Huang et al. (2013) está de acordo com os resultados apresentados por Sripathi et al. (2018), em que os EPBs pré-amanhecer ocorreram devido a um campo elétrico perturbado durante uma tempestade geomagnética moderada sobre o setor indiano. Ram et al. (2015) também observaram EPBs perto do nascer do sol sobre o setor indonésio durante uma tempestade geomagnética moderada. Seus resultados mostraram que uma rápida inversão na direção norte do IMF  $B_z$  causou um PPEF, elevando o plasma a grandes altitudes e contribuindo para o desenvolvimento de EPBs próximo ao nascer do sol.

Zakharenkova et al. (2019) analisaram bolhas de plasma durante a intensa tempestade geomagnética de St. Patrick, de 17 de março de 2015, e encontraram ocorrências de EPBs após o nascer do sol. Os autores mostram que o DDEF induziu esses EPBs. Mais recentemente, Wu et al. (2020) realizaram um estudo usando seis anos de observação em airglow no sul da China e encontraram apenas um caso de EPBs próximo ao nascer do sol. Os autores sugeriram que a rápida elevação da altura da ionosfera, causada pela tempestade geomagnética, foi a principal razão para o aparecimento dessas EPBs. Outro estudo, realizado por Li et al. (2012), mostra a evolução de bolhas de plasma próximo do amanhecer. A Figura 2.21 mostra mapas ROTI com a evolução temporal e espacial das irregularidades, cobrindo todo o Japão. As setas pretas mostram magnitude e direção da velocidade aparente das irregularidades durante o processo de evolução, de 19:20 UT (04:55 LT) a 02:20 UT (10:51 LT).

Figura 2.21 - Mapa de ROTI das 19:20 UT a 02:20 UT no dia 21 de março de 2001, no Japão.



Fonte: Adaptada de Li et al. (2012).

Li et al. (2012) observaram bolhas de plasma em latitudes médias que duraram cerca de 1,5 hora após o nascer do sol. Os autores sugeriram que as irregularidades foram geradas por um campo elétrico para leste, associado ao dínamo perturbado, e a duração das irregularidades após o nascer do sol foi relacionada à intensa tempestade

ionosférica negativa em 21 de março de 2001.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

#### 3.1 Instrumentação

##### 3.1.1 Informações sobre as redes GNSS usadas nesse trabalho

O Sistema GNSS permite determinar longitude, latitude e altitude de qualquer ponto na Terra, devido ao fornecimento do posicionamento geoespacial com cobertura global, através dos dados coletados nos receptores. O GNSS é composto pelo GPS dos Estados Unidos da América, com 32 satélites, o GLONASS da Federação Russa, com 24 satélites, o Galileo da União Europeia, com 30 satélites, entre outros. A localização do receptor é feita pela transmissão de sinais de rádio que são enviados por cada satélite da constelação. Entretanto, garante-se que no mínimo quatro satélites sejam rastreados em qualquer ponto da superfície terrestre, em qualquer momento (MONICO, 2008).

Ondas portadoras de frequência L1 e L2 (ou L5) são transmitidas por cada satélite. As frequências são geradas simultaneamente para os usuários, permitindo que parte dos efeitos provocados pela ionosfera sejam corrigidos (MONICO, 2008). Com as frequências torna-se possível a correção da refração ionosférica, que é a principal causa de erro. Neste trabalho serão usados GPS, GLONASS e Galileo e as frequências correspondentes de cada onda se encontram na Tabela 3.1.

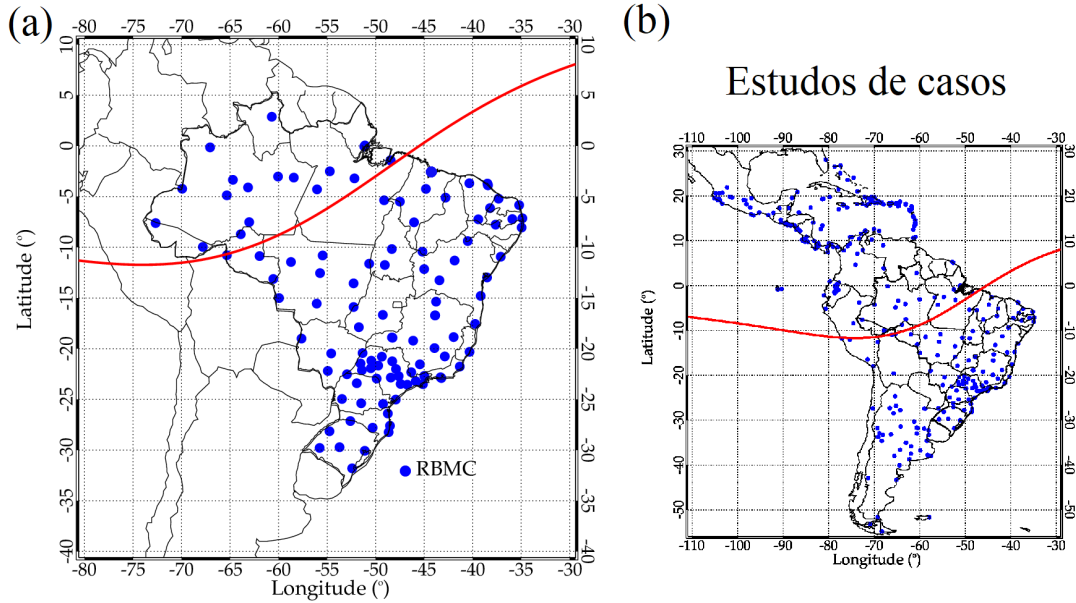
Tabela 3.1 - Frequência das ondas portadoras.

Onda	Frequência (MHz)		
	GPS	GLONASS	Galileo
L1	1575,42	1602,0 a 1615,5	1575,42
L2/L5	1227,60	1246,0 a 1256,5	1176,45

Fonte: Navipedia (2021).

A Figura 3.1 mostra a localização dos receptores GNSS (pontos azul) usados para (a) os estudos estatísticos de ocorrência e características de irregularidades do plasma com o ciclo solar dentro do setor brasileiro e (b) estudos de casos de detecção de EPBs realizados no setor da América Latina. Em ambos os mapas, a linha vermelha é o equador magnético referente ao ano de 2015.

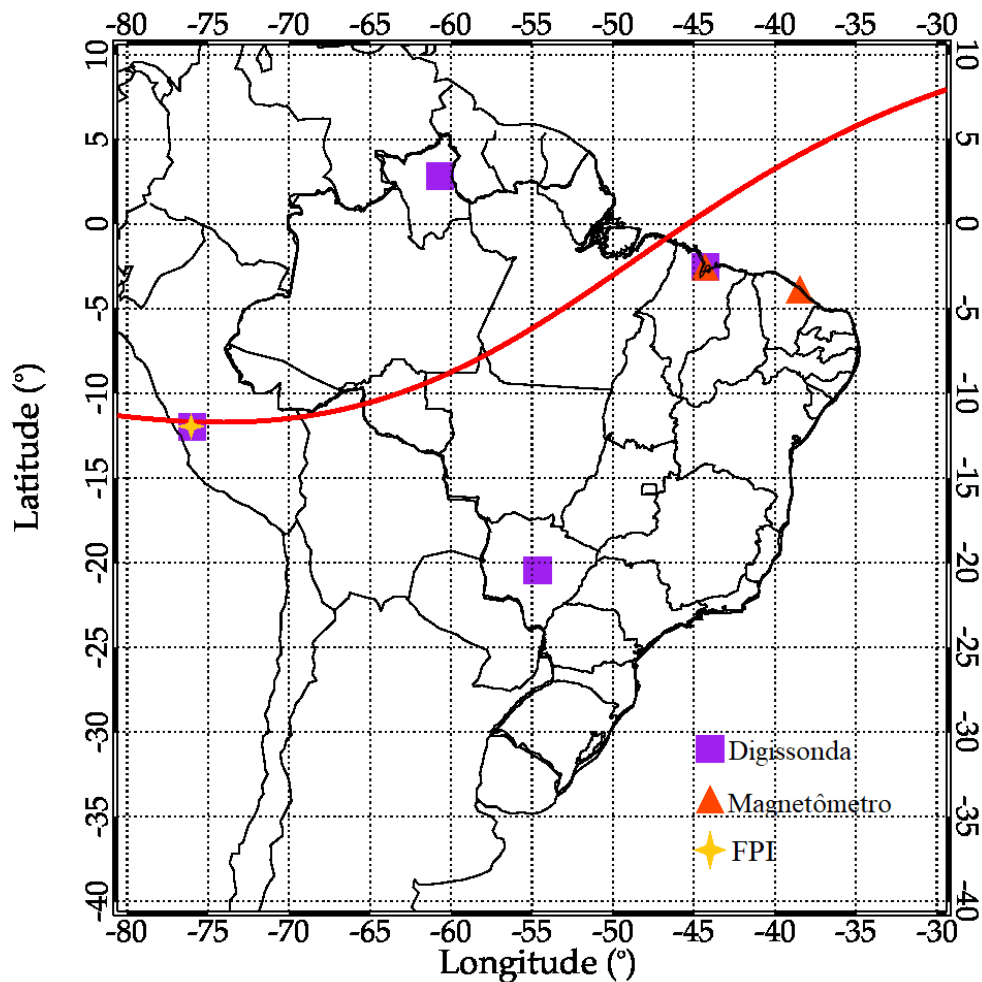
Figura 3.1 - Localização dos receptores GNSS (azul) no (a) setor brasileiro e (b) no setor da América Latina. A linha vermelha é o equador magnético referente ao ano de 2015.



### 3.1.2 Descrição sucinta da instrumentação usada para estudos de casos

Neste trabalho serão apresentados alguns estudos de caso para uma investigação mais detalhada dos mecanismos de geração das irregularidades do plasma em períodos perturbados, para isto, serão utilizados digissondas, magnetômetro e Interferômetro de Fabry-Perot (do inglês, “Fabry-Perot Interferômetro” - FPI), cuja localização está no mapa da Figura 3.2. Todos esses equipamentos têm suas características descritas no trabalho publicado por Denardini et al. (2016). No entanto, apresentaremos aqui uma sucinta descrição dessa instrumentação.

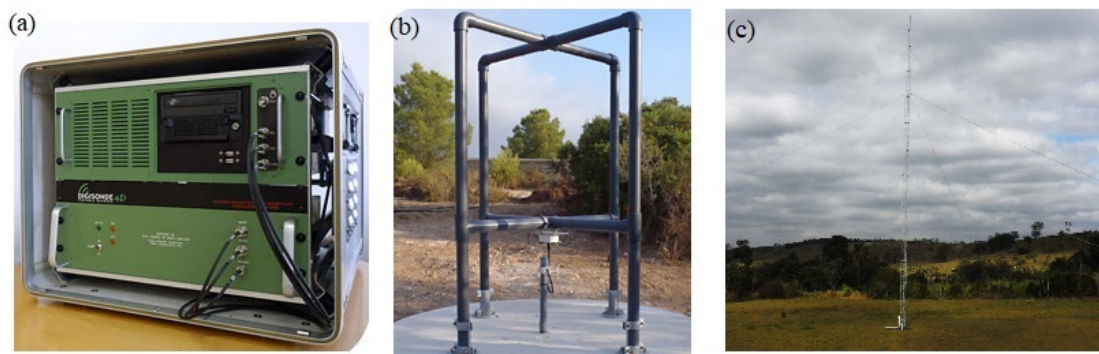
Figura 3.2 - Localização das digissondas (quadrado roxo), magnetômetro (triângulo laranja) e interferômetro de Fabry-Perot (FPI) (estrela amarela) no setor brasileiro e peruano. A linha vermelha é o equador magnético referente ao ano de 2015.



A ionossonda é um radar que opera em alta frequência (HF), com frequências entre 0,5 e 30 MHz, gerando o perfil ionosférico vertical em ionogramas. Os sinais são refletidos pelas camadas ionosféricas, correspondendo à frequência do sinal transmitido. Entre vários parâmetros observacionais, as ionossondas podem fornecer o perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera. As medições são feitas a partir do tempo decorrido entre os sinais emitidos e refletidos pela ionosfera, formando padrões de ecos característicos que compõem o ionograma. À medida que os sinais de rádio viajam mais lentamente dentro da ionosfera, a altura aparente ou virtual é registrada. Como resultado, o perfil de densidade eletrônica vertical é fornecido de

acordo com o parâmetro de altura virtual. Mais detalhes sobre ionossondas podem ser encontrados em [Reinisch et al. \(2009\)](#). O espalhamento equatorial na região F (Spread F) em ionogramas é, geralmente, associada com as EPB ([WOODMAN; HOZ, 1976](#); [ANDERSON; MENDILLO, 1983](#)). Portanto, será analisado o perfil vertical da densidade eletrônica sobre as estações de São Luís (SALU, 2,53° S, 44,30° O, dip: -8,57°), Boa Vista (BOAV, 12,81° N, 60,67° O, dip: 33,71°), Campo Grande (MSCG, 20,44° S, 54,64° O, dip: -25,98°) e Jicamarca (JICA, 11,99° S, 76,0° O, dip: -0,38°) (conforme [Figura 3.2](#)) para avaliar a propagação de EPBs na América do Sul. As fotos do instrumento são mostradas na [Figura 3.3](#) na qual (a) é a unidade de controle, geração e recepção, (b) é uma antena receptora e (c) a antena transmissora da ionossonda.

Figura 3.3 - (a) Unidade de controle, (b) uma antena receptora e (c) antena transmissora da ionossonda.



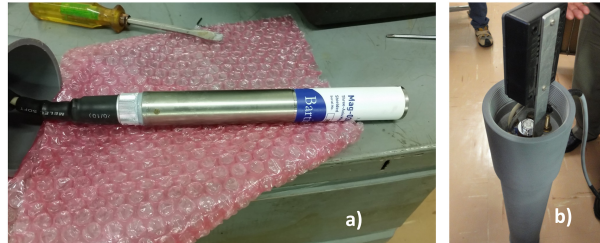
Fonte: [EMBRACE \(2021\)](#).

O magnetômetro, que também será utilizado neste trabalho em dois locais, SALU e Eusébio (3,89° S, 38,45° O, dip: -17,96°), é usado para medir o campo magnético da Terra. Este instrumento ajuda a identificar variações magnéticas no campo geomagnético. Mais detalhes técnicos do instrumento e da rede de magnetômetros podem ser encontrados em [Denardini et al. \(2018\)](#). Estas estações de magnetômetros foram selecionadas para calcular o efeito do EEJ ao nível do solo, neste trabalho. Para isso, utiliza-se uma estação próxima ao equador magnético e outra fora do equador magnético. Assim, calcula-se a diferença da componente H entre as duas estações conforme [Denardini et al. \(2009\)](#). O período calmo de referência para os dados do magnetômetro corresponde à média dos cinco dias mais calmos do mês. A [Figura 3.4](#) mostra fotos do equipamento, na qual (a) é o núcleo do sensor do magnetômetro e



(b) é o invólucro de PVC destes sensores.

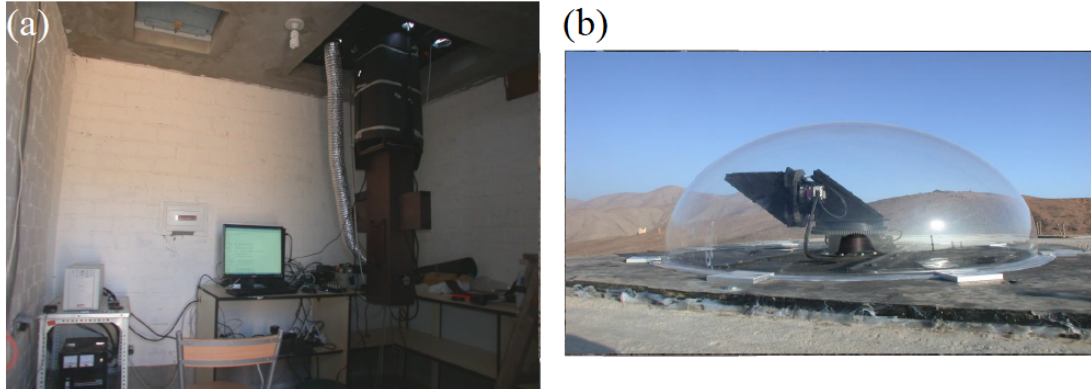
Figura 3.4 - Fotos (a) do núcleo do sensor e (b) invólucro de PVC dos sensores do magnetômetro, que fazem parte da rede de magnetômetros do Embrace MagNet.



Fonte: Denardini et al. (2018).

O FPI é um instrumento óptico composto por duas superfícies refletoras paralelas (espelhos finos). As ondas podem passar pela cavidade óptica somente quando estão em ressonância com ela. Avanços mais recentes na técnica permitem a criação de interferômetros de Fabry-Pérot ajustáveis muito precisos (PEROT; FABRY, 1899). A estação utilizada neste trabalho localiza-se em Jicamarca, no Peru. As especificações técnicas do FPI são: a abertura de Etalon de 7,5 cm, distância entre espelhos de 1,5 cm, Etalon sólido selado a ar, CCD Andor DU434, lentes de foco de 31,5 cm e filtro OI 630nm (conforme Navarro et al. (2021)). A Figura 3.5 mostra fotos deste equipamento em Jicamarca, Peru.

Figura 3.5 - Fotos da (a) unidade de controle do interferômetro de Fabry-Pérot e (b) é a cúpula com os espelhos e lente de observação.



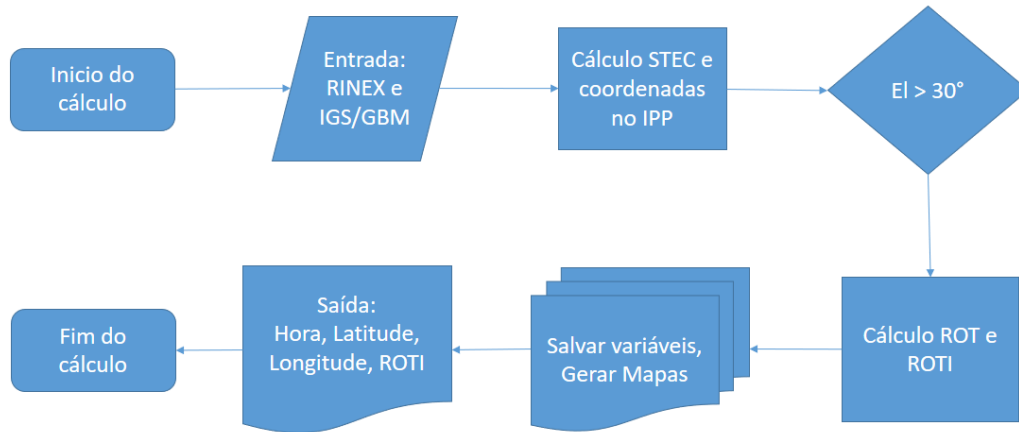
Fonte: Navarro et al. (2021).

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Cálculo e geração de mapas de ROTI

O cálculo do ROTI segue os procedimentos detalhados no fluxograma da Figura 3.6. Para tal, o arquivo RINEX (do inglês, “Receiver Independent Exchange Format”) e os arquivos de órbita GNSS (do inglês, “Multi-GNSS Experiment” - MGEX) são inseridos como dados de entrada. Detalhes sobre os procedimentos descritos no fluxograma são apresentados em seguida.

Figura 3.6 - Fluxograma da obtenção do índice ROTI.



Um exemplo de arquivo RINEX é mostrado na Figura 3.7, na qual são destacados os parâmetros utilizados no cálculo do ROTI. Nesta figura, o retângulo em vermelho de número (1) identifica a sigla correspondente à estação. O retângulo número (2) mostra a posição geográfica da estação (X, Y e Z em relação ao centro da Terra, em coordenadas cartesianas). O círculo número (3) que identifica a  $L_1$  mostra em qual coluna são encontradas as medidas de fases correspondentes a frequência 1 do satélite e cujos valores estão indicados pela seta. Essa localização, dentro do arquivo de dados, se repete para todos os blocos de medidas daquele de cada horário. De maneira similar, o círculo número (4) é a  $L_2$  que mostra as medidas de fases correspondentes à frequência 2 do satélite. O retângulo número (5) circunscreve a data e hora da primeira leitura (ano, mês, dia, hora, minuto e segundo). O retângulo número (6) mostra os números de satélites correspondentes a este horário, e que também estão relacionados à quantidade de linhas que se seguem dentro deste bloco. Finalmente, o retângulo número (7) corresponde a todos os satélites que estão na visada na estação de recepção ao longo dessa medida. Neste caso, a letra ‘G’ identifica os dados do GPS, ‘R’ do GLONASS e ‘E’ do Galileo. Os retângulos identificados com os números (5), (6) e (7) aparecem a cada novo horário, para o bloco seguinte, na linha posterior à medida de todos os satélites.

Figura 3.7 - Exemplo de arquivo RINEX para a estação de São José dos Campos, no dia 13 de março de 2015.

```

1 | 2.11 | OBSERVATION DATA | M (MIXED) | RINEX VERSION / TYPE
2 | teqc | 2013Mar15 | RBMC | 20150314 08:13:55UTC | PGM / RUN BY / DATE
3 | SJSF | 1 | | | MARKER NAME
4 | 41601M002 | | | | MARKER NUMBER
5 | RBMC | | IBGE/CGED | | OBSERVER / AGENCY
6 | 4923K35601 | | TRIMBLE NETRS | 4.87 | REC # / TYPE / VERS
7 | 4940353516 | | TRM59800.00 | NONE | ANT # / TYPE
8 | 4084802.4350 | -4209560.3990 | -2498056.9600 | | APPROX POSITION XYZ
9 | 0.1365 | 0.0000 | 0.0000 | | ANTENNA: DELTA H/E/N
10 | 1 | 5 | | | | WAVELENGTH FACT L1/2
11 | 15.0000 | | | | | # / TYPES OF OBSERV
12 | | | C1 | L2 | P2 | L5 | INTERVAL
13 | CODIGO: 91537 | Estacao: Sao Jose dos Campos | | | | COMMENT
14 | 2015 | 3 | 13 | 0 | 0 | 0.0000000 | GPS | TIME OF FIRST OBS
15 | | | | | | | | | END OF HEADER
16 | 15 | 3 | 13 | 0 | 0 | 0.0000000 | 0 | 18 | 21G23R19G09G32R05G31G08G04R20G11R16 | 7
17 | | | | | | | | | R06R09G01G22R15G03 |
18 | 114554874.762 | 7 | 21407322.078 | 89098330.297 | 7 | 21407332.289 |
19 | 117672159.401 | 7 | 22392265.789 | 91692627.96545 | 22392283.793 |
20 | 127114016.404 | 5 | 23762626.289 | 98866583.000 | 5 | 23762643.070 |
21 | 132529046.815 | 5 | 25219450.625 | | | |
22 | 111436902.400 | 8 | 21205653.555 | 86834064.07646 | 21205662.121 |
23 | 114601694.920 | 7 | 21438571.805 | 89134852.344 | 7 | 21438578.613 |
24 | 112436417.559 | 8 | 21395876.117 | 87612987.45046 | 21395883.453 |
25 | 108361157.546 | 8 | 20620396.852 | 84437508.92646 | 20620406.121 |
26 | 106222936.886 | 8 | 20213508.180 | 82771325.70647 | 20213518.211 |
27 | 112123028.735 | 7 | 20967581.734 | 87206907.151 | 7 | 20967598.281 |
28 | 110917523.704 | 8 | 21106875.469 | 86429313.03846 | 21106885.559 |
29 | 112126780.070 | 7 | 20990365.617 | 87209790.974 | 7 | 20990375.359 |
30 | 116166651.471 | 8 | 21769545.469 | 90352029.244 | 7 | 21769549.930 |
31 | 128759317.918 | 6 | 24112499.648 | | | |
32 | 109286317.728 | 8 | 20796468.469 | 85158294.66347 | 20796480.023 |
33 | 130013453.402 | 5 | 24740738.258 | | | |
34 | 113293211.280 | 7 | 21201273.016 | 88117011.731 | 7 | 21201279.473 |
35 | 118859810.819 | 7 | 22618214.734 | 92618305.32645 | 22618225.469 |
36 | 15 | 3 | 13 | 0 | 0 | 15.0000000 | 0 | 19 | 21G23R19G09G19G32R05G31G08G04R20G11 | 7
37 | | | | | | | | | R16R06R09G01G22R15G03 |

```

A partir do arquivo Rinex é possível calcular o TEC na linha de visada (do inglês, “Slant TEC” - STEC), conforme a Equação 3.1 (CHERNIAK et al., 2018).

$$STEC = \left( \frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{k}. \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1,  $f_1$  equivale a 1575,42 MHz, enquanto  $f_2$  equivale a 1227,60 MHz, para o sistema GPS. Já no sistema GLONASS,  $f_1$  e  $f_2$  são definidas por uma função matemática. A frequência  $f_1$  equivale a  $1602,0 \text{ MHz} + (0,5625 * 10^6)R$ , ao passo que  $f_2$  equivale a  $1246,0 \text{ MHz} + (0,4375 * 10^6)R$ . Nestas duas equações  $R$  é o canal de referência para cada PRN (vide Tabela 3.2). Para o sistema Galileo a frequência  $f_1$  é igual a 1575,42 MHz e a  $f_2$  é igual a 1176,45 MHz. Os termos  $L_1$  e  $L_2$  ou  $L_5$  na equação do  $sTEC$  (Equação 3.1) são as medidas de fase correspondentes a frequência 1 e 2/5, o termo  $k$  é igual a  $40,3 \text{ m}^3/\text{s}^2$  e a constante  $c$  é a velocidade da

luz.

Tabela 3.2 - Canais de referência (R) para cada PRN da constelação de satélites GLO-NASS.

PRN	R
1 e 5	1
2 e 6	-4
3 e 7	5
4 e 8	6
9 e 13	-2
10 e 14	-7
11 e 15	0
12 e 16	-1
17 e 21	4
18 e 22	-3
19 e 23	3
20 e 24	2

Fonte: [Navipedia \(2021\)](#).

Em seguida, os arquivos de órbita são utilizados para a obtenção do posicionamento dos satélites nos horários correspondentes ao STEC obtido no cálculo, projetado na altura do IPP (do inglês, “Ionospheric Pierce Point”) que, neste trabalho, considerou 350 km, no qual se utiliza o modelo de casca fina esférica. Consideram-se somente ângulos de elevação acima de 30° na linha de visada do receptor até o satélite. Um exemplo de arquivo de órbita é mostrado na [Figura 3.8](#). Nessa figura, o retângulo identificado com número (1) refere-se ao horário de leitura (com ano, mês, dia, hora, minuto e segundo). O retângulo identificado com número (2) identifica os PRNs correspondentes a cada satélite incluído no cabeçalho deste arquivo. O retângulo identificado com número (3) oferece a posição da órbita no horário correspondente (X, Y, Z) de cada PRN correspondente à sua esquerda. Aqui estão as informações que serão utilizadas no cálculo geométrico para a transformação das coordenadas X, Y e Z em latitude e longitude geográfica. O retângulo número (4) transcreve o número (2) na vertical. Vale lembrar, ainda, que somente são usados dados de GPS, GLONASS e Galileo associados a G, R e E.

Figura 3.8 - Exemplo de arquivo de órbita (MGEX) no dia 31 de outubro de 2019.

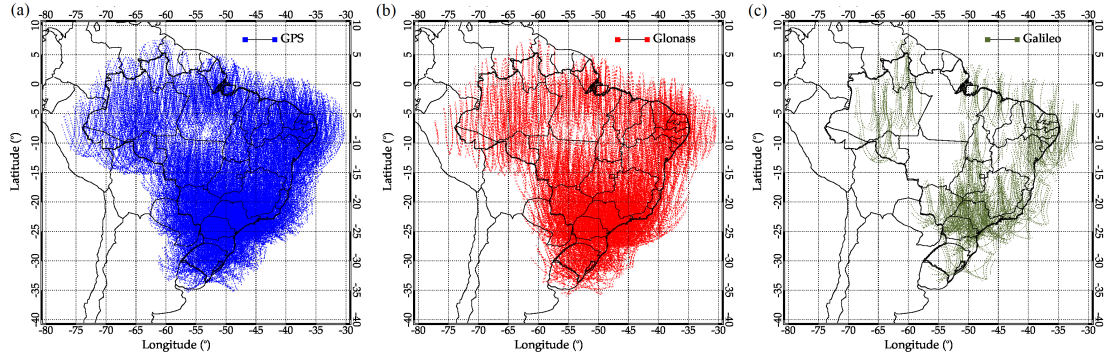
```

1 #dP2019 10 31 0 0 0.00000000 288 u+U IGS14 FIT GFZ
2 ## 2077 345600.00000000 300.00000000 58787 0.00000000000000
3 + 93 C01C02C03C04C05C06C07C08C09C10C11C12C13C14C16E01E02
4 + E03E04E05E07E08E09E12E13E14E15E18E19E21E24E26E27E30
5 + 4 E31E33E36G01G02G03G04G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15
6 + G16G17G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32
7 + J01J02J03J07R01R02R03R05R07R08R09R11R12R13R14R15R16
8 + R17R18R19R20R21R22R23R24 00 00 00 00 00 00 00 00
9 ++ 10 10 10 10 10 8 10 6 10 8 9 8 9 10 10 6 6
10 ++ 5 5 5 6 7 0 6 7 6 7 7 8 6 0 7 5 5
11 ++ 6 7 10 6 7 10 0 7 5 5 6 7 6 6 6 5 8
12 ++ 6 7 6 6 5 6 6 6 5 5 5 7 7 7 6 6 7
13 ++ 10 10 10 10 5 6 8 0 6 7 0 7 6 8 8 10 5
14 ++ 6 10 10 7 8 9 8 0 5 5 5 5 5 5 5 5 5
15 %c M cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
16 %c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
17 %f 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.0000000000000000
18 %f 0.00000000 0.0000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
19 %i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
20 %i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
21 /* PCV:IGS14_2076 OL/AL:FES2004 NONE YN CLK:CoN ORB:CoN
22 /* GeoForschungsZentrum Potsdam
23 /*
24 /* 1
25 2 * 2019 10 31 0 0 0.00000000
26 PC01 -32303.841797 27073.359141 143.034047 3 79.372425
27 PC02 4424.576692 41946.988672 646.913339 769.761151
28 PC03 -14843.718981 39459.706386 772.230151 434.312779
29 PC04 -39572.468851 14487.721817 221.561075 -408.580112
30 PC05 21900.193222 36038.155571 614.129209 -14.177244
31 PC06 -25193.069669 30200.575550 -15374.124265 338.736963
32 PC07 -10977.363486 35119.679201 -19967.377287 -230.290305
33 PC08 -12172.955835 18256.220685 36069.699800 -24.563321
34 PC09 -10291.058124 29724.273876 -28026.252495 79.806688
35 PC10 149.134674 41253.455878 -7431.368800 -319.759241
36 PC11 14406.168228 -15675.259093 -18019.697014 26.130059
37 PC12 26987.025404 -2051.433476 7060.495116 303.355835
38 PC13 3847.843108 25667.689648 33357.740336 80.861649

```

A partir desses arquivos de órbita realizam-se os cálculos geométricos descritos acima e apresenta-se a Figura 3.9 para ilustrar as órbitas de todos os PRNs no IPP de 350km, em um dia completo, para os satélites GPS (a), GLONASS (b) e Galileo (c), considerando o ângulo de elevação maior que 30°.

Figura 3.9 - Órbitas dos satélites GPS (a), GLONASS (b) e Galileo (c) em 24h.



Com o posicionamento das órbitas no IPP e o slant TEC obtido pelo RINEX, obtem-se: hora, latitude, longitude e slant TEC. Com esses parâmetros é possível calcular o ROT, que é definido conforme a Equação 3.2.

$$ROT = \frac{STEC_{t_2} - STEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta STEC}{\Delta t}. \quad (3.2)$$

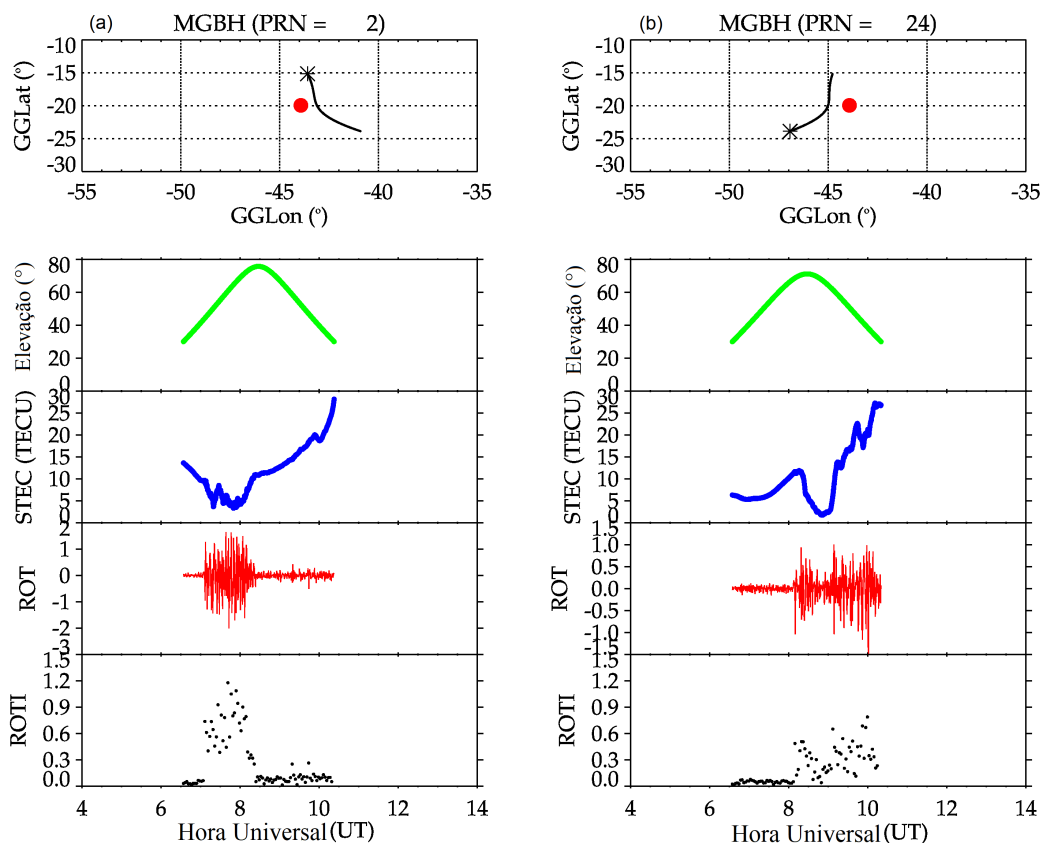
O ROTI representa o desvio padrão do ROT em um intervalo de tempo específico, conforme a Equação 3.3 (PI et al., 1997).

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}, \quad (3.3)$$

em que os colchetes indicam a média de um intervalo de tempo de 2,5 minutos.

Para exemplificar a aplicação das equações Equação 3.2 e Equação 3.3 a Figura 3.10 (a) mostra o PRN 2 e (b) o PRN 24, para a estação de Belo Horizonte-MG (MGBH), onde o primeiro painel está a localização da estação (em vermelho), a passagem do satélite (preto) e o asterisco marca o início da medição. Em seguida, está a elevação (verde), o STEC (azul), o ROT (vermelho) e o ROTI (preto).

Figura 3.10 - Localização da estação (círculo vermelho), passagem do satélite (preto), início da medição (asterisco preto), ângulo de elevação (verde), STEC (azul), ROT (vermelha) e ROTI (pontos pretos), na estação MGBH para GPS PRN=2 (a) e GPS PRN=24 (b), no dia 11 de maio de 2015.



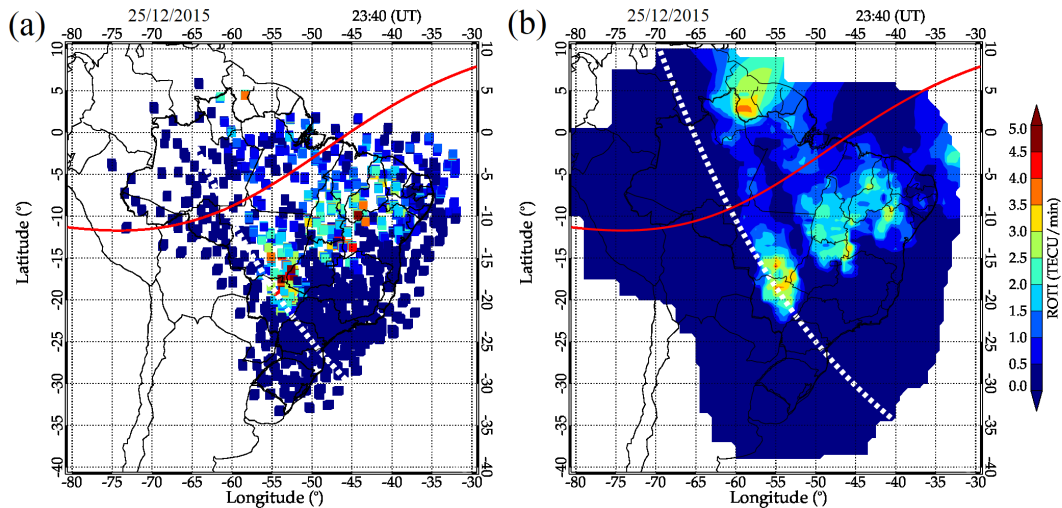
O resultado apresentado pela Figura 3.10 mostra depleções no STEC no PRN 2 e 24, para a estação MGBH. Estas depleções estão relacionadas com os valores elevados de ROTI ( $\text{ROTI} > 0,5 \text{ TECU}/\text{min}$ ). Esta mesma metodologia é aplicada para todas as estações disponíveis no setor brasileiro, conforme mencionado na instrumentação, para se construir mapas.

Para o propósito deste trabalho, os mapas ROTI são gerados a cada 10 min. A Figura 3.11 mostra o mapa de ROTI na altura do IPP (a) para cada PRN e (b) interpolado para cobrir todo o setor brasileiro. A interpolação é feita a partir de células de observação de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  em latitude e longitude. A célula é construída para  $3 \times 3$  elementos, correspondendo a  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ . Se não houver dados que cubram esta área, a célula é então redimensionada para  $5 \times 5$  elementos, correspondendo a  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  e assim por diante. Este método é aplicado em até  $21 \times 21$  elementos,



correspondendo a  $10,5^\circ \times 10,5^\circ$  (TAKAHASHI et al., 2016).

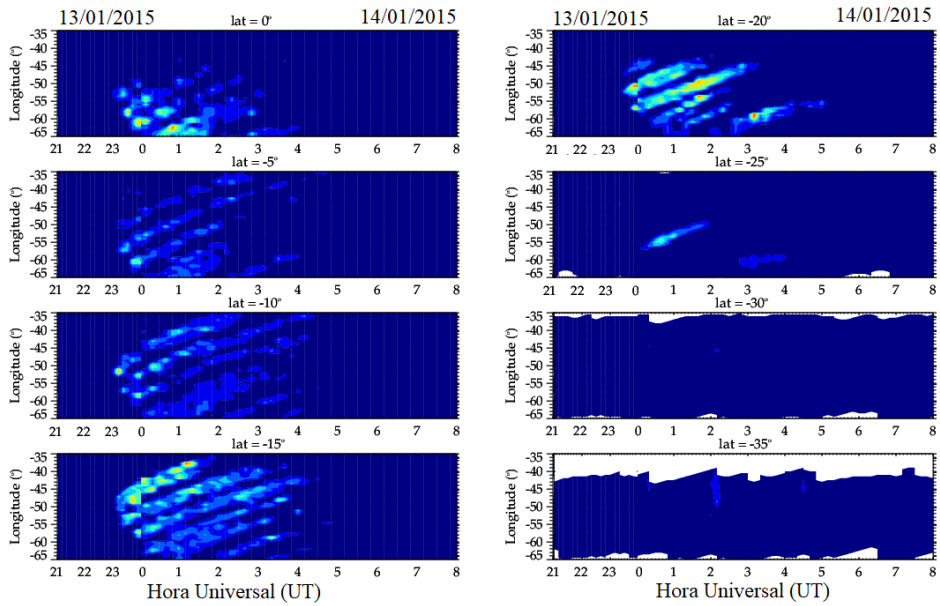
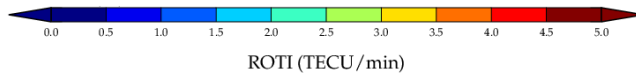
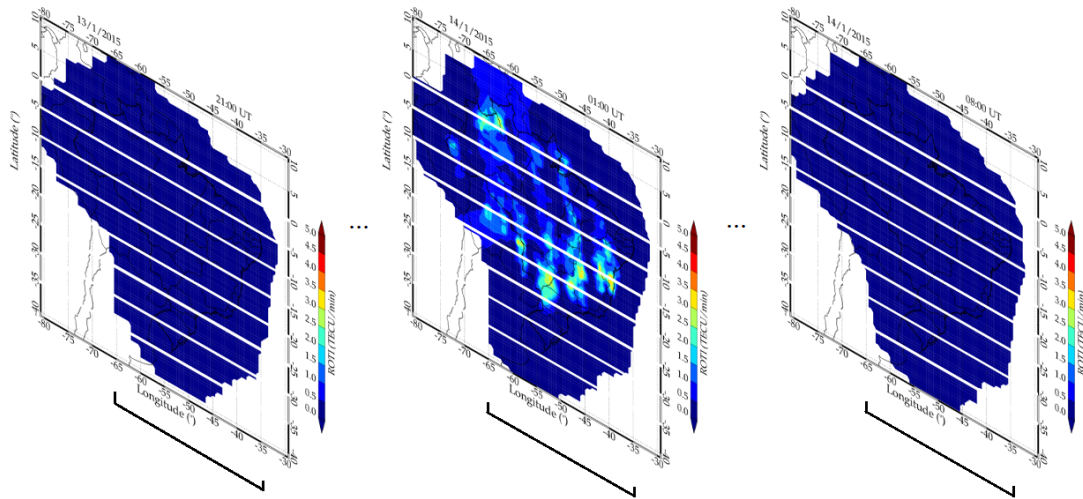
Figura 3.11 - Mapa de ROTI no IPP (a), mesmo mapa utilizando interpolação (b), às 23:40 UT do dia 25 de dezembro de 2015.



### 3.2.2 Técnica de Keograma aplicada a mapas de ROTI

O método para obtenção dos keogramas é baseado no estabelecimento de latitudes geográficas fixas nos mapas de ROTI para as quais os dados serão selecionados. Para cada uma das latitudes selecionadas no mapa de ROTI daquele horário, as variações longitudinais dos valores são copiadas para uma coluna do keograma. Isso se repete para todos os mapas de ROTI e para todas as latitudes selecionadas. Com isso, são gerados tantos keogramas quanto forem as latitudes escolhidas, para cada serie temporal de ROTI. Dessa forma, o keograma é um gráfico de contorno com latitude geográfica em função da hora universal, conforme apresentado na Figura 3.12. Nessa figura, assim como em todo o trabalho, as latitudes geográficas fixas consideradas são  $0^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $-30^\circ$  e  $-35^\circ$ .

Figura 3.12 - Keograma de ROTI com latitude versus tempo universal. Para o dia 14 de janeiro de 2015. Para latitude geográfica fixa de 0°, -5°, -10°, -15°, -20°, -25°, -30° e -35° respectivamente.



Com as estruturas de bolhas de plasma observadas no keograma é possível calcular a distância entre as estruturas e a velocidade de propagação das bolhas, conforme Equação 3.4 e Equação 3.5:

$$d = Lon_{t_2} - Lon_{t_1} = \Delta Lon, \quad (3.4)$$

e

$$v = \frac{\Delta Lon}{\Delta t}, \quad (3.5)$$

em que  $d$  é a distância entre as estruturas EPB,  $\Delta Lon$  é a diferença de longitude entre os tempos  $t_2$  e  $t_1$ ,  $\Delta t$  é a diferença temporal e  $v$  é a velocidade.

Finalmente, de posse de todos os cálculos e toda a metodologia descrita até aqui, algumas regras foram estabelecidas para que a estrutura detectada seja considerada como uma bolha de plasma:

- a) o índice ROTI deve apresentar valores superiores a 1 TECU/min;
- b) esses valores devem permanecer assim por período superior a 1h; e
- c) a estrutura detectada deve ser bem definida, com alongamentos superiores a  $10^\circ$  de latitude.

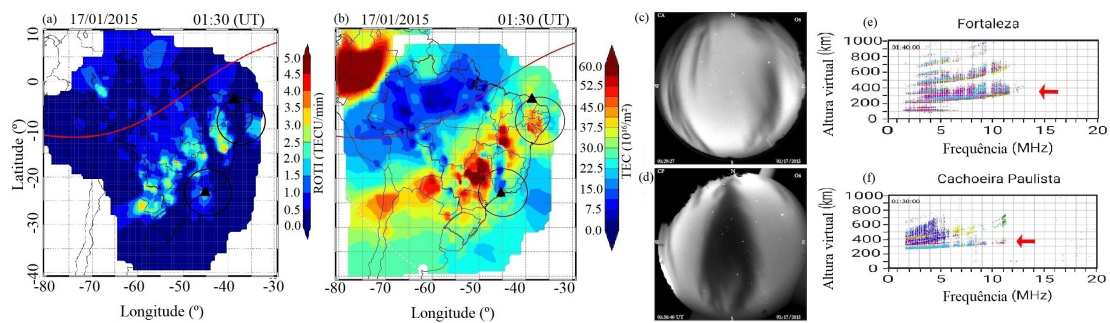
### 3.2.3 Avaliação e limitação do método de ROTI para identificar características das EPBs

O uso do ROTI possui algumas vantagens em relação ao TEC, como não ser necessário o cálculo do Bias, que é o maior fator de propagação de erro do TEC. O ROTI garante uma visualização ampla das irregularidades tanto na crista da EIA (quando o TEC possui valores muito altos) e no amanhecer (quando o TEC possui valores muito baixos). Entretanto, há algumas limitações, como o surgimento dos efeitos de bordas advindos da interpolação.

Carmo et al. (2021) realizaram um trabalho de metodologia para a detecção de bolhas de plasma, e também mostraram o surgimento de bolhas de plasma após o pôr do sol em diferentes instrumentos: em mapas de ROTI, de TEC, imageador All-Sky e ionossondas. A Figura 3.13 mostra os resultados da observação destes equipamentos para o dia 17 de janeiro de 2015, com mapas na região brasileira (ROTI e TEC), imageador em São João do Cariri e Cachoeira Paulista, e ionossondas em Fortaleza e Cachoeira Paulista. Nos mapas de ROTI e TEC a latitude compreende  $-10^\circ$  a  $10^\circ$ , e longitude de  $-80^\circ$  a  $30^\circ$ , nos quais os triângulos nos mapas correspondem à

localização das ionossondas e os círculos pretos correspondem à cobertura espacial do imageador All-Sky ( $\sim 600$  km de raio a partir da localização da estação). O equador magnético é a linha vermelha nos mapas. Os ionogramas são gráficos (e e f) que mostram a reflexão do sinal, tendo no eixo vertical a altura virtual e no eixo horizontal a frequência de sondagem.

Figura 3.13 - Mapa de ROTI (a), mapa de TEC (b), Imageador All-Sky em São João do Cariri (c), em Cachoeira Paulista (d), Ionossonda em Fortaleza (e) e em Cachoeira Paulista (f), no dia 17 de Janeiro de 2015, às 01:30 UT.



Fonte: Adaptada de Carmo et al. (2021).

Na Figura 3.13 é possível ver as bolhas de plasma em diferentes equipamentos e a cobertura espacial do imageador All-Sky é mostrada nos mapas (representada pelos círculos); os ionogramas apresentam o Spread F, estes relacionados às EPBs.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

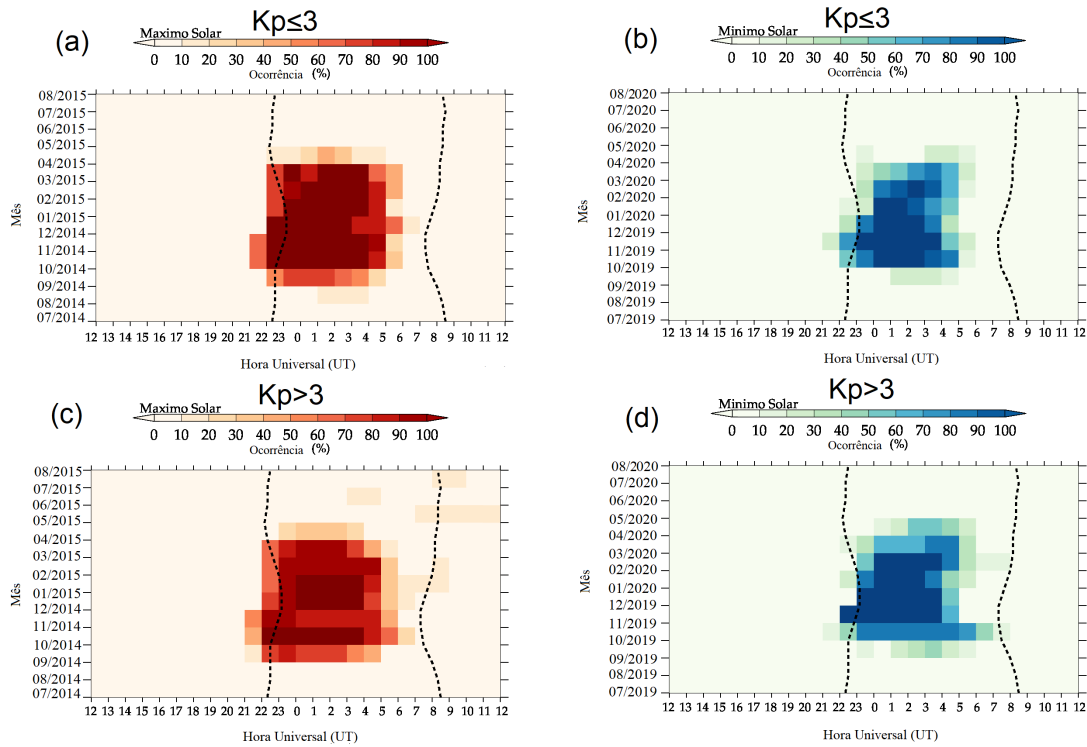
Neste Capítulo são apresentados os resultados e discussões relativos à determinação da ocorrência das EPBs em períodos de máxima (F10.7: 145,9 sfu) e mínima atividade solar (F10.7: 69,7 sfu). Este estudo é apresentado em termos estatísticos na primeira seção do presente capítulo, levando em consideração a condição magnética (calmo e perturbado) durante a detecção dos eventos. Na seção subsequente, a partir de estudos de casos, também são apresentados e discutidos os resultados das características de detecção de algumas bolhas de plasma em ocasiões singulares.

### 4.1 Ocorrência de irregularidades de plasma com ciclo solar e atividade magnética

Nesta seção, os resultados são apresentados em função do ciclo solar e da atividade magnética. Para representar o máximo de atividade solar foram selecionados os dados das estações de GNSS que estão localizadas na [Figura 3.1](#), coletados entre os meses de julho de 2014 e julho de 2015. Similarmente, para representar o mínimo de atividade solar foram coletados os dados de GNSS nas mesmas estações, mas para o período que compreende os meses de julho de 2019 e julho de 2020. Estes conjuntos de dados foram subdivididos conforme o nível de atividade magnética, entre calmo ( $K_p \leq 3$ ) e perturbado ( $K_p > 3$ ), como em [Fejer et al. \(1991\)](#), [Liu et al. \(2018\)](#). Neste trabalho, considera-se a média horária do  $K_p$ .

Diante do exposto acima, com base na metodologia de detecção descrita no Capítulo anterior e tendo em conta as regras estabelecidas para que o evento seja considerado como EPBs, é apresentado na [Figura 4.1](#) o primeiro resultado desse trabalho. Nesta figura é mostrada a taxa de ocorrência percentual no período de máxima atividade solar (escala vermelha) e mínima atividade solar (escala azul), em que os painéis superiores (a) e (b) correspondem às detecções durante condições magneticamente calmas, e os painéis inferiores (c) e (d) correspondem às mesmas detecções, mas agora para condições magneticamente perturbadas. Em todos os painéis desta figura o eixo vertical apresenta o período de observação, enquanto o eixo horizontal determina a hora do dia em UT. As linhas verticais pontilhadas pretas, em todos os painéis, denotam o terminador do anoitecer seguido pelo terminador do amanhecer à sua direita a cerca de 350 km de altitude.

Figura 4.1 - Ocorrência de bolhas de plasma no período de máximo solar em vermelho (de julho de 2014 a julho de 2015) e mínimo solar em azul (de julho de 2019 a julho de 2020), em que os painéis (a) e (b) são períodos calmos, (c) e (d) são períodos perturbados. A linha pontilhada é o terminador solar em 350 km de altitude.



Na Figura 4.1 é possível observar que a maior taxa de ocorrência das bolhas de plasma é entre os meses de outubro e março em todas as condições analisadas. Este resultado está de acordo com os trabalhos de [Burke et al. \(2004\)](#), [Barros et al. \(2018\)](#) e [Kepkar et al. \(2020\)](#), no quais os autores também mostram que no período de alta atividade solar as menores taxas de ocorrência das bolhas de plasma estão entre maio e agosto. Além deste resultado coincidente, [Huang et al. \(2002\)](#) e [Burke et al. \(2004\)](#) afirmaram que a taxa de ocorrência das EPBs no máximo solar é maior que no mínimo. Este comportamento também pode ser observado no resultado apresentado na Figura 4.1, Tabela 4.1 e Tabela 4.2, que em números absolutos corresponde a um total de 218 detecções de bolhas de plasma no máximo solar e 193 no mínimo solar.

O resultado obtido durante o período perturbado mostra algumas ocorrências incomuns. Por exemplo, EPBs são detectadas em julho de 2015, quando não são esperadas. Outro ponto importante a se destacar neste resultado é a duração dessas irregularidades, que no período perturbado, apresentaram durações maiores quando

comparado ao período calmo, em alguns casos passando da linha do terminador solar do amanhecer. Estes casos específicos serão estudados em detalhes na seção em que se discute a influência da atividade magnética.

#### 4.1.1 Ocorrência de irregularidades no máximo solar

Para uma análise detalhada da ocorrência das bolhas de plasma no máximo solar, a Tabela 4.1 foi extraída da Figura 4.1. Nesta tabela, encontram-se as informações sobre a detecção dos eventos de bolhas de plasma, discriminados por mês e por nível de atividade magnética. Nela encontramos a quantidade de dias cujos dados analisados foram coletados quando  $Kp \leq 3$ , ao longo do seu correspondente número de detecções. A mesma informação, mas agora para  $Kp > 3$ , também está disponível nas mesmas linhas da Tabela 4.1. Por fim, o somatório de dias de cada mês nos quais foi possível coletar dados é apresentado, juntamente com o número total de detecções de eventos naquele mês. As últimas linhas da Tabela 4.1 apresentam os valores totais e percentuais para cada coluna. Nesta análise vale destacar que o termo “eventos de bolhas de plasma” significa a ocorrência das mesmas, sem distinguir a quantidade de estruturas. Ou seja, um dia com bolhas de plasma é considerado um evento. É importante mencionar, que a área utilizada neste estudo compreende todo o setor brasileiro.

Tabela 4.1 - Quantidade de dias analisados no máximo solar.

Meses	Dias Calmos		Dias Perturbados		Dias no Mês	Detecções Totais
	Nr Dias	Nr. Dectecções	Nr. Dias	Nr. Detecções		
jul/14	30	0	1	0	31	0
ago/14	18	3	13	0	31	3
set/14	18	13	12	9	30	22
out/14	16	16	15	15	31	31
nov/14	15	15	15	14	30	29
dez/14	9	9	22	22	31	31
jan/15	16	16	14	14	30	30
fev/15	18	18	11	10	29	28
mar/15	9	9	22	20	31	29
abr/15	17	7	13	4	30	11
mai/15	24	0	7	1	31	1
jun/15	19	0	11	2	30	2
jul/15	22	0	9	1	31	1
<b>Total</b>	231	106	165	112	396	218
%	100	45,9	100	67,9	100	55,1

Como resultado dessa análise detalhada, a [Tabela 4.1](#) mostra que foram analisados os dados coletados ao longo dos 396 dias, com 55% de ocorrência de bolhas de plasma. No período calmo houve 46% de ocorrência dessas bolhas de plasma e no período perturbado a ocorrência desses eventos foi de 68%.

#### 4.1.2 Ocorrência de irregularidades no mínimo solar

Análise semelhante à apresentada na seção anterior foi feita para os dados que representam o mínimo solar nesse estudo. As informações associadas a este resultado são mostradas na [Tabela 4.2](#). Nesse caso, também foram analisados os dados coletados ao longo de 396 dias. Como resultado, obteve-se 49% de ocorrência de bolhas de plasma. A análise dos dados correspondentes ao período calmo revelou uma ocorrência de bolhas em 47% dos dias considerados, ao passo que observou-se 56% da mesma ocorrência durante o período perturbado.

Tabela 4.2 - Quantidade de dias analisados no mínimo solar.

Meses	Dias Calmos		Dias Perturbados		Dias no Mês	Detecções Totais
	Nr Dias	Nr. Dectecções	Nr. Dias	Nr. Dectecções		
jul/19	26	0	5	0	31	0
ago/19	27	0	4	0	31	0
set/19	18	4	12	4	30	8
out/19	22	22	9	8	31	30
nov/19	27	27	3	3	30	30
dez/19	29	29	2	2	31	31
jan/20	25	25	5	5	30	30
fev/20	23	23	6	6	29	29
mar/20	25	20	6	5	31	25
abr/20	23	5	7	4	30	9
mai/20	29	1	2	0	31	1
jun/20	29	0	1	0	30	0
jul/20	27	0	4	0	31	0
<b>Total</b>	330	156	66	37	396	193
%	100	47,3	100	56,1	100	48,7

Em uma análise comparativa com o período de máxima atividade solar, apresentado na seção anterior, pode-se destacar que os percentuais de ocorrências desses eventos foi maior no período magneticamente perturbado do que no período magneticamente calmo. Neste contexto, é importante mencionar que a quantidade de dias calmos



é superior à quantidade de dias perturbados. Também destaca-se a influência da metodologia nos resultados deste trabalho, onde o período perturbado em análise abrange tempestades e subtempestades.

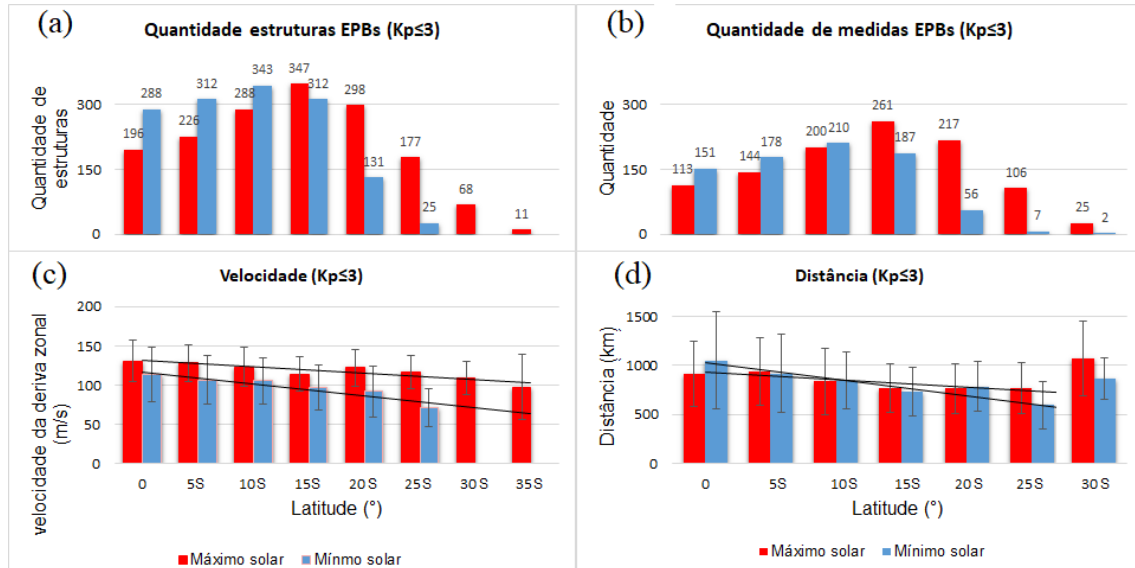
### **4.1.3 Características das irregularidades em período calmo versus período perturbado**

Uma análise adicional para identificar a ocorrência e as características (velocidade e distância) dessas estruturas de bolhas de plasmas em função da latitude é apresentada nessa seção. Para essa análise foi utilizado o keograma, a partir do qual foi calculada a velocidade e a distância entre as EPBs. Neste estudo, foram utilizados apenas os dados coletados nos meses de alta incidência de cintilação (de outubro a março).

#### **4.1.3.1 Características das irregularidades observadas no período calmo**

Os resultados obtidos no período calmo ( $K_p \leq 3$ ) desta análise são apresentados na [Figura 4.2](#). Nesta figura, o painel (a) mostra o histograma correspondente à quantidade de ocorrência da detecção dessas estruturas, por latitude geográfica fixa ( $0^\circ$ ,  $5^\circ\text{S}$ ,  $10^\circ\text{S}$ ,  $15^\circ\text{S}$ ,  $20^\circ\text{S}$ ,  $25^\circ\text{S}$ ,  $30^\circ\text{S}$ ,  $35^\circ\text{S}$ ). O painel (b) mostra um histograma de quantidade de medidas disponíveis para cálculos de distâncias, dado que uma medida de distância necessita de duas estruturas. O painel (c) mostra os resultados para a média das velocidades das estruturas das bolhas de plasma em cada latitude geográfica fixa. O desvio padrão está representado pelas barras de erro. O painel (d) mostra o resultado obtido para a média das distâncias entre as estruturas detectadas, em cada uma das latitudes fixas. Em todos os gráficos, os resultados correspondentes ao máximo solar estão em vermelho e o mínimo solar em azul.

Figura 4.2 - Os painéis (a) e (b) mostram a quantidade de ocorrência de bolhas de plasma e de medidas feitas, respectivamente. Os painéis (c) e (d) mostram a velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma por latitude fixa (0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S) e correspondem ao período calmo, no máximo (vermelho) e mínimo solar (azul), em período calmo.

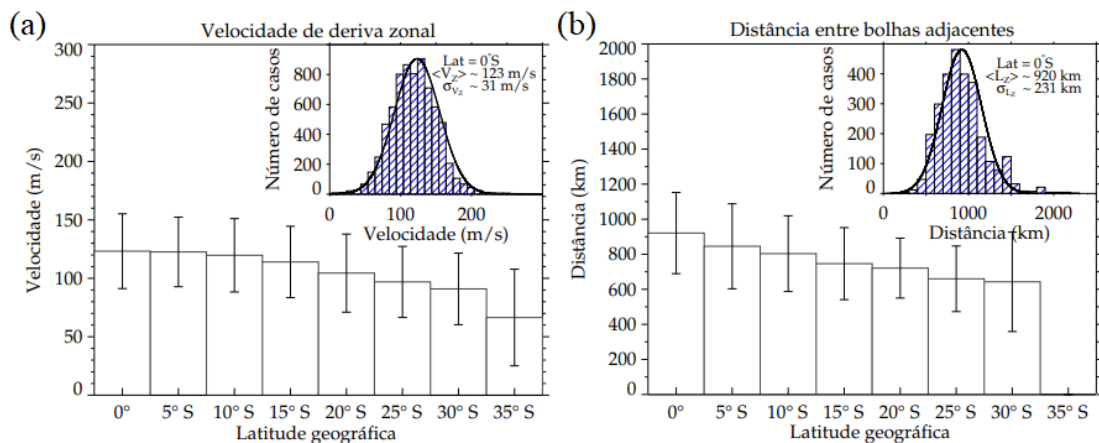


Os resultados apresentados na Figura 4.2 mostram que as maiores ocorrências dessas estruturas ocorreram na latitude de 15°S independente da atividade solar, para a análise realizada neste período calmo. Em todos os casos, a média das velocidades de deriva da bolha de plasma diminui com a latitude, caindo mais rapidamente no mínimo solar. A distância entre as estruturas de bolhas de plasma diminui com a latitude. A exceção neste resultado obtido ocorre na latitude de 30°S. Entretanto, este resultado é creditado a uma maior propagação de erro nas estruturas, uma vez que a área de observação deste estudo possui uma quantidade de receptores GNSS menor que nas demais latitudes, conforme mostra a Figura 3.1. Vale ainda ressaltar que existe a possibilidade de algumas estruturas intermediárias não se alongarem até esta latitude do estudo, o que levaria a uma medição da distância entre estruturas não consecutivas. Nesses casos, a distância calculada certamente seria superior àquelas estruturas consecutivas.

Estudo similar ao apresentado neste trabalho foi realizado por Barros et al. (2018), que calculou a velocidade (a) das estruturas de bolhas de plasma e distância (b) entre elas de novembro de 2012 a janeiro de 2016, conforme mostra a Figura 4.3. Interessante ressaltar que, naquele estudo, os autores utilizaram o valor do TEC para

os cálculos e determinações necessárias. Neste caso, como em todos os estudos que utilizam o valor do TEC, é necessário corrigir o Bias. Adicionalmente, é preciso ter em conta que detecções de estruturas de irregularidade são difíceis quando os valores de TEC são muito baixos. Ademais, os autores não fazem distinção de período calmo e perturbado, incluindo todas as bolhas encontradas em uma única análise. A menos de um sutil aumento na velocidade entre 20 e 25°S observados nos nossos resultados, no máximo solar.

Figura 4.3 - Os painéis (a) e (b) mostram a velocidade e distância entre estruturas de bolhas de plasma, respectivamente, nas latitudes de 0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S, entre novembro de 2012 a janeiro de 2016.



Fonte: Adaptado de Barros et al. (2018).

Com relação ao aumento sutil da velocidade nas latitudes de 20°S e 25°S no máximo solar, a explicação sugerida é em termos da presença da EIA. Para corroborar nossa interpretação trazemos à luz o estudo de Pimenta et al. (2003), no qual os autores estudaram a velocidade das bolhas de plasma com uso de imageadores All-Sky em Cachoeira Paulista e São João do Cariri. Neste, os autores destacaram o aumento da velocidade em duas regiões, no equador e em 20°S de latitude. Com o auxílio de um modelo (HWM-90), os mesmos autores observaram consistência nos resultados encontrados com o vento neutro, indicando que estes podem ser responsáveis pelos desvios do plasma nessas latitudes.

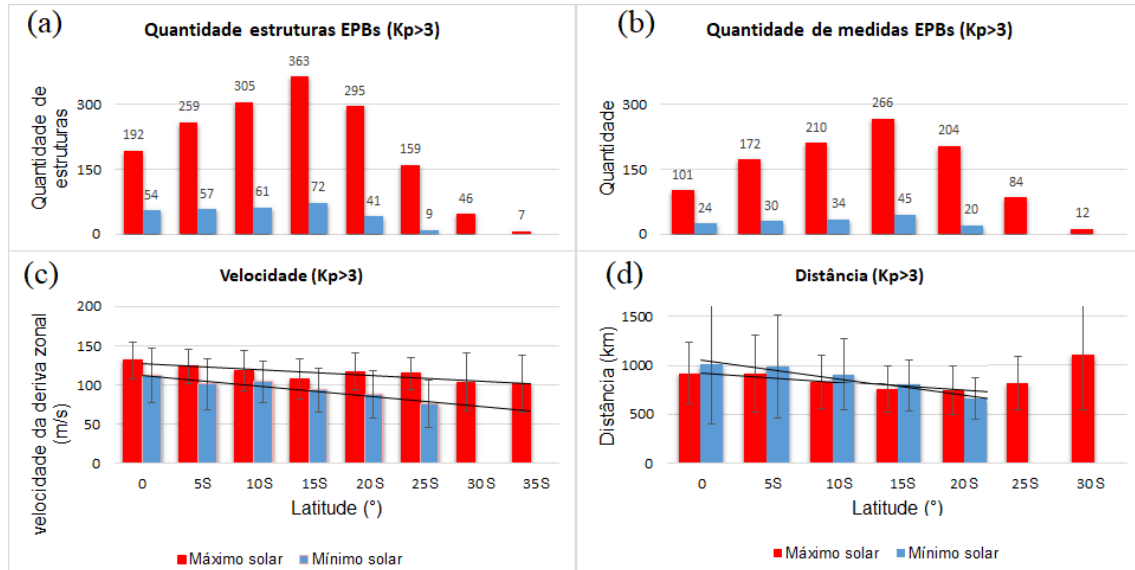
Sobre o resultado observado no painel (c) da Figura 4.2, no qual as velocidades das derivas das bolhas de plasma foram maiores no período de atividade solar alta comparada com o período de atividade solar baixa, nossos resultados são condizentes

com a literatura. [Paulino et al. \(2011\)](#) estudaram a velocidade de deriva das bolhas de plasma em período calmo, utilizando imagens de Airglow em São João do Cariri de setembro de 2000 a abril de 2007. Dentre os resultados obtidos pelos autores descararam-se que as velocidades de deriva das bolhas de plasmas foram maiores durante a alta atividade solar.

#### **4.1.3.2 Características das irregularidades observadas no período perturbado**

Os resultados obtidos no período perturbado ( $K_p > 3$ ) desta análise são apresentados na [Figura 4.4](#). Nesta figura, o painel (a) mostra o histograma correspondente à quantidade de ocorrência da detecção dessas estruturas, por latitude fixa ( $0^\circ$ ,  $5^\circ\text{S}$ ,  $10^\circ\text{S}$ ,  $15^\circ\text{S}$ ,  $20^\circ\text{S}$ ,  $25^\circ\text{S}$ ,  $30^\circ\text{S}$ ,  $35^\circ\text{S}$ ). O painel (b) mostra um histograma de quantidade de medidas disponíveis para cálculos de distâncias, dado que uma medida de distância necessita de duas estruturas. O painel (c) mostra os resultados para a média das velocidades das estruturas das bolhas de plasma em cada latitude fixa. O desvio padrão está representado pelas barras de erro. O painel (d) mostra o resultado obtido para a média das distâncias entre as estruturas detectadas, em cada uma das latitudes fixas. Em todos os gráficos os resultados correspondentes ao máximo solar estão em vermelho e ao mínimo solar em azul.

Figura 4.4 - Os painéis (a) e (b) mostram a quantidade de ocorrência de bolhas de plasma e de medidas feitas, respectivamente. Os painéis (c) e (d) mostram a velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma por latitude fixa (0°, 5°S, 10°S, 15°S, 20°S, 25°S, 30°S, 35°S) e correspondem ao período calmo, no máximo (vermelho) e mínimo solar (azul), em períodos perturbados.



De maneira geral, os resultados apresentados na Figura 4.4 desta seção são qualitativamente similares àqueles observados na Figura 4.2 da seção anterior. Via de regra, as ocorrências são maiores no período de máximo do que no mínimo de atividade solar. A queda na média das velocidades com a latitude é mais pronunciada no período de mínima atividade solar quando comparado com máxima atividade solar. E ambas as distâncias entre estruturas tendem a cair com a latitude. Não obstante, podemos observar diferenças quantitativas, tal como o fato da ocorrência de bolhas de plasma no máximo solar ser cerca de três vezes maior que no mínimo solar.

Essa pronunciada discrepância na ocorrência de bolhas de plasma entre as fases do ciclo solar não é vista nos períodos magneticamente calmos. De fato, Huang et al. (2002) sugerem que as menores ocorrências de EPBs detectadas pelos satélites DMSP no mínimo solar pode estar relacionada a baixos níveis de campos elétricos na ionosfera equatorial. Os autores mostraram evidências de que os campos elétricos na ionosfera e magnetosfera foram diminuídos durante o mínimo solar. Também utilizaram o índice F10.7 que impacta na ionosfera diurna devido à radiação ultravioleta. Os mesmos autores observaram que as médias diárias desse índice caíram drasticamente e atribuíram esta queda às contribuições do dínamo para os campos

elétricos do setor noturno, os quais diminuía no mínimo solar, tese que suporta nossa observação.

## 4.2 Detecções de EPBs atípicas durante tempestades geomagnéticas

Como visto na fundamentação teórica, as EPB são depleções formadas pelo processo de instabilidade Rayleigh-Taylor e são muito comuns após o pôr do sol, uma vez que estas são impulsionadas, principalmente, pelo pico pré-reversão da deriva  $\vec{E} \times \vec{B}$  do plasma para cima, em que o campo elétrico é direcionado para leste (KELLEY, 2009). Além disso, a ocorrência de EPBs é frequentemente associada à EIA devido ao efeito fonte, que também é impulsionado pelo campo elétrico direcionado para leste. As EPBs podem ser geradas em períodos de tempestade geomagnética (ABDU, 2012). Entretanto, a ocorrência de EPB ao amanhecer e após o nascer do sol é incomum. Nesta seção, serão apresentados três eventos de EPBs incomuns detectadas na América do Sul durante tempestades geomagnéticas, são eles: (1) em 18 de março de 2015; (2) 18 de fevereiro de 2015; e (3) 1 de março de 2015.

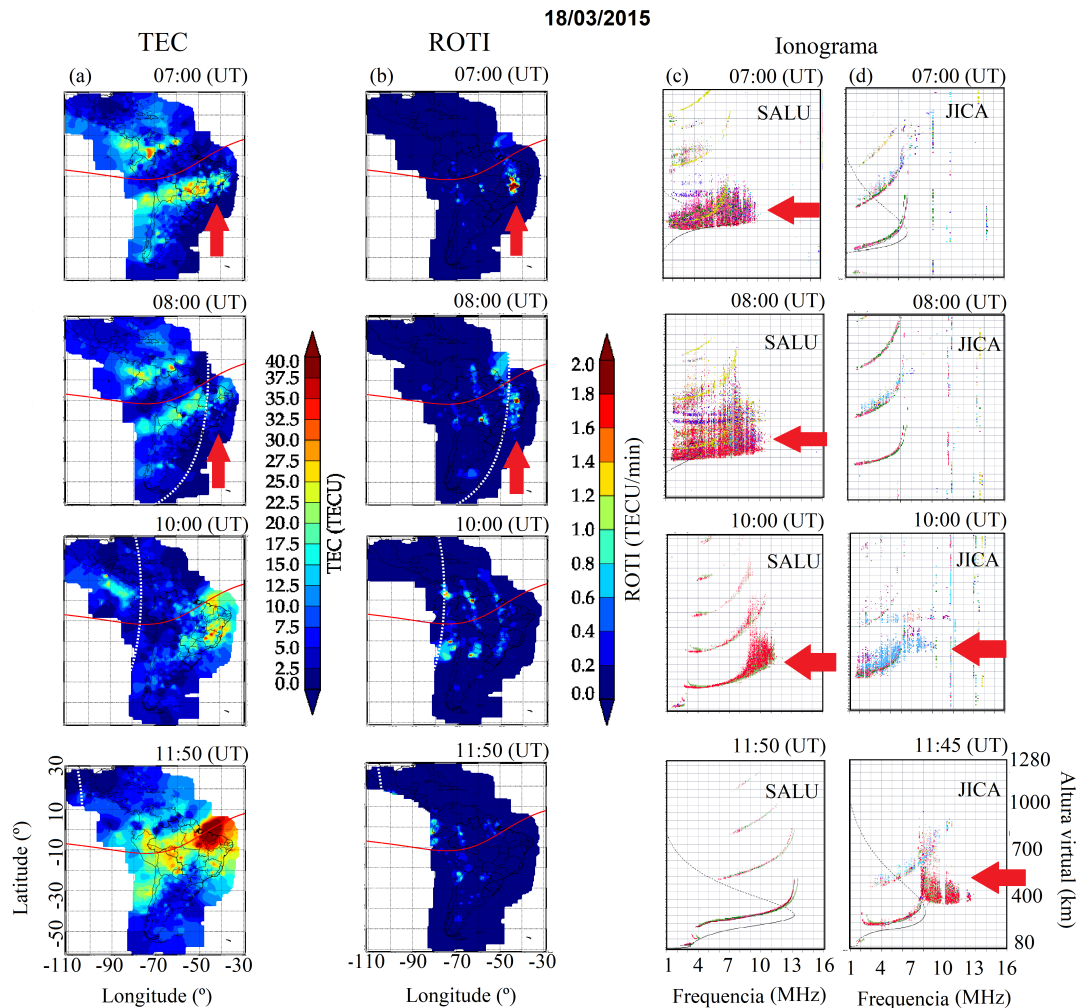
### 4.2.1 Detecção de evento de EPBs durante tempestade intensa - 18 de Março de 2015

O foco desta seção é a evolução das bolhas de plasma pré-amanhecer geradas em 18 de março de 2015, na fase de recuperação da tempestade geomagnética. O SSC foi registrado às 04:45 UT, em 17 de março de 2015 (ASTAFYEVA et al., 2015). O menor valor de Dst foi de -222 nT e foi registrado às 23:00 UT, que, pela classificação de Gonzalez et al. (1994) é denominada tempestade geomagnética intensa.

A resposta ionosférica a esta tempestade geomagnética foi analisada em muitos estudos (FAGUNDES et al., 2016; VENKATESH et al., 2017; ASTAFYEVA et al., 2015; FIGUEIREDO et al., 2017; DENARDINI et al., 2020). No entanto, análises detalhadas das bolhas de plasma pré e pós-amanhecer geradas durante esta tempestade no setor sul-americano não foram relatadas na literatura. Desse modo, nosso estudo está focado em revelar as principais características da geração e duração das bolhas de plasma em torno do amanhecer neste setor.

A Figura 4.5 mostra os mapas de TEC (coluna a), ROTI (coluna b) e ionogramas para SALU (coluna c) e JICA (coluna d) às 07:00, 08:00, 10:00 e 11:50 UT durante o dia 18 de março de 2015, na América do sul. A linha vermelha nos mapas de TEC e ROTI representa o equador magnético, e a linha pontilhada branca é o terminador solar em 350km de altitude.

Figura 4.5 - Mapas de TEC (coluna a), mapas de ROTI (coluna b), ionogramas em SALU (coluna c) e ionogramas em JICA (coluna d) às 07:00 UT, 08:00 UT, 10:00 UT, e 11:50 UT durante 18 de março de 2015. A linha vermelha sólida indica o equador magnético, e a linha branca pontilhada mostra o terminador solar.



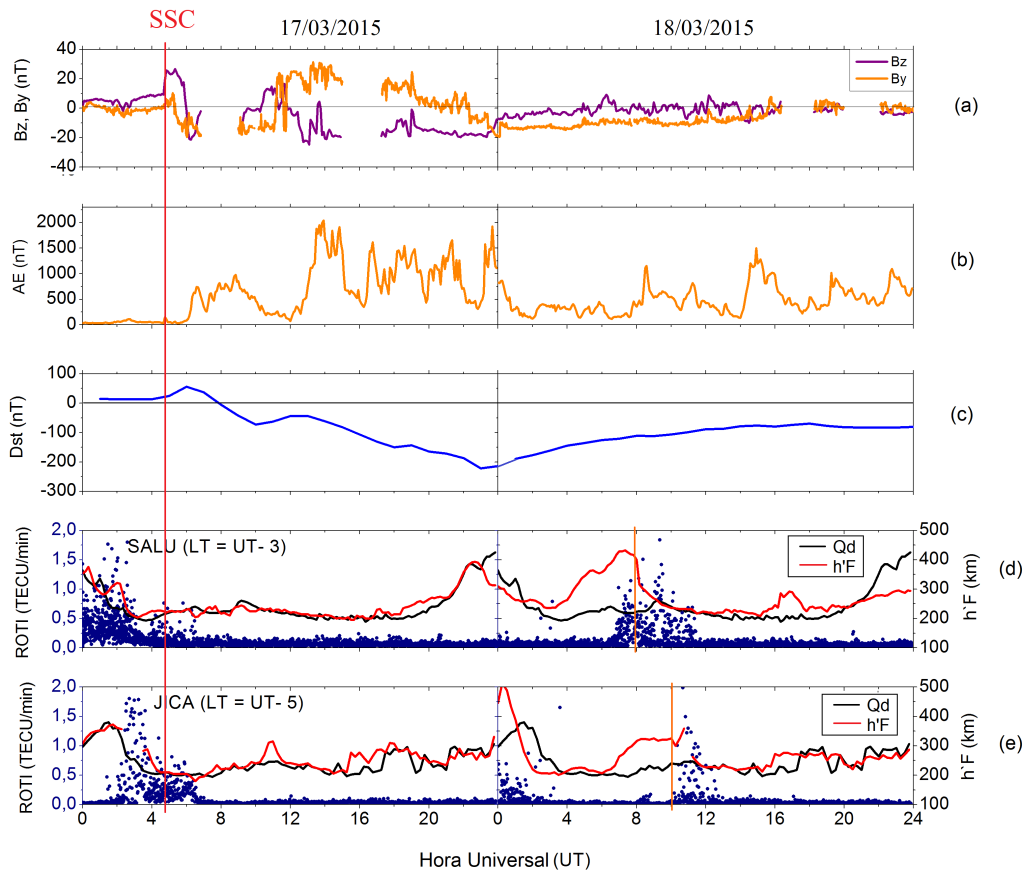
Os resultados apresentados na Figura 4.5 mostram a assinatura de depleções do plasma pré-amanhecer no mapa de TEC (identificados com as setas vermelhas). Essas irregularidades do plasma são mais evidentes no mapa de ROTI. Para esta análise, foi necessário reduzir a escala dos mapas de TEC para 40 TECU. Com esta redução, tais irregularidades tornaram-se visíveis nestes horários. O terminador solar está quase completamente fora do mapa por volta das 11:50 UT. Contudo, ainda é possível observar estruturas de bolhas de plasma nos mapas. Os ionogramas de SALU e JICA confirmam a ocorrência dessas EPBs com o aparecimento do espalhamento (Spread F), em ambas as estações. Estas estruturas foram intensas,

apesar de terem ocorrido em horário próximo do nascer do sol. Assim, os efeitos da fotoionização ativos não foram suficientes para que essas estruturas cessassem. Portanto, os mecanismos físicos potenciais responsáveis pela evolução e dissipação das bolhas de plasma geradas no setor sul-americano serão discutidos nesta seção. Este estudo terá foco em dois pontos principais: (1) o provável efeito que gerou essas irregularidades e (2) as principais diferenças encontradas entre a costa leste e oeste.

Para abordar o principal efeito que possa ter desencadeado essas irregularidades, a [Figura 4.6](#) mostra as componentes  $B_z$  e  $B_y$  do campo magnético interplanetário (IMF) (painel a, em roxo e laranja, respectivamente), o índice Auroral Electrojet (AE) (painel b, em laranja), o índice Dst (painel c, em azul) e o ROTI para SALU e Ancon (que está muito próximo de JICA) (painéis d e e, em azul, respectivamente). A altura virtual  $h'F$  e o dia calmo de referência são mostrados nos painéis d e e, em vermelho e preto, respectivamente, em SALU e JICA. O dia calmo (Qd) utilizado é o dia 14 de março de 2015.



Figura 4.6 - IMF  $Bz$  e  $By$  (painel a, em roxo e laranja, respectivamente), o índice AE (painel b, em laranja), o índice Dst (painel c, em azul) e ROTI para SALU e Ancon (estação próxima a JICA) (painéis d e e, na marinha, respectivamente),  $h'F$  e o dia calmo de referências (painéis d e e, em vermelho e preto, respectivamente) para SALU e JICA. A linha vermelha marca o SSC e a linha laranja marca o horário do nascer do sol em cada estação.



Os resultados apresentados na Figura 4.6 mostram o  $Bz$  negativo com elevados valores de AE às 06:00 UT, no dia 17 de março. Baseando a análise da Figura 4.6 nos resultados encontrados na literatura para a mesma tempestade magnética, tem-se que Huang et al. (2016) concluíram que o DDEF começou a atuar 4 horas após o SSC durando cerca de 31 horas. Carter et al. (2016) relataram que um campo elétrico “overshielding” começou a agir às 00:00 UT, no dia 18 de março. Após às 00:00 UT, o  $Bz$  começou a se recuperar e o  $h'F$  apresentou elevados valores quando comparado ao dia calmo de referência, às 03:00 UT em SALU. Nesta estação, irregularidades ionosféricas foram observadas no ROTI por volta das 07:00 UT (04:00 LT), durando até 11:30 UT (08:30 LT). Durante este período, uma rápida inversão para norte

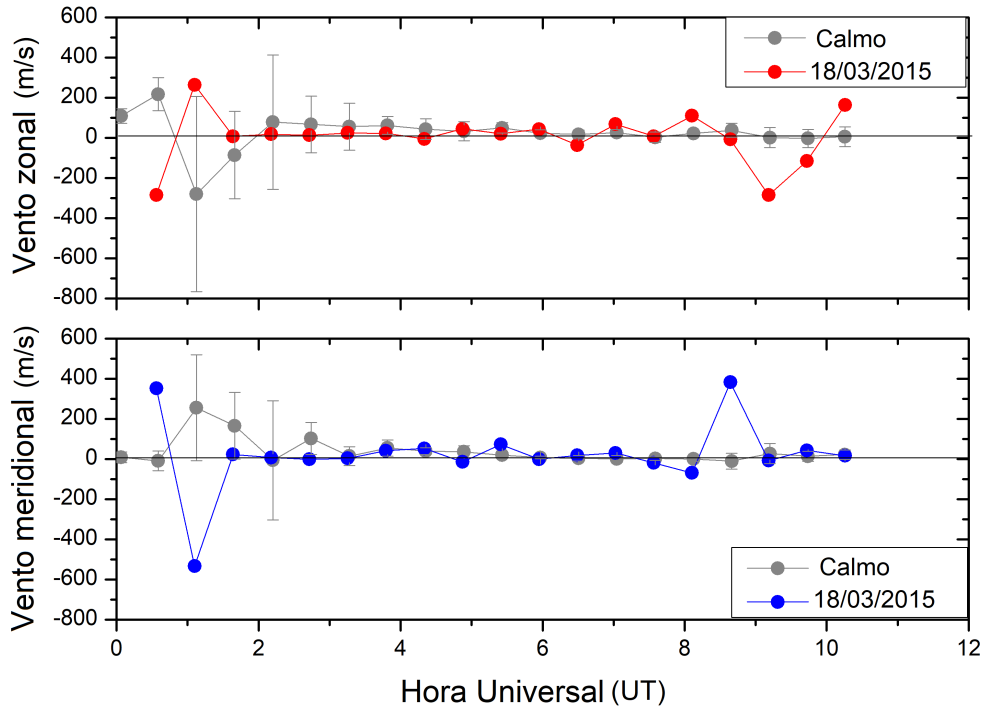
do IMF  $B_z$  foi registrada às 06:00 UT. Neste momento, a camada F sobre JICA aumentou em comparação com a curva Qd (01:00 LT). Em uma estação próxima a JICA (Ancon), os valores de ROTI aumentaram entre 10:00 UT e 13:00 UT (05:00 LT e 08:00 LT).

A deriva ascendente do plasma é observada com a elevação da camada F na região equatorial em ambas as longitudes. No setor da América do Sul, a climatologia da deriva do plasma é decrescente em condições calmas antes do amanhecer no mês de março (o campo elétrico direcionado para oeste) (FEJER, 2011). Portanto, este aumento da camada F observado em comparação com o período calmo antes da ocorrência de irregularidades é um efeito atribuído à tempestade magnética (Figura 4.6 (d) e (e)).

Esse aumento na camada F após a meia-noite local parece estar associado ao campo elétrico direcionado para leste devido ao DDEF (FEJER et al., 1983). Scherliess e Fejer (1997) mostraram um aumento da deriva vertical do plasma em Jicamarca às 06:00 LT, que foi atribuído ao DDEF. Este comportamento está de acordo com os resultados aqui apresentados. De fato, a camada F começa a subir em 01:00 LT em JICA e em SALU. Com uma elevação máxima em 04:00 LT em SALU e 06:00 LT em JICA, que é exatamente o momento em que começa o desenvolvimento do RTI para a geração das EPBs.

Ademais, o DDEF é resultado da ação dos ventos perturbados. Assim, torna-se necessário analisar os dados de vento disponíveis, que são mostrados na Figura 4.7. Esta figura mostra a variação temporal (entre 00:00 e 12:00 UT) do vento zonal no painel superior (curva vermelha) e do vento meridional no painel inferior (curva azul), cuja média é feita considerando os dias calmos do mês (10, 30, 5, e 14 de março de 2015, curva cinza) e o desvio padrão é representado pela barra de erro. Os dados de ventos foram obtidos pelo interferômetro Fabry-Perot em JICA, no dia 18 de março de 2015.

Figura 4.7 - Componente zonal e meridional do vento (em vermelho e azul respectivamente) obtido pelo interferômetro Fabry-Perot em JICA, juntamente com a média de cinco dias calmos de referência (em cinza, os dias são 10, 30, 5, e 14 de março de 2015).



Os dados da [Figura 4.7](#) mostram perturbações significativas no vento meridional e zonal quando comparado à média de dias calmos de referência. A perturbação do vento em JICA leva a possibilidade dos efeitos do DDEF atuarem no equador. Os desvios verticais do dínamo perturbado têm amplitudes maiores em cerca de 04:00 LT e podem estar relacionados a irregularidades do plasma nesses momentos ([FEJER et al., 1999](#); [FEJER, 2002](#)). É neste período, 09:00 UT (04:00 LT), que ocorrem as variações do vento em relação ao período calmo. Infelizmente, os dados de vento em SALU não estão disponíveis para este dia e nenhuma comparação pode ser feita entre o vento nas duas longitudes.

Com os dados de ventos e o IMF  $B_y$  apresentados na [Figura 4.6 \(a\)](#), é possível fazer algumas afirmações baseados no estudo de [Hui e Vichare \(2021\)](#), em que os aurores estudaram os efeitos do IMF  $B_y$  sobre o pico pré-reversão após pôr do sol e no amanhecer, no campo elétrico zonal equatorial, usando simulação. Eles sugeriram que a PRE matinal pode estar relacionada aos efeitos do dínamo perturbado. Este

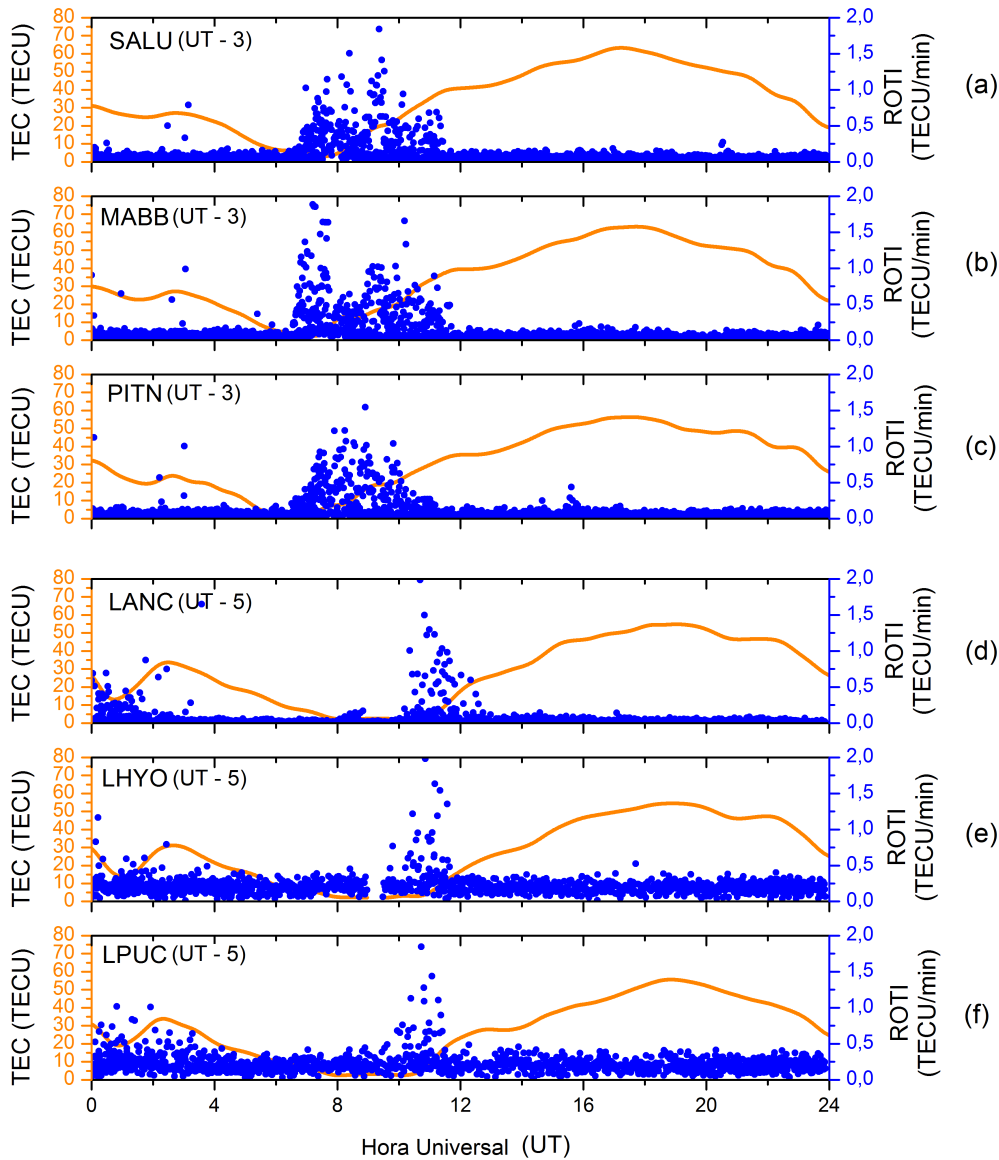
estudo de modelagem também mostra que as condições positivas e negativas de IMF  $B_y$  estão opostamente relacionadas às perturbações dos ventos meridionais no equador. Além disso, sugeriram que essa oposição é responsável pelos efeitos observados no PRE matinal e após o pôr do sol com a presença do DDEF. As observações aqui apresentadas mostram perturbações do vento no amanhecer quando IMF  $B_y$  é negativo, o que parece concordar com o estudo de Hui e Vichare (2021).

Adicionalmente, apesar de existirem fortes indícios da ação do DDEF, não se deve descartar os elevados valores de AE às 08:00 UT (como mostra a Figura 4.6 (b)). Esta atividade auroral pode ter contribuído para os efeitos que aparecem em baixas latitudes. O índice AE às 08:30 UT era de 1115 nT. Esta subtempestade pode ter gerado um campo elétrico de penetração e também contribuído para o aumento da camada F, somando-se aos efeitos do dínamo perturbado que já estava ativo. Porém, mais estudos devem ser realizados para comprovar essa suposição.

Portanto, neste trabalho, sugerimos que os campos elétricos do dínamo perturbado próximo do nascer do sol causaram a elevação da camada e, com o efeito adicional da penetração do campo elétrico que surgiu com os altos valores do AE, fizeram com que a camada continuasse elevada contribuindo para a permanência das irregularidades nos horários do amanhecer.

Além disso, as irregularidades foram analisadas em dois setores longitudinais (costa leste e costa oeste). Três estações na costa leste e três estações na costa oeste foram selecionadas para um estudo mais detalhado. Esta análise visa à avaliação da evolução temporal do TEC e do ROTI. A Figura 4.8 mostra o ROTI (pontos azuis) e TEC (curvas laranja) para os locais selecionados na costa leste (SALU, painel a, MABB, painel b, e PITN, painel c) e na costa oeste (LANC, painel d, LHYO, painel e, e LPUC, painel f).

Figura 4.8 - Variações temporais de TEC (laranja) e ROTI (pontos azuis) nas estações SALU, MABB, PITN, LANC, LHYO e LPUC (painéis a, b, c, d, e, e f, respectivamente) durante o dia 18 de março de 2015.

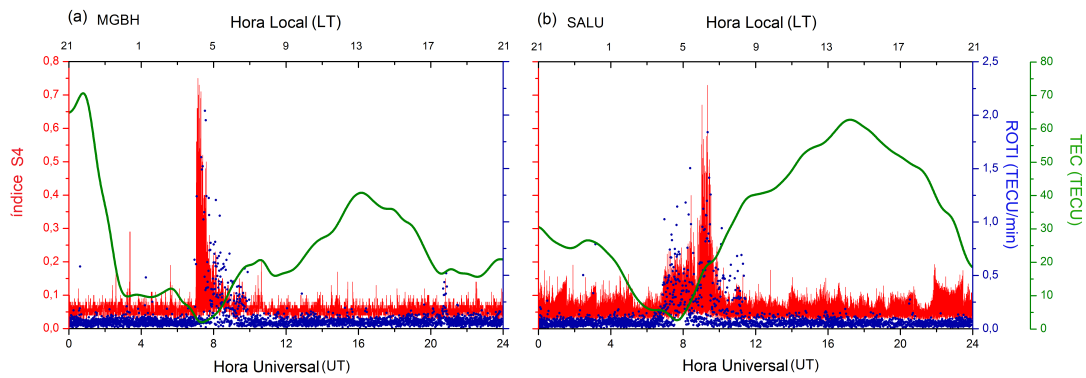


Os dados apresentados na Figura 4.8 mostram uma intensificação do ROTI em todas as estações. Como resultado, as irregularidades do plasma duraram mais tempo na costa leste (aproximadamente 5 horas, incluindo 3 horas após o nascer do sol) do que na costa oeste (aproximadamente 3 horas). As irregularidades na costa oeste não duraram muito depois do nascer do sol. Essas observações mostram uma dependência longitudinal distinta, em que as durações, após o nascer do sol, das bolhas

de plasma são diferentes nos dois setores de longitude. Além da diferença de  $33^\circ$  de longitude ( $\sim 3600$  km), há também uma diferença significativa na declinação do equador magnético, sendo aproximadamente  $-2^\circ$  na costa oeste e aproximadamente  $-20^\circ$  na costa leste.

Também foi feita uma análise das ocorrências de cintilações ionosféricas usando receptores GNSS, que fornecem medições do índice S4. As medições S4, ROTI e TEC para as estações MGBH e SALU, em uma longitude semelhante, são apresentadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Índice S4 (em vermelho), ROTI (pontos azuis) e TEC (curva verde) para as estações de MGBH (painel a) e de SALU (painel b), respectivamente.



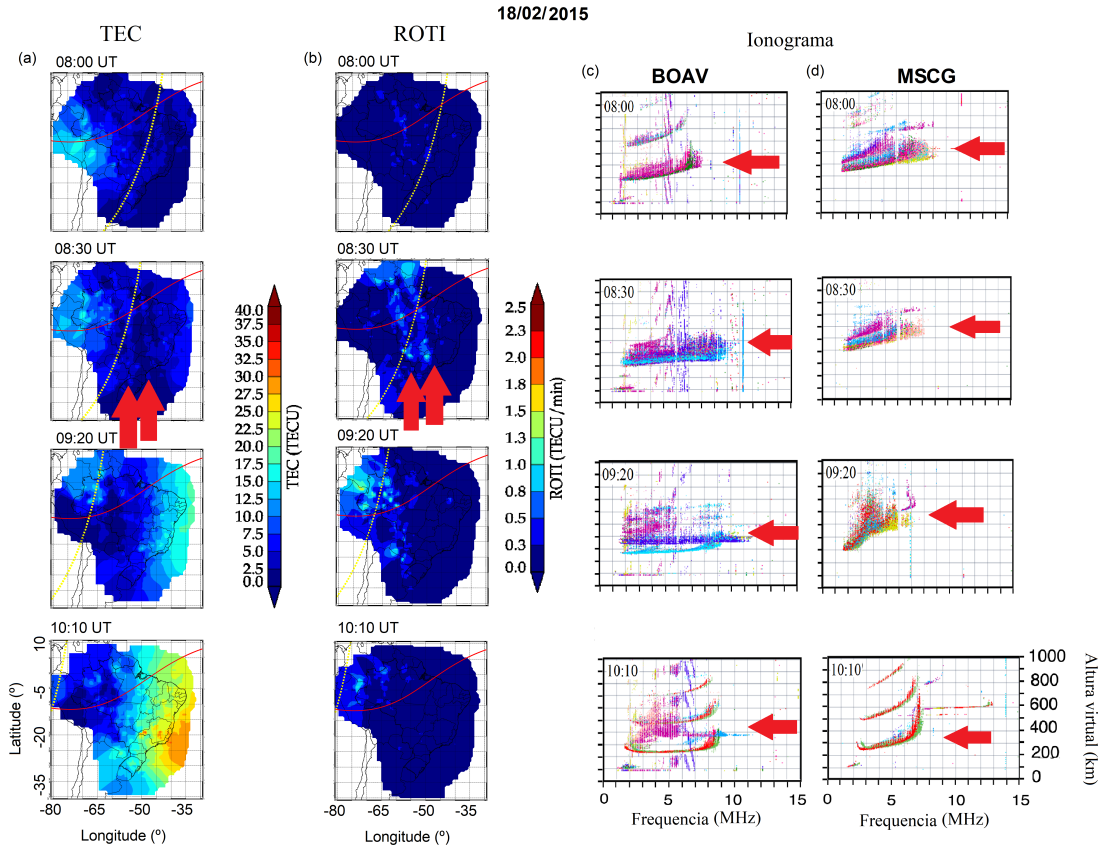
Os resultados apresentados na Figura 4.9 (a) mostram uma amplitude elevada na cintilação indicada pelo índice S4. Valores intensos de ROTI são observados na estação MGBH ao amanhecer e na estação SALU após o nascer do sol. O nascer do sol foi registrado às 04:45 LT em MGBH e 04:53 LT em SALU (de acordo com <https://www.timeanddate.com/sun/>). A forte cintilação ao amanhecer e após o nascer do sol, quando as densidades eletrônicas eram mínimas (de acordo com observações de TEC na estação MGBH) e perto do mínimo (na estação SALU) não foi relatada anteriormente. Os eventos observados contradizem alguns resultados de modelagem, em que as ocorrências de intensas cintilações estão geralmente associadas a valores elevados de densidade eletrônica (PRIYADARSHI, 2015).

#### 4.2.2 Detecção de evento de EPBs durante tempestade moderada - 18 de Fevereiro de 2015

Este evento é semelhante ao evento mostrado anteriormente, porém trata-se de uma tempestade magnética moderada. A tempestade geomagnética analisada neste estudo foi causada por uma corrente de vento solar de alta velocidade (do inglês, “High Speed Streams” - HSS). Este evento começou às 12:13 UT, em 17 de fevereiro de 2015, o menor valor registrado de Dst foi -64 nT em 18 de fevereiro.

Uma análise da propagação das EPBs deste evento é mostrada na [Figura 4.10](#), com uma sequência de mapas bidimensionais de TEC (coluna a), ROTI (coluna b), ionogramas em Boa Vista (BOAV, Lat: 2,81°, Lon: -60,67°) (coluna c) e ionogramas em Campo Grande (MSCG, Lat: -20,44, Lon: -54,65°) (coluna d), para 08:00 UT, 08:30 UT, 09:20 UT e 10:10 UT, no dia 18 de fevereiro de 2015. As linhas pontilhadas amarelas e as linhas vermelhas contínuas nos mapas TEC e ROTI referem-se ao terminador solar e ao equador magnético em 2015.

Figura 4.10 - Mapas bidimensionais multi-GNSS do TEC (coluna a), ROTI (coluna b), ionograma em BOAV (coluna c) e ionograma em MSCG (coluna d) para 08:00 UT, 08:30 UT, 09:20 UT e 10:10 UT no dia 18 de fevereiro de 2015. Os mapas mostram o equador magnético para o ano de 2015 (linha vermelha) e o terminador solar (linha pontilhada amarela).



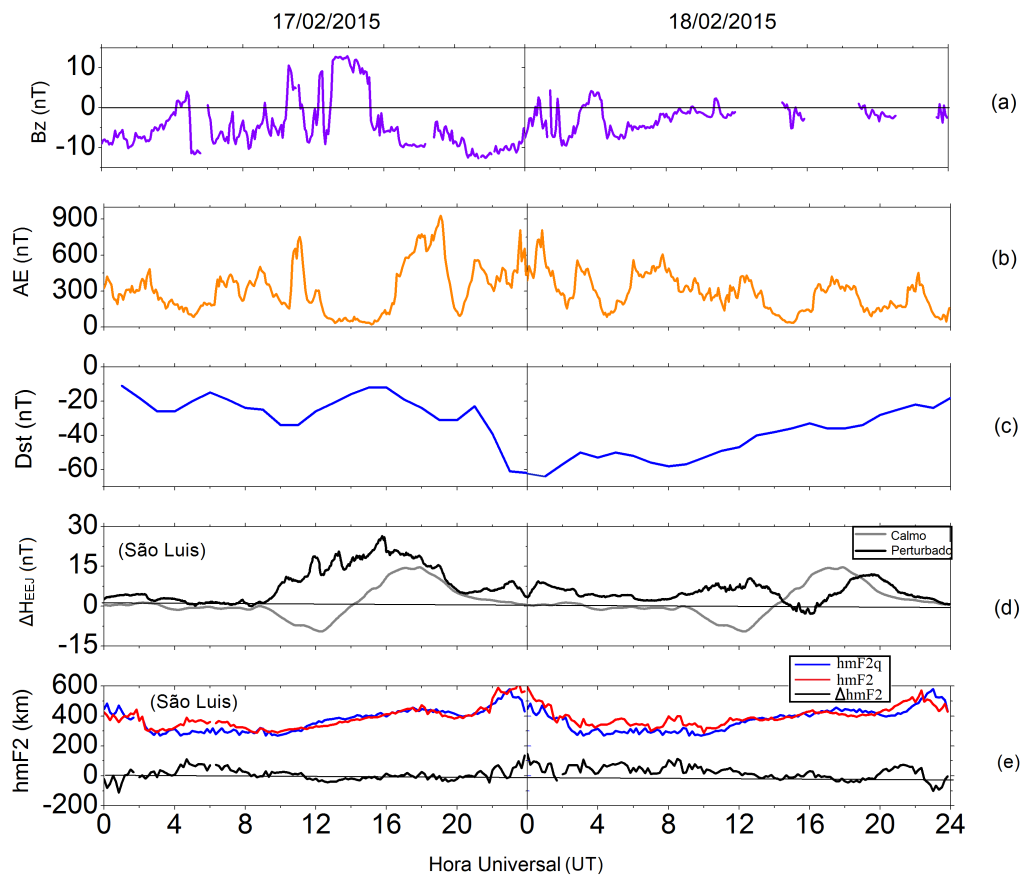
Observam-se estruturas de EPBs nos mapas de TEC (Figura 4.10 a) e nos mapas de ROTI (Figura 4.10 b) atingindo valores elevados no amanhecer (setas vermelhas na Figura 4.10 (a) e (b)). Notam-se duas estruturas de bolha de plasma equatorial com duração de 2 horas. Assim, o índice ROTI foi capaz de mostrar irregularidades em regiões de baixa latitude, como BOAV e MSCG. Além disso, os ionogramas de BOAV e MSCG mostraram ocorrências de Spread F (setas vermelhas na Figura 4.10 (c) e (d)), confirmando o aparecimento de EPBs diurnas.

Os dados apresentados na Figura 4.11 mostram os parâmetros analisados durante esta tempestade magnética; são eles: (a) campo magnético interplanetário (IMF  $B_z$ , em roxo), (b) índice AE (laranja), (c) Dst (azul), (d)  $\Delta H_{EEJ}$  ( $\Delta H_{SALU} - \Delta H_{Eusébio}$ ) no período perturbado e calmo (linhas preta e cinza, respectivamente). O painel



(e) mostra o  $hmF2$  (altura do pico da densidade de elétrons da camada F2, linha vermelha) e a referência de dia calmo ( $hmF2_q$ , linha azul) em SALU. É importante mencionar que  $\Delta hmF2$  significa  $hmF2 - hmF2_q$  (linha preta). O dia 14 de fevereiro de 2015 foi utilizado como dia calmo de referência.

Figura 4.11 - Parâmetros da tempestade geomagnética moderada que ocorreu de 17 a 18 de fevereiro de 2015: (a) o campo magnético interplanetário  $Bz$ , (b) índice AE, (c) Índice Dst, (d)  $\Delta H_{EEJ}$  ( $\Delta H_{SALU} - \Delta H_{Eusébio}$ ) durante a tempestade geomagnética (linha preta) e o período calmo (linha cinza), (e)  $hmF2$ ,  $hmF2_q$ , e  $\Delta hmF2$  para SALU nas linhas vermelha, azul e preta, respectivamente.



As consequências imediatas de uma tempestade geomagnética foram observadas nas latitudes equatoriais, em que houve uma expressiva entrada de energia em altas latitudes, perturbando a circulação termosférica. Esses ventos perturbados atingiram regiões de baixa latitude, modificando todo o sistema de vento termosférico e gerando mudanças drásticas nos fenômenos equatoriais (FEJER et al., 1983; ABDU,

2005). Isto é observado nas modificações dos parâmetros  $hmF2$  na Figura 4.11 sobre SALU. Assim, destaca-se um aumento no AE entre 20:00 UT e 21:00 UT, no dia 17 de fevereiro. Além disso, há um aumento no parâmetro  $hmF2$  às 21:30 UT em relação ao dia calmo de referência durante a fase principal da tempestade geomagnética. O aumento começou ao anoitecer, com a antecipação do PRE. A altura da camada F responde às variações de AE associadas à penetração de campo elétrico “undershielding” para latitudes equatoriais com polaridade para leste no pôr do sol (ABDU et al., 2012; SOBRAL et al., 2001).

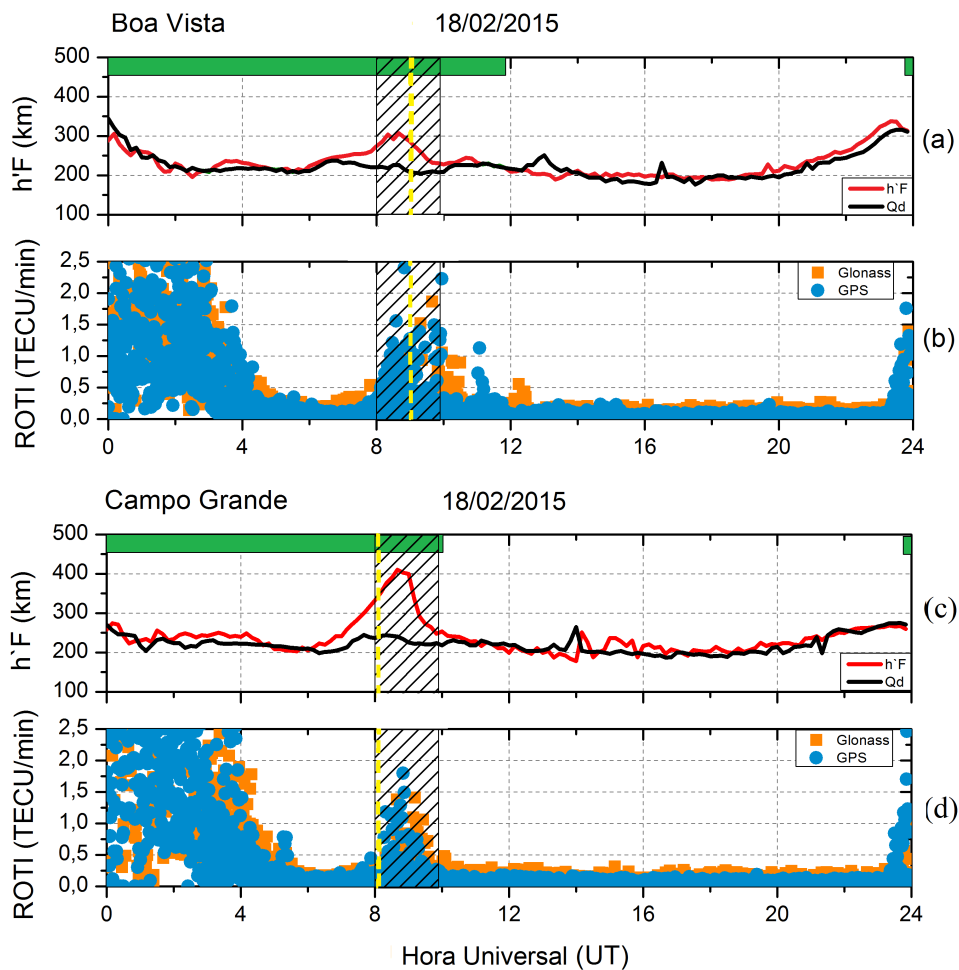
A orientação do IMF  $Bz$  sofre oscilações rápidas entre as direções sul e norte por volta das 05:00 UT, em 17 de fevereiro. Diferenças significativas na corrente do eletrojato equatorial ( $\Delta H_{EEJ}$ , painel g) em comparação com o período calmo podem ser observadas entre 08:00 UT e 16:00 UT. O IMF  $Bz$  inverte para sul às 16:00 UT, permanecendo assim por mais de 8 horas. O  $Bz$  inverte para norte às 00:00 UT, em 18 de fevereiro, com uma queda correspondente no índice AE. Observa-se ainda que os valores do  $\Delta H_{EEJ}$  durante o período perturbado apresentam uma pequena diminuição seguida de aumento em relação ao período calmo. Isto é um indicativo da ação do campo elétrico “overshielding”. Tal fato se confirma observando o  $hmF2$ , que possui valores mais expressivos em relação ao  $hmF2_q$ .

Contudo, o interesse deste estudo é a partir das 08:00 UT do dia 18 de fevereiro. Antes deste horário (08:00 UT) pode-se observar que já havia atividade auroral intensa, esta facilita a entrada de energia em altas latitudes resultando no aquecimento joule, que leva às condições adequadas ao desenvolvimento dos ventos perturbados. Além disso, o AE apresenta uma queda às 08:00 UT. Observa-se que ambos os parâmetros  $\Delta H_{HHJ}$  e  $hmF2$  tiveram valores mais altos do que o período calmo. Os valores elevados de  $\Delta H_{HHJ}$  começaram às 07:00 UT, permanecendo com direção oposta durante todo o dia. Este comportamento é um forte indicativo da presença do DDEF (ABDU et al., 2006; BLANC; RICHMOND, 1980). Portanto, existem as pré-condições necessárias para o desenvolvimento da instabilidade pré-amanhecer.

Assim sendo, foram observadas ocorrências incomuns de EPB em BOAV e em MSCG, como pode ser visto na Figura 4.12. Nesta figura é mostrada a altura virtual ( $h'F$ ) em 18 de fevereiro de 2015 (linha vermelha) e o dia calmo de referência (Qd) (linha preta) em BOAV (a) e MSCG (c), respectivamente. Para as mesmas regiões, o índice ROTI também é mostrado (b em BOAV e d em MSCG). A área hachurada é o período em análise e a linha pontilhada amarela é o terminador solar. Os blocos verdes são as ocorrências de Spread F. O símbolo laranja no gráfico ROTI utiliza o

GLONASS no cálculo e o símbolo azul se refere ao GPS.

Figura 4.12 - A altura virtual ( $h'F$ ) em 18 de fevereiro de 2015 (linha vermelha) e o dia calmo de referência ( $Q_d$ ) (linha preta) em BOAV (a) e MSCG (c), e o índice ROTI para as mesmas regiões nos painéis b e d. A área hachurada é o período em estudo e a linha pontilhada amarela é o terminador solar. Os blocos verdes são as ocorrências de Spread F.



Os resultados obtidos da Figura 4.12 mostram elevados valores de ROTI após o pôr do sol em ambas as regiões, o que está relacionado ao comportamento esperado quando a EPB está presente. Assim, como consequência do PRE na altura da camada F ocorrido na noite anterior, um aumento no ROTI na Figura 4.12 (b) e (d) começa antes das 00:00 UT. Também se observou uma longa duração deste evento de bolha de plasma, mostrando altos valores de ROTI até  $\sim 04:00$  UT que mantêm a camada

F em uma altitude elevada (Figura 4.12 (a) e (c)).

O segundo pico do ROTI (área hachurada) é o principal foco deste estudo, no qual há a o aparecimento das bolhas de plasma “frescas”. Este pico ocorre entre 08:00 UT e 10:00 UT no dia 18 de fevereiro, quatro horas após o primeiro evento. Observa-se que, no mesmo horário, o  $h'F$  aumenta significativamente em relação ao período calmo (Figura 4.12 (a) e (c)). Especificamente, a partir de  $\sim 06:00$  UT, o  $h'F$  começa a se elevar, apresentando um pico às 08:00 UT, atingindo 300 km em BOAV e 400 km em MSCG. Nestes horários o  $Bz$  permanece em torno de zero (Figura 4.11 a), sem variações significativas no AE (Figura 4.11 b). Esse aumento da altura da camada F após a meia-noite local parece estar associado ao campo elétrico direcionado para leste devido ao DDEF, que causou um aumento antes do nascer do sol que estabelece as pré-condições para o desenvolvimento de instabilidade. Este DDEF possui polaridade leste (oeste) à noite (dia) e pode permanecer dias após a tempestade magnética (ABDU et al., 2006). Assim, o aumento do ROTI entre 08:00 UT e 10:00 UT mostrou que a instabilidade do tipo bolha de plasma no período pré-amanhecer pode ter sido causada pelos efeitos do DDEF.

Além disso, a bolha de plasma em BOAV (LT = UT -4 horas) parece durar mais do que em MSCG (LT = UT -3,6 horas). Este fato deve-se, provavelmente, ao dia amanhecer primeiro em MSCG, visto que, neste dia, o nascer do sol foi às 05:14 LT ( $\sim 08:50$  UT) em MSCG, enquanto em BOAV foi às 05:05 LT ( $\sim 09:05$  UT). A depleção do plasma que forma EPBs é preenchida após o nascer do sol, devido aos efeitos da fotoionização da radiação solar EUV. Conseqüentemente, as bolhas de plasma equatorial tendem a desaparecer após o nascer do sol (WU et al., 2020). Portanto, esta é uma hipótese plausível para explicar o motivo das bolhas de plasma permanecerem mais tempo na estação BOAV.

Adicionalmente, Ram et al. (2015) observaram intensas EPBs no início do dia, durante uma tempestade geomagnética, usando radar coerente sobre o setor da Indonésia. Para explicar as suas observações, os autores atribuíram tais ocorrências de EPBs ao campo elétrico “overshielding” associado ao IMF  $Bz$  para norte, que difere da nossa interpretação para a fonte da elevação da camada. Independente disso, essa fonte ocasionou uma elevação da camada F para altitudes mais elevadas, criando condições típicas para o desenvolvimento de EPBs. Neste estudo de caso, a região F apresentou aumento nas horas em que o ROTI detectou irregularidades e aparecimento de Spread F. Conforme mencionado anteriormente, a tempestade geomagnética aqui analisada é moderada e os resultados indicam a presença de DDEF

nas mesmas horas de ocorrências das EPBs antes do nascer do sol. Ou seja, as EPBs pré-amanhecer analisadas foram vistas durante uma ação DDEF da tempestade geomagnética devido a um HSS em vez de um campo elétrico “overshielding” causado por uma tempestade geomagnética pela Ejeção de Massa Coronal Interplanetária (ICME), como mostrado por [Ram et al. \(2015\)](#).

Outro estudo foi realizado por [Wu et al. \(2020\)](#), no qual os autores analisaram as ocorrências das EPBs após o nascer do sol durante a fase de recuperação da tempestade geomagnética ocorrida em 06-08 de novembro de 2015. Os autores utilizaram imageador All-Sky (ASI) e dados GNSS no sul da China. Os resultados apresentados nesta análise mostram que as EPBs desapareceram cerca de 1 hora após o nascer do sol. Assim, no caso de BOAV e MSCG, as irregularidades duram cerca de 1 hora após o nascer do sol, mostrando que os efeitos da fotoionização não são suficientes para eliminar a irregularidade, concordando com os resultados de [Wu et al. \(2020\)](#). Além disso, os autores também observaram um aumento abrupto da região F durante o período por eles estudado, semelhante aos resultados mostrados neste estudo de caso. Portanto, embora a tempestade fosse moderada e os efeitos no campo magnético terrestre não fossem muito intensos, ela foi capaz de gerar irregularidades no plasma, como as EPBs aqui mostradas.

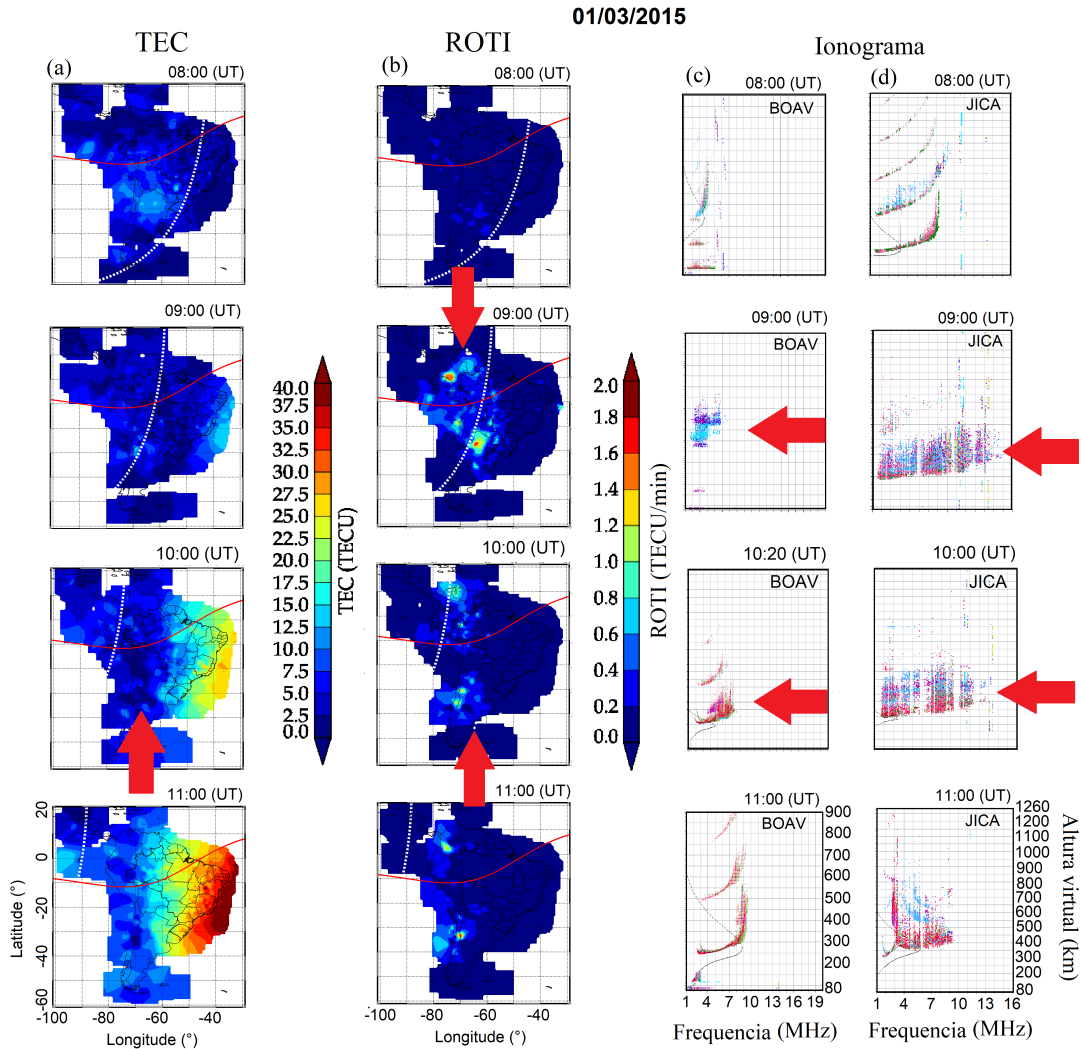
Por fim, acredita-se que os mecanismos de geração dessas ocorrências atípicas de EPBs no amanhecer são devidos à ação do DDEF nesses horários. De fato, às 08:00 UT do dia 18 de fevereiro de 2015, uma perturbação no sistema de dínamo do vento fez com que a camada se elevasse, gerando condições favoráveis para o desenvolvimento do RTI. Portanto, os resultados indicam que o DDEF foi o principal responsável pela geração dessas EPBs antes do amanhecer.

#### **4.2.3 Detecção de evento de EPBs durante tempestade fraca - 1 de Março de 2015**

Este evento é semelhante ao evento mostrado anteriormente, porém trata-se de uma tempestade magnética fraca. A tempestade geomagnética analisada neste estudo registrou o menor valor de Dst às 09:00 UT do dia 1 de março de 2015, com -46 nT.

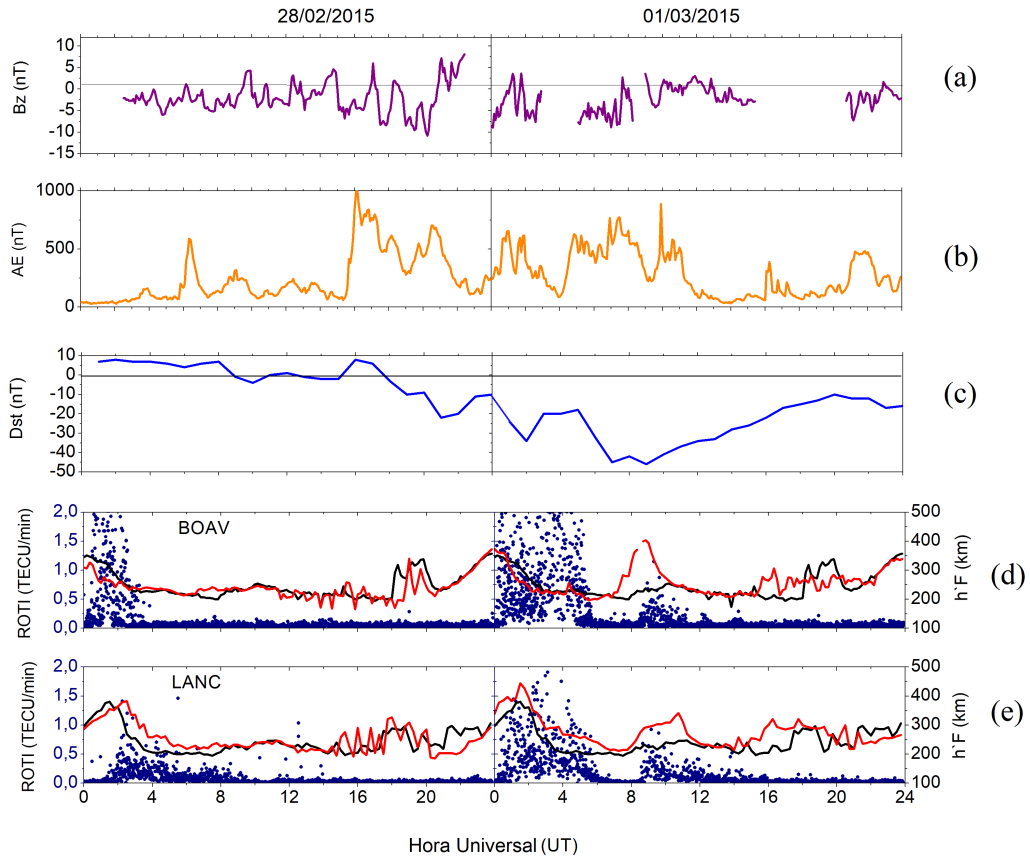
As bolhas de plasma durante o amanhecer também foram observadas em uma tempestade fraca no dia 1 de março de 2015. A [Figura 4.13](#) mostra os mapas de ROTI, ionogramas em BOAV e JICA às 08:00, 09:00 e 11:00 UT, respectivamente. As setas vermelhas indicam as irregularidades. Os mapas mostram a passagem do terminador solar (linha pontilhada branca) e o equador magnético (linha vermelha) em 2015.

Figura 4.13 - Mapas bidimensionais multi-GNSS do ROTI, ionograma em BOAV e ionograma em JICA às 08:00 UT, 09:00 UT e 11:00 UT, respectivamente, no dia 1 de março de 2015. Os mapas mostram o equador magnético para o ano de 2015 (linha vermelha) e o terminador solar (linha pontilhada branca).



Os resultados apresentados na Figura 4.13 mostram que é possível observar o surgimento destas irregularidades em todos esses equipamentos e a passagem do terminador solar deixa claro a permanência dessas irregularidades mesmo após o nascer do sol. Para uma análise mais detalhada deste evento foram analisados alguns parâmetros, como o IMF  $B_z$  (painel a), os índices AE (painel b) e Dst (painel c), conforme Figura 4.13. Além disso, é mostrado o índice ROTI em BOAV e JICA, respectivamente (pontos azuis) e o  $h'F$  (linha vermelha) e o dia calmo de referência ( $Q_d$ ) (linha preta) em BOAV (painel d) e LANC (painel e, estação próxima a Jicamarca).

Figura 4.14 - IMF  $B_z$  (roxo),  $V_x$  (verde),  $E_y$  (rosa), índice AE (laranja), Dst (azul), ROTI em BOAV e JICA, respectivamente (pontos azuis) e a altura virtual ( $h'F$ , linha vermelha) e o dia calmo de referência (Qd) (linha preta) em BOAV (d) e LANC (e).



Os dados apresentados na Figura 4.14 destacam dois eventos de EPBs no dia 1 de março de 2015 em cada estação, salientando que os dois eventos ocorrem simultaneamente em BOAV e LANC, diferentemente, dos dois estudos de casos apresentados anteriormente. As 08:00 UT, do dia 1 de março de 2015, nota-se um aumento da camada F ( $h'F$ ) em relação ao dia calmo de referência, seguido de bolhas de plasmas “frescas”, como mostrado pelos aumentos do ROTI ( $>0,5$  TECU/min). Neste mesmo horário o índice AE apresentava altos valores, significando entrada de energia nas regiões aurorais, se estendendo para baixas latitudes. Assim, há fortes indícios de que as bolhas de plasma “frescas” formadas neste dia possam ter sido geradas por efeitos de penetração de campo elétrico. Entretanto, são necessárias análises mais aprofundadas para comprovar esta suposição. Bolhas de plasma formadas devido à penetração de campo elétrico já foram relatadas na literatura anteriormente, como

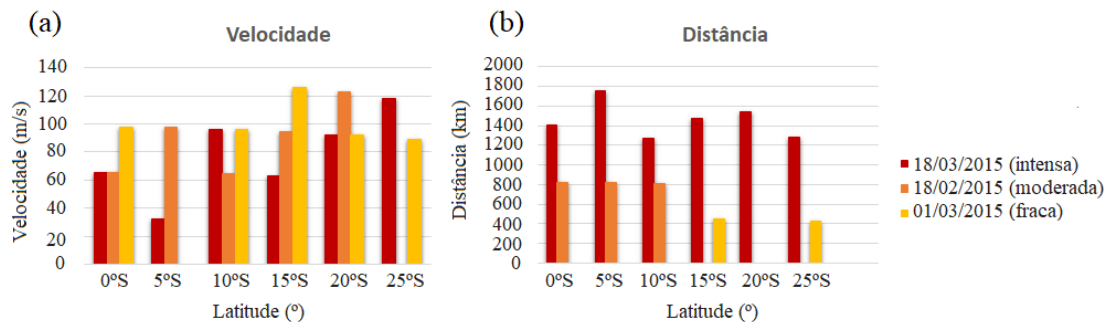
em Ram et al. (2015).

Portanto, apesar da tempestade ser considerada fraca também é possível geração de EPBs nessas condições, conforme mostrado. Estudos sobre o aparecimento de EPBs próximo do nascer do sol em tempestades fracas ainda não foram relatados na literatura. Além disso, as observações utilizando os mapas de ROTI auxiliam na identificação dessas irregularidades, principalmente nos períodos diurnos, quando não há dados de ASI disponíveis.

#### 4.2.4 Análise comparativa das características dos eventos com os diferentes níveis de tempestade

Para uma análise comparativa entre as três tempestades utilizadas nos estudos de casos, foram obtidas as características das estruturas das EPBs deste trabalho. A Figura 4.16 (a) mostra a velocidade de deriva das estruturas de bolhas de plasma por latitude e (b) mostra a distância entre as estruturas por latitude, para a tempestade intensa (vermelho), moderada (laranja) e fraca (amarelo).

Figura 4.15 - Velocidade e distância entre as estruturas de bolhas de plasma para os dias 18 de março (vermelho), 18 de fevereiro (laranja) e 01 de março (amarelo).



Os resultados obtidos com a Figura 4.15 mostram que a maior velocidade obtida foi na tempestade de 18 de março, com 118,25 m/s em 25°S. No dia 18 de fevereiro a velocidade foi de 122,61 m/s em 20°S e em 01 de março foi de 126,03 m/s em 15°S. O aumento da velocidade nessas latitudes pode estar relacionado à intensificação da crista da EIA em períodos perturbados, conforme relatado por Pimenta et al. (2003).

As tempestades de 18 de março e 18 de fevereiro tiveram direção de propagação para



oeste, e a tempestade de 01 de março para leste. Isto pode ser explicado pelos efeitos que geraram essas irregularidades. Assim, aquelas que se direcionam para oeste foram atribuídas ao DDEF e a direção para leste da tempestade fraca pode ter sido devido aos efeitos atribuídos ao PPEF. As maiores distâncias entre bolhas obtidas foram na tempestade de 18 de março. A distância entre bolhas foi proporcional à intensidade da tempestade, sendo as maiores distâncias na tempestade intensa e as menores na fraca.

#### 4.2.5 Análise da RTI utilizando o modelo TIE-GCM

O TIE-GCM é um modelo de circulação geral da eletrodinâmica da termosfera e ionosfera e realiza o cálculo auto consistente dos campos elétricos do dínamo. A sua versão atual inclui dinâmica, termodinâmica, reações e fotoquímica (FESEN et al., 1986; FESEN et al., 2000; HUANG et al., 2005). O modelo do dínamo ionosférico utiliza o cálculo do vento neutro juntamente com a condutividade elétrica, que são obtidos das distribuições de densidade de íons (vide detalhes em Richmond et al. (1992)).

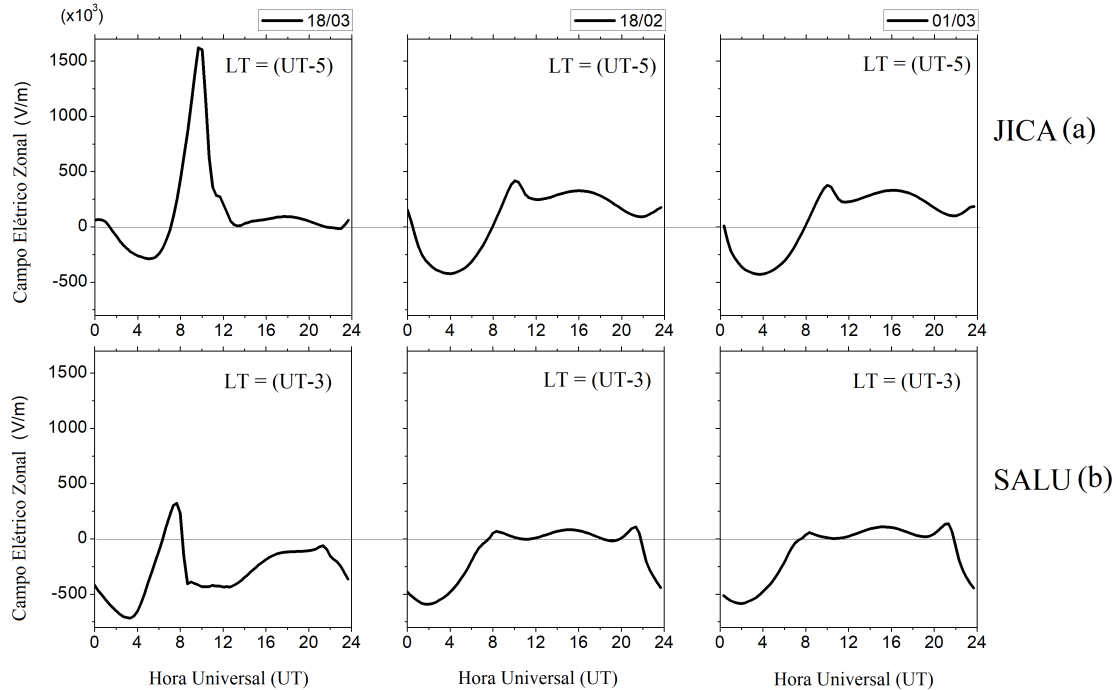
Com base neste modelo, nosso resultado de campo elétrico estimado para cada evento aqui estudado foi calculado para os casos que incluem as tempestades intensa (18/03/2015), moderada (18/02/2015) e fraca (01/03/2015). Como entrada do modelo foram usados valores de Kp e F10.7 (obtidos em <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>), são eles:

Tabela 4.3 - Valores de entrada utilizados no modelo TIE-GCM.

Tempestade	DD/MM/AAAA	Índice Kp	Índice F10.7
Intensa	18/03/2015	6	114
Moderada	18/02/2015	5	118
Fraca	01/03/2015	5	125

Além destes parâmetros, é importante ressaltar que usamos a altitude do IPP que foi definida ao longo de todo nosso trabalho, isto é, 350 km. Esse cálculo foi feito para as latitudes e longitudes correspondentes às estações de Jicamarca e São Luís, que são as estações próximas ao equador magnético. A Figura 4.16 mostra o comportamento do campo elétrico zonal, estimado pelo modelo TIE-GCM para as estações em estudo.

Figura 4.16 - Campo elétrico zonal em Jicamarca e São Luís, para os eventos de 18 de março, 18 de fevereiro de 1 de março de 2015.



O resultado obtido para o campo elétrico zonal calculado no dia 18 de março de 2015 nas duas estações tem sentido para leste nas horas que antecedem o amanhecer. Observa-se, ainda, que antes da inversão para oeste há um aumento abrupto deste campo elétrico. Este fenômeno é conhecido como pico pré-inversão no amanhecer e assemelha-se ao que acontece no período após o pôr do sol (FESEN et al., 2000). Esse PRE no amanhecer também foi estudado por Hui e Vichare (2021) com o modelo TIE-GCM. Os autores destacaram que, quando o dínamo perturbado está ativo, pode haver a ocorrência de PRE no amanhecer, o que está de acordo com os resultados apresentados aqui.

Outro ponto que pode se destacar entre os resultados obtidos na análise dessa tempestade é o não surgimento do PRE nos horários em torno do pôr do sol. Com isso, não foram criadas as condições para o aparecimento de bolhas de plasma, como pode ser observado nos gráficos (d) e (e) da Figura 4.6. Huang et al. (2005) utilizaram este modelo e mostraram que a redução da deriva nos horários do redor do pôr do sol é devido aos efeitos do dínamo perturbado, o qual interfere na ocorrência de Spread F. Neste caso, há uma taxa de crescimento reduzida para a instabilidade de

Rayleigh-Taylor.

A [Figura 4.16](#) mostra um perfil de campo elétrico zonal similar nas duas estações para os dias das tempestades moderada e fraca. Isto ocorre devido à resposta da ionosfera atribuída ao campo elétrico zonal em tempestades intensas, que tendem a ser maiores que as demais. Mas ainda assim, há o surgimento de bolhas de plasmas nesses dias.

A taxa de crescimento linear da instabilidade Rayleigh-Taylor, pode ser obtida pela [Equação 4.1](#) (SULTAN, 1996):

$$\gamma_{RT} = \frac{\Sigma_{P,0}^F}{\Sigma_{P,0}^E + \Sigma_{P,0}^F} \left( V_P - U_L^P - \frac{g_e}{\nu_{eff}^F} \right) K^F - R_T, \quad (4.1)$$

em que  $\Sigma_{P,0}^F$  é a condutividade Pedersen integrada na região F,  $\Sigma_{P,0}^E$  é a condutividade Pedersen integrada na região E,  $U_L$  é a componente meridional do vento neutro, também perpendicular à linha de campo,  $g_e$  é a gravidade,  $\nu_{eff}^F$  é a frequência de colisão efetiva,  $K^F$  é o gradiente do conteúdo eletrônico vertical da região F integrado através das linhas de campo e  $R_T$  é a taxa de recombinação. O termo  $V_P$  é a velocidade do plasma integrada no tubo de fluxo perpendicular ao campo magnético ( $\vec{B}$ ), que é equivalente ao termo do campo elétrico zonal  $E_\varphi L^3/B_0$ , em que  $L$  é a distância geocêntrica medida em unidades de raios terrestres e  $B_0$  é o campo magnético na superfície da Terra.

Com base na [Equação 4.1](#), um campo elétrico zonal com sentido para leste e um vento neutro perturbado com sentido adequado criam condições para um desenvolvimento positivo da RTI, favorecendo o surgimento de bolhas de plasma. Corroborando essa afirmação, como em [Wu \(2015\)](#) e [Wu \(2017\)](#), calculou-se a taxa de crescimento da bolha de plasma utilizando parâmetros obtidos pelo modelo TIE-GCM para bolhas de plasma após o pôr do sol. O autor mostrou que este modelo é uma ferramenta eficaz para estimar a taxa de crescimento RTI. Portanto, a utilização deste modelo pode auxiliar no cálculo da taxa de crescimento da irregularidade em horários ainda não estimados anteriormente, como no nascer do sol.



## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, as ocorrências das bolhas de plasma foram estudadas durante o período que compreende os meses de julho de 2014 a julho de 2015 (máximo solar) e de julho de 2019 a julho de 2020 (mínimo solar), no setor brasileiro. Para a análise estatística foram utilizados receptores GNSS para a obtenção dos mapas de ROTI. Além disso, foram analisadas características das irregularidades do plasma, tais como horário de ocorrência, velocidade de deriva e distância entre estruturas. Estas análises foram agrupadas em dias geomagneticamente calmos ( $K_p \leq 3$ ) e perturbados ( $K_p > 3$ ). Os principais resultados obtidos nestas análises estão listados a seguir:

1. As maiores ocorrências irregularidades associados com eventos de EPBs se deram no período entre outubro e março. Porém, destacam-se significativas ocorrências incomuns próximo dos horários do amanhecer, no período perturbado;
2. As maiores ocorrências das estruturas das irregularidades de plasma foram observadas na latitude geográfica de  $15^\circ\text{S}$ , em todos os períodos analisados, onde está localizada a crista sul da EIA;
3. A velocidade de deriva das bolhas de plasma diminui com a latitude, caindo mais rapidamente no mínimo solar;
4. Há um sutil aumento na velocidade entre  $20$  e  $25^\circ\text{S}$  no máximo solar. Isto pode ser devido aos efeitos advindos da EIA;
5. O período de máxima atividade solar apresenta irregularidades com maiores velocidades do que o mínimo solar, tanto no período calmo como perturbado;
6. A distância entre as estruturas de bolhas de plasma também diminui com a latitude;
8. No período perturbado, no máximo solar, observaram-se ocorrências de EPBs em meses cuja incidência de cintilação é atípica (como em meses de inverno);
9. A ocorrência de bolhas de plasma no máximo solar no período perturbado é cerca de três vezes maior que no mínimo solar. Isto pode ser atribuído aos campos elétricos do dínamo do setor noturno, que diminuem neste período.

Ademais, três eventos raros de bolhas de plasma no amanhecer foram detectados durante tempestades magnéticas no setor brasileiro. Estas tempestades são classi-

ficadas em intensa (18 de março de 2015), moderada (18 de fevereiro de 2015) e fraca (01 de março de 2015). Os principais resultados relativos a essas análises estão listadas a seguir:

1. Na tempestade de St. Patrick, a geração de bolhas de plasma no amanhecer é desencadeada por um possível efeito do dínamo perturbado proveniente dos ventos, que são gerados pelo aquecimento Joule;
2. A geração dessas EPBs pode ser atribuída ao DDEF e elas se prolongaram por 3,5 h. A duração se estendeu devido à possível penetração de campo elétrico que pode ter agido juntamente com o DDEF para manter a camada F elevada;
3. A análise das observações sugere uma dependência longitudinal na duração da cintilação após o nascer do sol, com diferença de  $33^\circ$  de longitude ( $\sim 3000$  km) entre os setores leste e oeste;
4. A geração das bolhas de plasma na tempestade moderada pode ser atribuída aos efeitos do DDEF. Entretanto, a geração dessas irregularidades na tempestade fraca foi relacionada ao PPEF;
5. Os efeitos do DDEF ou PPEF induziram o pico pré-reversão nas horas anteriores ao nascer do sol e criaram condições favoráveis para o desenvolvimento da RTI em todas as tempestades analisadas.

### **5.1 Achados científicos não reportados na literatura**

Os mapas de ROTI sobre o setor brasileiro se mostraram eficazes para a detecção de bolhas de plasma, já que dados de outros equipamentos como imageadores All-Sky não estão disponíveis nos horários do amanhecer. Diante do exposto, os novos avanços científicos deste trabalho estão listados a seguir:

1. Observou-se forte cintilação ionosférica quando a densidade eletrônica é mínima, o que contraria alguns modelos da literatura;
2. Qualquer tempestade magnética, independente da intensidade, pode desencadear bolhas de plasma no amanhecer, desde que os efeitos sejam suficientes para elevar a camada F e desenvolver a RTI;
3. As distâncias entre estruturas de bolhas de plasma são quase diretamente proporcionais à intensidade da tempestade magnética;

4. As maiores velocidades de deriva de plasma calculadas são entre as latitudes de 15°S e 25°S. Isto pode estar relacionado à intensificação das cristas da EIA nessas tempestades. Porém, estudos devem ser realizados para obter comprovação;

5. A ocorrência de bolhas de plasma no período perturbado se mostrou maior do que o esperado, isso se deve à metodologia utilizada ( $K_p > 3$ ), que inclui tempestades magnéticas e subtempestades.

## 5.2 Trabalhos futuros

Os resultados deste trabalho fornecem a compreensão de alguns fenômenos físicos na geração de bolhas de plasma incomuns, próximas ao nascer do sol, cujos mecanismos, nestes horários, são de difícil compreensão, pois estão no limiar entre a noite e o dia.

Para uma análise mais aprofundada desses eventos torna-se relevante um estudo de simulação numérica para modelar as condições exatas e necessárias para a geração dessas irregularidades. Com a simulação numérica, questões científicas ainda não respondidas poderiam ser solucionadas, como, por exemplo, a duração dessas irregularidades. Ademais, um estudo visando à quantificação da ação do DDEF ou PPEF na influência sobre a geração dessas EPBs no amanhecer seria de extrema importância.

Além disso, estudos de ocorrência de bolhas de plasma visando a separação dos níveis das tempestades magnéticas poderia apresentar novos avanços científicos.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARONS, J. A descriptive model of F layer high-latitude irregularities as shown by scintillation observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 31, p. 7441–7450, 1973. 13

\_\_\_\_\_. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storms. **Radio Science**, v. 26, n. 04, p. 1131–1149, 1991. 38

\_\_\_\_\_. The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence. **Space Science Reviews**, v. 63, n. 3-4, p. 209–243, 1993. 14

AARONS, J.; MENDILLO, M.; YANTOSCA, R.; KUDEKI, E. 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. 1, 3

AARONS, J.; WHITNEY, H.; ALLEN, R. Global morphology of ionospheric scintillations. **Proceedings of the IEEE**, v. 59, n. 2, p. 159–172, 1971. 13

ABDU, M. Outstanding problems in the equatorial ionosphere–thermosphere electrodynamic relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 869–884, 2001. 13

\_\_\_\_\_. Equatorial ionosphere–thermosphere system: electrodynamic and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 771–787, 2005. 81, 82

\_\_\_\_\_. Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 75, p. 44–56, 2012. 70

ABDU, M.; BATISTA, I.; CARRASCO, A.; BRUM, C. South Atlantic magnetic anomaly ionization: a review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, n. 17-18, p. 1643–1657, 2005. 7

ABDU, M.; BATISTA, I.; REINISCH, B.; MACDOUGALL, J.; KHERANI, E.; SOBRAL, J. Equatorial range spread F echoes from coherent backscatter, and irregularity growth processes, from conjugate point digital ionograms. **Radio Science**, v. 47, n. 6, 2012. 1, 17, 82

ABDU, M.; BATISTA, I.; TAKAHASHI, H.; MACDOUGALL, J.; SOBRAL, J.; MEDEIROS, A.; TRIVEDI, N. Magnetospheric disturbance induced equatorial plasma bubble development and dynamics: a case study in Brazilian sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A12, 2003. 1, 17, 37, 38

ABDU, M.; KHERANI, E.; BATISTA, I.; SOBRAL, J. Equatorial evening prereversal vertical drift and spread F suppression by disturbance penetration electric fields. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 19, 2009. 13, 40

ABDU, M.; KHERANI, E. A.; BATISTA, I.; PAULA, E. D.; FRITTS, D.; SOBRAL, J. Gravity wave initiation of equatorial spread F/plasma bubble irregularities based on observational data from the SpreadFEx campaign. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 7, p. 2607–2622, 2009. 1, 2, 17

ABDU, M.; SOUZA, J. D.; SOBRAL, J.; BATISTA, I. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere. In: AGU AMERICAN GEOPHYSICAL UNION. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union**. [S.l.], 2006. v. 167, p. 283. 34, 35, 82, 84

ABREU, A. D.; FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; JESUS, R. de; BITTENCOURT, J.; BRUNINI, C.; GENDE, M.; PILLAT, V.; LIMA, W.; ABALDE, J.; PIMENTA, A. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A12, 2010. 34

AGYEI-YEBOAH, E.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; PAULINO, A. R.; ESSIEN, P.; LOMOTÉY, S. O.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M. Seasonal variation of plasma bubbles during solar cycle 23–24 over the Brazilian equatorial region. **Advances in Space Research**, v. 64, n. 7, p. 1365–1374, 2019. 26

ANDERSON, D. Modeling the ambient, low latitude F-region ionosphere: a review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 8, p. 753–762, 1981. 7

ANDERSON, D.; MENDILLO, M. Ionospheric conditions affecting the evolution of equatorial plasma depletions. **Geophysical Research Letters**, v. 10, n. 7, p. 541–544, 1983. 48

ASTAFYEVA, E.; ZAKHARENKOVA, I.; FÖRSTER, M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview. **Journal**

of **Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 10, p. 9023–9037, 2015. [38](#), [70](#)

BALAN, N.; OTSUKA, Y.; FUKAO, S.; ABDU, M.; BAILEY, G. Annual variations of the ionosphere: a review based on MU radar observations. **Advances in Space Research**, v. 25, n. 1, p. 153–162, 2000. [7](#)

BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. **Annales Geophysicae**, v. 36, p. 91–100, 2018. [1](#), [2](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [26](#), [27](#), [62](#), [66](#), [67](#)

BARTELS, J.; HECK, N.; JOHNSTON, H. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, v. 44, n. 4, p. 411–454, 1939. [29](#)

BATISTA, I.; MEDEIROS, R. D.; ABDU, M.; SOUZA, J. D.; BAILEY, G.; PAULA, E. D. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A5, p. 10887–10892, 1996. [7](#)

BLANC, M.; RICHMOND, A. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 85, n. A4, p. 1669–1686, 1980. [30](#), [34](#), [82](#)

BUHARI, S.; ABDULLAH, M.; YOKOYAMA, T.; OTSUKA, Y.; NISHIOKA, M.; HASBI, A.; BAHARI, S.; TSUGAWA, T. Climatology of successive equatorial plasma bubbles observed by GPS ROTI over Malaysia. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 2, p. 2174–2184, 2017. [19](#), [20](#)

BURKE, W.; GENTILE, L.; HUANG, C.; VALLADARES, C.; SU, S. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, n. A12, 2004. [13](#), [15](#), [16](#), [24](#), [62](#)

CARMO, C.; DENARDINI, C.; FIGUEIREDO, C.; RESENDE, L.; PICANÇO, G.; BARBOSA NETO, P.; NOGUEIRA, P.; MORO, J.; CHEN, S. Evaluation of different methods for calculating the ROTI index over the Brazilian sector. **Radio Science**, v. 56, n. 8, p. e2020RS007140, 2021. [2](#), [59](#), [60](#)

CARRASCO, A. J. **O pico pré-inversão na deriva vertical de plasma e a camada E esporádica**. 154 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) —

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.  
Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.18.14.19>>. Acesso em: 2005. 9, 11

CARTER, B.; YIZENGAW, E.; PRADIPTA, R.; RETTERER, J.; GROVES, K.; VALLADARES, C.; CATON, R.; BRIDGWOOD, C.; NORMAN, R.; ZHANG, K. Global equatorial plasma bubble occurrence during the 2015 St. Patrick's Day storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 1, p. 894–905, 2016. 73

CHAPMAN, S. The electrical conductivity of the ionosphere: a review. **Il Nuovo Cimento (1955-1965)**, v. 4, n. 4, p. 1385–1412, 1956. 7

CHAU, J. L.; WOODMAN, R. F. Interferometric and dual beam observations of daytime spread-F-like irregularities over Jicamarca. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 18, p. 3581–3584, 2001. 3

CHERNIAK, I.; KRANKOWSKI, A.; ZAKHARENKOVA, I. ROTI maps: a new IGS ionospheric product characterizing the ionospheric irregularities occurrence. **GPS Solutions**, v. 22, n. 3, p. 1–12, 2018. 52

CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I. First observations of super plasma bubbles in Europe. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 21, p. 11–137, 2016. 35, 36, 37

CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I.; REDMON, R. J. Dynamics of the high-latitude ionospheric irregularities during the 17 March 2015 St. Patrick's Day storm: ground-based GPS measurements. **Space Weather**, v. 13, n. 9, p. 585–597, 2015. 2, 4

DAO, E.; KELLEY, M.; RODDY, P.; RETTERER, J.; BALLENTIN, J.; BEAUJARDIERE, O. de L.; SU, Y.-J. Longitudinal and seasonal dependence of nighttime equatorial plasma density irregularities during solar minimum detected on the C/NOFS satellite. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 10, 2011. 40

DAVIS, T. N.; SUGIURA, M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 3, p. 785–801, 1966. 29

DENARDINI, C.; ABDU, M.; AVEIRO, H.; RESENDE, L.; ALMEIDA, P.; OLÍVIO, Ê.; SOBRAL, J.; WRASSE, C. Counter electrojet features in the

Brazilian sector: simultaneous observation by radar, digital sounder and magnetometers. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 4, p. 1593–1603, 2009. 48

DENARDINI, C.; ABDU, M.; PAULA, E. D.; WRASSE, C.; SOBRAL, J. VHF radar observations of the dip equatorial E-region during sunset in the Brazilian sector. **Annales Geophysicae**, v. 24, n. 6, p. 1617–1623, 2006. 1, 13

DENARDINI, C.; CHEN, S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; BILIBIO, A.; FAGUNDES, P. R.; GENDE, M. A.; CABRERA, M. A.; BOLZAN, M.; PADILHA, A. L.; SCHUCH, N.; HORMAECHEA, J.; ALVES, L.; BARBOSA NETO, P.; NOGUEIRA, P.; PIKANÇO, G.; BERTOLLOTTO, T. The Embrace magnetometer network for South America: network description and its qualification. **Radio Science**, v. 53, n. 3, p. 288–302, 2018. 48, 49

DENARDINI, C.; PIKANÇO, G.; BARBOSA NETO, P.; NOGUEIRA, P.; CARMO, C.; RESENDE, L.; MORO, J.; CHEN, S.; ROMERO-HERNANDEZ, E.; SILVA, R.; BILIBIO, A. Ionospheric scale index map based on TEC data during the Saint Patrick magnetic storm and EPBs. **Space Weather**, v. 18, n. 9, p. e2019SW002330, 2020. 1, 2, 7, 38, 70

DENARDINI, C. M.; ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. VHF radar studies of the equatorial electrojet 3-m irregularities over São Luís: day-to-day variabilities under auroral activity and quiet conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 17, p. 1603–1613, 2004. 1, 13

DENARDINI, C. M.; DASSO, S.; GONZALEZ-ESPARZA, J. A. Review on space weather in Latin America. 2. The research networks ready for space weather. **Advances in Space Research**, v. 58, n. 10, p. 1940–1959, 2016. 46

DENG, B.; HUANG, J.; KONG, D.; XU, J.; WAN, D.; LIN, G. Temporal and spatial distributions of TEC depletions with scintillations and ROTI over south China. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 1, p. 259–268, 2015. 17, 18, 19

DOHERTY, P.; RAFFI, E.; KLOBUCHAR, J.; EL-ARINI, M. B. Statistics of time rate of change of ionospheric range delay. In: CITESEER. **Proceedings of ION GPS**. [S.l.], 1994. v. 2. 3

EMBRACE. **ESTUDO E MONITORAMENTO BRASILEIRO DO CLIMA ESPACIAL - INPE**. 2021. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/.Acessoem:10dez.de2021.>>. 48

FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.; TAKAHASHI, H. Relationship between generation of equatorial F-region plasma bubbles and thermospheric dynamics. **Advances in Space Research**, v. 16, n. 5, p. 117–120, 1995. [37](#)

FAGUNDES, P. R.; CARDOSO, F.; FEJER, B.; VENKATESH, K.; RIBEIRO, B.; PILLAT, V. 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. [32](#), [33](#), [38](#), [70](#)

FARLEY, D.; BALSEY, B.; WOODMAN, R.; MCCLURE, J. Equatorial spread F: implications of VHF radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 34, p. 7199–7216, 1970. [1](#), [13](#)

FARLEY, D.; BALSLEY, B. Instabilities in the equatorial electrojet. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 1, p. 227–239, 1973. [13](#)

FARLEY, D.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 91, n. A12, p. 13723–13728, 1986. [12](#), [13](#)

FEJER, B. G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 677–693, 1991. [38](#)

\_\_\_\_\_. Low latitude storm time ionospheric electrodynamic. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1401–1408, 2002. [75](#)

\_\_\_\_\_. Low latitude ionospheric electrodynamic. **Space Science Reviews**, v. 158, n. 1, p. 145–166, 2011. [74](#)

FEJER, B. G.; LARSEN, M.; FARLEY, D. Equatorial disturbance dynamo electric fields. **Geophysical Research Letters**, v. 10, n. 7, p. 537–540, 1983. [74](#), [81](#), [82](#)

FEJER, B. G.; PAULA, E. D.; GONZALEZ, S.; WOODMAN, R. Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 96, n. A8, p. 13901–13906, 1991. [61](#)

FEJER, B. G.; SCHERLIESS, L.; PAULA, E. D. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 104, n. A9, p. 19859–19869, 1999. [12](#), [75](#)

- FESEN, C.; CROWLEY, G.; ROBLE, R.; RICHMOND, A.; FEJER, B. G. Simulation of the pre-reversal enhancement in the low latitude vertical ion drifts. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 13, p. 1851–1854, 2000. [89](#), [90](#)
- FESEN, C.; DICKINSON, R.; ROBLE, R. Simulation of the thermospheric tides at equinox with the National Center for Atmospheric Research thermospheric general circulation model. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 91, n. A4, p. 4471–4489, 1986. [89](#)
- FIGUEIREDO, C.; WRASSE, C.; TAKAHASHI, H.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; BARROS, D. Large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS dTEC maps over North and South America on Saint Patrick’s Day storm in 2015. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 4, p. 4755–4763, 2017. [38](#), [70](#)
- FORBES, J. M.; ZHANG, X. Lunar tide in the F region ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 9, p. 7654–7669, 2019. [7](#)
- FULLER-ROWELL, T.; CODRESCU, M.; MOFFETT, R.; QUEGAN, S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A3, p. 3893–3914, 1994. [31](#)
- GONZALEZ, W.; JOSELYN, J.-A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.; VASYLIUNAS, V. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771–5792, 1994. [28](#), [29](#), [70](#)
- GOSLING, J.; MCCOMAS, D.; PHILLIPS, J.; BAME, S. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 96, n. A5, p. 7831–7839, 1991. [28](#)
- GREENWALD, R.; ECKLUND, W.; BALSLEY, B. Auroral currents, irregularities, and luminosity. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 34, p. 8193–8203, 1973. [13](#)
- GUOZHU, L.; NING, B.; LIU, L.; WAN, W.; HU, L.; ZHAO, B.; PATRA, A. Equinoctial and June solstitial F-region irregularities over Sanya. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, 2012. [40](#)
- HUANG, C.; BURKE, W.; MACHUZAK, J.; GENTILE, L.; SULTAN, P. Equatorial plasma bubbles observed by DMSP satellites during a full solar cycle:

- toward a global climatology. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 107, n. A12, p. SIA-7, 2002. 62, 69
- HUANG, C.-M.; RICHMOND, A.; CHEN, M.-Q. Theoretical effects of geomagnetic activity on low-latitude ionospheric electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 110, n. A5, 2005. 89, 90
- HUANG, C.-S.; BEAUJARDIERE, O. de L.; RODDY, P.; HUNTON, D.; BALLENTHIN, J.; HAIRSTON, M. Long-lasting daytime equatorial plasma bubbles observed by the C/NOFS satellite. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 5, p. 2398–2408, 2013. 2, 41, 42
- HUANG, C.-S.; FOSTER, J.; GONCHARENKO, L.; ERICKSON, P.; RIDEOUT, W.; COSTER, A. A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 110, n. A6, 2005. 30, 38
- HUANG, C.-S.; WILSON, G. R.; HAIRSTON, M. R.; ZHANG, Y.; WANG, W.; LIU, J. Equatorial ionospheric plasma drifts and O+ concentration enhancements associated with disturbance dynamo during the 2015 St. Patrick's Day magnetic storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 8, p. 7961–7973, 2016. 73
- HUBA, J.; JOYCE, G. Global modeling of equatorial plasma bubbles. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 17, 2010. 21
- HUI, D.; VICHARE, G. Influence of IMF-By on the equatorial ionospheric plasma drifts: TIEGCM simulations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 126, n. 9, p. e2021JA029270, 2021. 75, 76, 90
- IYEMORI, T.; TAKEDA, M.; NOSE, M.; ODAGI, Y.; TOH, H. Mid-latitude geomagnetic indices “ASY” and “SYM” for 2009 (Provisional). 2010. Disponível em: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>. 29
- JIANG, C.; YANG, G.; LIU, J.; YOKOYAMA, T.; KOMOLMIS, T.; SONG, H.; LAN, T.; ZHOU, C.; ZHANG, Y.; ZHAO, Z. Ionosonde observations of daytime spread F at low latitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 12, p. 12–093, 2016. 3
- KELLEY, M.; FEJER, B. G.; GONZALES, C. An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the



interplanetary magnetic field. **Geophysical Research Letters**, v. 6, n. 4, p. 301–304, 1979. 1, 31

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. [S.l.]: Academic Press, 2009. 7, 15, 16, 17, 30, 70, 113

KEPKAR, A.; ARRAS, C.; WICKERT, J.; SCHUH, H.; ALIZADEH, M.; TSAI, L.-C. Occurrence climatology of equatorial plasma bubbles derived using FormoSat-3/ COSMIC GPS radio occultation data. **Annales Geophysicae**, v. 38, n. 3, p. 611–623, 2020. 13, 15, 16, 25, 26, 62

KLOBUCHAR, J.; ANDERSON, D.; DOHERTY, P. Model studies of the latitudinal extent of the equatorial anomaly during equinoctial conditions. **Radio Science**, v. 26, n. 4, p. 1025–1047, 1991. 14

KOGA, D.; SOBRAL, J.; ABDU, M.; CASTILHO, V. de; MASCARENHAS, M.; ARRUDA, D.; ZAMLUTTI, C.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.; BURITI, R. Space weather in the thermospheric–ionospheric domain over the Brazilian region: climatology of ionospheric plasma bubbles in the subequatorial and low-latitude region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 11-12, p. 1529–1534, 2011. 2

LI, J.; MA, G.; MARUYAMA, T.; LI, Z. Mid-latitude ionospheric irregularities persisting into late morning during the magnetic storm on 19 March 2001. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. A8, 2012. 3, 42, 43

LIMA, W.; BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.; ABALDE, J.; CROWLEY, G.; BITTENCOURT, J. Response of the equatorial and low-latitude ionosphere during the space weather events of April 2002. **Annales Geophysicae**, v. 22, n. 9, p. 3211–3219, 2004. 34

LIU, T.; WU, T.; WANG, M.; FU, M.; KANG, J.; ZHANG, H. Recurrent neural networks based on LSTM for predicting geomagnetic field. In: **2018 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. 61

LIU, Z.; YANG, Z.; XU, D.; MORTON, Y. J. On inconsistent ROTI derived from multiconstellation GNSS measurements of globally distributed GNSS receivers for ionospheric irregularities characterization. **Radio Science**, v. 54, n. 3, p. 215–232, 2019. 4

LUO, W.; XIONG, C.; XU, J.; ZHU, Z.; CHANG, S. The low-latitude plasma irregularities after sunrise from multiple observations in both hemispheres during the recovery phase of a storm. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, p. 2897, 2020. 3

MATSUSHITA, S. A study of the morphology of ionospheric storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 3, p. 305–321, 1959. 32

MONICO, J. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Fundação Editora UNESP, 2008. 480 p. 45

MORO, J.; XU, J.; DENARDINI, C.; RESENDE, L.; BARBOSA NETO, P.; SILVA, L. D.; SILVA, R.; CHEN, S.; PICANÇO, G.; CARMO, C.; LIU, Z.; YAN, C.; WANG, C.; SCHUCH, N. First look at a geomagnetic storm with Santa Maria Digisonde data: F region responses and comparisons over the American sector. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 126, n. 1, p. e2020JA028663, 2021. 1, 7

NAVARRO, L.; MERIWEHTER, J.; VELIZ, O.; CHAU, C. S.; LUIS, J. **Red de interferómetros Fabry-Perot en Perú para estudios de aeronomía**. 2021. Disponível em:  
<<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/3357>. Acesso em: 20dez.2021>. 49, 50

NAVIPEDIA. **GNSS basic observables**. 2021. Disponível em:  
<[http://www.navipedia.net/index.php/Main\\_Page](http://www.navipedia.net/index.php/Main_Page). Acesso em: 04fev.2021>. 45, 53

NISHIOKA, M.; SAITO, A.; TSUGAWA, T. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A5, 2008. 13, 15, 16, 23

OTSUKA, Y. Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 5, n. 1, p. 1–13, 2018. 16, 40, 41

PARK, J.; KIL, H.; STOLLE, C.; LÜHR, H.; COLEY, W. R.; COSTER, A.; KWAK, Y.-S. Daytime midlatitude plasma depletions observed by Swarm: topside signatures of the rocket exhaust. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 5, p. 1802–1809, 2016. 3

PAULA, E. D. **Resposta da região F ionosféricas às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil**. 205 p. p. Tese (Doutorado em

Ciência Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1987. 28

PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F. d.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; GOBBI, D. Plasma bubble zonal drift characteristics observed by airglow images over Brazilian tropical region. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, p. 239–246, 2011. 1, 17, 68

PEROT, A.; FABRY, C. On the application of interference phenomena to the solution of various problems of spectroscopy and metrology. **The Astrophysical Journal**, v. 9, p. 87, 1899. 49

PI, X.; MANNUCCI, A.; LINDQWISTER, U.; HO, C. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 18, p. 2283–2286, 1997. 1, 3, 4, 55

PIMENTA, A.; BITTENCOURT, J.; FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; BURITI, R.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: a study using oi 630nm emission all-sky images. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 10, p. 1117–1126, 2003. 1, 17, 67, 88

PRIYADARSHI, S. A review of ionospheric scintillation models. **Surveys in Geophysics**, v. 36, n. 2, p. 295–324, 2015. 78

PRÖLSS, G. W. Ionospheric F-region storms. In: **Handbook of atmospheric electrodynamics, Volume II**. [S.l.]: CRC Press, 2017. p. 195–248. 30, 35

RAM, S. T.; AJITH, K.; YAMAMOTO, M.; OTSUKA, Y.; YOKOYAMA, T.; NIRANJAN, K.; GURUBARAN, S. Fresh and evolutionary-type field-aligned irregularities generated near sunrise terminator due to overshielding electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 7, p. 5922–5930, 2015. 2, 41, 42, 84, 85, 88

RAM, S. T.; RAO, P. R.; PRASAD, D.; NIRANJAN, K.; KRISHNA, S. G.; SRIDHARAN, R.; RAVINDRAN, S. Local time dependent response of postsunset ESF during geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A7, 2008. 38

REINISCH, B. W.; GALKIN, I. A.; KHMYROV, G.; KOZLOV, A.; BIBL, K.; LISYSYAN, I.; CHENEY, G.; HUANG, X.; KITROSSER, D.; PAZNUKHOV, V.; LUO, Y.; JONES, W.; STELMASH, S.; HAMEL, R.; GROCHMAL, J. New

- Digisonde for research and monitoring applications. **Radio Science**, v. 44, n. 1, 2009. 48
- RESENDE, L. C.; ARRAS, C.; BATISTA, I. S.; DENARDINI, C. M.; BERTOLLOTTO, T. O.; MORO, J. 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. 1, 7
- RICHMOND, A.; RIDLEY, E.; ROBLE, R. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 6, p. 601–604, 1992. 89
- RISHBETH, H. The F-layer dynamo. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 2, p. 263–267, 1971. 13
- \_\_\_\_\_. Thermospheric winds and the F-region: a review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 34, n. 1, p. 1–47, 1972. 8
- \_\_\_\_\_. The ionospheric E-layer and F-layer dynamos: a tutorial review. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 15, p. 1873–1880, 1997. 8
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. [S.l.]: New York: Academic Press, 1969. 7, 8, 9, 11
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.; BITTENCOURT, J. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 15, p. 1377–1383, 2000. 14
- SANTOS, A.; ABDU, M.; SOUZA, J.; SOBRAL, J.; BATISTA, I.; DENARDINI, C. Storm time equatorial plasma bubble zonal drift reversal due to disturbance Hall electric field over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 6, p. 5594–5612, 2016. 37
- SAROSO, S.; SUGIURA, M.; IYEMORI, T.; ARAKI, T.; KAMEI, T. Derivation of polar cap AE indices. In: **NIPR SYMPOSIUM ON UPPER ATMOSPHERIC PHYSICS**. [S.l.: s.n.], 1992. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/43F627H>. 29
- SASTRI, J. H.; NIRANJAN, K.; SUBBARAO, K. Response of the equatorial ionosphere in the Indian (midnight) sector to the severe magnetic storm of July 15, 2000. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 13, p. 29–1, 2002. 38

SCHERLIESS, L.; FEJER, B. G. Storm time dependence of equatorial disturbance dynamo zonal electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A11, p. 24037–24046, 1997. 74

SHUME, E.; RODRIGUES, F.; PAULA, E. de; BATISTA, I.; BUTALA, M.; GALVAN, D. Day-time F region echoes observed by the Sao Luis radar. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 103, p. 48–55, 2013. 3

SILVA, R.; SOUZA, J.; SOBRAL, J.; DENARDINI, C.; BORBA, G.; SANTOS, M. Ionospheric plasma bubble zonal drift derived from total electron content measurements. **Radio Science**, v. 54, n. 7, p. 580–589, 2019. 2

SOBRAL, J.; ABDU, M.; GONZALEZ, W.; TSURUTANI, B.; BATISTA, I.; GONZALEZ, A. C. de. Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A7, p. 14305–14313, 1997. 30

SOBRAL, J.; ABDU, M.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; PAULA, E. D.; ZAMLUTTI, C.; AQUINO, M. D.; BORBA, G. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977–1998) of 630nm airglow observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1517–1524, 2002. 2

SOBRAL, J.; ABDU, M.; YAMASHITA, C. S.; GONZALEZ, W.; GONZALEZ, A. C. de; BATISTA, I. S.; ZAMLUTTI, C.; TSURUTANI, B. Responses of the low-latitude ionosphere to very intense geomagnetic storms. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 965–974, 2001. 82

SOUZA, A. L. C. d.; CAMARGO, P. d. O. Comparison of GNSS indices, ionosondes and all-sky imagers in monitoring the ionosphere in Brazil during quiet and disturbed days. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, 2019. 5

SPENCER, M. The shape of irregularities in the upper ionosphere. **Proceedings of the Physical Society. Section B**, v. 68, n. 8, p. 493, 1955. 13

SPIRO, R.; WOLF, R.; FEJER, B. G. Penetrating of high-latitude-electric-field effects to low latitudes during SUNDIAL 1984. **Annales Geophysicae**, v. 6, p. 39–49, 1988. 30

SRIPATHI, S.; ABDU, M.; PATRA, A.; GHODPAGE, R. Unusual generation of localized EPB in the dawn sector triggered by a moderate geomagnetic storm.

**Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 11, p. 9697–9710, 2018. 42

SULTAN, P. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26875–26891, 1996. 91, 114

TAKAHASHI, H.; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J.; PAULA, E.; NOGUEIRA, P.; DENARDINI, C.; BECKER-GUEDES, F.; WRASSE, C.; IVO, A.; GOMES, V.; JR, W. G.; SANT'ANNA, N.; GATTO, R. Diagnostics of equatorial and low latitude ionosphere by TEC mapping over Brazil. **Advances in Space Research**, v. 54, n. 3, p. 385–394, 2014. 1, 17

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C.; DENARDINI, C.; PÁDUA, M.; PAULA, E. de; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J. G.; IVO, A.; SANT'ANNA, N. Ionospheric TEC weather map over South America. **Space Weather**, v. 14, n. 11, p. 937–949, 2016. 2, 57

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C.; OTSUKA, Y.; IVO, A.; GOMES, V.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A.; DENARDINI, C.; SANT'ANNA, N.; SHIOKAWA, K. Plasma bubble monitoring by TEC map and 630 nm airglow image. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 130, p. 151–158, 2015. 1, 17

TIMOÇIN, E.; INYURT, S.; TEMUÇIN, H.; ANSARI, K.; JAMJAREEGULGARN, P. Investigation of equatorial plasma bubble irregularities under different geomagnetic conditions during the equinoxes and the occurrence of plasma bubble suppression. **Acta Astronautica**, v. 177, p. 341–350, 2020. 38, 39, 40

TSUNODA, R. T. Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes 1. Growth phase. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 86, n. A1, p. 139–149, 1981. 1, 17

TSURUTANI, B.; VERKHOGLYADOVA, O.; MANNUCCI, A.; SAITO, A.; ARAKI, T.; YUMOTO, K.; TSUDA, T.; ABDU, M.; SOBRAL, J.; GONZALEZ, W. D.; MCCREADIE, H.; LAKHINA, G.; VASYLIÛNAS, V. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of 30–31 october 2003. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A5, 2008. 30, 31

VENKATESH, K.; RAM, S. T.; FAGUNDES, P.; SEEMALA, G. K.; BATISTA, I. Electrodynamic disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude

ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 4, p. 4553–4570, 2017. 38, 70

WANNINGER, L. The occurrence of ionospheric disturbances above Japan and their effects on precise GPS positioning. **Proceedings of the CRCM**, v. 93, p. 6–11, 1993. 3

WEI, Y.; ZHAO, B.; LI, G.; WAN, W. Electric field penetration into Earth's ionosphere: a brief review for 2000–2013. **Science Bulletin**, v. 60, n. 8, p. 748–761, 2015. 31

WHALEN, J. An equatorial bubble: its evolution observed in relation to bottomside spread F and to the Appleton anomaly. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 105, n. A3, p. 5303–5315, 2000. 13, 14

WOODMAN, R. F.; HOZ, C. L. Radar observations of F region equatorial irregularities. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 31, p. 5447–5466, 1976. 14, 48

WOODMAN, R. F.; PINGREE, J. E.; SWARTZ, W. E. Spread-F-like irregularities observed by the Jicamarca radar during the day-time. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 47, n. 8-10, p. 867–874, 1985. 3

WU, K.; XU, J.; YUE, X.; XIONG, C.; WANG, W.; YUAN, W.; WANG, C.; ZHU, Y.; LUO, J. Equatorial plasma bubbles developing around sunrise observed by an all-sky imager and global navigation satellite system network during storm time. **Annales Geophysicae**, v. 38, n. 1, p. 163–177, 2020. 4, 42, 84, 85

WU, Q. Longitudinal and seasonal variation of the equatorial flux tube integrated Rayleigh-Taylor instability growth rate. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 2015. 91

\_\_\_\_\_. Solar effect on the Rayleigh-Taylor instability growth rate as simulated by the NCAR TIEGCM. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 156, p. 97–102, 2017. 91

YIZENGAW, E.; RETTERER, J.; PACHECO, E.; RODDY, P.; GROVES, K.; CATON, R.; BAKI, P. Postmidnight bubbles and scintillations in the quiet-time June solstice. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 21, p. 5592–5597, 2013. 40

YOKOYAMA, T.; JIN, H.; SHINAGAWA, H.; LIU, H. Seeding of equatorial plasma bubbles by vertical neutral wind. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 13, p. 7088–7095, 2019. 21, 22, 23, 37

YOKOYAMA, T.; PFAFF, R.; RODDY, P.; YAMAMOTO, M.; OTSUKA, Y. Post-midnight low-latitude ionospheric irregularities during solar minimum observed simultaneously with probes on the C/NOFS satellite and the equatorial atmosphere radar. In: **AGU FALL MEETING**. [S.l.: s.n.], 2010, Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/43F627H>. v. 2010, p. SA51B–1627. 40

YOKOYAMA, T.; SHINAGAWA, H.; JIN, H. Nonlinear growth, bifurcation, and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 12, p. 10–474, 2014. 21

ZAKHARENKOVA, I.; CHERNIAK, I.; KRANKOWSKI, A. Features of storm-induced ionospheric irregularities from ground-based and spaceborne GPS observations during the 2015 st. patrick’s day storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 12, p. 10728–10748, 2019. 2, 16, 38, 41, 42



## ANEXO A - TAXA DE CRESCIMENTO DA INSTABILIDADE RAYLEIGH-TAYLOR

A taxa de crescimento linear da instabilidade Rayleigh-Taylor pode ser dada conforme a equação:

$$\gamma = -\frac{g}{\nu_{in}} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial h} - R \quad (\text{A.1})$$

onde  $n_0$  é a densidade de elétrons,  $h$  é a altura acima da superfície da Terra,  $\nu_{in}$  é a frequência de colisão íon-neutron,  $g$  é a gravidade e  $R$  é a taxa de recombinação química. O campo magnético e a densidade do plasma ao longo das linhas de campo magnético são considerados uniformes nesta derivação local, e os efeitos inerciais são desprezados (KELLEY, 2009).

Os efeitos devido a recombinação também foram acrescentados na equação conforme:

$$R_T = \frac{R_E L}{N} \int n R_{local} (1 - \xi^2)^3 d\xi \quad (\text{A.2})$$

onde  $L$  é a distância geocêntrica medida em unidades de raios terrestres,  $R_{local}$  é igual a  $\alpha n_{mol}$  na base da camada F e camada E e igual a zero na região F. O coeficiente de perda de recombinação dissociativa é  $\alpha = 2 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ .

Quando este sistema ionosférico é incluído a taxa de crescimento RT resultante é:

$$\gamma_{RT} = \frac{-\Sigma_{P,0}^F}{\Sigma_{P,0}^E} \frac{g_e}{\nu_{eff}^F} K^F - R_T \quad (\text{A.3})$$

onde  $\Sigma_{P,0}^F$  e  $\Sigma_{P,0}^E$  são as condutividades Pedersen integrada na região F e E respectivamente,  $g_e$  é a gravidade,  $\nu_{eff}^F$  é a frequência de colisão efetiva,  $K^F$  é o gradiente do conteúdo eletônico vertical da região F integrado através das linhas de campo e  $R_T$  é a taxa de recombinação.

Os efeitos do vento neutro também podem ser adicionados na taxa do crescimento, resultando em:

$$\gamma_{RT} = \frac{\Sigma_{P,0}^F}{\Sigma_{P,0}^E + \Sigma_{P,0}^F} \left( -U_L^P - \frac{g_e}{\nu_{eff}^F} \right) K^F \quad (\text{A.4})$$

onde  $U_L$  é a componente meridional do vento neutro.

Os efeitos devido ao campo elétrico também foram incluídos:

$$\gamma_{RT} = \frac{\Sigma_{P,0}^F}{\Sigma_{P,0}^E + \Sigma_{P,0}^F} \left( E_\varphi \frac{L^3}{B_0} - \frac{g_e}{\nu_{eff}^F} \right) K^F \quad (\text{A.5})$$

onde  $E_\varphi$  é o campo elétrico zonal e  $B_0$  é o campo magnético na superfície da Terra.

Uma forma mais completa da taxa de crescimento RTI incluindo os efeitos do campo elétrico e vento pode ser obtida da seguinte forma:

$$\gamma_{RT} = \frac{\Sigma_{P,0}^F}{\Sigma_{P,0}^E + \Sigma_{P,0}^F} \left( V_P - U_L^P - \frac{g_e}{\nu_{eff}^F} \right) K^F - R_T \quad (\text{A.6})$$

onde  $\Sigma_{P,0}^F$  é a condutividade Pedersen integrada na região F,  $\Sigma_{P,0}^E$  é a condutividade Pedersen integrada na região E,  $U_L^P$  é o vento neutro também perpendicular à linha de campo,  $g_e$  é a gravidade,  $\nu_{eff}^F$  é a frequência de colisão efetiva,  $K^F$  é o gradiente do conteúdo eletônico vertical da região F integrado através das linhas de campo e  $R_T$  é a taxa de recombinação. O termo  $V_P$  é a velocidade do plasma integrada no tubo de fluxo perpendicular ao campo magnético ( $\vec{B}$ ), que é equivalente ao termo do campo elétrico zonal  $E_\varphi L^3/B_0$ .

Maiores detalhes podem ser obtidos em [Sultan \(1996\)](#).

## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.