



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



**ESTUDO DA IONOSFERA TERRESTRE DURANTE EVENTOS DE CLIMA  
ESPACIAL POR MEIO DE SATÉLITES, SONDADORES DIGITAIS E  
MAGNÉTICOS**

Anita Jungton Valcorte

Relatório de Iniciação Científica do Programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Juliano Moro e  
Dr. Clezio Marcos de Nardin.

INPE

Santa Maria

2024



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



**ESTUDO DA IONOSFERA TERRESTRE DURANTE EVENTOS DE CLIMA  
ESPACIAL POR MEIO DE SATÉLITES, SONDADORES DIGITAIS E  
MAGNÉTICOS**

Anita Jungton Valcorte

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

INPE

Santa Maria

2024

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço incondicionalmente à minha mãe, Ana Cristina Hoehr Jungton, pelo enorme apoio e ensinamentos que me proporcionou durante esta fase. Ao meu pai, André Luíz Valcorte, que me encaminhou a tomar decisões que me levaram até onde estou hoje.

Agradeço especialmente o meu orientador, Dr. Juliano Moro, pelo apoio e aprendizados durante o período do projeto. Sua orientação enriqueceu meus conhecimentos científicos e pessoais, auxiliando no meu crescimento como pessoa. Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu coorientador, Dr Clezio Marcos De Nardin, que apesar da distância prestou orientação e palavras de incentivo e ensino que contribuíram em cada etapa desse processo.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa APOENA, que demonstraram apoio e conselhos durante este período. Agradeço ao meu colega de faculdade, Lucas Adinã Baungartner, pelas conversas e manhãs de estudo que dividimos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq que me proporcionou a bolsa que auxiliou meu desenvolvimento como pesquisadora, e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilização das instalações e oportunidade de estudo.

## RESUMO

Os *flares* aumentam a ionização nas regiões mais baixas da ionosfera – região D, ocasionando assim “*blackouts*” nos sinais eletromagnéticos na faixa de rádio. Os efeitos das explosões na ionosfera variam de acordo com a incidência da radiação solar e da região geográfica em estudo. O campo magnético terrestre também está sujeito a mudanças em suas componentes ao receber grandes quantidades de radiação durante um *flare*. Neste trabalho foram estudados os impactos de cinco eventos de *flares* de classe X sobre quatro estações ionosféricas: Santa Maria (SMK, 29.7° S, 53.8° O), Fortaleza (FZA, 3,9° S, 38,5° O), Cachoeira Paulista (CAJ, 22.6°S, 44.9°O), e Ascension Island (ASO, 7.5°S, 14.2°O). Para cada estação ionosférica, foram analisados os parâmetros *foF2*, *hmF2*, *fminF*, *foE* e *fbEs* e comparados com os dias de referência, bem como a componente horizontal (*H*) e vertical (*Z*) do campo geomagnético e os ângulos de declinação (*D*) e inclinação (*I*) para São Martinho da Serra (SMS, 29.3°S, 53.8°O), RS. Os *flares* estudados resultaram em *blackouts* totais na região de Santa Maria, três *blackouts* totais em Cachoeira Paulista e bloqueios parciais em Fortaleza e Ascension Island. As variações dos impactos dos *flares* são apresentadas e discutidas em termos das variações dos parâmetros ionosféricos e das componentes do campo geomagnético para cada estação ionosférica, uma vez que não houve uma similaridade entre elas devido as diferenças na incidência da radiação solar.

Palavras-chave: Ionosfera. Clima Espacial. AMAS.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Imagem ilustrativa da estrutura solar.....	2
Figura 2.2 - Variação temperatura (linha contínua) e densidade (linha tracejada) da atmosfera solar em função da altura. ....	3
Figura 2.3 - Ondas Alfvén em um fluido condutor.....	4
Figura 2.4 - Ondas magnetosônicas propagando-se paralelamente ao campo magnético.....	5
Figura 2.5 – Variação do número de manchas solares entre os anos de 1749 e 2024. ....	6
Figura 2.6 - Mínimos de manchas solares e Pequena Era do Gelo. ....	7
Figura 2.7 – Região ativa do dia 1/9/1859. "A" e "B" marcam as posições iniciais de um evento intensamente brilhante, que se moveu em 5 minutos para "C" e "D" antes de desaparecer.....	8
Figura 2.8 – Comparação entre as manchas solares de 1839 do evento Carrington e a mancha solar AR3664, observada no dia 8/5/2024.....	9
Figura 2.9 - Principais correntes da Magnetosfera.....	10
Figura 2.10 - Posição da corrente Chapman-Ferraro. ....	11
Figura 2.11 - Simulação das correntes Sq pelo <i>Global Scale Wave Model</i> (GSWM).....	13
Figura 2.12 - Média equivalente do Sq nos meses de março, junho, setembro e dezembro. ....	13
Figura 2.13 - Média equivalente de L durante julho 1957–dezembro 1959.....	14
Figura 2.14 - Ilustração dos cinturões de radiação Van Allen. ....	15
Figura 2.15 - Trajetória helicoidal de uma partícula positiva adentrando obliquamente um campo magnético uniforme.....	16
Figura 2.16 - Movimento das partículas carregadas nos cinturões de radiação Van Allen. ....	17
Figura 2.17 - Principais componentes do campo magnético.....	18
Figura 2.18 - Elementos do campo geomagnético em forma de sistema e suas características..	19
Figura 2.19 - (A) Variação da inclinação magnética de acordo com a latitude, (B) Principais componentes do campo magnético. ....	20
Figura 2.20 - Representação visual dos eixos magnéticos e geográficos.....	21
Figura 2.21 - Gráficos representativos da ocorrência do fenômeno do crochê magnético. ....	22
Figura 3.1 - Localização das Digissondas utilizadas no trabalho.....	23
Figura 3.2 - Antena transmissora delta, da Digissonda instalada em Santa Maria.....	24
Figura 3.3 - Uma das quatro antenas receptoras da Digissonda de Santa Maria.....	25
Figura 3.4 – Parte eletrônica da Digissonda de Santa Maria.....	25
Figura 3.5 – Interface do SAO-Explorer. ....	26
Figura 3.6 – Identificação dos parâmetros utilizados no Ionograma.....	27
Figura 3.7 - Parâmetros foF2, hmF2, foE e fbEs do dia 3/3/2023 obtidos em Santa Maria. ....	27
Figura 3.8 - Satélite GOES-16. ....	28
Figura 3.9 – Magnetômetro da Rede Embrace instalado no Observatório Espacial do Sul: (a) sensor magnético enterrado a 1 m de profundidade embaixo de uma proteção de madeira. (b) sistema de controle com uma central digital que armazena os dados. ....	30
Figura 4.1 - Localização da região ativa onde ocorreu o <i>flare</i> X2.1. ....	33
Figura 4.2 – Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 1.....	35
Figura 4.3 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 1.....	35
Figura 4.4 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 1.....	36
Figura 4.5 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 1.....	36
Figura 4.6 - Localização da região ativa onde ocorreu o <i>flare</i> X1.9. ....	37
Figura 4.7 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 2. ....	38
Figura 4.8- Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 2. ....	38

Figura 4.10 – Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 2. ....	39
Figura 4.9 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island, durante o Evento 2.....	39
Figura 4.11 - Localização da região ativa onde ocorreu o <i>flare</i> X1.3. ....	40
Figura 4.12 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 3. ....	41
Figura 4.13 – Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 3. ....	41
Figura 4.14 – Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 3. ....	42
Figura 4.15 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 3.....	42
Figura 4.16 - Localização da região ativa onde ocorreu o <i>flare</i> X1.1. ....	43
Figura 4.17 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 4. ....	44
Figura 4.18 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 4. ....	44
Figura 4.19 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 4. ....	45
Figura 4.20 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 4.....	45
Figura 4.21 - Localização da região ativa onde ocorreu o <i>flare</i> X1.0. ....	46
Figura 4.22 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 5. ....	47
Figura 4.23 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 5. ....	47
Figura 4.25 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 5. ....	48
Figura 4.24 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 5.....	48
Figura 4.26 – Ângulo Zenital em relação ao Azimute e o Horizontal.....	49
Figura 4.27 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 1. ....	51
Figura 4.28 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 2. ....	51
Figura 4.29 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 3. ....	52
Figura 4.30 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 4. ....	52
Figura 4.31 - Componentes do campo geomagnético de Cachoeira Paulista para o Evento 5. ..	53

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 3.1 - Classificação dos <i>flares</i> em relação a intensidade de entrada de fluxo de raios-x na atmosfera. ....	29
Tabela 4.1 - Explosões solares que causaram o bloqueio total dos sinais eletromagnéticos sobre Santa Maria. ....	33
Tabela 4.2 – Variação percentual dos parâmetros para o Evento 1. ....	37
Tabela 4.3 – Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 2. ....	40
Tabela 4.4 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 3. ....	43
Tabela 4.5 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 4. ....	46
Tabela 4.6 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 4. ....	49
Tabela 4.7 - Valores do Ângulo Zenital para cada localização estudada.....	50
Tabela 4.8 - Valores das variações das componentes do campo geomagnético .....	53
Tabela 4.9 - Razão entre variáveis obtidas da Tabela 4.10.....	54

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	REVISÃO TEÓRICA .....	2
2.1	Plasma, Fenômenos Solares e Clima Espacial .....	2
2.2	Evento Carrington .....	8
2.3	Correntes Elétricas da Magnetosfera e o Campo Geomagnético .....	9
2.3.1	Cinturões de Radiação Van Allen e a Dinâmica das Partículas .....	14
2.3.2	Componentes do Campo Magnético .....	18
3.	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA .....	23
3.1	Digissonda .....	23
3.2	Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) .....	28
3.3	Magnetômetro .....	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32
4.1	Explosões Solares .....	32
4.2	Respostas da Ionosfera Durante as Explosões Solares .....	33
4.2.1	Evento 1 – Dia 3/3/2023 .....	33
4.2.2	Evento 2 – Dia 9/1/2023 .....	37
4.2.3	Evento 3 – Dia 30/3/2022 .....	40
4.2.4	Evento 4 - Dia 11/2/2023 .....	43
4.2.5	Evento 5 – Dia 28/10/2021 .....	46
4.3	Ângulo Zenital .....	49
4.4	Variação das Componentes do Campo Geomagnético .....	50
5.	CONCLUSÃO .....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

Neste Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica intitulado “ESTUDO DA IONOSFERA TERRESTRE DURANTE EVENTOS DE CLIMA ESPACIAL POR MEIO DE SATÉLITES, SONDADORES DIGITAIS E MAGNÉTICOS” são apresentados os estudos realizados entre setembro de 2023 e julho de 2024. Os principais objetivos desse projeto referem-se à capacitação da bolsista nas áreas de desenvolvimento científico e tecnológico relacionados às Ciências Espaciais e Atmosféricas. Ademais, busca-se desenvolver as habilidades da bolsista na edição dos ionogramas obtidos em diferentes estações ionosféricas durante explosões solares (*flares*) e obter os parâmetros ionosféricos para compreender os efeitos causados pelo *flare*. Outro objetivo está relacionado a análise das componentes do campo geomagnético durante esses eventos de clima espacial.

O presente relatório está estruturado da seguinte forma: revisão teórica sobre o Sol e a Magnetosfera no Capítulo 2, instrumentações e metodologias no Capítulo 3, resultados e discussões no Capítulo 4. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho seguida pelas referências utilizadas.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta a revisão teórica sobre o Sol. Primeiramente será abordado o plasma e suas principais características. A estrutura interior e da atmosfera solar são abordadas em seguida. Serão discutidos alguns conceitos como os processos de aquecimento da atmosfera solar, o ciclo solar e seus períodos de máxima e mínima. Finalmente o famoso evento de Carrington é apresentado.

### 2.1 Plasma, Fenômenos Solares e Clima Espacial

O plasma é um estado físico da matéria que se assemelha a um gás com um grande número de partículas ionizadas, se tornando assim um material condutor com campo eletromagnético (BITTENCOURT, 2018). As partículas ionizadas e os elétrons presentes neste estado de matéria interagem entre si através de interações coletivas. Um exemplo, é o movimento de oscilação coletivo das partículas com uma frequência característica, que depende da densidade do plasma. As estrelas, como o Sol, são formadas desse tipo de matéria. A densidade média do Sol é de  $1,41 \text{ g/cm}^3$ , e a temperatura varia de forma significativa em suas diferentes camadas. Com relação as diversas camadas do seu interior e exterior, a Figura 2.1 mostra o núcleo, zonas de radiação e convecção, camada de transição, fotosfera, cromosfera e a coroa solar.

Figura 2.1 - Imagem ilustrativa da estrutura solar.

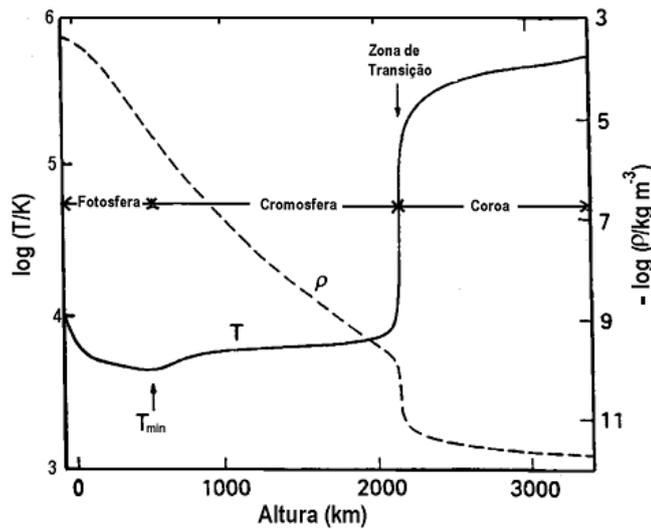


Fonte: Asth, (2020).

As regiões dentro do Sol são definidas através de como as energias são transferidas do núcleo para a superfície. O interior solar é subdividido em núcleo, zona radiativa e zona convectiva. No núcleo do Sol toda a energia é gerada por meio de reações de fusão nuclear, convertendo hidrogênio em hélio via cadeia próton-próton. A energia gerada no núcleo é liberada lentamente através da zona radiativa na forma de fótons. Na zona convectiva a energia é transportada principalmente por convecção, um processo onde o plasma quente sobe para a superfície, esfria e, em seguida, desce novamente.

As regiões da atmosfera solar são definidas por sua densidade e temperatura, como mostra a Figura 2.2. A atmosfera solar é subdividida em fotosfera, cromosfera e coroa solar. A fotosfera que é a primeira camada da atmosfera solar possui uma espessura de aproximadamente 500 km, já a cromosfera tem ~2,000 km. Entre ambas as regiões existe uma fina camada de transição. A parte mais externa da atmosfera solar é chamada de coroa solar, e seu tamanho não é bem definido. Considerando a estrutura solar, ao se distanciar do núcleo, onde é a fonte de energia do Sol, a expectativa é de redução da temperatura. Porém, a atmosfera terrestre apresenta um súbito aumento da temperatura na zona de transição. Na Figura 2.2 é possível observar o súbito aumento na temperatura e redução da densidade na zona de transição para a coroa solar em aproximadamente 2,000 km.

Figura 2.2 - Variação temperatura (linha contínua) e densidade (linha tracejada) da atmosfera solar em função da altura.



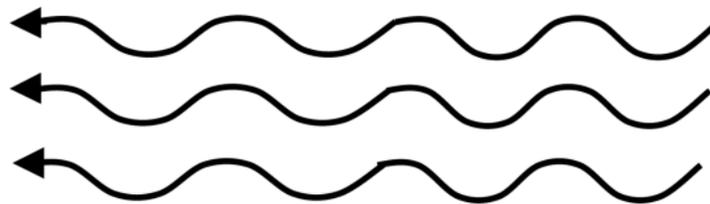
Fonte: Filho (2004).

Este comportamento incomum da variação da temperatura solar foi explicado por Biermann (1946) e Schwarzschild (1948). Eles acreditavam que o processo de aquecimento da atmosfera se dava através da dissipação de ondas de choque. Estes distúrbios seriam gerados por ondas sonoras na zona convectiva de hidrogênio e se propagariam em direção as camadas mais externas da atmosfera. Alfvén (1942) também apresentou um mecanismo para explicar o aquecimento da atmosfera solar. O método proposto por Alfvén envolve as ondas Alfvén, que se originam de perturbações no campo magnético solar e têm a capacidade de aquecer a alta atmosfera. O aquecimento da alta atmosfera solar não é executado por apenas um processo, e sim inúmeros mecanismos são responsáveis por este fenômeno. Assim, faz-se necessário apresentar os importantes tipos de onda presentes neste processo: acústicas, ondas Alfvén, e as magnetosônicas.

As ondas acústicas podem ser analisadas em fluidos não condutores sem a presença de campo magnético. Nas ondas sonoras, o fluido está sujeito a compressões e refrações, que serão descritas através de perturbações. A atenuação cresce com a frequência, cresce com o aumento da viscosidade do fluido, enquanto decresce com o aumento da velocidade do som.

O segundo tipo de onda responsável pelo aquecimento da alta atmosfera solar são as ondas Alfvén, como esquematizado na Figura 2.3. Elas são ondas que se propagam paralelamente ao campo magnético e podem ser geradas em qualquer fluido condutor, neste caso o plasma. A atenuação das ondas Alfvén aumenta com a frequência, enquanto a frequência diminui com a intensidade do campo magnético. Além disso, a atenuação também cresce com a viscosidade do fluido.

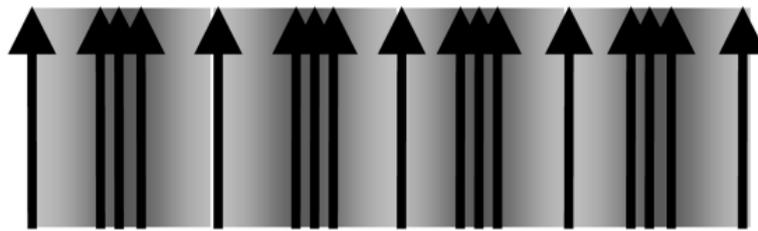
Figura 2.3 - Ondas Alfvén em um fluido condutor.



Fonte: Nelson et al. (2013)

O terceiro tipo de onda são as ondas magnetosônicas, cujo esquema é apresentado na Figura 2.4. Elas se assemelham às ondas sonoras. À medida que as ondas magnetosônicas se propagam criam-se regiões de compressão e rarefação, além de regiões com variações na intensidade do campo magnético. A atenuação das ondas magnetosônicas cresce com a frequência, e decresce com o aumento da intensidade do campo magnético.

Figura 2.4 - Ondas magnetosônicas propagando-se paralelamente ao campo magnético.

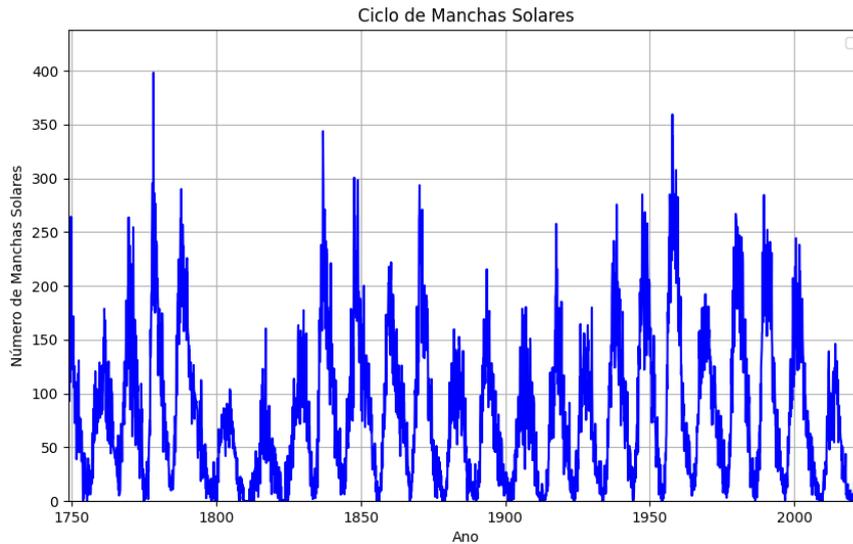


Fonte: Nelson et al. (2013).

Uma menor atenuação destas ondas mencionadas, significa um menor depósito de energia na atmosfera estelar, assim conseqüentemente, menor contribuição no processo de aquecimento da coroa solar. Quando a estrela possui um dínamo forte o suficiente para produzir um campo magnético intenso, as ondas Alfvén e magnetosônicas irão sofrer atenuação, logo irão contribuir menos para o processo de aquecimento da alta atmosfera estelar (NELSON et al., 2013).

O Sol também apresenta um ciclo de atividade solar, como mostra a Figura 2.5, que é caracterizado pelo número de manchas solares. Na média, o ciclo solar tem um período de 11 anos. Ele é dividido entre fases: máximo, mínimo e declínio. O máximo do ciclo acontece quando o número de manchas solares alcança seu pico. Nesse período, a probabilidade de ocorrer *flares* e ejeções de massa coronal aumenta e, conseqüentemente, há um aumento na densidade eletrônica da ionosfera. No mínimo solar a variação da atividade solar reduz, e o declínio acontece após o máximo solar, onde a atividade começa a reduzir até retornar ao mínimo solar.

Figura 2.5 – Variação do número de manchas solares entre os anos de 1749 e 2024.



Fonte: Autor.

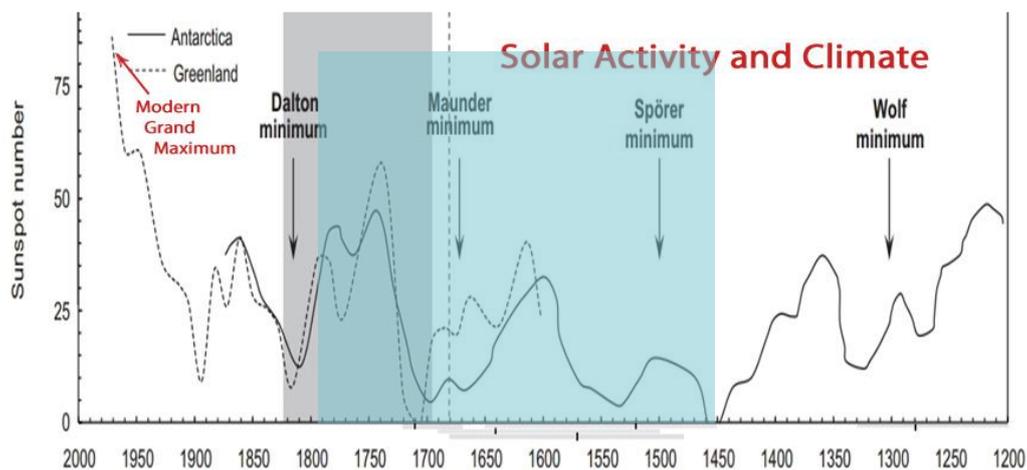
Quando o ciclo solar é analisado, pode-se observar períodos peculiares. Um desses períodos é conhecido como o Máximo Solar Medieval entre os séculos X e XIII. Nesse período, houve um aquecimento global relativamente breve. Estudos paleoclimáticos, que analisam registros naturais como anéis de árvores e sedimentos, sugerem que a atividade solar durante o Máximo Solar Medieval teve um grande impacto nas condições climática. Registros mostram que as temperaturas na Europa e em outras partes do Hemisfério Norte eram mais altas que a média.

O Máximo Solar Moderno foi identificado por Solanki et al. (2004) através da análise dos registros históricos de manchas solares e da atividade solar de 11.000 anos. O máximo solar moderno começou por volta de 1900 e se estendeu até 2008, sendo um dos períodos mais ativos da história recente do Sol. Durante esse período, houve um aumento significativo no número de manchas solares, com picos chegando a mais de 200 manchas por ciclo solar. Esse aumento também refletiu em uma maior ocorrência de ejeções de massa coronal (do inglês *Coronal Mass Ejection* - CME) e *flares*.

Em 1894 um Astrônomo Inglês Edward Walter Maunder, constatou que poucas manchas solares foram observadas durante o período de 1645 e 1715. Esse período ficou conhecido como Mínimo de Maunder (Figura 2.6). Esse mínimo coincidiu com a Pequena Idade do Gelo (início do século XIV até o fim do século XIX) que foi um período de

resfriamento no mundo. O mínimo de Sporer, outro período de poucas manchas solares, que aconteceu entre 1390 e 1550, também coincidiu com a Pequena Idade do Gelo (destacado pelo retângulo azul claro na Figura 2.6). Ambos os episódios coincidiram com os anos de menores temperaturas na Europa, mas a ausência de manchas solares não explicou a causa da ocorrência de baixas temperaturas em outras partes do mundo. Outro mínimo solar conhecido é o de Dalton, que aconteceu entre 1790 e 1830 e foi nomeado através do meteorologista inglês John Dalton. Durante o mínimo de Dalton ainda era possível observar o ciclo solar, porém durante o máximo solar o número de manchas solares era um terço do número durante ciclos normais. Durante os três ciclos que aconteceram durante o mínimo de Dalton, eles tiveram longos períodos de inatividade de manchas solares. Houve um período de resfriamento nos anos do mínimo de Dalton, mas cientistas apontam outros eventos para explicar tal ocorrência.

Figura 2.6 - Mínimos de manchas solares e Pequena Era do Gelo.



Fonte: Chen et al. (2015).

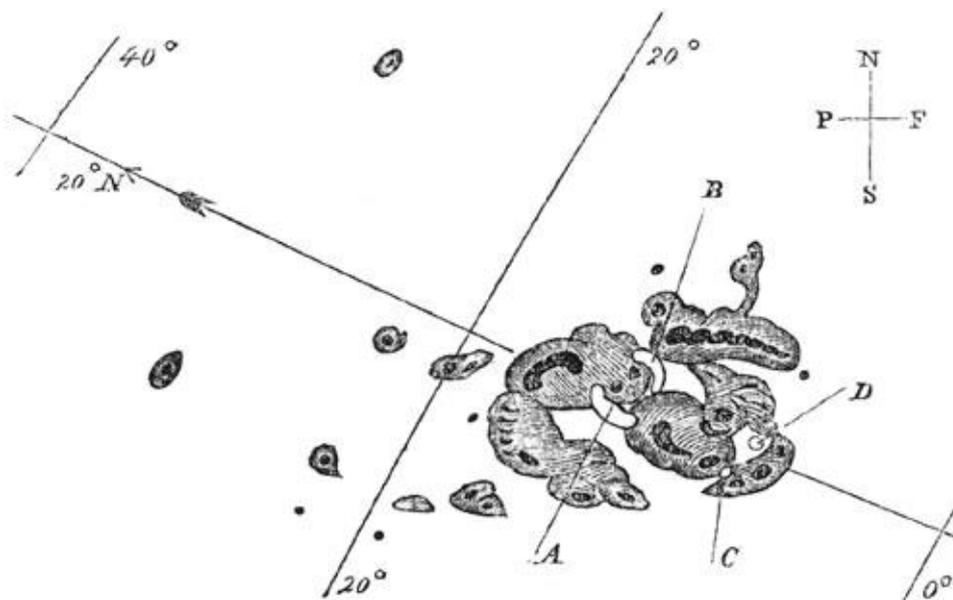
As manchas solares têm efeito no clima da Terra (KRIVOVA et al., 2010). A incidência de radiação ultravioleta aumenta em períodos com alto número de manchas solares. Ou seja, a ausência das manchas solares pode influenciar o clima da Terra. Mas a questão seria em que porcentagem essa influência atua no clima da Terra. Estudos mostram que durante o período de resfriamento da Terra, conhecido pela Pequena Idade do Gelo, ocorreram múltiplas explosões vulcânicas que impediram a entrada da radiação solar. Logo, múltiplos fatores podem ter causado este período de resfriamento, mas não se pode negar a influência das manchas solares no clima da Terra.

## 2.2 Evento Carrington

Em 1 de Setembro de 1839 aconteceu a maior explosão solar já registrada. Em função da imensa liberação de energia, testemunhas da América Central relataram que auroras boreais iluminavam seus jornais durante a noite. Telégrafos funcionavam sozinhos, e embora não houvesse muito aparelhos eletrônicos, fios de telégrafos queimaram (MOLDWIN, 2008). Se um evento do tipo Carrington viesse a ocorrer atualmente, o mundo tecnológico deixaria de existir em instantes, haveria um colapso nas redes de distribuição e geração de energia, satélites seriam totalmente inutilizáveis causando problemas na rede de comunicação e do sistema de localização (SANTARINE, 2014).

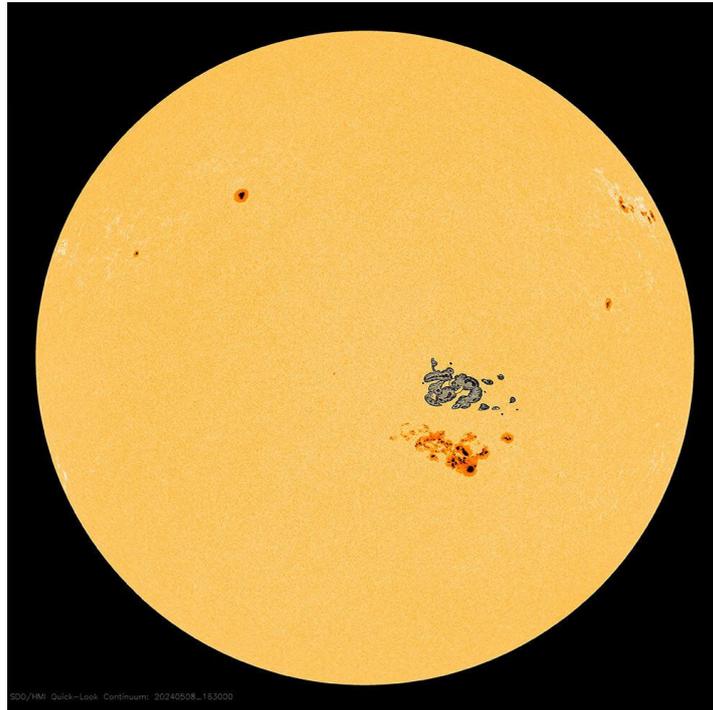
O tamanho e aparência da mancha solar, que foi registrada pelos astrônomos ingleses Richard C. Carrington e Richard Hodgson, como pode ser visto na Figura 2.7. Recentemente, foi registrado uma região ativa (AR3664) que alcançou o ápice de 62 manchas solares no dia 8/5/2024, a região se estendeu 200.000 km de uma extremidade a outra. A região ativa emitiu *flares* de até X8.79. A Figura 2.8 mostra uma comparação dessa mancha solar com a mancha observada por Carrington.

Figura 2.7 – Região ativa do dia 1/9/1859. "A" e "B" marcam as posições iniciais de um evento intensamente brilhante, que se moveu em 5 minutos para "C" e "D" antes de desaparecer.



Fonte: Carrington, 1860.

Figura 2.8 – Comparação entre as manchas solares de 1839 do evento Carrington e a mancha solar AR3664, observada no dia 8/5/2024.



Fonte: NASA via Spaceweather.

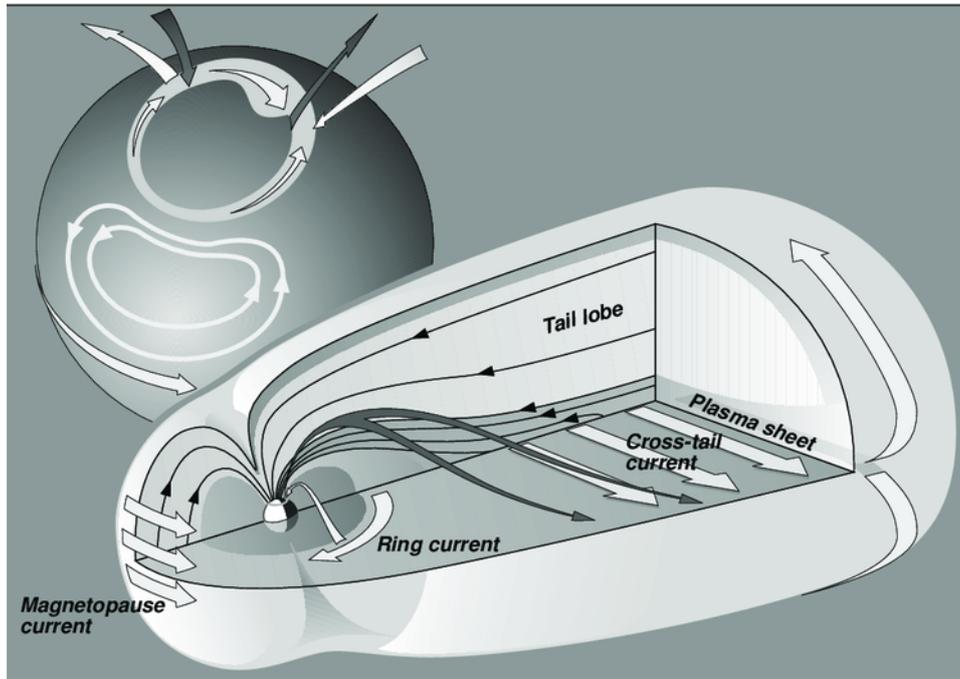
### 2.3 Correntes Elétricas da Magnetosfera e o Campo Geomagnético

A magnetosfera terrestre é definida como a região ao redor da Terra que é formada pela interação do vento solar com o campo magnético terrestre, resultando em uma estrutura que protege o planeta das explosões solares e CMEs (MOLDWIN, 2008). A magnetosfera é composta por várias sub-regiões e correntes elétricas, como mostra a Figura 2.9.

A corrente de anel é uma corrente elétrica de partículas carregadas localizada na magnetosfera terrestre entre 3 e 8 raios terrestres (DAGLIS, 2000). Ela se movimenta no sentido horário ao redor da Terra. O vento solar que está a todo momento interagindo com a magnetosfera é responsável pela formação desta corrente. A estrutura e intensidade da corrente de anel depende da intensidade dos parâmetros do vento solar. A depressão do campo geomagnético na região equatorial medida por magnetômetros, causada por uma CME, por exemplo, é proporcional ao aumento da corrente de anel e a consequente

intensificação do campo magnético oposto ao campo geomagnético. Essa depressão caracteriza uma tempestade magnética.

Figura 2.9 - Principais correntes da Magnetosfera.



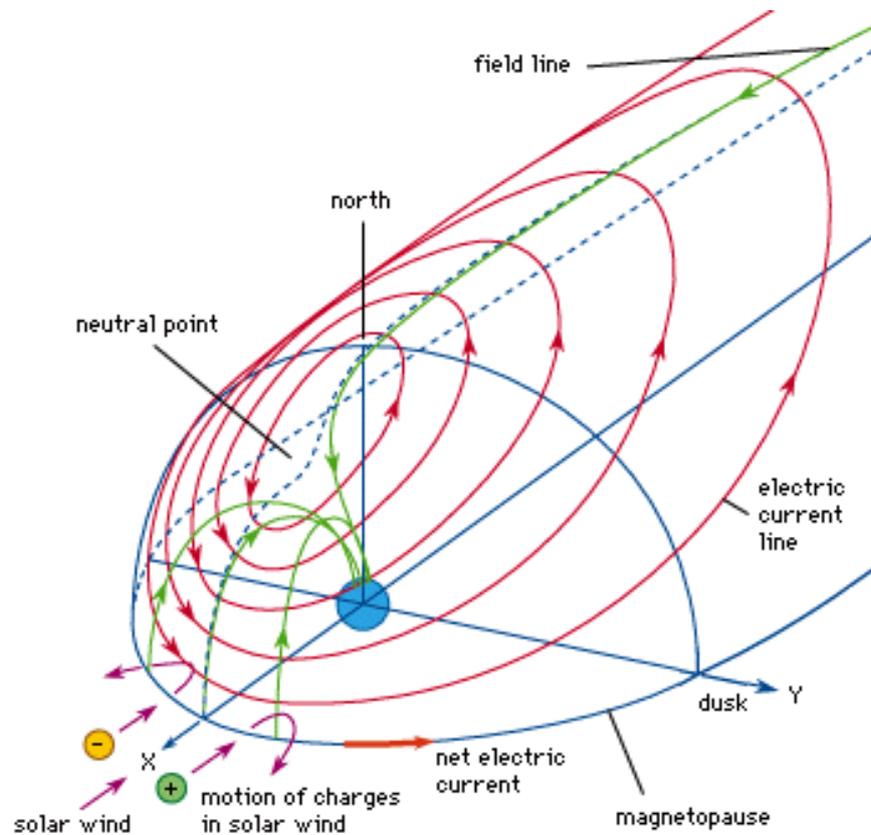
Fonte: Pulkkinen et al. (2007).

O índice que quantifica a intensidade das tempestades geomagnéticas, conhecido como *Disturbance storm time* (Dst), representa o nível de perturbação do campo geomagnético na região equatorial. Grandes perturbações no índice Dst (menores que 100 nT, por exemplo) são representadas por valores negativos em nT, ou seja, a depressão do campo em razão do aumento da corrente de anel (Gonzalez et al., 1994).

A corrente de Chapman-Ferraro, também conhecida como corrente da magnetopausa, é um sistema de corrente que tem o papel de confinar o campo magnético dentro da magnetopausa. Ela é formada pela penetração de íons e elétrons do vento solar no campo geomagnético. Devido a isso, a variação da pressão do vento solar afeta a intensidade desta corrente. Quando o vento solar se aproxima da magnetosfera, sua penetração no campo geomagnético é complicada devido a magnetopausa. Com a chegada das partículas carregadas do vento solar, os íons e elétrons são desviados das suas trajetórias pelo campo magnético da Terra, em sentidos opostos, criando assim uma corrente na região iluminada (*dayside*) da magnetosfera. As linhas da corrente Chapman-

Ferraro fecham ao longo do limite da magnetosfera, ou seja, em altas latitudes estas linhas passam pela parte superior da magnetosfera e na magnetocauda. Em baixas altitudes, a corrente se propaga por linhas de campo próximas, criando assim uma força externa na direção do Sol. Este sistema limita a interação do vento solar com o campo magnético terrestre. A corrente flui do ‘amanhecer’ para o ‘anoitecer’ em baixas latitudes e em altas latitudes flui no sentido oposto, conforme esquematizado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Posição da corrente Chapman-Ferraro.



Fonte: BRITANNICA. *Geomagnetic field - Magnetopause, Currents, Shielding*. 2024.

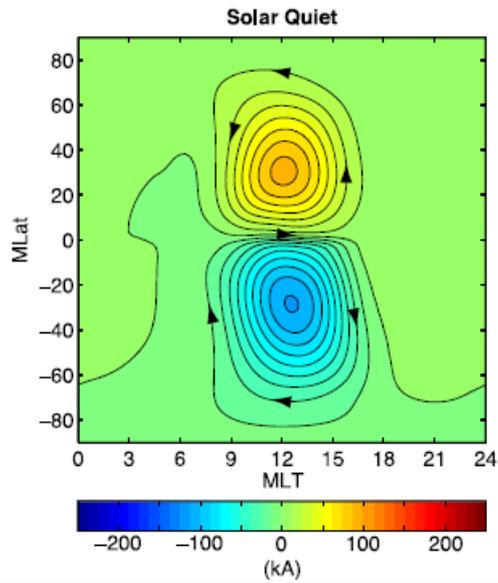
A variação na intensidade e direção do campo magnético interplanetário (do inglês *Interplanetary Magnetic Field - IMF*) afeta o nível de interação e conexão entre o meio interplanetário e o campo magnético. Quando a componente  $B_z$  do IMF está na direção do norte, a corrente é ordinária, ou seja, uma única corrente uniforme nas linhas de campo magnetosférico, esta é uma corrente de Chapman-Ferraro clássica. Em ocasiões em que o IMF está na direção do sul, temos o processo de reconexão magnética, onde as linhas

de campo do IMF conectam-se com o campo magnético da Terra que tem sua direção ao norte. Assim, quando a componente  $B_z$  está na direção sul, a corrente da magnetopausa é dividida em três regimes. O primeiro regime é a corrente externa de Chapman-Ferraro, localizada em linhas de campo abertas. O segundo regime da corrente é semelhante a situação quando o IMF aponta ao norte, ou seja, é uma corrente única e uniforme nas linhas de campo fechadas. O terceiro regime consiste em uma mudança contínua nos valores das componentes do campo até alcançarem seus valores magnetosféricos.

As variações diárias no campo geomagnético dependem da latitude e são causadas principalmente pela interação do campo magnético com os ventos solares e lunares e também por correntes ionosféricas do dínamo. A ação dos ventos de marés na atmosfera terrestre induz correntes elétricas na ionosfera que produzem um sistema de campo magnético adicional na superfície terrestre. A radiação solar não apenas ioniza a atmosfera terrestre como também a aquece, dessa maneira gera os ventos de marés térmicas. Estes ventos, em conjunto com os ventos de maré gerados pela interação gravitacional Sol e Lua, geram correntes na ionosfera. Estas correntes presentes na ionosfera terrestre são as principais responsáveis pelas variações geomagnéticas diárias. Variação magnética governada pelo Sol ( $S_q$ ) e a variação governada pela Lua ( $L$ ). As correntes ficam presentes na região E da ionosfera por ser a região mais condutiva da ionosfera.

A corrente  $S_q$  é um sistema de correntes elétricas presentes na ionosfera, que são geradas pela radiação solar, correntes “*solar quiet*”. Elas possuem essa nomenclatura em razão que suas variações diurnas são apenas de possível visualização em períodos “calmos” (YAMAZAKI et al., 2016). O padrão de variação geomagnética causada por esse sistema de correntes varia de acordo com a latitude. As correntes  $S_q$  formam dois vórtex no lado iluminado da Terra, o vórtex no hemisfério Norte é no sentido anti-horário e o vórtex no hemisfério Sul é no sentido horário, como é possível observar na Figura 2.11.

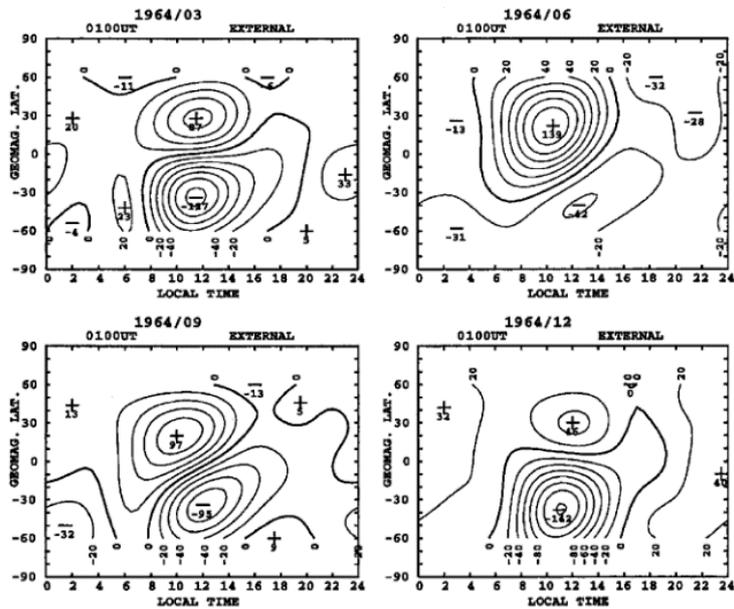
Figura 2.11 - Simulação das correntes Sq pelo *Global Scale Wave Model (GSWM)*.



Fonte: Heelis e Maute (2020).

A radiação solar afeta a intensidade das correntes Sq e também a sua posição nos hemisférios, durante o mínimo solar a posição dos vértices se aproxima do polo no hemisfério norte (SHIRAKI et al., 1973). Durante o verão, a amplitude da corrente Sq é maior do que no inverno, como pode ser observado na Figura 2.12.

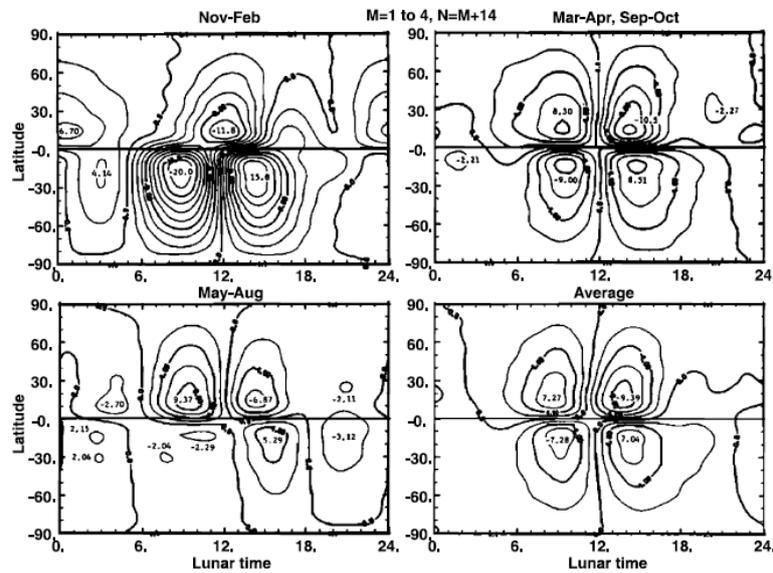
Figura 2.12 - Média equivalente do Sq nos meses de março, junho, setembro e dezembro.



Fonte: Takeda et al. (1999).

O sistema de correntes L consiste em um conjunto de quatro vórtex, dois no hemisfério Norte e dois no hemisfério Sul (Figura 2.13). A principal fonte responsável pela geração destas correntes são as marés lunares, que ocorrem em razão da força gravitacional gerada pela Lua. As variações geomagnéticas causadas por esse sistema de corrente são muito pequenas em comparação com as variações das correntes Sq. Na Figura 2.13 é possível observar as variações de intensidade do sistema de corrente L na mudança de estação nos dois hemisférios. Semelhante ao Sq as correntes L aumentam a intensidade no hemisfério que se encontra no verão.

Figura 2.13 - Média equivalente de L durante julho 1957–dezembro 1959.

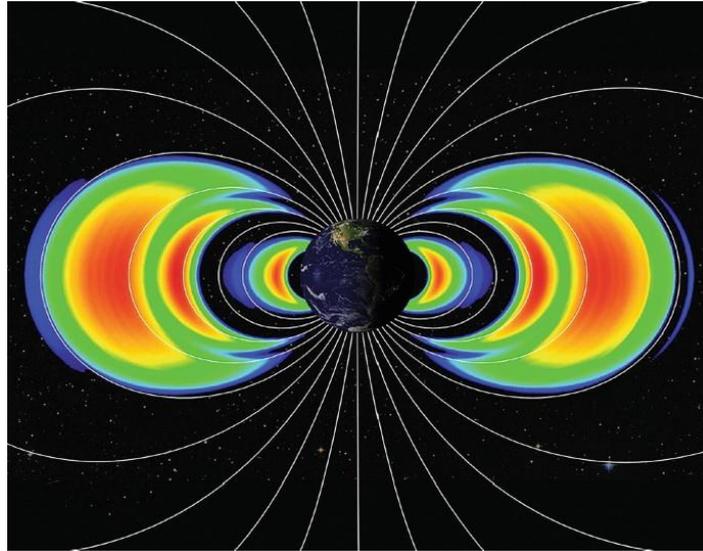


Fonte: Matsushita and Xu. (1984).

### 2.3.1 Cinturões de Radiação Van Allen e a Dinâmica das Partículas

Os cinturões de Van Allen são regiões de grande concentração de partículas carregadas aprisionadas pelo campo geomagnético. O formato destes cinturões segue as linhas de campo magnético terrestre (Figura 2.14). O cinturão mais próximo não possui muita instabilidade logo geralmente localiza-se em aproximadamente 2-3 raios terrestres e é predominado por prótons. Os prótons presentes nesta região são de origem do decaimento de nêutrons que são emitidos pela atmosfera na interação com raios cósmicos. Porém, o cinturão mais externo muda de acordo com a atividade solar, variando rapidamente de extensão, podendo variar entre 3-9 raios terrestres.

Figura 2.14 - Ilustração dos cinturões de radiação Van Allen.



Fonte: NASA Centro de Voo Espacial Goddard – Universidade Johns Hopkins.

Os cinturões sobrepõem diferentes regiões plasmáticas da magnetosfera, como a plasmasfera, a corrente de anel e o plasma *sheet*. Regiões que variam de localização e intensidade de acordo com a intensidade do vento solar. Quando as partículas estão no campo magnético elas descrevem três movimentos principais: giro ao redor da linha de campo, movimento entre os polos de espelhamento e deriva em torno da Terra (MARIA et al., 2020). Para que suas propriedades de movimento sejam compreendidas é necessário entender o comportamento do campo magnético, como o conceito de Força de Lorentz.

O campo magnético em uma região do espaço exercerá uma força sobre cargas em movimento. Esta força é descrita pela Lei de Lorentz que estabelece que a força é perpendicular à direção do movimento da partícula, bem como ao campo magnético. A lei é dada pela equação:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

onde  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico criado pelas partículas em movimento,  $\mathbf{v}$  a velocidade da partícula e  $\mathbf{B}$  o campo magnético. As partículas carregadas ao entrarem em contato com o campo geomagnético experimentam a força de Lorentz.

O módulo da força magnética é dado por  $F_m = qBv$  considerando que o ângulo entre a velocidade da partícula e o campo magnético é  $90^\circ$ . Se uma partícula executa um movimento circular uniforme (MCU) com aceleração centrípeta igual a  $v^2/R$ , onde  $R$  é

o raio da trajetória, é possível obter uma equação através da segunda lei de Newton para o raio, dada por:

$$R = \frac{mv}{|q|B} \quad (2.2)$$

Onde a carga está em módulo para ser um resultado geral, se a partícula for negativa ela apenas muda o sentido da rotação. Utilizando que a velocidade ( $v$ ) em função da velocidade angular ( $\omega$ ) é dada por como  $v = R\omega$ , pode-se obter que a velocidade angular:

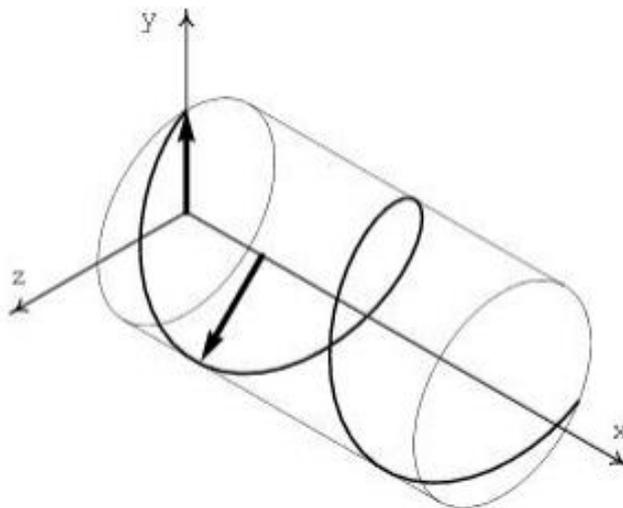
$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m} \quad (2.3)$$

Giro frequência é a frequência com que a partícula carregada gira em torno das linhas de campo, dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{|q|B}{2\pi m} \quad (2.4)$$

Se a partícula não apresentar um ângulo de  $90^\circ$  ao incidir na região de campo magnético, a velocidade da partícula terá uma componente paralela ao campo que provoca um deslocamento da partícula. O seu movimento será helicoidal, como mostra a Figura 2.15.

Figura 2.15 - Trajetória helicoidal de uma partícula positiva adentrando obliquamente um campo magnético uniforme.

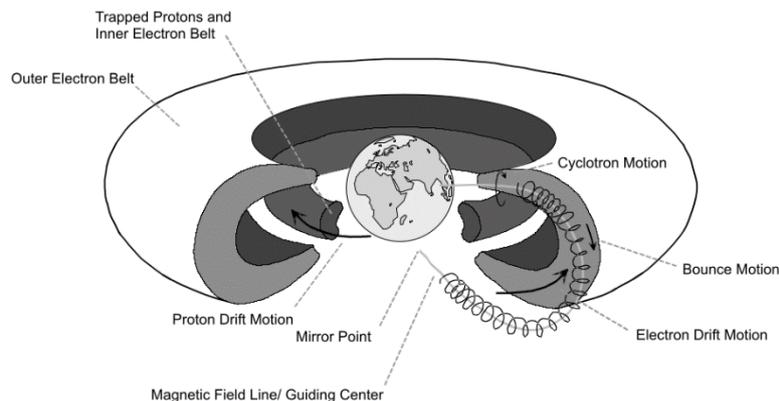


Fonte: Macedo et al. (2021).

Se o campo magnético for estático as partículas carregadas demonstrarão a trajetória helicoidal perfeita, em campos variáveis como no caso do campo geomagnético, a trajetória pode sofrer alterações que serão maiores quanto maior for a amplitude da perturbação.

O campo geomagnético é variável, isto é, apresenta variações temporais e espaciais, ele atinge sua intensidade máxima nos polos. Essas duas regiões de intensidade máxima atuam como espelhos magnéticos. As partículas do vento solar são aprisionadas nesses espelhos, pois a força magnética que elas experimentam causa o seu movimento a ser retardado e eventualmente forçando que o sentido do movimento da partícula mude (Figura 2.16). Formando assim os cinturões de radiação de Van Allen.

Figura 2.16 - Movimento das partículas carregadas nos cinturões de radiação Van Allen.



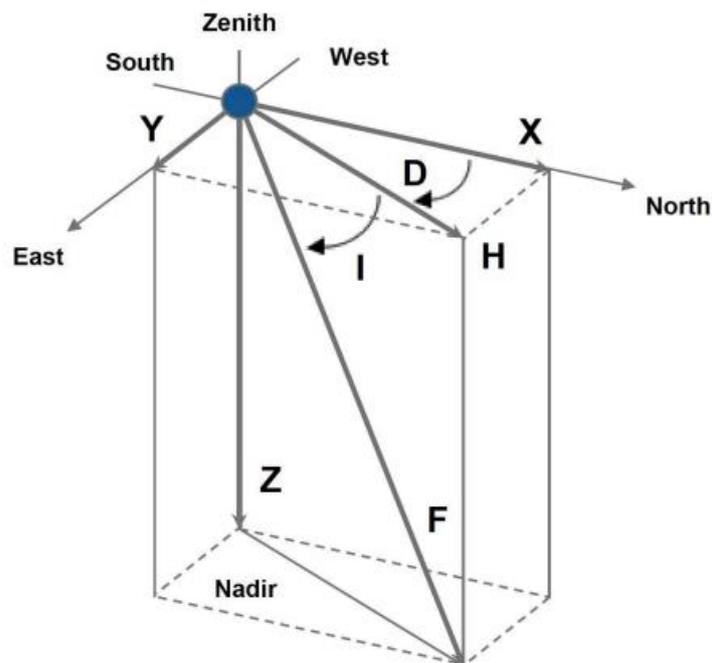
Fonte: Benton et al. (2001).

O gradiente do campo magnético é a variação da intensidade do campo magnético ao longo do espaço. Quando uma partícula carregada se move em tal campo, ela experimenta uma força diferente em diferentes pontos ao longo de sua trajetória. A força de Lorentz não é simétrica, ela se manifesta de maneira diferente em um campo variável. Dessa forma, resulta em uma componente de movimento perpendicular tanto a direção do campo magnético tanto ao gradiente deste. Devido a este fenômeno, as partículas carregadas tendem a se mover em relação ao gradiente do campo geomagnético, onde elas seguem direções opostas dependendo de sua carga. A gradiente do campo geomagnético é também o que impulsiona o movimento helicoidal das cargas ao redor das linhas de campo.

### 2.3.2 Componentes do Campo Magnético

O vetor do campo magnético é decomposto em componentes de um sistema cartesiano, onde  $X$  tem direção norte - sul geográfico, onde o sentido norte é o positivo,  $Y$  tem direção leste - oeste geográfico, onde o sentido leste é o positivo. A componente  $Z$  aponta para o centro da Terra sendo o seu positivo o mesmo sentido (CARVALHO et al., 2014), como mostra a Figura 2.17. A componente horizontal ( $H$ ) é a projeção da intensidade total do campo ( $F$ ) no plano  $XY$ . O ângulo entre a componente horizontal ( $H$ ) e a direção do norte geográfico ( $X$ ) é chamado de ângulo de declinação ( $D$ ). O ângulo entre a componente horizontal ( $H$ ) e a intensidade total do campo ( $F$ ) é chamado de ângulo de inclinação ( $I$ ).

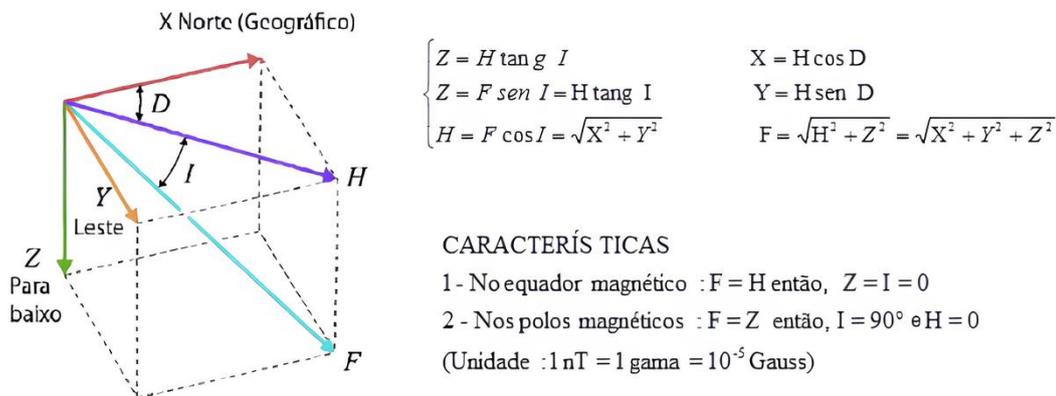
Figura 2.17 - Principais componentes do campo magnético.



Fonte: Chulliat, et al. (2020).

As componentes do campo geomagnético podem ser obtidas conforme o conjunto de equações mostradas na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Elementos do campo geomagnético em forma de sistema e suas características.



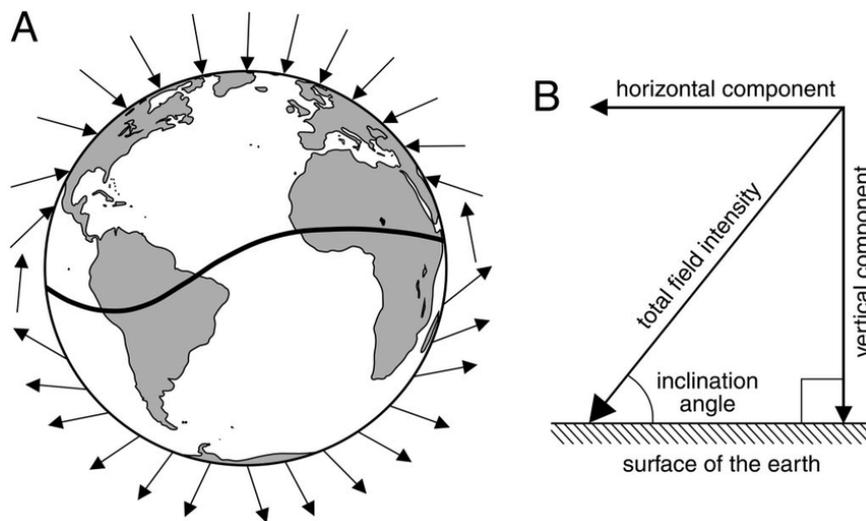
Fonte: Carvalho et al. (2014).

No presente trabalho são analisadas quatro componentes: vertical ( $Z$ ), horizontal ( $H$ ), inclinação ( $I$ ) e declinação ( $D$ ). A magnitude da componente vertical ( $Z$ ) é significativamente inferior a componente horizontal ( $H$ ) e leste ( $D$ ) do campo geomagnético. Apresenta uma variação diária inferior as outras componentes cilíndricas  $H$  e  $D$ . Aponta na direção vertical para baixo, em direção ao centro da Terra. A componente horizontal ( $H$ ) atua paralela à superfície terrestre, sua intensidade apresenta variações diárias, são influenciadas pela posição do solar. A intensidade da componente atinge seu pico por volta das 15:00h (UT) e diminui ao anoitecer.

A inclinação magnética ( $I$ ) é o ângulo que a linha de campo magnético faz com a superfície terrestre, variando de  $0^\circ$  no equador magnético a  $90^\circ$  nos polos magnéticos. Esta inclinação pode causar erros na bússola, quanto mais próximo dos polos magnéticos, maior será a inclinação magnética, assim ocorrendo um aumento significativo de erros de leitura da bússola (MARANGONI et al., 2013). Isso ocorre em função da dificuldade da agulha da bússola se alinhar corretamente com o campo magnético para indicar norte e sul. O estudo das auroras também está relacionado a esta inclinação. O ângulo da inclinação determina o local do oval auroral que são locais com mais chance de ocorrerem auroras (boreais e austrais) em função da maior inclinação das linhas de campo, ou seja, região com a maior entrada de partículas carregadas provenientes do vento solar.

Na Figura 2.19 (a) mostra uma representação de como as linhas de campo intersectam a superfície terrestre, e como o ângulo de inclinação varia de acordo com a latitude. Na Figura 2.19 (b) tem-se duas componentes, que são o ângulo de inclinação e a intensidade total do campo. Esta segunda componente pode ser descrita em dois vetores, a intensidade do campo horizontal e a intensidade do campo vertical.

Figura 2.19 - (A) Variação da inclinação magnética de acordo com a latitude, (B) Principais componentes do campo magnético.



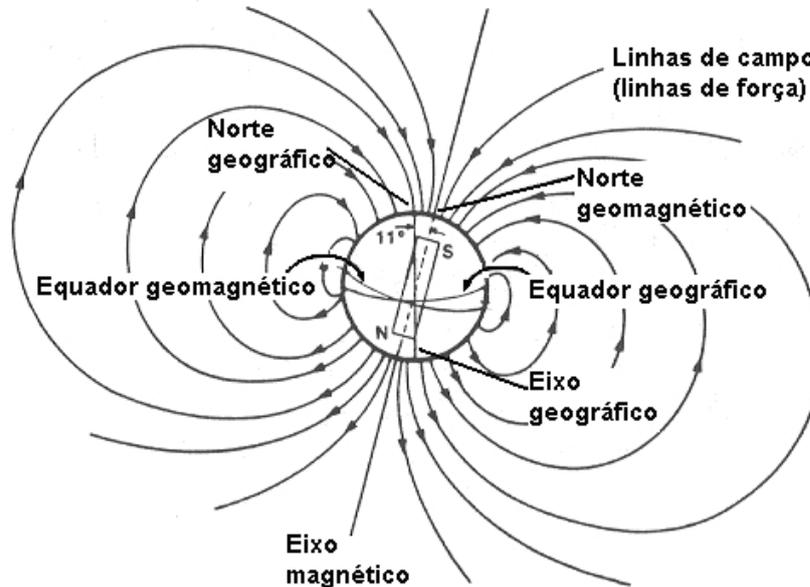
Fonte: Lohmann et al. (2009).

A inclinação magnética também determina o equador magnético, que é uma linha imaginária onde o ângulo de inclinação magnética é  $0^\circ$ , ou seja, o campo magnético é horizontal. Este fenômeno também se chama *dip equador*. Ao contrário, o equador geográfico é uma linha imaginária que é equidistante aos polos norte e sul geográficos, e com uma latitude de  $0^\circ$ . O dip equador tem a maior distância do equador geográfico na região da América do Sul. Esta diferença está ligada a eletrodinâmica da região equatorial ionosférica, uma consequência das correntes de eletrojetos equatoriais. Na Figura 2.20 é possível observar a diferença entre o equador dip e o equador geográfico.

Através das esféricas harmônicas do modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), Rangarajan et al. (2020) mostrou mudanças seculares da posição do dip equador magnético ao longo do século XX, em setores: América, África e Índia. Destacando que os fatores determinantes desta mudança são mudanças nas componentes

do campo geomagnético. Assim confirmando taxa de mudança longitudinal de aproximadamente  $0,22^\circ$  por ano.

Figura 2.20 - Representação visual dos eixos magnéticos e geográficos.



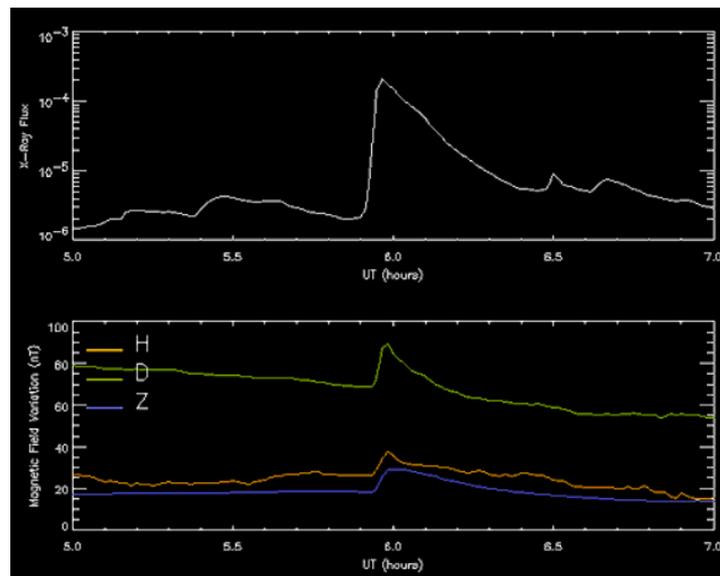
Fonte: Marques et al. (2009).

A declinação magnética ( $D$ ), também chamado de variação magnética, é um ângulo entre o norte magnético e o norte geográfico. A declinação é positiva quando o ângulo está a leste do norte geográfico e negativo quando está a oeste. A declinação magnética é a direção e variação entre os dois nortes. O tamanho e direção da declinação depende de quanto alinhado os dois nortes estarão em uma determinada região. Quando estes dois polos se alinham, tem-se declinação  $0^\circ$ . Esta linha em específico chama-se de linha agônica.

As componentes do campo geomagnético podem apresentar uma variação repentina e transitória. O fenômeno é conhecido como crochê magnético (CURTO, 2020). As emissões de radiação dos *flares* são as principais fontes desta variação em função do aumento da densidade eletrônica na baixa ionosfera. A alteração súbita da densidade na ionosfera é conhecida como Distúrbio Ionosférico Súbito (*Sudden Ionospheric Disturbances*, SID). Estas variações da densidade provocam um aumento na condutividade da ionosfera assim ocorre um acréscimo na geração de correntes adicionais. Dessa maneira, acontecendo as variações súbitas nas componentes. Estes

fenômenos são difíceis de serem detectados, pois é necessário um *flare* de grande intensidade para provocar estas variações súbitas. Na Figura 2.23 tem-se um exemplo de crochê magnético observado as 6:00 (UT) do dia 4 de novembro de 1997 em Camberra, Austrália, causado por um *flares* de classe X.

Figura 2.21 - Gráficos representativos da ocorrência do fenômeno do crochê magnético.



Fonte: IPS – Radio and Space Services.

A variação das componentes do campo geomagnético ao receber o impacto de um *flare* solar, depende de fatores como o horário local da estação observada, o ângulo zenital solar, a posição da estação em relação ao equador magnético, a localização da explosão no Sol e a intensidade do *flare* (Grodji et al., 2022).

De acordo com Santos et al. (2009), quanto mais próximo ao meio-dia local o horário da ocorrência do evento explosivo, sendo 15:00 UT no horário de Brasília, maior é a possibilidade e a intensidade da ocorrência de súbitas variações. No estudo mencionado a autora identificou que as componentes magnéticas apresentaram um certo comportamento para o impacto dos *flares* estudados. A componente *H* do campo magnético apresentou um aumento em todos os casos, a componente *D* exibiu um acréscimo quando ocorrido após o meio-dia local e um decréscimo quando ocorrido antes do meio-dia. A componente *Z* não apresentou nenhum comportamento característico.

### 3. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

#### 3.1 Digissonda

O principal instrumento utilizado no estudo da ionosfera terrestre durante evento de clima espacial é a Digissonda de modelo DPS-4D (*Digisonde Portable Sound 4D*) (REINISCH et al., 2009). É o modelo desenvolvido em Lowell, MA, EUA, criado nos anos de 1970, o radar possui transmissores e receptores digitais. Através desta ionossonda digital são obtidos os dados necessários para o estudo através de gráficos com leituras diárias da ionosfera local. As Digissondas utilizadas neste trabalho (Figura 3.1) estão em Santa Maria (29.7°S, 53.8°O) (MORO et al., 2019), Ascension Island (8.0°S, 14.4°O) (Mendillo e Baumgardner (1982)) e, Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O) e Fortaleza (3.8°S, 38°O) (NETO et al., 1999).

Figura 3.1 - Localização das Digissondas utilizadas no trabalho.



Fonte: Autora

A Digissonda é um instrumento que utiliza técnicas de radar ao emitir impulsos de energia eletromagnética em diferentes frequências, entre 1 e 30 MHz, os sinais são

transmitidos verticalmente na direção da ionosfera através de uma antena delta cruzada (Figura 3.2). Um conjunto de quatro antenas receptoras (Figura 3.3) de dipolo magnético cruzado recebem os impulsos, as antenas são distribuídas em um formato de triângulo equilátero de 45 a 60 metros com a quarta antena localizada no meio do triângulo, a forma do triangular é utilizada para reduzir interferências. As antenas receptoras possuem um amplificador de sinal embutido na parte inferior da estrutura da antena. Os dados coletados pela Digisonda são ecos do sinal refletido pelas camadas ionosféricas, estes são mantidos na central digital (Figura 3.4). A sequência dos sinais recebidos forma os ionogramas, gráficos da altura virtual em função da frequência emitida pela Digisonda. A leitura das frequências transmitidas fornece informações sobre a densidade de elétrons livres em função da altura

Figura 3.2 - Antena transmissora delta, da Digisonda instalada em Santa Maria.



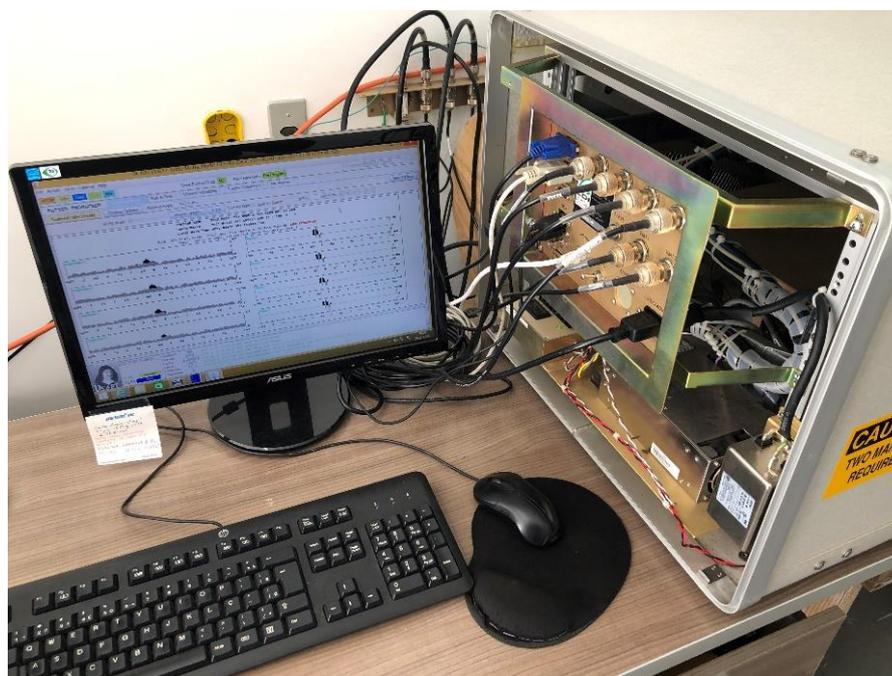
Fonte: Valcorte, (2023).

Figura 3.3 - Uma das quatro antenas receptoras da Digissonda de Santa Maria.



Fonte: Valcorte, (2023).

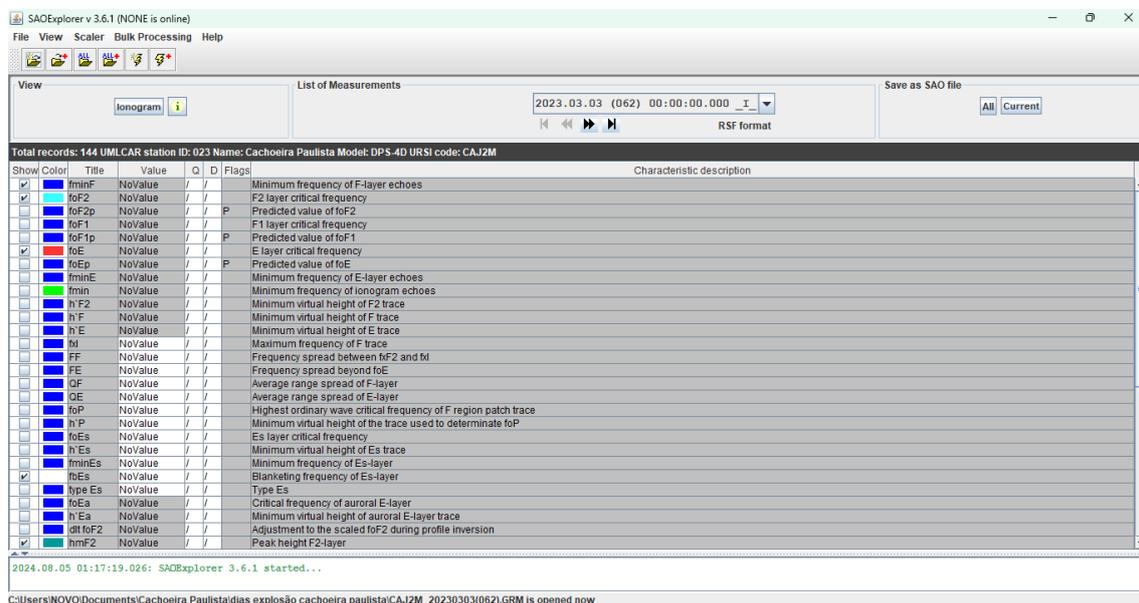
Figura 3.4 – Parte eletrônica da Digissonda de Santa Maria.



Fonte: Valcorte, (2023).

Na análise dos dados obtidos pela Digisonda é utilizado o software de edição manual de ionogramas SAO Explorer. Esse software possui um programa de processamento dos dados que analisa automaticamente os ionogramas chamado de *Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True height (ARTIST) software*. A análise manual dos ionogramas ainda deve ser feita pois o ARTIST pode estar sujeito a fornecer valores errados dos parâmetros ionosféricos. Com os dados obtidos pela Digisonda é possível determinar diversos parâmetros da ionosfera Na Figura 3.5 estão presentes os 49 parâmetros disponíveis para a análise, que se encontram na página inicial do programa.

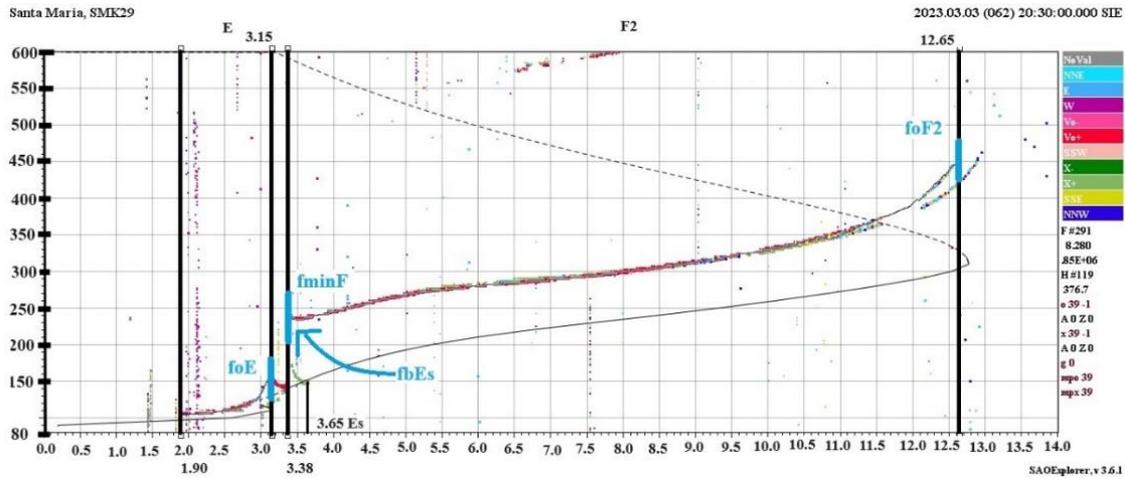
Figura 3.5 – Interface do SAO-Explorer.



Fonte: Autor

Os parâmetros utilizados para a análise da ionosfera durante eventos de clima espacial são: a frequência crítica da região F (foF2) e sua frequência mínima (fminF), a altura do pico da densidade eletrônica (hmF2), frequência crítica da região E (foE), e frequência de bloqueio da camada Esporádica (fbEs). Esses parâmetros ionosféricos podem ser identificados no ionograma da Figura 3.6. Para esse ionograma, obtido no dia 3/3/2023, o parâmetro foF2 é 12,5 MHz, hmF2 é ~320 km, foE tem o valor de 3.15 MHz. Além disso, o parâmetro fminF é igual ao parâmetro fbEs com valor de 3,4 MHz. No entanto, isso não ocorre geralmente.

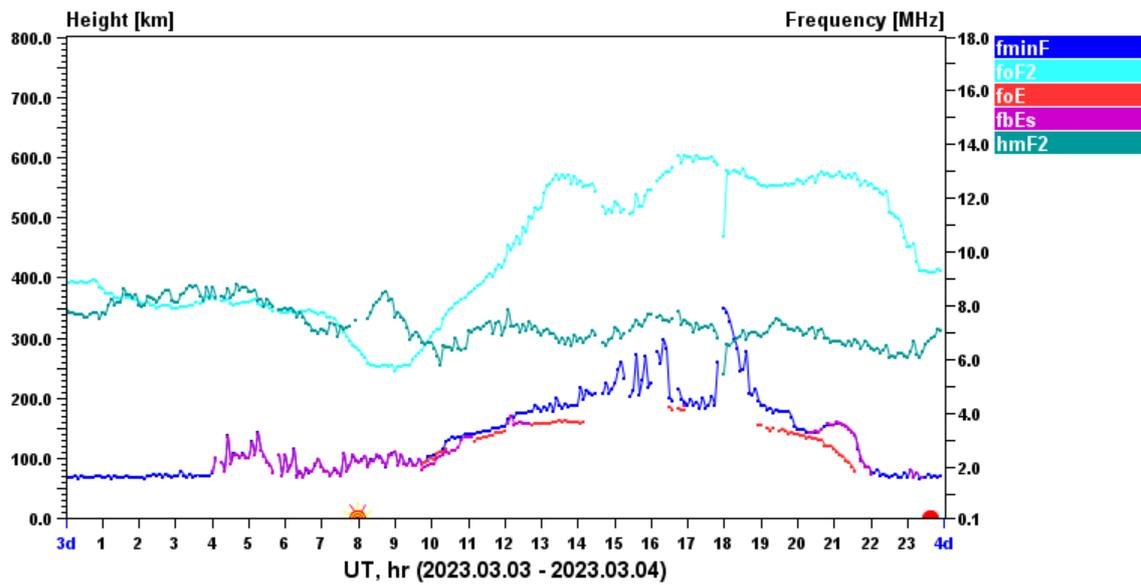
Figura 3.6 – Identificação dos parâmetros utilizados no Ionograma.



Fonte: Autor

Após a edição dos ionogramas com o SAO-Explorer, um gráfico dos parâmetros pode ser obtido como mostra a Figura 3.7.

Figura 3.7 - Parâmetros foF2, hmF2, foE e fbEs do dia 3/3/2023 obtidos em Santa Maria.



Fonte: Autor

Para cada um dos eventos estudados neste trabalho foi realizada a análise da variação percentual de cada parâmetro. Como exemplo, a variação percentual do parâmetro foF2, dada por  $\Delta foF2$ , é calculada pela Equação 3.1:

$$\Delta f_{oF2} = \frac{foF2_{flare} - foF2_{ref}}{foF2_{ref}} \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1,  $foF2_{flare}$  é o termo que se refere ao parâmetro foF2 obtido no dia de ocorrência da explosão solar e  $foF2_{ref}$  é a média do parâmetro foF2 obtido de cinco dias geomagneticamente calmos. Equações similares são empregadas para os demais parâmetros para obter suas variações percentuais:  $\Delta f_{minF}$ ,  $\Delta hmF2$ ,  $\Delta foE$ , e  $\Delta fbEs$ .

### 3.2 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)

A missão dos satélites GOES são montados e lançados pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e são operados pelo *National and Atmospheric Administration* – NOAA. As medidas responsáveis pela entrada do fluo de raios-x no meio interplanetário são feitas pela frota de satélites desde 1986, mas são feitas por NOAA desde 1974.

A série-R dos satélites GOES é a mais nova e avançada frota de satélites geoestacionários para observações climáticas. Um instrumento dessa frota de satélites é o *EXIS-Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors*, são sensores importantes para o monitoramento solar e sua propagação das partículas para a alta atmosfera terrestre. Este é composto por dois sensores principais um destes sensores é o *X-Ray Sensor (XRS)*, uma peça de grande importância para o monitoramento do fluxo de raios-x. O satélite utilizado na identificação dos flares deste trabalho é o GOES-16. (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Satélite GOES-16.



Fonte: NASA *Participates in the NOAA GOES-16 Field Campaign*.

As medidas de radiação são obtidas por dois compartimentos do satélite preenchidos com partículas que detectam o aumento da radiação solar. Com as medidas de intensidade do fluxo de radiação solar dada em Watt/m<sup>2</sup>, é possível determinar a classificação de um *solar flare* conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação dos *flares* em relação a intensidade de entrada de fluxo de raios-x na atmosfera.

Classe de um <i>solar flare</i>	Intensidade do fluxo (Watt/metro <sup>2</sup> )
<b>A</b>	$I < 10^{-7}$
<b>B</b>	$10^{-7} \leq I < 10^{-6}$
<b>C</b>	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
<b>M</b>	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
<b>X</b>	$I \geq 10^{-4}$

### 3.3 Magnetômetro

A rede Embrace de Magnetômetros (Embrace MagNet) é uma iniciativa voltada para a observação e estudo das variações geomagnéticas na América do Sul (DENARDINI et al., 2016). Essa rede conta com a operação de magnetômetros do tipo "fluxgate" que são instrumentos utilizados na medição da intensidade e direção do campo geomagnético. As estações são estrategicamente posicionadas para cobrir a porção leste do setor longitudinal da América do Sul. O magnetômetro utilizado neste estudo está localizado no Observatório Espacial do Sul (OES, 29° S, 53° O), em São Martinho da Serra, RS, e está em operação desde junho de 2013.

Cada estação magnética é composta por um magnetômetro de três eixos do tipo *fluxgate*. O sensor que é enterrado a 1 metro de profundidade, abaixo de uma cobertura feita para proteção contra chuva, ventos e exposição solar (Figura 3.9a). O cabo que conecta o sensor magnético ao sistema de controle é selado e enterrado a 20 cm de profundidade para evitar a exposição solar. O sistema de controle e o computador para o armazenamento dos dados e transferência dos dados via servidor FTP de Internet estão instalados a aproximadamente 50 metros de distância do sensor (Figura 3.9b).

Figura 3.9 – Magnetômetro da Rede Embrace instalado no Observatório Espacial do Sul: (a) sensor magnético enterrado a 1 m de profundidade embaixo de uma proteção de madeira. (b) sistema de controle com uma central digital que armazena os dados.



Fonte: Denardin et al. (2016).

Neste presente trabalho foram utilizados dados do sondador magnético do OES para analisar as variações das componentes do campo geomagnético durante os eventos de *flare* selecionados. As componentes horizontal ( $H$ ) e vertical ( $Z$ ) do campo geomagnético e os ângulos de declinação ( $D$ ) e inclinação ( $I$ ) foram obtidas e analisadas. Para as componentes  $H$  e  $Z$  foram calculadas as variações das componentes em relação ao pré flare, conforme metodologia apresentada por Taat et al. (2019), através das seguintes equações:

$$\Delta H_{sfe} = H_{max} - H_{min} \quad (3.2)$$

$$\Delta Z_{sfe} = Z_{max} - Z_{min} \quad (3.3)$$

$$\Delta H_0 = H_{min} - H_{00} \quad (3.4)$$

$$\Delta Z_0 = Z_{min} - Z_{00} \quad (3.5)$$

Nessas equações,  $H_{max}$  e  $Z_{max}$  são os valores das componentes no horário do pico da explosão,  $H_{min}$  e  $Z_{min}$  são os valores das componentes do campo no começo da explosão solar e  $H_{00}$  e  $Z_{00}$  são os valores das componentes a meia noite. Se a razão entre  $\Delta H_{sfe}$  e  $\Delta H_0$  for maior que zero, implica que  $\Delta H_{sfe}$  é maior que  $\Delta H_0$ , sugerindo que houve uma intensificação do campo geomagnético com o impacto do *flare*. A variação das componentes  $I$  e  $D$  também são analisadas da mesma forma, utilizando o método empregado por Taat et al. (2019):

$$\Delta D_{sfe} = D_{max} - D_{min} \quad (3.6)$$

$$\Delta I_{sfe} = I_{max} - I_{min} \quad (3.7)$$

$$\Delta D_0 = D_{min} - D_{00} \quad (3.8)$$

$$\Delta I_0 = I_{min} - I_{00} \quad (3.9)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente seção são apresentados os resultados e discussões sobre a resposta da ionosfera sobre quatro estações ionosféricas durante a ocorrência de cinco flares. As estações são: Santa Maria (SMK, 29.7° S, 53.8° O), Fortaleza (FZA, 3,9° S, 38,5° O), Cachoeira Paulista (CAJ, 22.6°S, 44.9°O), e Ascension Island (ASO, 7.5°S, 14.2°O). Os *flares* selecionados causaram bloqueio total sobre Santa Maria. Dessa forma, pode-se comparar a resposta ionosférica sobre SMK com as respostas sobre FZA, CAJ e ASO. Cabe ressaltar que as variações dos parâmetros ionosféricos sobre SMK durante os cinco eventos foram apresentados e discutidos em Valcorte (2023).

Conforme mencionado no Capítulo 3, os parâmetros ionosféricos estudados nesse trabalho são: foF2, fminF, hmF2, foE e fbEs. Para estes eventos também foram estudadas as variações das componentes do campo geomagnético (Z, H, I e D) obtidas pelo magnetômetro instalado no OES. Assim, com a análise das componentes do campo geomagnético e as variações dos parâmetros ionosféricos para cada evento, em conjunto com o cálculo do ângulo zenital durante a ocorrência da explosão solar para cada estação, tem-se um melhor conhecimento sobre a influência dos *flares* na ionosfera e no campo geomagnético.

### 4.1 Explosões Solares

Sabe-se que as súbitas ejeções de radiação que são os *flares* influenciam o aumento da densidade eletrônica da Região D (60-90km) da ionosfera. Em função do aumento da densidade eletrônica desta região, a propagação dos sinais eletromagnéticos na faixa de rádio é bloqueada totalmente ou parcialmente pela Região D. Assim, em SMK foram identificados 5 bloqueios totais dos sinais emitidos pela Digissonda, ocasionados por explosões solares de classe X, conforme Tabela 4.1. Os eventos analisados ocorreram durante os anos 2017 e 2023. A tabela mostra o dia da ocorrência do evento, hora do pico da explosão, do bloqueio e o intervalo de tempo que ocorreu o bloqueio dos sinais eletromagnéticos emitidos pela Digissonda de Santa Maria. Observa-se que o intervalo de tempo do bloqueio foi de 5 minutos para os cinco eventos.

Tabela 4.1 - Explosões solares que causaram o bloqueio total dos sinais eletromagnéticos sobre Santa Maria.

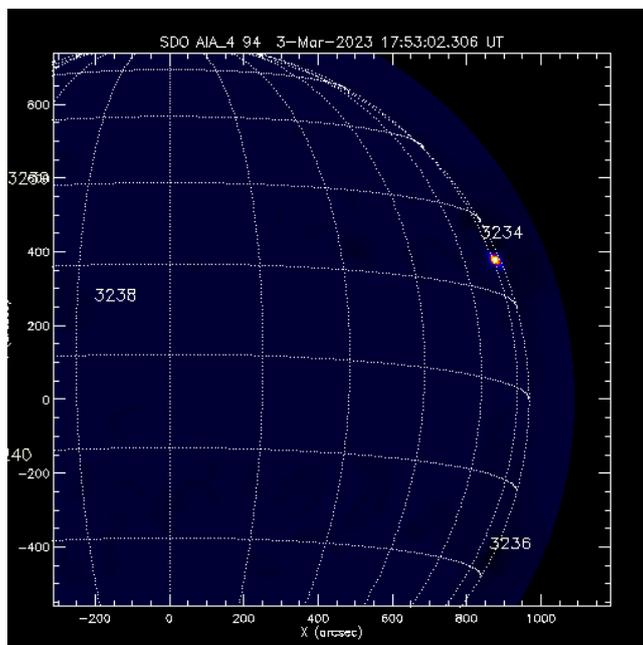
Evento	Data	Classe	Pico (UT)	Bloqueio (UT)	Duração do Bloqueio
1	3/3/2023	X2.1	17:52	17:50	5 minutos
2	9/1/2023	X1.9	18:50	18:55	
3	30/3/2022	X1.3	17:40	17:40	
4	11/2/2023	X1.1	15:50	15:50	
5	28/10/2021	X1.0	15:35	15:35	

## 4.2 Respostas da Ionosfera Durante as Explosões Solares

### 4.2.1 Evento 1 – Dia 3/3/2023

Uma explosão solar de classe X2.1 oriunda da região ativa 3234 foi observada na Terra no dia 3/3/2023. O *flare* teve início às 17:39 UT, o seu pico as 17:52 UT e chegou ao fim as 17:55 UT. A Figura 4.1 mostra a região ativa 3234 no limbo direito solar, obtida pelo satélite *Solar Dynamic Observatory* (SDO). O tamanho estimado dessa região ativa é de aproximadamente  $2,9 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup>.

Figura 4.1 - Localização da região ativa onde ocorreu o *flare* X2.1.



Fonte: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)

A Figura 4.2 mostra as variações do fluxo de raio-x e os parâmetros ionosféricos para o dia 3/3/2023. As linhas tracejadas em verde na vertical destacam o início e fim da explosão solar na Terra. A explosão solar atingiu a intensidade X2.1, como mostra o painel (a). A linha tracejada horizontal mostra o nível da categoria X do flare. No painel (b) tem-se a variação do foF2 que apresenta uma redução do parâmetro após o bloqueio que ocorreu às 17:50 UT. Utilizando a Equação 3.1 foi obtido a variação percentual do parâmetro em relação aos dias de referência. O valor encontrado foi -22%. O painel (c) apresenta o parâmetro fminF, que neste caso teve um acréscimo de 40%. No painel (d) observa-se que o parâmetro hmF2 reduziu 30 % em relação a curva de referência. Como a região E e camadas esporádicas não estavam presentes durante o *flare*, não foi possível obter as variações percentuais dos parâmetros foE e fbEs, como mostram os painéis (e) e (f).

Figura 4.2 – Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 1.

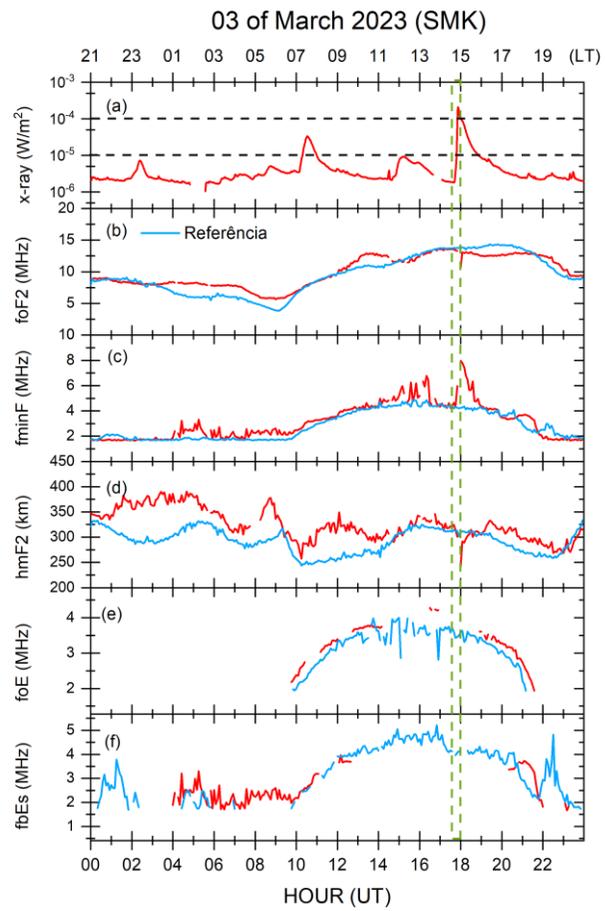


Figura 4.3 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 1.

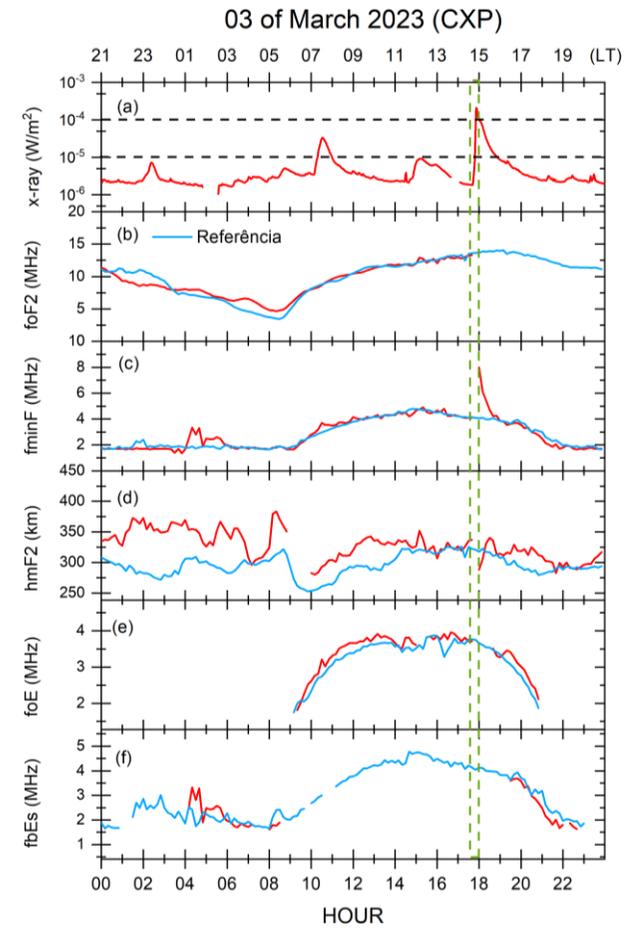


Figura 4.4 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 1.

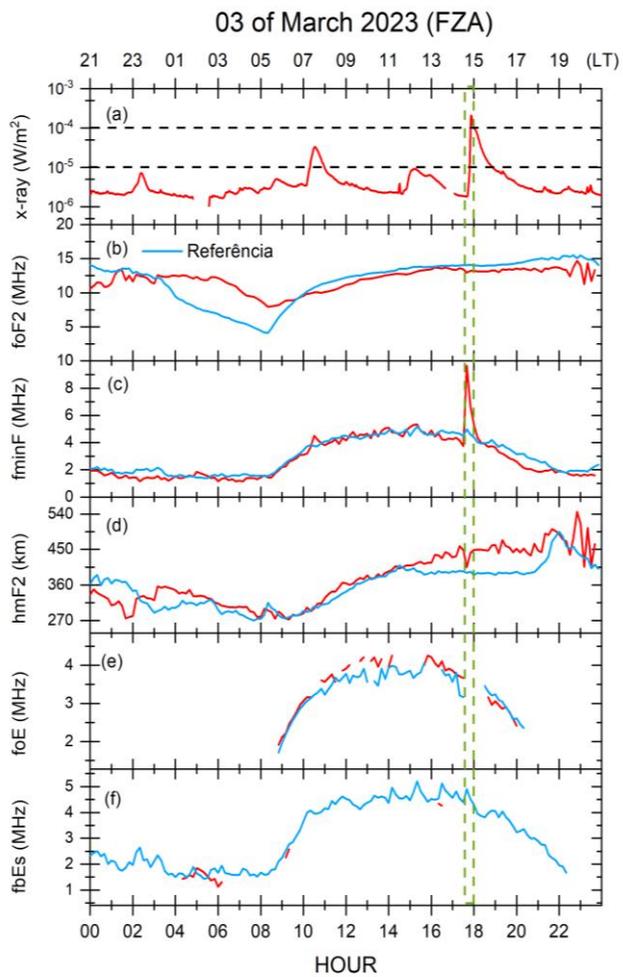
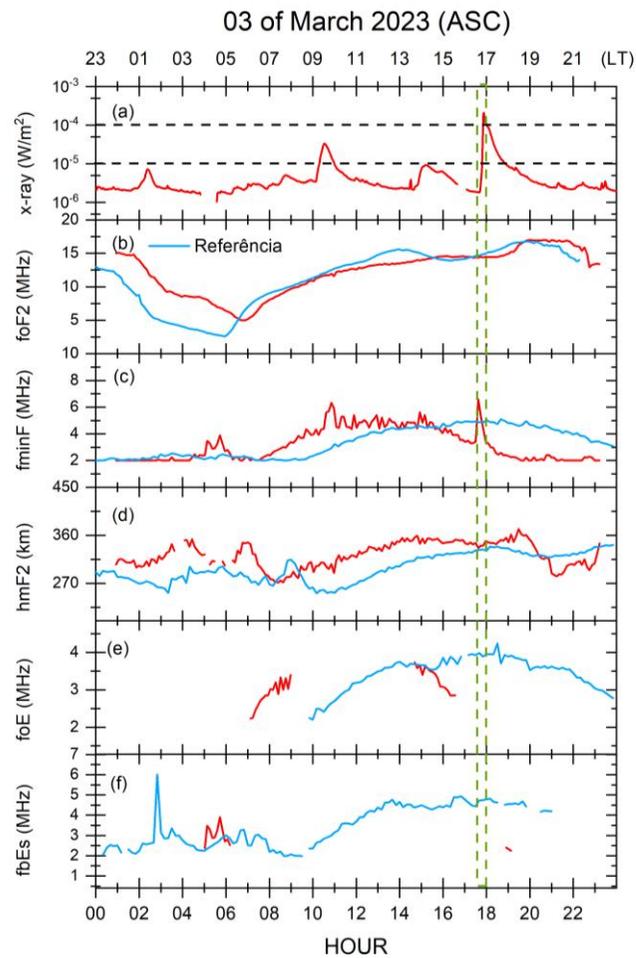


Figura 4.5 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 1.



O Evento 1 ocasionou o bloqueio total dos sinais eletromagnéticos em Santa Maria e Cachoeira Paulista. Para as outras localizações, Fortaleza e Ascension Island, o evento ocasionou apenas um bloqueio parcial. A variação percentual dos parâmetros foF2, hmF2, e fminF é apresentado para todas as estações na Tabela 4.2.

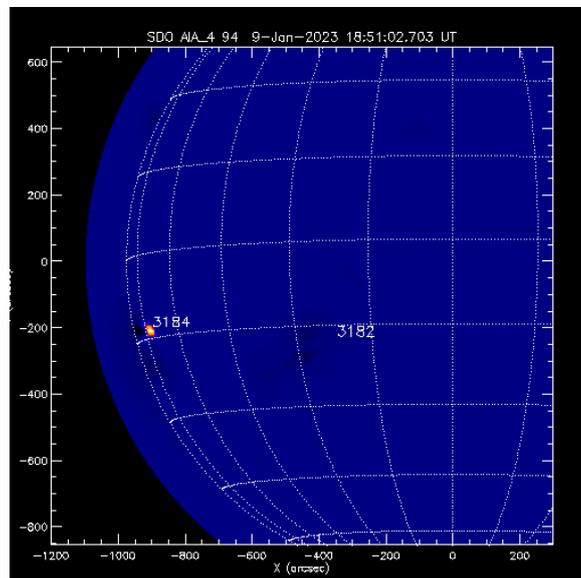
Tabela 4.2 – Variação percentual dos parâmetros para o Evento 1.

Estação	$\Delta foF2$		$\Delta hmF2$		$\Delta fminF$	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
<b>Santa Maria</b>	-1,6%	-22%	+3,2%	-30%	+11%	+40%
<b>Cachoeira Paulista</b>	-2,2%	-11%	+4,7%	-9,1%	-1%	+81%
<b>Fortaleza</b>	+7,3%	+6,4%	+9,8%	+7,8%	-16%	+44%
<b>Ascension Island</b>	0%	-2%	+5,4%	+1,2%	-32,5%	+35,4%

#### 4.2.2 Evento 2 – Dia 9/1/2023

No dia 9/1/2023 ocorreu uma explosão solar de classe X1.9 na região ativa 3184. O flare teve início às 18:37 UT, o seu pico ocorreu às 18:50 UT e chegou ao fim às 18:57 UT. A região ativa 3184 alcançou o tamanho de aproximadamente  $1,21 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup>.

Figura 4.6 - Localização da região ativa onde ocorreu o *flare* X1.9.



Fonte: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)

De forma similar ao Evento 1, as Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam as variações dos parâmetros ionosféricos.

Figura 4.7 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 2.

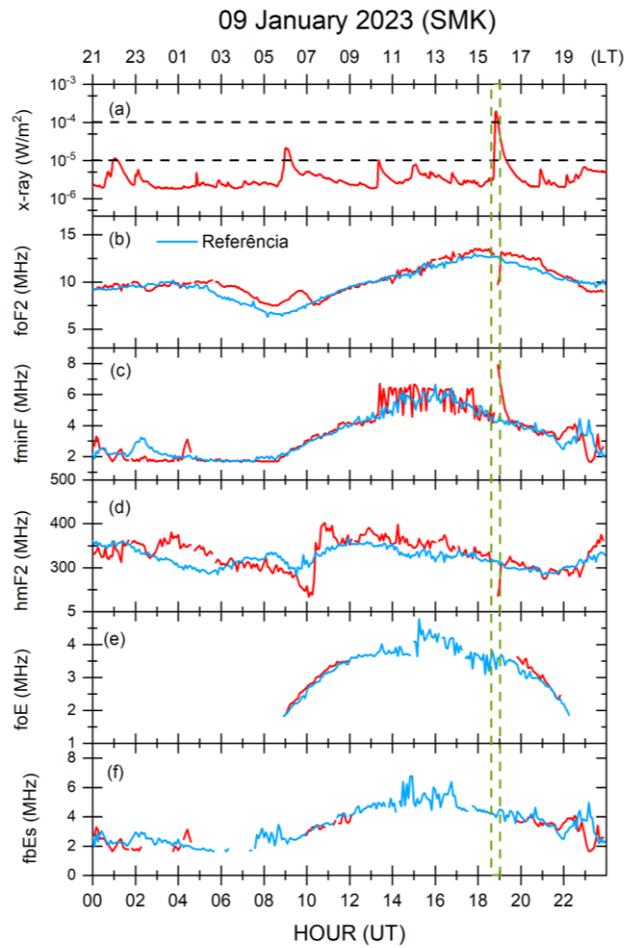


Figura 4.8- Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 2.

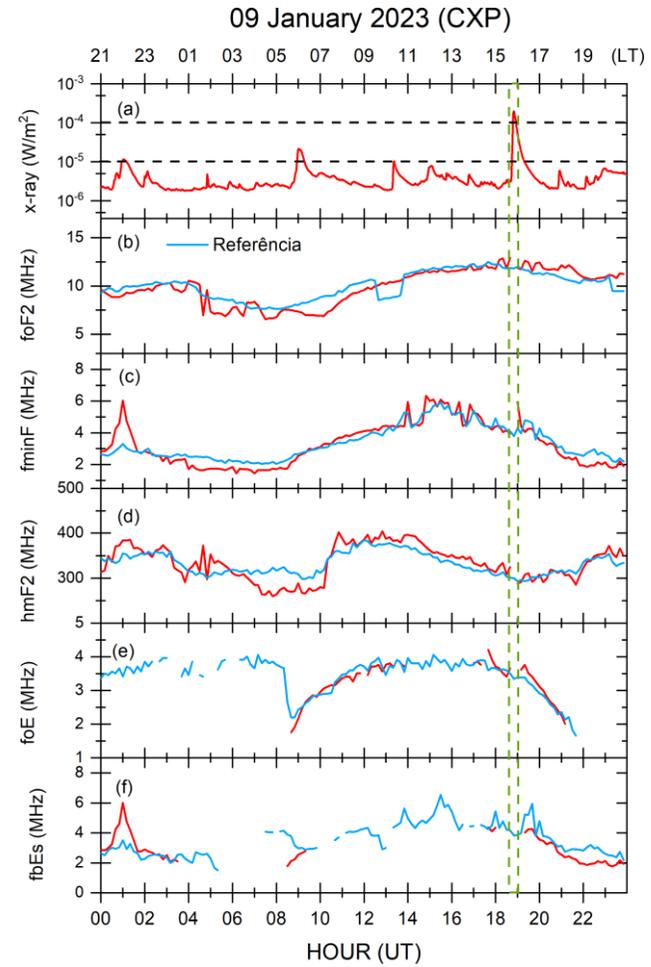


Figura 4.10 – Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 2.

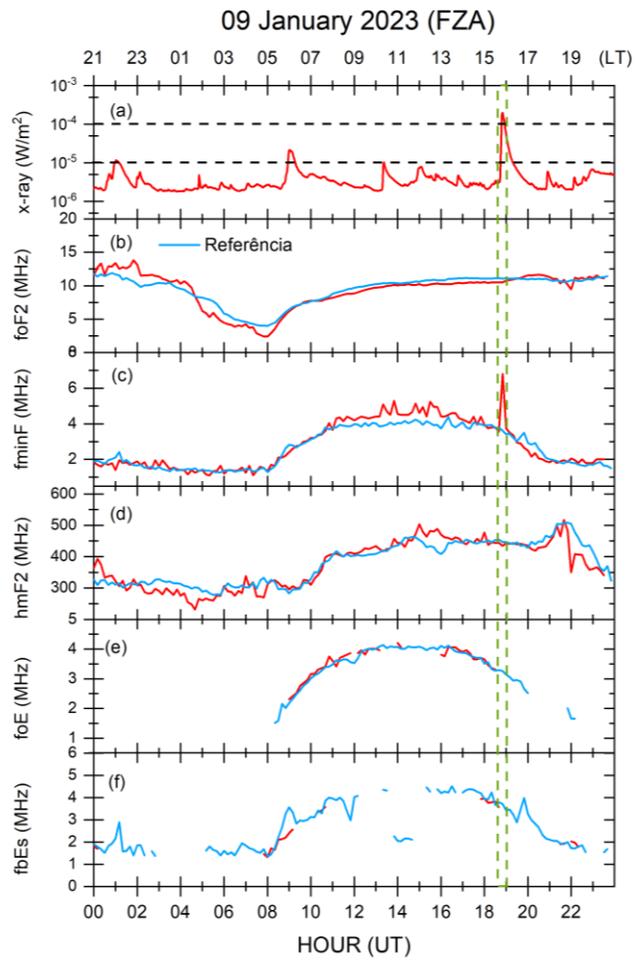
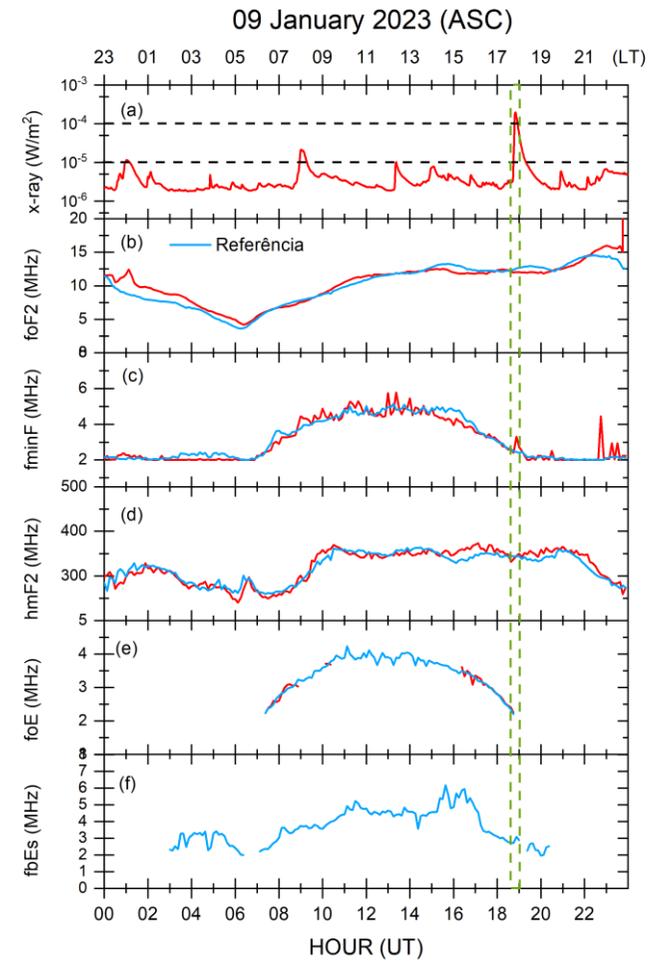


Figura 4.9 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island, durante o Evento 2.



Este evento ocasionou bloqueio total dos sinais eletromagnéticos em Santa Maria e Cachoeira Paulista. Para as outras localizações, o evento ocasionou apenas um bloqueio parcial. No geral, foi observado uma redução dos parâmetros foF2 e hmF2 e um aumento da fminF. As variações percentuais desses parâmetros estão apresentadas na Tabela 4.3.

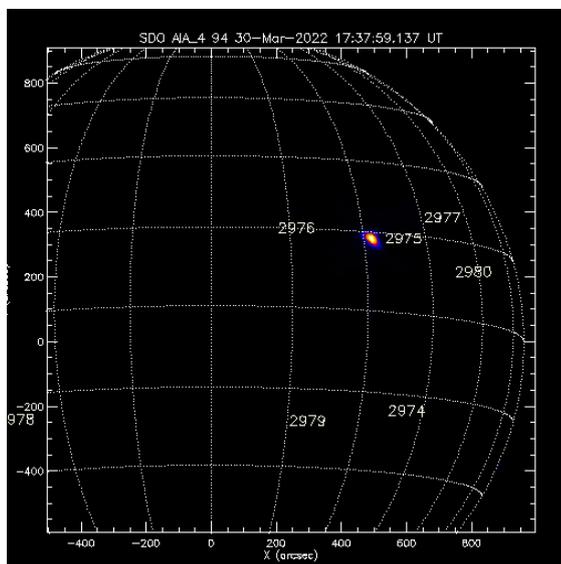
Tabela 4.3 – Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 2.

Estação	$\Delta foF2$		$\Delta dhmF2$		$\Delta fminF$	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
<b>Santa Maria</b>	+2,3%	-22%	+2,8%	-23%	-8,3%	+85%
<b>Cachoeira Paulista</b>	+9,3%	-1,6%	+7,9%	-1,7%	-2,5%	+38,3%
<b>Fortaleza</b>	-7,8%	-5,7%	+3,6%	+16%	-5,8%	+87,8%
<b>Ascension Island</b>	-2,4%	-2,4%	-3,9%	+1,5%	-2,6%	+12,5%

#### 4.2.3 Evento 3 – Dia 30/3/2022

No dia 30 de março de 2022 ocorreu uma explosão solar de classe X1.3 na região ativa 2975. O flare teve início às 17:21 (UT), o seu pico as 17:37 (UT) e chegou ao fim as 17:46 (UT). A Figura 4.11 mostra a região ativa 2975 que alcançou o tamanho estimado de  $1,0 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup>.

Figura 4.11 - Localização da região ativa onde ocorreu o flare X1.3.



Fonte: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)

As Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam as variações dos parâmetros ionosféricos para este evento.

Figura 4.12 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 3.

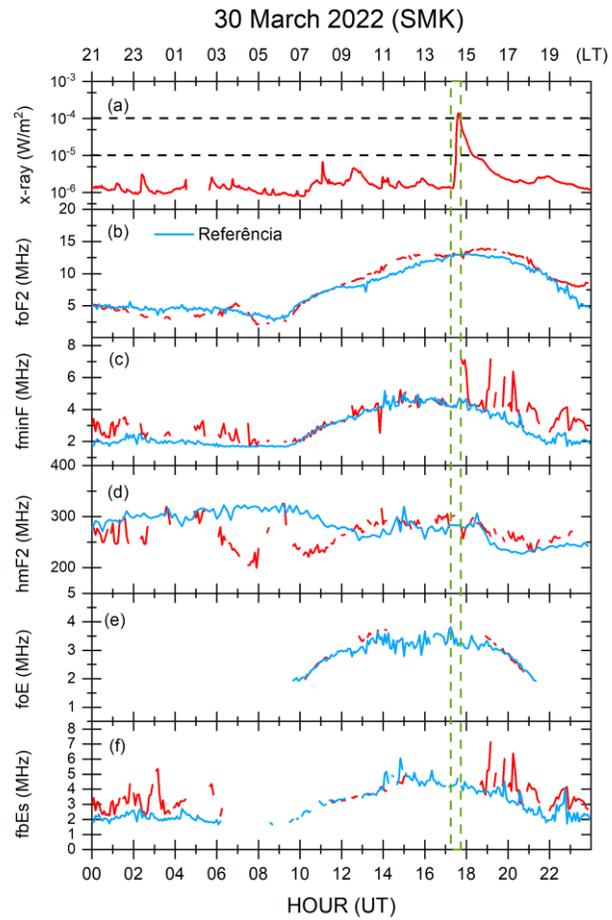


Figura 4.13 – Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 3.

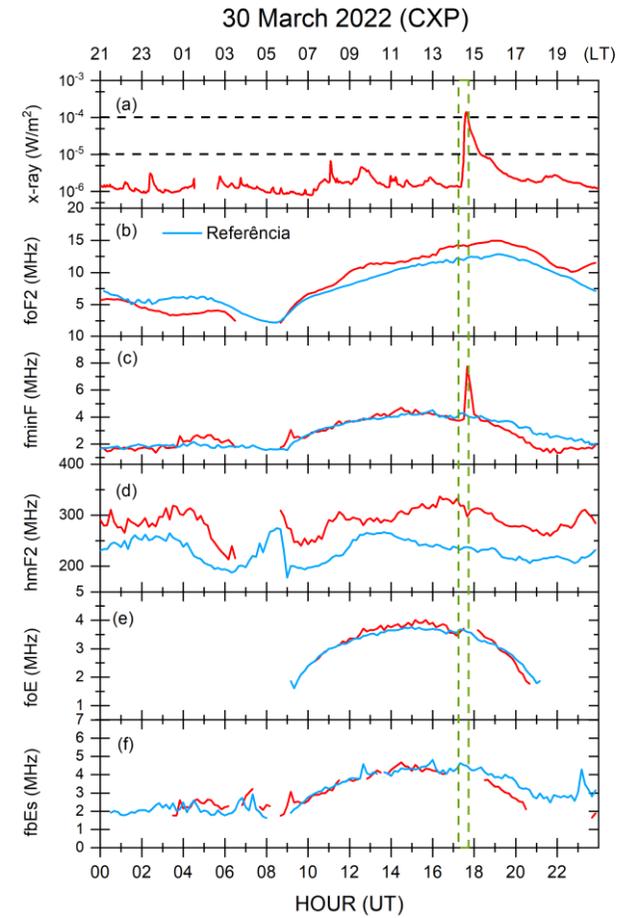


Figura 4.14 – Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 3.

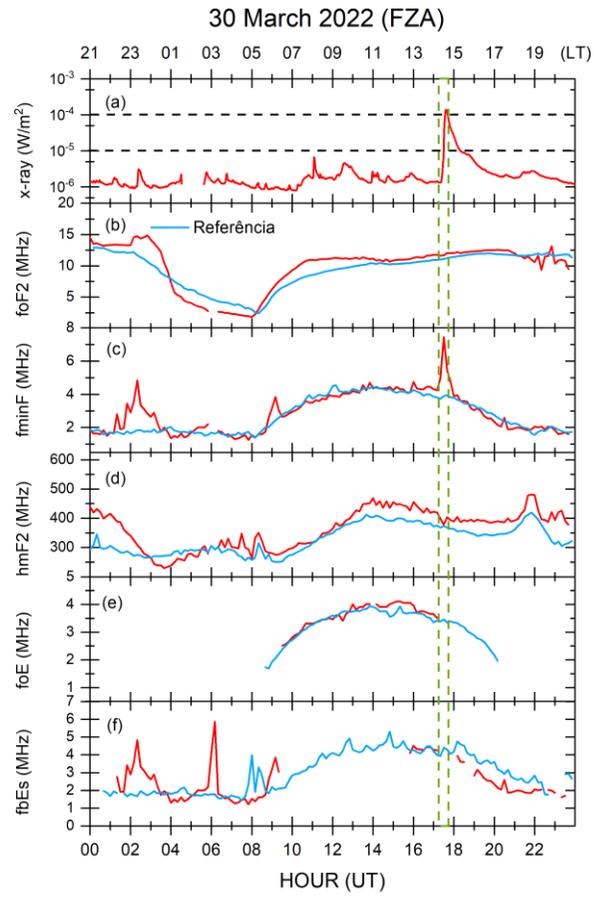
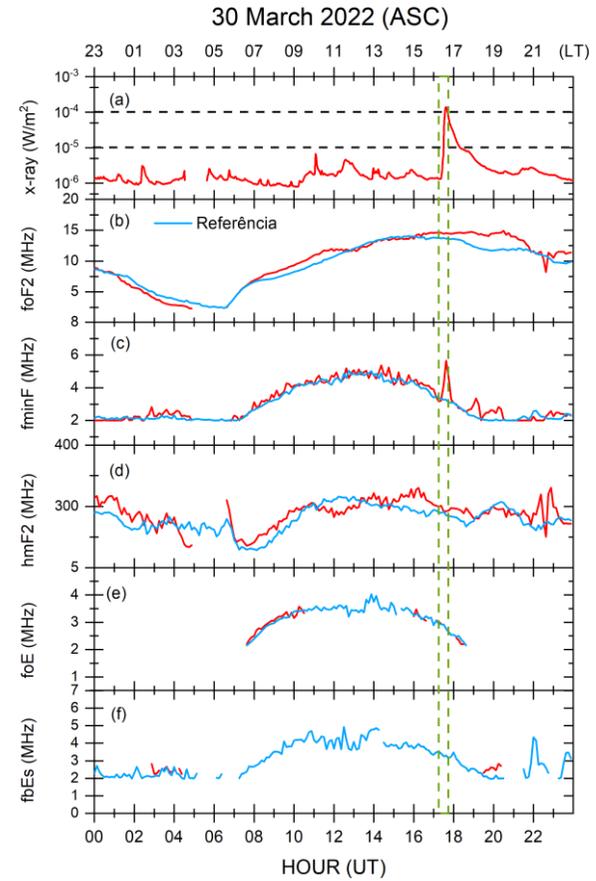


Figura 4.15 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 3.



Este evento ocasionou bloqueio total dos sinais eletromagnéticos apenas em Santa Maria. Para as outras localizações o evento ocasionou apenas um bloqueio parcial. Para esse evento houve uma redução percentual dos parâmetros foF2 e hmF2 e um aumento da fminF, como mostra a Tabela 4.4.

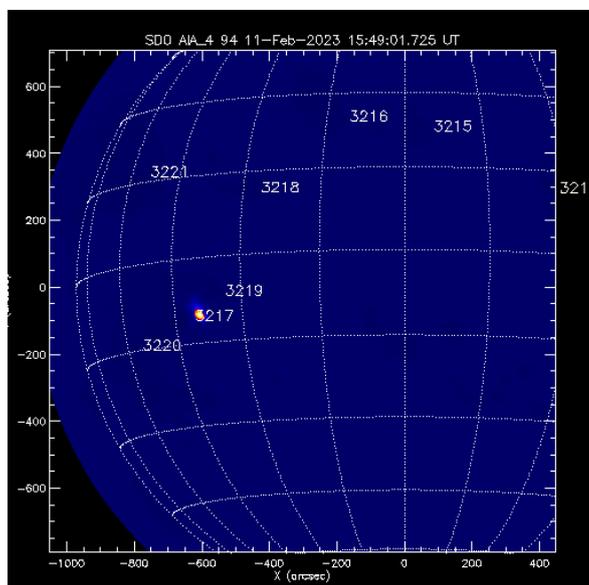
Tabela 4.4 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 3.

Estações	$\Delta$ foF2		$\Delta$ hmF2		$\Delta$ fminF	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
<b>Santa Maria</b>	+2,8%	+3,8%	+4,8%	-1,06%	-0,2%	+56%
<b>Cachoeira Paulista</b>	+17,5%	+13,7%	+37%	+30,8%	-12,5%	+52,5%
<b>Fortaleza</b>	-5,4%	-3%	-2,2%	-0,8%	+32%	+38%
<b>Ascension Island</b>	+6,5%	+3,6%	+2,7%	-2,3%	+28,8%	+34,5%

#### 4.2.4 Evento 4 - Dia 11/2/2023

No dia 11/2/2023 ocorreu uma explosão solar de classe X1.1 oriunda da região ativa 3217. O flare teve início às 15:40 UT, o seu pico as 15:48 UT e chegou ao fim as 15:54 UT. Na Figura 4.16 é possível observar a região ativa 3217, que alcançou o tamanho estimado de  $1,16 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup>.

Figura 4.16 - Localização da região ativa onde ocorreu o flare X1.1.



Fonte: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)

As Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam as variações dos parâmetros ionosféricos para o Evento 4.

Figura 4.17 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 4.

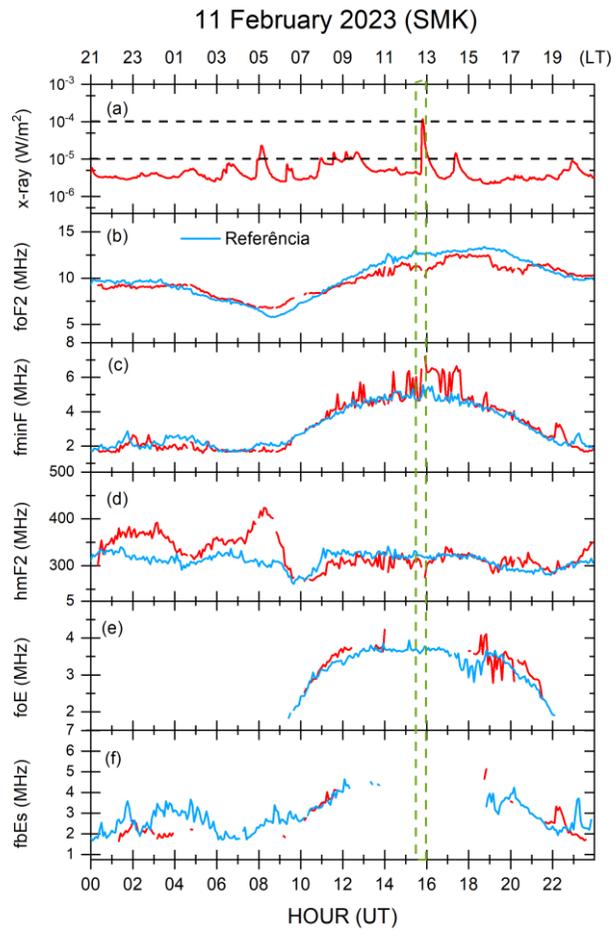


Figura 4.18 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 4.

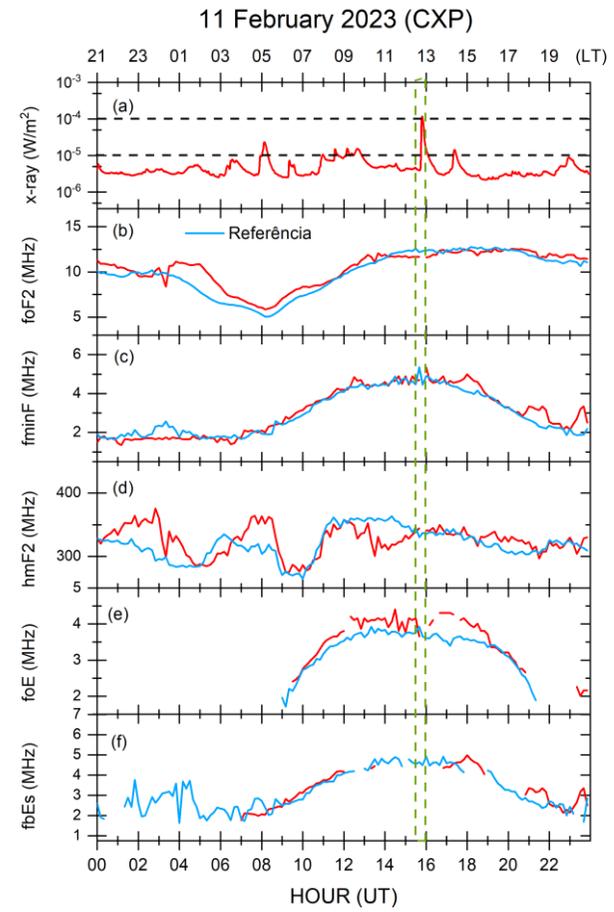


Figura 4.19 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 4.

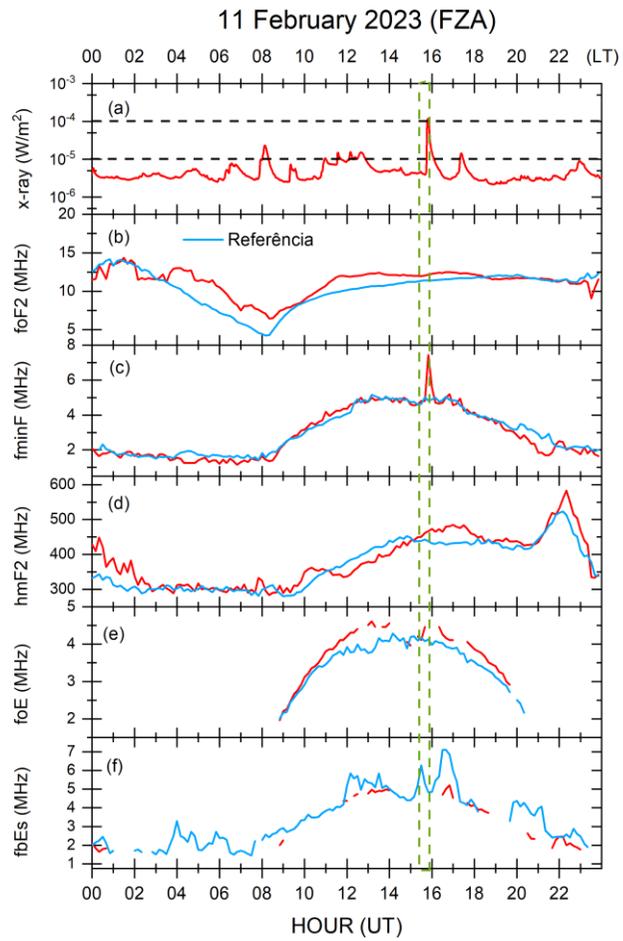
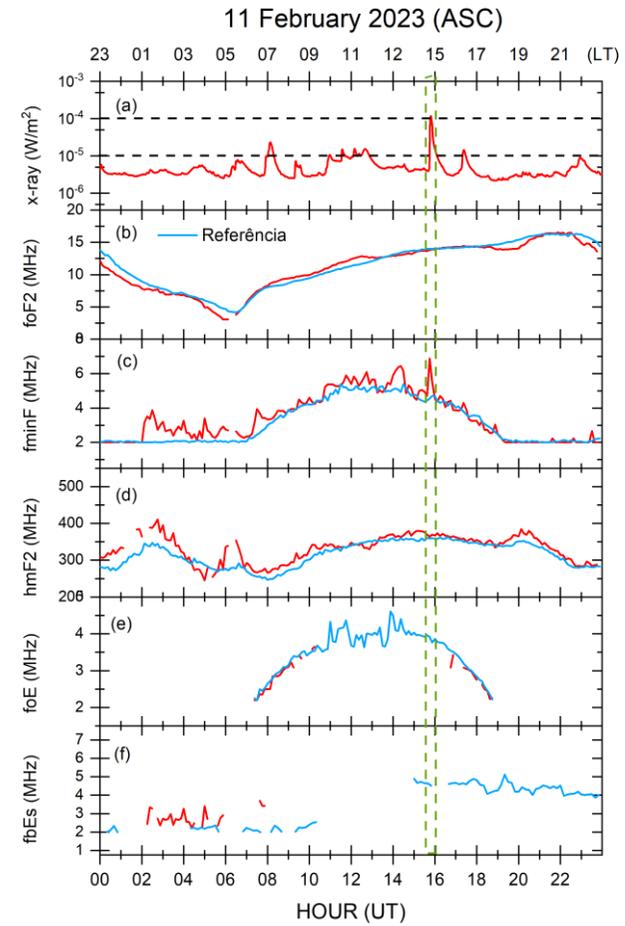


Figura 4.20 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 4.



O Evento 4 foi responsável por um bloqueio total das ondas eletromagnéticas emitidas pelas Digisondas de Santa Maria e Cachoeira Paulista. Para as outras localizações, o evento ocasionou apenas um bloqueio parcial. A Tabela 4.5 apresenta as variações percentuais dos parâmetros.

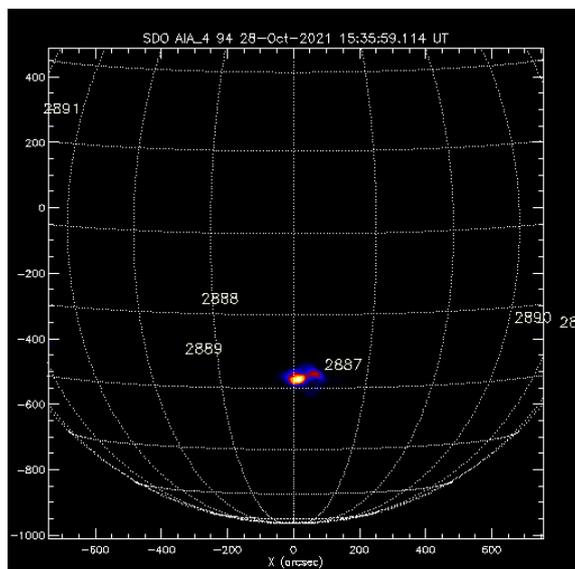
Tabela 4.5 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 4.

Estações	$\Delta f_oF2$		$\Delta h_mF2$		$\Delta f_{min}F$	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
<b>Santa Maria</b>	-12%	-20%	-3,1%	-13%	-2,7%	+46%
<b>Cachoeira Paulista</b>	-2,7%	-5,7%	+4,4%	+8,9%	-11,3%	+8,9%
<b>Fortaleza</b>	+21,8%	7,5%	+4,2%	+9,6%	-4%	+54%
<b>Ascension Island</b>	+2,1%	-7%	+2,6%	+1,6%	+6,8%	+46%

#### 4.2.5 Evento 5 – Dia 28/10/2021

No dia 28 de outubro de 2021 ocorreu uma explosão solar de classe X1.0 oriunda da região ativa 2887. O *flare* teve início às 15:17 (UT), o seu pico as 15:35 (UT) e chegou ao fim as 15:48 (UT). A Figura 4.21 mostra a região ativa 2887 ativa. O tamanho estimado desta região foi de aproximadamente  $9,74 \times 10^{11}$  km<sup>2</sup>.

Figura 4.21 - Localização da região ativa onde ocorreu o *flare* X1.0.



Fonte: [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)

As Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam as variações dos parâmetros ionosféricos para o Evento 5.

Figura 4.22 - Parâmetros ionosféricos sobre Santa Maria durante o Evento 5.

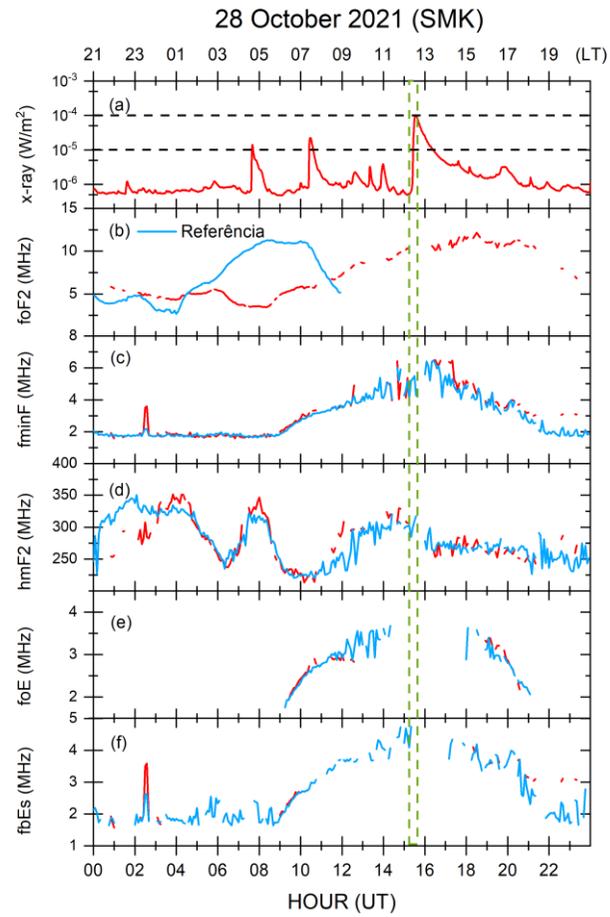


Figura 4.23 - Parâmetros ionosféricos sobre Cachoeira Paulista durante o Evento 5.

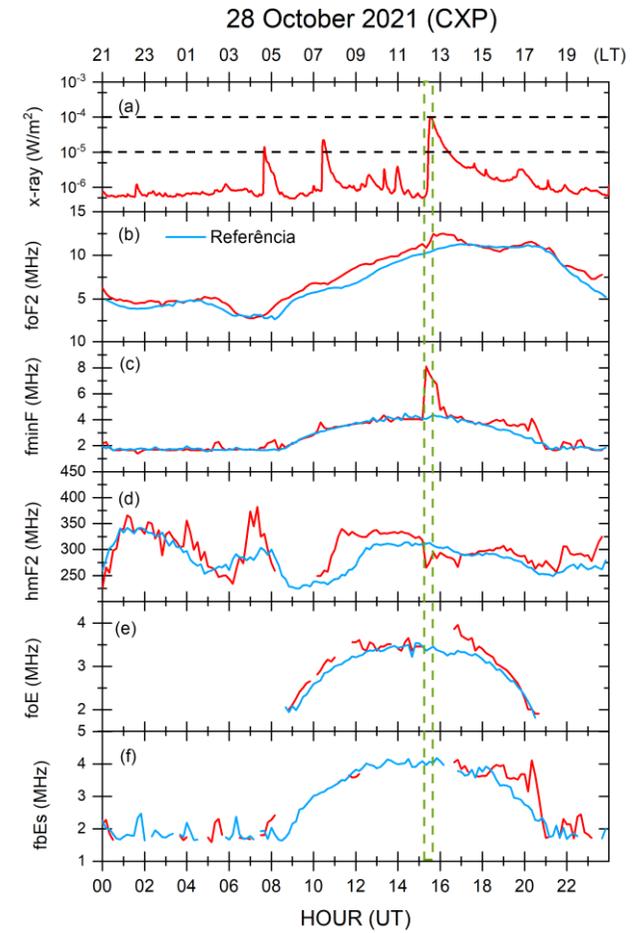


Figura 4.25 - Parâmetros ionosféricos sobre Fortaleza durante o Evento 5.

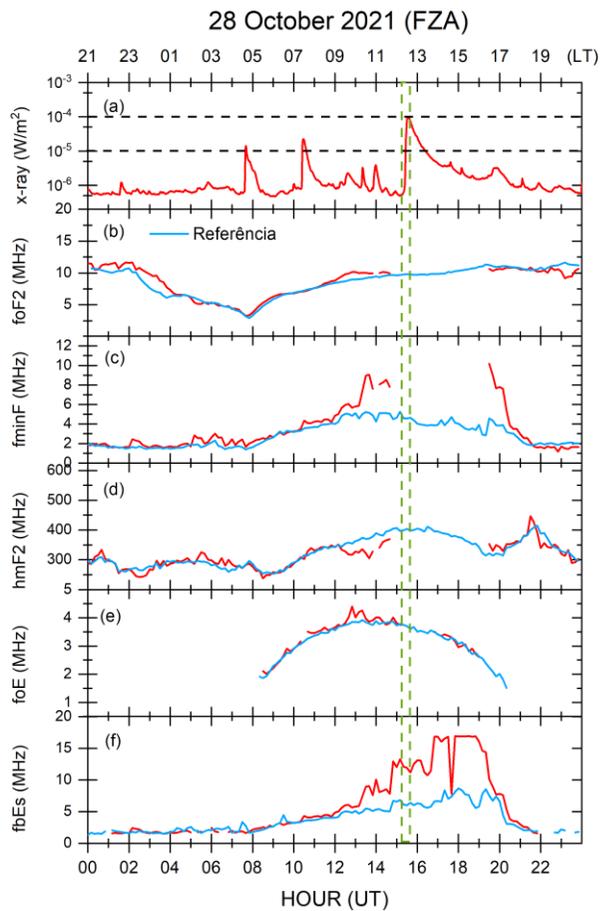
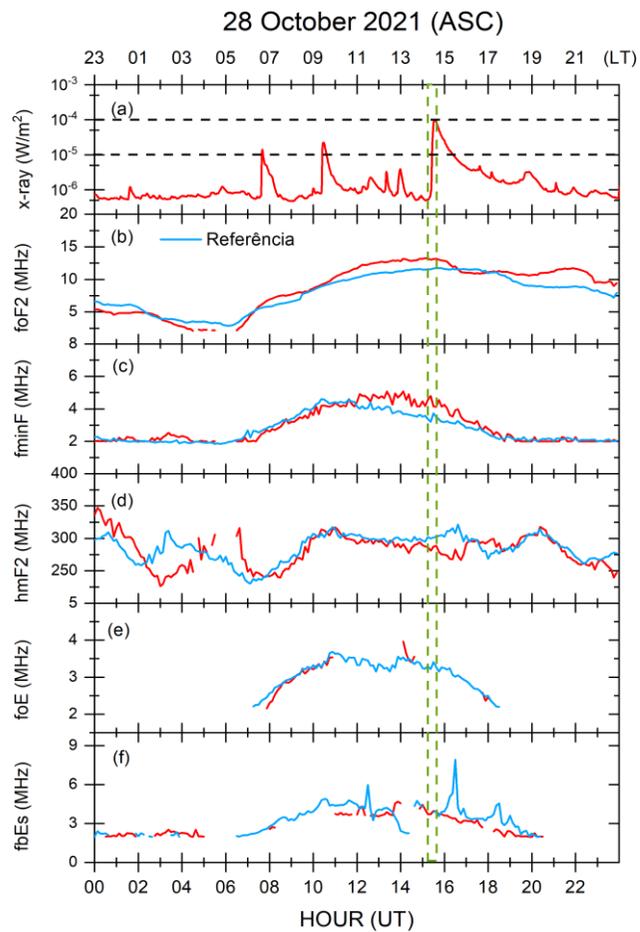


Figura 4.24 - Parâmetros ionosféricos sobre Ascension Island durante o Evento 5.



O Evento 5 ocasionou um bloqueio total das ondas eletromagnéticas em Santa Maria. Nas outras estações o evento ocasionou bloqueios parciais. A Tabela 4.6 apresenta a variação dos parâmetros para cada estação.

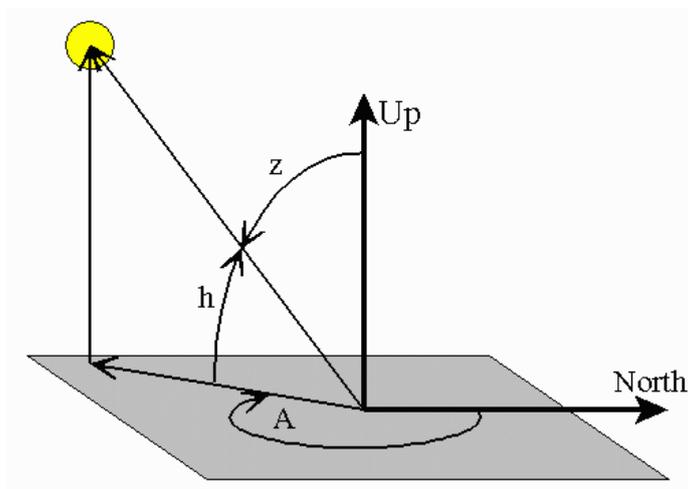
Tabela 4.6 - Variação dos parâmetros ionosféricos para o Evento 4.

Estações	$\Delta f_oF2$		$\Delta h_mF2$		$\Delta f_{min}F$	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
<b>Santa Maria</b>	+8,1%	-2,6%	+0,9%	-12%	+13%	+32%
<b>Cachoeira Paulista</b>	+5,8%	+14%	-14,5%	-6,9%	+102%	59,5%
<b>Fortaleza</b>	ES					
<b>Ascension Island</b>	+5,8%	+14%	-6,6%	-7,9%	+50%	+36%

### 4.3 Ângulo Zenital

A incidência solar está diretamente ligada com os efeitos dos *flares* solares na ionosfera terrestre. O Ângulo Zenital mostra a posição solar em determinado momento do dia e localização, como é possível observar na Figura 4.26. Este fato sugere que quanto menor for o ângulo zenital maior será a incidência solar na região calculada. E quanto maior a incidência solar maior é a probabilidade do *flare* ocasionar um bloqueio total dos sinais eletromagnéticos na faixa de rádio.

Figura 4.26 – Ângulo Zenital em relação ao Azimute e o Horizontal



A Tabela 4.7 apresenta os valores calculados do ângulo zenital para todas as estações durante a ocorrência dos eventos. Os valores destacados em vermelho na tabela indicam as localizações onde ocorreram bloqueio total dos sinais. Desta maneira é

possível confirmar que onde ocorreu o bloqueio os valores dos ângulos são menores do que os locais onde não ocorreram. Assim sustentando o fato de o ângulo zenital ter total influencia na ocorrência de *blackouts*.

Tabela 4.7 - Valores do Ângulo Zenital para cada localização estudada

Eventos	Santa Maria	Fortaleza	Cachoeira Paulista	Ascension Island
(1) X2.1	36,9°	45,9°	14,9°	43,5°
(2) X1.9	42,6°	62,8°	45,4°	69,8°
(3) X1.3	44,3°	46°	53,3°	84,2°
(4) X1.1	15,7°	18,3°	11,3°	39,3°
(5) X1.0	16,7°	21,3°	41,4°	70,3°

#### 4.4 Variação das Componentes do Campo Geomagnético

A Figura 4.27 apresenta os gráficos das componentes do campo geomagnético para o dia 3/3/2023. Em verde pontilhado está demarcado o período de duração do *flare* para facilitar a análise do evento. Em azul claro, estão as componentes para um dia geomagneticamente calmo do mês da ocorrência do evento, que é uma referência. No painel (a) tem-se a variação da componente D. Ao utilizar as equações apresentadas na Seção 3.3 é possível observar uma redução do parâmetro após o *flare*. O painel (b) mostra a componente I do campo, que neste caso também reduziu. O painel (c) apresenta a variação da componente H, onde é possível observar uma redução da componente após o pico do *flare*. No painel (d) observa-se a componente Z do campo e sua variação durante o dia do Evento 1. A componente aumentou após o pico da explosão. Os painéis (e) e (f) apresentam indicies relacionados ao nível de atividade geomagnética, respectivamente os indicies Kp e Dst.

O mesmo padrão foi utilizado para os gráficos das componentes do campo, utilizando os dados de magnetômetros para os demais eventos estudados. No caso do Evento (4), houve a ausência de dados para este dia no magnetômetro do OES. Assim utilizou-se os dados do magnetômetro de Cachoeira Paulista. As Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 apresentam as variações dos das componentes do campo para os outros eventos.

Figura 4.27 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 1.

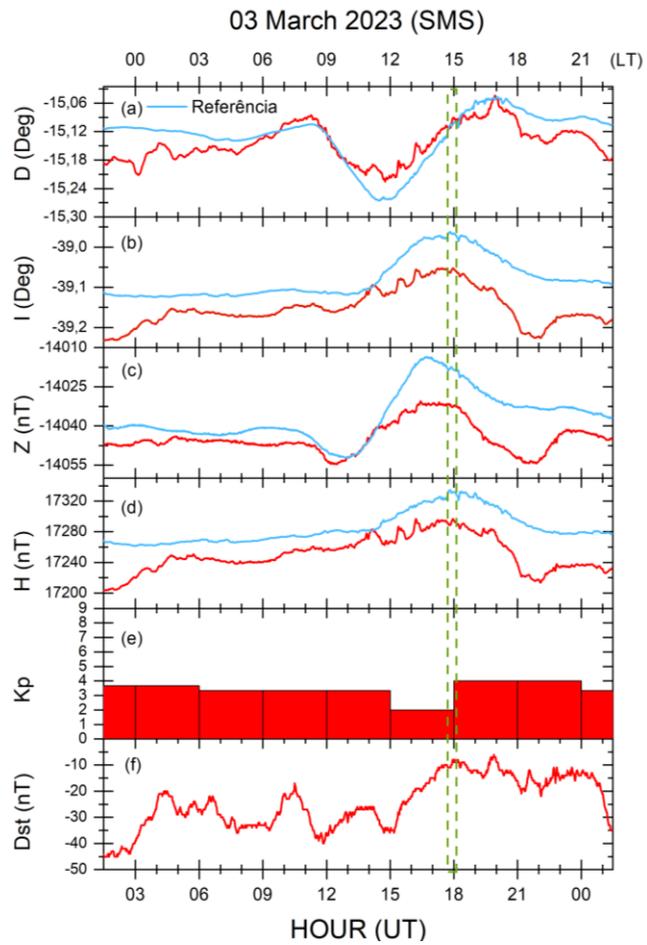


Figura 4.28 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 2.

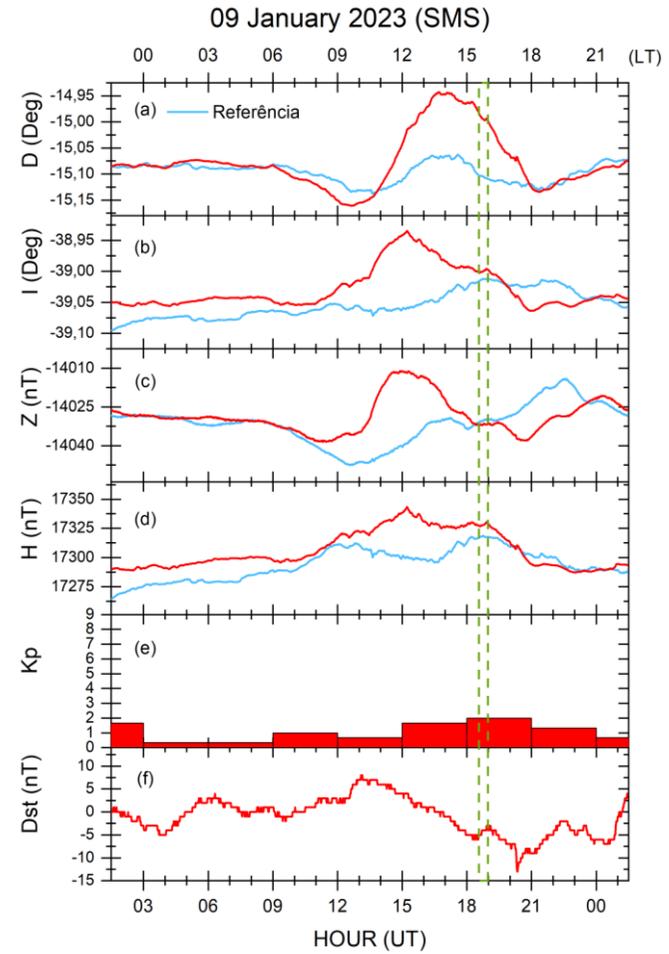


Figura 4.29 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 3.

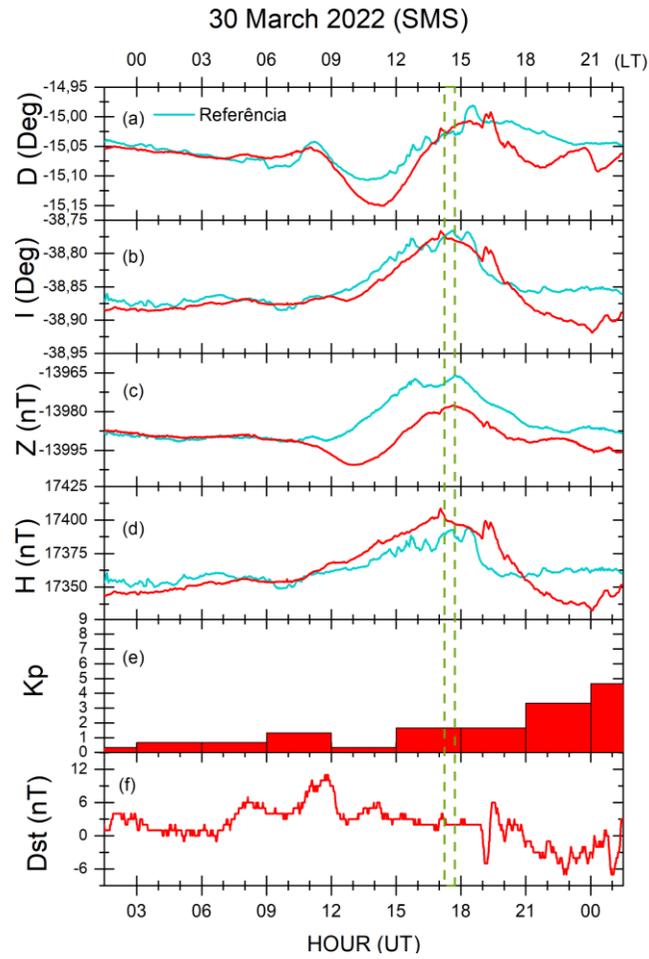


Figura 4.30 - Componentes do campo geomagnético do OES para o Evento 4.

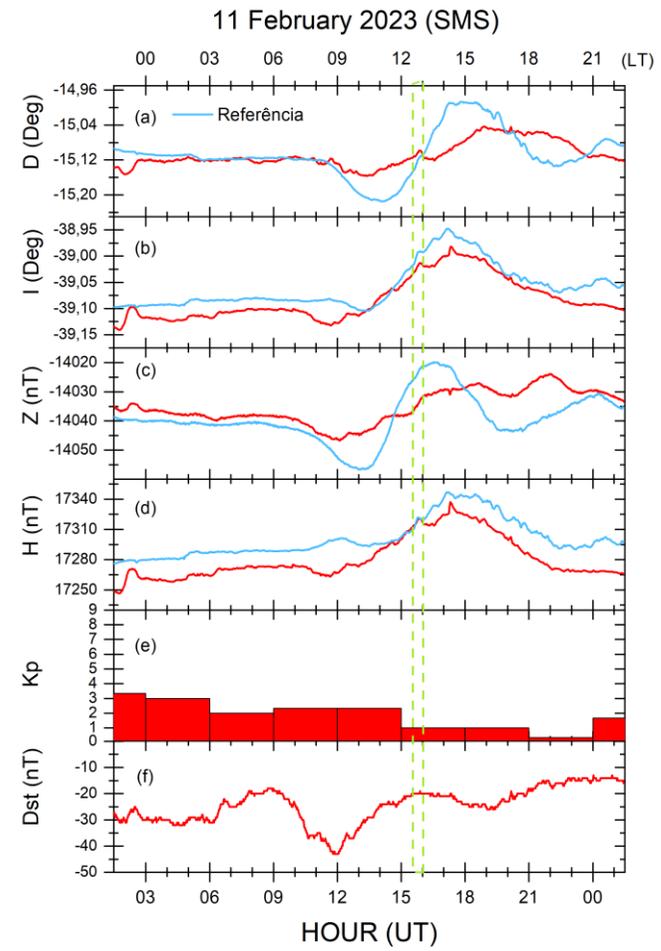
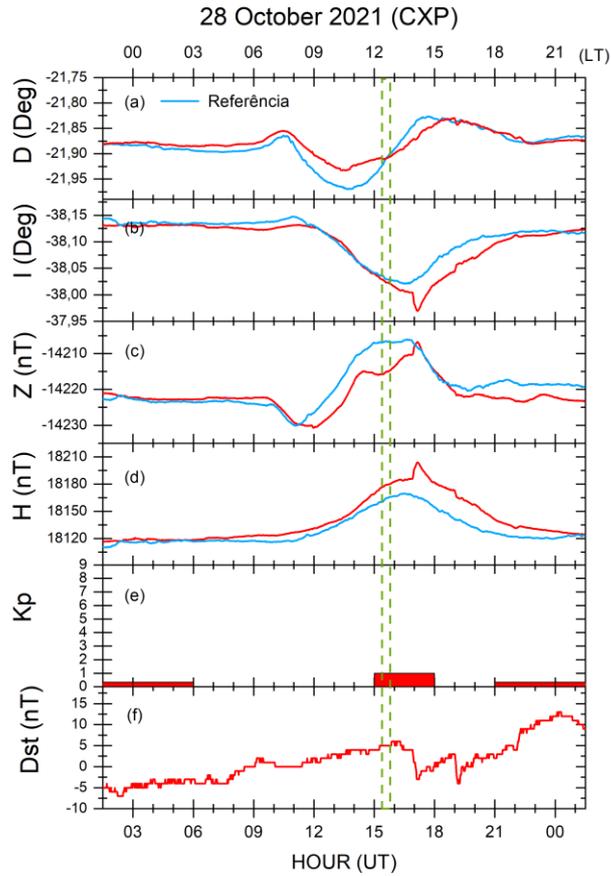


Figura 4.31 - Componentes do campo geomagnético de Cachoeira Paulista para o Evento 5.



A Tabela 4.10 apresenta os valores calculados para cada evento, utilizando as equações da Seção 3.3. Estes valores serão importantes para determinar se ocorreu a intensificação do campo geomagnético após o impacto dos *flares*. Para determinar isso é necessário realizar a razão entre os dois valores obtidos, a variação pré *flare* e após o impacto do *flare*.

Tabela 4.8 - Valores das variações das componentes do campo geomagnético

Evento	H		Z		D		I	
	$\Delta H_{sfe}$	$\Delta H_0$	$\Delta Z_{sfe}$	$\Delta Z_0$	$\Delta D_{sfe}$	$\Delta D_0$	$\Delta I_{sfe}$	$\Delta I_0$
(1)X2.1	6,4nT	72,1nT	5,7nT	-3,1nT	0,002°	0,0925°	0,006°	0,126°
(2)X1.9	-0,1nT	20,5nT	-2,2nT	-9nT	0,002°	-0,03°	0,001°	0,0732°
(3)X1.3	-6nT	18,2nT	-2,1nT	14,6nT	0,0035°	0,0307°	0,0004°	0,0265°
(4)X1.1	11,9nT	75,7nT	-1,8nT	5,8nT	0,0052°	0,0351°	0,0174°	0,1343°
(5)X1.0	15,9nT	69,2nT	3,2nT	10,8nT	0,0051°	0,0051°	0,0306°	0,1271°

De acordo com Santos et al. (2009), quanto mais próximo ao meio-dia local (15:00 UT) o horário da ocorrência do evento explosivo, maior é a possibilidade da ocorrência do crochê magnético. Logo, na Tabela 4.11 é apresentada a relação entre os valores da razão e o horário da ocorrência do *flare*. Os resultados mostram que quanto mais próximo das 15:00 UT, maior é a possibilidade de ocorrer uma intensificação no campo geomagnético.

Tabela 4.9 - Razão entre variáveis obtidas da Tabela 4.10.

Evento	Horário Explosão (UT)	H	Z	D	I
		$\Delta H_{sfe}/\Delta H_0$	$\Delta Z_{sfe}/\Delta Z_0$	$\Delta D_{sfe}/\Delta D_0$	$\Delta I_{sfe}/\Delta I_0$
(1)X2.1	17:39	11,26	-0,54	0,0216	0,0476
(2)X1.9	18:37	-0,00048	0,24	-0,066	0,0136
(3)X1.3	17:21	-0,32	-0,14	0,114	0,0150
(4)X1.1	15:40	6,36	-0,31	-0,148	0,1295
(5)X1.0	15:17	0,22	0,29	1	0,2407

Os valores destacados em verde na Tabela 4.11 são positivos. De acordo com Taat et al. (2019), estes valores sugerem que o *flare* intensificou o campo geomagnético. O aumento do ângulo de inclinação (*I*) ocorreu para todos os eventos. Observa-se que a ocorrência mais próxima ao horário local foi o evento que obteve valores positivos na razão de todas as componentes. O Evento (5), que ocorreu às 15:17 UT, apresentou todos os valores positivos. Isso sugere que houve a intensificação do campo após o impacto do *flare*.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado a análise dos eventos explosivos que ocasionaram bloqueio total dos sinais eletromagnéticos na faixa de rádio em Santa Maria. Os eventos foram estudados em outras localizações para entender a variação dos parâmetros dependendo da localização e do ângulo zenital no horário da explosão. As outras estações ionosféricas estudadas foram Fortaleza, Cachoeira Paulista e Ascension Island. As explosões analisadas são de classe X e ocorreram durante o dia em Santa Maria.

Após o cálculo das variações percentuais dos parâmetros para todos os eventos nas 4 estações, foi feito o cálculo do ângulo zenital para confirmar a sua dependência na ocorrência de bloqueios totais dos sinais. Dos eventos estudados, três ocasionaram *blackouts* em Cachoeira Paulista. Nas outras estações ionosféricas ocorreram apenas bloqueios parciais.

Os bloqueios totais ocorridos em Cachoeira Paulista são explicados pelo ângulo zenital. Para o Evento (1), o valor foi menor que o encontrado em Santa Maria. Para o Evento (2), o valor do ângulo zenital em Cachoeira Paulista foi  $2,8^\circ$ , maior que o de Santa Maria. O Evento (4) apresentou o valor menor para Cachoeira Paulista. Assim confirma-se a influência do ângulo zenital para a ocorrência de *blackouts*. Durante o Evento (5) houve a presença de camadas esporádicas que alcançaram 17 MHz sobre Fortaleza, e com isso não foi possível detectar os bloqueios dos sinais eletromagnéticos.

No presente trabalho também foi estudado o impacto dos *flares* no campo geomagnético. A grande quantidade de energia que adentra na atmosfera influencia súbitas alterações nas componentes no campo magnético em função da geração de correntes ionosféricas adicionais (SID). Para os eventos foram obtidos os dados do magnetômetro do Observatório Espacial do Sul (OES), em São Martinho da Serra, RS. Para o Evento (5) foi considerado os dados do magnetômetro de Cachoeira Paulista, em função da ausência de dados no OES. A variação das componentes é calculada em relação ao pré *flare* e após o impacto. A razão entre estes valores determina se os eventos intensificaram as componentes do campo. Se o resultado da razão for positivo significa que houve um aumento das componentes após o impacto do *flare*.

Os valores obtidos indicam que todos os eventos aumentaram o ângulo de inclinação ( $I$ ), três eventos aumentaram as componentes  $H$  e  $D$  e dois eventos intensificaram a componente  $Z$ . Também foi relacionado aos valores obtidos o horário da ocorrência da explosão, pois de acordo com Santos et al. (2009), quanto mais próximo ao meio-dia local maior a probabilidade de ocorrer a intensificação do campo geomagnético pelo *flare*. Neste caso o evento mais próximo às 15:00 UT (12:00 LT) ocorreu às 15:17 UT (12:17 LT), e foi o Evento (5). Com isso, foram observados valores positivos na razão para todas as componentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKEN, P. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. **Earth, Planets and Space**, v. 73, n. 1, 11 fev. 2021.

ALMEIDA, P, D, S, C. **Evolução do mapa DIP simulado pelo modelo IGRF para a localidade de São Luís (MA)**. Relatório final de projeto de iniciação científica PIBIC/INPE – CNPq/MCT, 2020. [s.l: s.n.].

BENTON, E. R.; BENTON, E. V. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 184, n. 1-2, p. 255–294, 1 set. 2001.

BIERMANN, L. Interpretation of chromospheric turbulence and excess UV radiation from the Sun. **Die Naturwissenschaften**, v.33, n.4, p.118-119, 1946

BITTENCOURT, J. A. Fundamentals of Plasma Physics. 4. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2018.

CANE, H, V. et al. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. **Space Science Reviews**, v.93, p.55–77, 2000.

CARRINGTON, R. C. **Observations of a white light solar flare associated with a sunspot group**. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 150, p. 1-13, 1860.

CHEN, H. et al. Solar influences on spatial patterns of Eurasian winter temperature and atmospheric general circulation anomalies. **J. Geophys. Res. Atmos**, v.120, p.8642–8657, 2015.

CHULLIAT et al. The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report. 1 jan. 2020.

CNOSSSEN, I.; RICHMOND, A. D. **How changes in the tilt angle of the geomagnetic dipole affect the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system**. Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 117, n. A10, 2012.

DAGLIS, I. A. Ring current dynamics. *Space Science Reviews*, v. 1, n. 1, p. 1-20, 2000. DOI: 10.1007/BF00214994

DUMBOVIĆ, M. Analysis And Forecasting Of Coronal Mass Ejection Space Weather Effects. 2015. 79p. Tese (Astrophysics (Solar Physics)) - University of Zagreb, Zagreb, 2015.

EASTWOOD, J. P. et al. The Scientific Foundations of Forecasting Magnetospheric Space Weather. **Space Science Reviews**, v. 212, n. 3-4, p. 1221–1252, 15 ago. 2017.

HEELIS, R. A.; MAUTE, A. Challenges to Understanding the Earth's Ionosphere and Thermosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 125, n. 7, 1 jul. 2020.

INOSTROZA LARA, Ana María. **Movimento de partículas carregadas, com velocidades relativísticas, sob ação de campo geomagnético perturbado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020

JANVIER, M. et al. The Two-step Forbush Decrease: A Tale of Two Substructures Modulating Galactic Cosmic Rays within Coronal Mass Ejections. **The Astrophysical Journal**, v.922, n.216, p.15, 2021.

JIRIKOWIC, J. L.; DAMON, P. E. The Medieval Solar Activity Maximum. **Springer eBooks**, p. 309–316, 1 jan. 1994.

KRIVOVA, N A; VIEIRA, A ; SOLANKI, S K, Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum, **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. A12, 2010.

LOHMANN, K. Geomagnetic imprinting: A unifying hypothesis of long-distance natal homing in salmon and sea turtles. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.105, 2009

MACÊDO, M.; MACÊDO, C. **Física B Aula 7 CAMPO MAGNÉTICO E FORÇA MAGNÉTICA**. [s.l: s.n.]. Disponível em:  
<[https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15122916022012Fisica\\_B\\_aula\\_7.pdf](https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15122916022012Fisica_B_aula_7.pdf)>.

MARANGONI, Y. R. Magnetometria aplicada à prospecção de bens minerais e estudos crustais: O Campo Magnético, Conceitos e aplicações em Geofísica. [s.l: s.n.], [s.d.]. Disponível em: [https://www.iag.usp.br/~eder/mag/Apostila\\_mag\\_2016.pdf](https://www.iag.usp.br/~eder/mag/Apostila_mag_2016.pdf). Acesso em: 07 ago. 2024.

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 87, n. A9, p. 7641–7652, 1 set. 1982

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**, v. 124, n. 9, p. 7638–7653, 2019.

NELSON, O, R. et al. Uma abordagem didática da natureza dos processos de aquecimento da atmosfera estelar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p.3317, 2013.

OLIVEIRA, A, G. et al. Raios cósmicos e a heliosfera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p.2316, 2014.

OSWALD; DOUMBIA, Vafi; PAUL OBIAKARA AMAECHI; *et al.* A Study of Solar Flare Effects on the Geomagnetic Field Components during Solar Cycles 23 and 24. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, p. 69–69, 2021.

Provisional Dst index, February 2022. Disponível em: [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/202202/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202202/index.html). Acesso em 31 out. 2023.

PULKKINEN, T. Space Weather: Terrestrial Perspective. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 4, 1 jan. 2007.

RANGARAJAN, G. K.; BARRETO, L. M. Secular change in the location of the magnetic dip equator in the twentieth century. **Geofísica Internacional**, v. 39, n. 4, p. 323–336, 2024.

REINISCH, B W *et al*, New Digisonde for research and monitoring applications, **Radio Science**, v. 44, n. 1, 2009.

SANTOS, A; RONAN, T. **ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSÕES SOLARES E DE SEUS EFEITOS NA TERRA RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE -CNPq/MCT)**. 2009.

SCHWARZSCHILD, M. On Noise Arising from the Solar Granulation. **The Astrophysical Journal**, v.107, n.1, p.1, 1948.

SOLANKI, S. K. et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. **Nature**, v. 431, n. 7012, p. 1084–1087, 1 out. 2004.

Solar Monitor. Disponível em: <https://www.solarmonitor.org>. Acesso em: 31 out.2023.

**Van Allen Radiation Belts**. Disponível em:

<<https://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/Plasmahtml/node24.html>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

YAMAZAKI, Y.; MAUTE, A. Sq and EEJ—A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. **Space Science Reviews**, v. 206, n. 1-4, p. 299–405, 14 set. 2016.