



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/11.08.16.44-TDI

CLIMA ESPACIAL: FUNDAMENTOS PARA A AVIAÇÃO CIVIL

Joaquim Eduardo Rezende Costa
Cristiano Max Wrasse
Marcelo Banik de Pádua
Douglas Silva
Fábio Becker Guedes
José Paulo Marchezi
José Roberto Cecatto
Láysa Cristina Araujo Resende Chagas
Lígia Alves da Silva
Lívia Ribeiro Alves
Marlos Rockenbach da Silva
Paulo Ricardo Jauer
Siomel Savio Odriozola
Sony Su Chen

EMBRACE/DICEP

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47UGJJ5>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

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

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

Presidente:

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

Membros:

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/11.08.16.44-TDI

CLIMA ESPACIAL: FUNDAMENTOS PARA A AVIAÇÃO CIVIL

Joaquim Eduardo Rezende Costa
Cristiano Max Wrasse
Marcelo Banik de Pádua
Douglas Silva
Fábio Becker Guedes
José Paulo Marchezi
José Roberto Cecatto
Láysa Cristina Araujo Resende Chagas
Lígia Alves da Silva
Lívia Ribeiro Alves
Marlos Rockenbach da Silva
Paulo Ricardo Jauer
Siomel Savio Odriozola
Sony Su Chen

EMBRACE/DICEP

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/47UGJJ5>>

INPE
São José dos Campos
2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>	
1.1	Diagrama de Hertzsprung-Russel. Os números na faixa sombreada da sequência principal são massas estelares em unidades da massa solar. As linhas pontilhadas são curvas de raio constante, rotuladas raio / raio-sol; RW Ventos impulsionados por radiação. Os tipos espectrais B, A, ..., correspondem às estrelas da sequência principal (STIX, 2004).	4
1.2	Estruturas internas do Sol	5
1.3	Perfil de temperatura (linha contínua) e perfil de densidade em função da altura na atmosfera solar.	7
1.4	Radiação eletromagnética de uma típica explosão solar, mostrando que a emissão se apresenta num amplo espectro, desde rádio, passando pelo visível e UV até Raios-X e Raios-gama.	9
1.5	Sequência de imagens da evolução da Ejeção de massa coronal.	11
1.6	Imagens mostrando o efeito da chegada de uma corrente de partículas energéticas solares (SEP) num detector em órbita da Terra. O quadro à esquerda mostra a origem da corrente de partículas energéticas - uma explosão /“flare” solar. E o quadro à direita a perturbação na imagem é a detecção da corrente de partículas energética solares pelo detector.	13
1.7	Buracos coronais observados em raios X pelo satélite YOHKOH e em 193 Angstrom pelo AIA/SDO.	14
2.1	Imagem combinada mostrando a estruturação do vento solar na coroa solar.	16
2.2	Diagrama esquemático da topologia do campo magnético na coroa solar.	17
2.3	O modelo da saia de bailarina tridimensional da heliosfera como proposto por ALFVÈN (1977).	19
3.1	representa as diferentes regiões com suas escalas espaciais e temporais envolvidas no estudo do clima espacial.	23
3.2	ilustra um conjunto de equações utilizadas pelo novo modelo MHD3D da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. De cima para baixa: a primeira equação representa a conservação da massa; a segunda representa a conservação do momentum; a terceira representa a conservação da energia; e a 4 representa a conservação do fluxo magnéticos, juntamente com as condições de contorno iniciais representada pela lei de Gauss do divergente de B.	25

4.1	Ilustração da interação entre o Sol e a magnetosfera da Terra (sem escala). Neste exemplo, uma erupção do Sol atingiu a Terra, comprimiu a magnetosfera e injetou partículas energéticas.	28
4.2	(Direita) Ilustração esquemática de estruturas de vento solar típicas de regiões de interação corrotante (CIRs) e de (esquerda) ejeções de massa coronal (CMEs): (de cima para baixo) campo magnético B , um dos componentes cartesianos B_i , velocidade do vento solar V , densidade N , temperatura T , resposta esperada do índice Dst e fluxo de elétrons $> 2,0$ MeV em órbita geossíncrona.	29
4.3	Ilustração do cinturão externo e interno de radiação e as Sondas Van Allen A e B.	30
4.4	Ilustração do cinturão externo e interno de radiação e as Sondas Van Allen A e B.	31
4.5	(a) fluxos de elétrons nos canais de energias de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV e 3,4 MeV em $L^* = 5,2$; (b) velocidade do vento solar (V_p); (c) Intensidade do campo magnético interplanetário (IMF) (B_t) e componente B_z do IMF; (d) Altura da magnetopausa calculada através do modelo de Shue et al., (1998). Os fluxos de elétrons são obtidos pelo instrumento REPT a bordo das Sondas Van Allen A e B. Os V_p , B_t , B_z , B_x e B_y são obtidos pelo satélite ACE no ponto Lagrangiano L1. TH-D representa o satélite THEMIS-D cruzando a magnetopausa em 23:50 UT (x-GSE 8RE)..	33
4.6	(De cima para baixo) a distribuição do pitch angle (PAD) do elétron (eixo vertical) em função do tempo (eixo horizontal) para o canal de energia de 2,10 MeV (escala de cores); os espectros dinâmicos do campo magnético (escala de cores) como uma função da frequência (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal) para ondas EMIC, Chorus e ULF, respectivamente. Os dados são obtidos do Van Allen Probe A para o período de 19 de julho às 22:30 UT a 20 de julho às 06:00 UT.	34
4.7	Características da radiação espacial de diferentes fontes, e seus efeitos em satélites.	36
6.1	Ilustração da localização das fontes de campos magnéticos que compõem o campo geomagnético.	48
6.2	Mapa da magnitude da componente total do campo geomagnético obtida a partir do modelo IGRF-13 para o ano de 2020.	49
6.3	Esquemática do sentido da corrente do sistema de Sq e do eletrojato equatorial.	53

6.4	Equador geográfico (azul) e magnético (vermelho). Os limites da região de influência do EEJ (laranja) encontram-se nas latitudes dip $\pm 5^\circ$ em torno do equador magnético, onde o efeito Cowling é mais efetivo.	54
6.5	Representação dos sistemas de correntes elétricas da ionosfera, dentre elas, o eletrojato auroral ao centro da figura.	55
6.6	Sistemas de correntes que circulam na magnetosfera terrestre.	56
6.7	Mapa com as estações magnéticas da Embrace MagNet. Os círculos indicam a região de menor intensidade da componente total do campo geomagnético, 22287 nT em 2018 e 22567 nT em 2010. As isolinhas de 23000 nT da componente total do campo geomagnético representam a região próxima do centro da SAMA. As linhas tracejadas correspondem ao equador magnético. As cores verde e laranja das linhas sólidas e tracejadas indicam os anos de 2018 e 2010, respectivamente.	58
6.8	Fotografias do (a) sensor magnético enterrado a aproximadamente 80 centímetros abaixo da superfície e envolto por uma cobertura de madeira e (b) sistema de controle do magnetômetro da estação magnética de São Martinho da Serra (SMS).	59
6.9	Magnetogramas das componentes H, D e Z observados no magnetômetro de Vassouras da Embrace MagNet no dia (a) 4 de dezembro de 2016 (período calmo) e (b) 8 de dezembro de 2016 (período perturbado).	60
6.10	Mapa com as localizações dos observatórios e estações magnéticas que produzem os índices de atividade geomagnética Kp (verde), Dst (vermelho), ΔH_{sa} e Ksa (azul). A linha vermelha corresponde ao equador magnético. As linhas laranjas correspondem às isoclínicas $\pm 40^\circ$ e $\pm 20^\circ$. Os contornos em preto indicam a região da SAMA.	60
6.11	Índice Kp observado no dia 10 de setembro de 2021.	62
6.12	Índice Dst observado entre os dias 16 e 22 de outubro de 1998, e as respectivas fases da tempestade geomagnética.	63
6.13	Índices ΔH_{sa} e Ksa observados no dia 10 de setembro de 2021	64
7.1	Formação de corrente Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividade diferentes.	69
7.2	Ilustração de diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos, obtidos através do programa SÃO Explorer.	70
7.3	Alguns tipos de camadas Es aferidos por ionogramas.	71
7.4	Mapa da distribuição global da magnitude da componente total do campo geomagnético obtida a partir do modelo IGRF-13 para o ano de 2020.	72
7.5	Ilustração da evolução de uma instabilidade gerando bolhas de plasma baseado no mecanismo da IRT.	74

7.6	As escalas espaciais que podem ter as irregularidades geradas no equador geomagnético e os instrumentos que as detectam (PIMENTA, 2002).	75
7.7	Deriva ionosférica no período noturno (linha cinza) e o parâmetro Vz (seta vermelha) para o mês de janeiro de 2001 em São Luís.	76
7.8	Ionogramas entre 2120 UT e 2240 UT para São Luís no dia 26 de janeiro de 2001, mostrando o início da ocorrência de irregularidades (seta vermelha).	78
7.9	Mapa de TEC para o dia 16 de janeiro de 2015, às 01:10 UT, onde é possível ver a presença de bolhas de plasma.	79
7.10	Emissão do OI 630,0 nm observada pelo imageador instalado em São João do Cariri durante a noite de 24 para 25 de dezembro de 2013, as 21h41 UT (sem bolha de plasma) e as 1h01 UT (com bolha de plasma).	80
7.11	Índice de cintilação S4 medido por um receptor GNSS localizado na cidade de Natal a 230 km ao nordeste de São João do Cariri (Figura 7.10)	81
A.1	Solar Monitor	98
A.2	berkeley.edu	99
A.3	Heliophysics Events Knowledgebase	100
A.4	Wang-Sheeley-Arge (WSA) Enlil	101
A.5	CME Scoreboard	102
A.6	Disposição dos detectores de iodeto de sódio e do germanato de bismuto do satélite Fermi.	104
A.7	Instrumentos que equipam o STEREO	105
A.8	Imagem do coronógrafo C3 do LASCO	106

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Relação entre o aumento da taxa de fluxo de elétrons e prótons e a ocorrência de anomalias em satélites. Fonte: Adaptada de Iucci et al. (2005).	37
5.1 Classificação das pulsações geomagnéticas de acordo com a IAGA em 1958.	40
5.2 Classificação de 1964 feita pela IAGA das ondas de plasma e as pulsações de acordo com a banda espectral e a fonte de energia para geração. . . .	41
7.1 Escala do índice referente às camadas Es.	72
7.2 Escala do índice AV.	77
7.3 Exemplo sobre a relação do índice ionosférico e a ocorrência da irregularidade.	77

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 SOL E IMPACTOS NO AMBIENTE E TECNOLOGIAS TERRESTRES	3
1.1 Introdução	3
1.2 Clima Espacial, fenômenos relacionados e impactos no ambiente e tecnologias terrestres.	8
1.2.1 Explosões (“flares”) solares	8
1.2.2 Ejeções de massa coronal (CME, do inglês <i>Coronal Mass Ejection</i>)	10
1.2.3 Correntes de partículas energéticas solares (SEP)	12
1.2.4 Vento Solar	13
1.2.5 Buracos coronais	14
2 O VENTO SOLAR E CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO	15
3 Simulação Magnetohidrodinâmica 3D da interação do plasma do vento solar com a Magnetosfera Terrestre.	21
4 ESTRUTURAS DO VENTO SOLAR E SEUS IMPACTOS NA MAGNETOSFERA INTERNA - CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN	27
4.1 Exposição de dispositivos tecnológicos no ambiente dos cinturões de radiação	35
5 PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS	39
5.1 Pulsações Contínuas	42
5.1.1 Pulsações de baixa frequência (PBF), 1 – 10 mHz	42
5.1.2 Pulsações de média frequência (PMF), 10 – 100 mHz	43
5.1.3 Pulsações de alta frequência (PAF)	43
5.2 Pulsações Irregulares	44
5.2.1 Pi1 e Pi2	44
5.3 Outros tipos de Pulsações	44
5.4 Pulsações em Baixas Latitudes	45
6 GEOMAGNETISMO	47

6.1	O Campo Geomagnético	47
6.2	As Variações Do Campo Geomagnético	51
6.2.1	Corrente do Sistema Sq	51
6.2.2	Corrente do Eletrojato Equatorial	53
6.2.3	Corrente do Eletrojato Auroral	54
6.2.4	Corrente Anelar	55
6.3	A Rede de Magnetômetros do EMBRACE	56
6.4	Os Índices de Atividade Geomagnética	60
6.4.1	Índice Kp	61
6.4.2	Índice Dst	62
6.4.3	Índices ΔH_{sa} e K_{sa}	63
6.5	Considerações Finais	65
7	IONOSFERA E CORRENTES IONOSFÉRICAS	67
7.1	Fenômenos ionosféricos e seus efeitos em clima espacial	68
7.1.1	Eletrojato Equatorial	68
7.1.2	Camadas Es	69
7.1.3	e como são registradas por diferentes instrumentos em solo	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXO A - ATIVIDADE - Sol	97
A.1	Resumo	97
A.2	Solar Monitor (https://solarmonitor.org/) e SpaceWeather (https://www.spaceweather.com/)	97
A.3	http://sprg.ssl.berkeley.edu/tohban/browser/	98
A.4	https://www.lmsal.com/hek/isolsearch/isolsearch.html	99
A.5	https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction 101	
A.6	https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEScoreboard/	101
A.7	TELESCÓPIOS	102
A.8	Solar Dynamics Observatory (SDO)	102
A.9	Fermi Gamma-Ray	103
A.10	STEREO (Solar TERrestrial RELations Observa- tory)	104
A.11	Glossário	106
	ANEXO B - ATIVIDADE - Obtenção de dados do Meio Interpla- netário – Satélite ACE.	109
B.1	Objetivo	109

ANEXO C - ATIVIDADE - Simulação MHD3D da interação do vento solar com a Magnetosfera Terrestre.	111
C.1 Objetivo	111
C.2 Procedimento	111
C.3 Conclusão	113
ANEXO D - ATIVIDADE - Elétrons Relativísticos no Cinturões de Radiação.	115
D.1 Objetivo	115
D.2 Procedimento	115
D.3 Conclusão	116
D.4 Extra	116
ANEXO E - ATIVIDADE - Geomagnetismo	117
E.1 Conclusão da Atividade	118
ANEXO F - ATIVIDADE - ISMR – S4	119

PREFÁCIO

Com as discussões no meio acadêmico sobre o conhecimento aplicado ao uso do espaço exterior e a evolução dos serviços prestados pelas tecnologias embarcadas em satélites e também aquelas que dependiam da propagação de rádio-ondas no nosso espaço próximo o clima espacial tornou-se um tema essencial para todas as nações. Em uma descrição sumária podemos dizer que as sociedades tornaram-se muito dependentes de serviços que são vulneráveis aos impactos dos fenômenos do clima espacial. Dentre esses serviços estão as operações que dependem do uso do tempo preciso e utilizam as constelações GNSS e certamente as inúmeras aplicações que usam posição geográfica de precisão, dentre elas a aviação, agricultura, mineração e tantas outras.

Importantes áreas de pesquisas, com iniciativas nacionais e internacionais, foram fomentadas para implementar instrumentos e desenvolver a ciência relacionada ao espaço. O programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE), operado pela Divisão de Clima Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), nasceu em 2008 dentro dessas iniciativas, como um serviço pioneiro na América Latina. Num passado recente, a Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO) e a Organização Meteorológica Mundial (WMO), iniciaram conversações com organizações que discutiam os serviços de clima espacial, e que reconheciam a importância do tema para a aviação civil, iniciando o que podemos chamar de meteorologia espacial para a aviação civil. Dentre as medidas que foram tomadas estava o treinamento das autoridades reguladoras da aviação para a "próxima geração de serviços ambientais", seguindo as melhores práticas fornecidas pelos parceiros da WMO no setor de aviação ou entre outros Grupos de discussão da Organização das Nações Unidas (ONU) e organização Internacional dos Serviços do Ambiente Espacial (ISES).

Nesse documento, preparado para atender a parceria do EMBRACE/INPE com o Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (CIMAER/DECEA), um grupo de jovens pesquisadores do EMBRACE se envolveram com muito entusiasmo e conseguiram reunir com reconhecida precisão os fundamentos para o treinamento do corpo técnico do CIMAER na Meteorologia Espacial.

A todos os nossos colaboradores, fica aqui um profundo agradecimento pela construção de mais um bloco fundamental para o bom serviço prestado pelo nosso programa.

Joaquim Costa

1 SOL E IMPACTOS NO AMBIENTE E TECNOLOGIAS TERRESTRES

1.1 Introdução

Os primeiros registros - pré-históricos - referentes ao Sol estão gravados em paredes de cavernas. Também existem registros babilônicos do século XIX A.C. referentes à atividade solar, bem como uma publicação chinesa do século VIII A.C sobre a observação de manchas solares. Por sua vez, os primeiros registros do ocidente foram realizados na Grécia e datam de 300 A.C.

Mas, as investigações científicas sistemáticas foram inauguradas apenas no início do século XVII com as observações e registros de manchas solares usando o telescópio realizadas por Galileu e colaboradores.

Trata-se de uma estrela de classe espectral G2V, o que significa que possui uma temperatura superficial relativamente baixa (5800 K), comparada àquela de estrelas mais massivas, e que se encontra na sequência principal, consumindo o Hidrogênio em seu núcleo central para produção de energia e síntese de elementos mais pesados. A Figura 1.1 mostra o diagrama Hertzsprung-Russel de distribuição de estrelas em termos de massa, luminosidade, magnitude absoluta, tipo espectral e temperatura superficial. A sequência principal na figura é o traço grosso com a posição do Sol (Sun) bem como, abaixo, estrelas menos massiva e, acima, mais massivas, indicado pelo números no interior do traço. Como referência, as massas são dadas em massas solares e, obviamente no caso solar é a unidade.

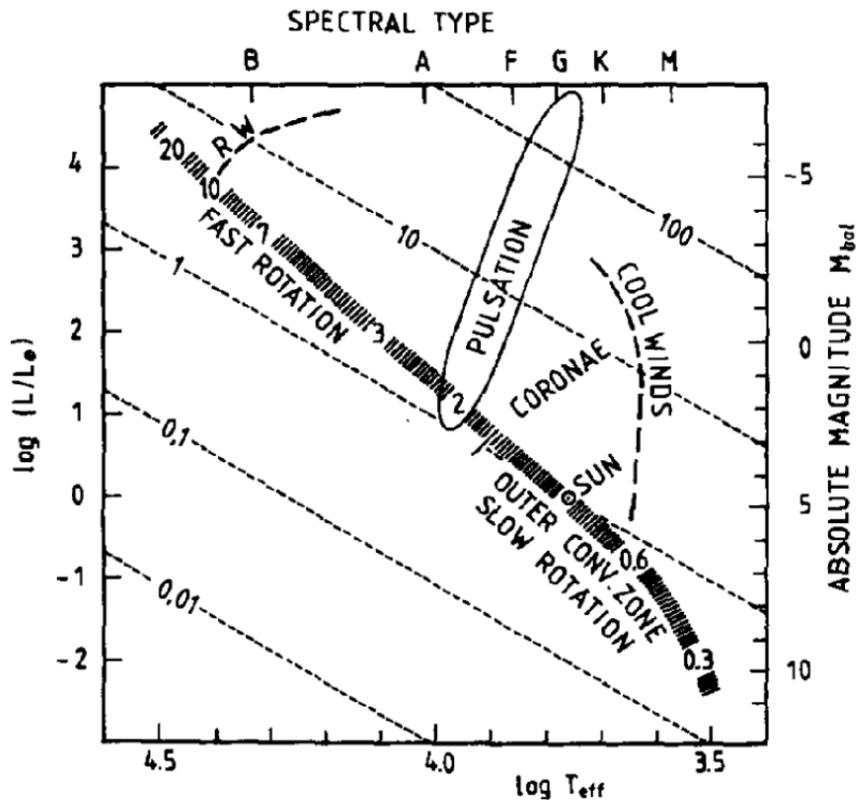


Figura 1.1 - Diagrama de Hertzsprung-Russel. Os números na faixa sombreada da sequência principal são massas estelares em unidades da massa solar. As linhas pontilhadas são curvas de raio constante, rotuladas raio / raio-sol; RW Ventos impulsionados por radiação. Os tipos espectrais B, A, ..., correspondem às estrelas da sequência principal (STIX, 2004).

O Sol está localizado no centro geométrico e gravitacional do sistema solar, e sua luz viaja por cerca de 8 minutos até chegar à Terra. É imprescindível para o ser humano tanto como fonte de luz e energia quanto por ser o agente responsável pela existência e manutenção da vida em nosso planeta. Isso porque a Terra tem uma órbita que se posiciona no interior da zona habitável do sistema solar, uma região que permite a existência de água no estado líquido em abundância na maior parte de nosso planeta. Como se sabe a água é o solvente mais importante para a ocorrência de inúmeros processos biológicos essenciais para as formas de vida que conhecemos. Logo, sem o Sol seria muito difícil a existência de vida em nosso planeta.

Contudo, o Sol não gera apenas benefícios ao ser humano. Também tem a capacidade de perturbar, prejudicar e interromper atividades humanas baseadas

em modernas tecnologias. Pode até oferecer risco de vida, quando esta se localiza fora das camadas protetoras da atmosfera e magnetosfera terrestres. O ramo de pesquisas e atividade que investiga e monitora os fenômenos solares bem como seus efeitos no ambiente e serviços/sistemas tecnológicos terrestres é designado por Clima Espacial. Voltaremos a este tópico mais adiante.

De volta às características e fenomenologia solar, pode-se fazer uma analogia da estrutura solar com uma cebola que compõe-se de camadas sucessivas sobrepostas do interior à casca.

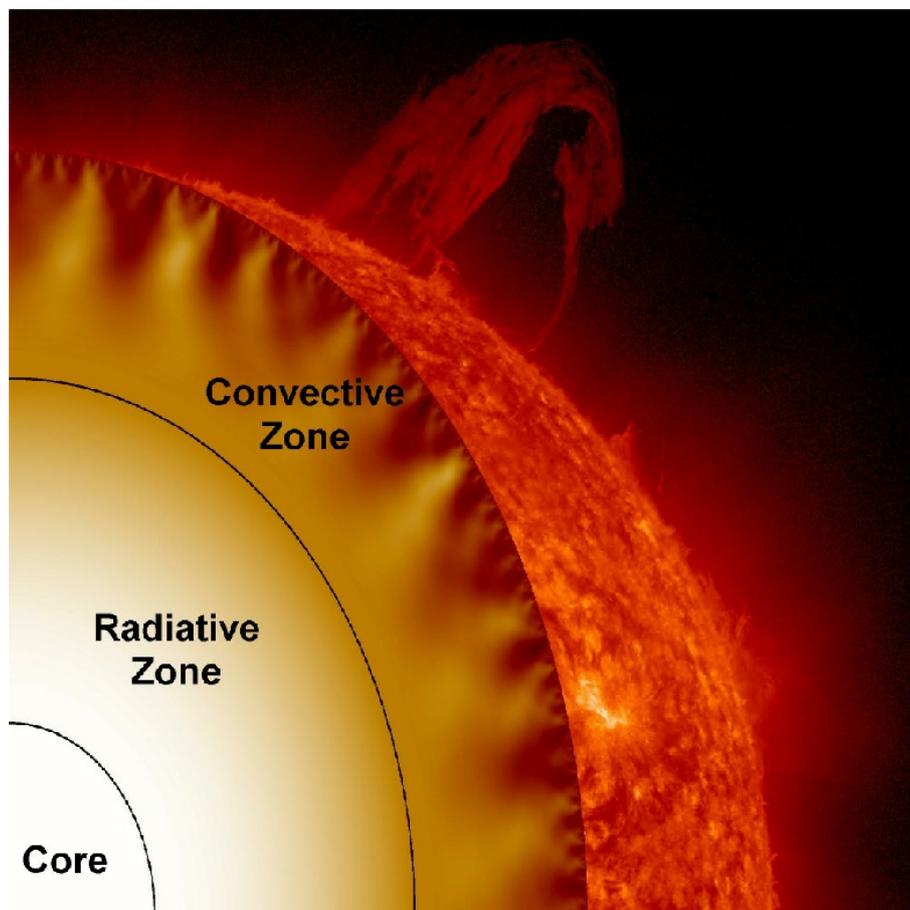


Figura 1.2 - Estruturas internas do Sol

Fonte: (

<https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/cutaway.jpg>, Setembro 2021)

Como mostrado na Figura 1.2 ao lado, a estrutura solar possui um interior composto de núcleo central recoberto por uma camada radiativa que transporta a

energia produzida no núcleo em direção à fotosfera. A camada radiativa termina numa estreita região de transição, entre o transporte de energia radiativo e o envelope superior convectivo, conhecida como tacoclina. A partir daí, existe um envelope convectivo, que recobre a tacoclina e camadas mais internas, que se estende até a base da fotosfera - a camada extremamente luminosa e visível do Sol. Acredita-se que os campos magnéticos das chamadas regiões ativas da atmosfera solar se originem a partir da tacoclina.

Da fotosfera em direção ao espaço, temos a atmosfera solar composta basicamente de 3 camadas: fotosfera - a camada mais baixa, fria e densa que é relativamente estreita (500 km), a cromosfera que recobre a fotosfera, sendo mais quente, menos densa e conseqüentemente menos brilhante que a primeira, e se estende por poucos milhares de km até a estreita região de transição cromosfera-coroa e, por fim, a coroa solar bem mais tênue, quente e muito menos brilhante, do que as outras camadas e que se estende por milhões de km em direção ao espaço. A Figura 1.3 mostra os perfis de temperatura e densidade em função da altura na atmosfera solar.

Ao contrário do que pode parecer, o Sol não é uma estrela monótona e sem vida, pois apresenta fenômenos característicos de estrelas ativas, e o aspecto mais marcante desse comportamento é o chamado ciclo de atividade solar. Trata-se de um período com duração média de 11 anos, durante o qual ocorrem as fases ascendente, de máximo, de decaimento e por fim a fase de mínimo que encerra um ciclo e indica que se espera pelo próximo, o qual deverá se iniciar dentro de poucos anos adiante.

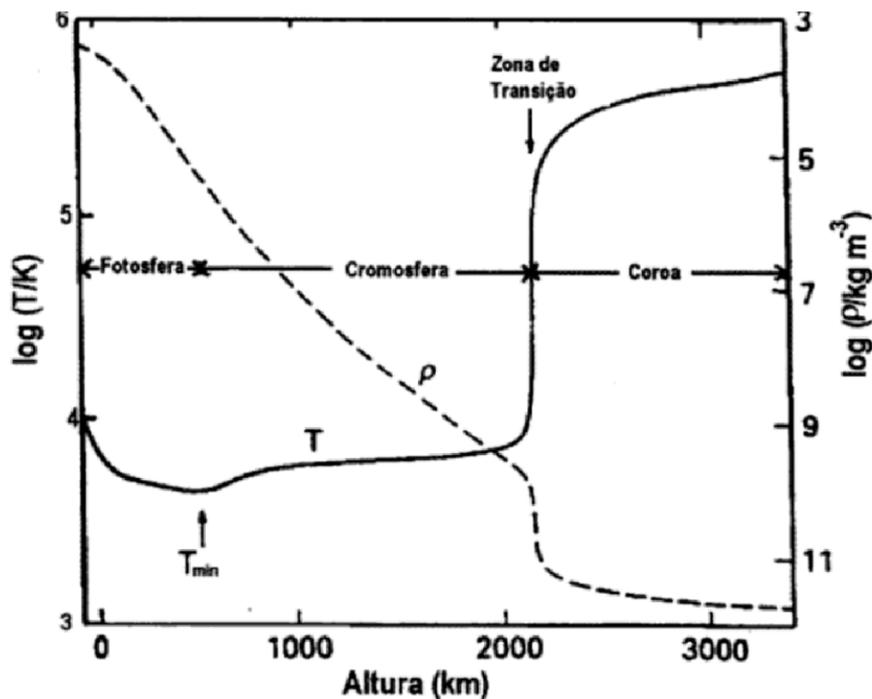


Figura 1.3 - Perfil de temperatura (linha contínua) e perfil de densidade em função da altura na atmosfera solar.

Fonte: <https://oxfordre.com/physics/oxford/fullsizeimage?imageUri=/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-21-graphic-007-full.gif&uriChapter=/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-21;> setembro de 2021

O início desse período cíclico apresenta o surgimento de manchas e grupos de manchas na fotosfera, os quais se projetam para as outras camadas da atmosfera solar na forma de arcos magnéticos originados a partir das manchas. Essas últimas, inicialmente surgem esporadicamente e em pequeno número ocupando pequenas áreas da fotosfera no início da fase ascendente. O número, a área e a frequência de surgimento dos grupos de manchas fotosféricas vai crescendo gradualmente, embora não constantemente, até atingir um máximo durante a fase de máximo do ciclo, o qual dura uns poucos anos. A partir de então, durante a fase de decaimento, se observa um comportamento inverso, com uma diminuição gradual de número, área e frequência dos grupos de manchas até alcançar a fase de mínimo quando praticamente desaparecem da fotosfera as manchas e seus grupos durante uns poucos anos até o início do próximo ciclo de atividade, quando todo esse comportamento se repete. Apesar disso, não existe um padrão para o ciclo de

atividade e, tanto a duração quanto a intensidade de um novo ciclo de atividade não podem ser previstos com precisão.

É na atmosfera solar, onde temos os arcos magnéticos das regiões ativas, que ocorre a grande maioria dos fenômenos solares associados com o ciclo de atividade solar. Aqueles que são os mais importantes e que causam os maiores efeitos, perturbações, prejuízos e até riscos são: “flares” ou explosões solares, ejeções de massa coronal (CME), correntes de partículas energéticas solares (SEP) e vento solar, principalmente o rápido que se origina dos buracos coronais.

A seguir tratamos de Clima Espacial, fenômenos solares relacionados e impactos que causam no ambiente e tecnologias terrestres.

1.2 Clima Espacial, fenômenos relacionados e impactos no ambiente e tecnologias terrestres.

1.2.1 Explosões (“flares”) solares

O fenômeno do “flare” ou explosão solar foi descoberto em 01 de setembro de 1859 simultaneamente por Carrington e Hodgson. Enquanto estudavam grupos de manchas no disco solar em luz visível, eles observaram um brilho intenso repentino proveniente de um grupo de manchas solares específico. A esse fenômeno designaram por “flare” que significa um abrillhantamento intenso e abrupto. A partir de então foram iniciadas investigações científicas sistemáticas sobre esse fenômeno.

Sobre as principais características do “flare”, trata-se de uma repentina, rápida (dezenas segundos a poucas horas) e intensa liberação de grande quantidade de energia ($10^{24} - 10^{32}$ erg; tipicamente 10^{27} erg) magnética, observada como uma forte variação de brilho numa região ativa (RA) da atmosfera solar (alta cromosfera / baixa coroa). Se manifesta como uma explosão de Radiação Eletromagnética (RE) num amplo espectro (de rádio a RX e Raios-gama). A energia se origina de reconexão magnética ocorrendo na RA presente na atmosfera solar (cromosfera/coroa). A figura 4 mostra os perfis temporais de uma explosão solar em várias bandas do espectro eletromagnético.

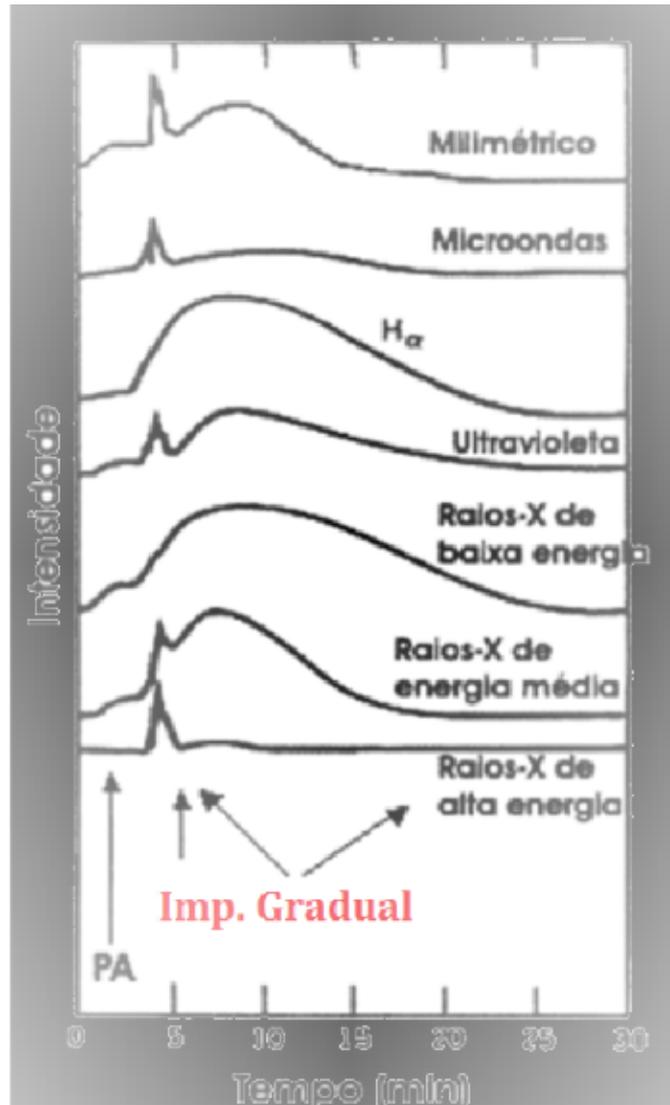


Figura 1.4 - Radiação eletromagnética de uma típica explosão solar, mostrando que a emissão se apresenta num amplo espectro, desde rádio, passando pelo visível e UV até Raios-X e Raios-gama.

Fonte: Adaptado de (KANE, 1974)

Na banda dos raios-X moles ($1.0 - 8.0 \text{ \AA}$), o fenômeno possui uma classificação em termos de sua intensidade de fluxo (I) de acordo com a lista abaixo.

- $I < 10^{-7} \text{ W/m}^2$ – classe A;
- $10^{-7} = < I < 10^{-6} \text{ W/m}^2$ – classe B;
- $10^{-6} = < I < 10^{-5} \text{ W/m}^2$ – classe C;

- $10^{-5} = < I < 10^{-4} \text{ W/m}^2$ – classe M;
- $I \geq 10^{-4} \text{ W/m}^2$ – classe X

A radiação eletromagnética desse fenômeno energético, dependendo da posição (longitude) da região ativa no disco solar e de sua intensidade, se propaga pelo meio interplanetário e eventualmente atinge a Terra em cerca de 8 minutos podendo causar efeitos de perturbações, prejuízos, danos e até riscos tanto no ambiente quanto nos serviços/sistemas que usam tecnologias sensíveis. Entre os efeitos podemos citar:

- Aquecimento da alta atmosfera perturbando a órbita de satélites;
- Perturbação de circuitos eletrônicos de satélites;
- Altas doses radiação em astronautas;
- Aumento do conteúdo eletrônico total (TEC) da ionosfera perturbando / interrompendo telecomunicações, além de sistemas de posicionamento, orientação e navegação, eventualmente com blecaute de rádio.

1.2.2 Ejeções de massa coronal (CME, do inglês *Coronal Mass Ejection*)

As ejeções de massa coronal foram registradas, pela primeira vez no início da década de 1970, pelo coronógrafo a bordo do satélite Skylab quando da realização de sessões observacionais da coroa solar em luz visível. As imagens tomadas com o instrumento, que eram projetadas no plano do céu, evidenciaram e registraram a ocorrência eventual de estruturas brilhantes que se originavam a partir da coroa e se expandiam em direção ao espaço. Verificou-se que a luz dessas estruturas brilhantes era proveniente do espalhamento Thomson de elétrons na estrutura da CME. A Figura 1.5 mostra a evolução temporal da estrutura típica do fenômeno – frente de choque, vão e filamento - desde os primeiros minutos de seu início até sua propagação pelo espaço próximo ao Sol horas depois.

Um aspecto muito importante foi o fato de se registrar, algum tempo após sua ocorrência, uma correspondência entre boa parte das CME com tempestades geomagnéticas.

Com o advento de instrumentos mais elaborados e capazes de missões espaciais que sucederam a Skylab, foi possível se estudar as principais características e

parâmetros físicos desse fenômeno. Observou-se que a estrutura da CME era composta de uma enorme massa de gás (10^{15} - 10^{16} g) magnetizado expulsa da coroa a velocidades de centenas a poucos milhares de km/s.

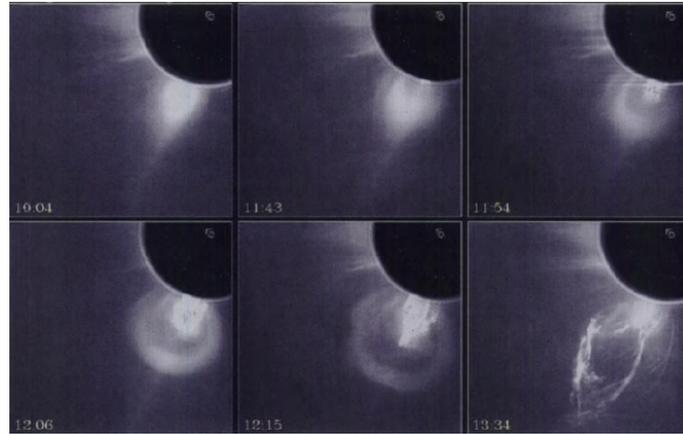


Figura 1.5 - Sequência de imagens da evolução da Ejeção de massa coronal.

Fonte: https://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/cmeposter/smm_cme_big.html, setembro/2021

Sua causa e origem ainda não são bem conhecidos mas, sabe-se que boa parte estão associados a instabilidades em proeminências (eruptivas) que se desconectam de estruturas magnéticas da coroa e são ejetadas a alta velocidade em direção ao espaço. A outra parte está associada à ocorrência de “flares”.

As CME, dependendo de sua velocidade, produzem ondas de choque que se propagam pela coroa - evidenciadas pelo registro de explosões tipo II em rádio - e em seguida pelo espaço, e eventualmente atingem a Terra, tipicamente cerca de 2-3 dias após sua ocorrência. Quando atingem nosso planeta, dependendo da direção de seu campo magnético em relação ao campo da magnetosfera terrestre, esses fenômenos podem causar os seguintes efeitos:

- Compressão e perturbação da magnetosfera terrestre na direção Sol-Terra e formação de “cauda” da Terra em direção ao espaço exterior;
- Penetração de partículas pelos polos magnéticos terrestres podendo gerar auroras;
- Perturbações dos cinturões de radiação com precipitação de partículas;

- Tempestade geomagnética com indução de poderosas correntes nas proximidades da superfície com impacto em sistemas de distribuição de energia – eventualmente blecaute – e em corrosão de oleodutos / gasodutos.

1.2.3 Correntes de partículas energéticas solares (SEP)

Trata-se de uma corrente de partículas – elétrons e íons positivos – que são energizadas (até MeV) pela onda de choque produzida durante um “flare” ou uma ejeção de massa coronal (CME). As correntes mais prejudiciais constituídas pelas partículas mais energéticas normalmente estão associadas a CMEs. Por serem formadas por partículas relativísticas levam dezenas de minutos para chegar à Terra. A Figura 1.6 mostra o exemplo do efeito causado por uma corrente de partículas energéticas (SEP), originada de uma explosão solar, quando de sua chegada num detector em órbita da Terra, dezenas de minutos após o início da explosão associada. E, por se tratarem de partículas carregadas ionizantes têm o poder de danificar e até destruir alguns serviços/sistemas tecnológicos, além de também oferecem risco de vida. Referente aos efeitos e riscos que causam podemos citar os seguintes:

Referente aos efeitos e riscos que causam podemos citar os seguintes:

- Degradação de painéis solares, circuitos eletrônicos e aquisição / registro / armazenamento de sinais digitais em satélites artificiais;
- Irradiação de astronautas em missões tripuladas e de tripulações de aeronaves principalmente de rotas aéreas trans-polares;
- Aumento do fluxo de precipitação de partículas energéticas nos polos magnéticos terrestres e na Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA);
- Produção de auroras nas regiões polares e de altas/moderadas latitudes.

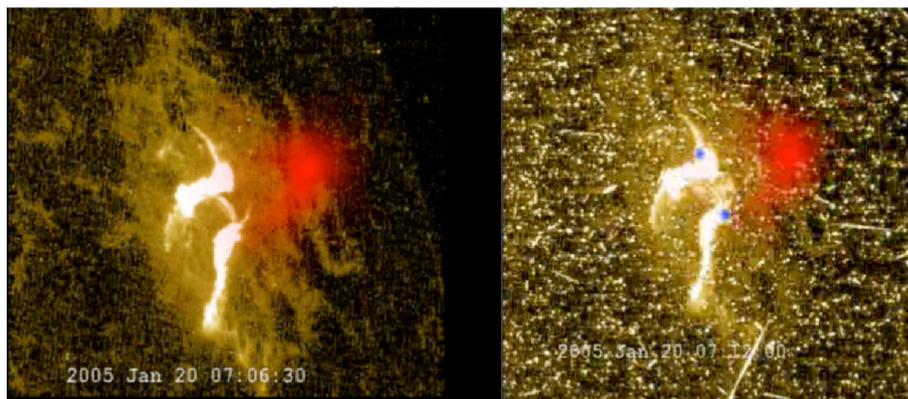


Figura 1.6 - Imagens mostrando o efeito da chegada de uma corrente de partículas energéticas solares (SEP) num detector em órbita da Terra. O quadro à esquerda mostra a origem da corrente de partículas energéticas - uma explosão /“flare” solar. E o quadro à direita a perturbação na imagem é a detecção da corrente de partículas energética solares pelo detector.

Fonte: <https://svs.gsfc.nasa.gov/3162>, setembro/2021

1.2.4 Vento Solar

O vento solar é um fluxo de elétrons e íons positivos, que se origina na atmosfera solar, expulso da coroa para o meio interplanetário com velocidades dentro da faixa de 200~900 km/s. Esse fluxo é possível porque escapa da coroa ao espaço através de linhas de campo “abertas” ou que possuem uma configuração de campo magnético predominantemente radial em direção ao espaço. Pode ser classificado em dois tipos: vento rápido e vento lento.

O vento solar lento (≤ 400 km/s) se origina dos chamados “streamers” coronais acima das regiões ativas, enquanto isso, o vento solar rápido (> 400 km/s) é proveniente dos chamados buracos coronais.

Pode-se dizer que nosso planeta é quase continuamente submetido a esse fluxo do vento solar que quando atinge a Terra pode causar vários efeitos. O efeito mais imediato é uma compressão da magnetosfera terrestre na direção Sol-Terra e um alongamento em forma de cauda da Terra em direção ao espaço. Além disso, outros efeitos também podem ser observados, desde auroras e perturbações na magnetosfera terrestre até sub-tempestade geomagnética.

1.2.5 Buracos coronais

O termo buraco coronal refere-se as manchas mais escuras na superfície solar, medidas em ultravioleta (UV) e radiação de raios X. Possuem regiões de plasma de baixa densidade no Sol e campos magnéticos abertos que se estendem para heliosfera (CRANMER, 2009). As linhas de campos magnéticos abertos permitem que matéria escape mais facilmente da atmosfera solar do que em regiões com linhas de campo fechadas, isto é, nos arcos magnéticos. Durante o início da atividade do ciclo solar prevalecem os grandes buracos coronais que cobrem as calotas polares norte e sul do Sol. No entanto, durante o período mais ativo do ciclo solar eles podem ser observados em qualquer latitude solar. A Figura 1.7 mostra dois buracos coronais observados em bandas distintas do espectro eletromagnético.

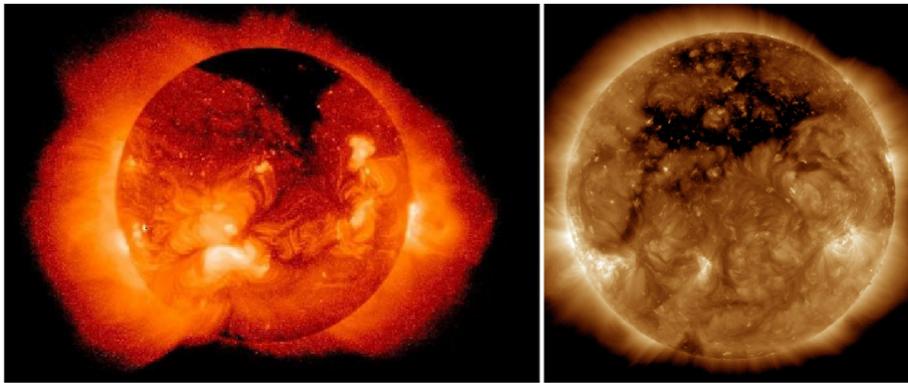


Figura 1.7 - Buracos coronais observados em raios X pelo satélite YOHKOH e em 193 Angstrom pelo AIA/SDO.

Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Coronal_hole#/media/File:Sun_in_X-Ray.png, <https://weatherboy.com/exploring-coronal-holes>, setembro/2021

2 O VENTO SOLAR E CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO

A heliosfera é preenchida por um tênue plasma magnetizado, composto por uma mistura de íons e elétrons fluindo para longe do Sol: o vento solar. A atmosfera exterior solar é tão quente que nem mesmo a gravidade solar pode evitar que o vento solar “evapore” continuamente. Este plasma carrega consigo o campo magnético solar até a fronteira da heliosfera, onde seu domínio termina (SCHWENN, 2006).

O vento solar e o campo magnético interplanetário ("Interplanetary Magnetic Field- IMF), demonstram ser a ligação chave entre a atmosfera solar e o geoespaço. Geralmente, o vento solar é desviado em torno da Terra por sua magnetosfera que é mantida pelo campo magnético intrínseco da Terra. As partículas do vento solar não podem penetrar na magnetosfera, a menos que ocorra um processo chamado de reconexão magnética das linhas dos campos magnéticos interplanetário e planetário. Isto pode ocorrer se o campo magnético apontando para o norte (sentido positivo do eixo z, no sistema de coordenadas GSM) na frente da magnetosfera terrestre (sentido positivo do eixo x, no sistema de coordenadas GSM), for atingido pelo vento solar carregando um campo magnético interplanetário direcionado para Sul (sentido negativo do eixo z, no sistema de coordenadas GSM). Em tal situação, distúrbios geomagnéticos significantes de vários tipos são iniciados. As observações mais detalhadas do vento solar têm sido feitas por satélites localizados no ponto Lagrangeano L1 (Ponto de equilíbrio gravitacional entre Sol e Terra). Vários fenômenos relevantes para o clima espacial são visualizados na coroa solar, que só podem ser observados durante eclipses ou por coronógrafos (instrumentos que simulam um eclipse). A Figura 2.1 mostra que a coroa solar é altamente estruturada e dinâmica. A coroa solar muda sua forma durante o ciclo de atividade solar. Conseqüentemente, não é surpreendente que sua estrutura espacial e variabilidade temporal sejam reproduzidas no vento solar. Devido a esta estruturação, o vento solar não é emitido uniformemente, pois o plasma pode ser aprisionado na coroa solar por estruturas em formas de arco, o que ocorre, por exemplo, na região equatorial solar durante o mínimo de atividade solar, como pode ser visto na Figura 2.2.

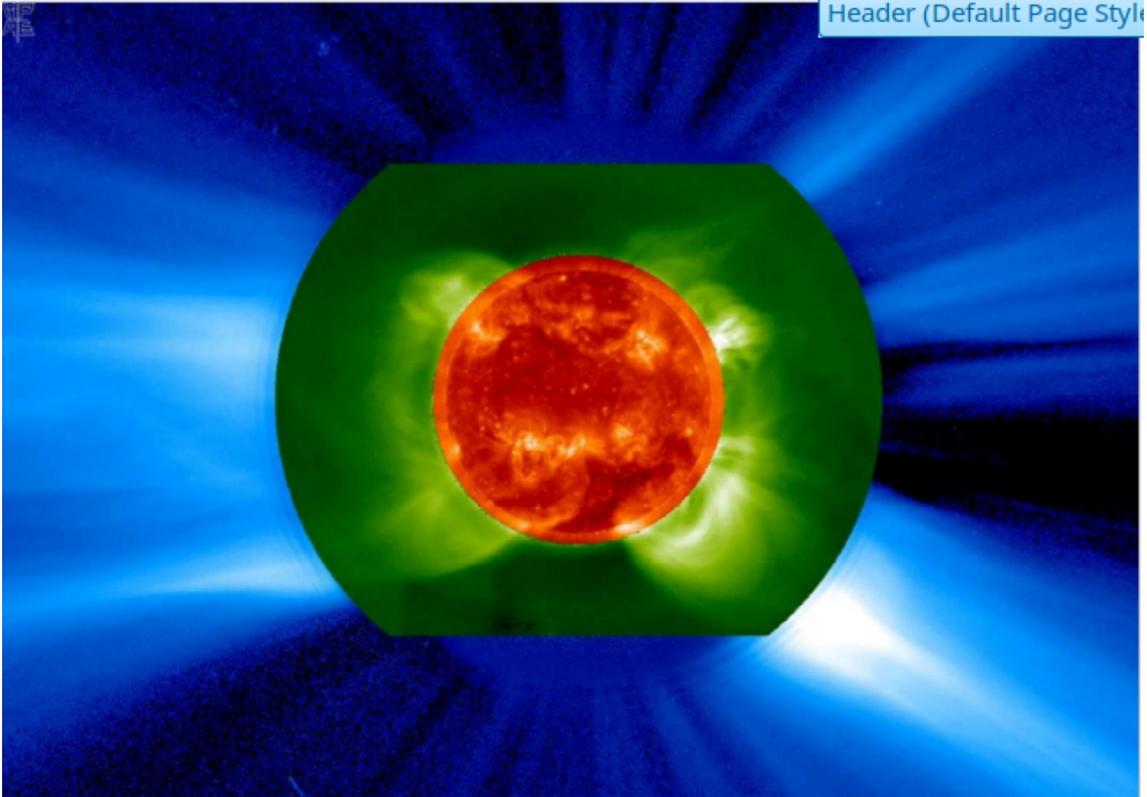


Figura 2.1 - Imagem combinada mostrando a estruturação do vento solar na coroa solar.

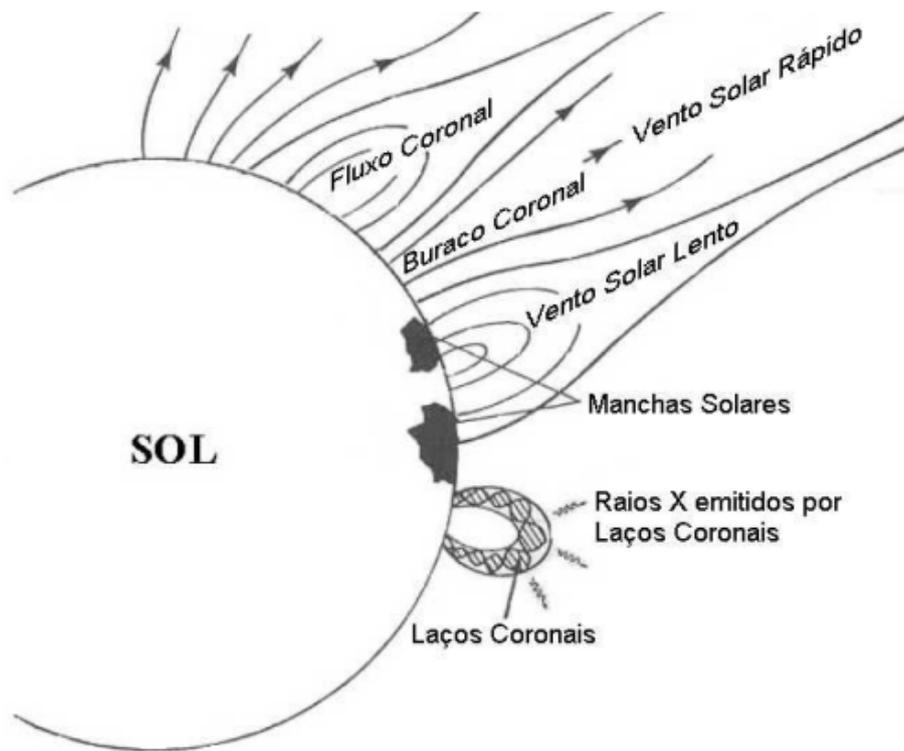


Figura 2.2 - Diagrama esquemático da topologia do campo magnético na coroa solar.

Ainda na fase de mínimo, em torno dos pólos solares podem ser vistas grandes regiões escuras, que são chamadas de buracos coronais, que possuem configuração de linhas de campo magnético “abertas” (as linhas de campo magnético destas regiões se estendem para muito longe do Sol, aparentando estarem abertas, mas na verdade essas linhas estão conectadas e fechadas), por onde o vento solar rápido emerge. Quando a polaridade do campo magnético solar é positiva no polo norte, ou seja, as linhas de campo estão apontando para fora do Sol, a polaridade no polo Sul é negativa, as linhas apontam para dentro. A polaridade do campo magnético solar possui um ciclo de 22 anos, sendo invertida a cada 11 anos definindo o chamado ciclo de atividade solar. O número de manchas solares que aparecem na fotosfera é o principal indicador deste ciclo, sendo maior no máximo da atividade solar.

Como vimos, o vento solar é um plasma ionizado, altamente condutor, emitido pelo Sol e, por este motivo, ele só não é sensível a ação do campo magnético solar como o movimento de seus elétrons e íons livres altera a configuração deste campo, produzindo uma relação interdependente entre plasma e campo magnético. Desta

forma, o plasma e o campo magnético estão unidos e diz que o campo magnético solar está “congelado” no plasma. O campo magnético é carregado pelo vento solar, mas permanece unido à sua fonte no Sol. Portanto, as linhas do campo magnético solar não são paralelas à direção da velocidade radial do vento solar, mas elas se torcem conforme o vento solar se afasta do Sol, constituindo o IMF, com intensidade de aproximadamente 5 nT nas circunvizinhanças da Terra. Devido à rotação do Sol, o IMF possui o aspecto de uma espiral, sendo quase radial próximo ao Sol e praticamente perpendicular à direção radial a uma distância de 5 a 10 AU. Próximo a órbita da Terra (1 AU) o IMF tem uma inclinação de aproximadamente 45° em relação a reta que liga a Terra ao Sol.

Devido à expansão do vento solar e ao congelamento das linhas do IMF no mesmo, forma-se uma Lâmina de Corrente Heliosférica (“Heliospheric Current Sheath- HCS), afim de separar os setores de polaridades opostas, que é uma descontinuidade tangencial que separa dois plasmas com campo magnéticos antiparalelos. Com base nas descobertas feitas durante os anos 70, um modelo tridimensional da heliosfera e das estruturas de fluxo do vento solar foi desenvolvido. A heliosfera é mais adequadamente visualizada pelo modelo de saia de bailarina primeiramente proposto por. A Figura 2.3 mostra uma versão artística da heliosfera interior como ela poderia estar imediatamente antes do mínimo de atividade solar. Esta configuração deve-se ao fato de o eixo da HCS estar deslocada em relação ao eixo de rotação solar, fazendo com que a HCS assume um formato ondulado, sendo mais ondulada e perturbada no máximo da atividade solar.

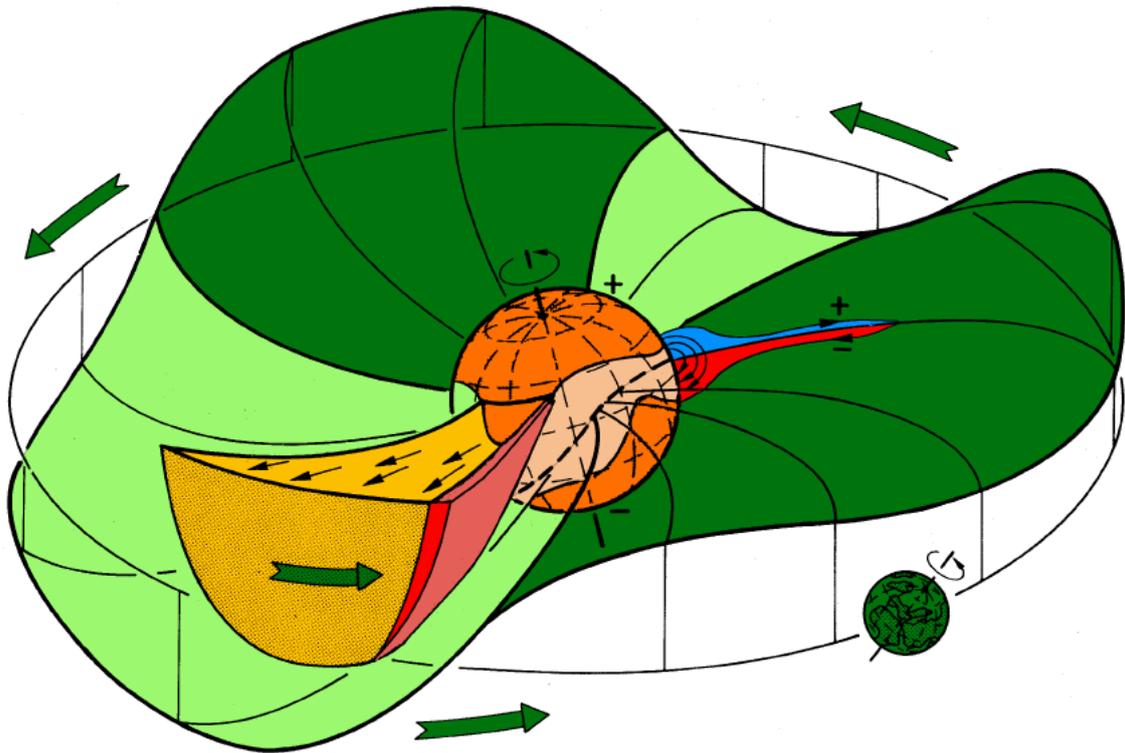


Figura 2.3 - O modelo da saia de bailarina tridimensional da heliosfera como proposto por ALFVÈN (1977).

Na Figura 2.3, estão representados, em laranja em torno dos pólos, os buracos coronais. Estas estruturas algumas vezes migram (estrutura amarela na Figura 2.3) para a região equatorial interagindo com o vento solar lento local, formando regiões de interação dos ventos solares lento e rápido, podendo gerar uma onda de choque (representado pela cor vermelha na Figura 2.3). A parte verde representa a HCS. Seguindo-se a órbita da Terra (setas verdes), ela passará por regiões de diferente polaridade do IMF, sendo positiva a verde escura e negativa a verde clara. O vento solar expande-se pela heliosfera até onde sua pressão dinâmica equilibra-se com a pressão dinâmica do meio interestelar passando de um estado supersônico para subsônico, formando, desta forma, uma onda de choque chamada de choque terminal, definindo a Heliosfera, em aproximadamente 100 UA.

3 Simulação Magnetohidrodinâmica 3D da interação do plasma do vento solar com a Magnetosfera Terrestre.

O clima espacial que se refere as condições e os processos físicos que ocorrem no Sol, vento solar, meio interplanetário e o ambiente global e interno da magnetosfera terrestre que podem afetar diretamente ou indiretamente a vida humana e dos animais e os sistemas tecnológicos (TÓTH et al., 2012). O conteúdo energético que é liberado a partir da superfície solar mais externa a coroa propaga-se de forma supersônica, radial e continua na forma de massa, momentum, energia e fluxo magnético podendo interagir com qualquer objeto magnetizado ou não a sua propagação. Durante a fase do máximo de atividade solar as erupções solares tornam-se mais frequente liberando/ejetando bilhões de toneladas de plasma magnetizado no meio interplanetário conhecido como Ejeções Coronais de Massa (ECM). Estas estruturas solares são conhecidas no meio interplanetário como Ejeções Coronais de Massa interplanetária (ECMI). Se estas estruturas energéticas possuem uma componente direcionada para a Terra, devido suas características de velocidade e campo magnético, podem de forma intensa e em poucas horas, interagir com a magnetosfera terrestre subsolar e através do processo físico de reconexão magnética (DUNGEY, 1961), o qual fornece um meio de interligação estes dois regimes de plasma (interplanetário- magnetosférico) penetrar para regiões internas da magnetosfera terrestre. Os efeitos desta abrupta interação/transferência energética com a magnetosfera global e interna é um aumento súbito na propagação de ondas em diferentes faixas de frequência, e nos níveis de energia de um conjunto de partículas, que habita diferentes regiões da magnetosfera global e interna como, por exemplo, a corrente de anel (CA) e os cinturões de radiação (CR).

Contudo, durante a fase do mínimo de atividade solar as estruturas solares predominantes e que causam efeitos similares, porém com intensidades diferentes, aos elencados em outrora na magnetosfera terrestre são os buracos coronais (BC). Estas regiões solares de campo magnético aberto aonde o fluxo do vento solar rápido emana continuamente e interage com o vento solar lento forma uma região de interação corrotante (RIC) como mostrado anteriormente em outra seção. Estas estruturas solares recorrentes devidos suas características de plasma e flutuações quando interagem repetidamente, a cada rotação solar, com a magnetosfera global e interna transferem energia continuamente que podem causar aceleração de partícula em altos níveis, apresentando altos riscos para vida humana, em especial, de astronautas e tripulantes em voos transpolares e aos sistemas tecnológicos.

Estes distúrbios globais e internos são conhecidos com o nome de tempestades e subtempestades magnéticas, que são as manifestações dos efeitos globais e dinâmicos deste acoplamento.

Os efeitos, desta forte e contínua interação entre o sistema Sol, Magnetosfera, ionosfera, alta atmosfera e no solo, e suas manifestações podem ser medidas em diferentes regiões da magnetosfera global e interna, pelos sensores a bordo de satélites e em solo. Apesar e de certo modo contraditório, os meios tecnológicos que nos são úteis/aliados para monitorar estes ambientes energéticos estão sujeitos aos efeitos, além disso, independente da fase do ciclo solar o ambientes magnetosféricos esta continuamente sendo perturbado.

Podemos citar um evento solar, interplanetário e magnetosférico mais energético registrado no século XIX que ocorreu entre 1-2 de setembro de 1859 chamados de evento Carrington. Pela primeira vez foi documentada/escrita à conexão entre o que estava acontecendo no sol e uma supertempestade magnética ou atividade geomagnética extrema. Se tal classe de evento solar extremo retorna-se a acontecer novamente poderia impactar todos os nossos sistemas de satélites, rotas/linhas de tráfego aéreo, sinais de GPS, rede de transmissão de energia. As perdas seriam sem precedentes podendo haver um colapso mundial devido à alta dependência que a humanidade encontra-se em relação ao sistema tecnológico.

Tendo em vista esta limitação intrínseca, imposta pela complexidade das grandes escalas espaciais e temporais envolvidas, no clima espacial (Figura 3.1) os cientistas espaciais deste a década de 80 até os dias atuais (LEBOEUF et al., 1981; BRECHT et al., 1981; WU et al., 1981; LYON et al., 1986; RAEDER et al., 1996; OGINO, 1986; POWELL et al., 1999; TÓTH et al., 2012), estão dedicando esforços para desenvolver modelos numéricos, que complementem/aliem-se aos meios de investigação e observações já existentes. Estes modelos conhecidos como Magnetohidrodinâmico (MHD), que consiste em considerar em primeira aproximação o plasma com sendo um fluido condutor, possuindo forte e consistente base físico-matemática e numérica para descrever com certo grau de confiabilidade estes complexos cenários de clima espacial. Como citado anteriormente, os processos físicos ocorrem nas mais variadas escalas espaço-tempo (Figura 3.1) e as orbitas dos satélites são insuficientes para fornecer uma ampla e detalhada imagem ou um cenário tridimensional completo, pois a aquisição dos dados esta restrita a poucos pontos ao longo desta orbita.

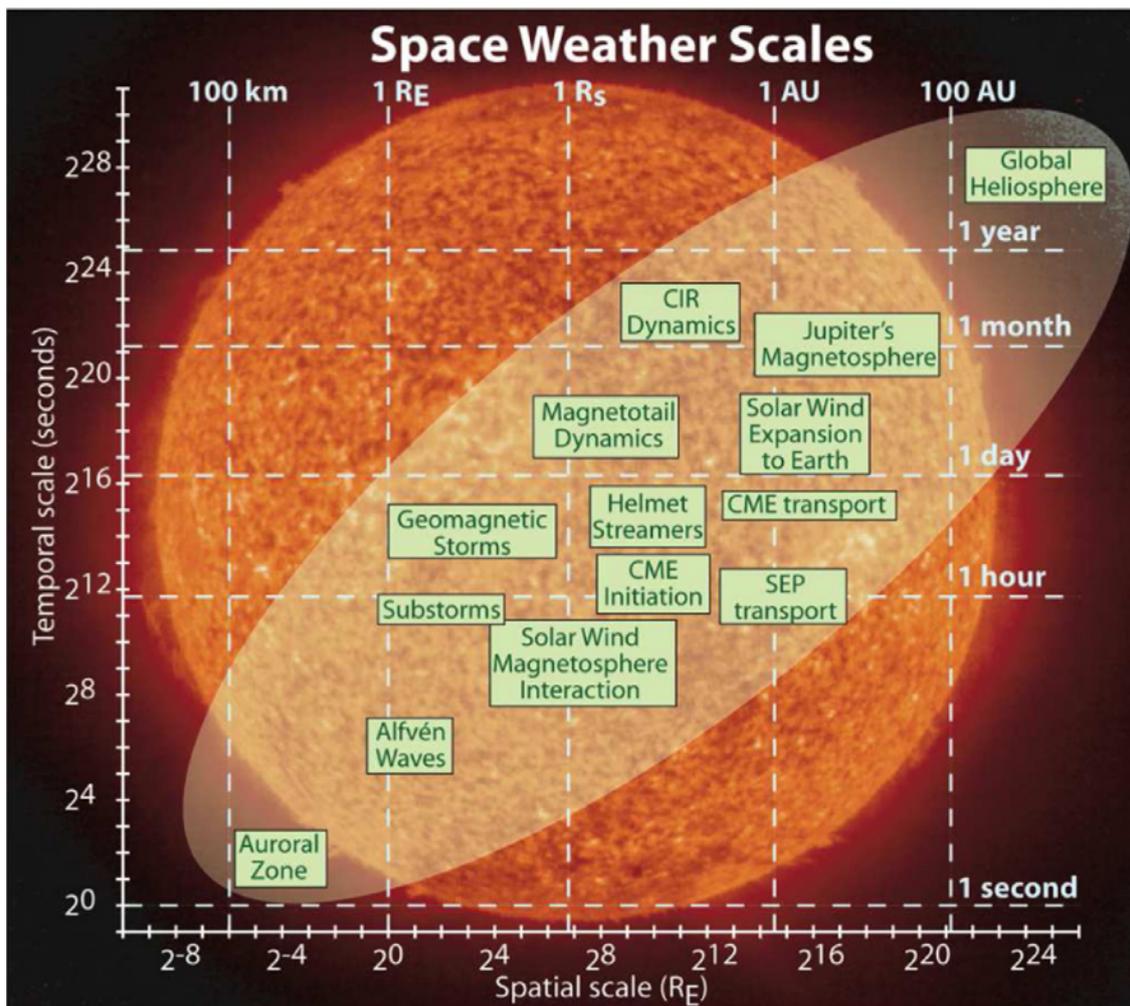


Figura 3.1 - representa as diferentes regiões com suas escalas espaciais e temporais envolvidas no estudo do clima espacial.

Fonte: Adaptada de Tóth et al. (2012)

Deste modo, os modelos MHD3D são uma ferramenta poderosa aliada as observações, fornecendo uma oportunidade de construir e reconstruir cenários de extremos eventos, assim como, o evento de Carrington 1859, entre outros observados na nossa era espacial. Estes cenários construídos de forma auto-consistente possibilitam aos cientistas espaciais analisar de forma mais detalhada diferente regiões da magnetosfera global e interna, e realizar uma estimativa dos possíveis efeitos. Com esta previsão numérica global e informação detalhada medidas e estimadas podemos de forma rápida tomar decisão para minimizar seus efeitos caso tal evento venha a se repetir no futuro.

Um dos principais modelos MHD 3D utilizado pela comunidade científica nacional e internacional para realizar pesquisa e também que esta sendo utilizado para fornecer uma previsão do estado magnetosférico é o modelo Space Weather modeling framework/Block Adaptive Tree solar wind Roe upwind Scheme (SWMF/BATSRUS) desenvolvido pelo Center of Space Environment Modeling (CSEM) da Universidade de Michigan (TÓTH et al., 2012). Este modelo encontra-se disponível na NASA Coordinated Modeling Center (CCMC), no seguinte endereço: (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/requests/requests.php>) para a comunidade de cientistas requisitar modelagem de eventos que são importantes do ponto de vista científico. O modelo SWMF/BATSRUS esta sendo utilizado pela NOAA Space Weather Prediction Center (SWPC) no seguinte endereço eletrônico: (<https://www.swpc.noaa.gov/products/geospace-magnetosphere-movies>), cujo intuito é fornecer uma previsão do estado magnetosférico devido a interação do vento solar com a magnetosfera terrestre em tempo real.

Com o intuito de auxiliar o programa de clima espacial do INPE o EMBRACE a fornecer um produto de qualidade para comunidade científica um modelo totalmente Brasileiro foi desenvolvido pelo pesquisador Dr. Paulo Ricardo Jauer e colaboradores. Este é o primeiro modelo magnetohidrodinâmico MHD3D (Artigo referente ao modelo esta sendo elaborado) Global Brasileiro da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre para ser utilizando como um primeiro modelo global de previsão do clima espacial brasileiro e para estudos científicos. Este modelo desenvolvido reproduz do ponto de vista global as mesmas características da magnetosfera terrestre que os outros modelos citados acima com alta precisão numérica.

O modelo resolve um conjunto de equações na forma semi-conservativa MHD 3D Figura 3.2 utilizando coordenadas cartesianas regular cuja às dimensões são: $-30 < x < 120 \text{ Re}$; $-35 < y < 35 \text{ Re}$; $-35 < z < 35 \text{ Re}$. O modelo utiliza 4 ordem para resolver as derivadas espaciais e 2 ordem Runge Kutta para o tempo. O esquema numérico agrega um passo importante que é uma técnica de captura de Choque/descontinuidades baseado na seletiva identificação/localização dinâmica destas regiões e na aplicação de viscosidade local, fora destas células/regiões a viscosidade tende a zero, tornado o modelo com baixa difusividade e alta precisão numérica. Outro detalhe importante o modelo foi escrito em linguagem de programação fortran 90 compatível a ser executado em ambiente CUDA/Placas de vídeos e OPENMP. Agrega as mais modernas tecnologias podendo ser executado em tempo real em uma grade espacial com $dx=0.5\text{Re}$. Para simulações científicas

utiliza-se um espaçamento mais refinado $dx=0.25$, contudo o modelo roda próxima do tempo real. Outra vantagem não ha necessidade de um Cluster ou espaço específico para ser executado pode ser utilizado em um computador pessoal desde que cumpra os mínimos requisitos de processamento da placa de vídeo. O modelo já esta em fase final para ser executado em tempo real, no programa de clima espacial do INPE, aonde os dados obtidos dos satélites DSCOVR ou ACE podem ser utilizados como condições de contorno a cada intervalo de tempo real.

The Magnetohydrodynamic Equations

- Macroscopic plasma properties are governed by basic conservation laws for mass, momentum and energy in a fluid.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Mass} & \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v}) \\
 \text{Momentum} & \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v} + p \vec{\mathbf{I}}) + \vec{\mathbf{j}} \times \vec{\mathbf{B}} \\
 \text{Energy*} & \frac{\partial e}{\partial t} = -\nabla \cdot [(e + p) \vec{v}] + \vec{\mathbf{j}} \cdot \vec{\mathbf{E}} \quad e = \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p}{\gamma - 1} \\
 \text{Faraday's Law} & \frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{\mathbf{E}} \\
 \text{Gauss' Law} & \nabla \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0 \\
 \text{Ohm's Law} & \vec{\mathbf{E}} = -\vec{v} \times \vec{\mathbf{B}} + \eta \vec{\mathbf{j}} \quad \eta = \alpha \mathbf{j}^2 \\
 \text{Ampere's Law} & \vec{\mathbf{j}} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{\mathbf{B}}
 \end{array}$$

Figura 3.2 - ilustra um conjunto de equações utilizadas pelo novo modelo MHD3D da interação do vento solar com a magnetosfera terrestre. De cima para baixa: a primeira equação representa a conservação da massa; a segunda representa a conservação do momentum; a terceira representa a conservação da energia; e a 4 representa a conservação do fluxo magnéticos, juntamente com as condições de contorno iniciais representada pela lei de Gauss do divergente de B.

Fonte: Adaptada de Tóth et al. (2012)

4 ESTRUTURAS DO VENTO SOLAR E SEUS IMPACTOS NA MAGNETOSFERA INTERNA - CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN

A magnetosfera da Terra está contida dentro de uma extensão interplanetária altamente variável, nas camadas externas da atmosfera solar, no vento solar (Hundhausen, 1995). As observações in situ das condições do plasma, do vento solar, e do campo magnético terrestre, medidas através de satélites, como WIND, ACE e DSCOVR, mostram que durante os períodos de baixa atividade solar (mínimos solares), o vento solar lento (~ 350 km/s) está confinado às regiões de baixa latitude do Sol, enquanto o vento solar rápido (~ 600 km / s) é observado em latitudes mais altas (Krieger et al., 1973) (Figura 4.1). Durante os períodos de alta atividade solar (máximos solares), a configuração do campo magnético solar se afasta significativamente da configuração quase-dipolar observada durante os mínimos solares. Portanto, a estrutura global do vento solar é alterada, refletindo assim a estrutura da atmosfera solar próxima à superfície solar (Balogh et al., 1999). Durante o máximo solar e a fase descendente da atividade solar, o vento solar rápido (High Speed solar wind Stream - HSS) pode se estender a baixas latitudes. O acoplamento entre o vento rápido e o lento resulta na evolução de uma região de interação co-rotativa (CIR) (Sheeley et al., 1976; Tsurutani et al., 2006) (Figura 4.2-Direita). Superpostos à estrutura global do vento solar, os transientes são mais frequentemente observados durante os máximos solares. A maioria desses transientes observados no meio interplanetário é gerada a partir das ejeções de massa coronal (CMEs) (GOSLING, 1990; Echer et al., 2011) (Figura 4.2-Esquerda).

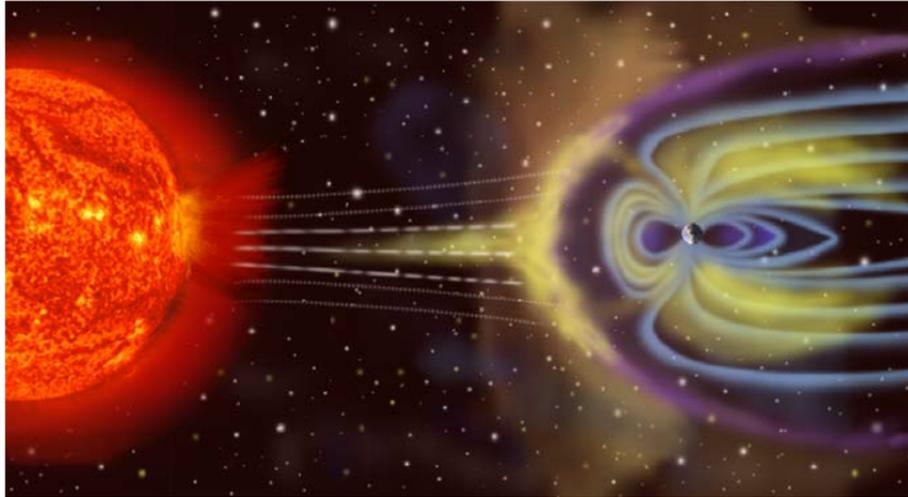


Figura 4.1 - Ilustração da interação entre o Sol e a magnetosfera da Terra (sem escala). Neste exemplo, uma erupção do Sol atingiu a Terra, comprimiu a magnetosfera e injetou partículas energéticas.

Fonte: NASA

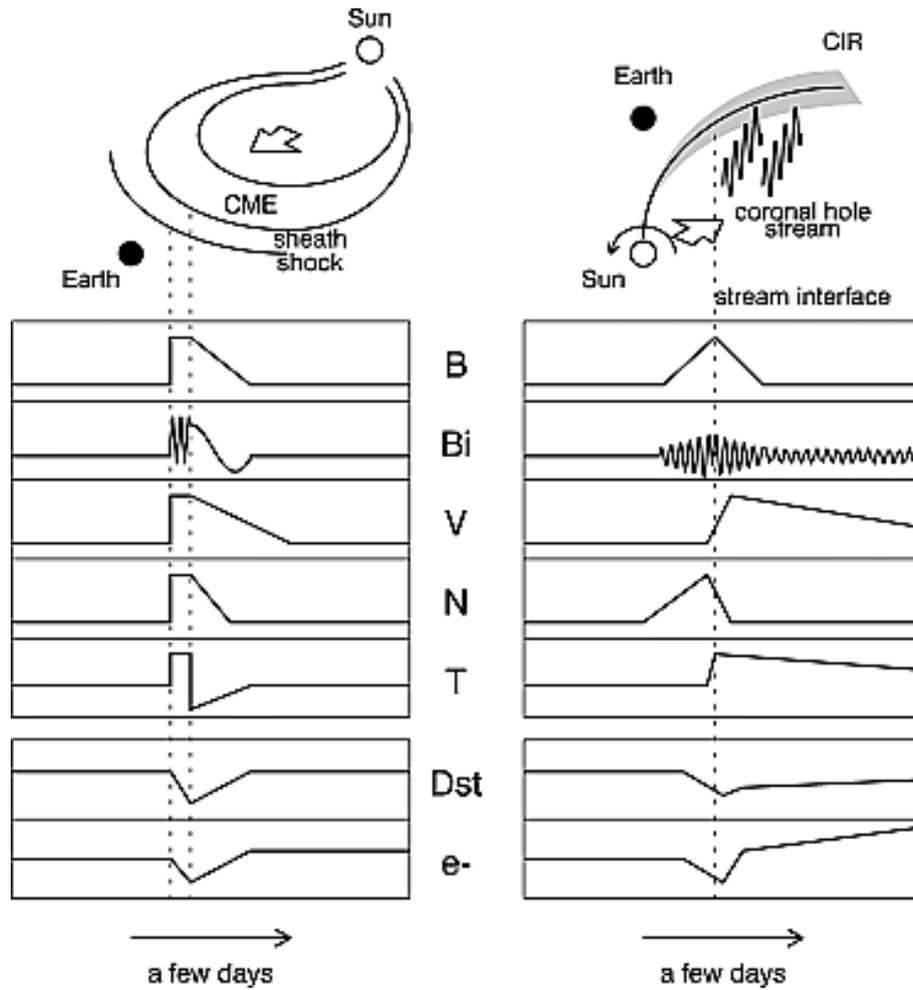


Figura 4.2 - (Direita) Ilustração esquemática de estruturas de vento solar típicas de regiões de interação corrotante (CIRs) e de (esquerda) ejeções de massa coronal (CMEs): (de cima para baixo) campo magnético B, um dos componentes cartesianos B_i , velocidade do vento solar V, densidade N, temperatura T, resposta esperada do índice Dst e fluxo de elétrons $> 2,0$ MeV em órbita geossíncrona.

Fonte: Kataoka e Miyoshi (2006)

O acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera da Terra depende do tipo de estrutura global do vento solar, como as ejeções de massa coronal interplanetária (ICMEs) e os HSS. Ressalta-se que durante a passagem destas estruturas pela magnetosfera, uma grande quantidade de energia pode ser transferida (PAULIKAS; BLAKE, 2013; Baker et al., 1990; Baker et al., 1997; POTAPOV, 2013; Ponomarev et al., 2006) e seus impactos podem ser observados tanto na magnetosfera externa quanto na interna. A dinâmica de aprisionamento de partículas carregadas rege a

magnetosfera interna da Terra, assim são observados através de satélites, como SAMPEX, Van Allen probes e AREASE, os dois cinturões denominados de cinturões de radiação de Van Allen (Figura 4.3). O Cinturão de radiação interno (1.0 – 2.0 RE), que possui população preferencial por prótons, e o externo (3.0 – 6.5 RE) por elétrons (e.g., Baker e Kanekal (2008), Alves et al. (2016), Da Silva et al. (2019), Da Silva et al. (2021)). Estes cinturões de radiação podem sofrer influências significativas das estruturas do vento solar que se acoplam à magnetosfera. No entanto, o cinturão de radiação externo é consideravelmente mais vulnerável aos distúrbios geomagnéticos, em comparação com o interno.

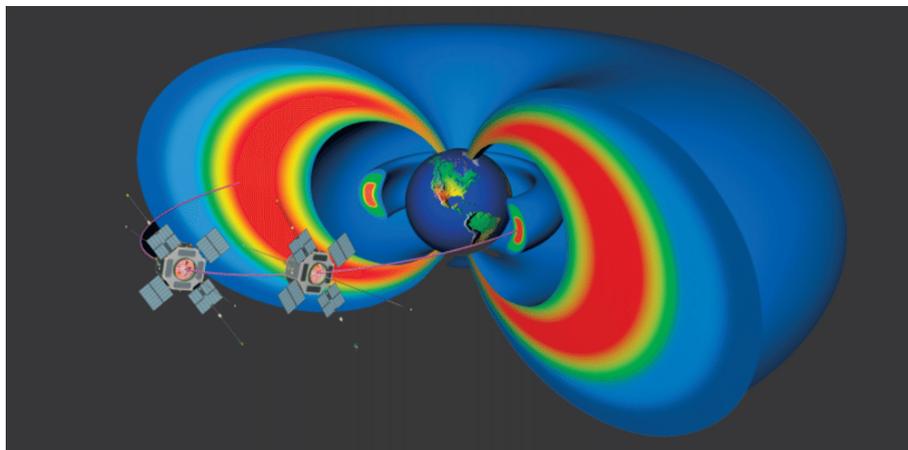


Figura 4.3 - Ilustração do cinturão externo e interno de radiação e as Sondas Van Allen A e B.

Fonte: NASA.

Os elétrons do cinturão externo de radiação, presos no campo magnético da Terra fazem movimentos periódicos complexos que podem variar adiabaticamente. A forma usual de expressá-los é a partir de três movimentos fundamentais. Os elétrons executam um movimento de giro ao redor das linhas de campo, além disso, ao se deslocarem ao longo da linha de campo experimentam um aumento do campo magnético nas proximidades dos polos, que faz com que a sua velocidade diminua e a orientação do movimento se inverta executando-se assim um movimento periódico denominado espelhamento, entre os polos magnéticos. Finalmente, o gradiente de curvatura do campo magnético leva os elétrons a executarem um movimento de deriva ao redor do campo magnético (NORTHROP; TELLER, 1960; ROEDERER, 1970; SHABANSKY, 1971; UKHORSKIY; SITNOV, 2014) (Figura 4.4)

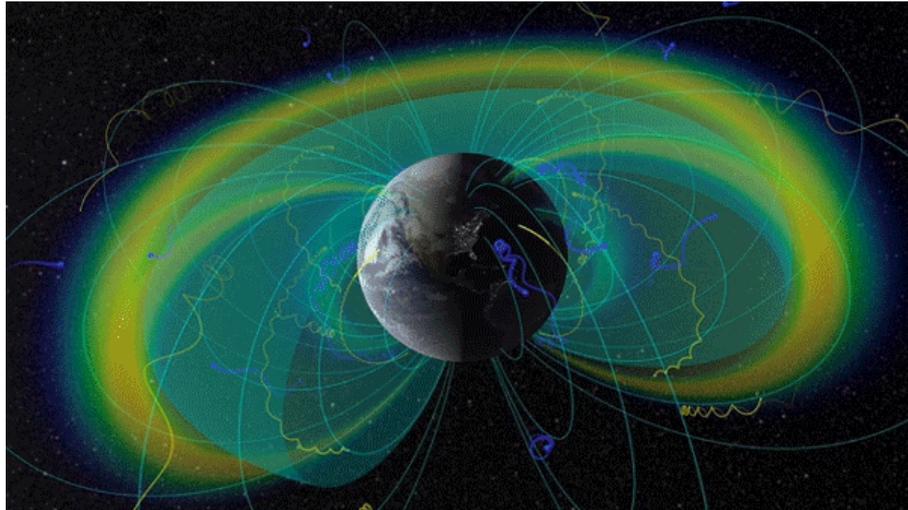


Figura 4.4 - Ilustração do cinturão externo e interno de radiação e as Sondas Van Allen A e B.

Fonte: NASA.

A grande variedade de processos eletrodinâmicos na magnetosfera pode ocasionar em violações dos invariantes adiabáticos (1° , 2° e 3° invariantes), os quais estão associados aos três movimentos citados, respectivamente. Isto pode levar a aceleração dos elétrons nos cinturões de radiação, proporcionando um aumento de população de elétrons relativísticos (Bortnik; THORNE, 2007; THORNE, 2010; Artemyev et al., 2013; POTAPOV, 2013; Baker et al., 2014), ou até mesmo uma perda de elétrons para a atmosfera ou para fora da magnetosfera (Alves et al. (2016), Da Silva et al. (2019) e referências neles). Tal variabilidade no fluxo de elétrons pode impactar diretamente nos satélites que orbitam em algum momento esta região, como, os satélites de órbita geossíncrona, de baixa órbita e de GPS. A variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão externo de radiação (Figura 4.5) ocorre devido aos processos eletromagnéticos envolvidos, como por exemplo, as interações entre ondas e partículas (Figura 4.6). As ondas de frequências ultra baixas (Ultra Low Frequency - ULF), que possuem uma faixa de alguns mHz até cerca de 5 Hz (KIVELSON; RUSSELL, 1995; Cahill; WINCKLER, 1992; MANN et al., 1999), podem interagir ressonantemente (ressonância de deriva) com os elétrons aprisionados e causar variabilidade no fluxo destes através do mecanismo de difusão radial. Por outro lado, as ondas de frequências mais altas, como as ondas whistler no modo Chorus, que estão numa faixa de algumas centenas de Hz a algumas dezenas de kHz (Gurnett; O'BRIEN, 1964), podem interagir

ressonantemente (ressonância de giro) com os elétrons aprisionados e causar variabilidade local no fluxo destes através do mecanismo de espalhamento por pitchangle. As ondas EMIC (electromagnetic ion cyclotron - EMIC), que se estendem de 0.2 Hz a 5 Hz (Horne, 2002; THORNE, 2010; MEDEIROS et al., 2019) podem interagir ressonantemente (ressonância de giro) com os elétrons e causar diminuição do fluxo destes através do mecanismo de espalhamento por pitch angle.

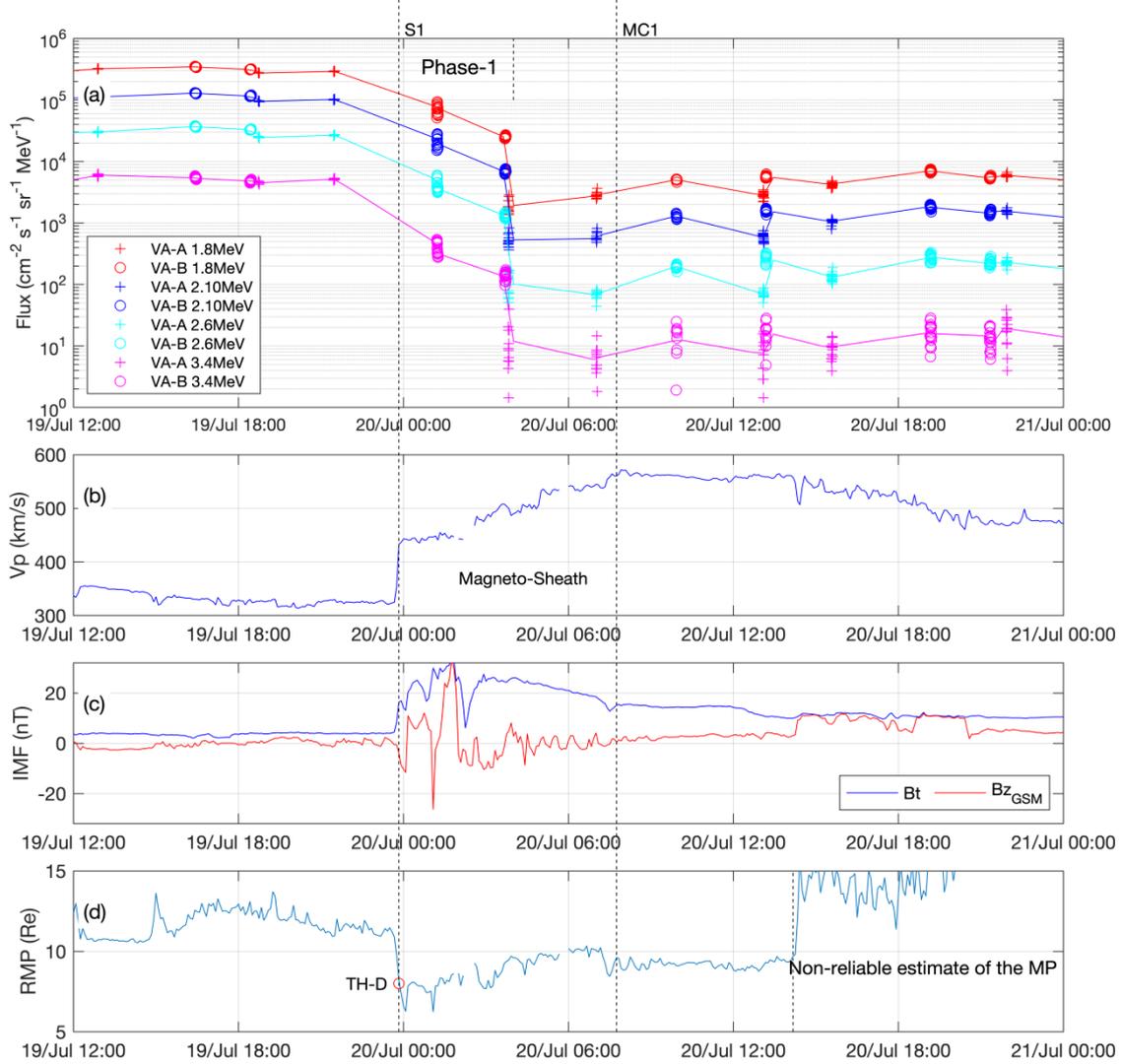


Figura 4.5 - (a) fluxos de elétrons nos canais de energias de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV e 3,4 MeV em $L^* = 5,2$; (b) velocidade do vento solar (V_p); (c) Intensidade do campo magnético interplanetário (IMF) (B_t) e componente B_z do IMF; (d) Altura da magnetopausa calculada através do modelo de Shue et al., (1998). Os fluxos de elétrons são obtidos pelo instrumento REPT a bordo das Sondas Van Allen A e B. Os V_p , B_t , B_z , B_x e B_y são obtidos pelo satélite ACE no ponto Lagrangiano L1. TH-D representa o satélite THEMIS-D cruzando a magnetopausa em 23:50 UT (x-GSE 8RE)..

Fonte: Da Silva et al. (2021)

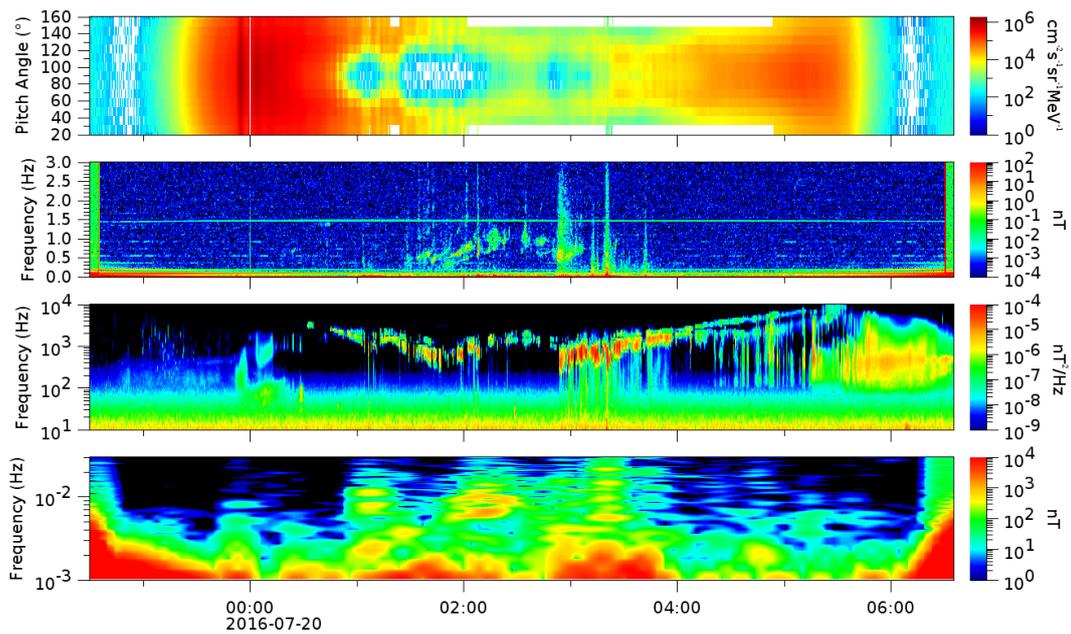


Figura 4.6 - (De cima para baixo) a distribuição do pitch angle (PAD) do elétron (eixo vertical) em função do tempo (eixo horizontal) para o canal de energia de 2,10 MeV (escala de cores); os espectros dinâmicos do campo magnético (escala de cores) como uma função da frequência (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal) para ondas EMIC, Chorus e ULF, respectivamente. Os dados são obtidos do Van Allen Probe A para o período de 19 de julho às 22:30 UT a 20 de julho às 06:00 UT.

Fonte: Da Silva et al. (2021)

A literatura tem mostrado que a maioria dos trabalhos sobre a variabilidade do cinturão externo de radiação da era SAMPEX se concentravam exclusivamente em períodos associados a tempestades magnéticas. Os resultados de análises de longas séries de dados de variação do fluxo de elétrons nos cinturões de radiação durante eventos de tempestade mostram que a variabilidade do fluxo de elétrons também pode ser observada em períodos em que perturbações geomagnéticas não são registradas, e de forma semelhante, há registros de períodos com perturbação no meio interplanetário em que não são observadas variações no cinturão de radiação. Esse comportamento, conhecido como sendo uma resposta não-linear da atividade do cinturão de radiação externo perante diferentes condições do sistema Solar-Terrestre é considerado um dos problemas mais intrigantes da atualidade. Assim, analisar os diferentes tipos de estruturas do vento solar, considerando os seus respectivos parâmetros pode trazer algumas respostas as lacunas ainda em aberto.

Por essa razão, desde a sua descoberta, os cinturões de Van Allen tem motivado trabalhos para além dos avanços produzidos em ciência, como por exemplo proporcionar o desenvolvimento tecnológico para uso de equipamentos no espaço. Uma vez que, diversos setores da sociedade tem utilizado sistemas tecnológicos que utilizam de dados de satélites. Sistemas de geolocalização utilizam sinais de satélites em órbita e estão presentes em vários dispositivos do cotidiano sendo essenciais como guias em grandes cidades. Servidores de internet usam satélites para aumentar a taxa de transmissão de dados. Diversas aplicações de sensoriamento remoto utilizam dispositivos orbitais, seja para auxílio na agricultura, no monitoramento ambiental, no acompanhamento de desastres naturais, ou entre muitas outras. Do ponto de vista econômico, para manter tais dispositivos operantes por longos períodos faz-se necessário assegurar a correta monitoração e/ou previsão de curto e curtíssimo prazos do ambiente onde operam.

4.1 Exposição de dispositivos tecnológicos no ambiente dos cinturões de radiação

A radiação presente no ambiente espacial pode induzir diversos efeitos em satélites que conduzem a eventuais falhas ou degradação operacional. Até mesmo um pequeno mas contínuo fluxo de partículas, pode transferir sua carga para superfícies do satélite que conduzem a grandes descargas de energia elétrica com potencial para danificar células solares, tanques de propulsão, e muitos outros componentes eletrônicos. Contudo o maior risco é referente a partículas de alta energia, acima de 1 MeV. Nessa escala, a radiação consegue penetrar no interior do dispositivo espacial, alcançando com facilidade diversos materiais com propriedades muito sensíveis a radiação. Contudo o maior risco é referente a partículas de alta energia, acima de 1 MeV. Nessa escala, a radiação consegue penetrar no interior do dispositivo espacial, alcançando com facilidade diversos materiais com propriedades muito sensíveis a radiação. De acordo com a literatura ([Baker et al., 2004](#); [Duzellier, 2005](#)), o carregamento interno e descargas dielétricas são ambos causadas por elétrons e íons de alta energia penetrando na estrutura de observação e no satélite como um todo. Essas partículas fazem com que superfícies internas sejam carregadas eletricamente até que se ultrapasse o limite de tensão de isolamento (breakdown), momento em que se descarregam (regiões no satélite a qual a referência de tensão é zero). Essa descarga pode resultar em danos de circuitos eletrônicos, ou mudanças de estados digitais (upsets) ou ruídos nos subsistemas do satélite e instrumentos. Além disso, os prótons existentes no cinturão de radiação na faixa de energia de 10 MeV a 50 MeV podem ser

responsáveis por causar eventos de maior dano a dispositivos espaciais, chamado de eventos de efeito único (Single Event Effects - SEE), que ocorre quando o caminho de ionização atinge a junção de dispositivos semicondutores, definida com sua região sensível, e altera seu funcionamento de maneira drástica.

A Figura 4.7 apresentada por Ecoffet (2013) mostra a contribuição de efeitos de radiação em satélites por componentes vindas dos raios cósmicos, de partículas energéticas solares e dos cinturões de Van Allen. As partículas armazenadas no cinturão contribuem para os três efeitos expressos em componentes eletrônicos, i.e. SEE, dose de ionização total (Total Ionising Dose - TID) e danos de deslocamento (Displacement Damage - DDD). O efeito TID são os efeitos causados pelo acúmulo de cargas no dispositivo semicondutor, alterando assim suas propriedades de funcionamento. O efeito DDD ocorre quando as colisões da partícula no meio material podem deslocar átomos de sua matriz (Duzellier, 2005).

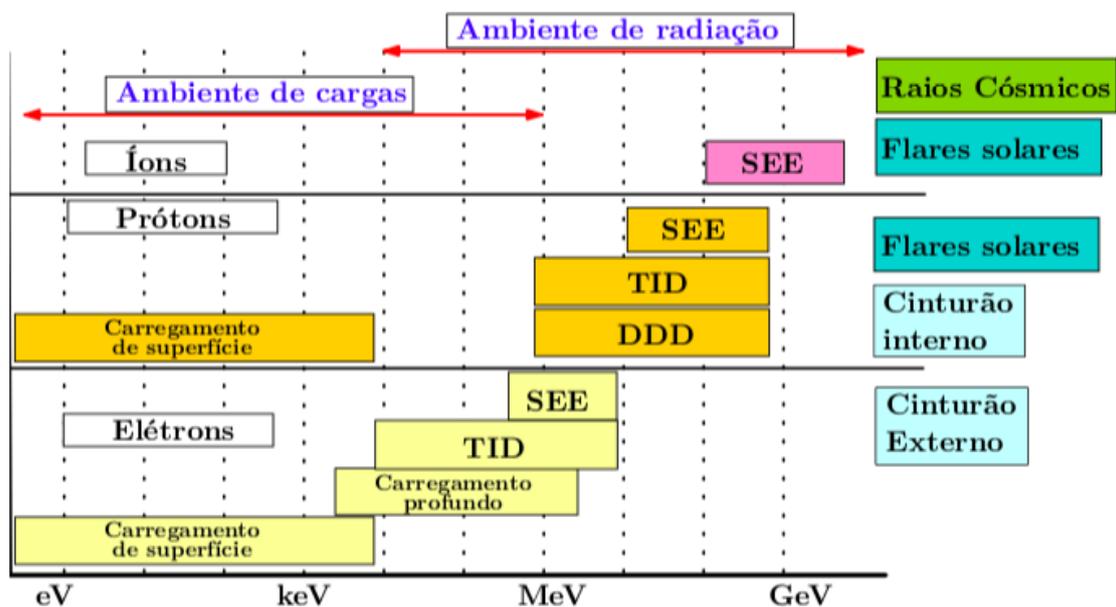


Figura 4.7 - Características da radiação espacial de diferentes fontes, e seus efeitos em satélites.

Fonte: Adaptada de Ecoffet (2013)

Tabela 4.1 - Relação entre o aumento da taxa de fluxo de elétrons e prótons e a ocorrência de anomalias em satélites. Fonte: Adaptada de [Iucci et al. \(2005\)](#).

Parâmetro	Dias calmos (Sem Anomalias)	Dias provavelmente perigosos (Anomalias em um ou dois satélites)	Dias perigosos (Anomalias em mais que três satélites)
Número de dias total	5862	2606	298
Número de anomalias por dia por satélite	0	1.6	4.55
Numero de satélites com anomalias por dia	0	1.24	3.51
Máximo fluxo de prótons (>10 MeV)	8.2	18.1	91
Fluência de elétrons (>2MeV [x10 ⁷])	4.9	7.6	12.7

5 PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

Pulsações geomagnéticas, ou simplesmente pulsações magnéticas, observadas na superfície da terrestre são manifestações de ondas hidromagnéticas de ultra-baixa frequência ¹ na magnetosfera (DUNGEY, 1961). A faixa de frequência dessas pulsações vai desde 1 mHz até maiores que 10 Hz.

As ondas com menores frequências possuem comprimentos de onda comparáveis ao tamanho da magnetosfera e, geralmente, possuem as maiores amplitudes, que chegam a centenas de nanoteslas.

Flutuações no campo magnético já são observadas desde 1741, inicialmente pelo astrônomo e físico sueco Anders Celsius que comparou medidas de bússolas com flutuações aurorais. Pulsações magnéticas também foram observadas pelo cientista finlandês J. Nervander, por volta de 1840. Posteriormente, o geofísico inglês Balfour Stewart, em 1861, relatou observações de flutuações, denominadas na época de micropulsações, no campo geomagnético em dados de uma grande tempestade geomagnética registrada pelo *Kew Observatory* em Greenwich, Inglaterra (VILLANTE, 2007; Kangas et al., 1998).

Em 1958, Ano Internacional da Geofísica, o estudo das ondas na teoria magneto-hidrodinâmica (MHD) teve um grande impulso. A primeira morfologia das pulsações magnéticas foi estabelecida (SAITO, 1969). Este fato levou a IAGA a classificar as pulsações em duas categorias de acordo com sua regularidade e o período das variações. As pulsações com pico espectral muito bem definido foram classificadas como pulsações contínuas (Pc), enquanto as que envolvem grande faixa espectral foram classificadas como pulsações irregulares (Pi). Dentro de cada grupo, as pulsações são divididas de acordo com o período e a frequência, conforme a tabela 5.1.

¹Segundo a ITU (*International Telecommunication Union*), a faixa de frequências compreendida como ULF vai de 300Hz a 3KHz. Nos estudos da magnetosfera e sismologia, as frequências variam de 1mHz a 10Hz (SAITO, 1969; ??; PILIPENKO, 1990; MOLCHANOV et al., 2003)

Tabela 5.1 - Classificação das pulsações geomagnéticas de acordo com a IAGA em 1958.

Classe	Período (s)	Frequência (mHz)
Contínuas		
Pc1	0,2 - 5	200 - 5000
Pc2	5 - 10	100 - 200
Pc3	10 - 45	22,2 - 100
Pc4	45 - 150	6,6 - 22,2
Pc5	150 - 600	1,6 - 6,6
Irregulares		
Pi1	1 - 40	25 - 1000
Pi2	40 - 150	6,6 - 25

Fonte: [Samson \(1991\)](#)

Essa classificação foi montada devido ao fato de que pouco se sabia sobre os mecanismos de geração desses sinais. Embora essa classificação ainda seja muito utilizada, o esquema de classificação vem sendo modificado ao longo dos anos, buscando uma classificação que leve em consideração os processos físicos e mecanismos de geração das pulsações. As pulsações com períodos longos são interpretadas como ondas MHD; enquanto que as de períodos curtos são relacionadas a ondas íons-ciclotrônicas que se propagam na magnetosfera. Dividiu-se, então, as pulsações em três bandas de frequências distintas: baixa frequência (1 – 10 Hz), média frequência (10 – 100 mHz) e alta frequência (0,1 – 10 Hz), e dois tipos de pacotes de ondas: contínuas e impulsivas (Tabela 5.2) ([SAMSON, 1991](#); [GUBBINS; HERRERO-BERVERA, 2007](#)).

Em 1973, a IAGA adicionou duas novas classes ao esquema de classificação. As pulsações contínuas Pc6, com períodos maiores que 600s e as pulsações impulsivas Pi3, com períodos maiores que 150 s. Pi3 incluem flutuações associadas com inícios súbitos de tempestades e sub-tempestades ([SAMSON, 1991](#); [VILLANTE, 2007](#)).

As pulsações contínuas Pc1 a Pc5 são nomenclaturas dos intervalos atribuídos ao período indicado no pico das amplitudes. As nomenclaturas de pulsações irregulares Pi1 e Pi2 é identificada com faixas de seu período na parte inferior da curva de intensidade.

A ação do vento solar e as condições da magnetosfera influenciam diretamente na ocorrência e nas características das pulsações. A latitude e a longitude magnética também modificam as propriedades morfológicas e físicas das pulsações.

Tabela 5.2 - Classificação de 1964 feita pela IAGA das ondas de plasma e as pulsações de acordo com a banda espectral e a fonte de energia para geração.

	Banda Espectral	Fonte de energia
Contínuas		
	1 – 10 mHz (baixa freq.)	- Instabilidade de deriva de espelho - Ressonância - Instabilidade Kelvin-Helmholtz
	10 – 100 mHz (média freq.)	- Instabilidade Kelvin-Helmholtz - Instabilidade ciclotrônica de prótons do vento solar
	0,1 – 10 Hz (alta freq.)	- Instabilidades ciclotrônica de prótons do vento solar devido a ondas de íons ciclotrônicos na magnetosfera
Irregulares		
	1 – 10 mHz (baixa freq.)	- Impulsos súbitos do vento solar - Mudanças abruptas da convecção da cauda - Eventos de transferência de fluxo
	10 – 100 mHz (média freq.)	- Mudanças abruptas na cauda magnetosférica - Instabilidades de correntes alinhadas ao campo
	0,1 – 10 Hz (alta freq.)	- Instabilidades de correntes alinhadas ao campo

Fonte: Samson (1991), Villante (2007)

As localizações das regiões de interesse são geralmente dadas em termos da latitude geomagnética ou do parâmetro L . O parâmetro de McIlwain L é a distância do centro da Terra à linha magnética, no plano equatorial, dado em raios terrestres. Um parâmetro relacionado é a latitude invariante $\Lambda = \cos^2(1/L)$, que é a latitude em que a linha de campo intercepta a superfície da Terra.

Dungey (1967) propôs que essas pulsações eram causadas por ondas estacionárias ao longo das linhas de campo magnético. Além disso, *upstream waves* (ondas contrárias ao fluxo do plasma) geradas por partículas refletidas da onda de choque ao longo das linhas do campo magnético interplanetário são consideradas uma importante fonte externa de pulsações de média frequência. Acredita-se que

pulsações contínuas de alta frequência são geradas por instabilidades ciclotrônicas que ocorrem na magnetosfera (KIVELSON; RUSSELL, 1995; VILLANTE, 2007).

5.1 Pulsações Contínuas

Pulsações contínuas abrangem o intervalo inteiro das pulsações, com períodos de 0,2 a 600 segundos. Elas são observadas sobre um amplo intervalo longitudinal e latitudinal, mas suas frequências e amplitudes frequentemente exibem uma variação latitudinal.

5.1.1 Pulsações de baixa frequência (PBF), 1 – 10 mHz

A banda de frequência dessas pulsações varia entre 1 – 10 mHz, são ondas de plasma com comprimentos de onda comparáveis às dimensões da magnetosfera. Essa faixa compreende as pulsações contínuas Pc4 e Pc5 (SAMSON, 1991).

Pulsações Pc4 variam em frequência entre 6,6 e 22,2 mHz, com amplitudes entre 5 e 9 nT nas altas latitudes e em torno de 1 nT em baixas latitudes. Os sinais apresentam dois picos de amplitudes; um perto da zona auroral e outro em zonas sub aurorais. Em médias latitudes, a ocorrência é máxima ao meio dia (SAITO, 1969). A frequência de ocorrência de Pc4 aumenta com a diminuição da atividade solar, como a frequência de ocorrência das Pc3 não muda muito ao longo do ciclo solar, as Pc4 são mais dominantes que as Pc3 nos mínimos solares.

Pulsações Pc5 podem ter amplitudes que chegam até centenas de nanoteslas. Possuem longos períodos (150 a 600 s) e perduram por um longo tempo; de 10 minutos a várias horas, com formas inteiramente senoidais, muitas vezes amortecidas, com algumas distorções que aparecem com o aumento da atividade magnética (SAITO, 1969; ZANANDREA, 1998). Possuem uma larga distribuição latitudinal; mas, devido à sua frequência, são geralmente observadas desde latitudes aurorais até o cúspide (VILLANTE, 2007).

Em geral, as amplitudes máximas das PBF ocorrem nas zonas aurorais (latitude geomagnética entre 65° e 70°). A posição do oval auroral governa as intensidade máximas das pulsações, que se intensificam ao meio dia local. Na região auroral, picos entre 06:00h e 10:00h em hora local, com um máximo entre 18:00h e 22:00h são observados (SAMSON, 1991). Há um aumento na amplitude em regiões equatoriais, que pode ser explicado pelas correntes ionosféricas no eletrojato equatorial.

5.1.2 Pulsações de média frequência (PMF), 10 – 100 mHz

Com frequências que variam entre 10 – 100 mHz, as PMF compreendem, principalmente, as pulsações contínuas do tipo Pc3. São mais frequentes no lado diurno, com períodos médios sofrendo variações e maximizados ao meio dia. A frequência dessas pulsações é regulada pela intensidade do Campo Magnético Interplanetário (SAMSON, 1991).

Pulsações Pc3 possuem amplitudes usualmente menores que 0,5 nT em baixas latitudes, chegando a um máximo em latitudes mais altas, com períodos que variam de 10 a 45 s.

O ciclo solar e a variação diurna influenciam no período das pulsações Pc3. Em latitudes médias, o período aumenta do amanhecer ao anoitecer e, em baixas latitudes, há um período mínimo ao meio dia, essa variação depende também da localização geográfica da estação. A variação da atividade de manchas solares é proporcional à atividade dessas pulsações. A frequência característica dessas pulsações aumenta com o aumento do índice Kp. Há incidência dessas pulsações também na fase inicial de tempestades magnéticas (SAITO, 1969).

As PMF são geralmente observadas no lado diurno da magnetosfera terrestre (SAITO, 1969) e suas frequências são reguladas pela magnitude do campo magnético interplanetário (CMI) (SAMSON, 1991).

5.1.3 Pulsações de alta frequência (PAF)

Pulsações na banda de alta frequência, 0,1 - 10 Hz, são frequentemente observadas em médias latitudes e regiões aurorais, inclui as classes Pc1 e Pc2, com períodos de 0,2 a 10s. Na superfície da Terra, as amplitudes máximas dessas pulsações são tipicamente de 0,1 a 10 nT em zonas aurorais com uma diminuição da amplitude em um grau de magnitude no equador (SAMSON, 1991). Observações na magnetosfera e em solo mostram uma probabilidade de ocorrência máxima de Pc1 e Pc2 em $L = 7$ e $L = 9$ (Anderson et al., 1992). Observações também identificaram Pc1 fora da magnetosfera do lado diurno em $L = 20$ (Engebretson et al., 2002).

A fonte de energia na faixa de frequência das Pc1-2 provém de instabilidades eletromagnéticas íon-ciclotrônicas (EMIC). A fonte de energia para essas instabilidades provém da anisotropia da distribuição de prótons com energia maior que 10 keV (SAMSON, 1991; WOODROFFE, 2010).

Registros obtidos em solo também mostram um outro subtipo de pulsação Pc1, as chamadas de pérolas. Foram identificadas em 1936 por Sucksdorff e Harang (Kangas et al., 1998), o nome é devido a similaridade entre a preferência de suas séries temporais e um cordão de pérolas (SAITO, 1969; SAMSON, 1991).

5.2 Pulsações Irregulares

As pulsações irregulares são comparativamente mais curtas em duração, compostas em geral de poucas oscilações decaindo no tempo e nem apresentando forma senoidal ou pico espectral bem definido. Em geral mais localizadas, tanto em latitude, e tendo um espectro similar sobre a região de ocorrência.

5.2.1 Pi1 e Pi2

As Pi1 tem formas irregulares com períodos menores que 15 s. Suas amplitudes tem valor máximo nas zonas aurorais e sua intensidade decresce rapidamente com a latitude. Essas oscilações tem forma de microestruturas devido aos distúrbios lentos do campo magnético, observados durante a fase principal das tempestades magnéticas.

Algumas vezes, as Pc1 e Pi1 são registradas simultaneamente com distúrbios lentos e, também, como distúrbios de campo independentes. As pulsações que aparecem na forma de séries de oscilações, cada uma durando cerca de 10 a 20 minutos e o fenômeno todo cerca de uma hora, são sempre acompanhadas por perturbações de outros tipos Pi1 ou de ambas, Pi1 e Pc1.

O período típico das Pi2 é entre 40 e 150 s, que pode, as vezes, alcançar períodos acima de 250 s. Suas amplitudes variam entre 1 e 5 nT. As Pi2 tem como características principais o seu pequeno tempo de duração e a sua superposição com as Pi1, as quais podem ser seguidas, em certas ocasiões, pelas Pc1.

A probabilidade de ocorrência das Pi2 aumenta com o aumento do índice Kp. Para um mesmo intervalo de tempo, as atividades de Pi1 aumentam como máximo de manchas solares, sugerindo que as Pi1 e Pi2 tem diferentes fontes de geração ou que tem diferentes modos de propagação sobre a superfície da Terra (SAITO, 1969).

5.3 Outros tipos de Pulsações

Principalmente durante períodos de tempestade, outros tipos de oscilações podem ser observadas, são bem menos regulares em aparência que as contínuas; mas mais

regulares que as Pi1. Essas emissões ocorrem durante períodos magneticamente perturbados.

5.4 Pulsações em Baixas Latitudes

Os mecanismos de geração de ondas ULF na magnetosfera terrestre podem ser externos, continuamente ou subitamente afetados pelo vento solar; e internos, principalmente mudanças abruptas e transientes do ambiente magnetizado de plasma e a energia livre armazenada na magnetosfera terrestre (Yumoto, 1988).

As fontes externas à magnetosfera diurna são: ondas excitadas pela instabilidade ressonante íon-ciclotrônica no feixe de íons refletidos na região de choque; ondas superficiais geradas no limite magnetosférico; impulsos súbitos causado pelo choque interplanetário, descontinuidades e reconexão magnética diurna. As fontes externas controlam principalmente as pulsações Pc3-Pc5 diurnas. As fontes internas aparecem no lado noturno da magnetosfera e estão associadas à formação súbita de corrente em forma de cunha (*wedge*) no início de subtempestades; a instabilidade de deriva de espelho na corrente anelar; a instabilidade de cisalhamento gerada pelo fluxo viscoso de plasma na magnetopausa. As fontes internas controlam principalmente as Pc5 em períodos de tempestades e as Pi2.

Para baixas latitudes, os esforços têm se concentrado no estudo das pulsações Pc3-4, pois a frequência fundamental das oscilações das linhas de campo na plasmasfera está nessa faixa (NISHIDA, 1978). Ressonância nas linhas de campo, transmissão de energia proveniente da instabilidade íon-ciclotrônica na região de choque para a magnetosfera e o modo de oscilação toroidal desacoplado das linhas de campo local podem ser fontes geradoras de Pc3-4 em latitudes muito baixas.

Em baixas latitudes, uma parte das linhas do campo geomagnético está imersa na ionosfera que pode influenciar as propriedades das pulsações nessas regiões, quase não há ressonância nas linhas de campo (Kuwashima; FUJITA, 2013; ZANANDREA et al., 2004) o que torna difícil a explicação da existência de pulsações Pc3 e Pc4 nessas regiões. Pesquisas sugerem que as ondas Pc3-4 produzidas nas altas latitudes poderiam se propagar para baixas latitudes, via ionosfera.

Pulsações Pc5 são comumente observadas em altas latitudes, relacionadas a oscilações na cavidade magnetosférica, instabilidades Kelvin-Helmholtz e ondas de deriva de espelho. Entretanto, ocorrência de Pc5 em latitudes muito baixas, bem como em latitudes equatoriais tem sido reportadas nos últimos anos (Trivedi et al.,

1997).

Em latitudes muito baixas podem estar relacionadas a redemoinhos das correntes ionosféricas de Pedersen induzidas pelo próprio campo elétrico da onda compressional Pc3 que chega à ionosfera. (Saito, 1983) propôs que picos de ocorrência de Pc3 ao anoitecer na região subtropical, pode estar associado às correntes elétricas devido ao efeito fonte na ionosfera.

Observações de satélites também revelaram a existência de ondas compressãois na faixa de Pc4-5 como também ondas de Alfvén de cisalhamento (Barfield; MCPHERRON, 1972; Yumoto, 1988). Instabilidades nas correntes do eletrojato equatorial sugerem uma fonte de geração de pulsações Pi1 em regiões equatoriais (Padilha et al., 2020).

6 GEOMAGNETISMO

6.1 O Campo Geomagnético

O campo magnético terrestre, também chamado de campo geomagnético, é classificado em campo magnético interno e campo magnético externo. A magnitude média do campo geomagnético medido na superfície terrestre pode variar em várias ordens de grandeza dependendo da fonte deste campo magnético. No caso do campo do principal (Bp), a ordem de grandeza da magnitude deste campo varia em torno de algumas dezenas de milhares de nanoteslas, entre 20000 a 70000 nT (CAMPBELL, 2003; OLSEN; STOLLE, 2012) e o campo crustal (Bc) varia na ordem de dezenas a poucas centenas de nanoteslas (LANGEL et al., 1982). Já os campos magnéticos externos (Be), àqueles produzidos pelas correntes elétricas da magnetosfera e na ionosfera, variam na ordem de dezenas até centenas de nanoteslas (OLSEN; STOLLE, 2012; YAMAZAKI; MAUTE, 2016). Ademais, 30% destas correntes ionosféricas são responsáveis pela produção destes campos induzidos (Bi) na superfície terrestre (MATSUSHITA, 1967; YAMAZAKI; MAUTE, 2016). A Figura 6.1 ilustra a localização destas fontes de campos magnéticos que compõem o campo magnético terrestre.

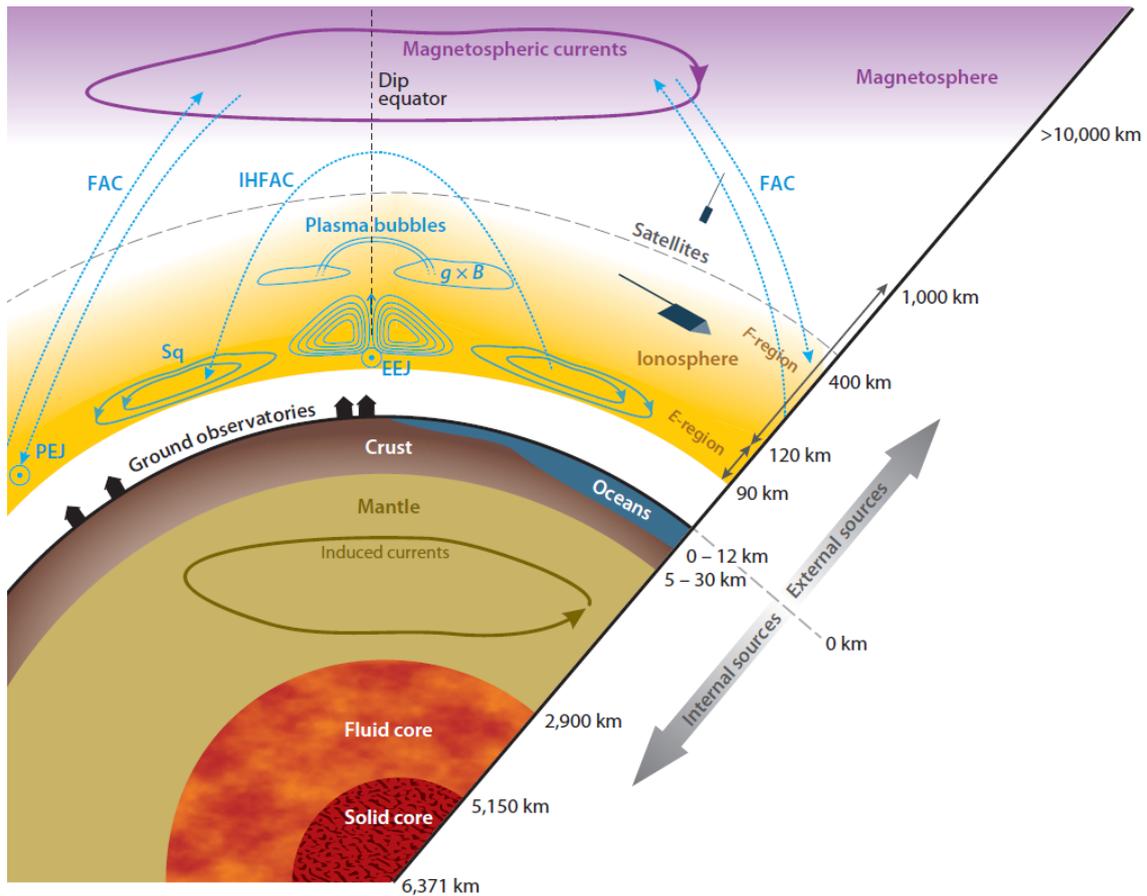


Figura 6.1 - Ilustração da localização das fontes de campos magnéticos que compõem o campo geomagnético.

Fonte: Adaptada de Olsen e Stolle (2012)

De forma resumida e simplificada, o campo geomagnético B pode ser expresso matematicamente em termos do somatório de todas as fontes de campos magnéticos, demonstrado na Equação 6.1.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_p(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_c(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_e(\mathbf{r}, t) + \mathbf{B}_i(\mathbf{r}, t). \quad (6.1)$$

Vale ressaltar que o campo geomagnético não é estático e, portanto, varia no espaço (\mathbf{r}) e no tempo (t).

O campo magnético é uma grandeza física vetorial e, portanto, possui magnitude, direção e sentido. Neste caso, este vetor campo magnético pode ser obtido a partir das componentes do campo geomagnético nas direções horizontais com sentido

norte e leste geográficos, e a vertical para cima (X, Y e Z, respectivamente).

A partir da solução de conjunto de equações do campo geomagnético é possível construir mapas do campo magnético principal. Estes mapas são representações gráficas da magnitude de uma componente do campo geomagnético e normalmente referem-se a uma época específica.

Na construção destes mapas, as linhas de contorno do campo geomagnético representam um determinado valor constante de uma componente magnética e são chamadas de linhas isomagnéticas ou isolinhas magnéticas. A Figura 6.2 mostra um exemplo de mapa da magnitude do campo geomagnético sobre a superfície terrestre.

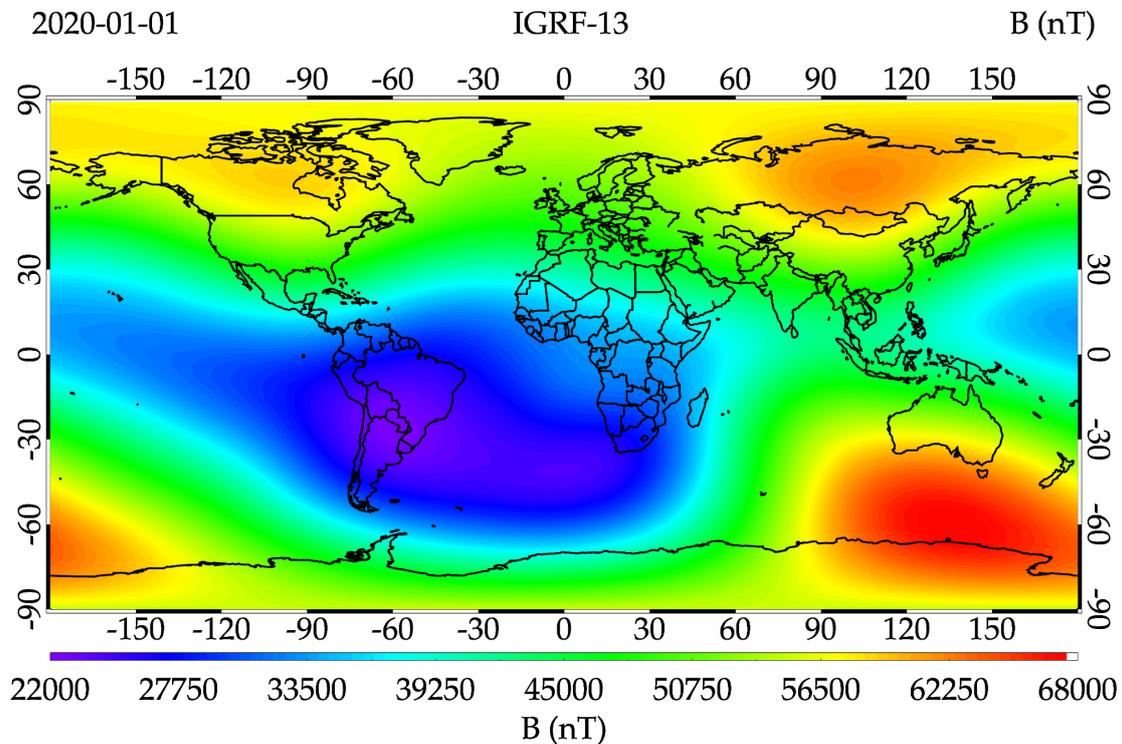


Figura 6.2 - Mapa da magnitude da componente total do campo geomagnético obtida a partir do modelo IGRF-13 para o ano de 2020.

Esta figura mostra o gráfico de contorno das linhas isodinâmicas da magnitude do campo geomagnético sobre a superfície terrestre obtida a partir do modelo de Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF, do inglês International

Geomagnetic Reference Field), utilizando a versão IGRF-13 para o ano de 2020. No mapa desta figura, identificam-se as presenças de três máximos (avermelhado) e um mínimo (azul) na magnitude do campo geomagnético. Os máximos da componente total são observados próximos às regiões da América do Norte, Ásia e Oceania, enquanto que o mínimo é observado próximo à região da América do Sul.

A região de menor magnitude do campo geomagnético é modernamente conhecida como Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA) e é comumente atribuída à excentricidade do dipolo magnético (PINTO et al., 1992; TRIVEDI et al., 2005; ANDERSON et al., 2018). Esta região é caracterizada pela maior aproximação do cinturão de radiação interno de Van Allen sobre a atmosfera terrestre. Como consequência, esta região de menor magnitude do campo geomagnético permite que as partículas do cinturão de radiação possam atingir altitudes mais baixas que nas demais regiões do globo (KURNOSOVA et al., 1962; ANDERSON et al., 2018). O fluxo de partículas em direção à atmosfera terrestre é conhecido como precipitação de partículas e, geralmente, ocorre devido à geometria das linhas do campo geomagnético, como é o caso das regiões de altas latitudes. Esse tipo de precipitação também é observada na SAMA, principalmente durante períodos geomagneticamente perturbados. No entanto, ainda pouco se sabe sobre a influência dessa precipitação na variação geomagnética na região da SAMA (Abdu; BATISTA, 1977; TRIVEDI et al., 2005).

O campo magnético externo é composto por campos magnéticos gerados pelas correntes elétricas que fluem na magnetosfera e na ionosfera terrestre. A origem dessas correntes elétricas ocorre a partir da interação entre o Sol e a magnetosfera, ou entre o Sol e a ionosfera. As correntes elétricas que fluem na magnetosfera terrestre são: as correntes da magnetopausa (também conhecida como as correntes de Chapman-Ferraro) (CHAPMAN; FERRARO, 1931), a corrente da cauda (NESS, 1965; SPEISER; NESS, 1967), as correntes alinhadas ao campo (POTEMRA, 1988) e a corrente de anel simétrica (AKASOFU; CHAPMAN, 1961). Já as correntes elétricas que fluem na ionosfera são: o sistema de correntes Sq (CHAPMAN; FERRARO, 1931; CAMPBELL; MATSUSHITA, 1982; YAMAZAKI; MAUTE, 2016), a corrente do eletrojato equatorial (FORBES, 1981; REDDY, 1981; REDDY, 1989) e a corrente do eletrojato auroral (FEJER, 1963; ROSTOKER, 1979). Todas essas correntes elétricas são responsáveis por variações no campo geomagnético.

6.2 As Variações Do Campo Geomagnético

As variações observadas nas medidas de campo geomagnético podem ocorrer de maneira regular ou irregular. Em geral, estas variações são classificadas em relação ao nível de perturbação magnética.

As variações regulares são aquelas que ocorrem durante condições geomagneticamente calmas, observadas em magnetogramas, cuja variação é suave. Estas variações ainda podem ser classificadas de acordo com a periodicidade observada em seus registros. As periodicidades que excedem dezenas de anos podem ser atribuídas às mudanças no interior da Terra, conhecida pelo termo variação secular. Já as periodicidades menores ou iguais a 22 anos estão relacionadas à interação solar-terrestre. Neste caso, a variação diurna é um exemplo com esta faixa de periodicidade, sendo esta da ordem de um dia (24 horas).

Por outro lado, as morfologias irregulares das variações do campo geomagnético estão relacionadas às tempestades geomagnéticas. Neste caso, as variações do campo geomagnético são discutidas em relação ao parâmetro de orientação do campo magnético interplanetário, especialmente, a componente na direção sul (B_z) (GONZALEZ et al., 1994).

Os campos magnéticos externos são campos magnéticos que não se originam no interior do núcleo terrestre. Esses campos são sustentados por correntes elétricas na magnetosfera, na ionosfera, nos cinturões de radiação de Van Allen, e as correntes alinhadas ao campo, bem como as correntes elétricas nas regiões de médias e baixas latitudes. Na ionosfera cita-se o sistema de correntes do Solar quiet (Sq), a corrente elétrica do eletrojato equatorial (EEJ, do inglês Equatorial Electrojet) e a corrente elétrica do eletrojato auroral (AEJ, do inglês Auroral Electrojet).

6.2.1 Corrente do Sistema Sq

A variação diurna do campo geomagnético é causada por um sistema de correntes elétricas localizada na ionosfera terrestre devido à ação do dínamo atmosférico e pela alta condutividade ionosférica. O movimento do ar da atmosfera neutra causado pelas marés atmosféricas proporciona o deslocamento de íons e elétrons em torno das linhas do campo geomagnético. Deste movimento, induz-se um campo elétrico, produzindo o fluxo de corrente. Com o avanço das investigações da ionosfera feita por APPLETON e BARNETT (1925), Tuve e Breit (1925) e, principalmente por (CHAPMAN; FERRARO, 1931), desenvolveu-se a teoria do

dínamo da região E (RICHMOND; THAYER, 2000). Nesta teoria se afirma que o movimento das partículas neutras ocorre em função dos ventos neutros e que os ventos de marés proporcionam o movimento das partículas carregadas. Sob condição atípica, esses ventos e as suas correntes elétricas associadas possuem uma parcela relacionada à influência solar (Sq) e a outra à influência lunar (L).

Em geral, as parcelas solar e lunar da variação diurna são estudadas separadamente. No entanto, as correntes elétricas ionosféricas carregam ambas as parcelas, sendo o dínamo ionosférico o principal mecanismo de sua formação nas regiões de médias e baixas latitudes. Particularidades nas regiões equatoriais e polares levam a diferentes mecanismos de formação de correntes elétricas. O sistema de correntes ionosféricas Sq corresponde a dois vórtices de correntes elétricas, um em cada hemisfério do globo. O sentido do vórtice de correntes elétricas no hemisfério norte é anti-horário, enquanto que no hemisfério sul é horário. O sentido de cada um destes sistemas de correntes elétricas é decorrente do efeito da força de Coriolis.

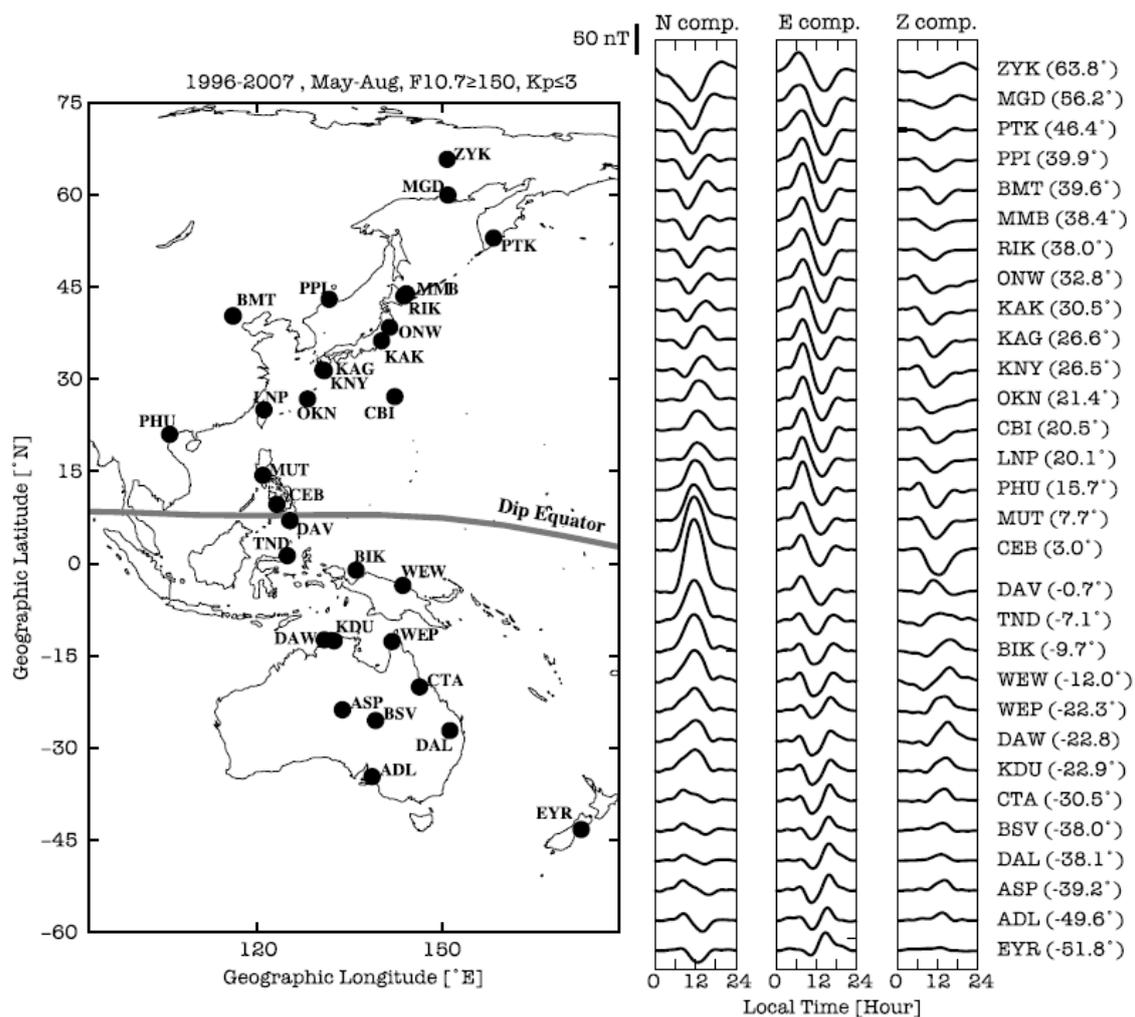


Figura 6.3 - Esquematização do sentido da corrente do sistema de Sq e do eletrojoato equatorial.

6.2.2 Corrente do Eletrojoato Equatorial

O efeito Cowling é o mecanismo em que ocorre a efetividade da corrente Pedersen quando há restrição da circulação da corrente Hall, resultando num campo elétrico de polarização (COWLING, 1932). Este efeito é importante para o sistema de correntes elétricas Sq global, mas o seu efeito é mais forte ao longo do equador magnético, onde o campo geomagnético é horizontal (HIRONO, 1950; BAKER; MARTYN, 1953).

O efeito Cowling é mencionado na explicação da formação da corrente do EEJ (FORBES, 1981). Esta corrente elétrica é resultado da intensificação da

corrente elétrica do sistema Sq que flui ao longo do equador magnético. Isso se deve à alta condutividade na altura da região E ionosférica e a geometria do campo geomagnético, quando o campo geomagnético é horizontal ($I = 0^\circ$). Essa corrente elétrica atinge intensidade máxima próximo do meio dia local, quando fotoionização é máxima, também observada no sistema de correntes Sq. Devido a sua presença, temos uma intensificação da componente horizontal do campo magnético terrestre (H) entre $\pm 5^\circ$ de latitude dip em torno do equador magnético, região ilustrada na Figura 6.4. O sentido da corrente do EEJ é para a direção leste durante o dia e oeste durante a noite (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

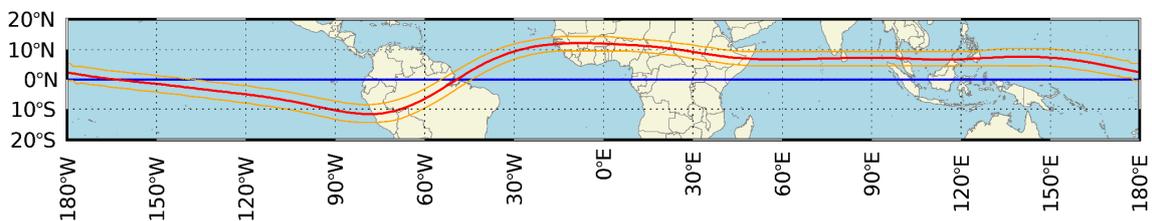


Figura 6.4 - Equador geográfico (azul) e magnético (vermelho). Os limites da região de influência do EEJ (laranja) encontram-se nas latitudes dip $\pm 5^\circ$ em torno do equador magnético, onde o efeito Cowling é mais efetivo.

6.2.3 Corrente do Eletrojato Auroral

O eletrojato auroral está localizado na região dos pólos magnéticos. Para a formação do eletrojato auroral, a corrente recebe a contribuição do sistema de corrente Sq junto com as correntes alinhadas ao campo da magnetosfera, localizadas próximas à oval auroral. Quando ocorre precipitação de plasma na ionosfera da região polar, o eletrojato se expande para as latitudes inferiores. A Figura 6.5 mostra a esquematização das correntes ionosféricas, dentre elas o eletrojato auroral.

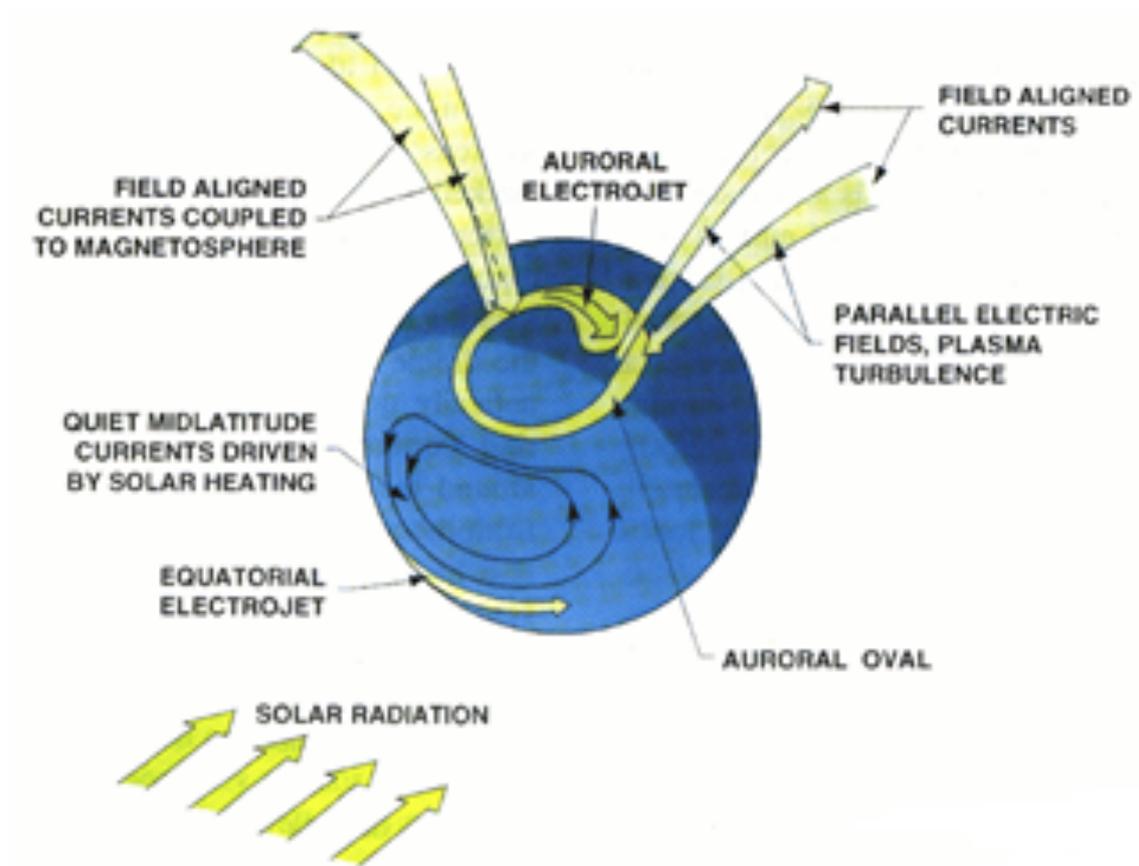


Figura 6.5 - Representação dos sistemas de correntes elétricas da ionosfera, dentre elas, o eletrojato auroral ao centro da figura.

Na maioria das vezes, utilizam-se dados das variações do campo geomagnético de regiões de altas latitudes ou regiões aurorais para as análises de tempestades geomagnéticas. Isso se deve ao fato de que a eletrodinâmica da região auroral pode afetar a eletrodinâmica de regiões equatoriais e de baixas latitudes.

6.2.4 Corrente Anelar

A corrente anelar é uma corrente elétrica que flui próximo à região equatorial do globo terrestre e é responsável pelas variações do campo geomagnético em períodos de tempestade geomagnética. O desenvolvimento da tempestade geomagnética pode ser acompanhado pela variação da intensidade em que a corrente elétrica que flui na corrente anelar através do índice de atividade magnética Dst, o qual é obtido através de quatro observatórios geomagnético próximos ao equador magnético. A Figura 6.6 mostra a esquematização das correntes elétricas na

magnetosfera terrestre. Ao centro desta, está localizada a corrente anelar, também chamada de corrente de anel.

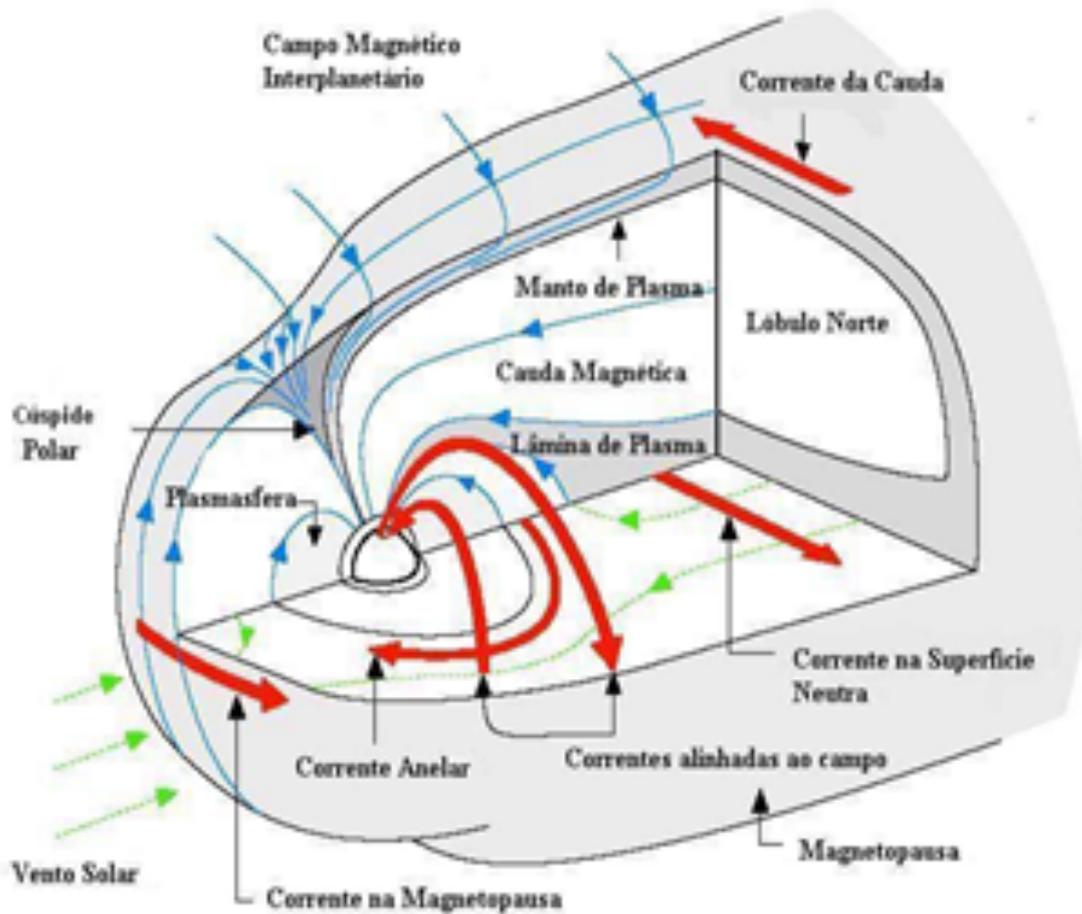


Figura 6.6 - Sistemas de correntes que circulam na magnetosfera terrestre.

Fonte: Kivelson e Russell (1995)

6.3 A Rede de Magnetômetros do EMBRACE

As observações e o monitoramento do campo geomagnético são feitas a partir de instrumentos científicos conhecidos como magnetômetros. Os tipos de magnetômetros mais utilizados para realizar as medidas do campo magnético terrestre são os absolutos e os variômetros. Os magnetômetros absolutos medem a magnitude do campo magnético, enquanto que os variômetros medem apenas a variação deste campo.

Estes instrumentos são cuidadosamente instalados em localidades livres de interferências magnéticas antropogênicas. O princípio de funcionamento do magnetômetro variômetro baseia-se na saturação da curva de histerese do núcleo magnético. Este núcleo magnético é composto por um material de alta permeabilidade magnética e é utilizado para obter o sinal do campo magnético existente no ambiente. Em geral, esses magnetômetros são constituídos por duas bobinas. A primeira, chamada de primária, provoca uma variação da permeabilidade magnética do núcleo, saturando-o periodicamente. A segunda, chamada de secundária, faz a detecção do campo magnético externo que se quer medir. O sinal que aparece na bobina secundária é proporcional à variação do campo magnético externo na direção da bobina (RIPKA, 1992). São necessários três sensores variômetros orientados em três direções ortogonais para produzirem as três componentes necessárias para a medição do campo geomagnético.

O campo geomagnético é medido nas componentes cartesianas (XYZ) ou cilíndricas (HDZ) do campo magnético. A Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA, do inglês International Association of Geomagnetism and Aeronomy) possui um longo histórico no estudo e observação do campo geomagnético e estabelece recomendações mínimas necessárias para a realização de medidas do campo geomagnético. Essas medidas de campo magnético são realizadas em locais denominados de observatórios magnéticos ou estações magnéticas.

O Programa EMBRACE é o acrônimo de “Estudo e Monitoramento BRAsileiro do Clima Espacial”, e possui uma série de redes de instrumentos espalhados na América do Sul (DENARDINI et al., 2016). Uma das redes de instrumentos é chamada de Embrace MagNet, composta por vários magnetômetros variômetros, e é responsável por coletar dados da variação do campo geomagnético na região sob influência da SAMA. Esta rede de magnetômetros coleta dados do campo geomagnético desde de 2010, fornecendo informações importantes a respeito da variabilidade do campo magnético terrestre há mais de uma década. A Figura 6.7 mostra um mapa com as estações magnéticas da Embrace MagNet. Nesta Figura também são mostradas as variabilidades temporal e espacial do equador magnético e da região próxima do centro da SAMA, entre os anos de 2010 e 2018.

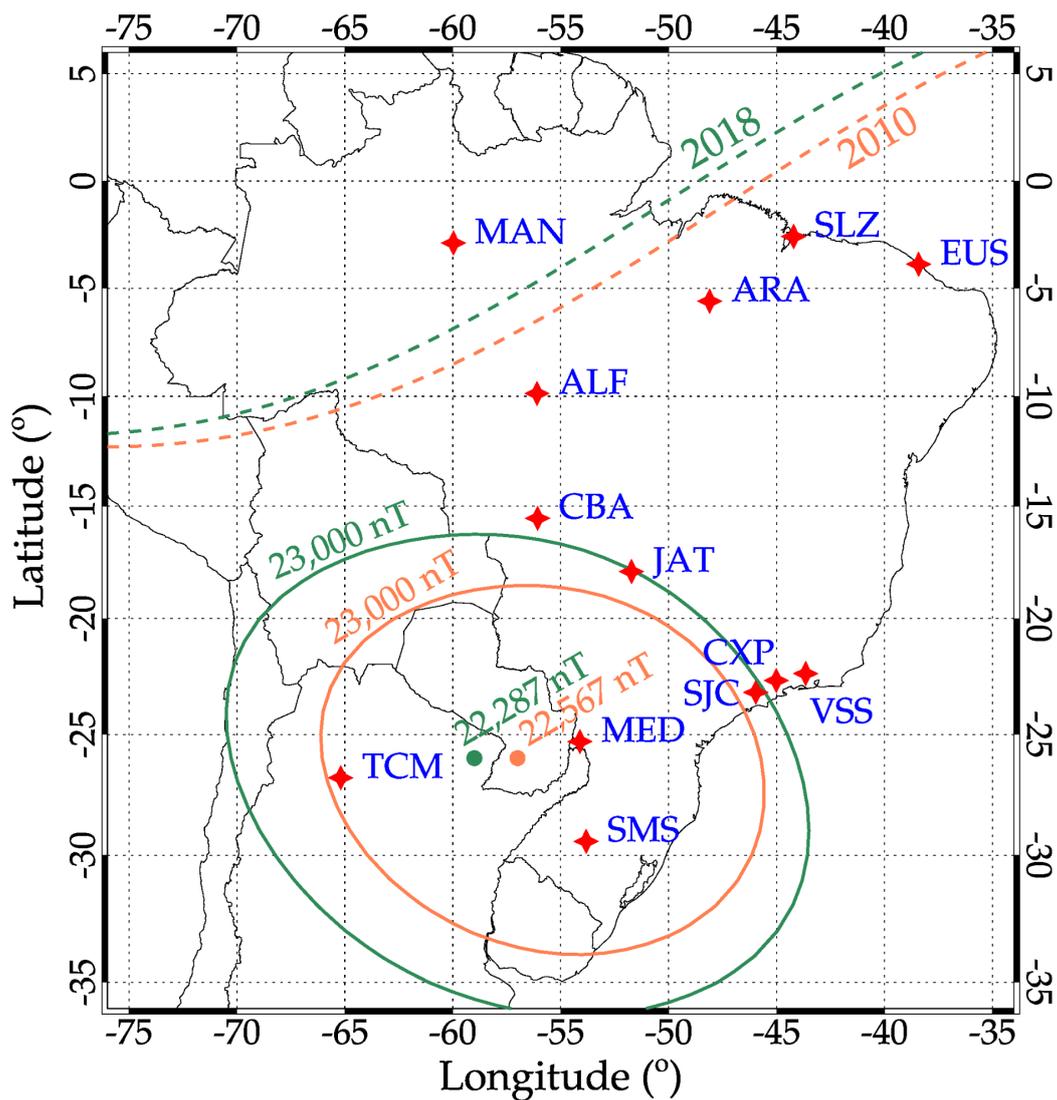


Figura 6.7 - Mapa com as estações magnéticas da Embrace MagNet. Os círculos indicam a região de menor intensidade da componente total do campo geomagnético, 22287 nT em 2018 e 22567 nT em 2010. As isolinhas de 23000 nT da componente total do campo geomagnético representam a região próxima do centro da SAMA. As linhas tracejadas correspondem ao equador magnético. As cores verde e laranja das linhas sólidas e tracejadas indicam os anos de 2018 e 2010, respectivamente.

Fonte: Chen et al. (2021)

Figura 6.8 mostra um conjunto de fotografias do magnetômetro de São Martinho da Serra. A Figura 6.8a mostra o sensor magnético enterrado a aproximadamente 80 centímetros abaixo da superfície e envolto por uma cobertura de madeira. Já a

Figura 6.8b mostra o sistema de controle do magnetômetro. Os magnetômetros do Programa EMBRACE são projetados para



Figura 6.8 - Fotografias do (a) sensor magnético enterrado a aproximadamente 80 centímetros abaixo da superfície e envolto por uma cobertura de madeira e (b) sistema de controle do magnetômetro da estação magnética de São Martinho da Serra (SMS).

Fonte: Denardini et al. (2018)

Um exemplo das medidas do campo geomagnético é apresentado nos magnetogramas da Figura 6.9 para Vassouras nos dias 4 e 8 de dezembro de 2016. A Figura 6.9a mostra um exemplo da variação do campo geomagnético durante um dos dias geomagneticamente mais calmo do mês de dezembro de 2016. Já a Figura 6.9b mostra um exemplo para o dia mais perturbado daquele mês. O eixo vertical à esquerda (linha azul) representa a magnitude da variação da componente horizontal. O eixo vertical à direita (linha vermelha) representa a magnitude da variação do ângulo de declinação magnética, o eixo vertical à direita (verde) representa a amplitude da variação da componente vertical e o eixo horizontal representa a hora em tempo universal.

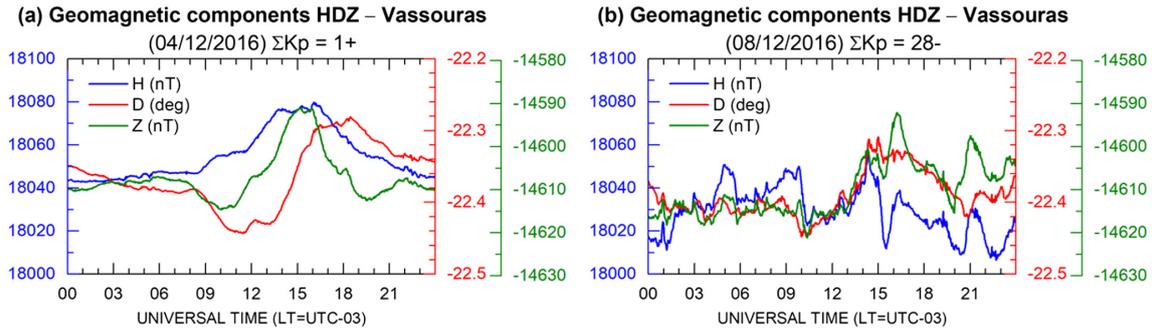


Figura 6.9 - Magnetogramas das componentes H, D e Z observados no magnetômetro de Vassouras da Embrace MagNet no dia (a) 4 de dezembro de 2016 (período calmo) e (b) 8 de dezembro de 2016 (período perturbado).

Fonte: Denardini et al. (2018)

6.4 Os Índices de Atividade Geomagnética

Os índices de atividade geomagnética são fundamentais para quantificar o grau de perturbação do campo magnético terrestre. A comunidade científica tem um amplo conjunto de índices geomagnéticos.

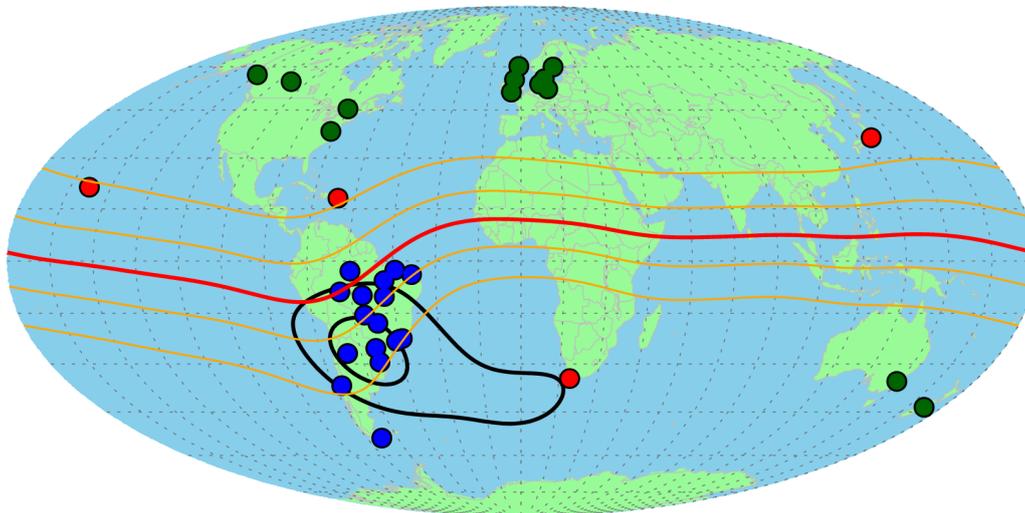


Figura 6.10 - Mapa com as localizações dos observatórios e estações magnéticas que produzem os índices de atividade geomagnética Kp (verde), Dst (vermelho), ΔH_{sa} e K_{sa} (azul). A linha vermelha corresponde ao equador magnético. As linhas laranjas correspondem às isoclinicas $\pm 40^\circ$ e $\pm 20^\circ$. Os contornos em preto indicam a região da SAMA.

6.4.1 Índice Kp

O índice Kp é o índice global, desenvolvido para indicar o nível de atividade geomagnética dentro de um intervalo de 3 horas. Ele foi introduzido primeiramente por e revisado por. O índice é derivado de uma composição estatística da variação de um grupo selecionado de estações na região auroral mostrado na Figura 6.10.

Essencialmente, o índice Kp é derivado da média dos índices K dos dados da variação do campo geomagnético de cada observatório para um intervalo de 3 horas na hora universal (0 – 3, 3 – 6, ..., 21 – 24). Para cada intervalo, a diferença entre o máximo e o mínimo absoluto da componente é medida para a componente X e Y. O máximo de desvio das duas componentes é então estabelecido e denominado de amplitude. Cada observatório possui a sua própria tabela quase logarítmica para conversão da amplitude para um índice K, os valores da tabela são determinados pela latitude geomagnética de cada observatório. Os valores K vão de 0 (baixa atividade) até 9 (intensa atividade). Além disso, este índice é subdividido em uma escala com terços de um número inteiro, representado por símbolos que indicam seu valor correspondente, onde: 0,33 (um terço) equivale ao símbolo "°"; 0,67 (dois terços) equivalem ao símbolo "+"; e finalmente o valor inteiro equivale ao símbolo "o".

A Figura 6.11 mostra um exemplo gráfico do índice Kp para a data de 10 de setembro de 2021. Os valores equivalentes ao observado neste gráfico são, respectivamente, 1o (0 – 3 UT), 2o (3 – 6 UT), 2– (6 – 9 UT), 1– (9 – 12 UT), 1– (12 – 15 UT) e 1o (15 – 18 UT).

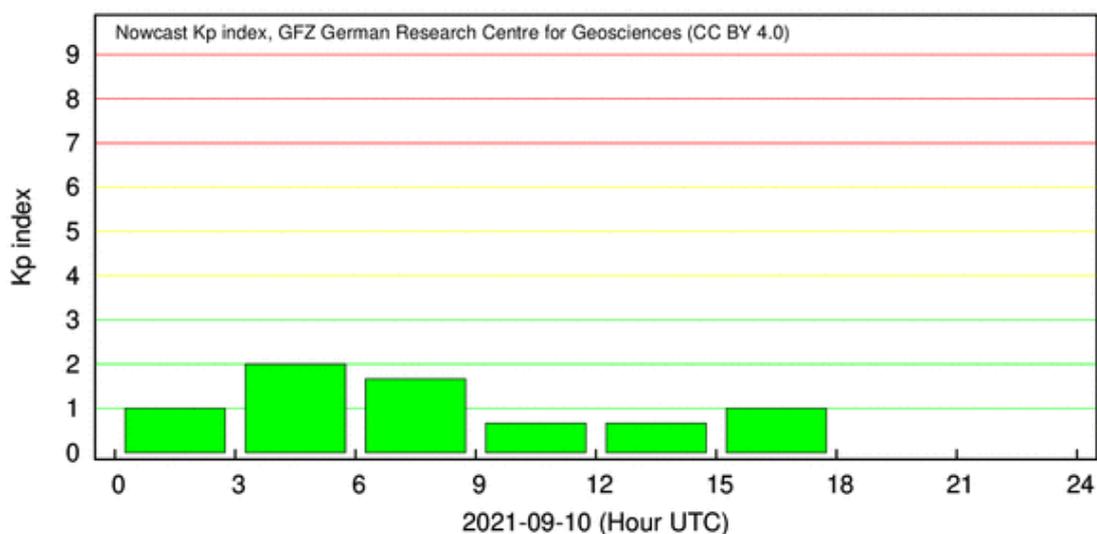


Figura 6.11 - Índice Kp observado no dia 10 de setembro de 2021.

6.4.2 Índice Dst

O índice Dst é um índice geomagnético global que monitora o nível de perturbações magnéticas com base em observatórios magnéticos ao longo de médias e baixas latitudes. Este índice é calculado a partir da média do componente H do campo geomagnético medida por quatro magnetômetros localizados próximo às latitudes equatoriais e médias ao longo do equador (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). A localização destes observatórios magnéticos é indicada em vermelho na Figura 6.12. Os valores negativos de Dst indicam que uma tempestade magnética está em andamento. Essas deflexões negativas são causadas pela corrente anelar.

É possível identificar o início e o término de uma tempestade geomagnética a partir deste índice. Para isso, as tempestades geomagnéticas nesse índice são divididas em fases: inicial, principal e recuperação. O gráfico da Figura 6.12 mostra as diferentes fases da tempestade magnética utilizando o índice Dst.

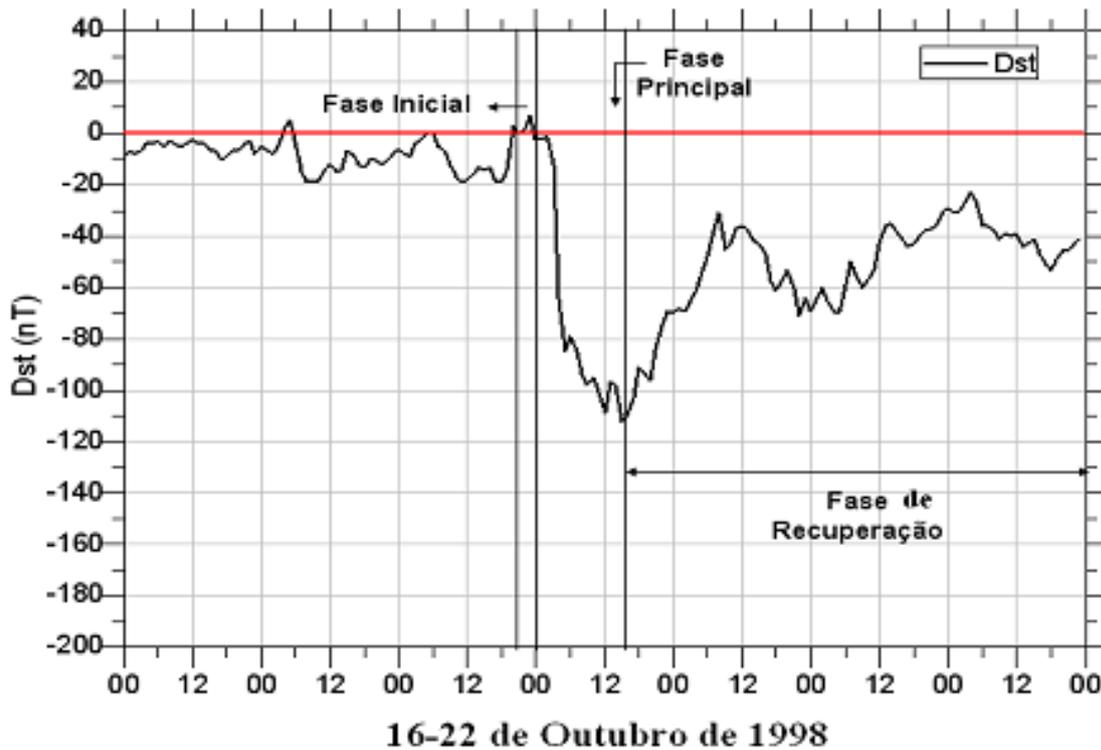


Figura 6.12 - Índice Dst observado entre os dias 16 e 22 de outubro de 1998, e as respectivas fases da tempestade geomagnética.

Ainda, o índice Dst pode ser utilizado para classificar as tempestades magnéticas em diferentes intensidades, são elas: super intensas ($Dst < -250$ nT), intensas (-250 nT $< Dst < -100$ nT), moderadas (-100 nT $< Dst < -50$ nT) e fracas (-50 nT $< Dst < -30$ nT) (GONZALEZ et al., 1994). As tempestades em que o índice Dst alcança na ordem de -50 a -150 nT ocorrem quase sempre em todos os meses. Já as perturbações entre -150 e -300 nT podem ocorrer algumas vezes ao ano. Algumas vezes uma tempestade magnética pode exceder -500 nT por ciclo solar (KIVELSON; RUSSELL, 1995).

6.4.3 Índices ΔH_{sa} e K_{sa}

Por fim, os índices regionais ΔH_{sa} e K_{sa} da América do Sul foram desenvolvidos por Denardini et al. (2018), com o intuito de monitorar e quantificar o nível das perturbações magnéticas na região sobre a influência da SAMA. A localização das estações magnéticas utilizadas nos cálculos dos índices geomagnéticos da América do Sul são mostrados em azul na Figura 6.7. Estes índices são calculados a partir das metodologias apresentadas nos índices Dst e K_p , respectivamente.

A Figura 6.13 mostra um exemplo gráfico dos índices ΔH_{sa} e K_{sa} para a data de 10 de setembro de 2021. Desta figura, pode-se observar que o índice K_{sa} apresenta valores um pouco maiores do que o índice K_p , comparando o mesmo período de análise.

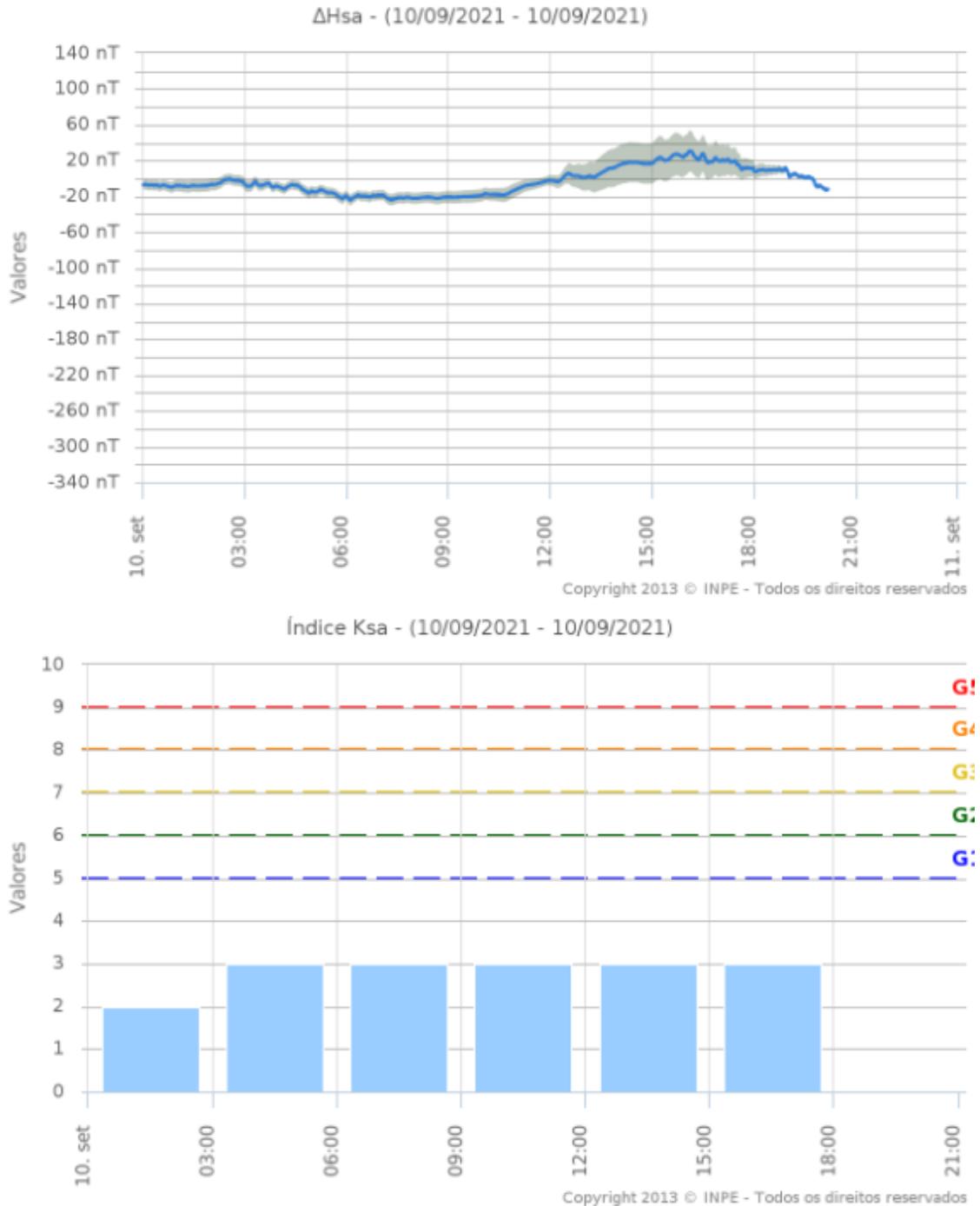


Figura 6.13 - Índices ΔH_{sa} e K_{sa} observados no dia 10 de setembro de 2021

6.5 Considerações Finais

Finalmente, neste Capítulo serão as considerações finais sobre o tópico de geomagnetismo e a sua relação com o clima espacial. Nos Capítulos anteriores foram apresentadas várias características marcantes sobre o campo geomagnético. Entre as questões sobre o campo magnético terrestre, foram descritas as diversas fontes de campo magnético que compõem o campo geomagnético. Além disso, especificamente, na América do Sul há a presença da região de menor magnitude do campo magnético terrestre, a anomalia magnética conhecida por SAMA.

Outro conceito introduzido foram as variações do campo geomagnético. Estas variações possuem escalas temporais e espaciais distintas. Dependendo da aplicação ou finalidade do uso das medidas do campo geomagnético e suas variações, pode-se reduzir ou estender o entendimento das condições calmas ou perturbadas do campo magnético terrestre.

A realização das medidas do campo geomagnético e suas variações são feita a partir de instrumentos conhecidos como magnetômetros. Estes equipamentos permitem mensurar o vetor campo magnético e suas variações ao longo do tempo. Ademais, com o uso de uma rede de sensores deste equipamento é possível verificar as variações espaciais do campo geomagnético. Vale ressaltar que a calibração de uma rede de sensores é muito importante para quantificar as variações espaciais do campo magnético.

Por fim, o uso dos índices geomagnéticos são muito importante para quantificar as variações do campo geomagnético. Para o clima espacial, as informações a respeito das variações do campo magnético são importantes para definir as condições do ambiente solar-terrestre, como por exemplo o caso de tempestades geomagnéticas. Entre os vários índices de atividade geomagnética que existem, há aqueles que quantificam os graus de perturbações em escala global e outros para escala regional/local. Em escala regional, os índices existentes para a América do Sul são K_{sa} e ΔH_{sa} . Já os índices para uma escala global são K_p e Dst .

7 IONOSFERA E CORRENTES IONOSFÉRICAS

Conforme mencionado anteriormente, a ionosfera é uma região caracterizada por apresentar uma alta densidade de elétrons livres e de íons positivos e, por ser capaz de afetar a propagação de ondas de rádio. As correntes na ionosfera surgem da interação entre os ventos e o campo magnético. Assim, campos elétricos são estabelecidos devido às diferentes mobilidades de íons e elétrons. Durante o dia, a maior parte da corrente ionosférica está concentrada na região E enquanto durante a noite o dínamo da região F conduz a maior parte da corrente (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

O dínamo da região E ionosférica ocorre devido a presença de movimentos dos ventos neutros conduzidos por oscilações de marés. Os ventos da região do dínamo da região E, através do campo magnético da Terra, contribuem na formação de uma força eletromotriz e estabelecem correntes (Pedatella et al., 2011). O resultado desse sistema de correntes é conhecido como Solar Quiet (Sq), o qual flui em sentido anti-horário no hemisfério Norte diurno e sentido horário no hemisfério Sul diurno (Farley, 2009). Na região E, os campos elétricos de indução e de polarização são geralmente comparáveis em magnitude. Mesmo durante a noite, quando a densidade eletrônica é menor, a magnitude da condutividade longitudinal é suficiente para permitir correntes fluindo, mantendo o campo de polarização.

O dínamo da região F é gerado pelos ventos termosféricos que induzem o movimento dos íons e elétrons ao longo das linhas de campo, com velocidade igual a componente dos ventos neutros nessa direção. Devido a dependência com a carga das partículas carregadas, os íons e elétrons se movimentam em direções contrárias, criando um campo elétrico de polarização. Devido ao acoplamento que existe entre as regiões E e F durante o dia, este campo elétrico de polarização é descarregado por correntes que fluem ao longo do campo magnético. Já com a queda de condutividade durante a noite, estes campos elétricos de polarização se somam ao campo elétrico natural da região F, contribuindo para uma forte deriva e o surgimento do pico de pré-reversão nos horários do anoitecer (RISHBETH; GARRIOTT, 1969).

Vale salientar que estes campos elétricos de polarização na ionosfera em geral são influenciados pelos campos elétricos oriundos de processos magnetosféricos, os quais são gerados nas altas latitudes ionosféricas, mas que podem penetrar nas baixas latitudes, bem como pelos campos elétricos gerados devido ao aquecimento da região auroral, afetando o ambiente de clima espacial.

7.1 Fenômenos ionosféricos e seus efeitos em clima espacial

7.1.1 Eletrojato Equatorial

Devido a configuração das condutividades ionosféricas, a ação do dínamo se torna mais efetiva no equador magnético nas alturas da região E ionosférica. Assim, surge uma corrente que flui do terminadouro do amanhecer para o terminadouro do anoitecer nos dois lados da Terra. Dessa forma a corrente, denominada eletrojato equatorial (EEJ), fluirá para leste durante o dia e para oeste durante a noite (Farley, 2009). O desenvolvimento da corrente do EEJ pelo campo elétrico do dínamo pode ser explicado na Figura 7.1. Para se entender sua composição, considera-se uma camada condutora fina, onde o fluxo de corrente está confinado entre 90 e 140 km de altura, na qual as correntes verticais são desprezíveis.

O campo elétrico natural da ionosfera devido aos ventos de marés cria uma corrente Pedersen (JP) na sua direção e uma corrente Hall (JH) na direção perpendicular a ele e a componente do campo magnético (Figura 7.1a). Desde que a condutividade é reduzida abaixo e acima do pico de condutividade, a corrente Hall vertical produz um campo elétrico vertical (Figura 7.1b). Associadas a presença deste campo surgem correntes Pedersen e Hall. A primeira corrente reduz o efeito da corrente Hall do campo elétrico primário. A segunda corrente se somará a corrente Pedersen deste mesmo campo (Figura 7.1c). Finalmente, essa forte corrente é o eletrojato equatorial que circula ao longo do equador magnético e está presente na região brasileira. Por ocasionar um aumento significativo da variação diurna da componente horizontal do campo magnético na região do equador magnético, essa corrente pode ser obtida por equipamentos conhecidos como magnetômetros. Durante a noite, quando a densidade eletrônica da região E decai, o cenário apresentado anteriormente se reverte, ou seja, a corrente flui na direção oeste.

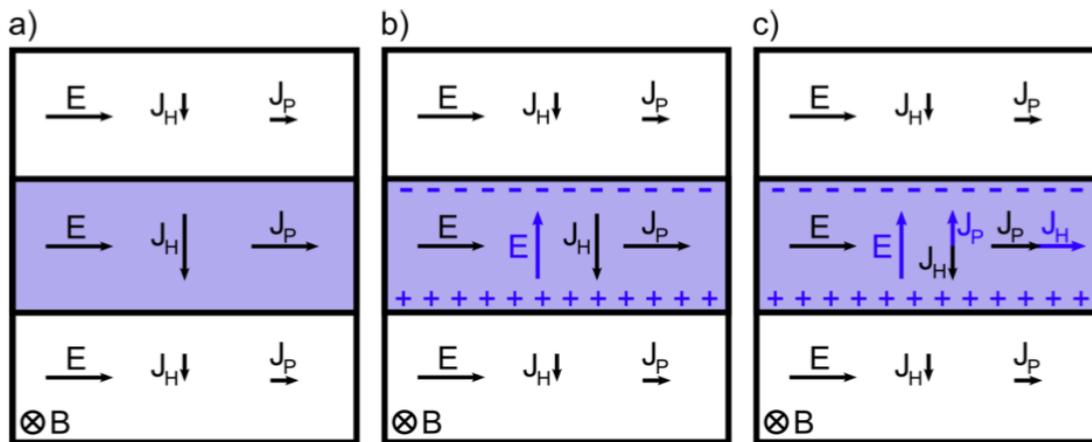


Figura 7.1 - Formação de corrente Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividade diferentes.

7.1.2 Camadas Es

Em geral, o termo camada E-esporádica, abreviado por Es, refere-se a adensamentos do plasma, compostos por íons metélicos, em uma faixa de altura estreita na região E ionosférica. Tal camada geralmente tem sido investigada por meio de observações feitas por diversos equipamentos durante anos, tais como, ionossondas, radares de espalhamento incoerente, foguetes e satélites (MATHEWS, 1998; Arras et al., 2009; Haldoupis, 2011). Assim, foi possível sedimentar os mecanismos de sua formação que dependem da altitude e, principalmente, da latitude onde são observadas. Em médias e baixas latitudes, o aumento da ionização que forma a camada Es é devido ao mecanismo de cisalhamento de ventos. Em regiões equatoriais, o termo camada Es é atribuído a irregularidade de gradiente de deriva presente nessa região. Em regiões aurorais ou na Anomalia Magnética da América do Sul (do inglês *South America Magnetic Anomaly*, SAMA), elas ocorrem devido a precipitação de partículas.

Essas camadas Es influenciam diretamente a propagação de rádio sinal devido ao seu adensamento. O principal equipamento para seu estudo é a digissonda, que é um tipo de equipamento de sondagem ionosférica que se caracteriza por ser um radar de alta frequência constituído de um transmissor acoplado a antena transmissora, o qual emite curtos pulsos na faixa de radio-frequência. Os dados coletados pela digissonda são ecos do sinal refletido pelas camadas ionosféricas de densidade correspondente a frequência do sinal transmitido. Os pulsos transmitidos

são refletidos em regiões onde a frequência do plasma ionosférico é igual a frequência do pulso no vácuo. Estes ecos são registrados em ionogramas, gráficos das alturas virtuais das camadas de reflexão versus a frequência do sinal que foi refletido. A partir dos ionogramas é possível obter parâmetros ionosféricos das diferentes camadas. Os dados brutos recebidos estão encriptados em um formato denominado TAP, ou modernamente em um formato denominado GRM. Este formato contém, além dos dados básicos, a informação da interpretação automática feita pelo programa Automatic Real-Time Ionogram Scaler with Trueheight (Artist). O Artist é uma coleção de programas que retiram as informações sobre a ionosfera a partir da potência do sinal versus dados de altura e frequência do ionograma. O programa usado para a análise é o SAO-Explorer (SAO-X), o qual permite fazer revisão da redução automática dos ionogramas. A Figura 7.2 mostra as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos que podem ser obtidas com o programa SAO-Explorer.

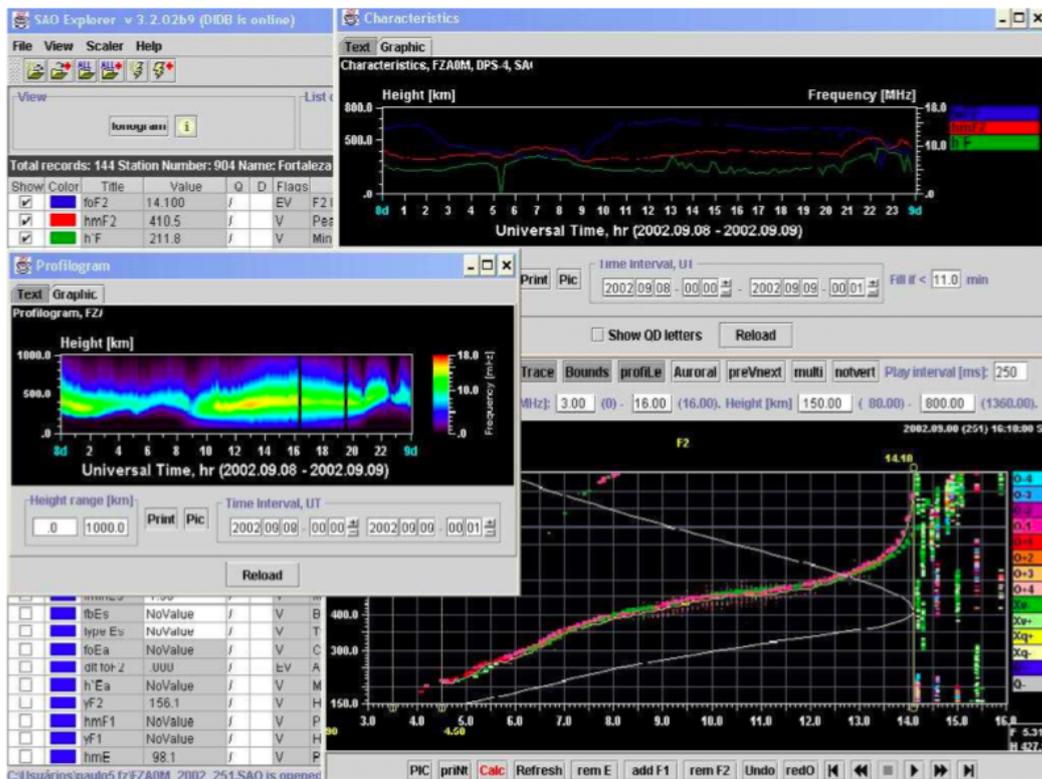


Figura 7.2 - Ilustração de diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos, obtidos através do programa SAO Explorer.

De acordo com sua aparência nos ionogramas, as camadas Es são classificadas em tipos distintos identificados por letras minúsculas. Dentre estes, pode-se citar: “f”(flat), “l”(low), “c”(cusp), “h”(high), “q”(equatorial), “a”(auroral) e “s”(slant). Os tipos mais comuns observados em médias e baixas latitudes estão mostrados na Figura 7.3

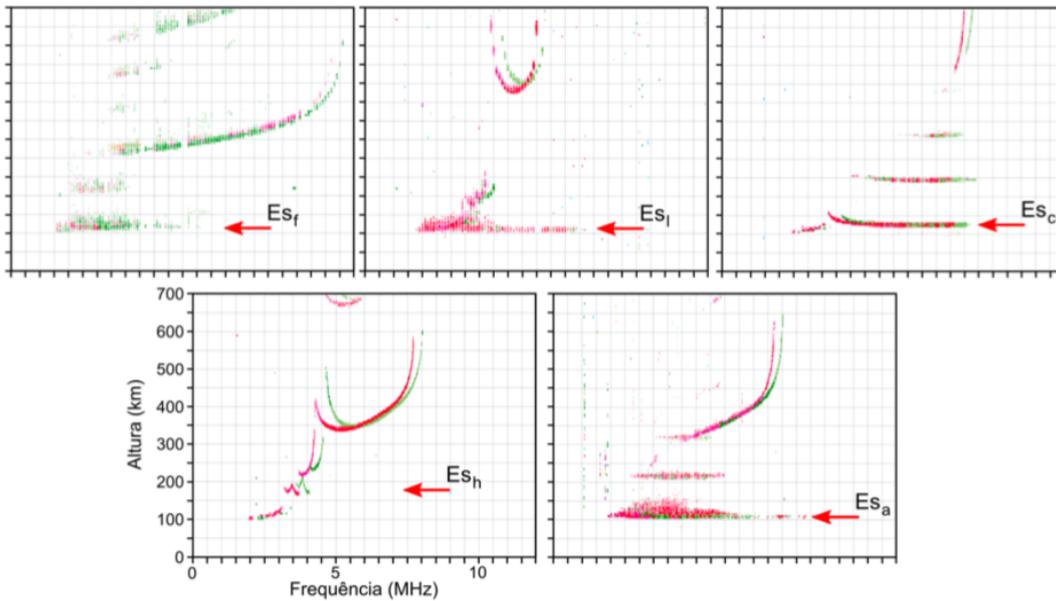


Figura 7.3 - Alguns tipos de camadas Es aferidos por ionogramas.

Devido à presença da SAMA no setor Sul-Americano ocorre a precipitação de partículas que causam as camadas Es aurorais (E_s_a), influenciando a ionosfera como um todo (Abdu; BATISTA, 1977). Um mapa da magnitude do campo Um mapa da magnitude do campo geomagnético sobre a superfície terrestre é mostrado na Figura 7.4. Esta figura mostra o gráfico de contorno das linhas isodinâmicas da magnitude do campo geomagnético sobre a superfície terrestre, obtida a partir do modelo de Campo geomagnético Internacional de Referencia (IGRF, do inglês International Geomagnetic Reference Field), com a versão IGRF-13 para o ano de 2020. Nesta região, a menor magnitude do campo geomagnético refere-se ao SAMA e é comumente atribuída a excentricidade do dipolo magnético. Esta região e caracterizada pela maior aproximação do cinturão de radiação interno de Van Allen sobre a atmosfera terrestre. Neste caso, esta região de menor magnitude do campo geomagnético permite que as partículas do cinturão de radiação possam

atingir altitudes mais baixas que nas demais regiões do globo. O fluxo de partículas em direção a atmosfera terrestre é conhecida como precipitação de partículas, e geralmente, ocorre devido a geometria das linhas do campo geomagnético, como é o caso das regiões de altas latitudes. No entanto, esse tipo de precipitação é mais observada durante períodos geomagneticamente perturbados.

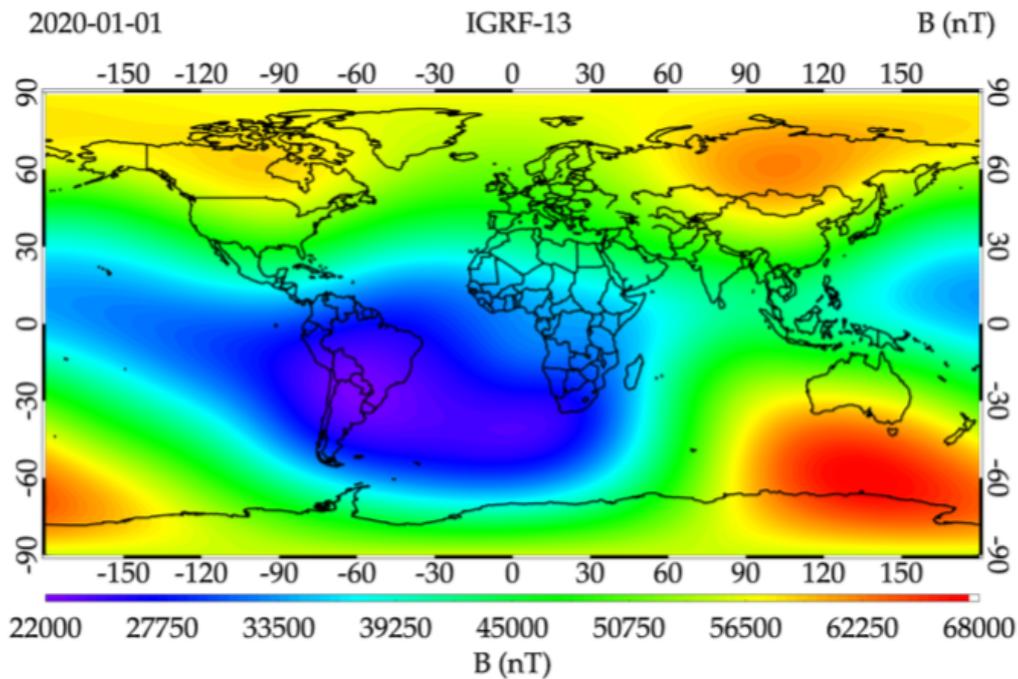


Figura 7.4 - Mapa da distribuição global da magnitude da componente total do campo geomagnético obtida a partir do modelo IGRF-13 para o ano de 2020.

Portanto, para o monitoramento dessas camadas Es, foi criado um índice ionosférico que avalia o seu comportamento diário em relação a sua frequência máxima observada nos ionogramas (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 - Escala do índice referente às camadas Es.

Es1	$1 < Es < 3$
Es2	$3 < Es < 5$
Es3	$5 < Es < 7$
Es4	$7 < Es < 9$
Es5	$Es > 9$

7.1.3 e como são registradas por diferentes instrumentos em solo

As bolhas de plasma são irregularidades ionosféricas caracterizadas por perturbações na densidade ionosférica e se originam devido a processos eletrodinâmicos. Estas irregularidades possuem um amplo espectro de escalas de tamanho, desde alguns centímetros até centenas de quilômetros (Barros et al., 2018). Elas se originam-se na ionosfera equatorial e se constituem de regiões onde a densidade de plasma é drasticamente reduzida. Além disso, desenvolvem-se na base da camada F, após o pôr do Sol, e podem se estender até algumas centenas de quilômetros em altura. Finalmente, apresentam variabilidade sazonal, sofrem a influência do ciclo solar, da atividade geomagnética e variam em função de latitude (Barros et al., 2018)

O mecanismo que explica o surgimento dessas bolhas de plasma é a Instabilidade Rayleigh-Taylor (IRT) ilustrado na Figura 7.5. Em torno do horário do terminador solar, a região E sofre rápida recombinação. Além disso, a camada F sofre uma subida abrupta devido à intensificação da deriva vertical (pico de pré-reversão), mencionado anteriormente. Estes dois fatores, a rápida recombinação da região E e a subida abrupta da camada F, resultarão na configuração onde um meio com maior densidade do plasma (camada F2) é sustentado por outro com densidade menor (regiões da ionosfera abaixo da camada F2). Esta configuração da ionosfera resultará em uma região de equilíbrio instável, onde caso acontecer alguma instabilidade provocada por um agente externo, a mesma vai ser amplificada. Estas instabilidades irão se desenvolver de acordo com o mecanismo da IRT, gerando as bolhas de plasma.

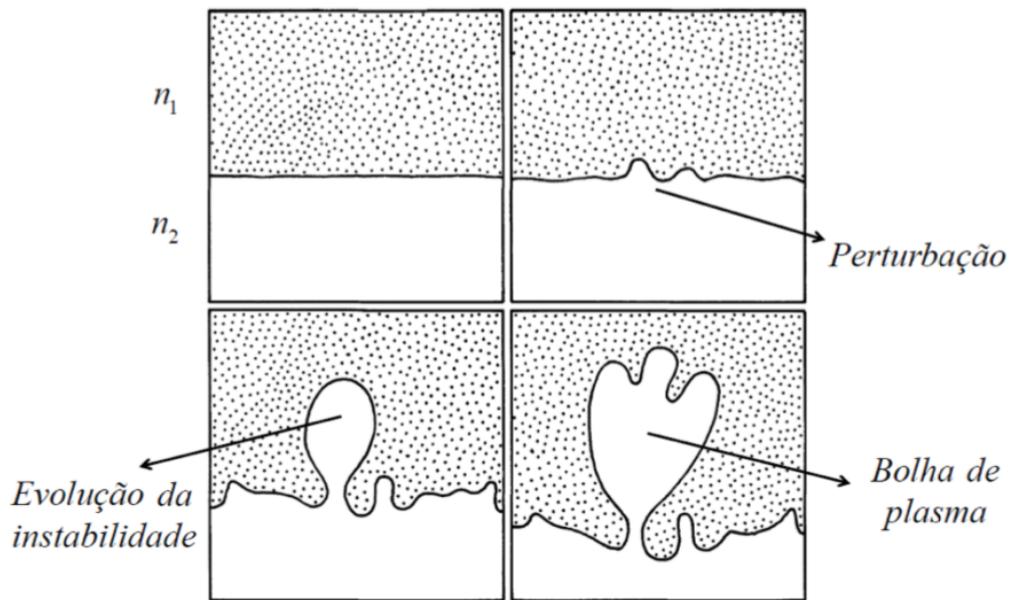


Figura 7.5 - Ilustração da evolução de uma instabilidade gerando bolhas de plasma baseado no mecanismo da IRT.

Como foi dito no início desta seção, as irregularidades do plasma ionosférico abarcam um leque muito grande de escalas, razão pela qual elas são estudadas usando diferentes instrumentos como mostra a Figura 7.6.

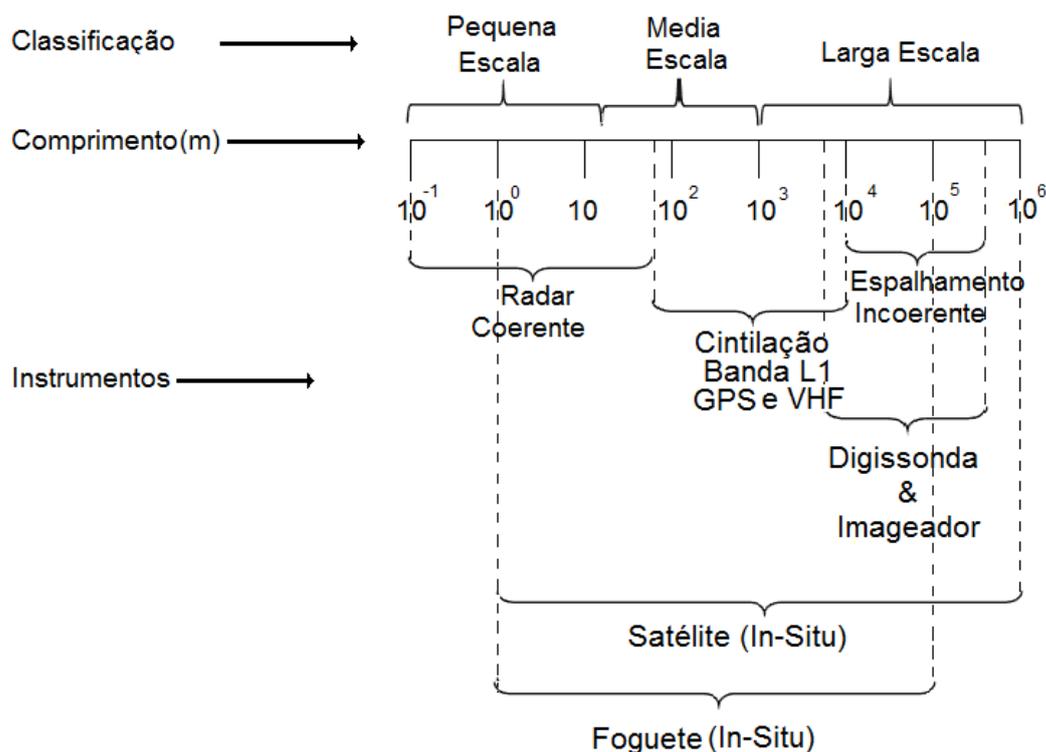


Figura 7.6 - As escalas espaciais que podem ter as irregularidades geradas no equador geomagnético e os instrumentos que as detectam (PIMENTA, 2002).

A ocorrência dessas irregularidades faz como que haja atraso no sinal das ondas de rádio e, principalmente, no Global Navigation Satellite System (GNSS), sendo o Global Positioning System (GPS) o mais conhecido. Portanto, foi realizada a criação de um novo índice ionosférico é denominado índice AV, baseado em um estudo climatológico e na análise da velocidade de deriva do plasma ionosférico que está diretamente ligada a ocorrência dessas bolhas de plasma. Para tal, utilizam-se dados observacionais e a análise dos fenômenos verificados através de modelagem computacional. Assim, o índice AV está sendo utilizado como ferramenta de previsão do clima espacial.

A deriva noturna (V_z) é obtida através do parâmetro de altura virtual ($h'F$) usando a relação:

$$V_z = \frac{\Delta h'F}{\Delta t} \quad (7.1)$$

Este parâmetro foi obtido para todos os dias através da avaliação manual de cada dado ionosférico, uma vez que para a região brasileira o programa automático de análise não funciona adequadamente. Após essa correção, foi calculada a deriva ionosférica no período noturno (a partir de 2000 UT) a cada 10/15 minutos, dependendo da resolução temporal dos dados da estação. A partir disso, o parâmetro V_z é obtido para cada dia de análise. Um exemplo é mostrado na Figura 7.7 para o mês de janeiro, na qual mostra-se a deriva ionosférica noturna diária, ressaltando através das setas vermelhas o parâmetro V_z .

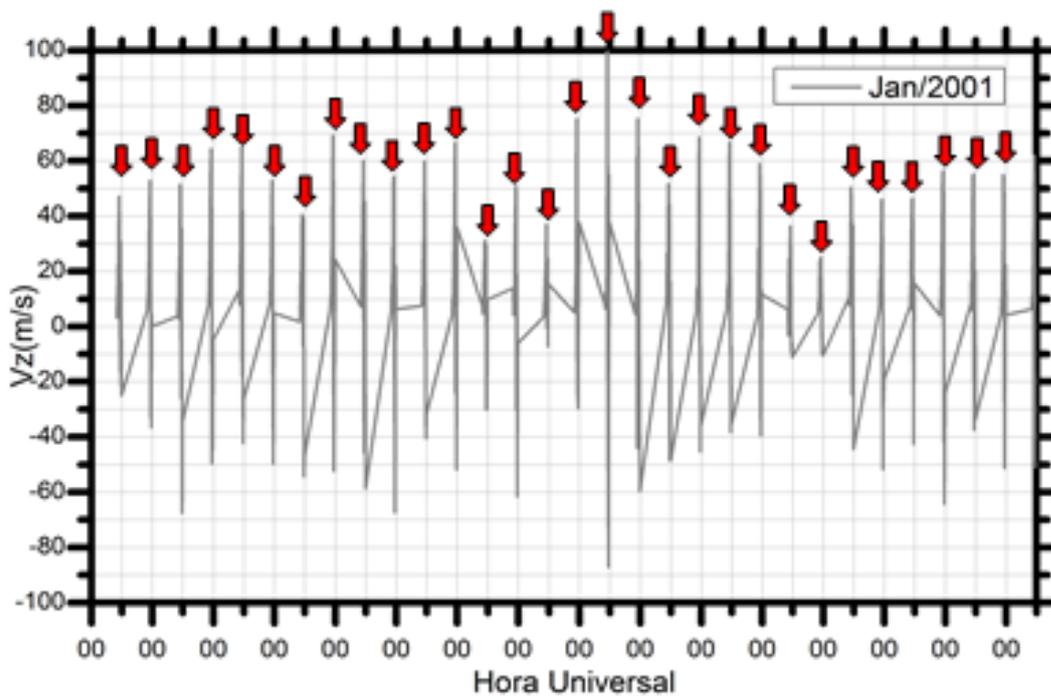


Figura 7.7 - Deriva ionosférica no período noturno (linha cinza) e o parâmetro V_z (seta vermelha) para o mês de janeiro de 2001 em São Luís.

A partir dessa análise, o estudo foi dividido de acordo com as estações do ano, uma vez que as irregularidades ionosféricas também são um fenômeno sazonal. Assim, neste estudo, o verão representa os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, o inverno se compõe dos meses de junho, julho e agosto, e os meses restantes são os equinócios.

Na Tabela 7.2 é mostrada a escala que foi proposta para associar o aumento do

parâmetro V_z com as irregularidades ionosféricas. Os valores dos índices AV foram divididos em cinco níveis.

Tabela 7.2 - Escala do índice AV.

AV1	$20 < V_z < 30$
AV2	$30 < V_z < 40$
AV3	$40 < V_z < 50$
AV4	$50 < V_z < 60$
AV5	$V_z > 60$

A conclusão é que se mostrou uma probabilidade de observar uma irregularidade ocorre quando o parâmetro V_z atinge, pelo menos, 40 m/s, ou seja, o índice AV₃. Um exemplo é mostrado para o dia 26 de janeiro de 2001, no qual o parâmetro V_z atingiu 53 m/s, escala AV₄. Estas informações são compiladas na Tabela 7.3. É possível observar que 20 minutos após o índice atingir seu máximo, a irregularidade pode ser observada nos ionogramas. A Figura 7.8 mostra os ionogramas para este dia, no qual a observação das irregularidades (espalhamento) se iniciou às 2140 UT e se referem às bolhas de plasma.

Tabela 7.3 - Exemplo sobre a relação do índice ionosférico e a ocorrência da irregularidade.

Dia	V_{zp}	Escala	Hora	Início do Espalhamento
2601	53	AV4	21:20	21:40

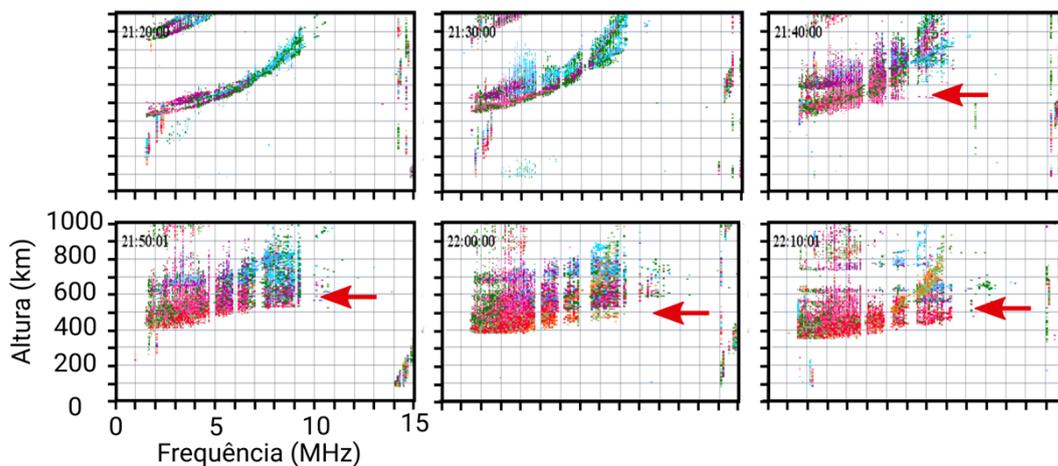


Figura 7.8 - Ionogramas entre 2120 UT e 2240 UT para São Luís no dia 26 de janeiro de 2001, mostrando o início da ocorrência de irregularidades (seta vermelha).

Finalmente, este estudo mostrou que o índice AV é adequado para ser incorporado aos produtos oferecidos pelo Embrace na previsão do clima espacial. Encontrou-se um valor limiar de 40 m/s para as duas regiões de análise e as irregularidades foram observadas após a subida do plasma da região F (em torno de pelo menos 10 minutos). Para confirmar a existências dessas bolhas de plasma ainda é utilizada a técnica de mapeamento do Conteúdo Total Eletrônico (TEC) no programa Embrace. O TEC corresponde à quantidade de elétrons ao longo de uma coluna, entre o satélite de uma constelação GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO) e o receptor em solo, cuja base possui área igual a 1m^2 . É obtido a partir das medidas de pseudodistâncias e diferenças de fase fornecidas pelos receptores GPS. Este parâmetro ionosférico é normalmente apresentado em unidades de TEC (TECU-TEC Unit), onde 1 TECU corresponde a 10^{16} elétrons/ m^2 . Os mapas de TEC são representações bidimensionais da distribuição do TEC sobre o território sul-americano. Possuem uma resolução temporal de 10 minutos e uma resolução espacial que varia entre 50 a 500 km, dependendo da concentração de receptores GNSS (Takahashi et al., 2015).

Na Figura 7.9 é apresentado o mapa de TEC obtido para o dia 16 de janeiro de 2015, às 0110 UT, onde é possível observar a ocorrência de bolhas de plasma, os tons em azul escuro (indicado pelas linhas brancas tracejadas). A seta vermelha indica que houve uma redução na densidade de plasma sobre São Luís, podendo

confirmar que as irregularidades observadas nos ionogramas (espalhamentos) estão associadas à ocorrência de bolhas de plasma neste dia.

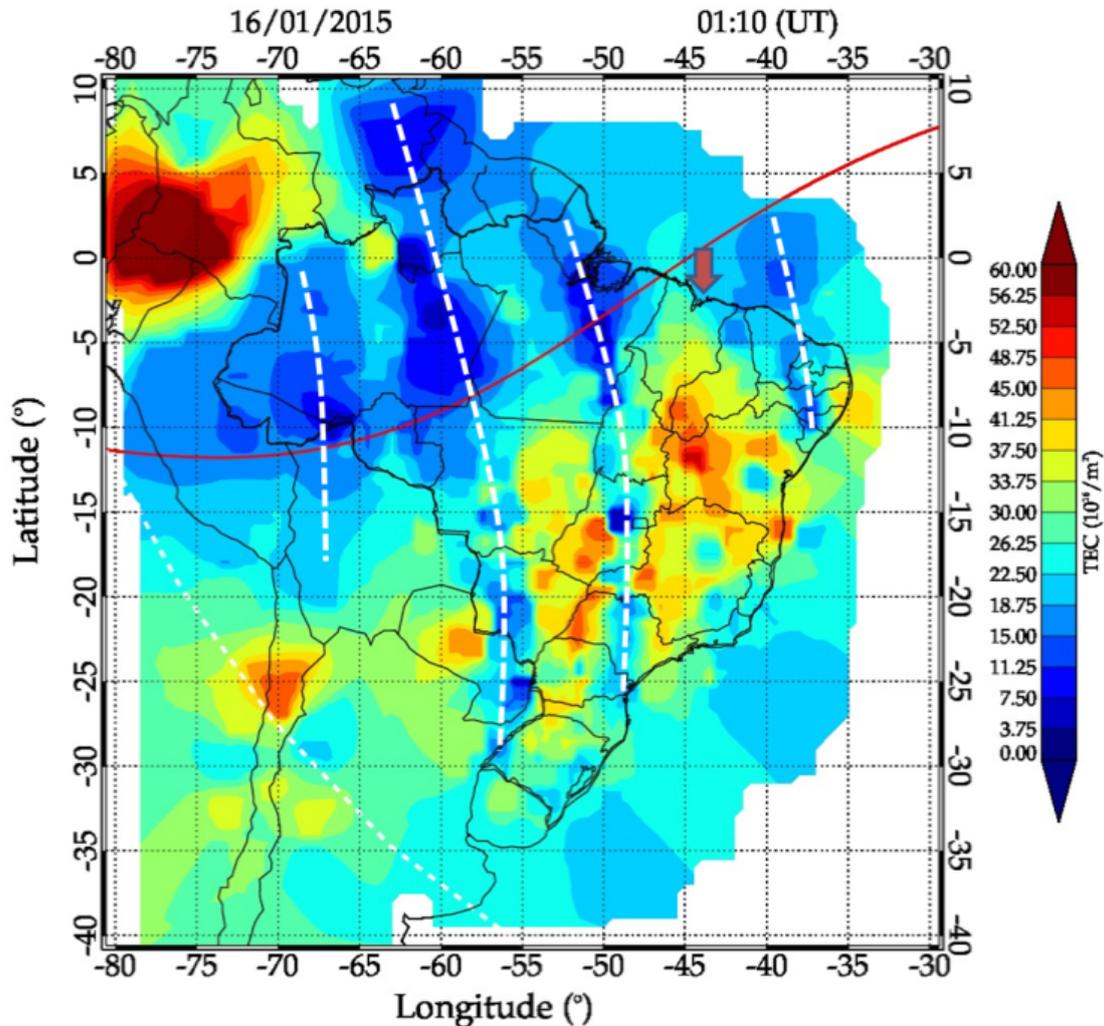


Figura 7.9 - Mapa de TEC para o dia 16 de janeiro de 2015, às 01:10 UT, onde é possível ver a presença de bolhas de plasma.

Além dos dados de TEC, utiliza-se os dados da emissão do OI 630,0 nm obtidos por um imageador All-Sky. O imageador All-Sky é um instrumento óptico de altíssima resolução capaz de averiguar a existência de bolhas de plasma, com uma abrangência espacial de 1600 km de raio (Takahashi et al., 2015). Na Figura 7.10 são apresentadas duas imagens obtidas pelo imageador instalado em São João do Cariri (PB) para a emissão do OI 630,0 nm durante a noite de 24 para 25 de dezembro de 2013, as 21h41 e as 1h01 (hora universal). A imagem d a Figura 7.9 à

esquerda apresenta a emissão do OI 630,0 nm sem ocorrência de bolhas de plasma. Já a imagem da Figura 7.10 à direita apresenta a emissão do OI 630,0 nm com a ocorrência de estruturas escuras. Estas estruturas são regiões onde a densidade de plasma é drasticamente reduzida em relação ao plasma ambiente, característica da ocorrência de bolhas de plasma (Barros et al., 2018)

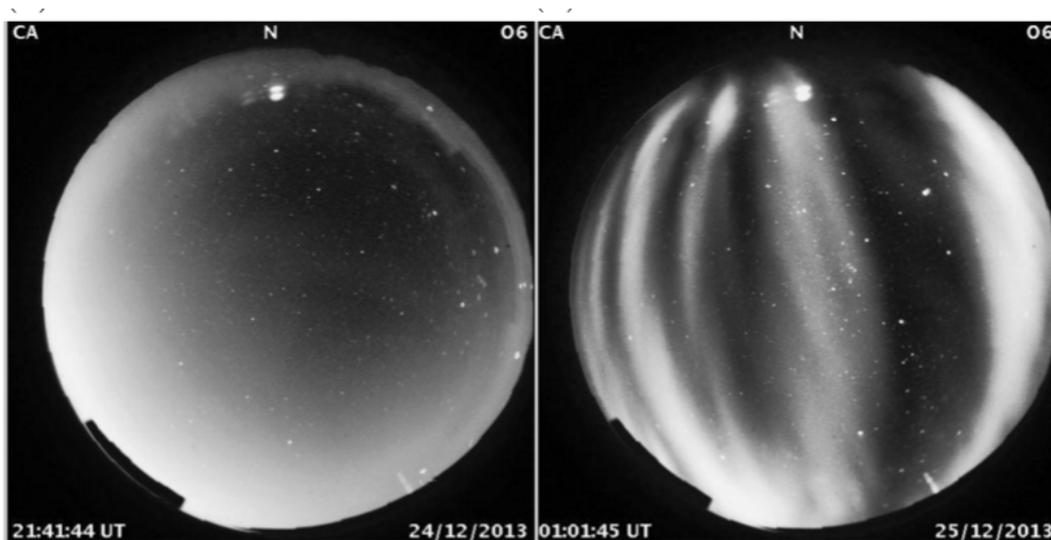


Figura 7.10 - Emissão do OI 630,0 nm observada pelo imageador instalado em São João do Cariri durante a noite de 24 para 25 de dezembro de 2013, as 21h41 UT (sem bolha de plasma) e as 1h01 UT (com bolha de plasma).

Como pode ser constatado a partir da Figura 7.6, as irregularidades com escala entre 90 m e 7 km podem ser detectadas desde solo apenas com medidas de cintilação do sinal nas frequências inferiores da banda típica de radares VHF e nas frequências de trabalho dos receptores GNSS (banda L). Dada a crescente dependência que tem a sociedade moderna dos diferentes serviços oferecidos pelos sistemas GNSS, o estudo de como são afetados estes serviços pelo clima espacial e pelos fenômenos próprios da ionosfera, como as bolhas de plasma e outras perturbações propagantes, torna-se de extrema importância. Além do TEC mencionado anteriormente, existem ao menos dois parâmetros obtidos mediante receptores GNSS que revelam a presença de irregularidades com escalas de centos de metros: o índice S4 e o índice ROTI.

O S4 caracteriza a cintilação da amplitude do sinal transmitido pelo satélite e atualmente receptores GNSS modernos, como os da fabricante Septentrio, são

capazes de processar o sinal e calcular a partir dos dados crus o S4 quase em tempo real. Já o ROTI (Rate of TEC Index) é um índice calculado a partir do TEC usando diferentes metodologias (JACOBSEN, 2014; CARMO et al., 2021) e está relacionado a taxa temporal de mudança da fase do sinal do satélite desde que o receptor consiga receber este sinal em pelo menos duas frequências diferentes.

Atualmente o projeto GNSS-NavAer da Faculdade de Ciências Cartográficas da UNESP (Campus Presidente Prudente) mantém uma rede de receptores GNSS espalhados pelo Brasil que coletam e disponibilizam em tempo real vários parâmetros a partir das observáveis de diferentes constelações GNSS. O S4 é um destes parâmetros.

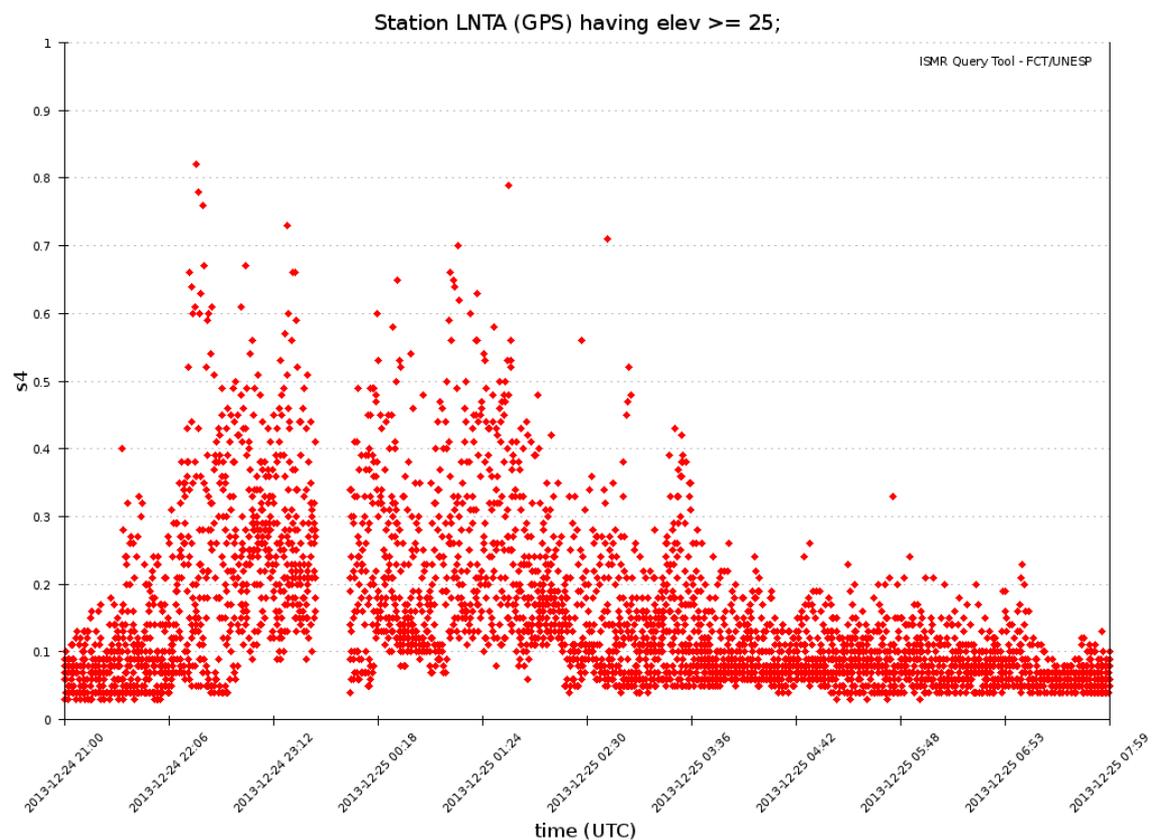


Figura 7.11 - Índice de cintilação S4 medido por um receptor GNSS localizado na cidade de Natal a 230 km ao nordeste de São João do Cariri (Figura 7.10)

A Figura 7.11 mostra o valor do S4 (sem a correção devido ao ruído térmico do receptor) para um intervalo de tempo similar aquele mostrado na Figura 7.10.

Estes dados foram obtidos por uma estação em Natal, RN localizada 230 km ao nordeste do sítio onde foi identificada a bolha de plasma (São João do Cariri, Figura 7.10). Às 2100 UT não existia manifestação de cintilação alta em consonância com o painel esquerdo da Figura 7.9. Já às 01 horas do dia 25/12/2013, observa-se valores acima de 0.4, situação que persiste por 3 horas e meia é que tinha começado ao redor das 2210UT. Inclusive, o receptor perde o sinal, não mostrando dados do S4, em algum intervalo de tempo entre às 2312 UT e às 0018 UT do dia seguinte o que pode ser devido ao efeito *lost of lock* que irregularidades do plasma, em situações severas de perturbação da ionosfera, provocam nos receptores GNNS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu, M. A.; BATISTA, I. S. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 39, n. 6, p. 723–731, jun 1977. ISSN 00219169. 50, 71

AKASOFU, S.-I.; CHAPMAN, S. The ring current, geomagnetic disturbance, and the van allen radiation belts. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 66, n. 5, p. 1321–1350, maio 1961. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/jz066i005p01321>>. 50

Alves, L. R.; SILVA, L. A. D.; SOUZA, V. M.; SIBECK, D. G.; JAUER, P. R.; VIEIRA, L. E. A. A.; WALSH, B. M.; SILVEIRA, M. V. D. D.; MARCHEZI, J. P.; ROCKENBACH, M.; LAGO, A. D.; MENDES, O.; TSURUTANI, B. T.; KOGA, D.; KANEKAL, S. G.; BAKER, D. N.; WYGANT, J. R.; KLETZING, C. A. Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 3, p. 978–987, feb 2016. ISSN 19448007. 30, 31

Anderson, B. J.; ERLANDSON, R. E.; ZANETTI, L. J. A statistical study of Pc 1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere. I - Equatorial occurrence distributions. II - Wave properties. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A3, p. 3075–3088, mar 1992. ISSN 0148-0227. 43

ANDERSON, P.; RICH, F.; BORISOV, S. Mapping the south atlantic anomaly continuously over 27 years. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier BV, v. 177, p. 237–246, out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.015>>. 50

APPLETON, E. V.; BARNETT, M. A. F. Local reflection of wireless waves from the upper atmosphere. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 115, n. 2888, p. 333–334, mar. 1925. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/115333a0>>. 51

Arras, C.; JACOBI, C.; WICKERT, J. Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 6, p. 2555–2563, 2009. ISSN 09927689. 69

Artemyev, A. V.; AGAPITOV, O. V.; MOURENAS, D.; KRASNOSELSKIKH, V.; ZELENYI, L. M. Storm-induced energization of radiation belt electrons: Effect of wave obliquity. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 40, n. 16, p. 4138–4143, 2013. ISSN 00948276. 31

Baker, D. N.; DALY, E.; DAGLIS, I.; KAPPENMAN, J. G.; PANASYUK, M. Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. **Space Weather**, John Wiley Sons, Ltd, v. 2, n. 2, p. n/a–n/a, feb 2004. ISSN 1542-7390. 35

Baker, D. N.; JAYNES, A. N.; LI, X.; HENDERSON, M. G.; KANEKAL, S. G.; REEVES, G. D.; SPENCE, H. E.; CLAUDEPIERRE, S. G.; FENNELL, J. F.; HUDSON, M. K.; THORNE, R. M.; FOSTER, J. C.; ERICKSON, P. J.; MALASPINA, D. M.; WYGANT, J. R.; BOYD, A.; KLETZING, C. A.; DROZDOV, A.; SHPRITS, Y. Y. Gradual diffusion and punctuated phase space density enhancements of highly relativistic electrons: Van Allen Probes observations. **Geophysical Research Letters**, John Wiley Sons, Ltd, v. 41, n. 5, p. 1351–1358, mar 2014. ISSN 19448007. 31

Baker, D. N.; KANEKAL, S. G. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 70, n. 2-4, p. 195–206, feb 2008. ISSN 13646826. 30

Baker, D. N.; LI, X.; TURNER, N.; ALLEN, J. H.; BARGATZE, L. F.; BLAKE, J. B.; SHELDON, R. B.; SPENCE, H. E.; BELIAN, R. D.; REEVES, G. D.; KANEKAL, S. G.; KLECKER, B.; LEPPING, R. P.; OGILVIE, K.; MEWALDT, R. A.; ONSAGER, T.; SINGER, H. J.; ROSTOKER, G. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements. **Journal of Geophysical Research A: Space Physics**, John Wiley Sons, Ltd, v. 102, n. A7, p. 14141–14148, jan 1997. ISSN 01480227. 29

Baker, D. N.; MCPHERRON, R. L.; CAYTON, T. E.; KLEBESADEL, R. W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 R E . **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. A9, p. 15133, 1990. ISSN 0148-0227. 29

BAKER, W.; MARTYN, D. F. Electric currents in the ionosphere-the conductivity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 246, n. 913, p. 281–294, 1953. 53

Balogh, A.; BOTHMER, V.; CROOKER, N. U.; FORSYTH, R. J.; GLOECKLER, G.; HEWISH, A.; HILCHENBACH, M.; KALLENBACH, R.; KLECKER, B.; LINKER, J. A.; LUCEK, E.; MANN, G.; MARSCH, E.; POSNER, A.; RICHARDSON, I. G.; SCHMIDT, J. M.; SCHOLER, M.; WANG, Y. M.; WIMMER-SCHWEINGRUBER, R. F.; AELLIG, M. R.; BOCHSLER, P.; HEFTI, S.; MIKIĆ, Z. The solar origin of corotating interaction regions and their formation in the inner heliosphere: Report of Working Group 1. **Space Science Reviews**, Springer, v. 89, n. 1-2, p. 141–178, 1999. ISSN 00386308. 27

Barfield, J. N.; MCPHERRON, R. L. Statistical characteristics of storm-associated Pc 5 micropulsations observed at the synchronous equatorial orbit. **Journal of Geophysical Research**, John Wiley Sons, Ltd, v. 77, n. 25, p. 4720–4733, sep 1972. ISSN 2156-2202. 46

Barros, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. **Annales Geophysicae**, v. 36, n. 1, p. 91–100, 2018. ISSN 14320576. 73, 80

Bortnik, J.; THORNE, R. M. The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 69, n. 3, p. 378–386, mar 2007. ISSN 13646826. 31

BRECHT, S.; LYON, J.; FEDDER, J.; HAIN, K. A simulation study of east-west IMF effects on the magnetosphere. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 8, n. 4, p. 397–400, 1981. 22

Cahill, L. J.; WINCKLER, J. R. Periodic magnetopause oscillations observed with the GOES satellites on March 24, 1991. **Journal of Geophysical Research**, John Wiley Sons, Ltd, v. 97, n. A6, p. 8239, jun 1992. ISSN 0148-0227. 31

CAMPBELL, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**. Cambridge University Press, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/cbo9781139165136>>. 47

CAMPBELL, W. H.; MATSUSHITA, S. Sq currents: A comparison of quiet and active year behavior. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, American Geophysical Union (AGU), v. 87, n. A7, p. 5305–5308, jul. 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/ja087ia07p05305>>. 50

CARMO, C.; DENARDINI, C.; FIGUEIREDO, C. A. O.; RESENDE, L. C. A.; PICANÇO, G. A. d. S.; NETO, P. F. B.; NOGUEIRA, P. A. B.; MORO, J.; CHEN, S. S. Evaluation of different methods for calculating the roti index over the brazilian sector. **Radio Science**, Wiley Online Library, v. 56, n. 8, p. e2020RS007140, 2021. 81

CHAPMAN, S.; FERRARO, V. C. A. A new theory of magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 36, n. 2, p. 77, 1931. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/te036i002p00077>>. 50, 51

CHEN, S. S.; DENARDINI, C. M.; RESENDE, L. C. A.; CHAGAS, R. A. J.; MORO, J.; SILVA, R. P. da; CARMO, C. de Sousa do; PICANÇO, G. A. da S. Evaluation of the solar quiet reference field (SQRF) model for space weather applications in the south america magnetic anomaly. **Earth, Planets and Space**, Springer Science and Business Media LLC, v. 73, n. 1, mar. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01382-8>>. 58

COWLING, T. G. The electrical conductivity of an ionised gas in the presence of a magnetic field. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 93, n. 1, p. 90–97, nov. 1932. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/93.1.90>>. 53

CRANMER, S. R. Coronal holes. **Living Reviews in Solar Physics**, Springer, v. 6, n. 1, p. 1–66, 2009. 14

Da Silva, L. A.; SHI, J.; ALVES, L. R.; SIBECK, D.; SOUZA, V. M.; MARCHEZI, J. P.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L. E. A.; AGAPITOV, O.; JAUER, P. R.; ALVES, M. E. S. V.; WANG, C.; LI, H.; LIU, Z.; LAGO, A. D.; ALVES, M. E. S. V.; ROCKENBACH, M. S.; BAKER, D. N.; ZHANG, S. Y.; KANEKAL, S. G. Dynamic Mechanisms Associated With High-Energy Electron Flux Dropout in the Earth's Outer Radiation Belt Under the Influence of a Coronal Mass Ejection Sheath Region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Blackwell Publishing Ltd, v. 126, n. 1, p. 1–30, jan 2021. ISSN 21699402. 30, 33, 34

Da Silva, L. A.; SIBECK, D.; ALVES, L. R.; SOUZA, V. M.; JAUER, P. R.; CLAUDEPIERRE, S. G.; MARCHEZI, J. P.; AGAPITOV, O.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L. E. A.; WANG, C.; JIANKUI, S.; LIU, Z.; GONZALEZ, W.; LAGO, A. D.; ROCKENBACH, M.; PADUA, M. B.; ALVES, M. V.; BARBOSA, M. V. G.; FOK, M. C.; BAKER, D.; KLETZING, C.; KANEKAL, S. G.;

GEORGIU, M. Contribution of ULF Wave Activity to the Global Recovery of the Outer Radiation Belt During the Passage of a High-Speed Solar Wind Stream Observed in September 2014. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 3, p. 1660–1678, 2019. ISSN 21699402. 30, 31

DENARDINI, C. M.; CHEN, S. S.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J.; BILIBIO, A. V.; FAGUNDES, P. R.; GENDE, M. A.; CABRERA, M. A.; BOLZAN, M. J. A.; PADILHA, A. L.; SCHUCH, N. J.; HORMAECHEA, J. L.; ALVES, L. R.; NETO, P. F. B.; NOGUEIRA, P. A. B.; PIKANÇO, G. A. S.; BERTOLLOTTO, T. O. The embrace magnetometer network for south america: Network description and its qualification. **Radio Science**, American Geophysical Union (AGU), v. 53, n. 3, p. 288–302, mar. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2017rs006477>>. 59, 60, 63

DENARDINI, C. M.; DASSO, S.; GONZALEZ-ESPARZA, J. A. Review on space weather in latin america. 1. the beginning from space science research. **Advances in Space Research**, Elsevier BV, v. 58, n. 10, p. 1916–1939, nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.012>>. 57

DUNGEY, J. W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 6, n. 2, p. 47–48, jan. 1961. 21, 39

Duzellier, S. Radiation effects on electronic devices in space. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier Masson, v. 9, n. 1, p. 93–99, jan 2005. ISSN 12709638. 35, 36

Echer, E.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; KOZYRA, J. U. High Speed Stream Properties and Related Geomagnetic Activity During the Whole Heliosphere Interval (WHI): 20 March to 16 April 2008. **Solar Physics**, Springer, v. 274, n. 1-2, p. 303–320, mar 2011. ISSN 00380938. 27

Ecoffet, R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 60, n. 3, p. 1791–1815, 2013. ISSN 00189499. 36

Engebretson, M. J.; PETERSON, W. K.; POSCH, J. L.; KLATT, M. R.; ANDERSON, B. J.; RUSSELL, C. T.; SINGER, H. J.; ARNOLDY, R. L.; FUKUNISHI, H. Observations of two types of Pc 1-2 pulsations in the outer dayside magnetosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, John Wiley Sons, Ltd, v. 107, n. A12, p. SMP 20–1, dec 2002. ISSN 21699402. 43

Farley, D. T. The equatorial E-region and its plasma instabilities: A tutorial. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 4, p. 1509–1520, 2009. ISSN 09927689. 67, 68

FEJER, J. A. Theory of auroral electrojets. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 68, n. 8, p. 2147–2157, abr. 1963. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/jz068i008p02147>>. 50

FORBES, J. M. The equatorial electrojet. **Reviews of Geophysics**, American Geophysical Union (AGU), v. 19, n. 3, p. 469, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/rg019i003p00469>>. 50, 53

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 99, n. A4, p. 5771, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/93ja02867>>. 51, 63

GOSLING, J. T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space. In: _____. **Physics of Magnetic Flux Ropes**. American Geophysical Union (AGU), 1990. p. 343 – 364. ISBN 9781118663868. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GM058p0343>>. 27

GUBBINS, D.; HERRERO-BERVERA, E. **Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism**. [S.l.]: Springer, 2007. 1062 p. (Encyclopedia of Earth Sciences Series). ISBN 9781402039928. 40

Gurnett, D. A.; O'BRIEN, B. J. High-latitude geophysical studies with satellite Injun 3: 5. Very-low-frequency electromagnetic radiation. **Journal of Geophysical Research**, John Wiley Sons, Ltd, v. 69, n. 1, p. 65–89, jan 1964. ISSN 2156-2202. 31

Haldoupis, C. A Tutorial Review on Sporadic E Layers. In: **Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere**. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2011. p. 381–394. 69

HIRONO, M. On the influence of the hall current to the electrical conductivity of the ionosphere. i. **Journal of geomagnetism and geoelectricity**, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences, v. 2, n. 1, p. 1–8, 1950. Disponível em: <<https://doi.org/10.5636/jgg.2.1>>. 53

Horne, R. B. The contribution of wave-particle interactions to electron loss and acceleration in the Earth's radiation belts during geomagnetic storms. **Review of Radio Science: 1999-2002**, IEEE Press, v. 33ne, p. 801–828, 2002. 32

Hundhausen, A. J. The Solar Wind. In: KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. (Ed.). **Introduction to Space Physics**. New York: Cambridge University Press, 1995. cap. 4.4, p. 91–128. 27

Iucci, N.; LEVITIN, A. E.; BELOV, A. V.; EROSHENKO, E. A.; PTITSYNA, N. G.; VILLORESI, G.; CHIZHENKOV, G. V.; DORMAN, L. I.; GROMOVA, L. I.; PARISI, M.; TYASTO, M. I.; YANKE, V. G. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. **Space Weather**, John Wiley Sons, Ltd, v. 3, n. 1, p. n/a–n/a, jan 2005. ISSN 1542-7390. vii, 37

JACOBSEN, K. S. The impact of different sampling rates and calculation time intervals on *roti* values. **Journal of Space Weather and Space Climate**, EDP Sciences, v. 4, p. A33, 2014. 81

KANE, S. Impulsive (flash) phase of solar flares: Hard x-ray, microwave, euv and optical observations. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. **Symposium-International Astronomical Union**. [S.l.], 1974. v. 57, p. 105–141. 9

Kangas, J.; GUGLIELMI, a. V.; POKHOTELOV, O. a. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (a review). **Space Science Reviews**, v. 83, p. 435–512, 1998. ISSN 00386308. 39, 44

Kataoka, R.; MIYOSHI, Y. Flux enhancement of radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. **Space Weather**, John Wiley Sons, Ltd, v. 4, n. 9, sep 2006. ISSN 15427390. 29

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to Space Physics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. ISBN 9780521451048. 31, 42, 56, 63

Krieger, A. S.; TIMOTHY, A. F.; ROELOF, E. C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. **Solar Physics**, Springer, v. 29, n. 2, p. 505–525, apr 1973. ISSN 00380938. 27

KURNOSOVA, L.; KOLOBYANINA, T.; LOGACHEV, V.; RAZORENOV, L.; SIROTKIN, I.; FRADKIN, M. Discovery of radiation anomalies above the south atlantic at heights of 310–340 km. **Planetary and Space Science**, Elsevier BV,

v. 9, n. 8, p. 513–516, ago. 1962. Disponível em:

<[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90057-0)>. 50

Kuwashima, M.; FUJITA, S. Characteristics of the Magnetohydrodynamic Waves Observed in the Earth's Magnetosphere and on the Ground. In: . [S.l.]: American Geophysical Union (AGU), 2013. p. 197–219. 45

LANGEL, R.; OUSLEY, G.; BERBERT, J.; MURPHY, J.; SETTLE, M. The MAGSAT mission. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 9, n. 4, p. 243–245, abr. 1982. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1029/g1009i004p00243>>. 47

LEBOEUF, J.; TAJIMA, T.; KENNEL, C.; DAWSON, J. Global simulations of the three-dimensional magnetosphere. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 8, n. 3, p. 257–260, 1981. 22

LYON, J.; FEDDER, J.; HUBA, J. The effect of different resistivity models on magnetotail dynamics. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 91, n. A7, p. 8057–8064, 1986. 22

MANN, I. R.; WRIGHT, A. N.; MILLS, K. J.; NAKARIAKOV, V. M. Excitation of magnetospheric waveguide modes by magnetosheath flows. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, John Wiley Sons, Ltd, v. 104, n. A1, p. 333–353, jan 1999. ISSN 2156-2202. 31

MATHEWS, J. D. **Sporadic E: Current views and recent progress**. [S.l.]: Pergamon, mar 1998. 413–435 p. 69

MATSUSHITA, S. Solar quiet and lunar daily variation fields. In: **International Geophysics**. Elsevier, 1967. p. 301–424. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-480301-5.50013-6>>. 47

MEDEIROS, C.; SOUZA, V. M.; VIEIRA, L. E. A.; SIBECK, D. G.; HALFORD, A. J.; KANG, S.-B.; SILVA, L. A. D.; ALVES, L. R.; MARCHEZI, J. P.; DALLAQUA, R. S.; JAUER, P. R.; ROCKENBACH, M.; MENDES, O.; ALVES, M. V.; LAGO, A. D.; FOK, M.-C.; KANEKAL, S. G.; BAKER, D. N.;

KLETZING, C. A. On the Contribution of EMIC Waves to the Reconfiguration of the Relativistic Electron Butterfly Pitch Angle Distribution Shape on 2014 September 12—A Case Study. **The Astrophysical Journal**, v. 872, n. 1, p. 36, feb 2019. ISSN 1538-4357. 32

- MOLCHANOV, O.; SCHEKOTOV, A.; FEDOROV, E.; BELYAEV, G.; GORDEEV, E. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka. **Natural Hazards and Earth System Science**, European Geosciences Union, v. 3, n. 3-4, p. 203–209, 2003. ISSN 15618633. 39
- NESS, N. F. The earth's magnetic tail. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 70, n. 13, p. 2989–3005, jul. 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/jz070i013p02989>>. 50
- NISHIDA, A. Geomagnetic Field Under the Solar Wind. In: . [S.l.: s.n.], 1978. p. 1–37. 45
- NORTHROP, T. G.; TELLER, E. Stability of the adiabatic motion of charged particles in the earth's field. **Physical Review**, American Physical Society, v. 117, n. 1, p. 215–225, jan 1960. ISSN 0031899X. 30
- OGINO, T. A three-dimensional mhd simulation of the interaction of the solar wind with the earth's magnetosphere: The generation of field-aligned currents. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 91, n. A6, p. 6791–6806, 1986. 22
- OLSEN, N.; STOLLE, C. Satellite geomagnetism. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, Annual Reviews, v. 40, n. 1, p. 441–465, maio 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105540>>. 47, 48
- Padilha, L. A.; Alves, M. V.; Trivedi, N. B.; KITAMURA, T.-I.; SHINOHARA, M. Pi1B pulsations at the South American equatorial zone during the 29 October 1994 magnetic storm. In: . European Association of Geoscientists Engineers, 2020. p. cp-168-00180. ISSN 2214-4609. Disponível em: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609-pdb.168.arq_318>. 46
- PAULIKAS, G. A.; BLAKE, J. B. Effects of the Solar Wind on Magnetospheric Dynamics: Energetic Electrons at the Synchronous Orbit. In: . [S.l.]: American Geophysical Union (AGU), 2013. p. 180–202. 29
- Pedatella, N. M.; FORBES, J. M.; RICHMOND, A. D. Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (Sq) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, John Wiley Sons, Ltd, v. 116, n. 4, p. 4317, apr 2011. ISSN 21699402. 67

PILIPENKO, V. A. ULF waves on the ground and in space. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 52, n. 12, p. 1193–1209, dec 1990. ISSN 00219169. 39

PIMENTA, A. A. Estudos da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical. **Sao José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, 2002. vi, 75

PINTO, O.; GONZALEZ, W.; PINTO, I.; GONZALEZ, A.; MENDES, O. The south atlantic magnetic anomaly: three decades of research. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, Elsevier BV, v. 54, n. 9, p. 1129–1134, set. 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90137-a](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90137-a)>. 50

Ponomarev, E. A.; SEDYKH, P. A.; URBANOVICH, V. D. Bow shock as a power source for magnetospheric processes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 68, n. 6, p. 685–690, mar 2006. ISSN 13646826. 29

POTAPOV, A. S. ULF wave activity in high-speed streams of the solar wind: Impact on the magnetosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, John Wiley Sons, Ltd, v. 118, n. 10, p. 6465–6477, oct 2013. ISSN 21699402. 29, 31

POTEMRA, T. A. Birkeland currents in the earth's magnetosphere. In: **Plasma and the Universe**. Springer Netherlands, 1988. p. 155–169. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3021-6_12>. 50

POWELL, K. G.; ROE, P. L.; LINDE, T. J.; GOMBOSI, T. I.; ZEEUW, D. L. D. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, v. 154, n. 2, p. 284–309, 1999. 22

RAEDER, J.; BERCHEM, J.; ASHOUR-ABDALLA, M.; CHANG, T.; JASPERSE, J. The importance of small scale processes in global mhd simulations: Some numerical experiments. **The physics of space plasmas**, MIT Cent. for Theoret. Geo/Cosmo Plasma Phys. Cambridge, Mass., v. 14, p. 403, 1996. 22

REDDY, C. The equatorial electrojet: a review of the ionospheric and geomagnetic aspects. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, Elsevier BV, v. 43, n. 5-6, p. 557–571, maio 1981. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90118-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90118-5)>. 50

REDDY, C. A. The equatorial electrojet. **Pure and Applied Geophysics PAGEOPH**, Springer Science and Business Media LLC, v. 131, n. 3, p. 485–508, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/bf00876841>>. 50

RICHMOND, A. D.; THAYER, J. P. Ionospheric electrodynamics: A tutorial. In: **Magnetospheric Current Systems**. American Geophysical Union, 2000. p. 131–146. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/gm118p0131>>. 52

RIPKA, P. Review of fluxgate sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier BV, v. 33, n. 3, p. 129–141, jun. 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80159-z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80159-z)>. 57

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. ISSN 00219169. 54, 62, 67

ROEDERER, J. G. Particle Drifts and the First Adiabatic Invariant. In: . [S.l.: s.n.], 1970. p. 1–33. 30

ROSTOKER, G. The auroral electrojets. In: **Dynamics of the Magnetosphere**. Springer Netherlands, 1979. p. 201–211. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-9519-2_10>. 50

SAITO, T. Geomagnetic pulsations. **Space Science Reviews**, v. 10, n. 3, p. 319–412, dec 1969. ISSN 00386308. 39, 42, 43, 44

Saito, T. Resonance model of Pc3 in subtropical regions. In: Cardús, J. O. (Ed.). **Scientific contributions in commemoration of ebro observatory's 75th anniversary**. São Paulo: [s.n.], 1983. p. 175–180. 46

SAMSON, J. C. **Geomagnetic Pulsations and Plasma Waves in the Earth's Magnetosphere**. London, UK: Academic Press, 1991. 481–592 p. ISBN 0123786746. 40, 41, 42, 43, 44

SHABANSKY, V. P. Some processes in the magnetosphere. **Space Science Reviews**, Springer, v. 12, n. 3, p. 299–418, jul 1971. ISSN 00386308. 30

Sheeley, N. R.; HARVEY, J. W.; FELDMAN, W. C. Coronal holes, solar wind streams, and recurrent geomagnetic disturbances: 1973-1976. **Solar Physics**, Springer, v. 49, n. 2, p. 271–278, aug 1976. ISSN 00380938. 27

SPEISER, T. W.; NESS, N. F. The neutral sheet in the geomagnetic tail: Its motion, equivalent currents, and field line connection through it. **Journal of**

Geophysical Research, American Geophysical Union (AGU), v. 72, n. 1, p. 131, 1967. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/jz072i001p00131>>. 50

STIX, M. **The sun: an introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. iii, 4

Takahashi, H.; WRASSE, C. M.; OTSUKA, Y.; IVO, A.; GOMES, V.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; DENARDINI, C. M.; SANT'ANNA, N.; SHIOKAWA, K. Plasma bubble monitoring by TEC map and 630nm airglow image. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Pergamon, v. 130-131, p. 151–158, aug 2015. ISSN 13646826. 78, 79

THORNE, R. M. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. **Geophysical Research Letters**, John Wiley Sons, Ltd, v. 37, n. 22, p. 22107, nov 2010. ISSN 00948276. 31, 32

TÓTH, G.; HOLST, B. Van der; SOKOLOV, I. V.; ZEEUW, D. L. D.; GOMBOSI, T. I.; FANG, F.; MANCHESTER, W. B.; MENG, X.; NAJIB, D.; POWELL, K. G. et al. Adaptive numerical algorithms in space weather modeling. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, v. 231, n. 3, p. 870–903, 2012. 21, 22, 23, 24, 25

TRIVEDI, N.; PATHAN, B.; SCHUCH, N. J.; BARRETO, M.; DUTRA, L. Geomagnetic phenomena in the south atlantic anomaly region in brazil. **Advances in Space Research**, Elsevier BV, v. 36, n. 10, p. 2021–2024, jan. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.09.020>>. 50

Trivedi, N. B.; ARORA, B. R.; PADILHA, A. L.; COSTA, J. M. D.; DUTRA, S. L. G.; CHAMALAUN, F. H.; RIGOTI, A. Global Pc5 geomagnetic pulsations of March 24, 1991, as observed along the American sector. **Geophysical Research Letters**, John Wiley Sons, Ltd, v. 24, n. 13, p. 1683–1686, jul 1997. ISSN 00948276. 46

Tsurutani, B. T.; GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; GUARNIERI, F. L.; GOPALSWAMY, N.; GRANDE, M.; KAMIDE, Y.; KASAHARA, Y.; LU, G.; MANN, I.; MCPHERRON, R.; SORAAS, F.; VASYLIUNAS, V. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. John Wiley Sons, Ltd, v. 111, n. 7, jul 2006. ISSN 21699402. 27

TUVE, M. A.; BREIT, G. Note on a radio method of estimating the height of the conducting layer. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical

Union (AGU), v. 30, n. 1, p. 15, 1925. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1029/te030i001p00015>>. 51

UKHORSKIY, A. Y.; SITNOV, M. I. Dynamics of radiation belt particles. In:
The Van Allen Probes mission. [S.l.]: Springer, Boston, MA, 2014. v.
9781489974, p. 545–578. ISBN 9781489974334. 30

VILLANTE, U. Ultra low frequency waves in the magnetosphere. In: **Handbook of Solar-Terrestrial Environment**. [S.l.]: Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p.
397–422. ISBN 9783540463146. 39, 40, 41, 42

WOODROFFE, J. R. **Ultra-low frequency waves, magnetic pulsations, and the ionospheric Alfvén resonator**. Tese (Phd Thesis) — University of Minnesota, 2010. 43

WU, C.; WALKER, R.; DAWSON, J. A three dimensional mhd model of the earth's magnetosphere. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 8, n. 5, p. 523–526, 1981. 22

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**, Springer Science and Business Media LLC, v. 206, n. 1-4, p. 299–405, set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>>. 47, 50

Yumoto, K. External and internal sources of low-frequency MHD waves in the magnetosphere - A review. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 40, p. 293–311, 1988. 45, 46

ZANANDREA, A. **Estudos de micropulsacoes geomagneticas PC3-5 em latitudes muito baixas, no Brasil**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, 1998. 42

ZANANDREA, A.; COSTA, J. M. D.; DUTRA, S. L. G.; TRIVEDI, N. B.; KITAMURA, T.; YUMOTO, K.; TACHIARA, H.; SHINOHARA, M.; SAOTOME, O. Pc3-4 geomagnetic pulsations at very low latitude in Brazil. **Planetary and Space Science**, v. 52, n. 13, p. 1209–1215, 2004. ISSN 00320633. 45

ANEXO A - ATIVIDADE - Sol

A.1 Resumo

O objetivo desta prática tem como finalidade de instruir e habilitar o usuário com relação a utilização de ferramentas virtuais e as principais páginas da internet para obtenção dos produtos das observações e análises de fenômenos solares. Serão explorados durante a prática alguns dos principais fenômenos transientes da atmosfera solar, tais como solar flares, ejeções de massa coronal, buracos coronais, manchas solares, vento solar entre outros. Também será explorado o modelo de previsão baseado na física da heliofera chamado Wang-Sheeley-Argé (WSA) Enlil. No decorrer da prática serão abordados as características gerais dos telescópios utilizados na parte prática como também a utilização dos produtos de observação dos mesmos.

A.2 Solar Monitor (<https://solarmonitor.org/>) e SpaceWeather (<https://www.spaceweather.com/>)

Nestes websites serão iniciada a pesquisa de alguns fenômenos atmosférico solares, tais como:

- solar flares,
- regiões ativas,
- buracos coronais

Após acesso desta página da internet será orientado a busca dos fenômenos solares do evento de interesse a partir da data de ocorrência. A parte relacionada a solar flares serão obtidos do telescópio Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Será tratado o conceito de raio-X mole e o contexto do uso da observação nesta faixa. Nesta página serão mostradas as regiões ativas e a disposição delas no disco solar e suas classificações. A identificação do buraco coronal neste website utiliza o Coronal Hole Identification via Multi-thermal Emission Recognition Algorithm (CHIMERA), noções básicas do funcionamento deste algoritmo serão tratadas.

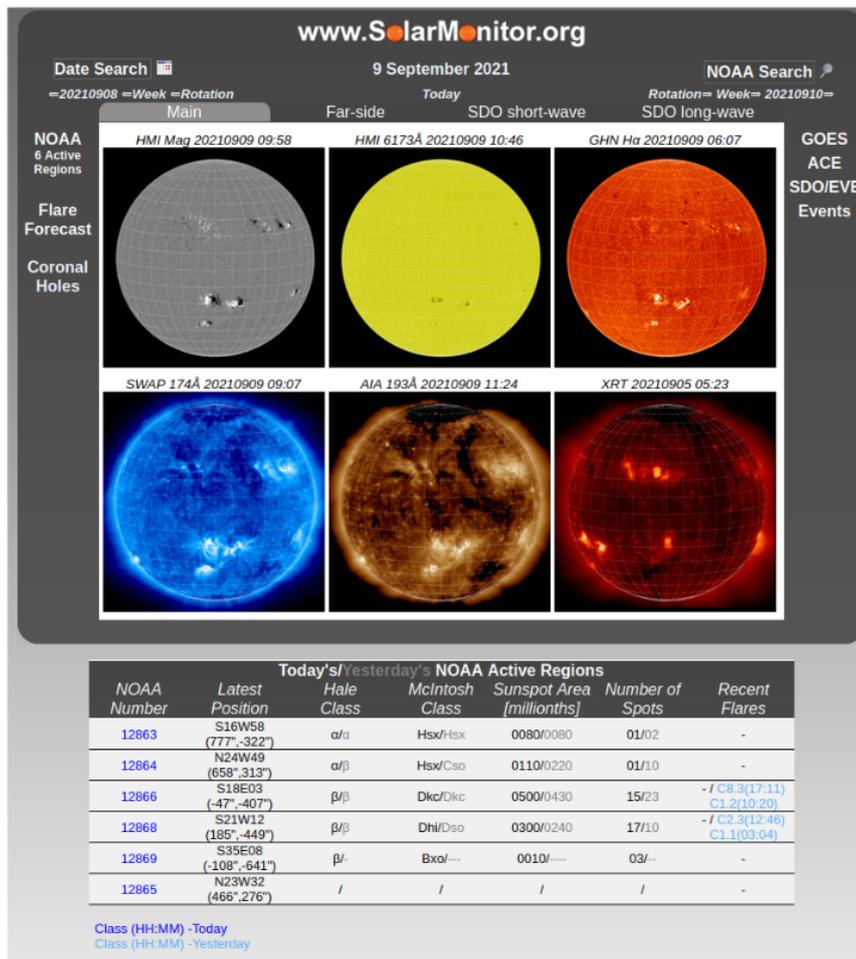


Figura A.1 - Solar Monitor

A.3 <http://sprg.ssl.berkeley.edu/tohban/browser/>

O objetivo é aprofundar um pouco mais sobre as solar flares. Este website permite analisar a solar flare em outros comprimentos de onda. A faixa de raios-X moles é coberta pelo telescópio GOES. A faixa entre raios X moles e raios X duros é observada pelo o telescópio fermi. E faixa de micro ondas nesta página disponibiliza a observação do Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA), que cobre de 1 a 18 GHz. Essas emissões fazem parte do amplo espectro produzido numa explosão solar, que se originam de mecanismos de emissão distintos sendo que os temporais de micro ondas e raios X duros, durante as explosões solares, apresentavam bastante similaridades. Devido à esta similaridade acredita-se que ambas faixas de energia representem uma mesma população de elétrons acelerados durante o evento.

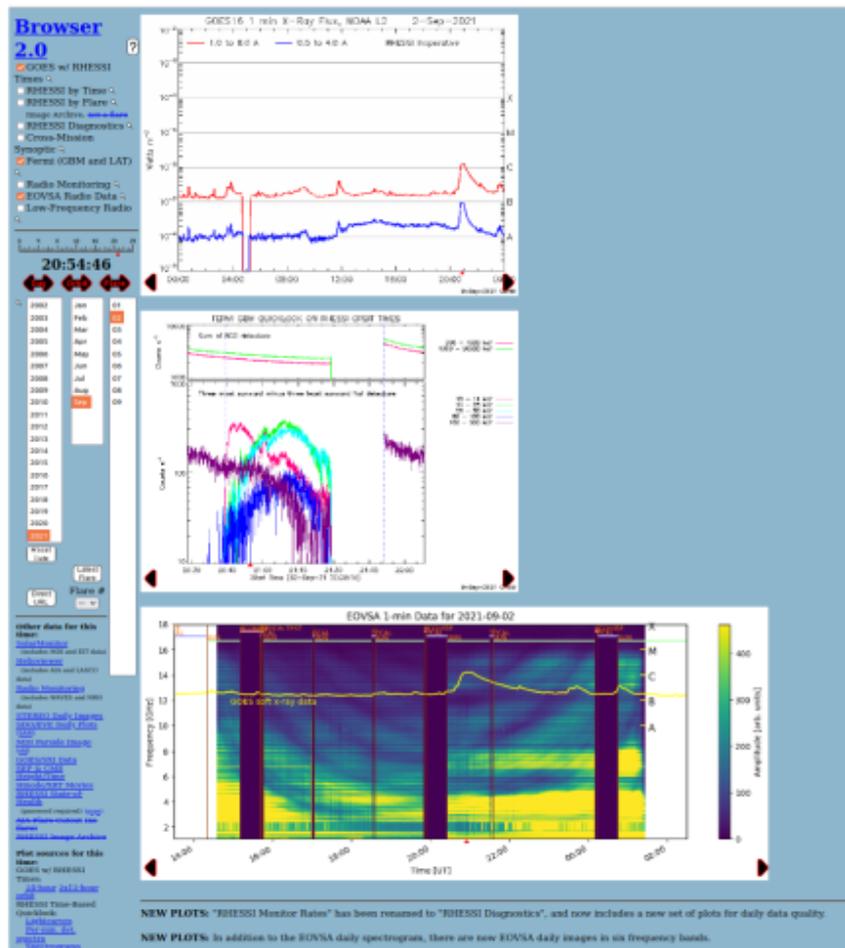


Figura A.2 - berkeley.edu

A.4 <https://www.lmsal.com/hek/isolsearch/isolsearch.html>

Os eventos solares investigados aqui serão:

- Ejeções de massa coronal
- Buracos coronais

As ejeções de massa coronal serão direcionadas para a seguinte página <https://wwwbis.sidc.be/cactus/>. O cactus refere-se a um pacote de software para rastreamento da ejeções de massa auxiliado por computador (Computer Aided CME Tracking). Esse pacote de software detecta de forma autônoma ejeções de massa coronal a partir da sequências de imagens do LASCO. Na página do

cactus uma lista de ejeções de massa coronal é produzida nos últimos 6-7 dias contendo as seguintes informações:

- data, hora UT de inicio
- duração da liberação da ejeção em horas
- angulo principal de ejeção (sentido anti-horário) a partir do Norte
- largura angular
- velocidade media
- variação da velocidade na extensão da ejeção
- velocidade mais baixa detectada dentro da ejeção de massa coronal
- velocidade mais alta detectada dentro da ejeção de massa coronal
- indicando potencial halo / halo parcial da ejeção de massa coronal

Os buracos coronais nesta página utiliza o Spatial Possibilistic Clustering Algorithm (SPoCA). Noções básicas sobre o funcionamento deste algoritmo serão mostradas.

Os detalhes da utilização da página serão explorados durante o curso.

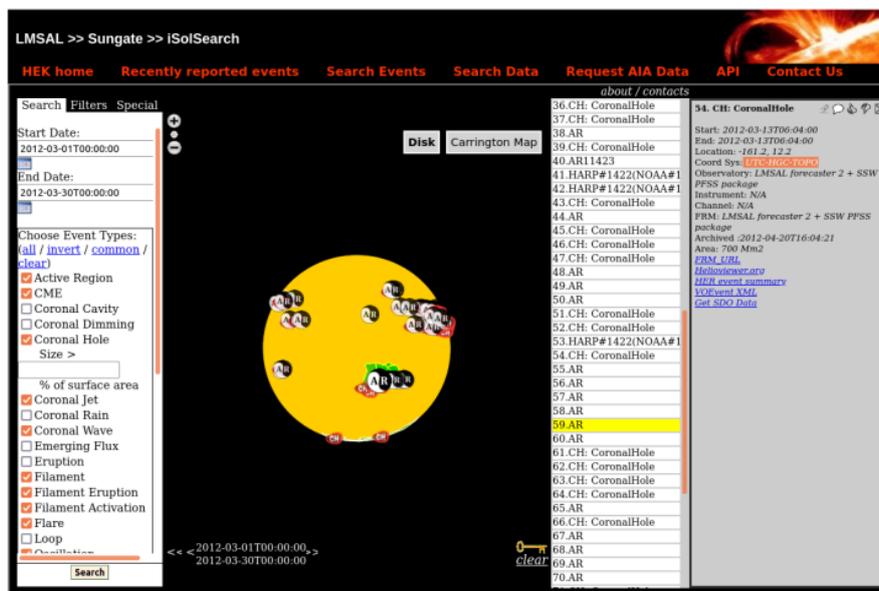


Figura A.3 - Heliophysics Events Knowledgebase

A.5 [https:](https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction)

[//www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction](https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction)

A página mostra principais conceitos e funcionamento do WSA-Enlil. Serão extraídos as previsões de algumas ejeções de massa coronal que foram analisadas nesta página como também a simulação do vento solar.

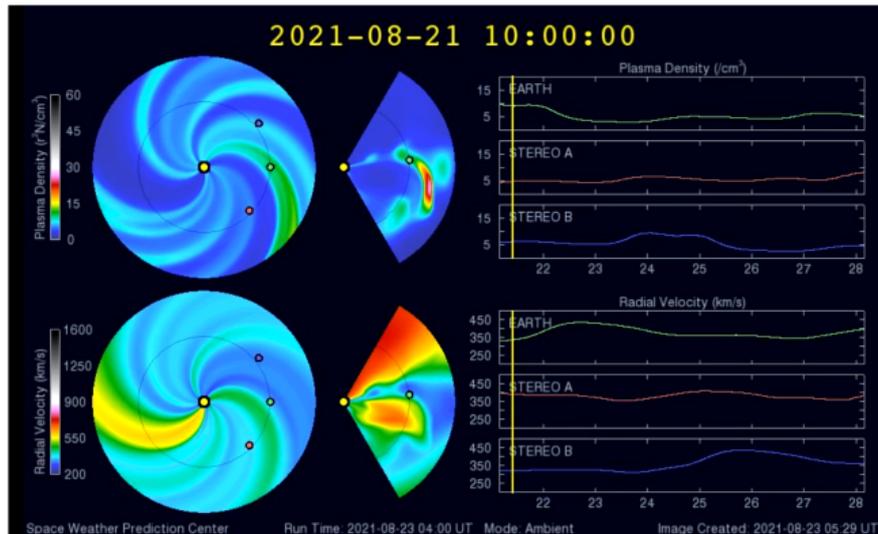


Figura A.4 - Wang-Sheeley-Arge (WSA) Enlil

A.6 <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEScoreboard/>

O website refere-se ao CME Scoreboard que é uma atividade de validação de métodos de previsão baseada em pesquisa o qual fornece uma localização central para a comunidade enviar sua previsão em tempo real, visualizar rapidamente todas as previsões de uma vez em tempo real e por fim comparar os métodos de previsão quando o evento chegar a Terra. Neste website será somente focado nos resultados produzidos pelo WSA-Enlil. Serão apresentados as informações relevantes com relação as ejeções de massa coronal tais como data e horário de ocorrência e as estimativas de chegada na Terra. E também os casos em que já foi registrado data e hora de detecção na Terra ou não detecção.

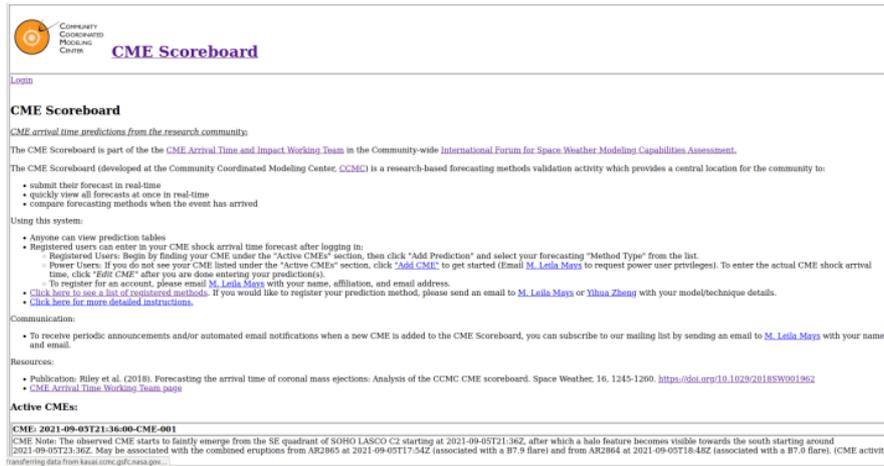


Figura A.5 - CME Scoreboard

A.7 TELESCÓPIOS

Nesta seção serão tratados as características gerais dos telescópios que foram abordados durante a parte pratica do curso.

A.8 Solar Dynamics Observatory (SDO)

O SDO foi lançado em 11 de fevereiro de 2010 para estudar a dinâmica da atmosfera solar e o interior do mesmo. Ele é composto por três instrumentos: o Atmospheric Imaging Assembly (AIA), o Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) e o Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE).

O AIA fornece imagens da coroa e da região de transição até 0.5 do raio solar, possui resolução espacial de 1,5 segundo de arco e resolução temporal de 12 segundos. Consiste de 4 telescópios que fornecem sete imagens no ultravioleta distante centradas nas seguintes linhas: Fe XVIII (94 Å), Fe VIII e XXI (131 Å), Fe IX (171Å), Fe XII e XXIV (193 Å), Fe XIV (211 Å), He II (304 Å) e Fe XVI (335 Å), também C IV (~ 1600 Å) e próximo ao contínuo (1700 Å).

O HMI estuda as oscilações e o campo magnético da superfície solar. Este instrumento explora o efeito Zeeman que permite determinar a intensidade da componente da linha de visada do campo magnético por medidas das linhas espectrais da onda circularmente polarizada. Observa todo o disco solar em 6173 Å, linha de absorção do Fe1, com resolução espacial de 1 segundo de arco. Fornece quatro tipos de informações: Dopplergrama (mapa da velocidade do

plasma da superfície solar), contínuo (fotografia da atmosfera solar em amplo comprimento de onda do visível, magnetogramas vetoriais e magnetograma ao longo da linha de visada (mapas do campo magnético fotosférico). São feitas duas medidas independentes da componente da linha de visada do campo magnético fotosférico: uma a cada 45 segundos e a outra a cada 720 segundos.

A.9 Fermi Gamma-Ray

O telescópio espacial de raios gama Fermi, lançado em 11 de junho de 2008, tem como um dos objetivos determinar o comportamento de explosões em altas energias, isto é, raios gama. O telescópio é formado por dois instrumentos, o Large Area Telescope (LAT) e o Gamma Ray Burst Monitor (GBM). O LAT é o principal instrumento do Fermi e observa raios gama acima de 20 MeV. O GBM tem como objetivo primário estender o intervalo de energia para limites inferiores aos que o LAT observa e, como objetivo secundário, fornecer quase em tempo real a localização das explosões, o que permite realinhar o Fermi para obter observações com o LAT. Neste trabalho, utilizou-se o GBM que é formado por 12 detectores que contêm cintiladores feitos de iodeto de sódio ativado com tálio e dois detectores que contêm germanato de bismuto. Os detectores de iodeto de sódio detectam espectro de baixa energia de 8 keV a 1 MeV e são usados para determinar a direção das explosões em raios gama. Já os de germanato de bismuto observam em um intervalo de 200 keV a aproximadamente 40 MeV e estão posicionados em lados opostos do Fermi. As posições dos detectores de iodeto de sódio e germanato de bismuto estão ilustradas na Figura A.6.

Os dados acumulados são convertidos em uma resolução de 128 canais (CSPEC) e também em uma resolução de 8 canais (CTIME). O intervalo de acúmulo do CTIME é a partir de 64 a 1024 ms, em múltiplos de 64 ms. Para o CSPEC, o intervalo é a partir de 1,024 a 32,768 segundos, em múltiplos de 1,024 segundos

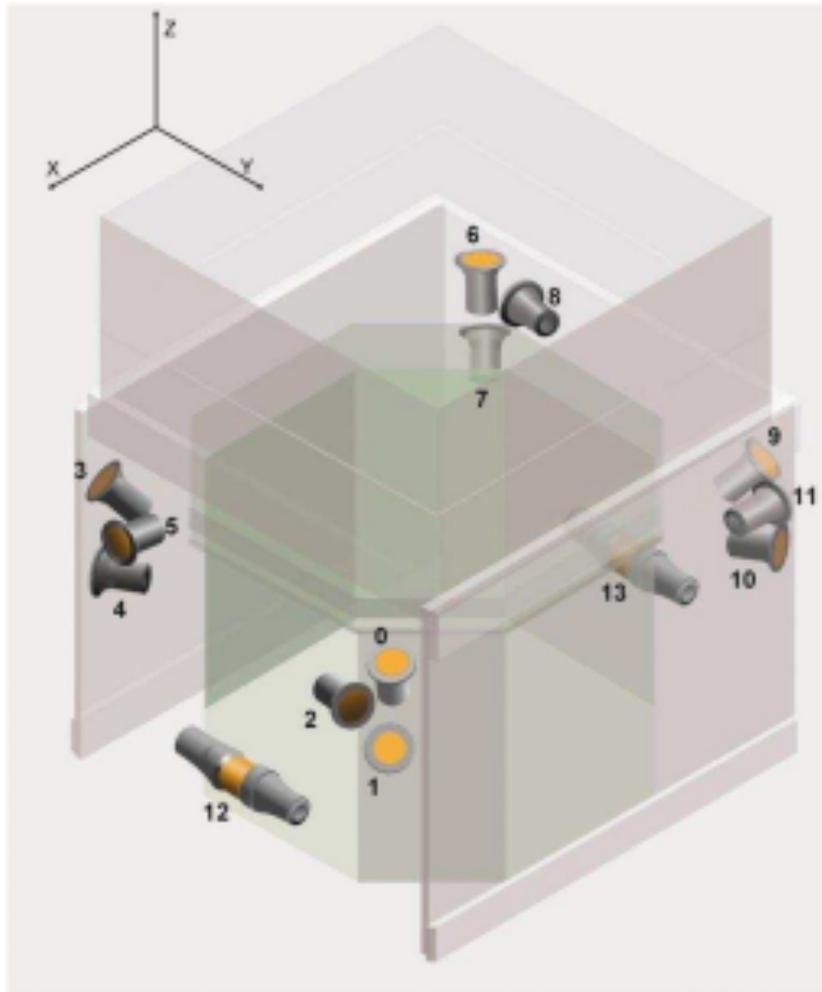


Figura A.6 - Disposição dos detectores de iodeto de sódio e do germanato de bismuto do satélite Fermi.

A.10 STEREO (Solar TERrestrial RELations Observa- tory)

A missão, lançada em outubro de 2006, é formada por dois observatórios quase idênticos o STEREO A e o STEREO B. Cada um deles possuem quatro instrumentos nomeados como SECCHI, SWAVES, IMPACT, e PLASTIC.

O primeiro instrumento é o SECCHI - (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation) formado por quatro instrumentos. O ultravioleta extremo, dois coronógrafos que observa na faixa do visível e um imageador heliosférico. O conjunto desses instrumentos analisam a evolução em três dimensões das ejeções de massa coronal desde o surgimento na superfície do Sol,

deslocando-se na coroa e percorrendo o meio interplanetário.

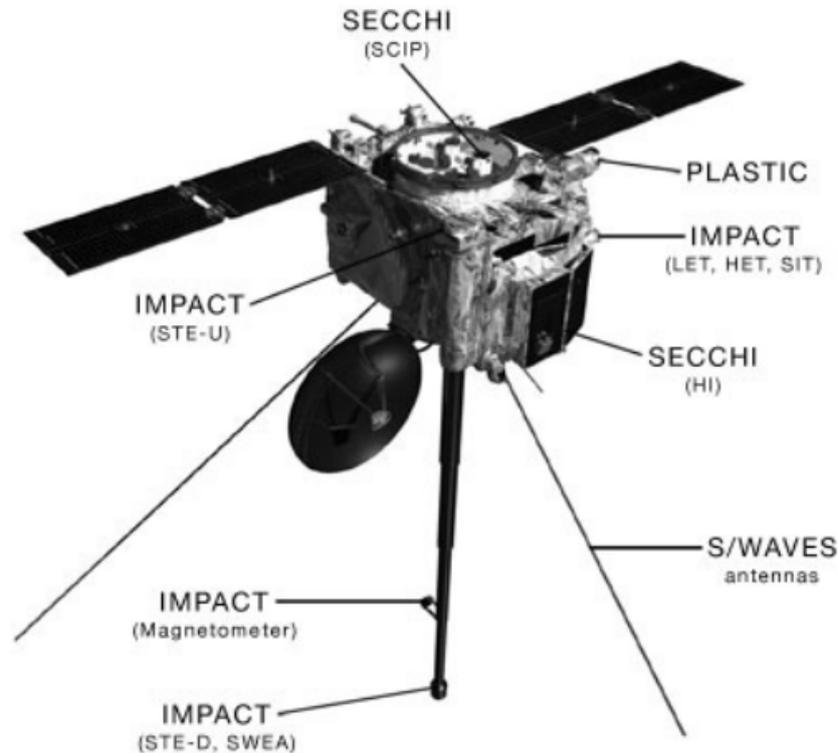


Figura A.7 - Instrumentos que equipam o STEREO

Outro instrumento é SWAVES - STEREO/WAVES que tem como objetivo rastrear a geração e evolução de distúrbios na faixa rádio que viajam do Sol até a órbita da Terra.

O IMPACTO (In-situ Measurements of Particles and CME Transients) analisa a distribuição em três e fornece as características do plasma das partículas energéticas solares e do campo magnético.

E por fim, o PLASTIC (PLAsma and SupraThermal Ion Composition) que fornece características de plasma de prótons, partículas alfa e íons pesados.

LASCO (Large Angle and Spectrometric COrona- graph)

O LASCO é um dos vários instrumentos que integram o SOHO (SOLar Heliospheric Observatory) o qual foi lançado em 02 de dezembro de 1995. O telescópio é

formado por um conjunto de três coronógrafos (C1, C2 e C3) que registram imagens no visível da coroa solar a partir de 1,1 até 32 raios solares. O coronógrafo C1 está desativado desde 1998.

Os coronógrafos ocultam as seguintes distancias na coroa solar:

- C1 de 1,1 a 3,0 raios solares,
- C2 de 2,0 a 6,0 raios solares,
- C3 de 3,7 a 32 raios solares



Figura A.8 - Imagem do coronógrafo C3 do LASCO

A.11 Glossário

- Solar flare: As explosões solares são fenômenos que ocorrem na atmosfera do Sol, caracterizadas por uma grande liberação de energia que aquece o

plasma na região onde acontece esse evento, e acelera partículas até altas energias produzindo radiação eletromagnética observada em todo o espectro.

- Ejeção de massa coronal:- Uma erupção na atmosfera solar externa que envia bilhões de toneladas de nuvens de plasma magnetizadas para o espaço interplanetário. Ao viajar em altas velocidades, essas ejeções criam choques no vento solar. A interceptação da Terra de uma ejeção de massa coronal é frequentemente seguida por uma tempestade geo magnética.
- Buraco coronal: vastas regiões na parte superior da atmosfera do Sol que parecem escuras em comparação com as áreas circundantes quando observadas em EUV e comprimentos de onda de raios-X.
- Coronógrafo: Um telescópio, ou anexo a um telescópio, que bloqueia a luz de uma estrela (Sol) dentro do campo de visão do instrumento para que as regiões ao redor da estrela (Sol), particularmente a atmosfera ou a coroa solar, possam ser observadas.
- MHD: Magnetohidrodinâmica é a teoria que descreve a física dos fluidos dos condutores, incluindo plasmas. Inclui a teoria dos fluidos (“hidrodinâmica”) e eletricidade e magnetismo (“Magneto”).
- EMC de halo: Ejeções de massa coronal que surgem contornando o disco ocultador do coronógrafo. A ejeção pode originar-se da frente ou de trás do Sol e, portanto, está se movendo em direção ou para longe do observador.
- Vento solar: Um plasma magnetizado altamente ionizado que flui radialmente para fora da coroa solar em velocidade supersônica.

ANEXO B - ATIVIDADE - Obtenção de dados do Meio Interplanetário – Satélite ACE.

B.1 Objetivo

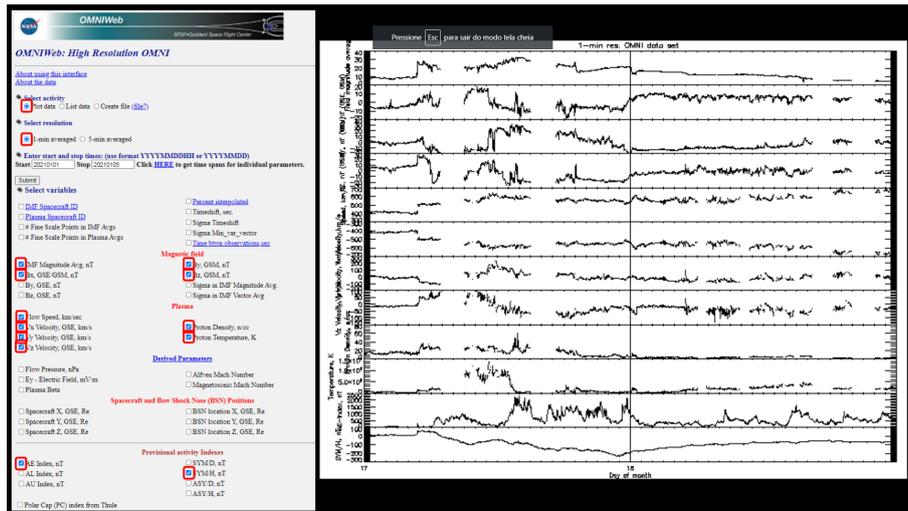
Esta atividade tem por objetivo obter os dados do meio interplanetário que servirão de entrada na simulação Global MHD 3D de dois eventos interplanetários modelados durante os períodos de Março de 2015 e Maio de 2017. A partir dos gráficos de ambos os eventos, identificar as estruturas interplanetárias responsáveis pelas variações na magnetosfera terrestre. Link útil para visualizar, com objetivo de identificar a estrutura interplanetária; e obter as planilhas de dados para serem utilizadas como entrada no Modelo MHD.

EMBRACE: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>

OMNIWEB: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

The image displays two side-by-side screenshots of the OMNIWeb website. The left screenshot is titled 'OMNIWeb Plus' and shows a navigation menu on the left with a red arrow pointing to the 'ACE' link under the 'Data via FTPBrowser' section. The right screenshot is titled 'OMNIWeb' and shows a main content area with a red arrow pointing to the 'Browse and Retrieve OMNI Data' link and a blue arrow pointing to the 'Browse and Retrieve New OMNI Data' link. Both screenshots include the NASA logo and the text 'GODDARD SPACE FLIGHT CENTER Space Physics Data Facility'.

Seguir as setas vermelhas para obter os perfis temporais dos parâmetros do plasma do vento solar. A seta azul serve para obter as planilhas de dados para esses parâmetros, para serem utilizados como entrada no Modelo MHD, conforme a próxima atividade descreve.



Com base nos perfis temporais e nas características médias das estruturas interplanetárias é possível identificar uma ICME, com choque, bainha e nuvem magnética para o evento de Saint Patriks day.

Seguir os mesmos passos para a obtenção dos perfis temporais para o período entre 27 a 29 de maio de 2017.

ANEXO C - ATIVIDADE - Simulação MHD3D da interação do vento solar com a Magnetosfera Terrestre.

C.1 Objetivo

Esta atividade tem por objetivo fazer uso da simulação Global MHD 3D de dois eventos interplanetários modelados durante os períodos de Março de 2015 e Maio de 2017. A partir das imagens e gráficos de ambos os eventos avaliar os impactos na magnetosfera global e interna e os procedimentos a ser tomando caso o sistema tecnológico/satélite encontra-se em região de alto risco devido à compressão da magnetosfera. Link útil

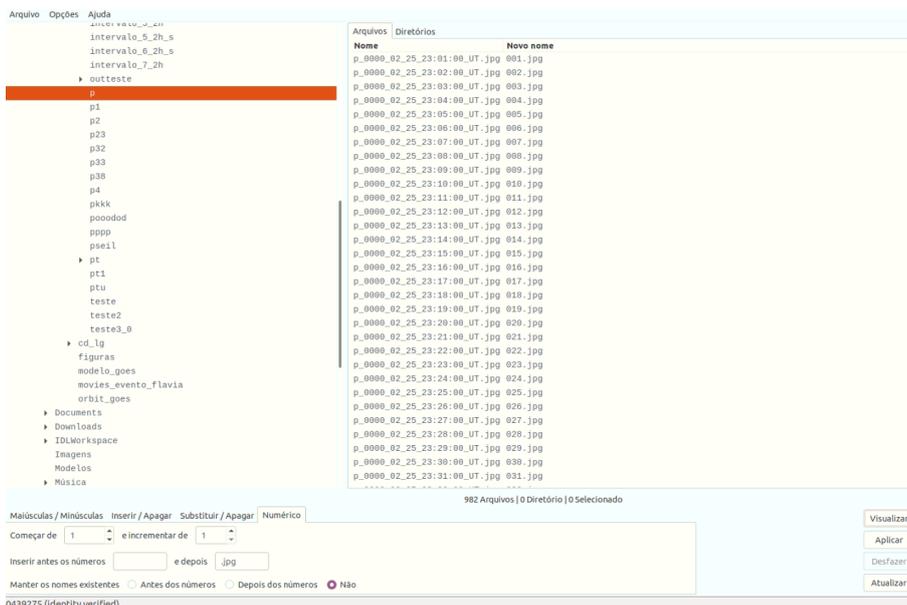
EMBRACE: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>

Período modelado para realizar a análise: Março de 2015 e Maio de 2017

C.2 Procedimento

Os passos para atingir os objetivos da atividade são os seguintes:

- a) Executar o software GPrename. O uso deste software tem por objetivo transformar as figuras em sequenciais começando em: 0001 0002 0003 etc.. Para podermos utilizar com o comando
`ffmpeg %04d.jpg -filter:v fps=10 movie evento.mp4.`



- b) Através do GPrenome abrir a pasta `figuras_simulação` clicando em cima da mesma.
- c) Neste passo clique no campo “Numérico”, vá para a segunda linha aonde este escrito “inserir antes os números”, na caixa a direita desta asserção deixa-se em branco.
- d) “Continuando na mesma linha aonde este escrito “e depois”, devemos colocar “.jpg”, como indicado na figura 1.
- e) Neste passo clicamos em visualizar para podemos ver se o procedimento e numeração teve êxito, se sim, ele vai aparecer ao lado da figura original como ilustrado na figura acima 001.jp....se tudo estiver ok clique em Aplicar. 6. Tudo certo entramos na pasta `/figuras_simulação` e executamos o comando acima
- ```
ffmpeg -i \04d.jpg -filter:v fps=10 movie_evento.mp4,
```
- f) Com o movie gerado podemos utiliza-lo para visualizar e compara a posição da magnetopausa modelada de forma autoconsistente com a posição fornecida no site do EMBRACE.
- g) Acessar o site do Embrace e localizar o intervalo nos dados do vento solar que corresponde ao período modelado para podermos checar o que acontece quando o Bz esta puramente sul, na modelagem, ou seja, se existe uma resposta nos parâmetros de plasma coletados pelo modelo na orbita geossíncrona.
- h) Utilizar o software matlab e executar o script “MaMi.m”, para podermos avaliar a posição máxima e mínima que a magnetopausa subsolar esteve durante todo o evento, e discutir quais as implicações caso a magnetopausa estivesse em  $R=6$  ou próximo, no caso do satélite GOES qual seria o procedimento a ser tomando?
- i) Localizar, visualmente a frente de choque e a magnetopausa durante a máxima compressão, pode-se utilizar o movie para realizar esta etapa, visto que no movie existem 3 gráficos. O primeiro é um mapa de cores da pressão térmica, o segundo é o perfil da pressão térmica extraído virtualmente na orbita geossíncrona e o último representa a posição da magnetopausa durante todo o evento.
- j) Localizar utilizando o movie qual a região que corresponde a parte noturna da magnetosfera, ou seja a cauda magnética.

### C.3 Conclusão

Esta atividade tem por objetivo, apresentar a magnetosfera global terrestre recriada a partir dos primeiros princípios físicos, matemáticos e numéricos através da modelagem MHD3D Fornecendo um meio de solidificação do conhecimento e correlação do observado com a realidade, por exemplo, identificar as estruturas de uma magnetosfera: frente de choque, magnetopausa, cúspides polares cauda magnética. Tem por objetivo também treinar a identificar a partir de gráficos e vídeos de simulação a rápida visualização de períodos que podem trazer riscos ao sistema tecnológico e até mesmo a vida humana e a partir disso tomar uma rápida decisão perante este cenário.



## ANEXO D - ATIVIDADE - Elétrons Relativísticos no Cinturões de Radiação

### D.1 Objetivo

Nesta atividade iremos selecionar o intervalo de análise, avaliar se no período houve algum tipo de estrutura interplanetária e avaliar se há algum tipo de ondas na magnetosfera que pode estar influenciando na variação no fluxo de elétrons relativísticos.

Links úteis

EMBRACE: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>

Science Gateway: <https://rbspgateway.jhuapl.edu/>

Autoplot: <http://autoplot.org/>

Período da análise: Março de 2015 e Maio de 2017

### D.2 Procedimento

- Acessar o site do Science Gateway
  - Ir no campo “L-shell Plots”
  - Selecionar o intervalo de análise
  - Plotar o dado do fluxo de elétrons em 2.10 MeV em função de L-shell
  - Observar os intervalos onde há uma maior variação no fluxo.
- Conferir os dados do meio interplanetário no próprio Science Gateway ou na página do EMBRACE
  - Definir o tipo de estrutura interplanetária que está gerando a perturbação.
- Na página do Science Gateway, entrar no campo “Spectra Line Plots”
  - Incluir os Espectrogramas para as ondas de interesse
    - \* EMIC, Chorus, ULF waves
- Identificar os períodos em que as ondas tem maior amplitude
  - Relacionar às variações no fluxo de elétrons relativísticos.

### **D.3 Conclusão**

Esta atividade teve como objetivo apresentar ao usuário o processo de identificação das possíveis causas de variação do fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação externo, utilizando os dados das Sondas Van Allen. A partir dos dados de fluxo, é possível identificar os períodos de interação de uma estrutura interplanetária com a magnetosfera da Terra e assim, selecionar os períodos de interesse para verificar a atividade de ondas no cinturão externo. As diferentes faixas de frequências dessas ondas podem ter papéis diferentes e momentos de maior contribuição durante o evento de variação no fluxo.

### **D.4 Extra**

Fazer os mesmos passos, mas desta vez, utilizando o software “autoplot”.

- Os procedimentos são semelhantes, mas são necessários algumas configurações para melhorar a visualização. As vantagens são a maior autonomia de personalização dos gráficos e uma maior gama de ferramentas de análises de sinal

## **ANEXO E - ATIVIDADE - Geomagnetismo**

Nesta atividade iremos realizar um exercício de calibração e aferição da componente horizontal (H) de 1 (um) magnetômetro. Para isso selecionaremos os dados de 2 (dois) magnetômetros localizados no Observatório Magnético de Vassouras do Observatório Nacional.

**Localização dos magnetômetros:** Vassouras (VSS).

**Período da análise:** 17 de março de 2015 maio 2017. **EMBRACE:**

<http://www2.inpe.br/climaespacial/SpaceWeatherDataShare>

**INTERMAGNET:**

<https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php> **Q-days e**

**D-Days:** <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>

Os passos a serem seguidos para atingir o objetivo desta tarefa são:

- 1. Entrar no site que listam quais os dias geomagneticamente mais calmos e perturbados do mês.
- Listar quais são os 5 (cinco) dias geomagneticamente mais calmos do mês.
- Entrar nos sites que possuem os dados do campo geomagnético.
- Baixar os dados do campo geomagnético coletados pelos 2 (dois) magnetômetros durante os 5 (cinco) dias geomagneticamente mais calmos do mês.
- Fazer o cálculo da média dos 5 (cinco) dias geomagneticamente mais calmos para cada magnetômetro, individualmente.
- Fazer o ajuste linear (utilize o método de mínimos quadrados) e a correlação linear (coeficiente de Pearson) entre os dados dos 2 (dois) magnetômetros.
- Fazer o ajuste da sensibilidade do magnetômetro em questão a partir do coeficiente angular do ajuste linear.
- Baixar 1 (um) dia de dados do campo geomagnético coletados pelos 2 (dois) magnetômetros.

- Fazer o ajuste linear (utilize o método de mínimos quadrados) e a correlação linear (coeficiente de Pearson) entre os dados dos 2 (dois) magnetômetros.

### **E.1 Conclusão da Atividade**

Esta atividade teve como objetivo apresentar ao usuário de dados do campo geomagnético a importância de realizar uma calibração da sensibilidade da medida magnética de um magnetômetro. A partir de uma boa calibração, é possível assegurar ao usuário de que as medidas estão calibradas, possibilitando realizar comparações entre as medidas magnéticas de outras localidades. Além disso, uma vez calibrada a rede de magnetômetros, será possível estabelecer índices de atividade geomagnética.

## ANEXO F - ATIVIDADE - ISMR – S4

- a) <https://ismquerytool.fct.unesp.br/is/login/login.php>
- b) Reconhecer que dia da semana teve cintilação
- c) analisar a faixa horária com maior cintilação
- d) Determinar quais satélites da constelação GPS mostraram maiores valores do índice S4
- e) Determinar a direção geográfica onde foram medidos os maiores valores do índice S4

