



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS
NA REGIÃO CENTRAL DA ANOMALIA MAGNÉTICA DA
AMÉRICA DO SUL (AMAS)**

Giovana Stefani

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Juliano
Moro e Coorientada pelo Dr. Clezio Marcos
De Nardin

INPE
São José dos Campos
2021

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS
NA REGIÃO CENTRAL DA ANOMALIA MAGNÉTICA DA
AMÉRICA DO SUL (AMAS)**

Giovana Stefani

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr. Juliano
Moro e Coorientada pelo Dr. Clezio Marcos
De Nardin

INPE
São José dos Campos
2021

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, **Marli Valgoi Stefani**, e meu pai, **Luis Stefani**, por todos os ensinamentos e incentivo desde sempre.

Ao meu irmão, **Giovanei Luis Stefani**, pelo companheirismo e parceria.

Ao meu amor, **Pedro Henrique Vestena Rossato**, pelas inúmeras horas em vídeo chamada durante esse período turbulento que enfrentamos, pela força e auxílio para que eu pudesse realizar este trabalho da melhor forma possível.

Às minhas amigas e colegas do curso de Física, **Heloísa Suffert Acosta** e **Yolanda Maria Barros Marcello**, por sempre acreditarem em meu potencial, pela motivação, sororidade e auxílio em cada etapa deste projeto.

Ao meu orientador, **Dr. Juliano Moro**, ao qual nutro uma enorme admiração, não apenas como profissional, mas também como pessoa. Por ter aceitado me orientar na Iniciação Científica e também no Trabalho de Conclusão de Curso. Obrigada por todos os ensinamentos, por todo o tempo dedicado a mim e a minha formação como cientista e como pessoa.

Ao meu coorientador e direcionador, **Dr. Clezio Marcos de Nardin**, por toda atenção, por cada palavra de incentivo que me fizeram ter certeza que eu poderia realizar este e quaisquer outros objetivos.

Aos demais colegas de grupo APOENA, **Amanda Navarro**, **Amanda Piassi**, **Carolina do Carmo**, **Dra. Esmeralda Hernández**, **Giorgio Picanço**, **Jaziel Campelo**, **Dra. Laysa Resende**, **Dr. Paulo França**, **Dr. Paulo Nogueira**, **Dra. Régia Pereira**, **Sony Su Chen**, pessoas e profissionais maravilhosos em que busco inspiração e apoio.

À **Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)** pelo excelente trabalho, que desde meu ingresso proporcionou minha permanência e meu crescimento pessoal e profissional. Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/MCTI)** pela concessão da bolsa que me auxiliou e incentivou durante todo este período, e ao **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTI)** pela oportunidade.

A todas as mulheres que, antes de mim, foram à luta para que hoje eu pudesse ocupar este espaço, e prosseguir na luta por nossos direitos.

RESUMO

As camadas E-Esporádicas (Es) podem ser classificadas em diversos tipos conforme a aparência nos ionogramas e local de observação: Es_q (*equatorial*), Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*). A Es_q é uma assinatura das irregularidades do tipo II do Eletrojato Equatorial, enquanto os demais tipos são caracterizados pelo adensamento do plasma na região E devido a deposição de íons metálicos do processo de ablação de meteoroides. O objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade das diversas camadas Es observadas em Santa Maria (29,7° S, 53,8° O), RS, na região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). Foram analisados e manualmente editados com o *software SAO-Explorer* aproximadamente 81.600 ionogramas coletados de julho de 2019 a junho de 2020 por uma Digissonda. Os tipos de Es foram classificados em relação a ocorrência, duração, estações do ano (solstícios de dezembro e junho e equinócios de março e setembro) e atividade magnética. Em termos gerais, o tipo “q” não foi observado conforme previsto, e a maior ocorrência de Es foi em novembro de 2019 igual a 74% do total de horas registradas pela Digissonda. A estação do ano com maior ocorrência de Es, igual a 66%, foi o solstício de dezembro. Com relação aos tipos observados foram predominantes os tipos “f”, “l” e “h”. A ocorrência da Es_a , geralmente vista em altas latitudes (regiões polares), também foi observada em Santa Maria, mesmo em dias classificados como geomagneticamente calmos (somatório do índice $Kp \leq 24$ ou $Kp < 3^+$). Sua ocorrência pode ser explicada devido a baixa intensidade do campo geomagnético (aproximadamente 22.000 nT) característica da região central da AMAS. Para cada estação do ano, foi realizada uma análise dos tipos específicos de camadas Es para cada hora, o que permitiu observar o horário de aparecimento de cada tipo. Durante o dia houve uma maior ocorrência dos tipos “h” e “l” e durante a noite foi predominante o tipo “f”. Com as presentes análises obteve-se, pela primeira vez, um amplo estudo estatístico sobre a ocorrência e variabilidade das camadas Es que ocorreram sobre Santa Maria, região central da AMAS.

Palavras-chave: Camadas E-Esporádicas, Anomalia Magnética da América do Sul, Clima Espacial.

ABSTRACT

Sporadic-E (Es) layers may be classified into various types accordingly to their appearance in the ionograms and the location of observation: Es_q (equatorial), Es_f (flat), Es_l (low), Es_c (cusp), Es_h (high), Es_s (slant), and Es_a (auroral). The Es_q is a signature of type II irregularities embedded in the Equatorial Electrojet, while the other types are characterized by the enhanced plasma ionization in the E region due to the deposition of metallic ions from the meteoroid ablation process. The objective of this work is to study the variability of the several Es layer types observed over Santa Maria (29,7° S, 53,8° W), RS, in the central region of the South American Magnetic Anomaly (SAMA). It was analyzed and manually edited with the SAO-Explorer approximately 81,600 ionograms collected from July 2019 to June 2020 by a Digisonde. The Es types were classified in terms of their occurrence, duration, seasons of the year (December and June solstices, March and September equinoxes), and magnetic activity. In general, the type “q” was not observed as expected, and the highest occurrence of Es was in November 2019, equal to 74% of the total hours recorded by the Digisonde. The season of the year with the highest occurrence of Es, equal to 66%, was the December solstice. According to the different types observed were predominant the types “f”, “l” and “h”. The occurrence of Es_a, usually seen at high latitudes (auroral regions), was also observed in Santa Maria, even on days classified as geomagnetically quiet ($\Sigma K_p \leq 24$ or $K_p < 3^+$). Its occurrence can be explained by the low intensity of the geomagnetic field (approximately 22,000 nT), which is a characteristic of the central region of the SAMA. For each season of the year, an analysis of the specific types of Es was carried out for each hour, which was allowed to observe the appearance of each type. During the day there was a high occurrence of types “h” and “l”, while during the night it was predominant the type “f”. It was obtained, for the first time with the present analyses, a broad statistical study on the occurrence and variability of the Es layers that occurred over Santa Maria, central region of the SAMA.

Keywords: E-Sporadic Layers, South American Magnetic Anomaly, Space Weather.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Estados físicos da matéria.	3
Figura 2.2 – (a) Rotação diferencial do Sol de acordo com a latitude, sendo necessários 35 dias para os polos completarem uma rotação e apenas 25 para que a região do equador complete o movimento; (b) Principais regiões solares e representações do tamanho de cada camada.	5
Figura 2.3 – Atmosfera Solar, (a) Fotosfera solar no dia 12 de março de 2015, mostrando algumas manchas solares; (b) Cromosfera solar fotografada usando um filtro na luz vermelha do H-alfa; (c) Um eclipse solar total, visto de Svalbard, na Noruega, em 20 de março de 2015; (d) Eclipse artificial produzido pelo satélite SOHO para a visualização e estudo da coroa solar, para o dia 15 de março de 2015.....	7
Figura 2.4 – Principais características do vento solar no período de 15 a 20 de março de 2015.....	9
Figura 2.5 – Manchas solares, (a) Ilustração da formação e composição – umbra e penumbra – das manchas solares na fotosfera solar; (b) Evolução do número de manchas solares ao longo do ciclo solar 24; (c) Representação gráfica do número de manchas solares no ciclo solar 24, e número estimado de manchas para o ciclo 25 que teve início no ano.....	10
Figura 2.6 – Campo Magnético Solar, (a) Evolução do campo magnético solar durante um ciclo solar; (b) Médias anuais do número de manchas solares diárias; (c) Diagrama borboleta, representando a média diária da área de manchas solares em rotações solares individuais.....	12
Figura 2.7 – (a) Explosão solar flagrada pelo SDO no dia 10 de junho de 2014; (b) Esquema de uma erupção solar; (c) Evolução de uma Ejeção de Massa Coronal ocorrida no dia primeiro de maio de 2013. Imagens capturadas no extremo ultravioleta.....	14
Figura 2.8 – Representação campo magnético interplanetário e representação esquemática da magnetosfera terrestre.	15
Figura 2.9 – Imagem das fases de uma reconexão magnética padrão.	16
Figura 2.10 – (a) Movimentos das partículas sob ação do campo geomagnético, (a.1) Rotação rápida; (a.2) Para frente e para trás; (a.3) Movimento de Deriva; (b) Representação tridimensional dos cinturões de radiação em torno da Terra e movimentos realizados por uma partícula sob o efeito do campo magnético terrestre.....	18
Figura 2.11 – (a) Visão da estrutura interna do planeta Terra; (b) Configuração do campo magnético terrestre; (c) Intensidade total do campo principal (F) para 2020. O intervalo de contorno é 1,000 nT.....	20

Figura 2.12 – (a) Variação da declinação magnética observada por Gellinbrand, em Londres; (b) Diminuição do momento magnético de dipolo magnético da Terra de 1839 a 1980; (c) Variação secular do polo magnético no hemisfério Norte.....	21
Figura 2.13 – Intensidade de diferentes índices para a tempestade geomagnética do dia 17 de março de 2015.	25
Figura 2.13 – Conclusão. Intensidade de diferentes índices para a tempestade geomagnética do dia 17 de março de 2015.....	26
Figura 2.14 – Classificação da atmosfera.	28
Figura 2.15 – (a) Processo de formação da ionosfera por meio da fotoionização; (b) Composição Ionosférica; (c) Densidades típicas da ionosfera em períodos de baixa atividade solar.....	29
Figura 2.16 – Ionograma ilustrando as regiões da ionosfera terrestre.....	31
Figura 2.17 – Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es) sobre Santa Maria, (a) Camada Es _a ; (b) Camada Es _c ; (c) Camada Es _f	33
Figura 2.17 – Conclusão. Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es) sobre Santa Maria, (d) Camada Es _h ; (e) Camada Es _i ; (f) Camada Es _s	34
Figura 3.1 – Apresentação do sistema da Digissonda localizada em Santa Maria. (a) Antena transmissora; (b) Uma das quatro antenas receptoras; (c) Parte eletrônica (plataformas de controle e de dados).....	36
Figura 3.2 – Página inicial do <i>software</i> SAO-Explorer e algumas abas de operação. ...	37
Figura 3.3 – Variação dos horários do nascer e pôr do Sol sobre Santa Maria.	38
Figura 4.1 – Variação subsazonal das camadas esporádicas sobre Santa Maria para o período julho 2019 – julho 2020.	40
Figura 4.2 – Ocorrência sazonal das camadas Es.....	41
Figura 4.3 – Ocorrência sazonal de cada um dos tipos de camadas Es.....	42
Figura 4.4 – Variação sazonal por tipo específico de camadas Es para cada intervalo de hora.....	43
Figura 4.5 – Relação dos dias calmos e perturbados de acordo com índice K _p	45
Figura 4.6 – Variação sazonal por tipo específico de camadas esporádicas, considerando apenas dias geomagneticamente calmos.	46
Figura 4.7 – Variação sazonal por tipo específico de camadas esporádicas, considerando apenas dias perturbados.....	47

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Características gerais do Sol.....	4
Tabela 2.2 – Classificação dos <i>flares</i> de acordo com a emissão de raios X.....	13
Tabela 2.3 – Classificação das tempestades magnéticas segundo o índice Dst.	23
Tabela 4.1 – Variação mensal de camadas esporádicas sobre Santa Maria.	40
Tabela A.1 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético Dst.....	55
Tabela A.2 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético Kp.....	55
Tabela A.3 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético AE, AO, AU e AL.....	56
Tabela A.4 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético SYM/H e ASY/H.	56
Tabela B.1 – Variação do nascer e pôr do Sol.....	57
Tabela C.1 – Variação sazonal das camadas Es.....	58
Tabela D.1 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o solstício de junho.	59
Tabela D.2 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o solstício de dezembro.....	59
Tabela D.3 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o equinócio de março.	59
Tabela D.4 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o equinócio de setembro.	60
Tabela E.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o solstício de junho.....	61
Tabela E.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o equinócio de março.	62
Tabela E.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o equinócio de setembro.....	63
Tabela E.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o solstício de dezembro.	64
Tabela F.1 – Classificação dos dias de acordo com a atividade geomagnética calma e perturbada	65
Tabela G.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o solstício de junho.....	66
Tabela G.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o equinócio de março.....	67
Tabela G.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o equinócio de setembro.....	68
Tabela G.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o solstício de dezembro.	69
Tabela H.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o solstício de junho.....	70

Tabela H.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o equinócio de março.....	71
Tabela H.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o equinócio de setembro.....	72
Tabela H.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o solstício de dezembro.....	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACE	– <i>Advanced Composition Explorer</i>
AE	– Índice relativo à atividade do Eletrojato Auroral (do inglês, <i>Auroral Electrojet</i>)
AMAS	– Anomalia Magnética da América do Sul
AL	– Índice auroral relativo à corrente do Eletrojato Auroral com sentido oeste (do inglês, <i>Auroral Lower</i>)
AO	– Índice relativo à circulação atmosférica sobre o Ártico (do inglês, <i>Arctic Oscillation</i>)
ASY/H	– Índice assimétrico da componente <i>H</i> da corrente de anel (do inglês, <i>Asymmetric Index</i>)
AU	– Índice auroral relativo à corrente do Eletrojato Auroral com sentido leste (do inglês, <i>Auroral Upper</i>)
CME	– Ejeção de Massa Coronal (do inglês, <i>Coronal Mass Ejection</i>)
COESU	– Coordenação Espacial do Sul
DST	– Índice de atividade magnética relativo à corrente anelar (do inglês, <i>Disturbance Storm Time</i>)
EEJ	– Eletrojato Equatorial (do inglês, <i>Equatorial Electrojet</i>)
ESA	– <i>European Space Agency</i>
EUV	– Ultravioleta Extremo (do inglês, <i>Extreme Ultraviolet</i>)
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Kp	– Índice de atividade magnética global (do inglês <i>Planetarische Kennziffer</i>)
LDI	– <i>Lowell Digisonde International</i>
MCTI	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
SAO - Explorer	– <i>Standard Archiving Output Explorer</i>
SDO	– <i>Solar Dynamics Solar</i>
SI	– Sistema Internacional de unidades (do francês, <i>Système International d'unités</i>)
SIIG	– Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos
SMK29	– Código na <i>International Union of Radio Science</i> (URSI) da Digisonda de Santa Maria
SOHO	– <i>Solar and Heliospheric Observatory</i>
STEREO	– <i>Solar Terrestrial Relations Observatory</i>

- SYM/H – Índice simétrico da componente H da corrente de anel (do inglês *Symmetric Index*)
- UFSM – Universidade Federal de Santa Maria
- URSI – União Internacional de Rádio Ciência (do inglês, *International Union of Radio Science*)
- UT – *Universal Time*

LISTA DE SÍMBOLOS

B_x	–	Componente x do campo magnético terrestre
B_y	–	Componente y do campo magnético terrestre
B_z	–	Componente z do campo magnético terrestre
E_s	–	Camadas E-Esporádica
f_oE	–	Frequência crítica da onda ordinária da camada E (MHz)
f_oF1	–	Frequência crítica da onda ordinária da camada F1 (MHz)
f_oF2	–	Frequência crítica da onda ordinária da camada F2 (MHz)
$fbEs$	–	Frequência de bloqueio da camada Es (MHz)
$fminE$	–	Frequência mínima da camada E (MHz)
$ftEs$	–	Máxima frequência de observação da camada Es (MHz)
$h' Es$	–	Altura virtual mínima da região Es (km)

SUMÁRIO

Pág.

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Plasma.....	3
2.2	Sol.....	4
2.2.1	Estrutura Solar.....	5
2.2.2	Vento Solar.....	8
2.2.3	Manchas Solares.....	9
2.2.4	Explosões Solares.....	12
2.3	Magnetosfera Terrestre.....	15
2.4	Cinturões de Van Allen.....	17
2.5	Campo Magnético da Terra.....	19
2.6	Tempestades Geomagnéticas.....	22
2.6.1	Índices Geomagnéticos.....	22
2.6.2	Classificação das Tempestades Geomagnéticas.....	25
2.7	Atmosfera Terrestre.....	26
2.7.1	Estrutura da atmosfera terrestre.....	27
2.8	Ionosfera.....	28
2.9	Camadas E-Esporádicas (Es).....	31
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	35
3.1	Digissonda.....	35
3.2	<i>Standard Archiving Output (SAO) - Explorer</i>	37
3.3	Metodologia.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	Variação Subsazonal de Camadas Es.....	39
4.2	Ocorrência Sazonal de Camadas Es.....	41
4.3	Ocorrência Sazonal por Tipo Específico de Camadas Es.....	42
4.4	Variação Sazonal por Tipo Específico de Camadas Es em Cada Hora.....	43
4.5	Classificação das Camadas Es de acordo com a Atividade Geomagnética Calma e Perturbada.....	44
5	CONTRIBUIÇÃO, SUMÁRIO DOS RESULTADOS, CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTURO.....	49
5.1	Contribuição.....	49
5.2	Sumário de Resultados.....	49

5.3	Conclusão.....	50
5.4	Trabalhos Futuros	50
REFERÊNCIAS		52
APÊNDICE A – Localização dos Observatórios Utilizados para Elaboração dos Índices Geomagnéticos		55
APÊNDICE B – Tabela da Variação do Nascer e Pôr do Sol		57
APÊNDICE C – Tabela da Variação Sazonal das Camadas Es		58
APÊNDICE D – Tabela da Ocorrência Sazonal por Tipo Específico de Camada Es.....		59
APÊNDICE E – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora Independente da Classificação Magnética		61
APÊNDICE F – Tabela da Classificação em Dias Calmos e Perturbados de Acordo com a Atividade Geomagnética.....		65
APÊNDICE G – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora para os Dias Magneticamente Calmos.....		66
APÊNDICE H – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora para os Dias Magneticamente Perturbados		70

1 INTRODUÇÃO

As camadas esporádicas (Es) se referem a adensamentos do plasma na região E da ionosfera (Whitehead, 1961; Mathews, 1998). Elas são caracterizadas por possuírem alta variabilidade dependendo da altura, coordenadas geográficas de onde são observadas, e de diversos mecanismos de formação como ventos de marés (originados basicamente pelo aquecimento da atmosfera pelo Sol), campos elétricos magnetosféricos, e precipitação de partículas do cinturão de radiação de Van Allen (Arras et al. 2009; Haldoupis, 2011, Denardini et al., 2016; Resende et al., 2016, 2017). As camadas Es são classificadas em diversos tipos como: Es_q (*equatorial*), Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*). Como as camadas Es podem alcançar taxas de ionização muito altas, elas são relevantes para as telecomunicações, uma vez que os sinais eletromagnéticos na faixa de rádio podem ser degradados (Arras e Wickert, 2018).

A partir dos dados coletados por uma ionossonda digital, do tipo Digissonda, instalada no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, (29,7° S, 53,8° O), RS, observou-se ao longo do período de dados analisado (julho 2019 a junho de 2020) a ocorrência das camadas Es_s , Es_f , Es_c , Es_h , e Es_l devido aos ventos ne marés. Também é notável o aparecimento da camada Es do tipo “a”, que é geralmente observada em altas latitudes, ou seja, é uma característica das regiões aurorais. Estas, por sua vez, são associadas a precipitação de partículas energéticas dos cinturões de radiação de Van Allen (Batista e Abdu, 1977). A presença da camada Es_a no Brasil é atribuída a baixa intensidade do campo geomagnético (aproximadamente 22.000 nT), característica da região central da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS; Abdu et al., 2005; Moro et al., 2019). A camada do tipo “q” não foi observada sobre Santa Maria, pois esta camada é característica apenas da região equatorial.

A partir do que foi exposto, este projeto tem como objetivo o estudo sobre a ionosfera terrestre com ênfase na região E e camadas Es. O principal objetivo é estudar a variabilidade das camadas Es entre julho de 2019 a junho de 2020, período caracterizado por ser de mínima atividade solar. Os objetivos específicos são basicamente conduzir uma extensa análise estatística dos tipos de camadas Es em função do horário, duração da camada, meses do ano, estações do ano (primavera, verão, outono e inverno), e atividade geomagnética.

A Digissonda localizada na UFSM faz parte da instrumentação científica que o Laboratório Sino-Brasileiro de Clima Espacial tem em cooperação com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTI), na Coordenação Espacial do Sul (COESU/INPE/MCTI), em Santa Maria, e UFSM. Para o processamento dos dados brutos obtidos com a Digissonda utiliza-se um software específico (gratuito) disponibilizado pelo fabricante (*Lowell Digisonde Internacional – LDI*) chamado de *Standard Archiving Output (SAO) – Explorer*. Através deste programa foi obtida a frequência máxima da camada Es (f^oEs), a sua frequência de bloqueio (f^bEs , que é definida como a frequência até a qual a camada Es bloqueia o recebimento dos ecos refletidos pelas regiões mais altas da ionosfera), e a sua altura virtual da camada Es ($h'Es$). As camadas Es foram classificadas em relação a hora, duração, estações do ano (solstício de dezembro, equinócio de março, solstício de junho e equinócio de setembro) e atividade magnética (utilizando para isso o índice Kp). Ainda, foram utilizados outros *softwares*, como o *OriginLab* e alguns *scripts* usando a linguagem de programação *Python* para a manipulação e a análise dos dados.

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, será realizado no Capítulo 2 uma revisão teórica. No Capítulo 3 apresenta-se a instrumentação e metodologia que se seguiu durante o desenvolvimento deste projeto. Por fim, no Capítulo 4, apresenta-se os resultados e as discussões obtidas através destas análises. As referências bibliográficas estão listadas no Capítulo 5.

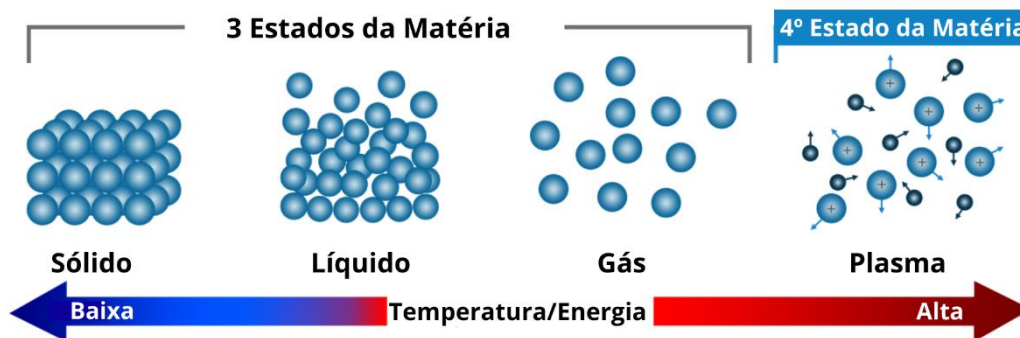
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta Seção é apresentada a revisão da bibliografia, realizada no período de agosto a dezembro de 2020. A Seção 2.1 apresenta uma breve discussão sobre o plasma. A Seção 2.2 apresenta o Sol, com suas principais características, incluindo suas regiões, estruturas, vento solar, manchas solares, e explosões solares. A definição e características da magnetosfera terrestre é mostrada na Seção 2.3. A Seção 2.4 aborda os cinturões de Van Allen, apresentando sua composição e formação. Na Seção 2.5, apresenta-se o campo magnético da Terra, sua estrutura, configuração, inclinação e declinação, e intensidade. As tempestades geomagnéticas e os índices geomagnéticos usados para medir a intensidade das tempestades, são apresentados na Seção 2.6. As Seção 2.7 e 2.8 abordam a atmosfera terrestre neutra e ionizada, respectivamente. A Seção 2.9 é dedicada as camadas Es, foco deste trabalho, onde são apresentados os tipos, e mecanismos de formação.

2.1 Plasma

Toda matéria é formada por átomos, e, inicialmente se pensava que esta se apresentava em apenas três estados: sólido, líquido e gasoso. No entanto, hoje se sabe que a matéria pode ser encontrada em outras formas na natureza. Ao fornecermos mais energia para a matéria em estado gasoso, esta passa a apresentar um comportamento atípico, rompendo as ligações entre os átomos, fazendo com que haja a coexistência de elétrons livres e íons, como pode ser visto no esquema da Figura 2.1. Essa apresentação da matéria é denominada de plasma (Bittencourt, 2004).

Figura 2.1 – Estados físicos da matéria.



Fonte: *School Tutoring Academy* (2016).

Pode-se encontrar plasma em diversos lugares em nosso dia a dia. Por exemplo, utiliza-se o plasma aprisionado em campos magnéticos nas televisões de plasma e em lâmpadas fluorescentes. De forma natural, o plasma é encontrado no interior das estrelas, como o Sol, e na parte ionizada da atmosfera da Terra, conhecida como ionosfera.

2.2 Sol

Desde a antiguidade se sabe da importância do Sol para a vida no planeta, fornecendo luz e calor para a humanidade. Muitas civilizações o adoravam como um deus, fortemente ligado a mitologia. Com o passar dos anos, intrigou inúmeras pessoas, instigando questionamentos sobre seu mecanismo de funcionamento.

Por se tratar da estrela mais próxima da Terra, o Sol se tornou objeto de intensa pesquisa sobretudo com o advento de novas ferramentas de estudo como satélites e sondas espaciais. Com essas ferramentas se pôde entender melhor seus mecanismos de geração de energia, que fornecem luz e calor para a Terra, e as suas características estruturais. As principais características do Sol são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características gerais do Sol.

Massa	$1,99 \times 10^{30}$ Kg
Idade	$4,5 \times 10^9$ yr
Raio médio	$6,96340 \times 10^5$ km
Aceleração da gravidade	274 m/s^2
Densidade média	$1,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Temperatura da superfície (efetiva)	5,785 K
Luminosidade	$3,86 \times 10^{26}$ W
Composição básica (aproximadamente)	Hidrogênio – 90%, Hélio – 10%
Distância média da Terra	$1,5 \times 10^8$ Km

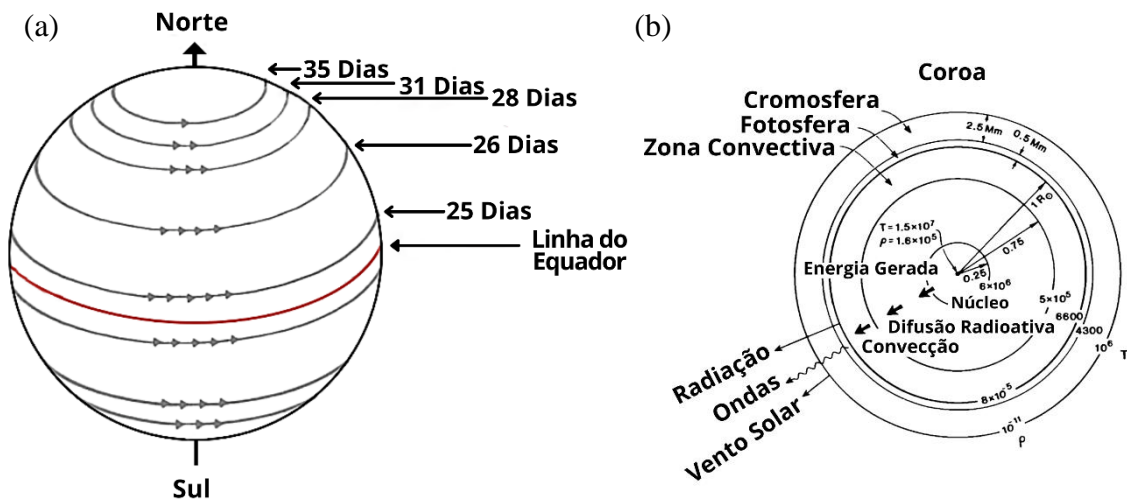
Fonte: Adaptado de Kivelson e Russell (1995).

Atualmente o Sol se encontra em equilíbrio hidrodinâmico, ou seja, o cabo de guerra entre a força externa e interna, causadas respectivamente pela força gravitacional e pela pressão térmica estão estáveis devido ao meio interplanetário (Gregorio-Hetem, 2010).

Por ser formado de gases ionizados, o Sol apresenta uma rotação diferencial. A região equatorial do Sol gira com velocidade angular maior do que a região polar. O número de dias para uma região solar completar uma rotação em função da sua latitude é mostrado na Figura 2.2(a).

O Sol é geralmente estudado em termos de duas grandes regiões: o interior e a atmosfera. O interior solar é composto pelo núcleo (*core*), pela zona radiativa (*radiative zone*), e pela zona convectiva (*convection zone*). Já a atmosfera é composta pela fotosfera (*photosphere*), pela cromosfera (*chromosphere*) e pela coroa (*corona*). Estas regiões serão descritas na próxima Seção. Pode-se observar um esquema das principais regiões solares na Figura 2.2(b).

Figura 2.2 – (a) Rotação diferencial do Sol de acordo com a latitude, sendo necessários 35 dias para os polos completarem uma rotação e apenas 25 para que a região do equador complete o movimento; (b) Principais regiões solares e representações do tamanho de cada camada.



Fonte: (a) Adaptado de NASA/Solar Dynamics Observatory (2017); (b) Adaptada de Kivelson e Russell (1995).

2.2.1 Estrutura Solar

O núcleo equivale a um quinto do tamanho do Sol, e por apresentar temperaturas muito altas é nele que ocorrem as reações termonucleares. Estas reações são chamadas de fusão nuclear, e liberam uma enorme quantidade de energia. Quando núcleos leves (hidrogênio) se fundem, a massa do núcleo produzido (hélio) é menor que a soma das massas dos

núcleos iniciais, e a massa perdida é convertida em energia. Esta energia, gerada no núcleo do Sol, é transportada para as camadas mais externas do Sol por processos muito complexos e lentos. A camada mais próxima ao núcleo, onde se dá o primeiro estágio de transmissão desta energia, por meio da absorção e remissão de fótons, é a chamada zona radiativa. Esse transporte pode levar milhares de anos, e quando finalmente chega a próxima camada, denominada de zona convectiva, ainda tem que ser transportada desta para a superfície solar, chamada de fotosfera. Essa transmissão não se dá de maneira contínua, muitas vezes, por fenômenos que serão apresentados adiante, são formadas manchas solares na fotosfera, e quando há a formação dessas manchas, o transporte de energia não é completamente efetivo, fazendo com que essas regiões sejam mais frias do que as demais partes da fotosfera.

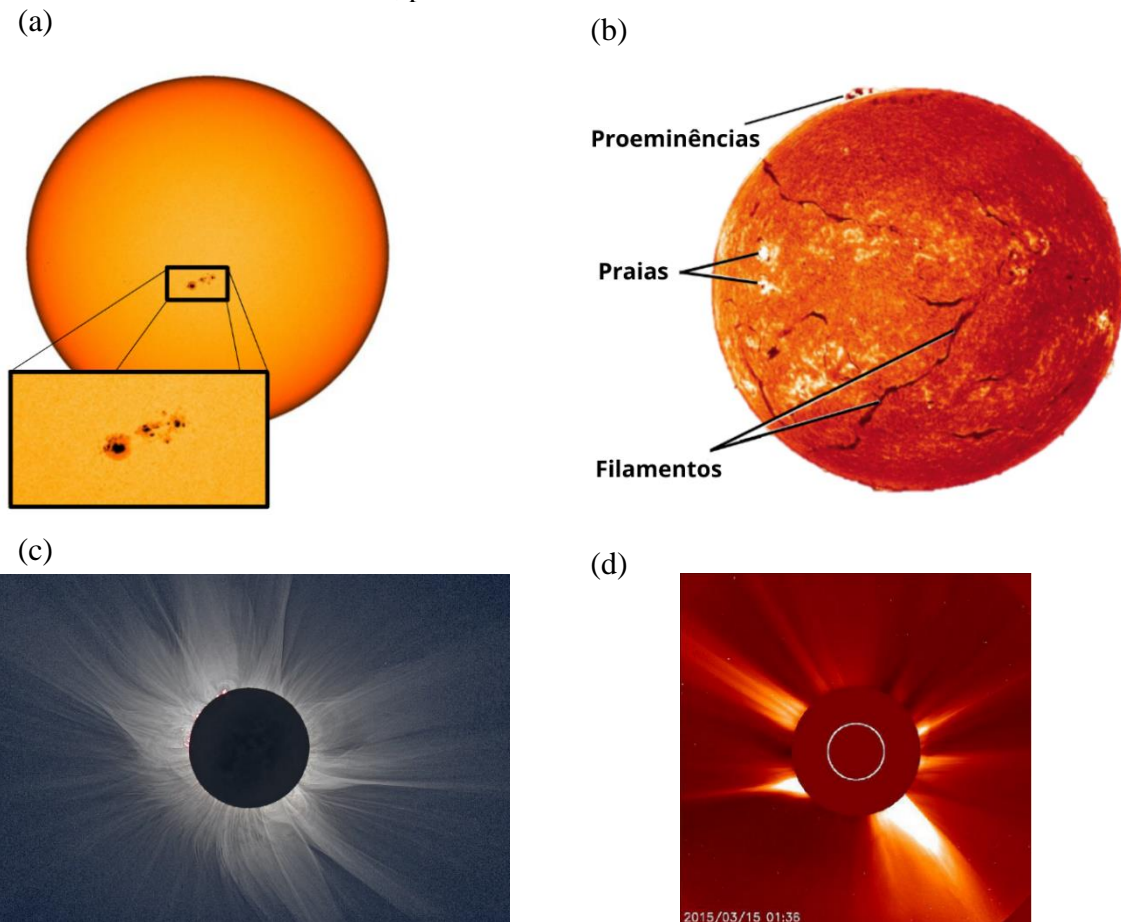
Devido ao movimento de partículas carregadas no interior do Sol, há a geração de um campo magnético associado vinculado a um processo denominado de dínamo solar. Esse é um mecanismo ainda pouco conhecido, porém, relaciona-se este campo magnético à rotação diferencial, e a movimentação por convecção, que viria a transformar essa energia cinética em energia eletromagnética.

A fotosfera é a superfície solar, possuindo cerca de 400 km de espessura e temperaturas da ordem de 5,800 K. Ela apresenta uma aparência granulada conhecida como granulação fotosférica. Estes grânulos são causados pelas colunas convectivas, sendo as áreas mais escuras regiões onde o gás se encontra em uma temperatura mais baixa e escorre para baixo. A fotosfera pode ser observada a olho nu, porém o gás desta camada é de certa forma, opaco, impossibilitando a visualização interna do Sol. A Figura 2.3(a) mostra uma imagem obtida através do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) onde se pode identificar a granulação fotosférica e também grupos de manchas solares, que são os pontos mais escuros no disco solar.

Acima da fotosfera, encontra-se a cromosfera, de cor avermelhada. Ela possui uma aparência ondulada por causa da presença de espículos – jatos de gás que se elevam a aproximadamente 100 km de altura. Sua temperatura aumenta da base para o topo, apresentando um valor médio de 15,000 K. A fonte de energia para esse aumento é provavelmente os campos magnéticos variáveis formadas na fotosfera e transportados por correntes elétricas para a coroa.

A cromosfera pode ser observada através de um filtro na luz vermelha conhecido como H-alfa (que corresponde à primeira linha da série de Balmer do átomo de Hidrogênio). Com este filtro, pode-se distinguir algumas das mais conhecidas estruturas cromosféricas, como proeminências, praias e filamentos, mostrados na Figura 2.3(b). As proeminências são arcadas magnéticas vistas no acima da superfície solar. Muitas vezes, ao se observar o Sol, não se vê sua arcada completa, mas apenas o topo destas, denominadas de filamentos (regiões mais escuras e com temperaturas mais baixas). Há também regiões mais ativas, com brilho mais intenso, designado de praias.

Figura 2.3 – Atmosfera Solar, (a) Fotosfera solar no dia 12 de março de 2015, mostrando algumas manchas solares; (b) Cromosfera solar fotografada usando um filtro na luz vermelha do H-alfa; (c) Um eclipse solar total, visto de Svalbard, na Noruega, em 20 de março de 2015; (d) Eclipse artificial produzido pelo satélite SOHO para a visualização e estudo da coroa solar, para o dia 15 de março de 2015.



Fonte: (a) Adaptado de SDO (2015); (b) Adaptada de *Space Environment Laboratory*, NASA (1980); (c) SOHO (2015); (d) SOHO (2015).

A coroa é a parte mais externa da Atmosfera Solar, possui temperaturas da ordem de 10^6 K e se estende por aproximadamente dois raios solares. Nessa região se encontram os buracos coronais, regiões mais escuras e que estão associadas a linhas de campo magnético “abertas”, chamadas desta forma pelo fato de que se fecham muito distantes do Sol. Dessas regiões emana o vento solar rápido, que será abordado com mais detalhes no próximo capítulo. A coroa é melhor observada durante os eclipses totais do Sol, como mostra a Figura 2.3(c) – pois, apesar de ter um brilho muito alto, ela fica ofuscada quando a fotosfera é visível. Também é possível produzir eclipses artificiais – Figura 2.3(d) – a fim de estudar e monitorar a coroa solar, como faz o satélite SOHO.

2.2.2 Vento Solar

Devido à enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário, surge o denominado vento solar, um fluxo de partículas ionizadas empurrado para longe do Sol mesmo sob tamanha atração gravitacional. O vento solar pode ser dividido em duas diferentes regiões geradoras, o vento solar rápido e o vento solar lento. O vento solar rápido é originado nos buracos coronais, regiões mais frias e menos densas da coroa solar, podendo atingir picos de velocidades de até 900 km/s. Já o vento solar lento se origina em regiões de baixas latitudes, mais próximas ao equador do Sol, geralmente mais denso e de comportamento irregular, atinge velocidades em torno de 300 km/s.

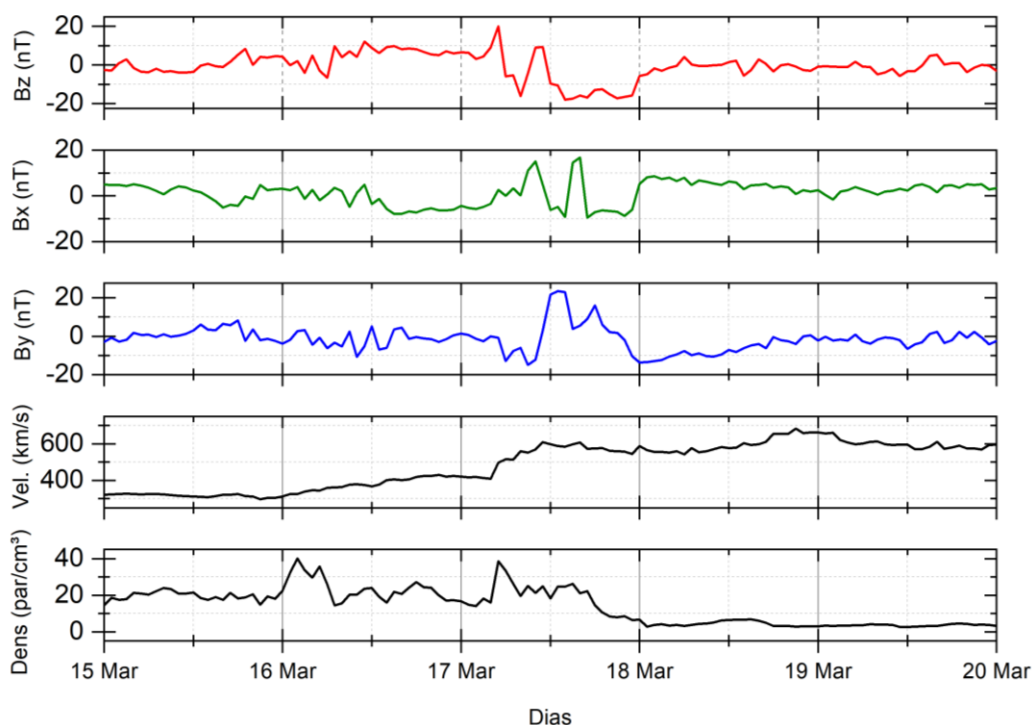
Por estar em constante expansão, suas características variam dependendo da região do espaço em que se encontra. Por exemplo, na órbita da Terra suas características são bem conhecidas, sua velocidade varia em torno de 400 km/s e sua densidade em valores próximos de 5 partículas/cm³, sendo estas majoritariamente elétrons, prótons e íons de Hélio.

Além disso, suas características variam muito de acordo com a atividade solar. Para exemplificar a variação temporal do campo magnético interplanetário e dois dos mais importantes parâmetros do vento solar, que são sua velocidade e densidade, apresenta-se a Figura 2.4. De cima para baixo nessa figura estão as componentes z (B_z), x (B_x), y (B_y), do campo magnético interplanetário, a velocidade do vento solar em (km/s), e a densidade (partículas/m³) entre os dias 15 e 20 de março de 2015. Neste período se pode notar um aumento da velocidade do vento solar, atingindo 683 km/s, e da densidade de partículas

chegando a $38,5$ partículas/cm³. Este aumento está associado a uma tempestade magnética, que será discutida mais adiante na Seção 2.6.

Por se tratar de um plasma altamente condutor, o vento solar transporta consigo as linhas de campo magnético do Sol. Esse fenômeno é conhecido como “congelamento” das linhas de campo magnético.

Figura 2.4 – Principais características do vento solar no período de 15 a 20 de março de 2015.



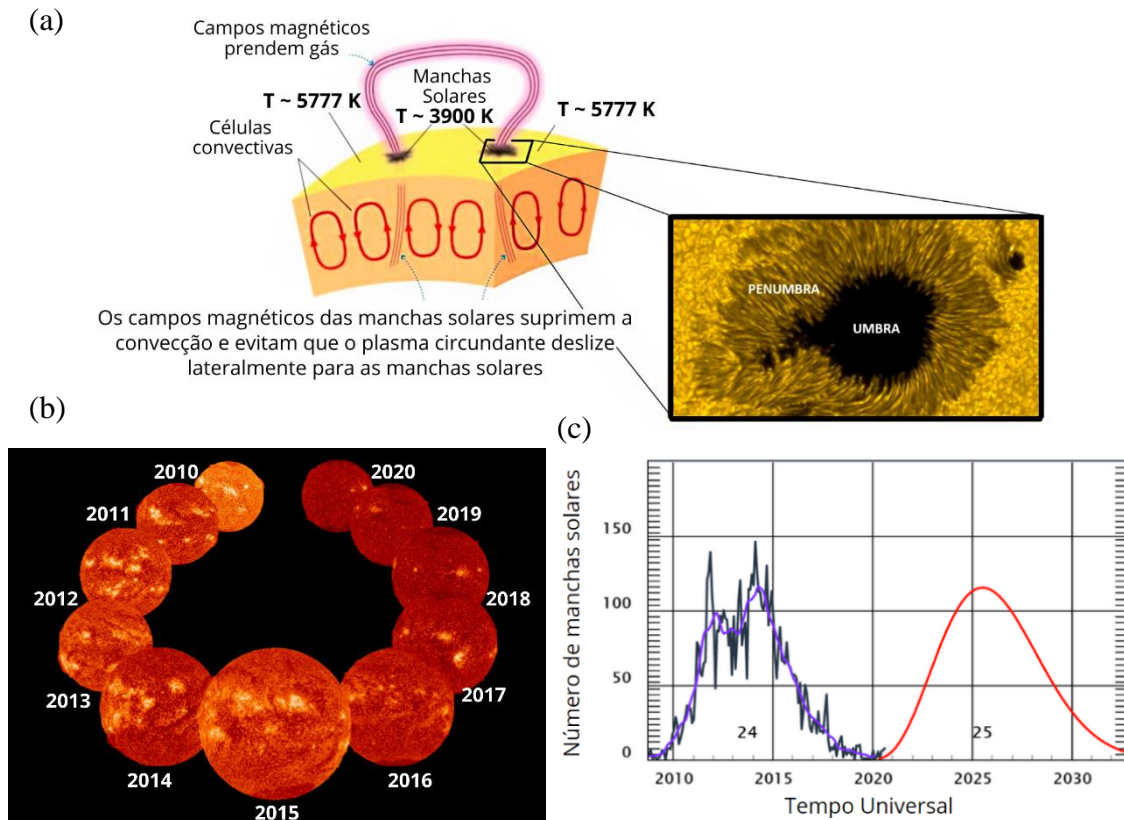
Fonte: Produção da autora (2020).

2.2.3 Manchas Solares

Por volta de 1613 Galileu Galilei, através de suas observações do Sol, identificou a aparição de algumas manchas na superfície solar, que intrigaram os cientistas da época. Estas manchas já eram observadas pelos chineses milhares de anos antes de Cristo, entretanto o estudo mais sistemático destas só começou após as observações de Galileu, a partir daí o monitoramento destas manchas se tornaram constantes.

O campo magnético intenso faz com que o transporte convectivo seja dificultado na zona convectiva. Logo, as manchas solares apresentam temperaturas mais baixas emitindo menos radiação do que o restante da fotosfera. Consequentemente as manchas são mais escuras do que o resto da fotosfera e são constituídas de duas partes: a umbra, que é a parte central mais escura, com temperaturas em torno de 3,900 K, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra, com temperaturas por volta de 5,777 K. A ilustração da formação das manchas solares bem como a umbra e a penumbra podem ser vistas na Figura 2.5(a).

Figura 2.5 – Manchas solares, (a) Ilustração da formação e composição – umbra e penumbra – das manchas solares na fotosfera solar; (b) Evolução do número de manchas solares ao longo do ciclo solar 24; (c) Representação gráfica do número de manchas solares no ciclo solar 24, e número estimado de manchas para o ciclo 25 que teve início no ano.



Fonte: (a) Adaptado de Bennett et al. (2017) e Space Weather Live; (b) Produção do autor, créditos NASA (2020); (c) *Space Weather Prediction Center* (2020).

As manchas solares geralmente se apresentam em pares, de polaridades opostas, sendo a ordem das polaridades opostas no hemisfério Norte e no hemisfério Sul. Por se localizarem na fotosfera, as manchas se deslocam juntamente com a rotação solar. O

número de manchas solares é o mais antigo índice de atividade solar, as manchas são contadas e atingem um máximo, decrescendo em seguida o que leva em torno de 11 anos, denominado ciclo de manchas solares.

Ao se analisar o valor máximo de manchas solares de cada ano de um ciclo solar, pode-se perceber que, durante os máximos de atividade solar, há um maior número de manchas solares, como é possível analisar através da Figura 2.5(b). Também é possível, através de predições, estimar como será o próximo ciclo solar, como mostra a Figura 2.5(c).

A evolução do campo magnético solar durante a rotação solar pode ser vista na Figura 2.6(a). No início de um ciclo, - Estágio 1 - o campo magnético é basicamente bipolar, ou seja, as linhas de campo magnético solar seguem a direção dos meridianos que atravessam o Sol do polo norte ao polo sul. Como o Sol apresenta uma rotação diferencial, as linhas de campo sofrem uma certa distorção nesta região – Estágio 2. Com o passar das rotações, as linhas se distorcem cada vez mais - Estágio 3 - até que a pressão magnética provoca o afloramento das linhas de campo superficial à superfície em forma de arcos – Estágio 4. Na base desses arcos são formadas as manchas solares.

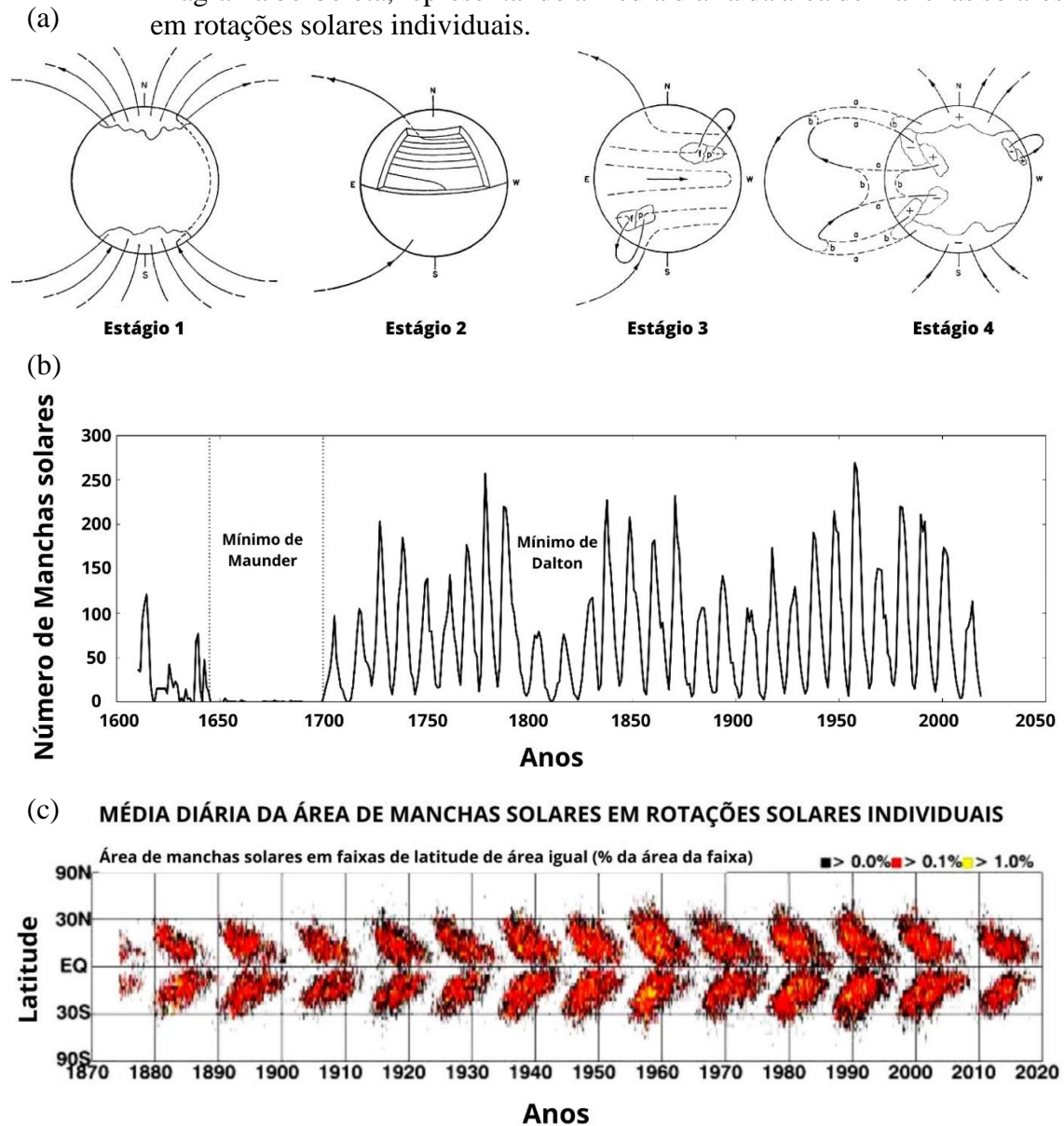
O número de manchas solares contabilizadas a partir do ano de 1613 até 2020 pode ser visto na Figura 2.6(b). Nessa figura, pode-se visualizar dois mínimos solares que são conhecidos como mínimo de Maunder e mínimo de Dalton. Esses mínimos são caracterizados por terem apresentado períodos com nenhuma ou poucas manchas solares. O mínimo de Maunder foi identificado por Edward Maunder em 1894, e está associado a um período de cerca de 50 anos (1650 – 1700) em que nenhuma mancha solar foi identificada. Período esse que deveria ter apresentado pelo menos 4 ciclos solares, é associado a uma onda gelada que atingiu a Europa conhecido como Idade do Gelo.

Já o mínimo de Dalton (1800 – 1850) não apresentou ausência de manchas solares, mas sim uma diminuição significativa da quantidade de manchas solares durante esses 50 anos.

Associadas a campos magnéticos intensos, formados pelo processo de dínamo solar, mencionado na Seção 2.2.1, as manchas solares se formam normalmente em grupos na região do equador solar, depois migrando para maiores latitudes. O gráfico da localização

das manchas solares ao longo dos anos forma o chamado diagrama Borboleta que pode ser visto na Figura 2.6(c).

Figura 2.6 – Campo Magnético Solar, (a) Evolução do campo magnético solar durante um ciclo solar; (b) Médias anuais do número de manchas solares diárias; (c) Diagrama borboleta, representando a média diária da área de manchas solares em rotações solares individuais.



Fonte: (a) Adaptado de Babcock (1961); (b) Hathaway (2019); (c) Adaptada de Hathaway (2019).

2.2.4 Explosões Solares

As explosões solares, também conhecidas como *solar flares* ou simplesmente *flares* foram identificadas pela primeira vez por R. C. Carrington e R. Hodgson, no dia primeiro de setembro de 1859, enquanto eles observavam manchas solares. Os *flares* são

caracterizados pela expulsão de enormes quantidades de energia (10^{19} - 10^{25} J) ao espaço interplanetário em intervalos de tempo relativamente curtos, podendo variar de alguns segundos até poucas horas. Não é possível visualizar os *flares* sem a ajuda de algum aparelho especializado, como radiotelescópios e telescópios ópticos para observação em solo terrestre. A Figura 2.7(a) mostra um *flare* obtido através de imagens de raios X.

Um esquema do que acontece com as linhas de campo magnético nessas regiões no momento de uma erupção solar é mostrada na Figura 2.7(b). Dependendo do tamanho e configuração das arcadas magnéticas, estas podem tocar suas bases e, por apresentarem polaridades opostas, há o rompimento desses arcos e com isso a ejeção de partículas. Os *flares* podem ser classificados de acordo com a intensidade de emissão de raios X, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação dos *flares* de acordo com a emissão de raios X.

Classe	Fluxo (Wm^{-2})	Intensidade ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
X	10^{-4}	10^{-1}
M	10^{-5}	10^{-2}
C	10^{-6}	10^{-3}
B	10^{-7}	10^{-4}
A	10^{-8}	10^{-5}

As classes de cada evento são chamadas de X, M, C, B e A conforme a intensidade do *flare*: X: mais longas e mais energéticas erupções solares; M: erupções de média intensidade; C: pequenas erupções; B: erupções de baixa intensidade; A: erupções de menor intensidade.

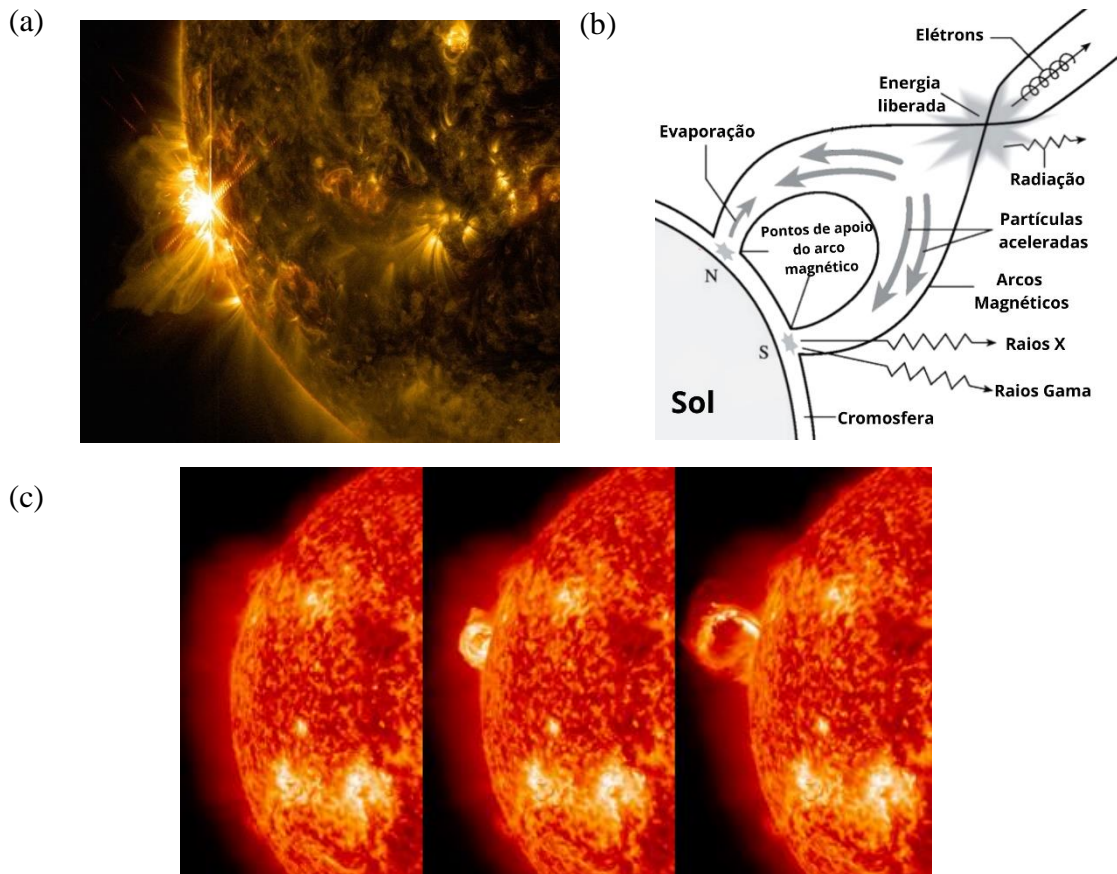
Fonte: Adaptado de Golub e Pasachoff (2009).

Uma explosão solar também pode estar associada a expulsão de grandes quantidades de matéria a velocidades que variam de centenas a milhares de quilômetros por segundo. Esse fenômeno é conhecido como ejeção de massa coronal (*CME* - do inglês *Coronal Mass Ejection*). As *CME*'s são grandes quantidades de matéria que são expulsas do Sol formando uma enorme erupção que se expande para o espaço a milhares de quilômetros por segundo. Mais da metade desses fenômenos estão associados a proeminências eruptivas, e o restante acompanha os *flares*.

A frequência dos CME varia de acordo com a atividade solar. A Figura 2.7(c) mostra imagens sucessivas da ocorrência de uma CME no dia primeiro de maio de 2013 capturada pelo satélite SDO com um filtro no extremo ultravioleta.

As CME's ejetam grandes quantidades de partículas que fazem variar de forma abrupta a velocidade do vento solar, criando uma onda de choque que é seguida por um intenso campo magnético e posteriormente uma nuvem magnética – regiões em que a pressão do plasma é menor do que a pressão magnética. Essas partículas interagem com os demais corpos celestes, como será visto também é o caso do nosso planeta.

Figura 2.7 – (a) Explosão solar flagrada pelo SDO no dia 10 de junho de 2014; (b) Esquema de uma erupção solar; (c) Evolução de uma Ejeção de Massa Coronal ocorrida no dia primeiro de maio de 2013. Imagens capturadas no extremo ultravioleta.



Fonte: (a) *Solar Dynamics Observatory* (2014); (b) Lang (2009); (c) *Solar Dynamics Observatory* (2014).

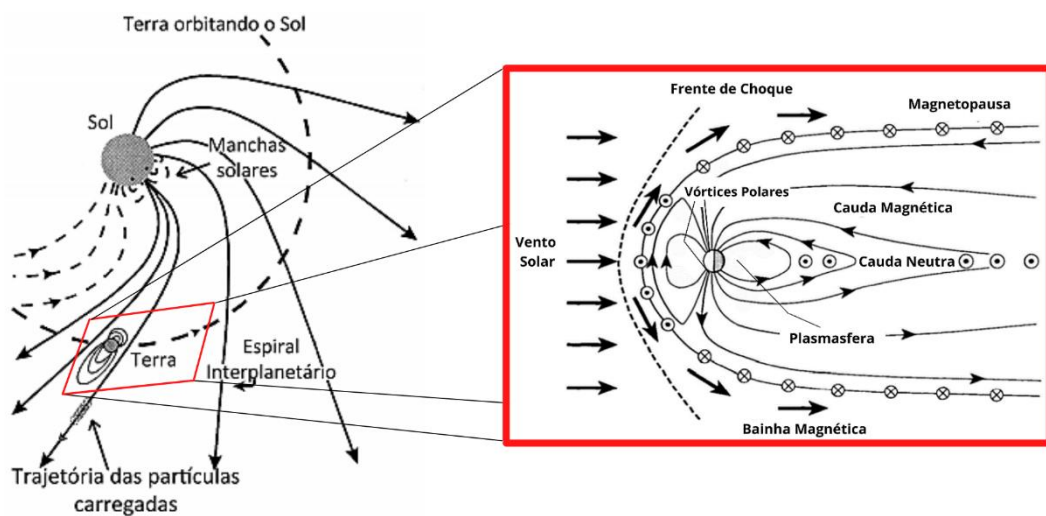
As erupções solares liberam enormes quantidades de energia, que por sua vez são transportadas para as camadas mais externas do Sol e após são arrastadas pelo vento solar

ao longo de milhares de quilômetros. Estas partículas carregadas provindas do Sol viajam pelo espaço e interagem com o campo magnético de um astro. O local onde ocorre essa interação é denominado magnetosfera. No caso do planeta Terra, essa região é conhecida como magnetosfera terrestre. Um esquema destes processos e regiões da magnetosfera podem ser vistos na Figura 2.8.

2.3 Magnetosfera Terrestre

A magnetosfera terrestre pode ser dividida em sub-regiões, sendo estas: Frente de Choque (*Bow Shock*), Bainha Magnética (*Magnetosheath*), Magnetopausa (*Magnetopause*), Cauda Magnética (*Tail Lobe*), Cauda Neutra (*Neutral Sheet*), Plasmasfera (*Plasmasphere*) e Vórtice Solar (*Polar Cusp*), descritas a seguir. Vale salientar também que, a magnetosfera, assim como as demais regiões atmosféricas, é dinâmica, portanto, a localização de cada sub-região pode variar de acordo com o fluxo de partículas incidente.

Figura 2.8 – Representação campo magnético interplanetário e representação esquemática da magnetosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de Nishida (2009) e Kivelson e Russell (1995).

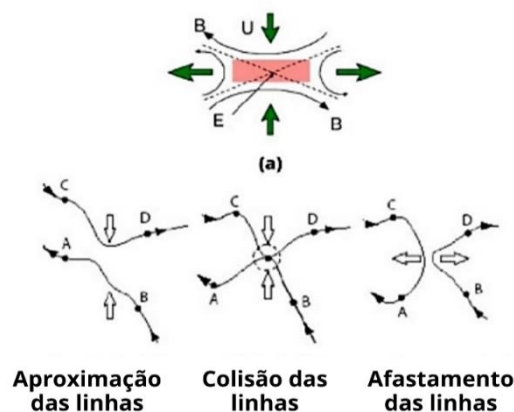
O vento solar viaja através do espaço interplanetário com velocidades supersônicas em relação ao Sol, e, ao entrar em contato com o campo magnético da Terra ele é desacelerado. O local que marca esta desaceleração é denominado bainha magnética, caracterizada por apresentar um fluxo bastante turbulento.

A frente de choque é a região de primeiro contato do vento solar com o campo magnético da Terra, formando uma onda de choque curvada simetricamente na direção Terra-Sol. O lado diurno (nariz da frente de choque) fica a cerca de $14 R_T$, onde R_T (Raio da Terra) = 6,371 km, e a extensão da magnetosfera na região noturna, denomina-se magnetopausa e se estende por aproximadamente $80 R_T$. Quando foi proposta por Chapman-Ferraro (1931), pensava-se que esta fosse uma camada variável, surgindo apenas em períodos de alta atividade solar, porém, provou-se mais tarde que esta é uma camada permanente. É na magnetopausa que a pressão do campo magnético terrestre e do campo magnético interplanetário se igualam.

Além da magnetopausa, a magnetosfera pode se estender, do lado noturno, a $\sim 1,000 R_T$, formando uma região denominada cauda magnética. Sua enorme extensão se deve, significativamente a um processo onde as linhas de campo magnético terrestre se conectam com as linhas de campo do vento solar, processo chamado de reconexão magnética. Porém, vale salientar que não é apenas no lado noturno que este processo ocorre.

Quando uma CME é geofetiva, sendo então absorvida pela magnetosfera terrestre, há a ocorrência desse processo, onde, ao se tocarem, as linhas de campo se rearranjam mudando suas conectividades, como mostra a Figura 2.9.

Figura 2.9 - Imagem das fases de uma reconexão magnética padrão.



Fonte: Adaptada de Lakhina (2000).

Através deste processo ocorre uma intensificação da corrente elétrica na magnetosfera, acelerando e permitindo a entrada de partículas carregadas no planeta Terra, que ao serem

direcionadas aos polos devido as polaridades, interagem com as moléculas neutras da atmosfera, formando as auroras boreais ou austrais através da ionização por impacto.

O processo descrito faz com que ocorra uma mudança da direção do campo magnético, o ponto onde este processo ocorre é denominado cauda neutra, sendo, aproximadamente circular com um diâmetro de $\sim 30 R_T$.

O acoplamento do campo magnético interplanetário com o campo magnético da Terra, no lado diurno, produz regiões com magnitude de campo magnético próximo a zero chamadas de vórtices ou cúspides polares (Russell, 2000).

Mais internamente, próximo ao planeta – cerca de $4 R_T$ do planeta, há uma região que apresenta um plasma mais denso e frio, essa região é classificada então como plasmasfera. Sua estrutura com linhas de campo fechadas aprisiona partículas carregadas, estatisticamente bem distribuídas que se movem e oscilam entre os dois hemisférios, formando os chamados Cinturões de Van Allen.

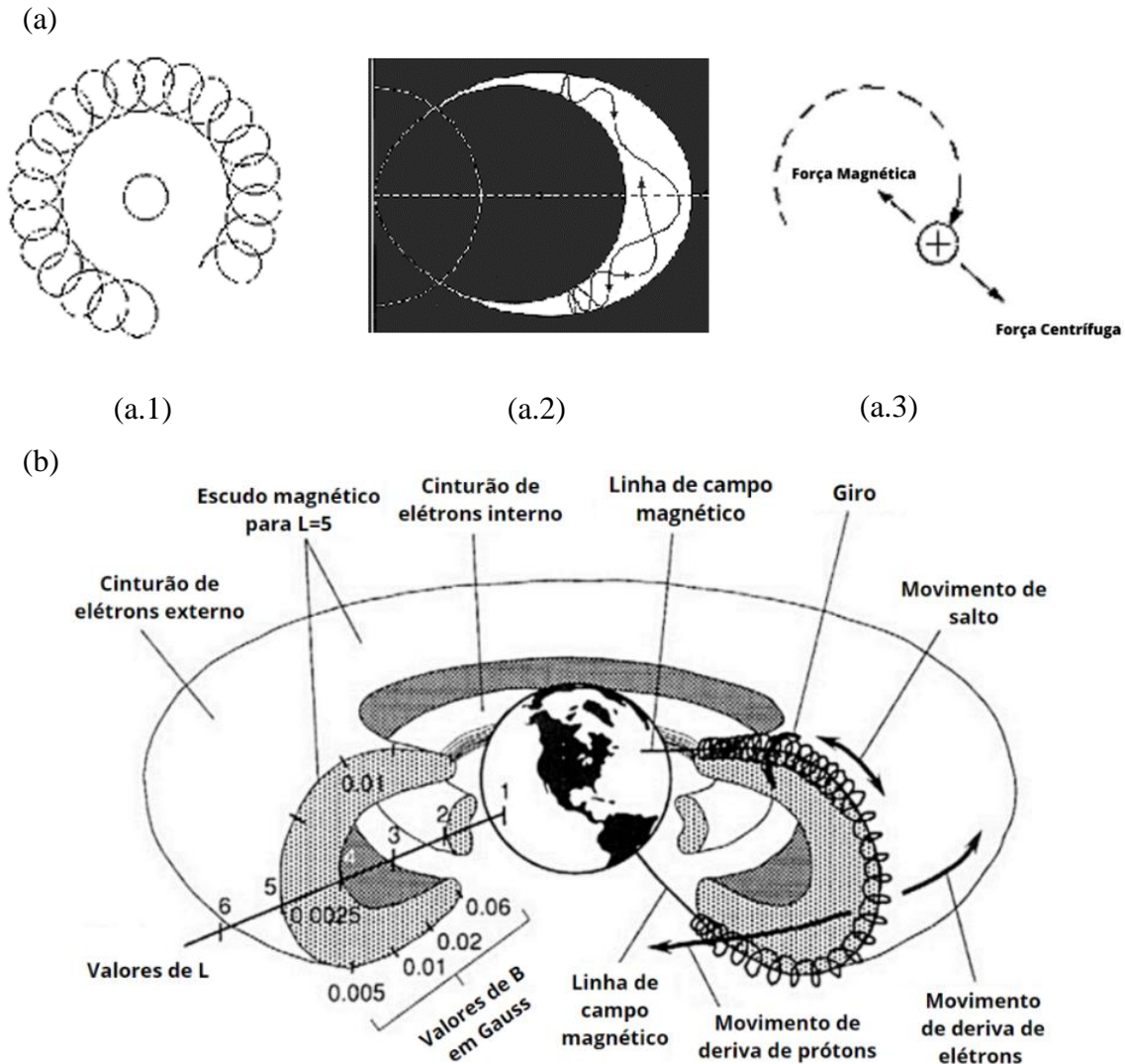
2.4 Cinturões de Van Allen

As partículas carregadas (principalmente elétrons e íons) apresentam três tipos de movimentos, ilustrados na Figura 2.10(a), onde se identifica os seguintes movimentos (a.1) rotação rápida, também chamada de ciclotrônica – onde os íons e elétrons circulam as linhas de campo elétrons no sentido anti-horário e íons no sentido horário, criando uma corrente elétrica que gera um campo magnético no sentido oposto ao do campo magnético terrestre, conhecida como corrente de anel; (a.2) para frente e para trás (*bouncing*) – onde as partículas se movimentam de um polo a outro sendo repelidas nos “pontos de espelho” próximo ao planeta; e (a.3) Deriva (*Drift*) – onde a partícula sofre um lento deslocamento fazendo-as saltar de uma linha de campo para outra.

Os Cinturões de Radiação de Van Allen, descobertos em 1958 pela equipe de James Van Allen, são regiões de alta concentração de partículas no campo geomagnético. Existem duas faixas distintas de partículas aprisionadas, as zonas “interna” e “externa”, como pode

ser observado na Figura 2.10(b). Porém, vale destacar que não há, entre os dois cinturões uma delimitação exata, pois eles se fundem em altitudes variáveis.

Figura 2.10 – (a) Movimentos das partículas sob ação do campo geomagnético, (a.1) Rotação rápida; (a.2) Para frente e para trás; (a.3) Movimento de Deriva; (b) Representação tridimensional dos cinturões de radiação em torno da Terra e movimentos realizados por uma partícula sob o efeito do campo magnético terrestre.



Fonte: (a) Adaptado de Stern (2001); (b) Adaptado de Mitchell (1994).

O cinturão interno está situado entre, aproximadamente, dois mil e cinco mil quilômetros de altitude da superfície do planeta Terra, apresentando sua intensidade máxima por volta de três mil quilômetros. É composta por prótons altamente energéticos com energias entre 100 keV até 100 MeV. A uma distância de cerca de 2,2 R_T deste cinturão interno, se encontra o cinturão externo. O cinturão externo se encontra, aproximadamente entre 4 a

$5 R_T$, composto principalmente por elétrons de altas energias, variando de dezenas de keV e algumas dezenas de MeV.

2.5 Campo Magnético da Terra

A Terra possui um campo magnético, gerado em seu interior, que se estende muito além de seu raio, fazendo com que o planeta funcione como um enorme imã. Nas regiões próximas ao corpo, este campo se assemelha ao campo de um dipolo magnético, formando uma configuração que funciona como um escudo contra a radiação solar.

A centenas de anos antes de Cristo, os Gregos já identificavam o fenômeno do magnetismo em algumas rochas que atraíam pedaços de ferro. Mas foi William Gilbert, em 1600, que realizou grandes estudos, descobrindo que a Terra funciona como um enorme imã, com um polo norte magnético e um polo sul magnético.

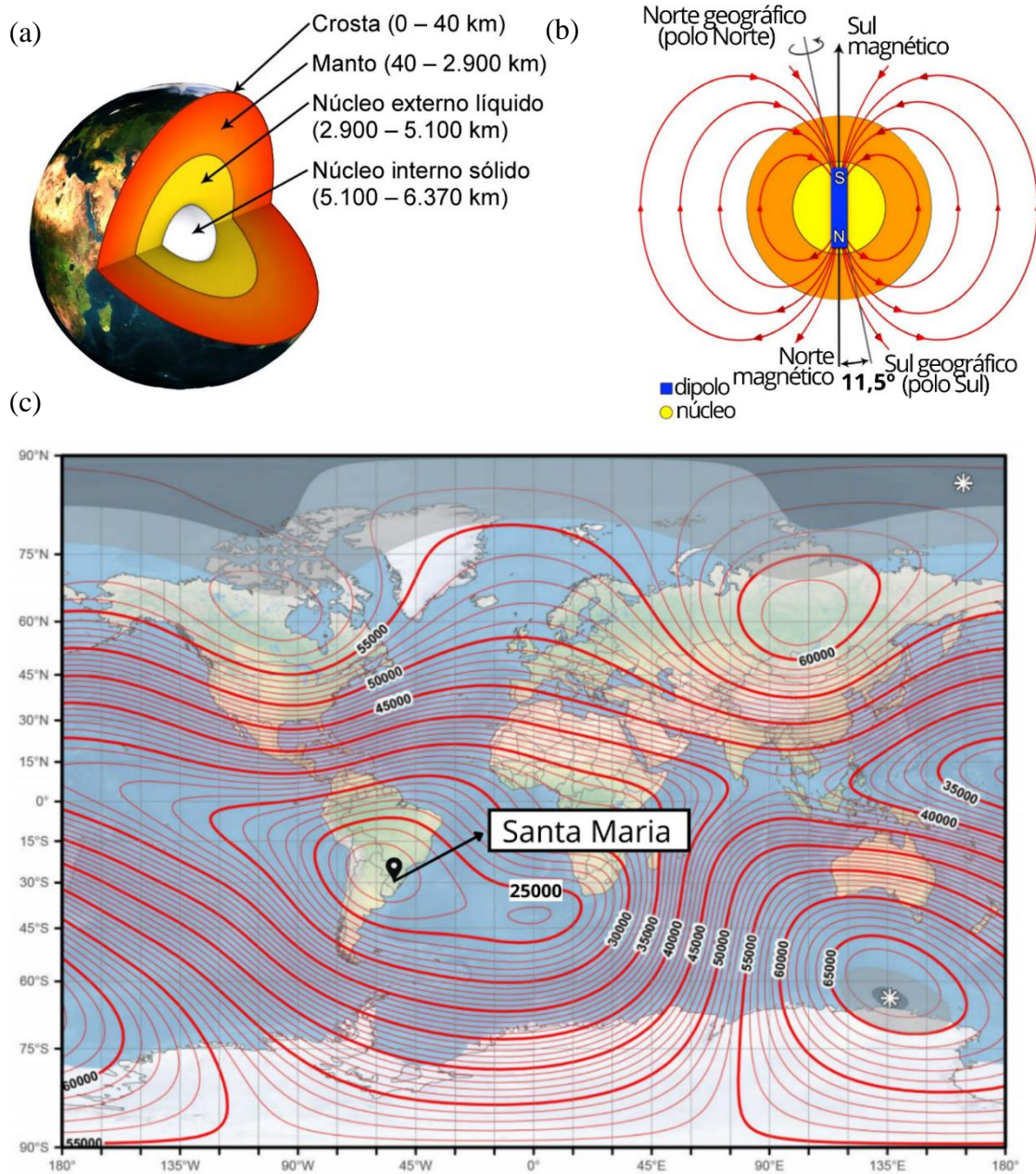
Hoje se sabe que o planeta Terra possui um núcleo dividido em duas partes, o núcleo externo e o núcleo interno. O núcleo externo é formado por ferro metálico e se encontra no estado líquido; o núcleo interno também é composto por ferro e demais materiais metálicos, porém a pressão neste é tão alta que faz com que os átomos não possam se mover facilmente, diz-se então que ele é sólido. Posteriormente se tem o manto, uma região sólida que envolve o núcleo. E, mais externamente, tem-se a crosta terrestre que caracteriza a superfície do nosso planeta. Uma ilustração das camadas internas e suas dimensões pode ser vista na Figura 2.11(a).

A Terra possui um campo magnético, gerado em seu interior, que se estende muito além de seu raio, fazendo com que o planeta funcione como um enorme imã (Figura 2.11 (b)). Este campo se assemelha ao campo de um dipolo magnético próximo ao solo, formando uma configuração que funciona como um escudo contra a radiação solar. O campo magnético terrestre total é uma composição do campo principal (gerado no núcleo externo fluido), crustal (gerado na crosta terrestre) e induzido (gerado por correntes elétricas que circulam na ionosfera e magnetosfera) (Chulliat et al., 2020).

Há uma diferença de cerca de $11,5^\circ$ em relação ao eixo de rotação terrestre e o polo magnético. A diferença entre o norte geográfico e o norte magnético é chamada de declinação magnética; e o ângulo formado entre a direção horizontal (equador) e o campo

magnético é conhecido como inclinação magnética, sendo essa, mínima no equador e máxima nos polos.

Figura 2.11 – (a) Visão da estrutura interna do planeta Terra; (b) Configuração do campo magnético terrestre; (c) Intensidade total do campo principal (F) para 2020. O intervalo de contorno é 1,000 nT.



Fonte: (a) Toledo (2014); (b) Adaptado de Toledo (2014); (c) Adaptado de Chulliat, A. et al. (2020).

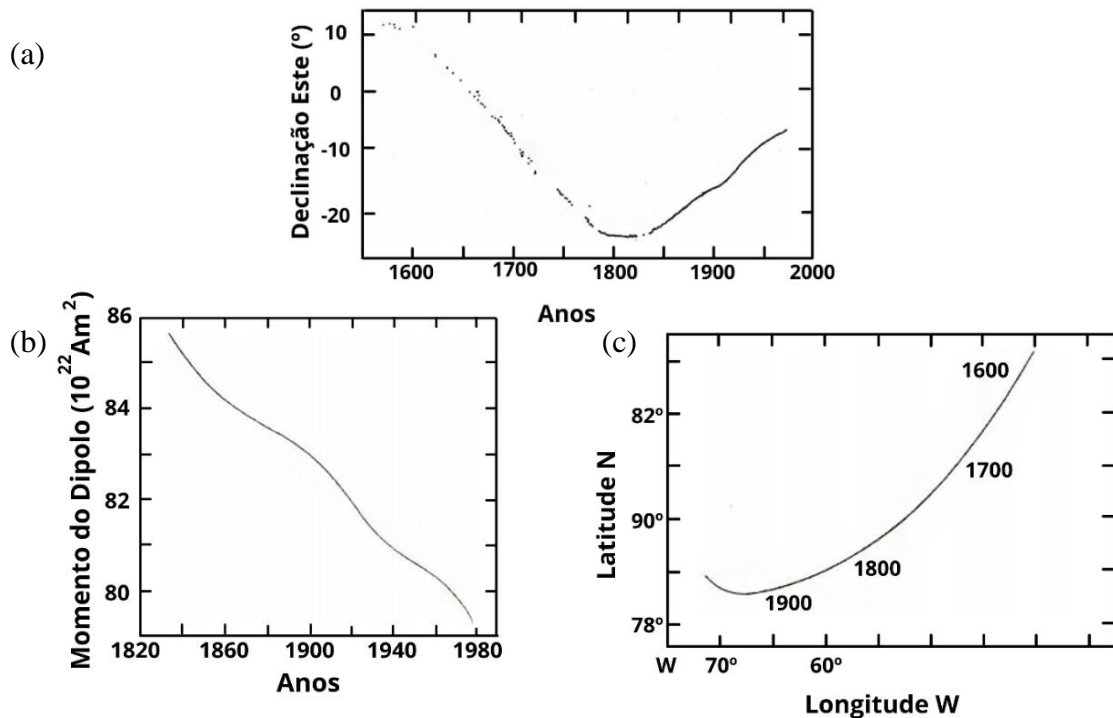
Na superfície da Terra a magnitude do campo magnético é de cerca de 0,3 a 0,6 Gauss – unidade de medida do campo magnético, que também pode ser medido em Tesla, onde 1

Gauss = 10^{-4} Tesla (unidade no SI) - variando ao longo da superfície terrestre. O valor da intensidade do campo magnético terrestre ao longo do ano de 2020 pode ser vista na Figura 2.11(c).

O valor da intensidade do campo magnético terrestre obtido com o modelo *World Magnetic Model 2020-2025* (Chulliat et al., 2020) pode ser vista na Figura 2.3. Através dessa figura percebe-se uma região entre o oeste do continente africano e o oceano Pacífico, sobre toda a América do Sul, que apresenta uma intensidade muito baixa do campo geomagnético, em torno de 23,000 nT. Essa região foi chamada historicamente de Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), devido a sua localização quando descoberta (meados de 1950). Porém, como a AMAS não é estática, pois seu centro adentrou no território brasileiro via oceano Atlântico em 1945 e atualmente encontra-se no Paraguai, é mais coerente chamá-la de Anomalia Magnética da América do Sul (Moro et al., 2012, 2021).

O campo geomagnético pode variar em períodos muitos grandes, e essa variação é chamada de variação secular. A Figura 2.12(a) mostra a variação da declinação magnética observada por Gellinbrand, em Londres.

Figura 2.12 – (a) Variação da declinação magnética observada por Gellinbrand, em Londres; (b) Diminuição do momento magnético de dipolo magnético da Terra de 1839 a 1980; (c) Variação secular do polo magnético no hemisfério Norte.



Fonte: Adaptado de Duque (2015).

A variação secular pode ser dividida em duas partes, sendo elas a diminuição do momento magnético de dipolo (Figura 2.12(b)) e a alteração da orientação do eixo do dipolo (Figura 2.12(c)).

No século XX foram encontradas algumas rochas vulcânicas magnetizadas em uma direção oposta a direção esperada. Estimaram então que poderia ter havido ao longo dos anos uma reversão do campo geomagnético, porém, nesta época o campo magnético terrestre não era muito estudado e não se dominavam os mecanismos de sua geração. Ao longo dos anos, com a pesquisa sendo disseminada, obteve-se a confirmação de que realmente, o campo geomagnético inverteu sua orientação, não só uma vez, mas sim dezenas e milhares de vezes ao longo de sua formação, sendo a última inversão a cerca de 780 mil anos. A causa dessa reversão ainda é alvo de discussões no meio científico, mas acredita-se que essa inversão está ligada aos eventos internos.

2.6 Tempestades Geomagnéticas

Devido as CME's, que ocorrem nas regiões ativas do Sol, o vento solar apresenta perturbações, como aumento da sua velocidade e densidade, pressão, temperatura, etc. Quando então o vento solar chega ao planeta Terra, tem-se respostas desta interação com o campo geomagnético.

As tempestades são descritas por meio das variações no fluxo do campo magnético terrestre. A sua maior característica é um decréscimo na componente horizontal do campo geomagnético, podendo durar algumas horas ou mesmo dias. Para que se possa medir as mudanças na componente do campo, utiliza-se os denominados índices geomagnéticos.

2.6.1 Índices Geomagnéticos

Os índices geomagnéticos nos fornecem medidas quantitativas dos níveis de atividades da magnetosfera terrestre, como por exemplo, sua intensidade e duração.

Os índices mais utilizados são: o Dst (do inglês, *Disturbance Storm Time*) que nos fornece a medida da intensidade da corrente anelar; o índice Kp (do inglês, *Planetary Kennziffer*) relativo à atividade magnética global; o AE (do inglês, *Auroral Electroject*) relacionado à atividade do Eletrojato Auroral; os índices relativos às correntes do

Eletrojato Auroral com sentido oeste e leste, AU (do inglês, *Auroral Upper*) e AL (do inglês, *Auroral Lower*), respectivamente; e os índices simétrico e assimétrico da componente H da corrente de anel, SYM/H (do inglês, *Symmetric Index*) e ASY/H (do inglês, *Asymmetric Index*). Estes índices são apresentados a seguir, sendo a Seção 2.6.1.1 dedicada ao índice Dst, a Seção 2.6.1.2 ao índice Kp, a Seção 2.6.1.3 ao índice AE, AO, AU e AL, e a Seção 2.6.1.4 ao SYM/H e ao ASY/H.

Para elaboração destes índices são usados diferentes observatórios localizados em diversos países, as tabelas com a localização dos observatórios podem ser vistas no Apêndice A.

2.6.1.1 Índice Dst

O índice Dst monitora a variação da corrente de anel na magnetosfera terrestre, atualmente sendo o mais preciso meio de medição destas perturbações da componente horizontal do campo geomagnético. As tempestades geomagnéticas, citadas anteriormente, podem ser classificadas de acordo com sua intensidade, e o índice mais utilizado para fazer essa classificação é o índice Dst.

A classificação de uma tempestade geomagnética está representada na Tabela 2.3, abaixo.

Tabela 2.3 – Classificação das tempestades magnéticas segundo o índice Dst.

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

Fonte: Gonzalez et al (1994).

De acordo com o índice Dst também é possível identificar, na maioria das tempestades geomagnéticas, três fases principais, ilustradas na Figura 2.13(a), e descritas a seguir.

As principais fases de uma tempestade geomagnética são denominadas de fase inicial, fase principal e a fase de recuperação. A fase inicial é marcada por um aumento súbito da pressão do vento solar, causando um aumento no índice Dst; na fase principal ocorre uma diminuição bastante significativa nos valores de Dst, justificada pelo aumento de

partículas ionizadas presas nas linhas de campo geomagnético, fazendo aumentar a corrente de anel; e a fase de recuperação, onde o índice, aos poucos, volta aos seus valores normais - esta fase pode levar vários dias, dependendo da intensidade da tempestade.

2.6.1.2 Índice Kp

O índice Kp representa a intensidade do fluxo solar, fornecendo as perturbações causadas principalmente na ionosfera. Este índice é obtido a partir de treze observatórios, localizados em todo planeta, fornecendo um dado a cada três horas.

O índice Kp varia de 0 a 9 e quanto mais alto está o índice, mais intensos estão os eventos solares, e mais radiação ionizante atinge a Terra. Um exemplo pode ser visto na Figura 2.13(b).

2.6.1.3 Índice AE

O índice do eletrojato auroral (AE), tem a finalidade de medir uma corrente que flui na zona auroral, a aproximadamente 100 km de altitude da superfície da Terra. O índice AE é obtido a partir de dados da componente horizontal do campo magnético terrestre, de forma similar ao índice Dst. Este índice deriva da diferença dos índices AU e AL, subtraindo a média para os cinco dias mais calmos, ou seja

$$AE = AU - AL \quad (2.1)$$

A média entre AU e AL define outro índice, o índice AO, que nos fornece a média da corrente zonal equivalente. Os índices AU, AL, AE e AO. Na Figura 2.13(c) é mostrada a variação destes parâmetros em uma tempestade geomagnética.

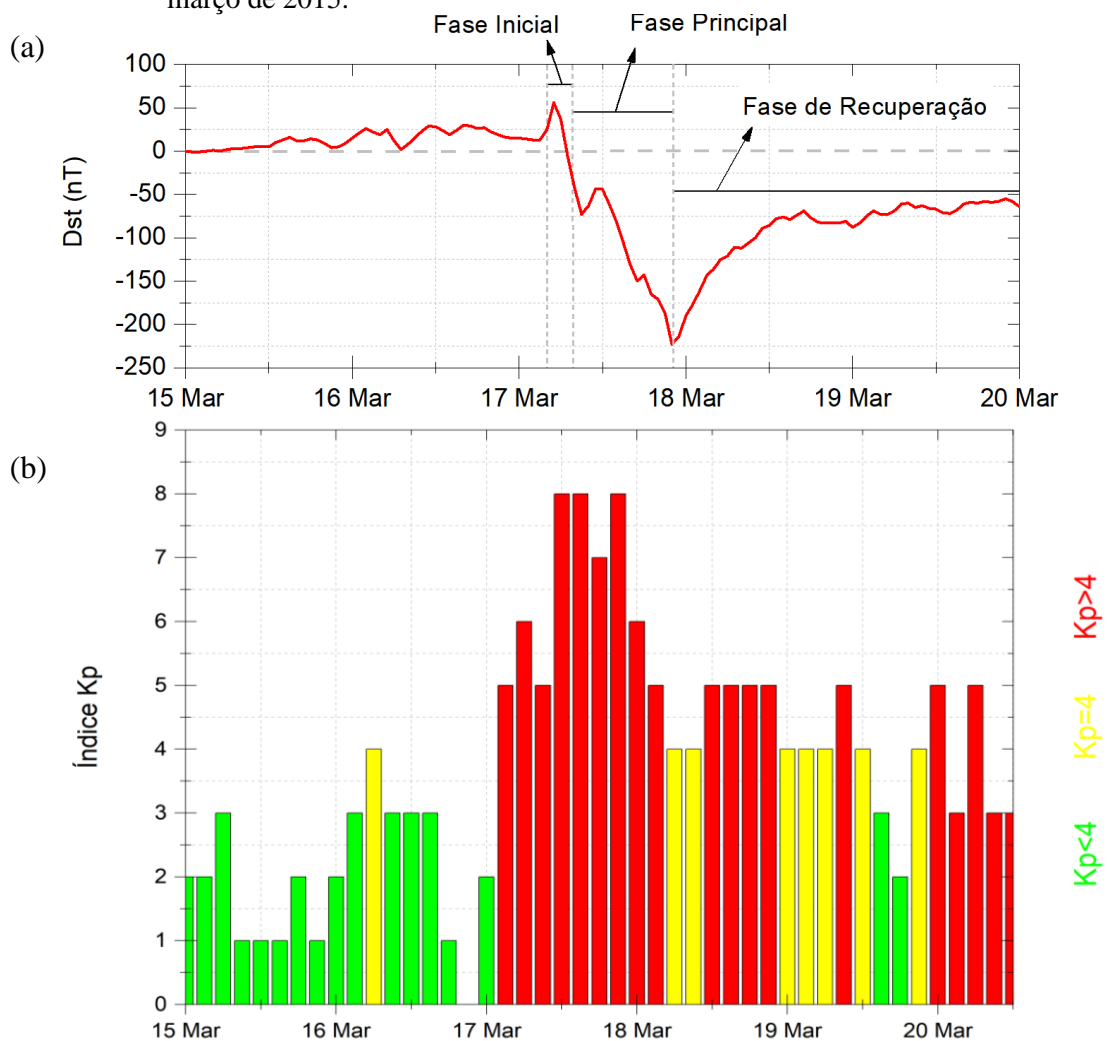
2.6.1.4 Índices ASY/SYM

Os índices ASY/H e SYM/H são utilizados para descrever perturbações magnéticas que ocorrem em latitudes médias usando as perturbações longitudinais assimétricas e simétricas, respectivamente. Esses índices mostram a variação da componente H (horizontal) ou D (leste-oeste) em nT, como pode ser visto na Figura 2.13(d).

2.6.2 Classificação das Tempestades Geomagnéticas

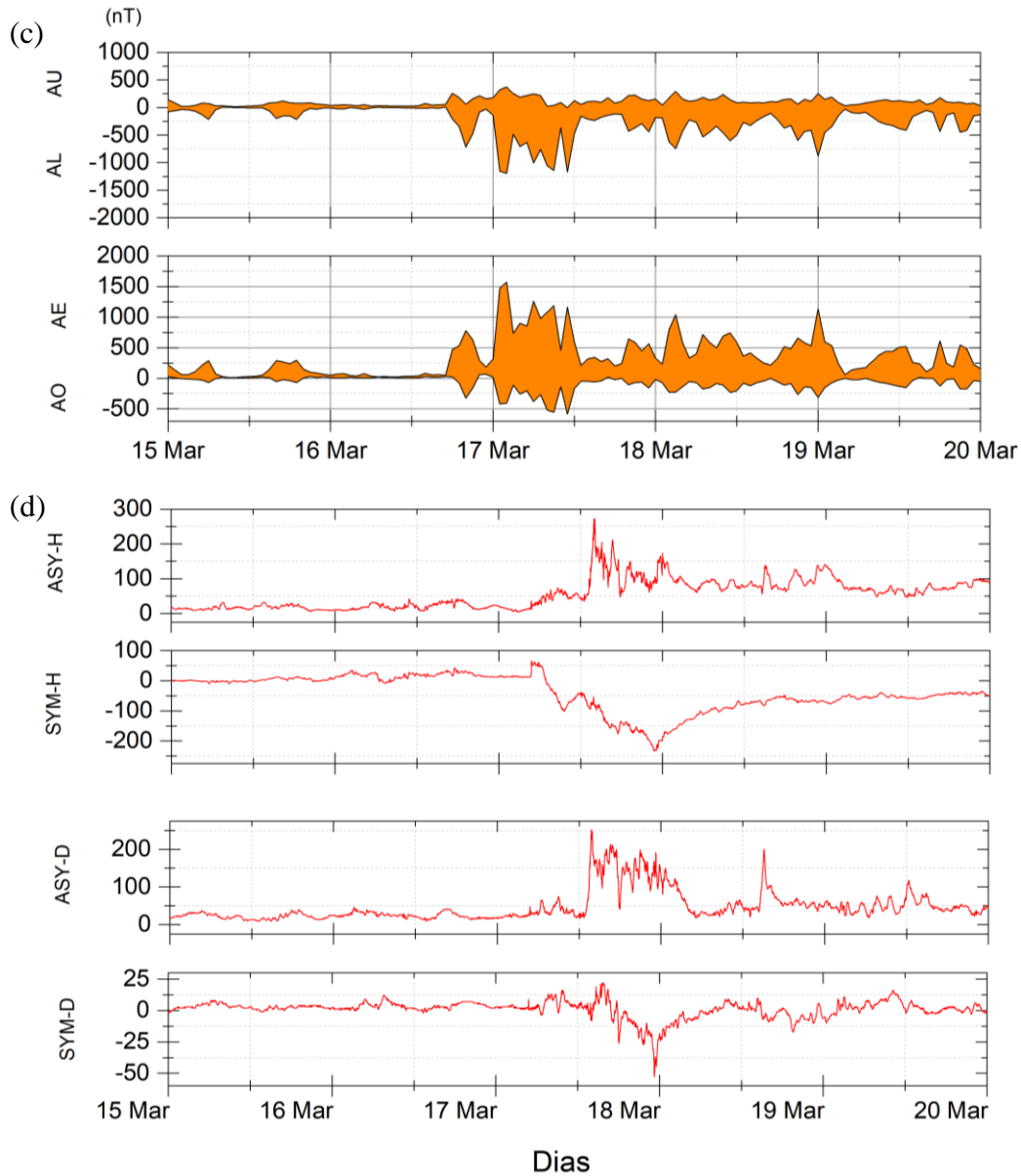
Na Figura 2.4 foram apresentados os parâmetros do campo magnético interplanetário e do vento solar para a tempestade geomagnética de março de 2015. Apresenta-se na Figura 2.13 mais informações sobre o período geomagneticamente perturbado, que são as variações dos índices geomagnéticos Dst, Kp, AE, AU, AL, SYM/H e ASY/H. Pode-se notar que a tempestade de março de 2015 é classificada como intensa pois o índice Dst atingiu -223 nT (veja também a Tabela 2.3).

Figura 2.13 – Intensidade de diferentes índices para a tempestade geomagnética do dia 17 de março de 2015.



(Continua)

Figura 2.13 – Conclusão. Intensidade de diferentes índices para a tempestade geomagnética do dia 17 de março de 2015.



Fonte: Produção da autora (2020).

2.7 Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é uma camada de gases que envolve o planeta Terra (Bresseur e Soloman, 2005). O conjunto desses gases – em sua maioria o nitrogênio molecular (78%), oxigênio molecular (21%), e argônio (1%) – é denominado de ar. Esta camada é estruturada em subcamadas, que podem ser analisadas através de diferentes propriedades,

como composição química, pressão, densidade eletrônica e temperatura (Brasseur e Soloman, 2005).

2.7.1 Estrutura da atmosfera terrestre

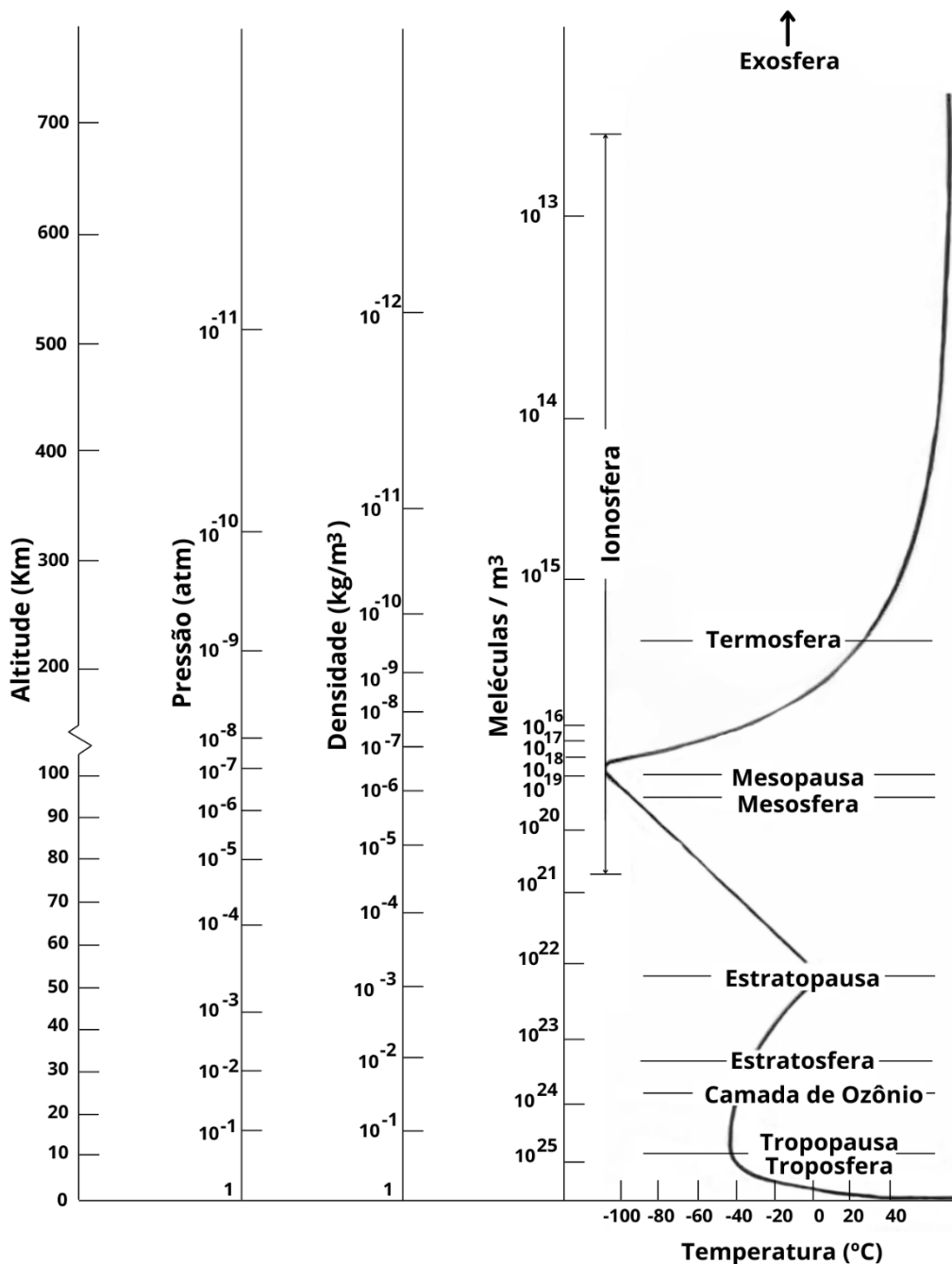
A estrutura das regiões atmosféricas varia de acordo com a altura e, apesar de não apresentar delimitações explícitas, possuem características distintas. Partindo da superfície da Terra, as regiões podem ser classificadas, em relação à temperatura, como:

- Troposfera – região que está intrinsicamente ligada aos fenômenos meteorológicos, se estende por cerca de 11 km a partir da superfície e apresenta variação de temperaturas de, aproximadamente, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a cada quilômetro de altura;
- Estratosfera – região com ventos que atingem velocidades maiores do que 100 km/h, localizada entre 15 km e 50 km acima da superfície terrestre, concentrando a maior parte da camada de ozônio (O_3);
- Mesosfera – região com temperaturas baixíssimas, com valores aproximados de $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$, localizada entre 50 km e 80 km de altura, possui gases rarefeitos, porém ainda consistentes a ponto de deter muitos dos meteoros que atingem nosso planeta;
- Termosfera – região de extrema extensão localizada a partir de 85 km, podendo se estender a mais de 640 km de altitude. As temperaturas nessa região variam de acordo com a atividade solar.
- Exosfera – região da atmosfera mais distante da superfície da Terra, se estendendo desde 500 e 1,000 km de altura, é a camada que nos separa do espaço interplanetário.

Existem também regiões intermediárias, denominadas de tropopausa, estratopausa e mesopausa, como mostra a Figura 2.14.

Além das características citadas acima, ao analisar o estado de ionização da atmosfera, pode-se também, classificá-la como Atmosfera Neutra e Atmosfera Ionizada (Ionosfera) que será vista com mais detalhes na Seção 2.8.

Figura 2.14 – Classificação da atmosfera.



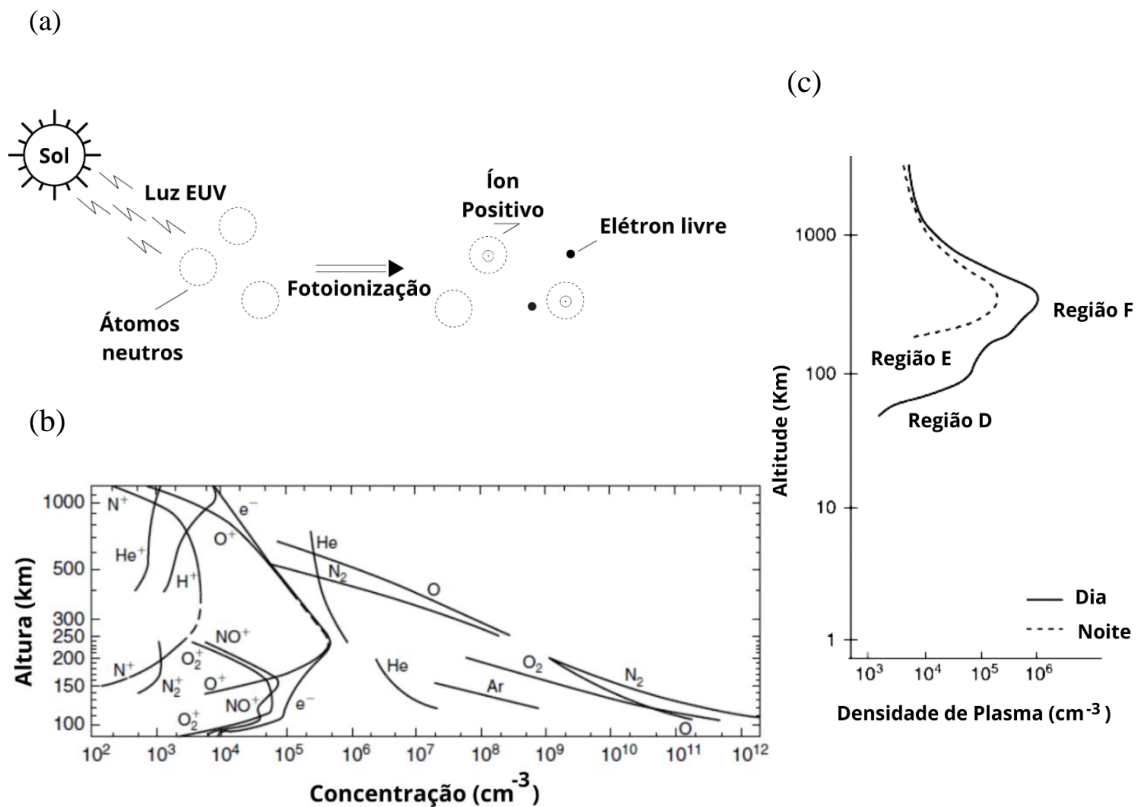
Fonte: Adaptado de Observatório Nacional, Atmosfera (2011).

2.8 Ionosfera

A atmosfera ionizada, ou ionosfera, começa a ser percebida a uma altura de cerca de 60 km e pode se estender até 2000 km da superfície da Terra, tendo uma maior densidade de elétrons por volta dos 350 km de altura. Devido à sua composição, a ionosfera acaba afetando a propagação das ondas de rádio.

A ionosfera é formada pela interação entre raios X, Lyman- α , Lyman- β , e raios cósmicos, bem como partículas energéticas provenientes dos cinturões de radiação de Van Allen, com os gases neutros presentes na atmosfera. O principal processo de ionização é a fotoionização, seguida da ionização por impacto que acaba removendo elétrons de suas moléculas, fazendo com que haja grandes quantidades de elétrons livres e íons. O processo de fotoionização está ilustrado na Figura 2.15 (a).

Figura 2.15 – (a) Processo de formação da ionosfera por meio da fotoionização; (b) Composição Ionosférica; (c) Densidades típicas da ionosfera em períodos de baixa atividade solar.



Fonte: (a) Adaptado de McNamara (1991); (b) e (c) Adaptado de Kelley (2009).

Os processos de ionização formam concentrações diferentes de íons e elétrons livres que apresentam variações de acordo com a incidência solar (portanto varia no decorrer do dia e também de acordo com as estações do ano), variações do ciclo solar e explosões solares. A Figura 2.15(b), apresenta uma representação dos componentes presentes típicos de um período de mínimo solar, como é caso atual. Esses íons se distribuem de tal forma que,

acima de aproximadamente 300 km encontra-se uma maior densidade de íons O^+ e H^+ , enquanto em aproximadamente 100 km de altura os íons de NO^+ e O_2^+ predominam.

Para melhor estudar a ionosfera, esta, normalmente, é dividida em regiões (D, E e F), de acordo com seus componentes químicos e densidade eletrônica. Essas regiões da ionosfera são descritas na sequência. As principais estruturas verticais da ionosfera são mostradas na Figura 2.15(c) e descritas na sequência.

Região D

É a região mais baixa da ionosfera, presente de 50 km a 90 km de altura e ocorre durante o dia, apenas. A presença de íons e elétrons nessa região distribuem-se de maneira quase idêntica, formando basicamente uma camada neutra, possuindo uma ionização muito fraca. Por esse motivo, utilizando a Digissonda – equipamento usado neste trabalho, não é possível identificar essa região pois a mínima frequência emitida pela Digissonda já corresponde a frequência de plasma da região E. A principal de fonte da ionização nesta região é o processo de fotoionização do óxido nítrico (NO) pela radiação Lyman- α (Banks e Kockarts, 1973).

Região E

A região E se estende a partir dos 90 km até cerca de 150 km de altitude. É a região mais condutiva da ionosfera, apresentando uma forte corrente elétrica na região equatorial, denominado Eletrojato Equatorial (do inglês, *Equatorial Electrojet* - EEJ) (Denardini, 2003; Moro 2015). O processo de ionização na região E é dado principalmente pela fotoionização e devido ao processo de ablação de meteoros, que produzem as camadas esporádicas Es. Elas foram notadas pela primeira vez por volta de 1940, e serão mais bem discutidas no subcapítulo a seguir.

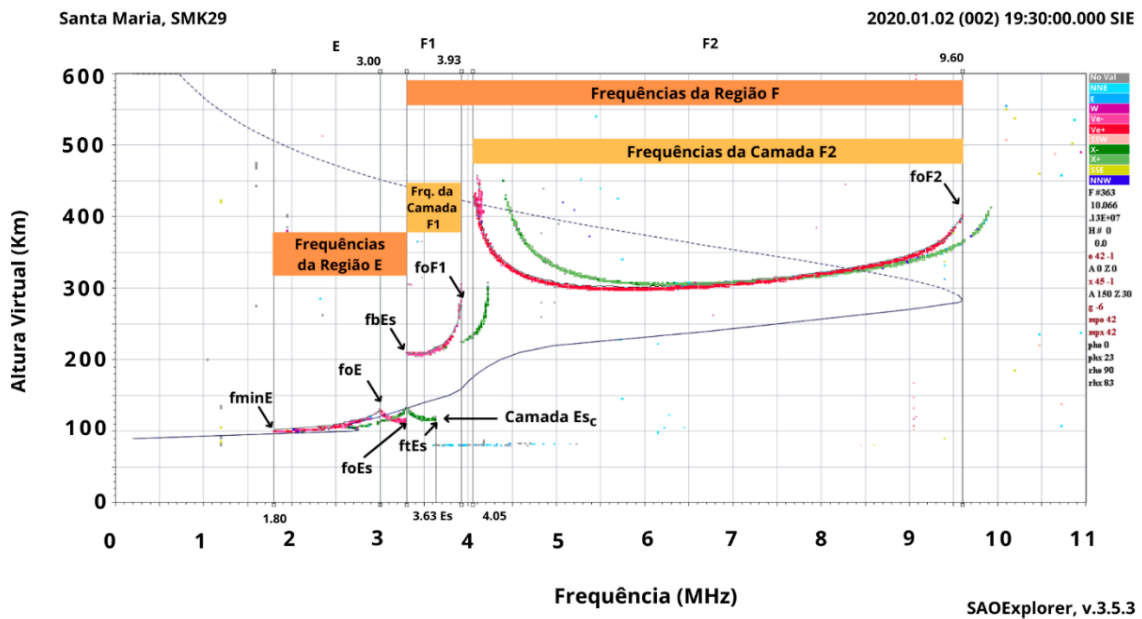
Região F

Essa é a região mais extensa da ionosfera, se estendendo desde os 150 km até mais de 2,000 km da superfície do planeta. Nesta região, a fonte de ionização está mais vinculada a interação da radiação EUV com nitrogênio molecular (N_2) e o oxigênio atômico (O) (Rishbeth e Garriott, 1969). Ela é comumente subdividida em camadas chamadas de F1 (150 km a 200 km), F2 (200 km a 900 km) e uma camada adicional conhecida como F3,

localizada acima do pico da camada F2. A região F é caracterizada por não desaparecer completamente após o pôr do Sol devido aos processos de transporte.

Na Figura 2.16 é possível ver, através de um ionograma - um gráfico dos ecos das frequências emitidas pela Digissonda localizada em Santa Maria, a aparição das camadas E, F1, F2 e Camada Esporádica (Es) do tipo “c” (*cusp*), bem como as frequências de topo e bloqueio das camadas de interesse.

Figura 2.16 – Ionograma ilustrando as regiões da ionosfera terrestre.



As indicações na Figura 2.16 mostram as frequências: f_{minE} (frequência mínima da camada E), f_{oE} (frequência crítica da onda ordinária da camada E), f_{bEs} (frequência de bloqueio da camada Es), f_{oF1} (frequência crítica da onda ordinária da camada F1), f_{oF2} (frequência crítica da onda ordinária da camada F2), e f_{tEs} (máxima frequência de observação da camada Es). Os traços em vermelho representam o traço ordinário da camada Es e o traço em verde representa o traço extraordinário. A camada esporádica presente é do tipo “c”.

Fonte: Produção da autora (2020).

2.9 Camadas E-Esporádicas (Es)

Como citado anteriormente, esta camada possui uma maior densidade e concentração de elétrons, tendo uma espessura menor do que 10 km. As camadas E-Esporádicas (Es) localizam-se entre 90 e 150 km de altura, e também são caracterizadas por sua intensa variação.

A formação das camadas Es estão vinculadas primordialmente a latitude onde ela está sendo vista. Dependendo da sua localização a camada pode apresentar diferentes tipos de

mecanismos de formação. Em regiões equatoriais, sua formação se deve principalmente aos campos elétricos situados no equador magnético e também ao mecanismo de cisalhamento de ventos. Já em regiões de altas latitudes, as camadas Es estão mais relacionadas ao campo elétrico e à precipitação de partículas. Em médias latitudes o principal mecanismo de formação são os ventos de marés.

A partir destes distintos tipos de formação e apresentação nos ionogramas atribui-se diferentes classificações a estas camadas, sendo, as observadas sobre Santa Maria, Es_a (*auroral*), Es_c (*cusp*), Es_f (*flat*), Es_h (*high*), Es_l (*low*) e Es_s (*slant*) apresentadas a seguir.

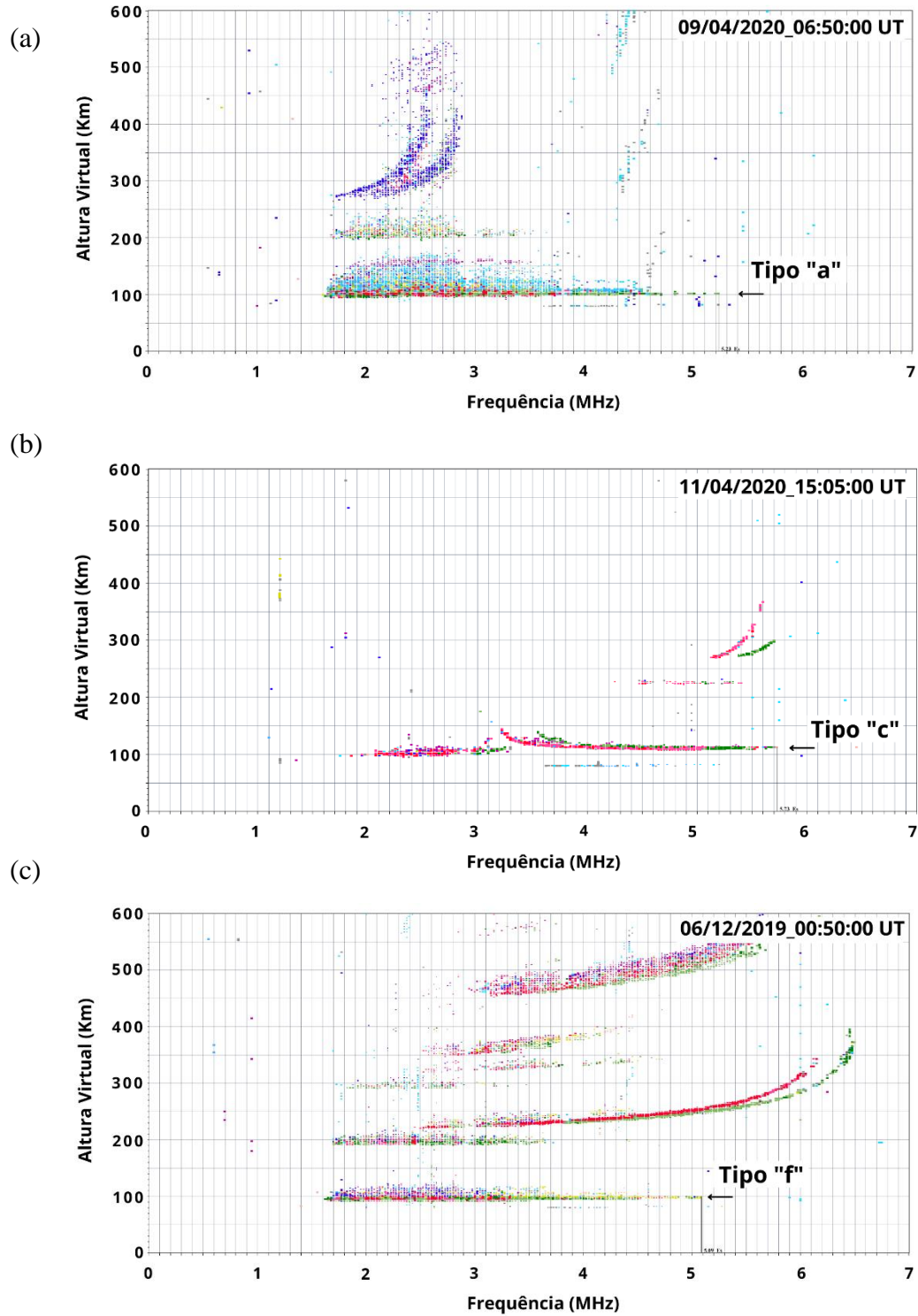
Tabela 2.4 – Características dos tipos de Camadas Esporádicas.

Tipo	Nome	Características do Traço	Local e Período de Ocorrência	Mecanismo de Formação
a	Auroral (<i>auroral</i>)	Espeço e estratificado ao longo da altura virtual.	Altas e médias latitudes. Comumente noturno.	Precipitação de partículas
c	Cúspide (<i>cusp</i>)	Simétrico em relação a frequência crítica da camada E, formando uma cúspide contínuo.	Latitudes temperadas. Apenas diurno.	Ação dos ventos de maré
f	Plana (<i>flat</i>)	Altura invariante ao longo da frequência observada.	Latitudes temperadas. Visível apenas em períodos noturnos.	Ação dos ventos
h	Alta (<i>high</i>)	Similar ao traço da camada “c”, porém apresenta uma descontinuidade em seu pico e um traço de altura superior.	Latitudes temperadas. Período diurno.	Ação dos ventos
l	Baixa (<i>low</i>)	Análogas ao do tipo “f”.	Latitudes temperadas. Período diurno.	Ação dos ventos
s	Inclinada (<i>slant</i>)	Inclinado que aumenta sua altura proporcionalmente com a frequência.	Baixas e altas latitudes. Vista junto com outras camadas.	Ação dos ventos de maré

Fonte: Produção da autora (2021).

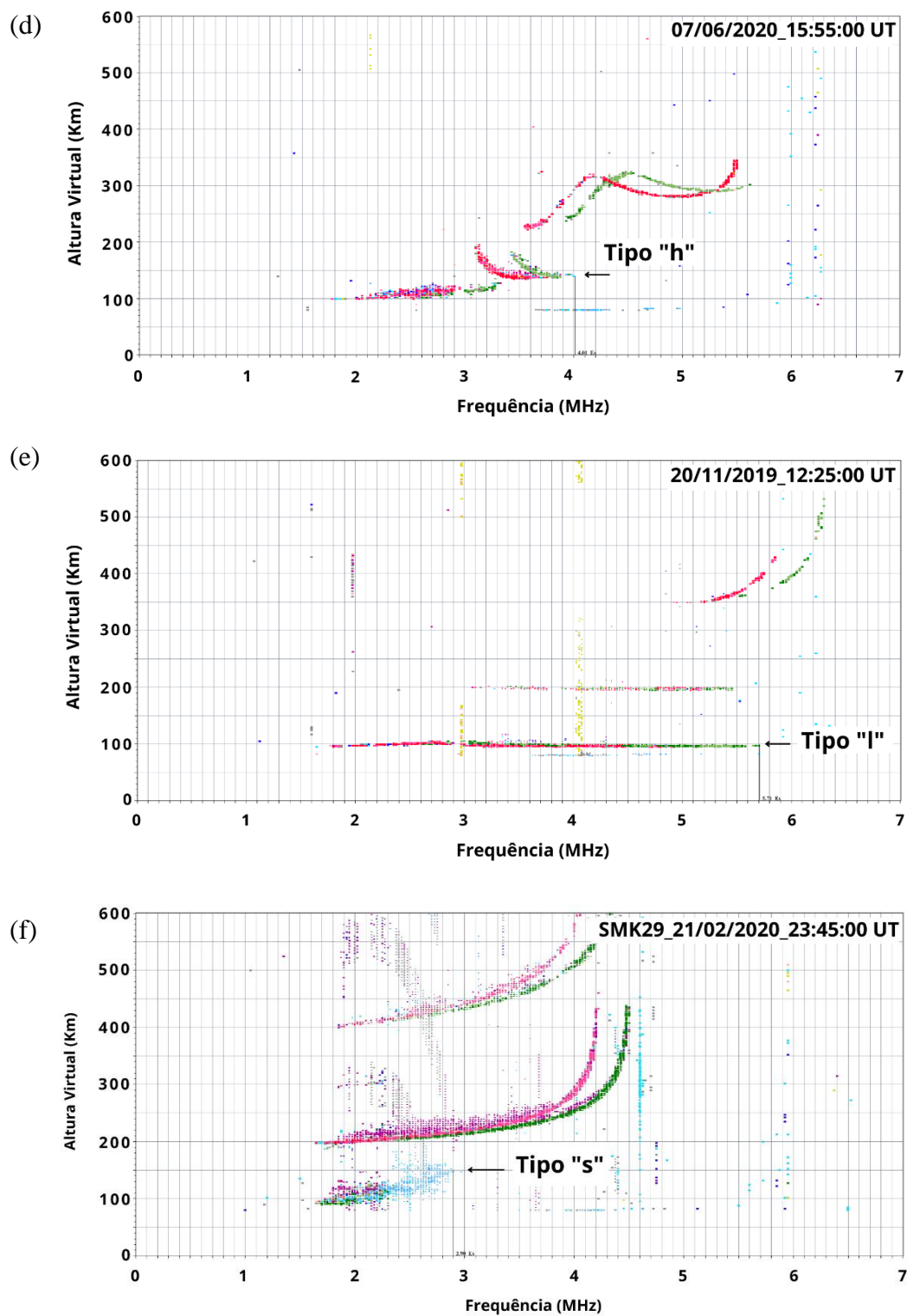
Para melhor ilustrar os diferentes tipos de camadas ionosféricas citadas anteriormente, na Figura 2.17 são apresentados um ionograma para cada um destes tipos de camadas Es.

Figura 2.17 – Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es) sobre Santa Maria, (a) Camada Es_a; (b) Camada Es_c; (c) Camada Es_f.



(Continua)

Figura 2.17 – Conclusão. Ionogramas ilustrando os diferentes tipos de camadas esporádicas (Es) sobre Santa Maria, (d) Camada Es_h; (e) Camada Es_i; (f) Camada Es_s.



Fonte: Produção da autora (2021).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Para a elaboração deste relatório foram utilizados dados de diversos satélites como o *Advance Composition Explorer* (ACE), o *Solar Dynamics Observatory* (SDO), o *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) e o *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO). Porém, o equipamento principal para a elaboração deste trabalho foi a ionossonda digital, do tipo Digissonda, modelo DPS-4D. Esse equipamento é descrito em maiores detalhes na Seção 3.1. A Seção 3.2 apresenta o funcionamento do *Standard Archiving Output* (SAO) – *Explorer*, o *software* utilizado para a análise dos ionogramas obtidos através da Digissonda. Com relação à metodologia, esta será detalhada na Seção 3.3.

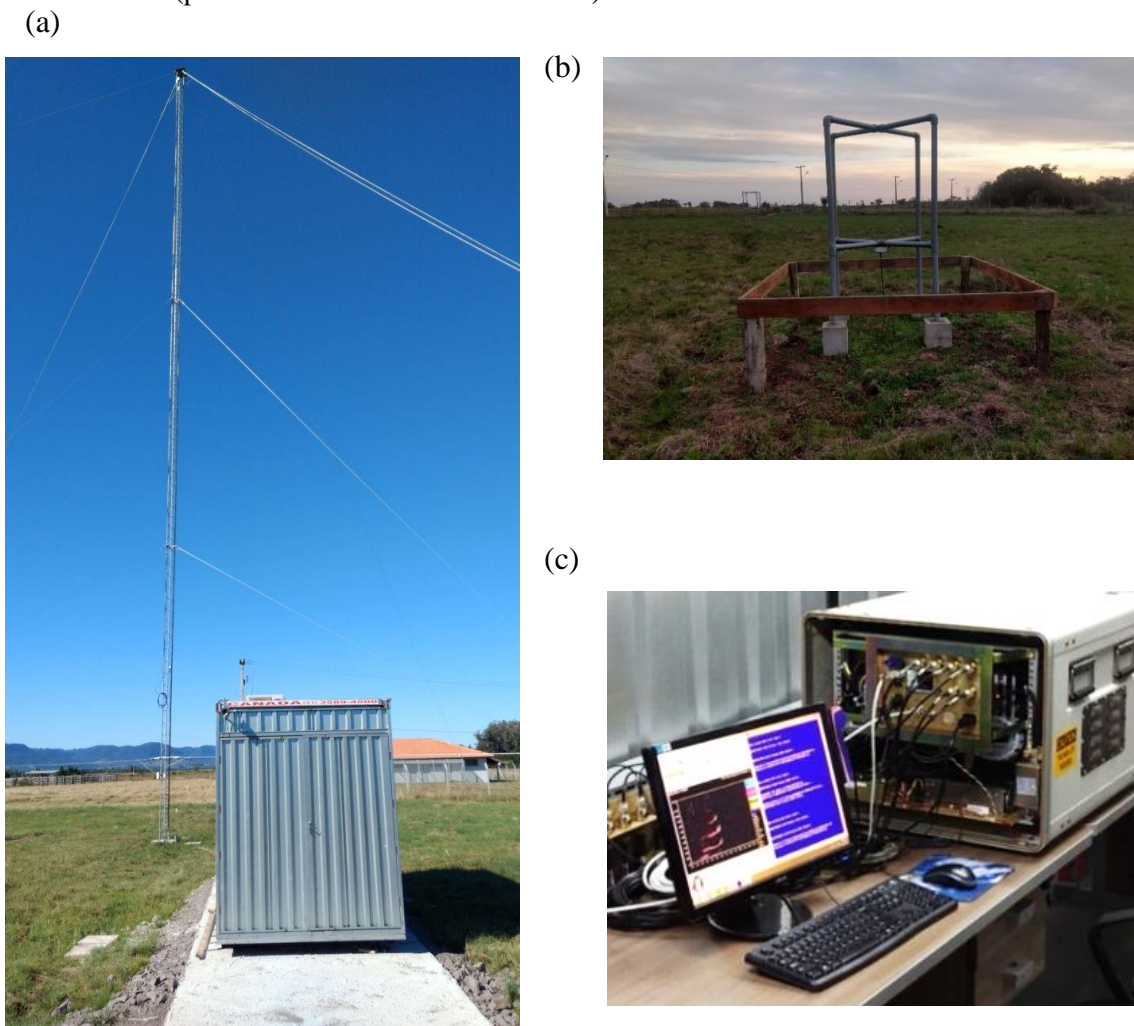
3.1 Digissonda

Inicialmente conhecida como ionossonda, idealizada pelo físico inglês Edward Appleton (1892 – 1965), seu principal objetivo era medir distâncias de objetos refletivos através de sinais de rádio, neste caso, os constituintes das camadas atmosféricas. Com o avanço tecnológico, todo o mapeamento ionosférico passou a ser digital e desde 1969 as Digissondas em operação são fabricadas e comercializadas pela *Lowell Digisonde International* (LDI), Massachusetts, EUA.

A Digissonda consiste em um sistema formado por uma antena transmissora (Figura 3.1 (a)) e por quatro antenas receptoras (Figura 3.1 (b)). A instalação destas antenas segue um padrão triangular de maneira a reduzir a interferência, melhorar o sinal recebido e deduzir o ângulo de chegada dos sinais.

Seu funcionamento consiste basicamente na emissão de ondas eletromagnéticas na faixa de rádio, através da antena transmissora, com frequências que variam de 0,5 a 30 MHz. Estes sinais são refletidos pelas camadas ionosféricas e recebidos pelas quatro antenas receptoras. Utilizando o esquema explicado anteriormente, os pulsos recebidos são requisitados e processados por computadores embarcados (plataformas de controle e de dados) (Figura 3.1(c)). Os gráficos gerados pela Digissonda são os ionogramas, já apresentados anteriormente, e nos permitem verificar a densidade eletrônica do plasma na ionosfera em tempo real, bem como traçar os perfis verticais da mesma.

Figura 3.1 – Apresentação do sistema da Digissonda localizada em Santa Maria. (a) Antena transmissora; (b) Uma das quatro antenas receptoras; (c) Parte eletrônica (plataformas de controle e de dados).



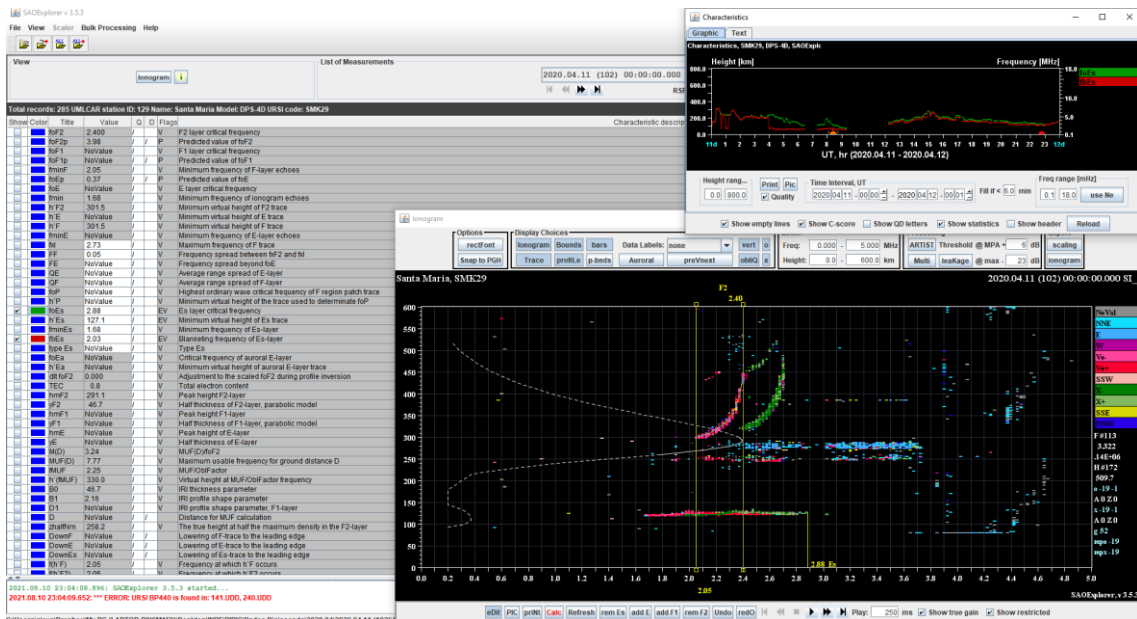
Fonte: Produção da autora (2021).

Para a realização deste trabalho foi utilizada a Digissonda localizada em Santa Maria – Rio Grande do Sul e é um dos 45 sondadores ativos atualmente (agosto 2021) no planeta. O código na *International Union of Radio Science* (URSI) da Digissonda de Santa Maria é SMK29. Maiores detalhes sobre o funcionamento deste equipamento podem ser consultadas em Moro et al. (2019) e Reinisch e Galkin (2011).

3.2 Standard Archiving Output (SAO) - Explorer

Para realizar a análise dos ionogramas, obtidos a partir da Digissonda, é necessário o uso do software *SAO-Explorer*. Este nos permite editar e manusear os dados de uma maneira intuitiva e ágil. Na Figura 3.2 se vê a interface do programa.

Figura 3.2 – Página inicial do *software SAO-Explorer* e algumas abas de operação.



Em primeiro plano, um ionograma sendo editado. No canto superior direito, um gráfico dos parâmetros fEs (linha verde) e $fbEs$ (linha vermelha) para o dia 11 de abril de 2020. Finalmente, no último plano da figura encontra-se a página inicial do programa com a seleção dos parâmetros.

Fonte: Produção da autora (2021).

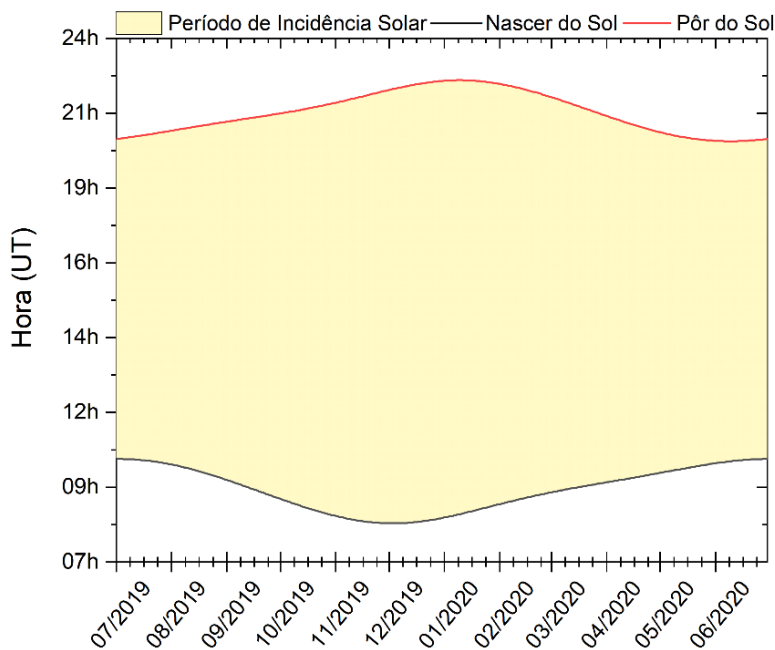
No programa principal é possível escolher entre 49 parâmetros para serem analisados. Entre esses, nesse trabalho foram utilizados a frequência máxima da camada Es (fEs), a frequência de bloqueio ($fbEs$), e a altura virtual da camada Es (hEs). Os parâmetros de frequência já foram apresentados no ionograma da Figura 2.16. O parâmetro referente à altura, hEs , refere-se simplesmente a altura na camada Es, que no caso da Figura 2.16 é 116 km. Porém, neste trabalho esses parâmetros não são apresentados, estes serão utilizados em um estudo futuro.

3.3 Metodologia

O foco principal desse trabalho foi classificar as camadas Es de acordo com o seu tipo específico: Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*), que

apresentam distintos mecanismos de formação e diferentes perfis de ecos quando vistos através dos ionogramas. Para classificar os dias de acordo com o período noturno e diurno, analisou-se o nascer e o pôr do Sol para cada dia entre o mês de julho de 2019 a junho de 2020. Com esta análise, foi construída a Figura 3.3 que nos apresenta a variação dos horários de nascer e pôr do Sol neste período. A tabela com os dados utilizados para a realização desta Figura é apresentada no Apêndice B.

Figura 3.3 – Variação dos horários do nascer e pôr do Sol sobre Santa Maria.



Fonte: Produção da autora (2021).

Para que houvesse representatividade das camadas Es em todas as estações do ano, analisaram-se dados coletados pela Digissonda de Santa Maria de julho de 2019 a junho de 2020, totalizando 315 dias e 81.627 ionogramas. As camadas Es também foram classificadas em relação a hora, duração, estações do ano e atividade magnética (utilizando para isso o índice Kp). Para realizar a análise estatística da ocorrência dos tipos de camadas Es, foi elaborada tabelas e em seguida histogramas, como é descrito para o primeiro caso dos resultados, na Seção 4.1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a apresentação da revisão bibliográfica, instrumentação e metodologia, apresenta-se nessa seção os resultados obtidos e as discussões. A Seção 4.1 apresenta os resultados da variação subsazonal das camadas Es sem considerar os tipos específicos. A Seção 4.2 apresenta as camadas Es (independentemente do tipo) conforme a distribuição ao longo das estações do ano: solstício de dezembro (dezembro, janeiro e fevereiro); equinócio de março (março, abril e maio); solstício de junho (junho, julho e agosto); e equinócio de setembro (setembro, outubro e novembro). A ocorrência sazonal por tipo específico de Es é mostrada na Seção 4.3. A Seção 4.4 contempla a distribuição de cada tipo de Es, a cada hora, nas estações do ano. Nas Seções 4.1 a 4.4 não houve uma classificação conforme a atividade magnética. Tal classificação é apresentada na Seção 4.5 e utilizada para as duas seguintes seções: a Seção 4.6 (4.7) se refere a distribuição de cada tipo de Es, a cada hora, nas estações do ano, considerando os dados medidos nos dias magneticamente calmos (perturbados).

4.1 Variação Subsazonal de Camadas Es

A Tabela 4.1 indica, na primeira coluna, a distribuição subsazonal de julho de 2019 a junho de 2020. A segunda coluna mostra o período de dados coletados pela Digissonda (HH se refere às horas e mm aos minutos). A terceira coluna exibe o período em que houve presença de camadas Es. A partir dessas informações se calculou a porcentagem de ocorrência de Es, quarta coluna, por meio da Equação 4.1:

$$Ocorrência = \frac{\text{Período com Es}}{\text{Período com dados coletados}} \times 100\%. \quad (4.1)$$

Para exemplificar esse cálculo, considera-se o exemplo para julho de 2019. O número de horas (HH) e minutos (mm) de dados coletados, através da sondagem realizada com a Digissonda, foi de 527 horas e 19 minutos. Nesse período foi observado camadas Es em 182 horas e 2 minutos. Conforme a Equação 4.1 a ocorrência de Es para julho de 2019 foi de 34,5%. A mesma análise foi realizada para os meses seguintes e para as demais classificações que serão apresentadas e discutidas nas seções seguintes.

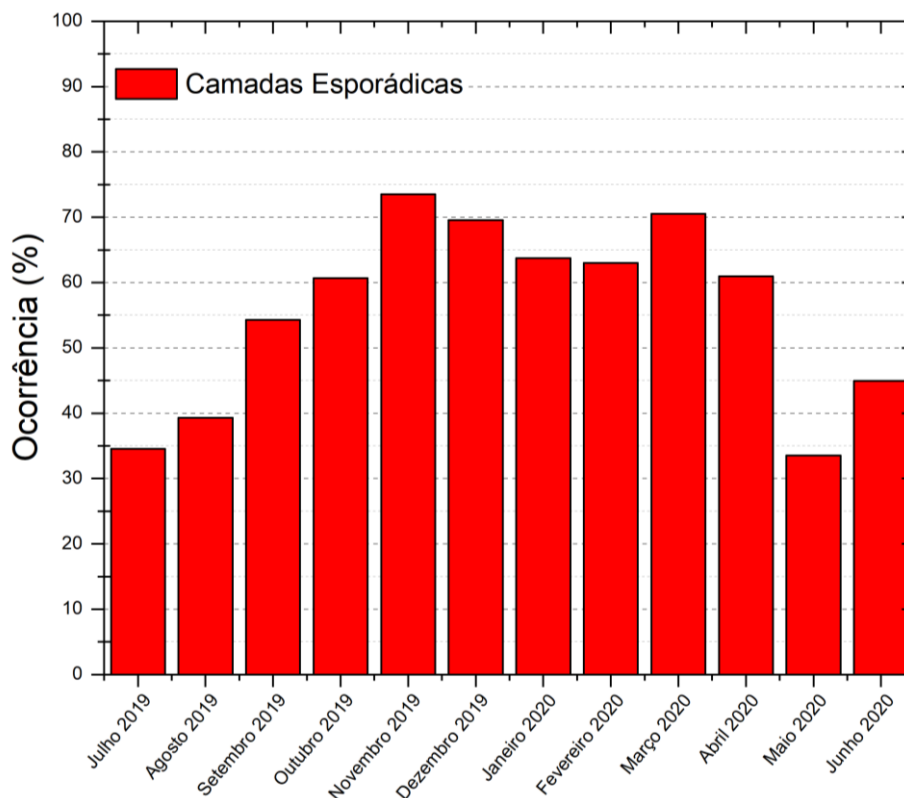
Tabela 4.1 – Variação mensal de camadas esporádicas sobre Santa Maria.

Mês	Período com dados coletados (HH:mm)	Período com Es (HH:mm)	Ocorrência (%)
Julho 2019	527:19	182:02	34,52
Agosto 2019	521:41	205:03	39,31
Setembro 2019	624:30	339:00	54,28
Outubro 2019	579:30	351:45	60,66
Novembro 2019	579:55	426:25	73,53
Dezembro 2019	548:10	381:25	69,58
Janeiro 2020	467:15	297:40	63,71
Fevereiro 2020	294:40	185:40	63,01
Março 2020	744:00	524:31	70,5
Abril 2020	692:55	422:15	60,94
Mai 2020	720:00	241:10	33,5
Junho 2020	610:25	274:24	44,95

Fonte: Produção da autora (2021).

Com base nos resultados das ocorrências de camadas Es apresentados na Tabela 4.1, elaborou-se a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Variação subsazonal das camadas esporádicas sobre Santa Maria para o período julho 2019 – julho 2020.



Fonte: Produção da autora (2021).

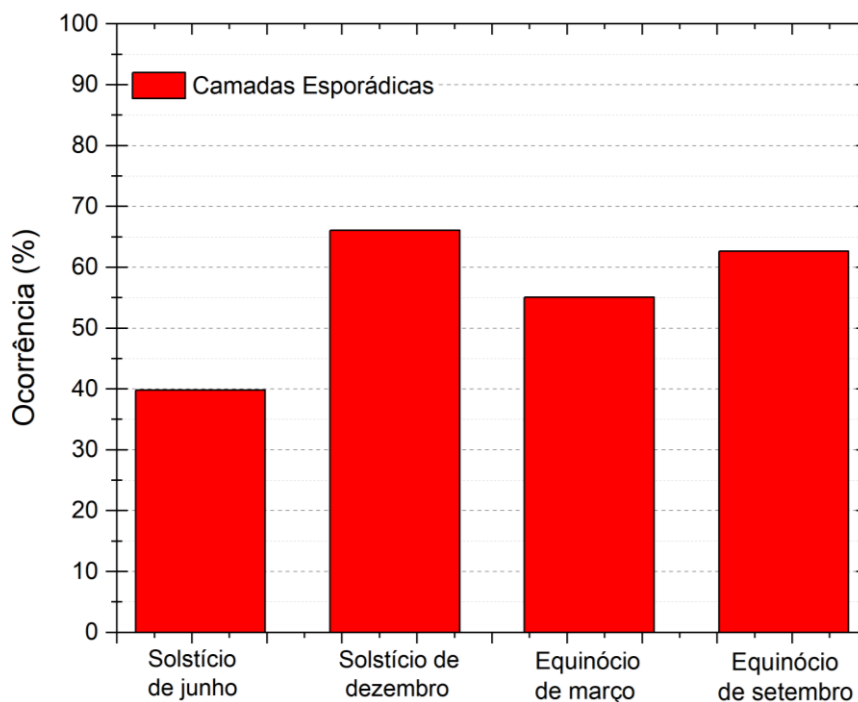
Através desta análise se pode visualizar a ocorrência das camadas esporádicas ao longo do período de observação. Consta-se que o mês em que houve maior ocorrência foi o mês de novembro de 2019, com uma porcentagem de 73,5%. O mês que menos apresentou camada Es foi o mês de maio de 2020, com 33,5% de ocorrência.

Pôde-se perceber que em todos os meses observados houve uma ocorrência maior de 30% de camadas Es, mostrando que essa camada não é eventual e sim uma camada característica da atmosfera terrestre ionizada sobre Santa Maria.

4.2 Ocorrência Sazonal de Camadas Es

Uma vez que já foi analisada a ocorrência subsazonal das camadas Es na Seção 4.1, a presente seção mostra a análise sazonal. Para isso os meses do ano foram agrupados conforme o solstício de dezembro (verão), equinócio de março (outono), solstício de junho (inverno) e equinócio de setembro (primavera). Para esta análise se obteve inicialmente uma tabela similar a Tabela 4.1, porém adequada para a ocorrência sazonal. Esta tabela se encontra no Apêndice C. Os dados obtidos por meio desta análise são apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Ocorrência sazonal das camadas Es.



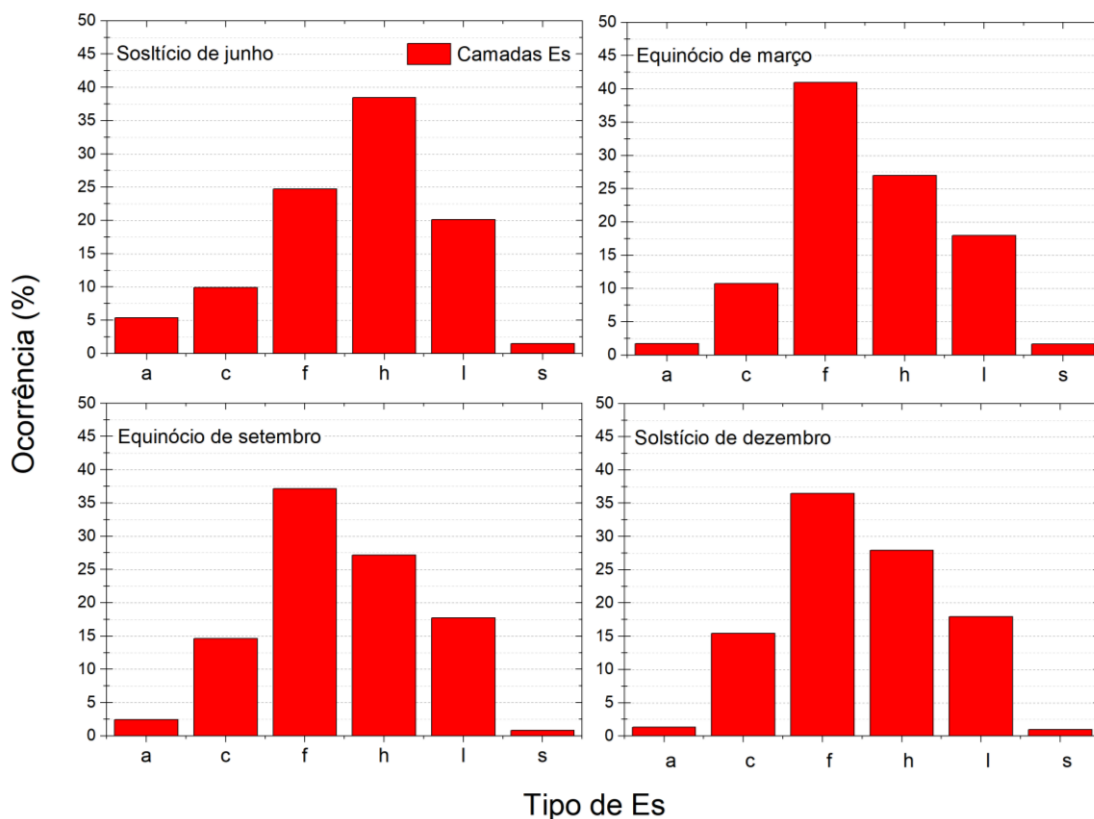
Fonte: Produção da autora (2021).

Através deste resultado se nota que a maior ocorrência de camadas Es ocorreu durante o solstício de dezembro, apresentando 66,1% do total de horas em que a Digissonda operou nos três meses referentes a esta estação. Por outro lado, o menor índice de ocorrência de camadas Es, igual a 39,8%, ocorreu durante o solstício de junho.

4.3 Ocorrência Sazonal por Tipo Específico de Camadas Es

Concluídas as análises anteriores, onde as camadas Es não eram classificadas por tipos específicos, esta Seção traz este critério para cada uma das estações do ano. As camadas Es foram classificadas por tipo conforme seu perfil visto nos ionogramas, sendo estes: Es_f (*flat*), Es_l (*low*), Es_c (*cusp*), Es_h (*high*), Es_s (*slant*), e Es_a (*auroral*), conforme Tabela 2.4. Com esta classificação, foi elaborada uma tabela similar às seções anteriores para cada estação do ano, considerando a duração de cada tipo de camada Es. Para os casos em que havia mais do que um tipo de camada Es simultaneamente, estas foram tratadas individualmente. Essas tabelas são apresentadas no Apêndice D. O resultado desta análise pode ser visto na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Ocorrência sazonal de cada um dos tipos de camadas Es.



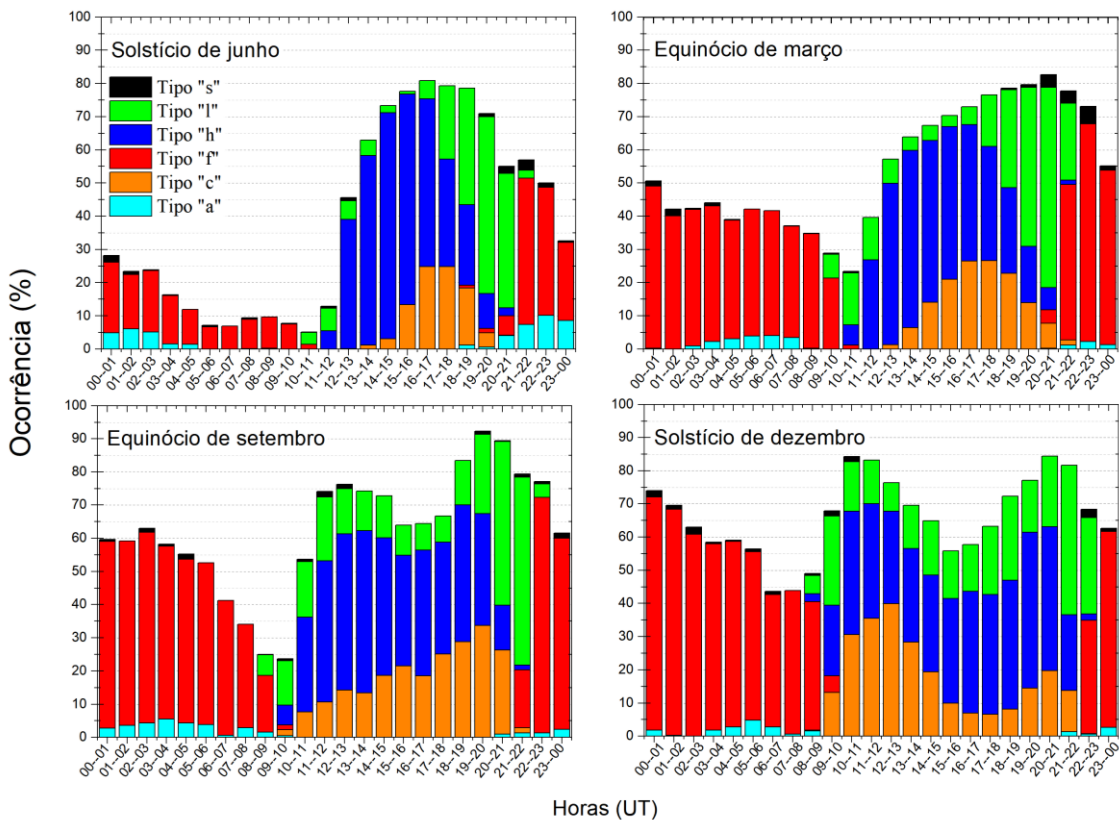
Fonte: Produção da autora (2021).

Por meio deste resultado é visto que, no geral, a camada Es que mais apareceu foi a do tipo “f”. Entre as quatro estações do ano, a Es_f ocorreu em ¾ das estações do ano, com exceção do solstício de junho em que o tipo “h” foi mais predominante. Os tipos “a” e “s” foram os que tiveram uma menor ocorrência, aproximadamente menor que 5%.

4.4 Variação Sazonal por Tipo Específico de Camadas Es em Cada Hora

Para compreender melhor o aparecimento das camadas Es ao longo do ano em função da hora (3600 s), as camadas Es foram analisadas de acordo com a variação sazonal por tipo específico. Inicialmente foram considerados válidos todos os dias com dados registrados, independentemente da classificação magnética. As tabelas elaboradas para esta análise são apresentadas no Apêndice E. O resultado pode ser visto na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Variação sazonal por tipo específico de camadas Es para cada intervalo de hora.



Fonte: Produção da autora (2021).

Em termos gerais, durante o dia houve uma maior ocorrência dos tipos “h” e “l”, enquanto durante os horários noturnos o tipo “f” foi predominante. Os tipos “c” e “h” apareceram

majoritariamente durante o período diurno, enquanto o tipo “s” foi mais visto no período noturno. Pôde-se ver também o aparecimento das camadas do tipo “a” durante o período noturno ao longo de todas as estações do ano.

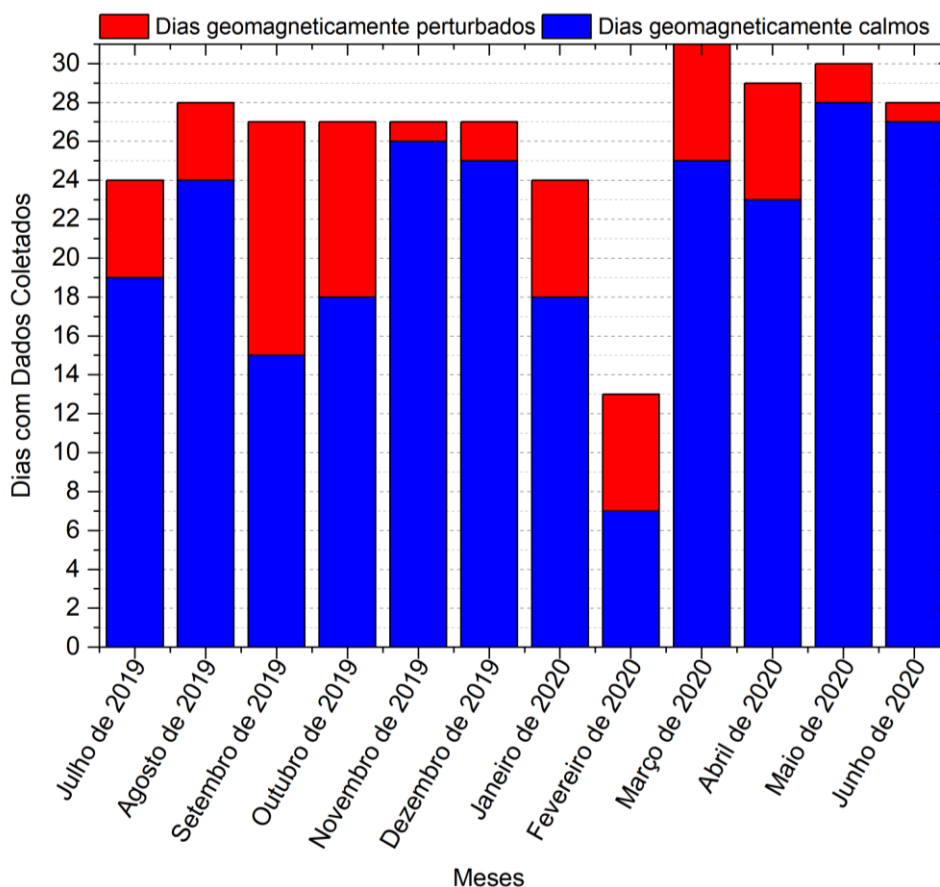
Com relação a comparação do aparecimento de camadas Es entre as estações no ano, a do tipo “l” surge antes durante o equinócio de setembro e solstício de dezembro, entre as 08 UT e 09 UT. Durante o solstício de junho, a camada Es₁ aparece entre 10 UT e 11 UT e no equinócio de março entre as 09 UT e 10 UT. A camada do tipo h comporta-se de forma similar, ou seja, surge nos ionogramas entre as 08 UT e 09 UT no solstício de dezembro e mais tarde durante o solstício de junho. Durante o solstício de dezembro também se observa uma maior taxa de ocorrência de camadas Es. Este resultado está de acordo com aqueles apresentados na Seção 4.1, que mostrou a maior ocorrência de camadas Es em novembro.

4.5 Classificação das Camadas Es de Acordo com a Atividade Geomagnética Calma e Perturbada

Para melhor compreender a variação das camadas Es, os dias em que se teve dados coletados foram classificados de acordo com a atividade geomagnética, em calmos ou perturbados. Através do índice K_p, apresentado na Seção 2.6.1.2, considerou-se geomagneticamente calmo os dias em que o somatório do índice K_p foi ≤ 24 , ou que o índice K_p apresentou valor $< 3^+$; O dia é classificado como geomagneticamente perturbado se o somatório do índice K_p foi > 24 ou que os dados fornecidos a cada três horas do índice K_p fossem $\geq 3^+$. A tabela com os dados para a elaboração desta classificação se encontra no Apêndice F. Esta análise está representada na Figura 4.5.

Por meio da Figura 4.5 se vê que os dias considerados calmos são maioria, somando 255 dias (81%), e os dias geomagneticamente perturbados foram 60 (19%), do total de 315 dias com dados no período analisado. A presença majoritária de dias calmos é condizente visto que estamos em um período de baixa atividade solar.

Figura 4.5 – Relação dos dias calmos e perturbados de acordo com índice Kp.

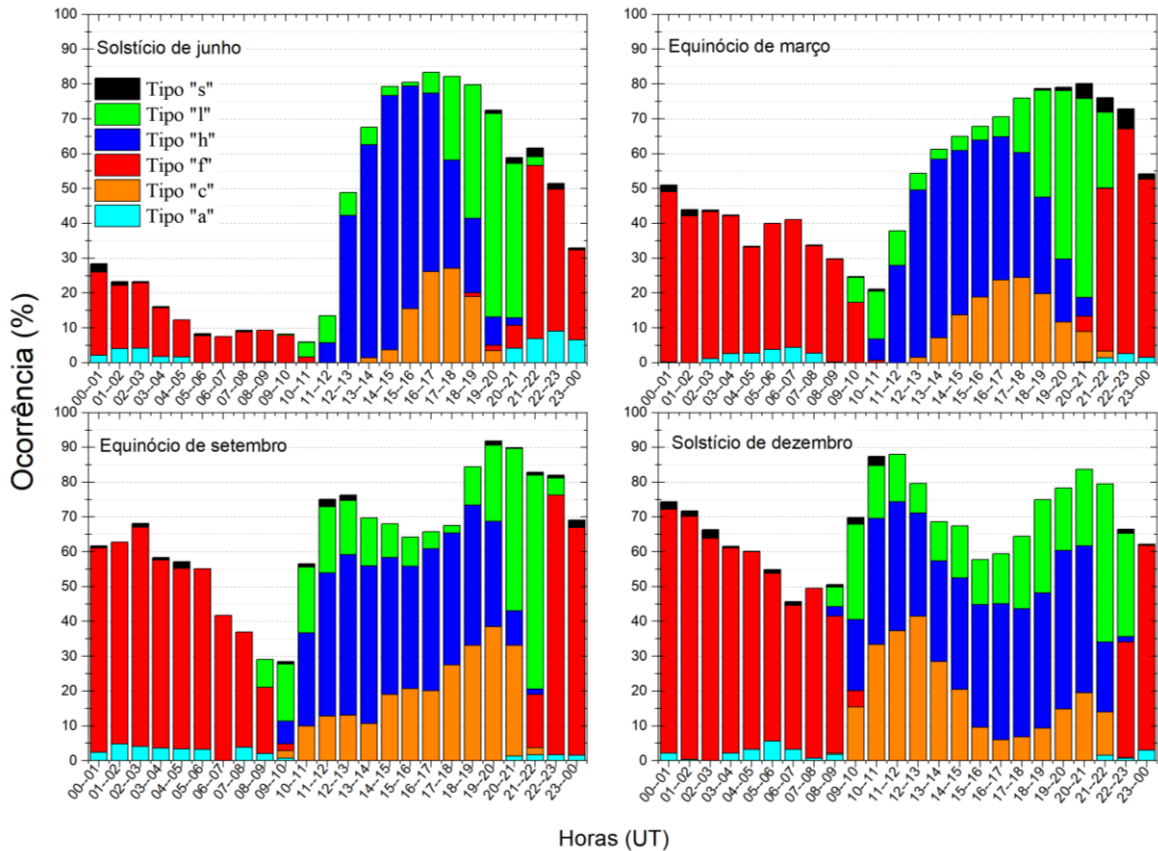


Fonte: Produção da autora (2021).

Uma análise similar à da Seção 4.4 é realizada considerando apenas os dias geomagneticamente calmos, conforme a classificação acima (Figura 4.5). As tabelas com os dados utilizados para a elaboração desta análise são apresentadas no Apêndice G. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.6.

Em termos gerais, observa-se novamente as características vistas na Seção 4.4, visto que os dias calmos são maioria de julho de 2019 a junho de 2020. Então, tem-se uma maior ocorrência dos tipos “h” e “l” no período diurno, enquanto durante os horários noturnos o tipo “f” foi predominante. Os tipos “h” e “c” aparecem principalmente durante o período diurno, enquanto o tipo “s” foi mais visto no período noturno. Observa-se também camadas do tipo “a” durante o período noturno ao longo de todas as estações do ano.

Figura 4.6 – Variação sazonal por tipo específico de camadas esporádicas, considerando apenas dias geomagneticamente calmos.



Fonte: Produção da autora (2021).

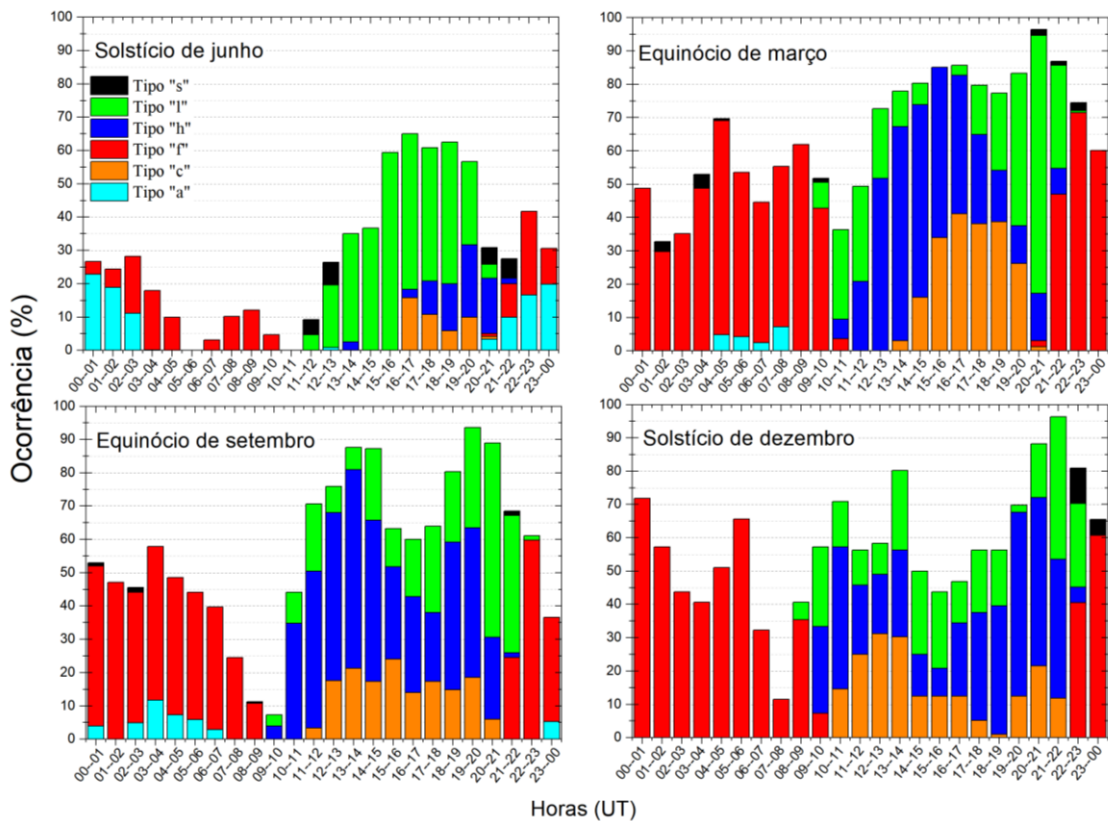
Entre as estações do ano, pode-se visualizar que a camadas Es_f tem uma ocorrência mínima durante o solstício de junho, enquanto no solstício de dezembro esta ocorrência é quase triplicada. A camada do tipo “l” surge entre 08 UT e 09 UT no equinócio de setembro e no solstício de dezembro, ao passo que no equinócio de março e solstício de junho aparece, entre 09 UT e 10 UT e 10 e 11 UT, respectivamente. A camada do tipo “c” se comporta da mesma maneira, visto que surge cerca de três horas depois no solstício de junho e equinócio de março, do que era observada nas demais estações.

Ao se comparar a Figura 4.6 e a Figura 4.4 se observa poucas diferenças, visto que os dias geomagneticamente calmos são maioria de julho de 2019 a junho de 2020, porém vale salientar algumas alterações. Ao comparar os dados relativos ao solstício de junho, observa-se que o tipo “a” desaparece das estatísticas no período das 18 UT às 20 UT, onde na Seção 4.4 a ocorrência era de 1,1% e 0,6%. Durante o equinócio de março houve

uma diminuição significativa na ocorrência do tipo “h” entre o às 21 UT e 22 UT horas, passando de 1,3% para 0,1%. Já no equinócio de setembro, teve-se uma significativa diminuição do tipo “l” no intervalo entre 16 UT e 18 UT, onde se tinha ocorrência de 7,9% e 7,8%, para os dias calmos estas ocorrências passaram a ser, respectivamente 4,9% e 2,3%. Comparando os dados do solstício de dezembro, vê-se a diminuição do tipo “s” entre 22 UT e 23 UT, onde antes havia a ocorrência de 2,5% agora se tem apenas 1,2%.

Com relação aos dias geomagneticamente perturbados, classificados de acordo com o índice Kp, os resultados podem ser vistos na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Variação sazonal por tipo específico de camadas esporádicas, considerando apenas dias perturbados.



Fonte: Produção da autora (2021).

Como mencionado anteriormente, 60 dias geomagneticamente perturbado foram contabilizados de julho de 2019 a junho de 2020, que é 19% do total de dias. Considerando cada estação do ano, esses 60 dias geomagneticamente perturbados são distribuídos ao longo das estações do ano da seguinte forma: 10 dias (17%) para o solstício de junho, 22 dias (37%) para o equinócio de setembro, 14 dias (23%) solstício

de dezembro, e 14 dias (23%) para o equinócio de março. As tabelas com os dados utilizados para a elaboração desta análise são apresentadas no Apêndice H.

Em termos gerais, nota-se que durante o solstício de junho houve uma baixa taxa de ocorrência de camadas Es, apresentando uma maior taxa entre 16 UT e 17 UT, enquanto que no solstício de dezembro e no equinócio de março a ocorrência chegou a 96%. O tipo “s” visto entre 11 UT e 13 UT e 20 UT e 22 UT, no solstício de junho, praticamente desaparece nas demais estações. A camada Es_c surge entre 10 UT e 14 UT durante o solstício de dezembro e equinócios de março e setembro, porém só é percebido entre 16 UT e 17 UT no solstício de junho. A ocorrência da camada do tipo “a” é muito maior no solstício de junho, e desaparece completamente no solstício de dezembro.

Ao comparar a Figura 4.7 com as Figuras 4.4 e 4.6, observa-se muitas divergências. Principalmente no solstício de junho, onde se vê um aumento significativo do tipo “a” de valores que antes apresentavam valor máximo de 10% e agora correspondem a 23% da ocorrência nos períodos noturnos. Quando se compara o equinócio de março obtido nesta seção com o obtido na Seção 4.4, vê-se um aumento principalmente no total de camadas Es no período das 20 UT às 21 UT onde, anteriormente havia 83% de ocorrência e agora se vê 96%. No equinócio de setembro se tem uma diminuição significativa do percentual total de camadas Es entre 09 UT e 10 UT, onde na Seção 4.4 se tinha uma ocorrência de 23,6%, agora se vê apenas 7,3%. Já para o solstício de dezembro, pode-se notar o desaparecimento do tipo “a”.

5 CONTRIBUIÇÃO, SUMÁRIO DOS RESULTADOS, CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração deste projeto no período 2020-2021, foram desenvolvidas várias análises da ocorrência das camadas Es sobre Santa Maria. A principal contribuição deste trabalho, juntamente com os principais resultados, conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentados neste capítulo.

5.1 Contribuição

A principal contribuição desse trabalho é:

- Pela primeira vez são apresentados estudos estatísticos das camadas Es sobre Santa Maria (29,7° S, 53,8° O), RS.

5.2 Sumário de Resultados

Os principais resultados deste estudo são:

- O mês em que houve maior ocorrência de camadas Es foi o mês de novembro de 2019, com uma porcentagem de 74%. Em contrapartida, o mês que menos apresentou camada Es foi o mês de maio de 2020, com 34% de ocorrência.
- O solstício de dezembro apresentou maior ocorrência de Es, com 66% do total de horas registradas. O solstício de junho apresentou a menor taxa de ocorrência, sendo esta de 40%.
- Os tipos de camadas Es que mais apareceram durante toda a observação foram “f”, “l” e “h”, enquanto os tipos “a” e “s” foram os que tiveram uma menor ocorrência.
- A camada do tipo “q” não foi observada sobre Santa Maria, como esperado, devido a localização ser em baixas/médias latitudes.
- Quando classificadas em relação as horas do dia, observa-se que durante o dia houve uma maior ocorrência dos tipos “h” e “l”, enquanto durante os horários noturnos o tipo “f” foi predominante.

- Quando houve a classificação dos dias de acordo com a atividade geomagnética, obteve-se 255 dias considerados geomagneticamente calmos e 60 dias geomagneticamente perturbados.
- Levando em consideração apenas os dias geomagneticamente calmos, viu-se poucas diferenças quando comparado aos resultados obtidos na Seção 4.4, visto que os dias calmos são maioria de julho de 2019 a junho de 2020. Porém, pode-se notar, principalmente o sumiço das camadas do tipo “a” das estatísticas no período das 18 UT às 20 UT.
- Considerando a ocorrência das camadas Es a cada hora apenas para os dias geomagneticamente perturbados, vê-se muitas diferenças quando comparados aos resultados obtidos para os dias geomagneticamente calmos, principalmente quando se olha para o solstício de junho, onde se vê um aumento significativo da camada do tipo “a”.
- De maneira geral, ainda é possível visualizar indicativos de variações semidiurnas (solstício de junho e equinócio de março) e terdiurnas (equinócio de setembro e solstício de dezembro) dos ventos de marés, que influenciam as camadas Es causadas pelo vento.

5.3 Conclusão

Com todas análises realizadas no decorrer deste trabalho, obteve-se um amplo estudo estatístico sobre a ocorrência e variabilidade dos diversos tipos de camadas Es que ocorrem na região de Santa Maria durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados. Este estudo permitiu também a obtenção de um enorme conhecimento sobre a dinâmica das camadas Es na região central da AMAS, onde a intensidade total do campo geomagnético é menor que 22,000 nT.

5.4 Trabalhos Futuros

Como uma perspectiva para o futuro, com a possível renovação do Projeto de Pesquisa para o período 2021-2022, pretende-se explorar os parâmetros f^iEs , $fbEs$ e a altura das camadas Es (h^iEs) que foram obtidas durante a vigência do atual Projeto de Pesquisa. Há

ainda a possibilidade de usar modelos físicos de camadas Es e ventos de marés para explicar o comportamento semidiurno e terdiurno das camadas Es ao longo do ano e realizar estudos de caso comparando a densidade eletrônica medida pela Digissonda e simulada com modelo da região E.

REFERÊNCIAS

- ABDU, M. A. et al. **Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities.** *Advances in Space Research*, 35(5), 771–787, 2005.
- ARRAS, C., and WICKERT, J. **Estimation of ionospheric sporadic E intensities from GPS radio occultation measurements,** *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 171, 2018.
- ARRAS, C., et al. **Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes,** *Ann. Geophys.*, 27, 2555–2563, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-2555-2009>, 2009.
- BABCOCK, H. W., *The Astrophysical Journal*, 133, 572-587, 1961.
- BANKS, P. M., and KOCKARTS, G. **Aeronomy: Part A.** New York: Academic Press, 1973.
- BATISTA, I.S., and M.A. ABDU, **Magnetic storm associated delayed sporadic E enhancements in the Brazilian Geomagnetic Anomaly,** *Journal of Geophysical Research.*, 82, 4777, 1977.
- BENNETT, J. O., et al. **The cosmic perspective** (8th ed.). Pearson, 2017.
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics** - São José dos Campos, SP: INPE, 2004.
- BRASSEUR, G.; SOLOMAN, S. **Aeronomy of the Middle atmosphere.** Bolder: Springer, 2005.
- CHAPMAN, S., and FERRARO, V. C. A., **A new theory of magnetic storms,** *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, 36 (3), 171– 186, 1931.
- CHULLIAT, A., W. Brown, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, G. Cox, A. Woods, S. Macmillan, B. Meyer and M. Panizza, 2020. **The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA.**
- DENARDINI, C. M. **Estudo da eletrodinâmica durante o período de máxima atividade solar (1999-2002),** 2003. 284. Tese de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- DENARDINI, C. M. et al, **Ocorrência da camada E esporádica de cobertura durante a fase de recuperação da super tempestade de 2003.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA ESPACIAL E AERONOMIA, 6. (SBGEA), Jataí, GO. Resumos. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34 P/3MT48EB>>, 2016.
- DUQUE, M. R. A. **Física da Terra,** Universidade de Évora, 21 July 2015.

GOLUB, L. & PASACHOFF, J. (2009). **The Solar Corona**. Cambridge University Press, 2009. ISBN: 9780521882019. 67. 10.1119/1.19237.

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

GREGORIO-HETEM, et al. **Apostila Aga215, Fundamentos De Astronomia** - Iag/Usp - Departamento de Astronomia, capítulo 11, Evolução Estelar, 2010.

HALDOUPIS, Christos. **Midlatitude Sporadic E. A Typical Paradigm of Atmosphere-Ionosphere Coupling**. Space Science Reviews, 168. 1-21. 10.1007/s11214-011-9786-8, 2011.

HATHAWAY, D. **Manchas Solares, Grande Mínimo Solar e Mudança Climática**, Planetary Science, 19 de junho de 2019.

KELLEY, Michael C. **The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**/Michael C. Kelley. p. cm. – (International geophysics series; v. 96), 2009.

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to Space Physics**, Cambridge University Press, Inglaterra, p. 229, 1995.

LAKHINA, G.S. **Bulletin of the Astronomical Society of India** 28, 593 (2000).

LANG, Kenneth R. **The Sun from Space**, 2ª edição, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Department of Physics and Astronomy Tufts University Medford, 2009.

LOWELL, Digisonde International (LDI), Technical Manual, **Operation and Maintenance Document Version 1.2.6**, Lowell, Massachusetts, EUA.

MATHEWS, J. D. **Sporadic E: Current views and recent progress**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 60 (4), 413-435, 1998.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 273 p, 1991.

MITCHELL, D. G., **The space environment, in Fundamentals of space systems**, edited by V. L. Pisacane and R. C. Moore, pp. 45-98, Oxford Univ. Press, Oxford, 1994.

MORO, J. et al. **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, 126, e2020JA028663, 2021.

MORO, J. et al. **On the sources of the ionospheric variability in the South American Magnetic Anomaly during solar minimum**. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124, 7638–7653, 2019.

MORO, J. **Variações longitudinais dos campos elétricos do eletrojato equatorial no setor americano**, 2015. 175. Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

MORO, J. et al. **Latitudinal dependence of cosmic noise absorption in the ionosphere over the SAMA region during the September 2008 magnetic storm**. Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 117, p. 6311, 2012.

NISHIDA, H. Ogawa, H. and Inatani, Y. **MHD Analysis of Force Acting on Dipole Magnetic Field in Magnetized Plasma Flow**, Computational Fluid Dynamics 2006, Springer, Berlin, 2009.

OBSERVATÓRIO NACIONAL, **Atmosfera**, Ed., nº 3. Divisão de Atividades Educacionais – DAED, Ministério da Ciência e da Tecnologia (MCTI), 2011.

REINISCH, B. W. **Digisonde 256: General Description of the compact digital ionospheric sounder**, Universidade de Lowell, Centro de Pesquisas Atmosféricas, 4ª edição, Lowell, Massachusetts, EUA, 1981.

REINISCH, B., & GALKIN, I. **Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO)**. Earth, Planets, and Space, 63. 377-381. 10.5047/eps.2011.03.001, 2011.

RESENDE, L. C. A., et al. **Competition between winds and electric fields in the formation of blanketing sporadic E layers at equatorial regions**. Earth Planets Space 68, 201, 2016.

RESENDE, L. C. A., et al. **Simulations of blanketing sporadic E-layer over the Brazilian sector driven by tidal winds**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 154, 104–114, 2017.

RISHBETH, H.; and GARIOTT, O. G. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 331p, 1969.

RUSSELL, C. T., **The Solar Wind Interaction with the Earth Magnetic Field**, disponível em: http://wwwspc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/solwind_interact_magsp_here_tutorial.pdf. Acesso em 04 de março de 2020.

RUSSELL, C. T., **The polar cusp**. Advances in Space Research. v. 25, p. 1413-1424, 2000.

SCHOOL TUTORING ACADEMY, **Science Review of Plasma**, Deborah, June 18, 2016. Disponível em < <https://schooltutoring.com/scholarship/2016/06/18/science-review-of-plasma/>>, acesso em 20 de setembro de 2020.

TOLEDO, M. C. et al. **Geologia**. São Paulo: USP/UNIVESP, 45 p, Licenciatura em Ciências, Módulo 2: Estrutura interna da Terra, capítulo 3, 2014.

WHITEHEAD, J.: **The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones**, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 20, 49–58, 1961.

APÊNDICE A – Localização dos Observatórios Utilizados para Elaboração dos Índices Geomagnéticos

As Tabelas a seguir apresentam a localização dos observatórios utilizados para a elaboração dos índices geomagnéticos apresentados na Seção 2.6.1. Sendo apresentados, respectivamente, os quatro observatórios referentes ao índice Dst (Tabela A.1), os treze observatórios do índice Kp (Tabela A.2), os doze observatórios aurorais (Tabela A.3) e os onze observatórios utilizados para obtenção dos índices SYM/H e ASY/H (Tabela A.4).

Tabela A.1 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético Dst.

#	Código	Observatório	País	Latitude	Longitude
1	HER	Hermanus	África do Sul	-34°25'	19°13'
2	HON	Honolulu	EUA	21°19'	202°0'
3	KAK	Kakioka	Japão	36°13'	140°11'
4	SJG	San Juan	EUA	18°6'	293°51'

Fonte: Adaptado de Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (SIIG) (2021).

Tabela A.2 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético Kp.

#	Código	Observatório	País	Latitude	Longitude
1	LER	Lerwick	Escócia	60°08'	358°49'
2	MEA	Meanook	Canadá	54°37'	246°40'
3	SIT	Sitka	Alasca	57°03'	224°40'
4	ESK	Eskdalemuir	Escócia	55°19'	356°48'
5	UPS	Uppsala	Suécia	59°54'	17°21'
6	OTT	Ottawa	Canadá	45°24'	284°27'
7	BFE	Brorfelde	Dinamarca	55°37'	11°40'
8	HAD	Hartland	Inglaterra	50°58'	355°31'
9	WNG	Wingst	Alemanha	53°45'	9°04'
10	NGK	Niemegk	Alemanha	52°04'	12°41'
11	FRD	Fredericksburg	EUA	38°12'	282°38'
12	CNB	Canberra	Austrália	-35°18'	149°00'
13	EYR	Eyrewell	Nova Zelândia	-43°25'	172°21'

Fonte: Adaptado de Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (SIIG) (2021).

Tabela A.3 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético AE, AO, AU e AL.

#	Código	Observatório	País	Latitude	Longitude
1	ABK	Abisko	Suécia	68°21'	18°49'
2	BRW	Barrow	EUA	71°19'	203°22'
3	CCS	Cape Chelyuskin	Rússia	77°43'	104°16'
4	CMO	College	EUA	64°52'	212°8'
5	DIK	Dixon	Rússia	73°32'	80°33'
6	FCC	Fort Churchill	Canadá	58°45'	265°54'
7	LRV	Leirvogur	Islândia	64°10'	338°18'
8	NAQ	Narsarsuaq	Groenlândia (Dinamarca)	61°9'	314°33'
9	PBK	Pebek	Rússia	70°4'	170°55'
10	SNK	Sanikiluaq	Canadá	56°30'	280°48'
11	TIK	Tixie Bay	Rússia	71°34'	129°0'
12	YKC	Yellowknife	Canadá	62°28'	245°31'

Fonte: Adaptado de Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (SIIG) (2021).

Tabela A.4 – Localização dos observatórios ativos atualmente (agosto 2021) utilizados para a elaboração do índice geomagnético SYM/H e ASY/H.

#	Código	Observatório	País	Latitude	Longitude
1	ABG	Alibag	Índia	18°38'	72°52'
2	AMS	Martin De Vivies- Amsterdam Island	Terras Austrais e Antárticas Francesas (França)	- 37°47'	77°34'
3	BOU	Boulder	EUA	40°8'	254°45'
4	CLF	Chambon La Foret	França	48°1'	2°15'
5	FRD	Fredericksburg	EUA	38°12'	282°37'
6	HER	Hermanus	África do Sul	-34°25'	19°13'
7	HON	Honolulu	EUA	21°19'	202°0'
8	MMB	Memambetsu	Japão	43°54'	144°11'
9	SJG	San Juan	EUA	18°6'	293°51'
10	TUC	Tucson	EUA	32°10'	249°16'
11	WMQ	Urumqi	China	44°21'	86°56'

Fonte: Adaptado de Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (SIIG) (2021).

APÊNDICE B – Tabela da Variação do Nascer e Pôr do Sol

A Tabela a seguir apresenta a variação dos horários de nascer e pôr do Sol de julho de 2019 a junho de 2020. Para a construção da Figura 3.3 foram utilizados dados de todos os dias neste período, porém, nesta Tabela são apresentados apenas os dados do primeiro e do décimo quinto dia de cada mês. Possibilitando, com isso, a visualização da variação, sem alongar demasiadamente este apêndice.

Tabela B.1 – Variação do nascer e pôr do Sol

Data	Nascer do Sol (HH:mm)*	Pôr do Sol (HH:mm)*
01/07/2019	10:31	20:47
15/07/2019	10:28	20:53
01/08/2019	10:20	21:03
15/08/2019	10:08	21:11
01/09/2019	09:50	21:20
15/09/2019	09:33	21:27
01/10/2019	09:14	21:36
15/10/2019	08:57	21:44
01/11/2019	08:41	21:56
15/11/2019	08:31	22:08
01/12/2019	08:27	22:21
15/12/2019	08:29	22:31
01/01/2020	08:38	22:39
15/01/2020	08:49	22:39
01/02/2020	09:03	22:33
15/02/2020	09:15	22:22
01/03/2020	09:26	22:07
15/03/2020	09:35	21:51
01/04/2020	09:46	21:31
15/04/2020	09:54	21:15
01/05/2020	10:04	21:00
15/05/2020	10:12	20:50
01/06/2020	10:22	20:43

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

APÊNDICE C – Tabela da Variação Sazonal das Camadas Es

A Tabela a seguir apresenta a variação sazonal das camadas Es de julho de 2019 a junho de 2020, conforme a distribuição ao longo das estações do ano: solstício de dezembro (dezembro, janeiro e fevereiro); equinócio de março (março, abril e maio); solstício de junho (junho, julho e agosto); e equinócio de setembro (setembro, outubro e novembro). Considerando a quantidade total de horas com Es e o período de dados coletados pela Digissonda ao longo dos três meses respectivos a cada uma das estações, obteve-se a porcentagem de Es para cada uma das estações do ano (colunas).

Tabela C.1 – Variação sazonal das camadas Es.

	Solstício de junho	Solstício de dezembro	Equinócio de março	Equinócio de setembro
Quantidade total de horas com Es (HH:mm)*	661:29	864:45	1187:56	1117:10
Período com dados coletados (HH:mm)*	1660:41	1308:25	2156:55	1783:55
Porcentagem de Es	39,83%	66,09%	55,08%	62,62%

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

APÊNDICE D – Tabela da Ocorrência Sazonal por Tipo Específico de Camada Es

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos dados utilizados para a elaboração da Figura 4.3, presente na Seção 4.3. As tabelas apresentam a variação sazonal das camadas Es de julho de 2019 a junho de 2020, conforme a distribuição ao longo das estações do ano e os tipos específicos de camadas Es. Considerando a quantidade total de horas com Es e o período de dados coletados pela Digissonda ao longo dos três meses respectivos a cada uma das estações, obteve-se a porcentagem de cada tipo de camada Es para cada uma das estações do ano. Os valores da quantidade total de horas por estação podem ser vistos no Apêndice B.

Tabela D.1 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o solstício de junho.

Tipo de Es	Quantidade de horas com Es (HH:mm)*	Ocorrência (%)
a	35:33	5,37
c	65:25	9,89
f	163:19	24,69
h	254:25	38,46
l	132:55	20,09
s	09:51	1,49

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

Tabela D.2 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o solstício de dezembro.

Tipo de Es	Quantidade de horas com Es (HH:mm)*	Ocorrência (%)
a	11:25	1,32
c	133:30	15,44
f	315:00	36,43
h	241:15	27,9
l	155:20	17,96
s	08:20	0,96

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

Tabela D.3 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o equinócio de março.

Tipo de Es	Quantidade de horas com Es (HH:mm)*	Ocorrência (%)
a	20:35	1,73
c	127:45	10,75
f	486:30	40,95
h	320:26	26,97
l	213:20	17,96
s	19:20	1,63

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

Tabela D.4 – Ocorrência de camada Es por tipo específico durante o equinócio de setembro.

Tipo de Es	Quantidade de horas com Es (HH:mm)*	Ocorrência (%)
a	26:55	2,41
c	163:30	14,64
f	415:00	37,15
h	303:10	27,14
l	198:15	17,75
s	09:25	0,84

*HH refere-se às horas e mm aos minutos

APÊNDICE E – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora Independente da Classificação Magnética

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos dados utilizados para a elaboração da Figura 4.4, presente na Seção 4.4. As tabelas apresentam a variação sazonal das camadas Es de julho de 2019 a junho de 2020, conforme a distribuição ao longo das estações do ano e os tipos específicos de camadas Es a cada hora. Considerando a quantidade total de horas com Es e o período de dados coletados pela Digissonda ao longo dos três meses respectivos a cada uma das estações, obteve-se a porcentagem de cada tipo de camada Es para cada uma das estações do ano e horas do dia.

Tabela E.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o solstício de junho.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	4,87	0,00	21,26	0,00	0,00	2,03	28,17
01--02	6,02	0,00	16,47	0,00	0,00	0,90	23,39
02--03	5,08	0,00	18,57	0,00	0,00	0,25	23,91
03--04	1,51	0,00	14,58	0,00	0,00	0,25	16,34
04--05	1,37	0,00	10,58	0,00	0,00	0,00	11,95
05--06	0,00	0,00	6,68	0,00	0,00	0,51	7,19
06--07	0,00	0,00	6,92	0,00	0,00	0,00	6,92
07--08	0,08	0,00	8,90	0,00	0,00	0,38	9,36
08--09	0,18	0,00	9,47	0,00	0,00	0,00	9,65
09--10	0,00	0,00	7,44	0,00	0,26	0,00	7,69
10--11	0,00	0,00	1,41	0,00	3,59	0,13	5,13
11--12	0,00	0,00	0,00	5,52	6,78	0,63	12,92
12--13	0,12	0,00	0,00	38,93	5,60	0,97	45,62
13--14	0,00	1,18	0,00	57,14	4,60	0,00	62,93
14--15	0,00	3,13	0,00	68,00	2,20	0,00	73,33
15--16	0,00	13,41	0,00	63,33	0,91	0,00	77,65
16--17	0,00	24,77	0,00	50,56	5,52	0,00	80,86
17--18	0,00	24,83	0,00	32,35	22,10	0,00	79,27
18--19	1,13	17,23	0,90	24,21	35,14	0,00	78,60
19--20	0,57	4,31	1,36	10,44	53,35	0,91	70,94
20--21	4,01	0,11	5,85	2,41	40,48	2,18	55,05
21--22	7,37	0,00	44,12	0,00	2,42	3,00	56,91
22--23	10,10	0,00	38,57	0,00	0,00	1,41	50,08
23--00	8,54	0,00	23,59	0,00	0,00	0,49	32,62

Tabela E.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o equinócio de março.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	0,19	0,00	48,88	0,00	0,00	1,59	50,66
01--02	0,00	0,00	40,17	0,00	0,00	1,97	42,14
02--03	0,94	0,00	41,1	0,00	0,00	0,37	42,41
03--04	2,22	0,00	40,93	0,00	0,00	0,93	44,08
04--05	3,06	0,00	35,74	0,00	0,00	0,28	39,08
05--06	3,89	0,00	38,24	0,00	0,00	0,00	42,13
06--07	4,07	0,00	37,59	0,00	0,00	0,00	41,66
07--08	3,43	0,00	33,52	0,00	0,00	0,19	37,14
08--09	0,19	0,00	34,54	0,00	0,00	0,09	34,82
09--10	0,00	0,00	21,3	0,00	7,20	0,37	28,87
10--11	0,00	0,00	1,11	6,11	15,74	0,46	23,42
11--12	0,00	0,00	0,00	26,85	12,78	0,00	39,63
12--13	0,00	1,30	0,00	48,61	7,31	0,00	57,22
13--14	0,00	6,48	0,00	53,33	4,07	0,00	63,88
14--15	0,00	14,07	0,00	48,80	4,44	0,00	67,31
15--16	0,00	21,00	0,00	46,02	3,33	0,00	70,35
16--17	0,00	26,48	0,00	41,11	5,37	0,00	72,96
17--18	0,00	26,57	0,00	34,44	15,56	0,00	76,57
18--19	0,00	22,78	0,00	25,76	29,54	0,46	78,54
19--20	0,00	13,98	0,00	16,94	47,96	0,83	79,71
20--21	0,19	7,50	4,07	6,76	60,28	3,89	82,69
21--22	1,20	1,57	46,76	1,30	23,24	3,70	77,77
22--23	2,22	0,00	65,56	0,00	0,19	5,09	73,06
23--00	1,30	0,00	52,55	0,00	0,00	1,30	55,15

Tabela E.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o equinócio de setembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	2,78	0,00	56,22	0,00	0,00	0,67	59,67
01--02	3,67	0,00	55,51	0,00	0,00	0,00	59,18
02--03	4,28	0,00	57,55	0,00	0,00	1,13	62,96
03--04	5,52	0,00	52,14	0,00	0,00	0,56	58,22
04--05	4,28	0,00	49,44	0,00	0,00	1,46	55,18
05--06	3,83	0,00	48,76	0,00	0,00	0,00	52,59
06--07	0,68	0,00	40,54	0,00	0,00	0,00	41,22
07--08	2,93	0,00	31,19	0,00	0,00	0,00	34,12
08--09	1,58	0,00	17,12	0,00	6,19	0,11	25,00
09--10	0,56	1,69	1,46	5,97	13,4	0,56	23,64
10--11	0,00	7,66	0,00	28,6	16,67	0,79	53,72
11--12	0,00	10,68	0,00	42,49	19,24	1,67	74,08
12--13	0,00	14,21	0,00	47,13	13,64	1,24	76,22
13--14	0,00	13,39	0,00	48,93	11,92	0,00	74,24
14--15	0,00	18,63	0,00	41,53	12,57	0,00	72,73
15--16	0,00	21,52	0,00	33,3	9,08	0,00	63,90
16--17	0,00	18,6	0,00	37,88	7,89	0,00	64,37
17--18	0,00	25,11	0,00	33,75	7,84	0,00	66,70
18--19	0,00	28,86	0,00	41,14	13,41	0,00	83,41
19--20	0,00	33,67	0,00	33,78	23,87	0,90	92,22
20--21	1,01	25,36	0,00	13,41	49,39	0,22	89,39
21--22	1,32	1,54	17,43	1,54	56,58	0,99	79,40
22--23	1,32	0,00	71,05	0,00	4,06	0,66	77,09
23--00	2,43	0,00	57,52	0,00	0,00	1,66	61,61

Tabela E.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora independente da classificação magnética durante o solstício de dezembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	1,82	0,00	70,3	0,00	0,00	1,82	73,94
01--02	0,31	0,00	68,00	0,00	0,00	1,23	69,54
02--03	0,00	0,00	60,80	0,00	0,00	2,16	62,96
03--04	1,85	0,00	56,17	0,00	0,00	0,46	58,48
04--05	2,78	0,00	55,86	0,00	0,00	0,46	59,10
05--06	4,78	0,00	50,77	0,00	0,00	0,93	56,48
06--07	2,78	0,00	39,90	0,00	0,00	0,93	43,61
07--08	0,62	0,00	43,21	0,00	0,00	0,00	43,83
08--09	1,54	0,31	38,73	2,31	5,56	0,62	49,07
09--10	0,00	13,12	5,09	21,3	26,85	1,54	67,90
10--11	0,00	30,56	0,00	37,19	14,97	1,54	84,26
11--12	0,00	35,48	0,00	34,54	13,19	0,00	83,21
12--13	0,00	39,94	0,00	27,83	8,65	0,00	76,42
13--14	0,00	28,35	0,00	28,2	12,96	0,00	69,51
14--15	0,00	19,35	0,00	29,17	16,37	0,00	64,89
15--16	0,00	9,96	0,00	31,48	14,35	0,00	55,79
16--17	0,00	6,96	0,00	36,67	14,06	0,00	57,69
17--18	0,00	6,61	0,00	36,12	20,56	0,00	63,29
18--19	0,00	8,18	0,00	38,79	25,3	0,00	72,27
19--20	0,00	14,53	0,00	46,94	15,6	0,00	77,07
20--21	0,00	19,79	0,00	43,38	21,16	0,00	84,33
21--22	1,39	12,35	0,00	22,84	45,06	0,00	81,64
22--23	0,62	0,15	34,10	2,01	29,01	2,47	68,36
23--00	2,64	0,00	59,07	0,00	0,00	0,93	62,64

APÊNDICE F – Tabela da Classificação em Dias Calmos e Perturbados de Acordo com a Atividade Geomagnética

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos dados utilizados para a elaboração da Figura 4.5, presente na Seção 4.5. Considerando calmo os dias em que o somatório do índice Kp foi ≤ 24 ou que os dados fornecidos a cada três horas fossem $< 3^+$; e perturbado os dias em que o somatório do índice Kp foi > 24 ou que os dados fornecidos a cada três horas fossem $\geq 3^+$.

Tabela F.1 – Classificação dos dias de acordo com a atividade geomagnética calma e perturbada

Mês/ano	Dias geomagneticamente calmos	Dias geomagneticamente perturbados	Total de dias com dados em cada mês
jul/19	19	5	24
ago/19	24	4	28
set/19	15	12	27
out/19	18	9	27
nov/19	26	1	27
dez/19	25	2	27
jan/20	18	6	24
fev/20	7	6	13
mar/20	25	6	31
abr/20	23	6	29
mai/20	28	2	30
jun/20	27	1	28
Total de dias	255	60	315

APÊNDICE G – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora para os Dias Magneticamente Calmos

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos dados utilizados para a elaboração da Figura 4.6, presente na Seção 4.6. As tabelas apresentam a variação sazonal das camadas Es de julho de 2019 a junho de 2020, conforme a distribuição ao longo das estações do ano e os tipos específicos de camadas Es a cada hora para os dias magneticamente calmos (255 dias), cuja classificação foi realizada na Seção 4.5. Considerando a quantidade total de horas com Es e o período de dados coletados pela Digissonda ao longo dos três meses respectivos a cada uma das estações, obteve-se a porcentagem de cada tipo de camada Es para cada uma das estações do ano e horas do dia.

Tabela G.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o solstício de junho.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	2,16	0,00	23,89	0,00	0,00	2,34	28,39
01--02	4,05	0,00	18,15	0,00	0,00	1,04	23,24
02--03	4,15	0,00	18,79	0,00	0,00	0,29	23,23
03--04	1,72	0,00	14,08	0,00	0,00	0,29	16,09
04--05	1,59	0,00	10,68	0,00	0,00	0,00	12,27
05--06	0,00	0,00	7,74	0,00	0,00	0,58	8,32
06--07	0,00	0,00	7,51	0,00	0,00	0,00	7,51
07--08	0,09	0,00	8,70	0,00	0,00	0,44	9,23
08--09	0,20	0,00	9,06	0,00	0,00	0,00	9,27
09--10	0,00	0,00	7,89	0,00	0,30	0,00	8,18
10--11	0,00	0,00	1,64	0,00	4,17	0,15	5,95
11--12	0,00	0,00	0,00	5,66	7,84	0,00	13,50
12--13	0,00	0,00	0,00	42,27	6,52	0,00	48,79
13--14	0,00	1,38	0,00	61,21	4,95	0,00	67,54
14--15	0,00	3,63	0,00	73,06	2,56	0,00	79,25
15--16	0,00	15,53	0,00	63,95	1,05	0,00	80,53
16--17	0,00	26,17	0,00	51,17	5,99	0,00	83,33
17--18	0,00	27,04	0,00	31,13	24,01	0,00	82,19
18--19	0,00	19,01	1,04	21,35	38,41	0,00	79,82
19--20	0,00	3,42	1,58	8,15	58,34	1,05	72,54
20--21	4,12	0,00	6,65	2,13	44,28	1,73	58,91
21--22	6,95	0,00	49,60	0,00	2,54	2,54	61,63
22--23	9,03	0,00	40,78	0,00	0,00	1,64	51,44
23--00	6,60	0,00	25,78	0,00	0,00	0,57	32,95

Tabela G.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o equinócio de março.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	0,22	0,00	48,89	0,00	0,00	1,89	51,00
01--02	0,00	0,00	42,11	0,00	0,00	1,78	43,89
02--03	1,11	0,00	42,22	0,00	0,00	0,44	43,77
03--04	2,63	0,00	39,47	0,00	0,00	0,33	42,43
04--05	2,74	0,00	30,48	0,00	0,00	0,22	33,44
05--06	3,84	0,00	36,18	0,00	0,00	0,00	40,02
06--07	4,39	0,00	36,73	0,00	0,00	0,00	41,12
07--08	2,74	0,00	30,81	0,00	0,00	0,22	33,77
08--09	0,22	0,00	29,50	0,00	0,00	0,11	29,83
09--10	0,00	0,00	17,32	0,00	7,13	0,22	24,67
10--11	0,00	0,00	0,66	6,14	13,71	0,55	21,06
11--12	0,00	0,00	0,00	27,96	9,87	0,00	37,83
12--13	0,00	1,54	0,00	48,03	4,82	0,00	54,39
13--14	0,00	7,13	0,00	51,32	2,85	0,00	61,30
14--15	0,00	13,71	0,00	47,15	4,06	0,00	64,92
15--16	0,00	18,86	0,00	45,07	3,95	0,00	67,88
16--17	0,00	23,79	0,00	41,01	5,81	0,00	70,61
17--18	0,00	24,45	0,00	35,86	15,68	0,00	75,99
18--19	0,00	19,85	0,00	27,65	30,70	0,55	78,75
19--20	0,00	11,73	0,00	17,98	48,36	0,99	79,06
20--21	0,22	8,66	4,50	5,37	57,13	4,28	80,16
21--22	1,43	1,86	46,71	0,11	21,82	4,17	76,10
22--23	2,63	0,00	64,47	0,00	0,11	5,59	72,80
23--00	1,54	0,00	51,15	0,00	0,00	1,54	54,23

Tabela G.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o equinócio de setembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	2,44	0,00	58,62	0,00	0,00	0,57	61,63
01--02	4,75	0,00	57,99	0,00	0,00	0,00	62,74
02--03	4,09	0,00	63,01	0,00	0,00	1,02	68,12
03--04	3,65	0,00	53,95	0,00	0,00	0,73	58,33
04--05	3,36	0,00	51,90	0,00	0,00	1,90	57,16
05--06	3,22	0,00	51,90	0,00	0,00	0,00	55,12
06--07	0,00	0,00	41,67	0,00	0,00	0,00	41,67
07--08	3,80	0,00	33,19	0,00	0,00	0,00	36,99
08--09	2,05	0,00	19,01	0,00	8,04	0,00	29,10
09--10	0,73	2,19	1,90	6,58	16,37	0,73	28,50
10--11	0,00	9,94	0,00	26,75	18,86	1,02	56,57
11--12	0,00	12,81	0,00	41,15	18,99	2,16	75,11
12--13	0,00	13,11	0,00	46,05	15,50	1,64	76,30
13--14	0,00	10,71	0,00	45,25	13,73	0,00	69,69
14--15	0,00	19,05	0,00	39,29	9,67	0,00	68,01
15--16	0,00	20,68	0,00	35,12	8,33	0,00	64,13
16--17	0,00	20,09	0,00	40,77	4,91	0,00	65,77
17--18	0,00	27,53	0,00	37,80	2,23	0,00	67,56
18--19	0,00	33,18	0,00	40,18	11,01	0,00	84,37
19--20	0,00	38,54	0,00	30,21	21,88	1,19	91,82
20--21	1,33	31,85	0,00	9,87	46,54	0,29	89,88
21--22	1,72	2,06	15,23	1,58	61,35	0,86	82,80
22--23	1,72	0,00	74,57	0,00	4,89	0,86	82,04
23--00	1,58	0,00	65,3	0,00	0,00	2,16	69,04

Tabela G.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente calmos durante o solstício de dezembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	2,13	0,00	70,04	0,00	0,00	2,13	74,29
01--02	0,36	0,00	69,86	0,00	0,00	1,44	71,66
02--03	0,00	0,00	63,77	0,00	0,00	2,54	66,30
03--04	2,17	0,00	58,88	0,00	0,00	0,54	61,59
04--05	3,26	0,00	56,70	0,00	0,00	0,18	60,14
05--06	5,62	0,00	48,19	0,00	0,00	1,09	54,89
06--07	3,26	0,00	41,30	0,00	0,00	1,09	45,65
07--08	0,72	0,00	48,73	0,00	0,00	0,00	49,46
08--09	1,81	0,36	39,31	2,72	5,62	0,72	50,54
09--10	0,00	15,40	4,71	20,47	27,36	1,81	69,75
10--11	0,00	33,33	0,00	36,23	15,22	2,54	87,32
11--12	0,00	37,34	0,00	36,97	13,68	0,00	87,99
12--13	0,00	41,48	0,00	29,63	8,52	0,00	79,63
13--14	0,00	28,44	0,00	28,99	11,23	0,00	68,66
14--15	0,00	20,49	0,00	31,94	14,93	0,00	67,36
15--16	0,00	9,54	0,00	35,26	12,95	0,00	57,75
16--17	0,00	6,06	0,00	39,06	14,31	0,00	59,43
17--18	0,00	6,84	0,00	36,75	20,85	0,00	64,44
18--19	0,00	9,40	0,00	38,83	26,77	0,00	75,00
19--20	0,00	14,87	0,00	45,52	17,92	0,00	78,32
20--21	0,00	19,50	0,00	42,20	21,99	0,00	83,69
21--22	1,60	12,41	0,00	20,04	45,39	0,00	79,43
22--23	0,71	0,18	33,16	1,60	29,61	1,24	66,49
23--00	3,03	0,00	58,82	0,00	0,00	0,36	62,21

APÊNDICE H – Tabelas da Ocorrência por Tipo Específico de Es em Cada Hora para os Dias Magneticamente Perturbados

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos dados utilizados para a elaboração da Figura 4.7, presente na Seção 4.7. As tabelas apresentam a variação sazonal das camadas Es de julho de 2019 a junho de 2020, conforme a distribuição ao longo das estações do ano e os tipos específicos de camadas Es a cada hora para os dias magneticamente perturbados (60 dias), cuja classificação foi realizada na Seção 4.5. Considerando a quantidade total de horas com Es e o período de dados coletados pela Digissonda ao longo dos três meses respectivos a cada uma das estações, obteve-se a porcentagem de cada tipo de camada Es para cada uma das estações do ano e horas do dia.

Tabela H.1 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o solstício de junho.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	22,90	0,00	3,83	0,00	0,00	0,00	26,73
01--02	18,85	0,00	5,52	0,00	0,00	0,00	24,37
02--03	11,11	0,00	17,15	0,00	0,00	0,00	28,27
03--04	0,14	0,00	17,79	0,00	0,00	0,00	17,93
04--05	0,00	0,00	9,94	0,00	0,00	0,00	9,94
05--06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06--07	0,00	0,00	3,16	0,00	0,00	0,00	3,16
07--08	0,00	0,00	10,17	0,00	0,00	0,00	10,17
08--09	0,00	0,00	12,04	0,00	0,00	0,00	12,04
09--10	0,00	0,00	4,63	0,00	0,00	0,00	4,63
10--11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11--12	0,00	0,00	0,00	0,00	4,63	4,63	9,26
12--13	0,85	0,00	0,00	0,00	18,80	6,84	26,50
13--14	0,00	0,00	0,00	2,50	32,50	0,00	35,00
14--15	0,00	0,00	0,00	0,00	36,67	0,00	36,67
15--16	0,00	0,00	0,00	0,00	59,43	0,00	59,43
16--17	0,00	15,83	0,00	2,50	46,67	0,00	65,00
17--18	0,00	10,83	0,00	10,00	40,00	0,00	60,83
18--19	0,00	5,83	0,00	14,17	42,50	0,00	62,50
19--20	0,00	10,00	0,00	21,67	25,00	0,00	56,67
20--21	3,33	0,83	0,83	16,67	4,17	5,00	30,83
21--22	10,00	0,00	10,00	1,67	0,00	5,83	27,50
22--23	16,67	0,00	25,03	0,00	0,00	0,00	41,69
23--00	19,82	0,00	10,83	0,00	0,00	0,00	30,65

Tabela H.2 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o equinócio de março.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	0,00	0,00	48,81	0,00	0,00	0,00	48,81
01--02	0,00	0,00	29,76	0,00	0,00	2,98	32,74
02--03	0,00	0,00	35,12	0,00	0,00	0,00	35,12
03--04	0,00	0,00	48,81	0,00	0,00	4,17	52,98
04--05	4,76	0,00	64,29	0,00	0,00	0,60	69,64
05--06	4,17	0,00	49,40	0,00	0,00	0,00	53,57
06--07	2,38	0,00	42,26	0,00	0,00	0,00	44,64
07--08	7,14	0,00	48,21	0,00	0,00	0,00	55,36
08--09	0,00	0,00	61,90	0,00	0,00	0,00	61,90
09--10	0,00	0,00	42,86	0,00	7,74	1,19	51,79
10--11	0,00	0,00	3,57	5,95	26,79	0,00	36,31
11--12	0,00	0,00	0,00	20,83	28,57	0,00	49,40
12--13	0,00	0,00	0,00	51,79	20,83	0,00	72,62
13--14	0,00	2,98	0,00	64,29	10,71	0,00	77,98
14--15	0,00	16,07	0,00	57,74	6,55	0,00	80,36
15--16	0,00	33,93	0,00	51,19	0,00	0,00	85,12
16--17	0,00	41,07	0,00	41,67	2,98	0,00	85,71
17--18	0,00	38,10	0,00	26,79	14,88	0,00	79,76
18--19	0,00	38,69	0,00	15,48	23,21	0,00	77,38
19--20	0,00	26,19	0,00	11,31	45,83	0,00	83,33
20--21	0,00	1,19	1,79	14,29	77,38	1,79	96,43
21--22	0,00	0,00	47,02	7,74	30,95	1,19	86,90
22--23	0,00	0,00	71,43	0,00	0,60	2,38	74,40
23--00	0,00	0,00	60,12	0,00	0,00	0,00	60,12

Tabela H.3 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o equinócio de setembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	3,92	0,00	48,04	0,00	0,00	0,98	52,94
01--02	0,00	0,00	47,06	0,00	0,00	0,00	47,06
02--03	4,90	0,00	39,22	0,00	0,00	1,47	45,59
03--04	11,76	0,00	46,08	0,00	0,00	0,00	57,84
04--05	7,35	0,00	41,18	0,00	0,00	0,00	48,53
05--06	5,88	0,00	38,24	0,00	0,00	0,00	44,12
06--07	2,94	0,00	36,76	0,00	0,00	0,00	39,71
07--08	0,00	0,00	24,51	0,00	0,00	0,00	24,51
08--09	0,00	0,00	10,78	0,00	0,00	0,49	11,27
09--10	0,00	0,00	0,00	3,92	3,43	0,00	7,35
10--11	0,00	0,00	0,00	34,80	9,31	0,00	44,12
11--12	0,00	3,43	0,00	47,06	20,10	0,00	70,59
12--13	0,00	17,59	0,00	50,46	7,87	0,00	75,93
13--14	0,00	21,24	0,00	59,73	6,64	0,00	87,61
14--15	0,00	17,35	0,00	48,40	21,46	0,00	87,21
15--16	0,00	24,09	0,00	27,73	11,36	0,00	63,18
16--17	0,00	13,95	0,00	28,84	17,21	0,00	60,00
17--18	0,00	17,31	0,00	20,67	25,96	0,00	63,94
18--19	0,00	14,90	0,00	44,23	21,15	0,00	80,29
19--20	0,00	18,52	0,00	44,91	30,09	0,00	93,52
20--21	0,00	6,02	0,00	24,54	58,33	0,00	88,89
21--22	0,00	0,00	24,54	1,39	41,20	1,39	68,52
22--23	0,00	0,00	59,72	0,00	1,39	0,00	61,11
23--00	5,29	0,00	31,25	0,00	0,00	0,00	36,54

Tabela H.4 – Ocorrência por tipo específico de Es em cada hora para os dias magneticamente perturbados durante o solstício de dezembro.

Intervalo de horas (UT)	Tipo "a"	Tipo "c"	Tipo "f"	Tipo "h"	Tipo "l"	Tipo "s"	Total por intervalo de hora
00--01	0,00	0,00	71,88	0,00	0,00	0,00	71,88
01--02	0,00	0,00	57,29	0,00	0,00	0,00	57,29
02--03	0,00	0,00	43,75	0,00	0,00	0,00	43,75
03--04	0,00	0,00	40,63	0,00	0,00	0,00	40,63
04--05	0,00	0,00	51,04	0,00	0,00	0,00	51,04
05--06	0,00	0,00	65,63	0,00	0,00	0,00	65,63
06--07	0,00	0,00	32,29	0,00	0,00	0,00	32,29
07--08	0,00	0,00	11,46	0,00	0,00	0,00	11,46
08--09	0,00	0,00	35,42	0,00	5,21	0,00	40,63
09--10	0,00	0,00	7,29	26,04	23,96	0,00	57,29
10--11	0,00	14,58	0,00	42,71	13,54	0,00	70,83
11--12	0,00	25,00	0,00	20,83	10,42	0,00	56,25
12--13	0,00	31,25	0,00	17,71	9,38	0,00	58,33
13--14	0,00	30,21	0,00	26,04	23,96	0,00	80,21
14--15	0,00	12,50	0,00	12,50	25,00	0,00	50,00
15--16	0,00	12,50	0,00	8,33	22,92	0,00	43,75
16--17	0,00	12,50	0,00	21,88	12,50	0,00	46,88
17--18	0,00	5,21	0,00	32,29	18,75	0,00	56,25
18--19	0,00	1,04	0,00	38,54	16,67	0,00	56,25
19--20	0,00	12,50	0,00	55,21	2,08	0,00	69,79
20--21	0,00	21,51	0,00	50,54	16,13	0,00	88,17
21--22	0,00	11,90	0,00	41,67	42,86	0,00	96,43
22--23	0,00	0,00	40,48	4,76	25,00	10,71	80,95
23--00	0,00	0,00	60,71	0,00	0,00	4,76	65,48