

Marcos Antonio Garcia

**CLIMA ESPACIAL: MECANISMOS E EFEITOS NA
TERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Humberto Andrei

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

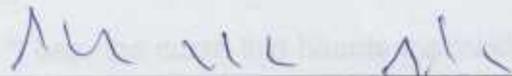
Dedicatória

"CLIMA ESPACIAL: MECANISMOS E EFEITOS NA TERRA"

MARCOS ANTONIO GARCIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

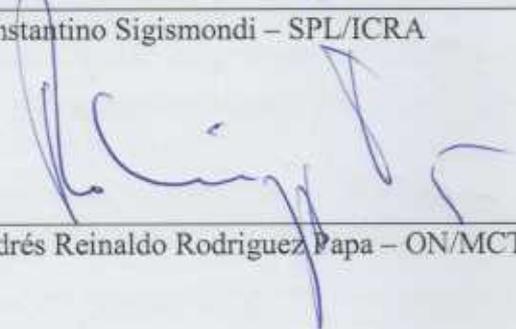
Aprovada por:



Dr. Alexandre Humberto Andrei – ON/MCTI (Orientador)



Dr. Constantino Sigismondi – SPL/ICRA



Dr. Andrés Reinaldo Rodríguez Papa – ON/MCTI

RIO DE JANEIRO - BRASIL
01 DE FEVEREIRO DE 2013

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família (mãe, pai (in memoriam), irmãos, sobrinhos e sobrinho-neto), amigos, professores, e colegas, pelo apoio e incentivo constantes, pois somente com apoio, um homem pode chegar mais longe.

"Pela perseverança, estudo e eterno desejo, qualquer homem pode ser tornar grande."

George S. Patton

"I bear the curse that haunts the minds of men
The hunger for power, the crave for respect."

Keep of Kalessin

Agradecimentos

Sem o apoio e ternura me concedidos pelas pessoas que seguem abaixo, eu nunca teria chegado ao término de mais este passo na eterna caminhada do progresso como ser humano.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Humberto Andrei, pelo suporte, paciência, atenção, dedicação e bom humor em todos os momentos do período de desenvolvimento deste trabalho.

Aos Profs. Drs. Sérgio Boscardin, Jucira L. Penna, Andrés R.R. Papa, Valéria Cristina F. Barbosa, Kátia J. Pinheiro, amigos e professores que me apoiaram e auxiliaram.

Aos colegas de Pós-graduação da Geofísica e da Astronomia, pelo incentivo e auxílio constante.

Ao Observatório Nacional, pela infraestrutura cedida para a minha formação.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, auxiliaram-me para que este trabalho pudesse ser realizado.

Resumo

Este trabalho visa o estabelecimento de uma correlação entre a série temporal do diâmetro solar, obtida no campus do ON/MCTI, localizado no bairro Imperial de São Cristóvão, com eventos solares explosivos, como flares e CMEs (emissões de massa coronal), e associar a partir destes eventos a ocorrência de tempestades geomagnéticas na Terra. Empregando a série temporal de dados geomagnéticos obtidos do Observatório Magnético de Vassouras, administrado pelo ON, estuda-se usar as variações súbitas do diâmetro solar como previsor de ocorrência de tempestades geomagnéticas. O trabalho também visa uma releitura da literatura fundamental referente ao Clima Espacial e sua fenomenologia, bem como contribuir para a competência de Geofísica Espacial e Clima Espacial no ON/MCTI.

As medidas que compõem a série temporal da componente geomagnética H, a que sofre maior variação devido a eventos solares, são tomadas diariamente, de maneira ininterrupta no observatório de Vassouras/RJ (situado na latitude $-22,40^\circ$, longitude $316,35^\circ$, altura de 457 metros), usando o magnetômetro vetorial tipo Fluxgate LEMI-417. O Observatório Magnético de Vassouras é filiado à rede INTERMAGNET desde 1999. As medidas do diâmetro solar foram obtidas por meio de dois dispositivos: o Astrolábio Solar CCD, que forneceu as medidas entre 1998 e 2008, e o Heliômetro, entre 2011 e 2012, ambos localizados no campus principal do ON/MCTI.

A análise revelou que os índices solares referentes à flares e manchas solares não são bons previsores de tempestades geomagnéticas (correlação baixa), ao passo que o diâmetro solar se mostra como um bom previsor da eclosão de CMEs intensas e quase simultâneas.

Palavras-chaves: Tempestades Geomagnéticas, Sol, Terra, Diâmetro Solar, Heliômetro, Geomagnetismo.

Abstract

This work aims to establish a correlation between sudden, intense variations of the solar diameter, as obtained at the ON/MCTI campus, located in São Cristóvão, with explosive solar events such as flares and CMEs (coronal mass ejections), and to associate these events to the occurrence of geomagnetic storms. Using the data time series obtained from the Vassouras Geomagnetic Observatory, managed by ON, the sudden variations of the solar diameter as a precursor for the occurrence of geomagnetic storms are studied. The work also aims to revisit the basic literature on Space Weather and its phenomenology, as well as to contribute for the endowment of the area of Space Geophysics and Space Weather at the ON/MCTI.

The measurements of the time series of geomagnetic H component, the one that experiences larger variation due to solar events, are daily, automatically taken at the Vassouras Observatory/RJ (site at latitude -22.40° , 316.35° longitude, height of 457 meters), using a vector magnetometer Fluxgate type LEMI-417. The Magnetic Observatory of Vassouras is affiliated to the INTERMAGNET network since 1999. The measurements of the solar diameter have been obtained through two instruments: the CCD Solar Astrolabe, between 1998 and 2008, and the Heliometer, between 2011 and 2012. Both are located on the main campus of ON/MCTI.

The analysis has revealed that the indices related to solar flares and sunspots are not good, direct predictors of geomagnetic storms (low correlation), whereas the solar diameter is shown as an efficient predictor for the onset of intense, nearly simultaneous CMEs.

Keywords: Geomagnetic Storms, Sun, Earth, Solar Diameter, Heliometer, Geomagnetism.

Sumário

Dedicatória	III
Agradecimentos	IV
Resumo	V
Abstract	VI
Sumário	VII
Sumário de Figuras	X
Sumário de Tabelas	XVII
Introdução	01
01 - O Sol	05
1.1 - Estrutura Solar	05
1.1.1 - Núcleo	05
1.1.2 - Zona de Radiação	07
1.1.3 - Tacoclina	07
1.1.4 - Zona de Convecção	09
1.1.5 - Fotosfera	10
1.2 - Atmosfera Solar	12
1.2.1 - Região do mínimo de temperatura.....	13
1.2.2 - Cromosfera	13
1.2.3 - Região de Transição	14
1.2.4 - Coroa Solar.....	14
1.2.5 - Heliosfera.....	15
1.3 - Campo heliomagnético	16
02 - Clima Espacial	19
2.1 - Manchas Solares e Ciclo de Manchas	20
2.2 - Flares	23
2.3 - Ejeções de Massa Coronal (Coronal Mass Ejections CMEs)	27
2.4 - Buracos Coronais	30
2.5 - Vento Solar	31
2.6 - Efeitos das alterações no clima espacial.....	33
2.6.1 - Problemas em satélites artificiais e missões espaciais	33

2.6.2 - Mudanças de órbita de Satélites LEO (Low Earth Orbit)	34
2.6.3 - Efeitos da radiação em humanos no espaço	35
03 - Campo Geomagnético	37
3.1 - Componentes Geomagnéticas	38
3.2 - Aproximação dipolar	43
3.3 - Pólos Magnéticos	43
3.4 - Variações temporais	44
3.5 - Magnetosfera da Terra	46
3.6 - Ionosfera da Terra	49
3.6.1 - Camadas da Ionosfera	51
3.6.1.1 - Camada D	51
3.6.1.2 - Camada E	53
3.6.1.3 - Camada E _s	53
3.6.1.4 - Camada F	53
3.6.2 - Modelo da ionosfera e anomalias	54
3.6.2.1 - Anomalia de inverno	54
3.6.2.2 - Anomalia equatorial	55
3.6.2.3 - Eletrojato equatorial	56
3.7 - Cinturões de Van Allen	56
3.8 - Correntes elétricas na Magnetosfera	57
3.9 - Classificação dos campos de correntes da Magnetosfera.....	60
04 - Tempestades geomagnéticas	62
4.1 - Caracterização.....	64
4.2 - Índices usados na detecção e caracterização de tempestades geomagnéticas.....	65
4.3 - Danos causados por tempestades geomagnéticas	66
4.3.1 - Riscos de contaminação por radiação	66
4.3.2 - Formas de vida	67
4.3.3 - Comunicações.....	67
4.3.4 - Sistemas de navegação	69
4.3.5 - Danos a satélites	70
4.3.6 - Redes de transmissão elétrica	71
4.6.7 - Oleodutos	73

05 - Análise de dados e resultados	75
5.1 - Dados solares e índices geomagnéticos globais	75
5.1.1 - O Índice A_p	76
5.1.2 - Comparação entre os índices A_p e SSN (sunspot number) da contagem de manchas solares	77
5.1.3 - Probabilidade de tempestades geomagnéticas	78
5.1.4 - Flares e Índices Geomagnéticos	80
5.1.5 - Explorando as CMEs	83
5.2 - Dados Geomagnéticos Locais	87
5.2.1 - Detecção por segregação de vales	88
5.2.2 - Detecção por derivadas	91
5.3 - Investigação do Heliômetro	96
5.3.1 - A Série Temporal	96
5.3.2 - Inexistência de contribuição atmosférica	99
5.3.3 - A Relação com as CMEs	104
5.4 - Os dados magnéticos de Vassouras e os dados solares heliométricos	108
06 - Conclusões	114
Bibliografia	117
Apêndices	126
Apêndice 1: Equipamento usado	126
1.1 Magnetômetros	126
1.2 Heliômetro	128

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 0.1 Atmosfera solar	02
Figura 1.1 Camadas internas do Sol Camadas internas do Sol	06
Figura 1.2 Zona de Radiação	07
Figura 1.3 A Região da tacoclina	08
Figura 1.4 Zona de Convecção	09
Figura 1.5 Células granulares convectivas	09
Figura 1.6 Fotosfera	10
Figura 1.7 Células granulares na fotosfera	11
Figura 1.8 Figura descritiva da atmosfera solar	12
Figura 1.9 Curvas de temperatura por altitude da atmosfera solar	13
Figura 1.10 Coroa Solar	15
Figura 1.11 Heliosfera	15
Figura 1.12 Ilustração do campo heliomagnético	16
Figura 1.13 Espiral de Parker	17
Figura 2.1 Ilustração da relação Sol-IMF-Terra.....	19
Figura 2.2 Aurora boreal na Finlândia	20
Figura 2.3 Manchas solares	21
Figura 2.4 Diagrama de ciclos de manchas solares (diagrama borboleta), representando sua deriva em direção ao equador solar	22

Figura 2.5 Diagrama de ciclos de manchas solares (diagrama borboleta – acima), representando sua deriva em direção ao equador solar, e o número de rotação de Carrington (abaixo).....	22
Figura 2.6 Foto da ocorrência de uma flare	23
Figura 2.7 Imagem descritiva da evolução de uma flare, levando em consideração uma descrição magnetohidrodinâmica	24
Figura 2.8 Imagem dos aspectos referentes à reconexão magnética de uma flare, que desencadeia uma CME	25
Figura 2.9 Imagem de uma CME no coronógrafo do LASCO/SOHO	27
Figura 2.10 Ilustração da ocorrência de uma flare, e de como a mesma desencadeia a ocorrência de uma CME	28
Figura 2.11 Ilustração de uma CME sendo orientada na direção da Terra	29
Figura 2.12 Sequência das primeiras fotos de buracos coronais obtidas pela missão Skylab	30
Figura 2.13 Ilustração artística da coroa solar, e de como buracos coronais aparentam	31
Figura 2.14 Imagem de um coronógrafo mostrando buracos coronais como fontes de vento solar acelerado e linhas de campo magnético.....	32
Figura 2.15 Ilustração de tipos de danos infligidos a satélites devido às alterações no clima espacial	33
Figura 2.16 Ilustração para diferenciar satélites LEO dos GEO	34
Figura 3.1 Ilustração do campo geomagnético.....	37
Figura 3.2 Ilustração do mecanismo do geodínamo	38
Figura 3.3 Componentes geomagnéticas.....	39
Figura 3.4 Mapa da componente geomagnética \vec{F}	40

Figura 3.5 Mapa da componente geomagnética \vec{I}	41
Figura 3.6 Mapa da componente geomagnética \vec{D}	42
Figura 3.7 Ilustração da aproximação dipolar do campo geomagnético	43
Figura 3.8 Ilustração dos polos magnéticos da Terra	44
Figura 3.9 Ilustração do padrão magnético deixado no fundo do oceano devido às reversões de polaridade do campo geomagnético	45
Figura 3.10 Ilustração da excursão do polo norte magnético da Terra	46
Figura 3.11 Ilustração da magnetosfera da Terra	46
Figura 3.12 Foto da geocoroa da Terra no Ultravioleta feita pela missão Apollo	47
Figura 3.13 Foto da plasmasfera da Terra	48
Figura 3.14 Ilustração da distribuição de temperatura (em °C) na atmosfera da Terra	50
Figura 3.15 Ilustração das camadas ionosféricas em relação ao período do dia e da noite.....	51
Figura 3.16 Ilustração das camadas ionosféricas em relação ao período do dia, e sua interferência em sinais de rádio	52
Figura 3.17 Ilustração anomalia equatorial na ionosfera	55
Figura 3.18 Gráfico mostrando a existência do eletrojato equatorial	56
Figura 3.19 Diagrama dos cinturões de Van Allen	57
Figura 3.20 Diagrama das correntes elétricas na atmosfera da Terra (visão do lado diurno)	58
Figura 3.21 Diagrama das correntes elétricas na atmosfera (lado noturno) ...	59

Figura 4.1 Visão da ocorrência de uma aurora, observada do espaço	62
Figura 4.2 Diagrama da ocorrência de uma aurora, mostrando o eletrojoato auroral, e gráfico mostrando a relação entre o pico magnético negativo (em NT) e uma tempestade geomagnética	63
Figura 4.3 Gravura mostrando a evolução de uma tempestade geomagnética no índice Dst	64
Figura 4.4 Evento de Carrington, detectado nas leituras de dados do observatório geomagnético de Kew, em Londres, na data de 02 de Setembro de 1859	68
Figura 4.5 Localização de observações aurorais durante as primeiras horas de 02 de setembro de 1859, data do evento de Carrington	69
Figura 4.6 Gráfico que mostra o posicionamento da Anomalia Magnética do Atlântico Sul	70
Figura 4.7 Ilustração de como surgem as GICs, e de como estas interferem nas redes de distribuição de energia elétrica	71
Figura 4.8 Transformadores danificados devido à tempestade geomagnética de março de 1989	72
Figura 4.9 Danos internos acontecidos em um transformador durante a tempestade geomagnética de 13/03/1989, o evento de Quebec, Canadá.....	73
Figura 4.10 Ilustração de como as correntes induzidas por tempestades geomagnéticas influem em oleodutos subterrâneos	74
Figura 5.1 Distribuição dos valores diários de A_p	76
Figura 5.2 Dados normalizados e anualizados	77
Figura 5.3 Valores médios da medida diária de A_p por classes do número de manchas	78
Figura 5.4 Probabilidade de efetiva ocorrência de uma tempestade	

magnética	79
Figura 5.5 Distribuição do desvio padrão anual de A_p	80
Figura 5.6 Comparação direta entre valores brutos da intensidade de flares individuos e valores médios do índice A_p , para o período 1998 a 2008	81
Figura 5.7 Probabilidade de ocorrência de tempestade geomagnética por classe de intensidade de flares	82
Figura 5.8 Intensidade de A_p conforme intensidade de CMEs, caracterizadas por três velocidades	84
Figura 5.9 Histograma da ocorrência de CMEs observada, entre 1998 e 2008 pelo coronógrafo LASCO do satélite SOHO	85
Figura 5.10 Probabilidade de ocorrência de tempestades geomagnéticas (definidas como $A_p \geq 16$) em função da intensidade de CMEs	86
Figura 5.11 Medidas na forma de média diária horizontalizada da componente H (em nT) do campo geomagnético, segundo medido nas estações dos Observatórios Geomagnéticos de Vassouras e Adis Abeba, na Etiópia	87
Figura 5.12 Séries da componente H (em unidades de desvio padrão, correspondente a medidas diárias e horizontalizadas, referentes ao Observatório Geomagnético de Vassouras e Observatório de Adis Abeba, Etiópia, alisadas por média corrida de 180 pontos	89
Figura 5.13 Mínimos relativos - vales encontrados com uma janela de busca 2x3X30% respectivamente da duração temporal e do diapasão de variação geomagnética	91
Figura 5.14 Derivada temporal da componente H do campo magnético medido no Observatório Geomagnético de Vassouras	92
Figura 5.15 Derivada temporal da componente H do campo magnético medido no Observatório de Adis Abeba	93

Figura 5.16 Distribuição das principais tempestades geomagnéticas medidas pelo Observatório Geomagnético de Vassouras	94
Figura 5.17 Distribuição das principais tempestades geomagnéticas medidas pelo Observatório Magnético de Adis Abeba	94
Figura 5.18 Série temporal de CMEs, caracterizadas pela velocidade inicial da ejeção (km/s)	96
Figura 5.19 Série de medidas do diâmetro solar fotosférico tomadas pelo Heliômetro no campus do Observatório Nacional	98
Figura 5.20 Média diária das medidas do diâmetro solar fotosférico tomadas pelo Heliômetro no campus do Observatório Nacional	99
Figura 5.21 Variação da pressão atmosférica com a época do ano (em vermelho), e ausência de dependência do semi-diâmetro solar medido com o Heliômetro à pressão atmosférica (em preto). Valores relativos à base da troposfera.	102
Figura 5.22: Variação da temperatura do ar com a época do ano, com valores relativos à base da troposfera	103
Figura 5.23 Variação da velocidade do vento com a época do ano, com valores relativos à base da estratosfera	103
Figura 5.24 Variação da direção do vento com a época do ano, com valores relativos à base da estratosfera	104
Figura 5.25 Ciclo Solar 24, representado pela contagem de manchas solares.....	105
Figura 5.26 Série temporal de CMEs observadas pelo instrumento LASCO/SOHO, no período equivalente às observações heliométricas	106
Figura 5.27 Série heliométrica de medidas do semi-diâmetro solar.....	106

Figura 5.28 Série temporal preliminar (dados não tratados) da componente H do campo geomagnético medida pela estação geomagnética de Vassouras – ON/MCTI	110
Figura 5.29 Depressões locais da componente Geomagnética H de VSS	111
Figura A.1.1 Magnetômetro LEMI-417	126
Figura A.1.2 Heliômetro do Campus do Observatório Nacional	128
Figura A.1.3 Esquema observacional de como o heliômetro determina o semi-diâmetro solar	129

Sumário de Tabelas

Tabela 2.1 Classificação de flares	26
Tabela 4.1 Relação entre os índices geomagnéticos K e A	66
Tabela 4.2 Relação entre os índices geomagnéticos K_p e A_p , e sua relação com o tipo de tempestade geomagnética que indicam	66
Tabela 5.1 Maiores variações negativas da componente H do campo geomagnético, entre os anos de 2002 e 2008, conforme medidas no Observatório Geomagnético de Vassouras e no Observatório de Adis Abeba, Etiópia	90
Tabela 5.2 Correlação de Pearson entre o diâmetro solar medido pelo Heliômetro e as grandezas meteorológicas relevantes na base da troposfera (42m)	101
Tabela 5.3 Correlação de Pearson entre o diâmetro solar medido pelo Heliômetro e as grandezas meteorológicas relevantes na base da estratosfera (12.000m)	102
Tabela 5.4 Comparação entre a datação de picos da série temporal de CMEs e máximos locais da série heliométrica do diâmetro solar	107
Tabela 5.5 Comparação entre a datação das CMEs mais importantes, caracterizadas por grupos numerosos de eventos quase-simultâneos com pelo menos um deles de grande intensidade, e as maiores depressões da componente H do campo geomagnético medido na estação de Vassouras..	112

Introdução

Estando imerso na Heliosfera (figura 0.1), no primeiro 1% do Sistema Solar, o planeta Terra recebe constantemente o impacto do vento solar, fluxo constante de material oriundo da atmosfera do Sol (que forma a Heliosfera). Este é constituído de vestígios do campo heliomagnético (Garcia et al., 2011) e partículas com energia cinética da ordem de 1,5 a 10 KeV (na maioria, prótons e elétrons), que comumente tem velocidade média entre 300 a 400 km/s, e densidade média de 4 cm^{-3} (Saiz et al., 2008), e que chega aos limites do sistema solar, formando a região conhecida como Heliosfera, mostrada na figura 0.1. O vento solar, por meio de sua interação com o campo geomagnético, molda a parte mais externa deste, chamada magnetosfera, em uma forma geométrica assimétrica. O lado diurno do campo, chamado Magnetopausa e que é voltado diretamente para o Sol (contrário ao fluxo do vento solar) é achatado devido à interação entre o plasma solar circundante e a Magnetosfera, que possui a altura de $15 R_T$ (raio da Terra = 6.378,1 km, logo, 95.671,5 km), e uma 'cauda' geomagnética alongada é formada no lado noturno da Terra. Ou seja, o vento solar estica as linhas de campo magnético em uma forma semelhante a um cilindro de 20-25 R_T (algo entre 127.562,0 e 159.452,5 km), e sua extensão, cuja totalidade ainda não é conhecida, ultrapassa os 200 R_T (1.275.620,0 km).

Em boa parte do tempo, esta configuração é estável, mas sofre alterações muitas vezes por ano quando estruturas solares súbitas e intensas como flares (erupções solares), ejeções de massa coronal (CME – Coronal Mass Ejections), ou buracos coronais, surgem, causando variações na velocidade do vento solar cotidiano, o que deprime as linhas do campo externo, gerando tempestades geomagnéticas e correntes induzidas na ionosfera e na crosta terrestre, as denominadas Geomagnetic Induced Currents (GICs), ou seja, correntes geomagnéticas induzidas. Assim, surgem fenômenos que vão desde auroras até grandes danos em usinas de força e redes de transmissão, como ocorrido em Quebec, em 13 de março de 1989 (Boteler et al., 1998), bem como podem causar problemas a aviões e satélites, e também a encanamentos condutores de derivados de petróleo.

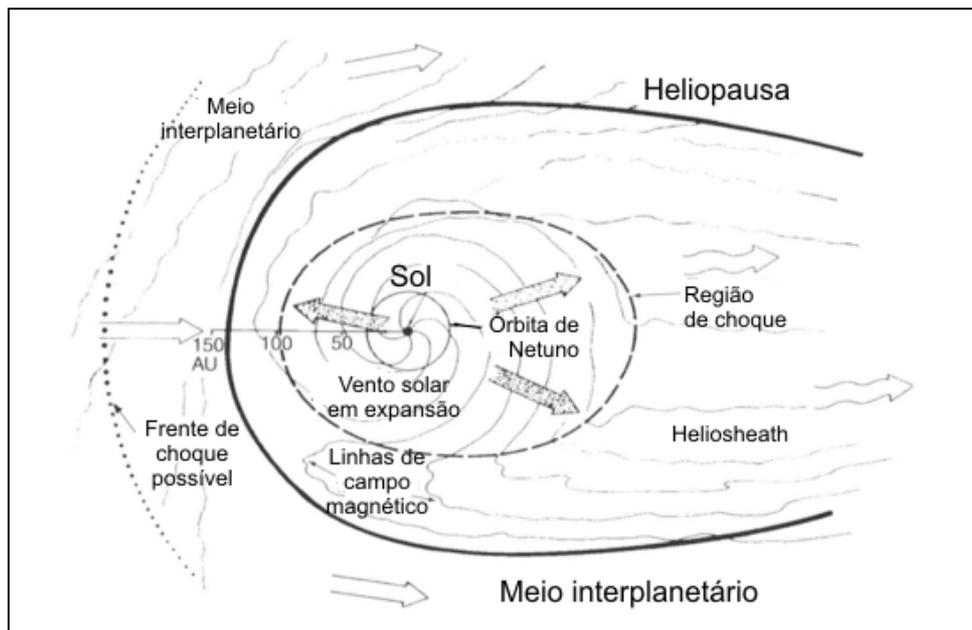


Figura 0.1. – Heliosfera engolfando o sistema solar (http://media.tumblr.com/tumblr_magw9keIO).

O termo Clima Espacial, conforme cunhado pela National Academy of Sciences (Committee on Solar and Space Physics, Committee on Solar-Terrestrial Research, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, 1997), tem sido usado nos últimos 20 anos para descrever toda a fenomenologia das mudanças súbitas no espaço sideral próximo ao planeta Terra, envolvendo o plasma existente, campos magnéticos, e outros materiais nessa região, mas em geral, lida com as alterações no vento solar (velocidade, densidade de partículas, entre outros). As áreas perturbadas por interferências de origem solar são diversas: Saúde humana e formas de vidas com dependência do campo geomagnético, telecomunicações, redes de transmissão de energia, oleodutos, interferência em alguns métodos de exploração geofísicos. O estudo do Clima Espacial lança mão da realização de observações para o monitoramento contínuo do ambiente Sol-meio interplanetário-Terra, seguidas a análise e modelagem dos dados observacionais adquiridos. Visa-se, portanto, compreender as fenomenologias relacionadas ao Sol, aos ambientes interplanetário e planetário. Uma vez modelada a fenomenologia do clima espacial como um todo, de como se dá intimamente a relação Sol-meio interplanetário-Terra, podem-se fazer previsões acuradas de impactos que estão por acontecer na magnetosfera.

Os eventos solares de maior impacto do Clima Espacial e que mais riscos trazem são as CMEs, que são ejeções súbitas de material da coroa solar, que ocorrem devido à desestabilização do campo heliomagnético (Kane, 2006).

Uma CME pode conter 10^{16} g de material, que pode ser acelerado até velocidades da ordem de milhões de km/s, gerando ondas de choque no ambiente interplanetário.

Flares, em termos bem gerais, classificam erupções solares súbitas que podem ocorrer tanto na fotosfera quanto na cromosfera, mais em geral sobre zonas ativas na fotosfera, onde existem manchas solares. As flares de classe X, Magflares e flares maiores têm sido associadas a tempestades cósmicas e geomagnéticas com grande frequência, bem como a efeitos diversos nas proximidades da Terra e em sua atmosfera.

Buracos coronais são regiões extensas da coroa solar onde a densidade de plasma é menor que os padrões para a mesma. Durante os mínimos de atividade solar eles ocorrem em maior número, próximos ao polo solar, e se tornam fontes de linhas de campo heliomagnético e plasma, acelerando o vento solar e causando tempestades geomagnéticas de menor intensidade.

Assim, ao longo de todo o ciclo solar existem mecanismos físicos capazes de impactar o meio interplanetário, e cujo resultado é a geração de uma tempestade geomagnética. Mas tais mecanismos, sua propagação, e mesmo a resposta geomagnética não são ainda inteiramente compreendidos em detalhes, embora seja claro que um súbito aumento de energia dá origem ou está, via de regra, relacionado a fenômenos fotosféricos, uma vez que Sangheeta et al. (2012) e Ambasta et al. (2012) mostram que tubos magnéticos e filamentos na fotosfera seriam as fontes de energia que abastecem CMEs.

Tal idéia abre possibilidades para estudo das medidas da fotosfera solar como um indicador da possibilidade de atividade solar intensa, e assim, como precursor de uma tempestade geomagnética.

Como previamente visto por Reis Neto et al. (2012), empregando dados do diâmetro solar obtidos pelo Astrolábio do ON/MCTI, existe a possibilidade da associação das medidas do diâmetro solar e medidas da componente geomagnética

H. A boa correlação entre ambas era evidenciada, arguindo-se uma relação causal não determinística também. Nesta nova análise, feita neste trabalho, usam-se dados do diâmetro solar vindos do Heliômetro, que se encontra em funcionamento pleno desde junho de 2011, ultrapassada sua construção e fase de testes.

Foram estudadas as séries temporais de dados geomagnéticos obtidos no Observatório Magnético de Vassouras, administrado pelo ON/MCTI, bem como foram analisados dados geomagnéticos do Observatório de Adis Abeba (na Etiópia), e dados solares e índices geomagnéticos vindos de vários centros de referência (LASCO/SOHO, NGDC/NOAA, SECCHI, entre outros), visando observar a eficácia dos dados de eventos solares em sua relação com índices geomagnéticos.

A primeira parte deste trabalho consiste na releitura e sistematização de material pré-existente, enquanto que os dois últimos capítulos trazem dados, pesquisa e conclusões originais.

01. O Sol

O Sol é a estrela localizada no centro de nosso sistema planetário, quase perfeitamente esférico (pois é ligeiramente achatado nos polos), composto de plasma aquecido, enclausurado (magnética e gravitacionalmente) e permeado por linhas de campo magnético, tendo um diâmetro de aproximadamente $1,32 \times 10^6$ km (algo em torno de 109 maior que o da Terra), massa de aproximadamente $2,0 \times 10^{30}$ quilogramas (330.000 vezes a massa da Terra), e que totaliza 99,86% da massa total do sistema solar.

A maior parte da composição química do Sol (3/4 de sua composição total) é de hidrogênio, enquanto o restante é composto principalmente de hélio, e menos de 2% de sua massa total é composta de elementos pesados como oxigênio, carbono, neon, ferro, e todos os outros.

A classificação do Sol como uma estrela, baseada na classe espectral, é G2V, magnitude absoluta de 4,8 (Matzner, 2001). Na classificação espectral, G2 indica uma temperatura fotosférica de 5778 K (aproximadamente 5505 °C), e V indica que ele se encontra na sequência principal, onde ocupa a região das anãs amarelas. No entanto sua aparência amarelada ou avermelhada diz respeito a maior dispersão atmosférica nas altas frequências (azul). Sua energia é gerada a partir de fusão nuclear de átomos de hidrogênio em hélio. O núcleo solar funde por volta de 620 milhões de toneladas de hidrogênio por segundo.

1.1 – Estrutura Solar

1.1.1 – Núcleo

É assumido que o núcleo solar tem seu raio entre $0,2 R_S$ a $0,25 R_S$ (R_S = Raio do Sol, que é aproximadamente $1,39 \times 10^6$ km, ou seja, os valores citados são de $2,8 \times 10^5$ e $3,5 \times 10^5$ km), conforme García et al. (2007), com densidade 150 g/cm^3 e temperatura de $17,5 \times 10^6$ K.

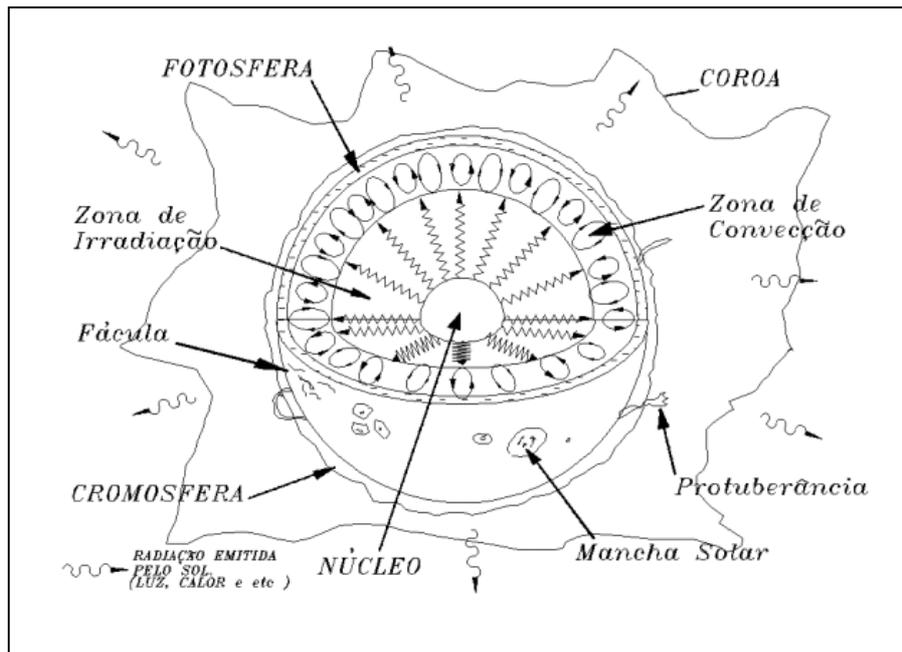


Figura 1.1 - Camadas internas do Sol (<http://www.cdcc.usp.br>).

É no núcleo do Sol, visto no centro da figura 1.1, que ocorre a produção de energia térmica, a partir da fusão de átomos de hidrogênio. Assim, as outras camadas do Sol são aquecidas pela energia difundida a partir do núcleo solar, ou seja, a energia produzida pela fusão então se propaga através das camadas superiores sucessivamente até a Fotosfera, onde ela escapa do Sol na forma de luz e de energia cinética das partículas.

Raios Gama (que são fótons de alta energia), que são liberados na fusão nuclear, são absorvidos pelo plasma solar após percorrerem alguns milímetros e são reemitidos em direções aleatórias, e com a energia um pouco menor, e por este motivo, as estimativas de tempo que um fóton leva para atingir a superfície do Sol é algo entre 10.000 e 170.000 anos, enquanto os neutrinos gerados nesse tipo de reação (algo por volta de 2% da produção de energia total do Sol) alcançam a superfície em apenas 2,3 segundos (Stix., 2003).

1.1.2 – Zona de Radiação

Até por volta de $0,7 R_S$ ($9,8 \times 10^4$ km), a matéria solar é suficientemente quente e densa para que a radiação termal permita que o intenso calor gerado no núcleo possa se propagar para fora (Siscoe et al., 2010). Esta é a chamada zona de radiação, que é livre da convecção termal, presente na zona de convecção.

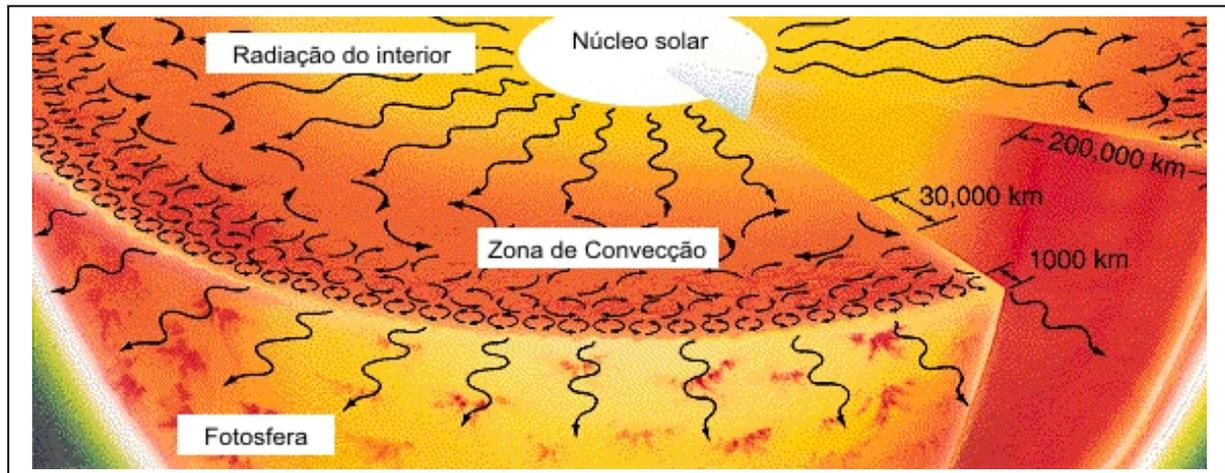


Figura 1.2 - Zona de Radiação (<http://www.pas.rochester.edu/~afrank/A10>).

Nesta região, enquanto o material resfria da temperatura de $7,0 \times 10^6$ K para algo próximo de $2,0 \times 10^6$ K à medida que se avança radialmente, o gradiente de temperatura é menor que o gradiente adiabático, logo não leva à convecção de material solar, e a energia é transferida por meio de irradiação, conforme ilustrado na figura 1.2, em que íons de H e He emitem fótons, que percorrem uma curta distância antes de serem absorvidos por outros íons. Nesta camada, a densidade cai por um fator de 100, de (de 20 g/cm^3 para $0,2 \text{ g/cm}^3$) de $0,25 R_S$ (região mais externa do núcleo do Sol) até o topo da zona de radiação.

1.1.3 – Tacoclina

Entre o topo da zona de radiação e o início da zona de convecção, existe uma camada transicional, a Tacoclina, conforme Elliot et al. (1999), uma região onde a nítida alteração de regime entre a rotação uniforme da zona radiativa (semelhante a um corpo rígido) e a rotação diferencial da zona de convecção (semelhante a um

fluido, mais lenta nos pólos e mais rápida próximo ao Equador Solar) resulta em um grande cisalhamento, devido ao aumento da taxa de rotação.

Resultados recentes da heliosismologia indicam que a Tacoclina está localizada a $0,70 R_S$, com uma espessura de $0,04 R_S$, ou seja, $5,57 \times 10^3$ km (Spiegel et al., 1992), que é a região apresentada em verde da figura 1.3.

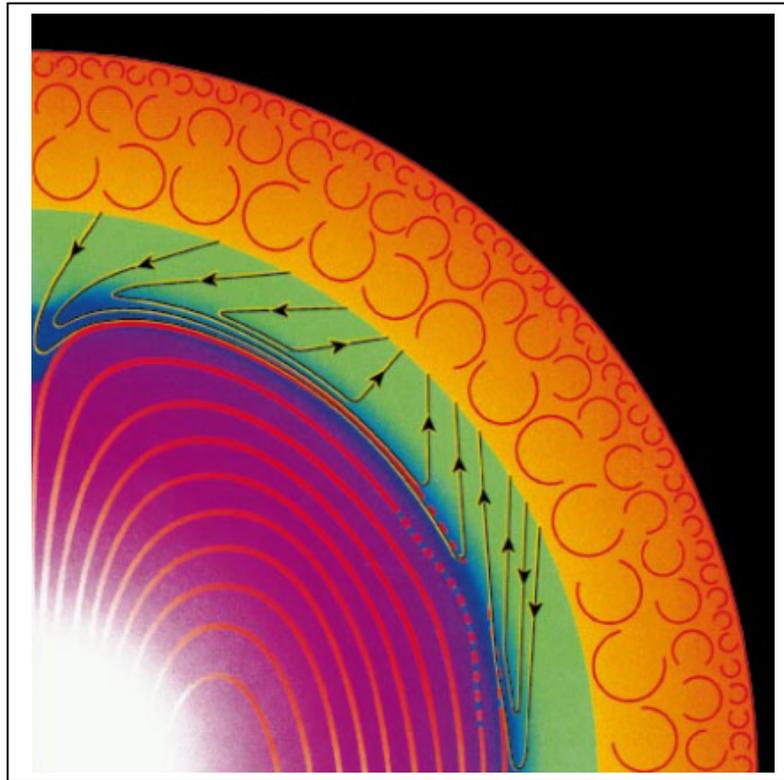


Figura 1.3 - A região da tacoclina é representada (em verde, com espessura exagerada), mostrando o contraste entre a rotação de corpo rígido da zona de radiação e a rotação de fluido da zona convectiva (Katherine E. Dagon, 2010).

Os movimentos dos fluídos encontrados da zona de convecção acima lentamente desaparecem nesta região, batendo com as características mais estáveis da zona de radiação ao fundo da mesma. Presentemente existe a hipótese que é na Tacoclina que surge o dínamo solar, que por sua vez gera o campo heliomagnético.

1.1.4 – Zona de Convecção

Na camada mais externa do Sol, de sua superfície até a profundidade de aproximadamente 200.000 km (ou seja, 0,77 R_S), o plasma não é denso e quente suficiente para permitir a transferência da energia termal do interior do Sol em direção ao exterior por meio de radiação. Ao invés, ele é grandemente opaco, levando a que exista a convecção termal, ou seja, colunas termais convectivas que carregam o material aquecido para a fotosfera (Siscoe et al., 2010). Quando o material alcança o topo e resfria, ele se precipita de volta às partes inferiores da zona convectiva, para receber mais calor do topo da Tacomina, em um processo contínuo de aquecer, ascender, resfriar e retornar para o fundo da zona convectiva. Este processo é visto nas figuras 1.4 e 1.5 de uma maneira muito simplificada.

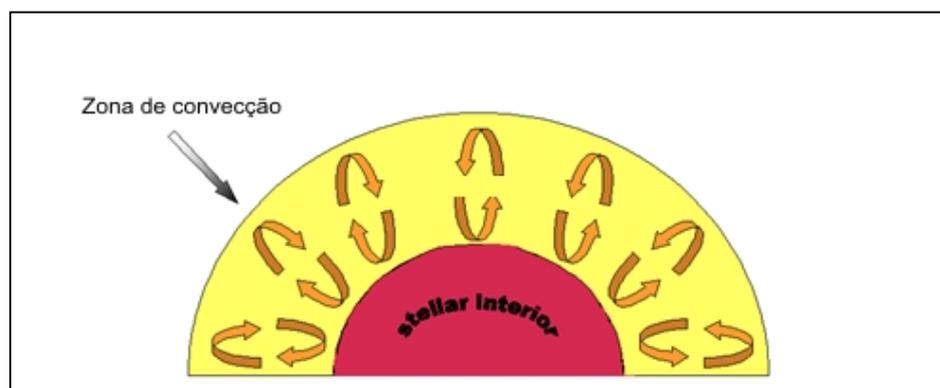


Figura 1.4 - Zona de Convecção (<http://www.astronomy.pomona.edu>).

Na superfície visível do Sol, a temperatura cai para 5.700 K, e a densidade para apenas $0,2 \text{ g/m}^3$ (aproximadamente $1,7 \times 10^{-3}$ da densidade do ar ao nível do mar).

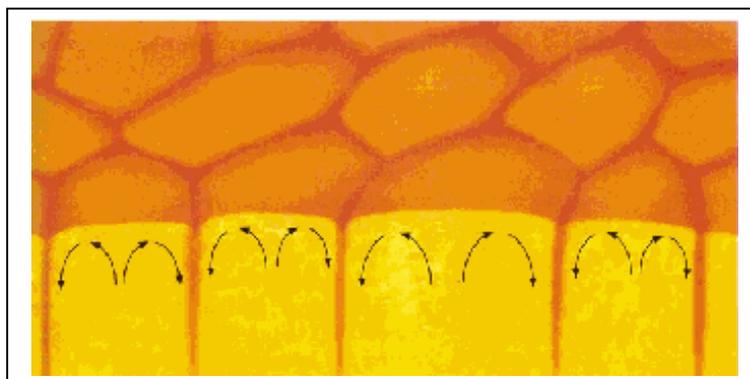


Figura 1.5 - Células granulares convectivas (<http://frigg.physastro.mnsu.edu>).

As colunas térmicas na zona de convecção formam uma marca sobre a superfície do sol, que são as células granulares e supergranulares. A convecção turbulenta desta parte exterior do interior solar provoca dínamos em pequena escala por toda a superfície do Sol, com polos magnéticos norte e sul, e tendem a ter uma geometria semelhante às de prismas hexagonais.

1.1.5 – Fotosfera

A superfície visível do Sol, chamada Fotosfera (figura 1.6), é a camada do Sol que se torna opaca à luz visível (Abhyankar, 1977). Acima dela, a luz solar visível é livre para se propagar pelo espaço, e a energia do Sol escapa quase totalmente. A alteração na opacidade ocorre por conta do decréscimo do número de íons de H^- , que absorvem a luz visível com grande facilidade. Por outro lado, a luz visível que vemos é produzida devido às reações de elétrons com átomos de H para produzir íons de H^- .

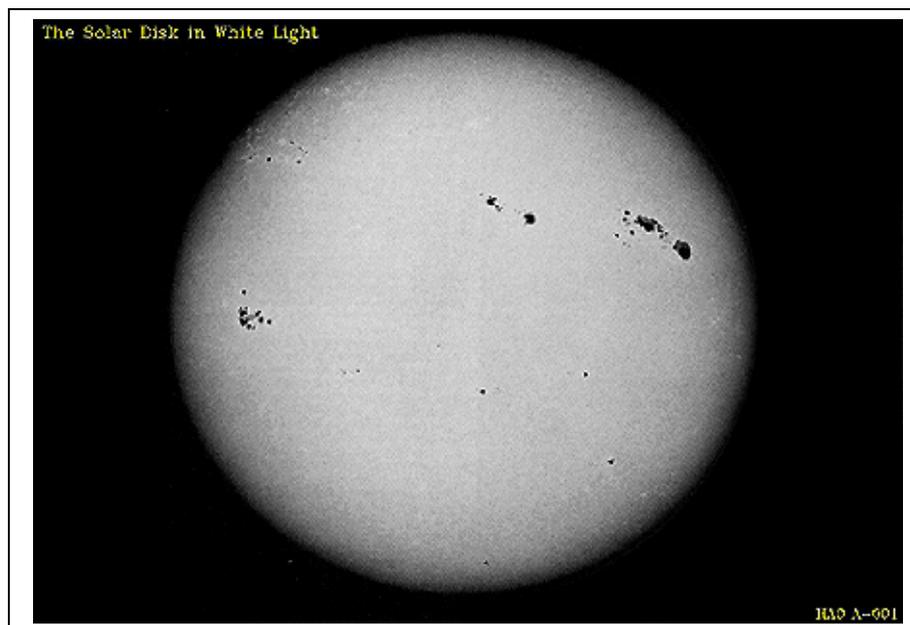


Figura 1.6 - Fotosfera (<http://solar.physics.montana.edu>).

A Fotosfera é de dezenas a centenas de quilômetros de espessura. Como a parte superior da Fotosfera é mais fria que a parte inferior, uma imagem do Sol aparece mais brilhante no centro do que na borda (conhecido no meio acadêmico como “limbo solar”) do disco solar, em um fenômeno conhecido como

'escurecimento de limbo', conforme Abhyankar (1977). A luz solar tem aproximadamente um espectro de corpo negro, com temperatura de cerca de 5778 K, ao qual se sobrepõe linhas de absorção atômica das camadas mais tênues acima da fotosfera.

A Fotosfera tem uma densidade de partículas de aproximadamente 10^{23} m^{-3} , que representa cerca de 0,37% do número de partículas por volume da atmosfera da Terra ao nível do mar.

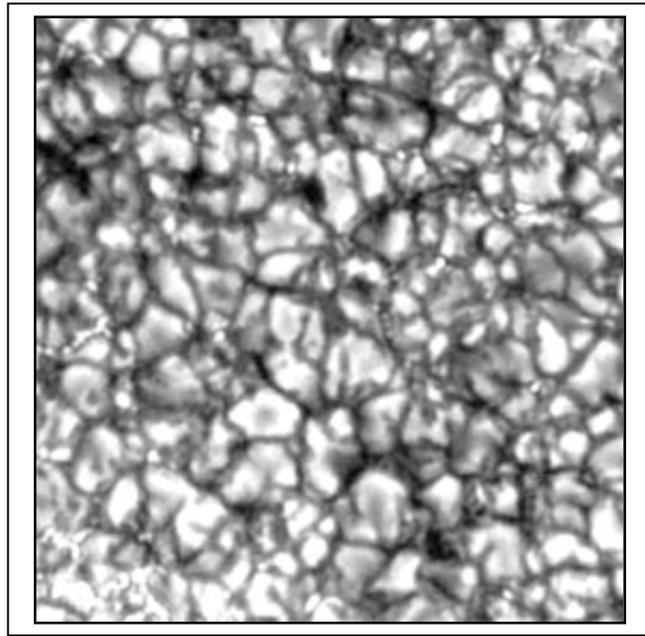


Figura 1.7 - Células granulares na Fotosfera (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>).

A Fotosfera é composta de grânulos (Siscoe et al., 2010), mostrados na figura 1.7, que são células de gás, cada uma delas com aproximadamente 1.000 km de diâmetro. Os grânulos são o topo das colunas de material quente em convecção a partir da Tacoclina, com material aquecido que sobe em seu centro e material menos aquecido em suas bordas se precipitando de volta ao interior da zona convectiva. Cada grânulo tem um tempo de vida de aproximadamente 8 minutos, o que resulta em um comportamento em constante mudança, aparentando como que a fotosfera estivesse em ebulição. Agrupamentos de grânulos comuns são chamados de super-grânulos, com extensão acima de 30.000 km de diâmetro e com tempo de vida de passam de 24 horas.

Durante os estudos iniciais do espectro óptico da fotosfera, algumas linhas de absorção que foram encontrados não correspondiam a nenhum dos elementos químicos até então conhecidos na Terra. Em 1868, Norman Lockyer formulou a hipótese de que essas linhas de absorção seriam devidas a um novo elemento, que ele chamou de hélio, referência ao deus grego que representa o Sol (Helios). As mesmas linhas de absorção haviam sido observadas por Jules Janssen na Índia (Kochhar, 1991) simultaneamente, enquanto que somente 25 anos depois o hélio foi isolado na Terra.

1.2 – Atmosfera Solar

As partes do Sol acima da Fotosfera, em geral, são comumente chamadas de Atmosfera Solar, como citado por Abhyankar (1977) e mostrado na figura 1.8.

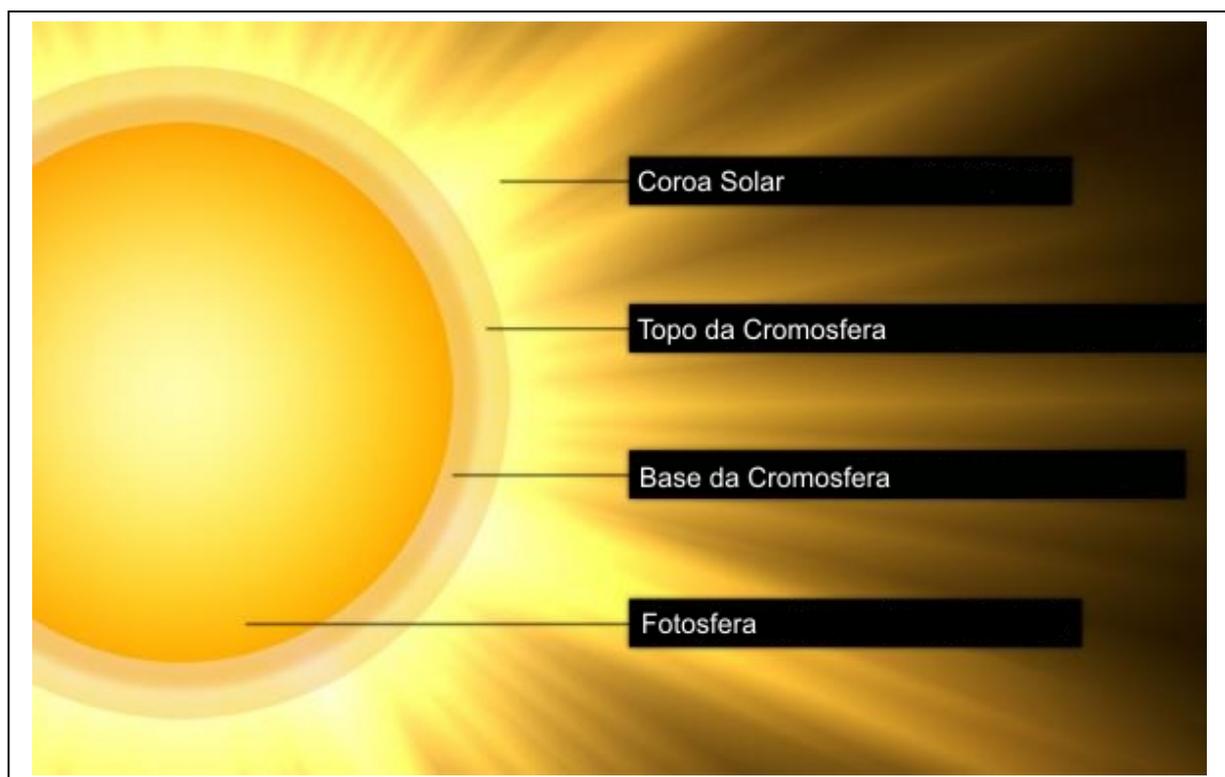


Figura 1.8 - Figura descritiva da atmosfera solar (<http://sciencenordic.com>).

As diferentes subdivisões da atmosfera solar podem ser vistas através de observações em diferentes partes do espectro eletromagnético, no comprimento de onda do rádio, passando pelo espectro visível, e chegando até os raios gama. Pode-se subdividir a atmosfera solar em cinco zonas principais e com propriedades

distintas uma da outra, em especial a temperatura (como ilustrado na figura 1.9): o mínimo de temperatura acima da Fotosfera solar, a Cromosfera, a região de transição, a coroa solar e a Heliosfera, conforme descrito por Abhyankar (1977).

1.2.1 – Região do mínimo de temperatura

O *mínimo de temperatura*, que fica situado em uma altitude de aproximadamente 500 km acima da base da Fotosfera, onde a mesma atinge valores de temperatura por volta de 4100 K (Abhyankar, 1977). Esta parte do Sol é fria o suficiente para permitir a formação de moléculas simples, como CO e H₂O, que podem ser detectados por meio de seu espectro de absorção.

1.2.2 – Cromosfera

Logo acima está uma camada com 2.000 km de espessura, onde há predominância de um espectro de linhas de absorção e emissão (Abhyankar, 1977), chamada *Cromosfera*, devido ao fato dela ser visível como um flash colorido no início e no fim de eclipses totais do Sol.

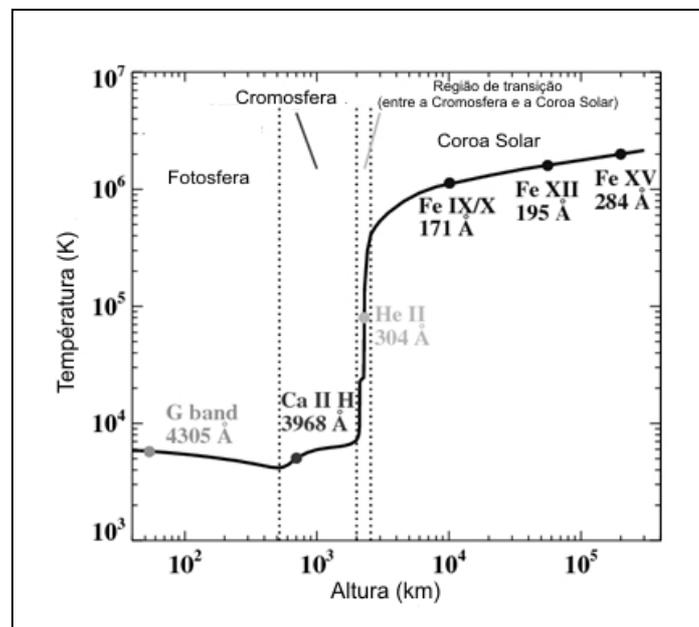


Figura 1.9 - Curvas de temperatura por altitude da atmosfera solar (<http://www.aanda.org>).

A temperatura na Cromosfera aumenta gradualmente com a altitude, atingindo por volta de $20,0 \times 10^3$ K na região próxima ao topo, e em sua parte superior, o He se torna parcialmente ionizado (Hasteen et al., 1997).

1.2.3 – Região de Transição

Acima da cromosfera, há uma região de transição não muito espessa (aproximadamente 200 km) (Erdélyi et al., 2007), onde a temperatura aumenta rapidamente dos $20,0 \times 10^3$ K da Cromosfera superior para as temperaturas coronais de 10^6 K, e tal crescimento se torna mais fácil devido plena ionização do He na região de transição, que reduz significativamente o resfriamento radiativo do plasma.

A região de transição não ocorre em uma altitude muito bem definida, e forma uma espécie de nuvem de características semelhantes as da cromosfera, como espículas e filamentos, estando sempre em movimento constante e caótico. A região de transição não é facilmente visível da superfície da Terra, mas facilmente observável do espaço através de instrumentos sensíveis ao ultravioleta extremo (Dwivedi, 2006).

1.2.4 – Coroa Solar

A Coroa Solar é a atmosfera mais exterior do Sol, conforme (Kane, 2006), que possui um volume muito maior que o próprio Sol. Ela se expande continuamente, formando o vento solar que preenche todo o nosso Sistema Planetário (mostrado na figura 1.10).

A parte mais baixa da Coroa Solar, mais próxima à superfície do Sol, tem densidade de partículas entre 10^{15} – 10^{16} m^{-3} . A temperatura média da Coroa Solar e do vento solar é por volta de 10^6 – $2,0 \times 10^6$ K, mas nas regiões mais quentes, a temperatura pode atingir de $8,0 \times 10^6$ até $20,0 \times 10^6$ K. Embora ainda não exista uma teoria que explique a totalidade da temperatura da Coroa Solar, pelo menos se sabe que parte de seu calor provém de processos de reconexão magnética, que são fenômenos dominantes nesta região (Kane, 2006).



1.10 - Coroa Solar, vista por meio de um coronógrafo (<http://www.astropix.com>).

1.2.5 – Heliosfera

A Heliosfera (figura 1.11) é a região em torno do Sol preenchida pelo vento solar (Matzner, 2001), que se estende de uma distância de aproximadamente $20 R_S$ (ou seja, $0,1 \text{ UA} \approx 1,4 \times 10^7 \text{ km}$) até os limites mais externos do Sistema Solar. Sua fronteira interna é definida como a camada na qual o fluxo do vento solar se torna superalfvénico, ou seja, onde a velocidade do fluxo se torna maior que a velocidade das ondas de Alfvén.

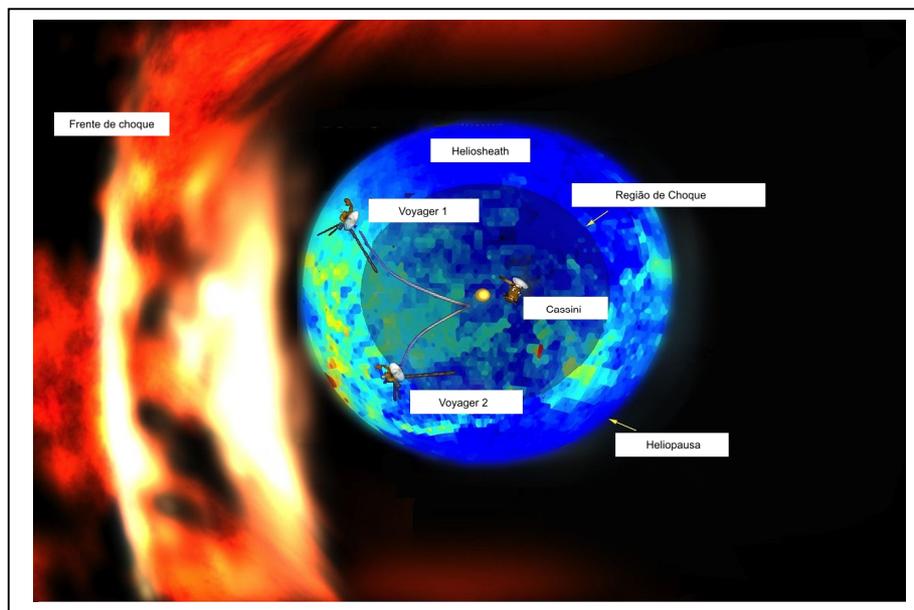


Figura 1.11 - Heliosfera (http://2011energy.alternate-healing-science-christian.ca/free_energy_solar_cycles.html).

A turbulência e forças dinâmicas externas a esta fronteira não conseguem deformar a coroa solar em seu interior, pois a informação só pode viajar a velocidade das ondas de Alfvén, que é dada pela equação 1.0:

$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}} \quad \text{Eq 1.0}$$

Onde μ_0 é permissividade magnética no vácuo, ρ é a densidade de partículas, e B é intensidade do campo heliomagnético.

O vento solar continuamente flui para o exterior do Sol passando pela Heliosfera (Russell, 2001), moldando o campo heliomagnético na forma de uma espiral de Arquimedes, conhecida de Espiral de Parker (Parker, 1958), até que o plasma choca-se com a Heliopausa, que está a 50 UA do Sol (aproximadamente $7,5 \times 10^9$ km).

1.3 – Campo heliomagnético

O Sol é uma estrela ativa magneticamente, tendo um campo magnético importante e variável, o qual reverte sua polaridade a cada 11 anos, durante o ciclo solar.

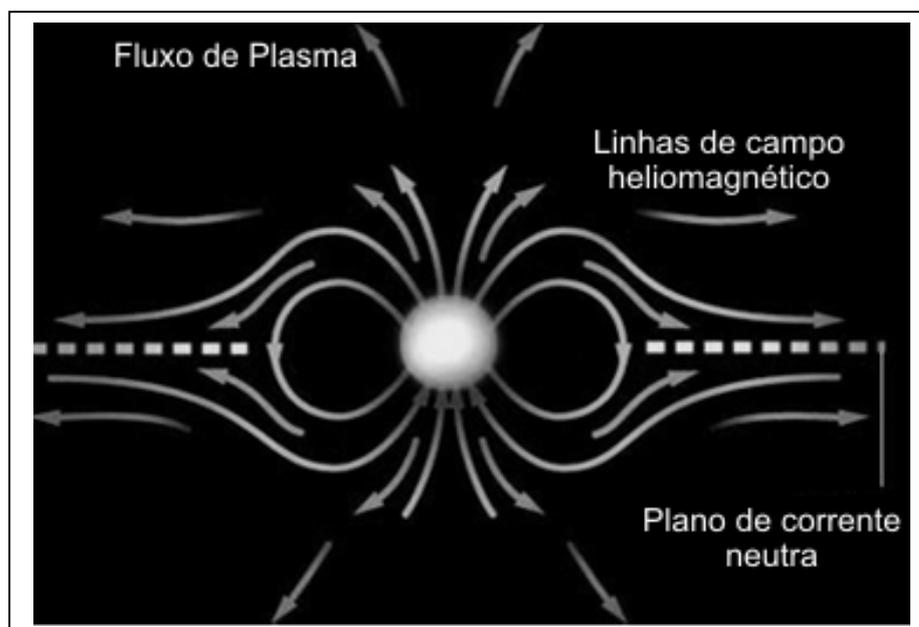


Figura 1.12 - Ilustração do campo heliomagnético (<http://www.daviddarling.info/images/>).

O campo heliomagnético leva a vários efeitos físicos que são chamados coletivamente de atividade solar, o que inclui manchas solares na sua superfície, (Kane, 2006), flares, buracos coronais, e tais eventos causam variações no vento solar (em sua velocidade, mais especificamente) (Kane, 2006), que leva material por todo o nosso sistema planetário (figura 1.12).

Os efeitos da atividade magnética solar no planeta Terra incluem auroras em altitudes medianas e altas, problemas nas comunicações por rádio e em redes de transmissão de energia elétrica, bem como outros danos em solo.

Todo material do Sol está em forma de gás e plasma, devido às altas temperaturas. É justamente pela zona convectiva estar em forma de plasma menos aquecido que no núcleo e na zona de radiação que há a rotação diferencial, ou seja, o Sol rotaciona mais rapidamente próximo ao Equador Solar (aproximadamente 27 dias) do que em altas latitudes (em torno de 35 dias próximo aos polos). Como existe uma relação entre a rotação diferencial e o campo heliomagnético (Stenflo, 1990), pode-se afirmar que a rotação diferencial das latitudes do Sol força as linhas do campo heliomagnético a se retorcerem, causando campos magnéticos fechados em forma de arcos, que entram em erupção na superfície do Sol e desencadeiam a formação de manchas solares e proeminências, efeitos também ligados à reconexão magnética. Esta distorção reflete a atividade do dínamo solar e cria um ciclo solar de 11 anos de atividade magnética, onde o campo heliomagnético reverte sua polaridade.

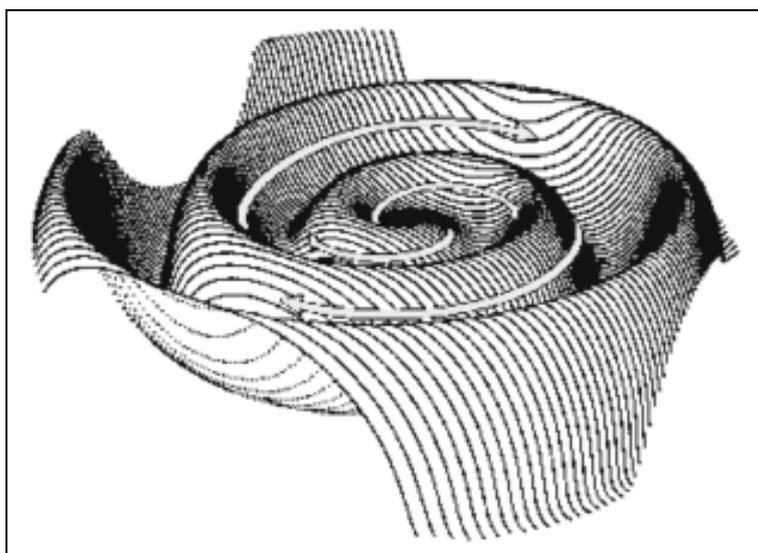


Figura 1.13 - Espiral de Parker (Russel et al., 2001).

O campo heliomagnético se estende para bem longe do Sol, sendo que o plasma magnetizado carrega as linhas de campo para dentro do espaço interplanetário do sistema solar, dando origem ao campo magnético interplanetário, conforme (Russel, 2001). Como o plasma se desloca orientado por linhas de campo, o campo interplanetário inicialmente é esticado de forma radial para fora do Sol. Devido aos campos acima e abaixo do Equador Solar serem de polaridades diferentes e apontando na direção exterior ao Sol, existe uma fina camada de corrente elétrica no plano equatorial do Sol, chamada de cinturão de corrente heliosférica. Em grandes distâncias, a rotação do Sol deforma o campo magnético e o cinturão de corrente numa estrutura denominada espiral de Parker (Russel, 2001), vista na figura 1.13. O campo magnético interplanetário se apresenta bem mais forte do que deveria ser, mais isso ocorre devido à componente dipolar do campo heliomagnético, pois a intensidade de 50–400 μT (na fotosfera) do dipolo solar diminui com o cubo da distância a cerca de 0,1 nT em 1 UA. No entanto, de acordo com observações de satélites, o campo interplanetário na localização da Terra é aproximadamente 50 vezes maior, cerca de 10 nT (Wang et al., 2003).

02 – Clima Espacial

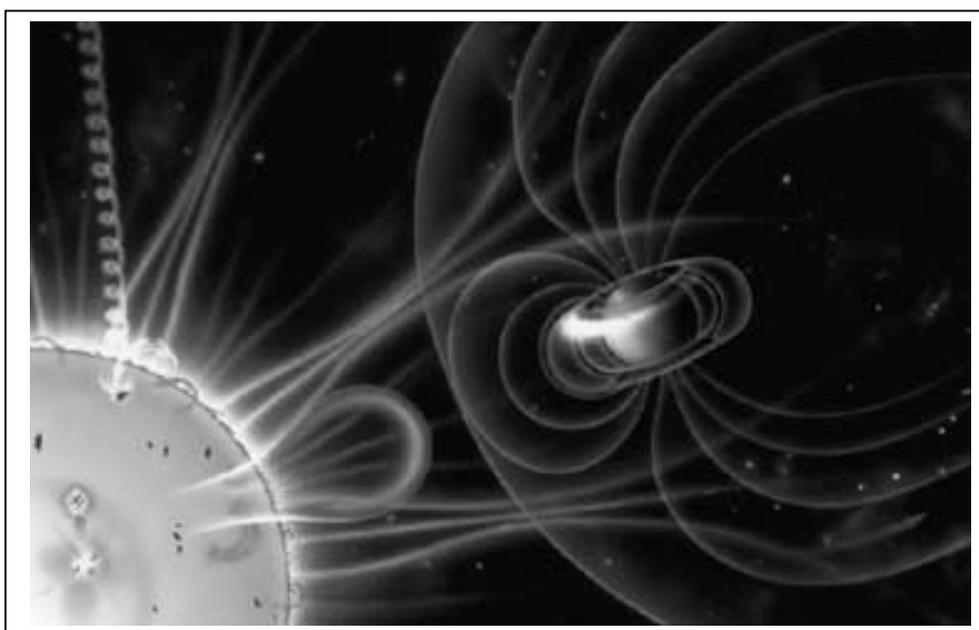


Figura 2.1 - Ilustração da relação Sol-meio interplanetário-Terra (<http://lasp.colorado.edu/home/wp-content>).

Por saber-se que o espaço interplanetário compreendido entre o Sol e a Terra não é um vácuo, mas preenchido pelo vento solar que flui do Sol em direção aos planetas, e sendo o Sol uma estrela ativa, eventos ocorridos na fotosfera e na coroa solar causam alterações nas propriedades do vento solar cotidiano, aumentando sua densidade de partículas e sua velocidade, o que causa distúrbios na magnetosfera da Terra, bem como pode ter consequências graves para vários aspectos da vida e sociedade humanas (Kane, 2008), e cuja interação pode ser vista na figura 2.1.

As alterações no vento solar estão associadas ao ciclo solar (ou ciclo de manchas solares), que ocorre a cada 11 anos, compreendendo períodos de crescimento, máximo, decrescimento e mínimo solares. Nos períodos de crescimento e máximo são onde ocorrem com maior frequência eventos explosivos na fotosfera e coroa solar, como flares e CMEs, em geral, sobre zonas magneticamente ativas na fotosfera, onde o campo heliomagnético começa a ficar anormalmente emaranhado, e as linhas de campo magnético atravessam a superfície solar em arcos.

Tais fenômenos explosivos são decorrentes do emaranhamento do campo heliomagnético, causando as anomalias citadas no vento solar, que ao impactar a

magnetosfera terrestre, podem causar tempestades geomagnéticas (marcadas pelo aparecimento de auroras boreais e austrais, como a mostrada na figura 2.2), bem como alterações significativas na camada de ozônio e na ionosfera, sendo estas últimas afetadas pelo aumento intenso da radiação UV, chegando até os raios X.

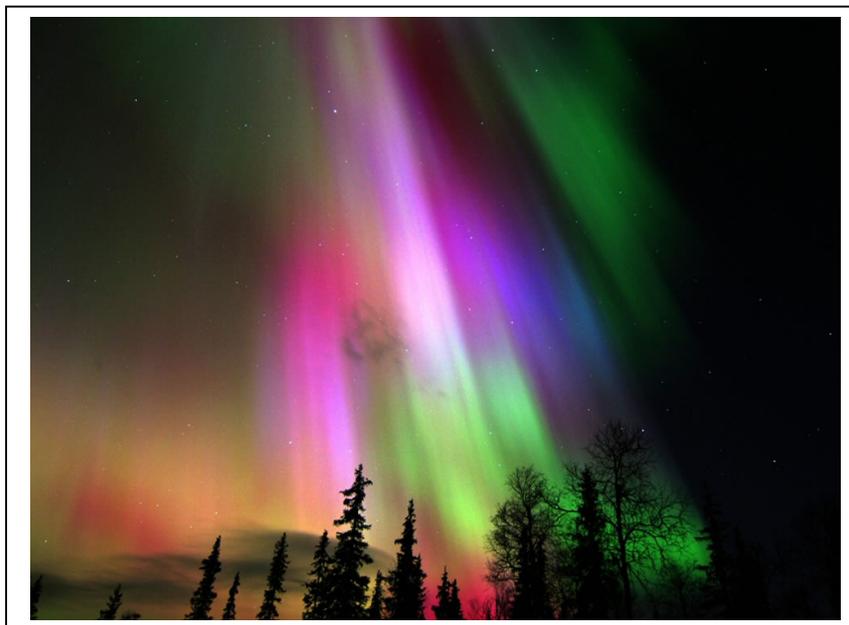


Figura 2.2 - Aurora boreal na Finlândia (<http://www.lovethepics.com/wp-content/uploads/2011/02/Colorful-Aurora-Borealis-in-Finland.jpg>).

Todos estes mecanismos, após vários problemas constatados na Terra, como o Evento de Carrington (Tsurutani et al., 2003) e o Evento de Quebec, em março de 1989, deram origem à pesquisa do ambiente interplanetário entre o Sol e a Terra.

2.1 – Manchas solares e ciclo solar

Observando o Sol com os devidos cuidados, umas das primeiras figuras visíveis que são detectadas são manchas solares (figura 2.3).

Manchas solares são fenômenos temporários na Fotosfera que aparecem como manchas mais escuras em relação as suas vizinhanças. Elas são causadas por intensa atividade magnética, que inibe a convecção de material plasmático, criando assim áreas não só mais escuras, mas também menos aquecidas que a

temperatura média da Fotosfera que as circunda (Kane, 2006). Frequentemente, as manchas surgem em agrupamentos com polaridades magnéticas opostas.

As manchas solares se expandem e contraem enquanto se movem pela superfície solar, algo notado por Galileu, em 1612 (Kane, 2011) e podem ter extensões de 80.000 km de diâmetro, tornando as maiores visíveis da Terra sem o auxílio de um telescópio. Elas podem viajar com velocidades de algumas centenas de m/s quando surgem na Fotosfera.

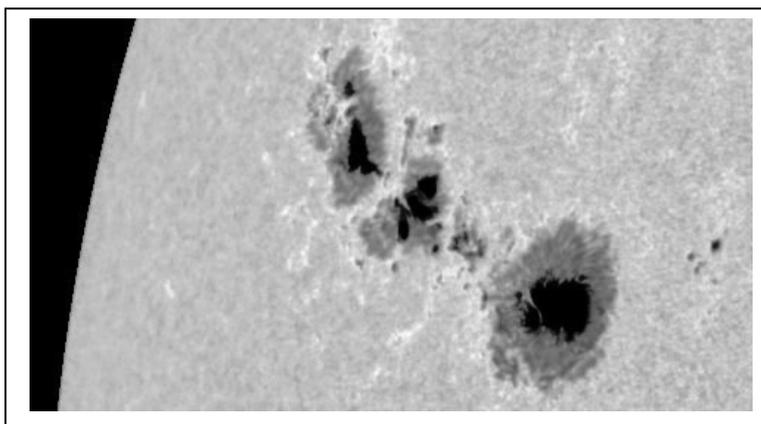


Figura 2.3 - Manchas solares (<http://www.wired.com>).

Como manifestam intensa atividade magnética, nas manchas solares ocorrem eventos secundários como arcos coronais (proeminências) e eventos de reconexão magnética, e por isso, a maioria das flares e CMEs ocorre em regiões ativas próximas a agrupamentos de manchas visíveis.

O número de manchas solares não é constante, mas varia durante o Ciclo Solar. Em um mínimo típico, poucas manchas são vistas, e as que aparecem, em geral, estão situadas em altas latitudes; mas enquanto o ciclo vai progredindo, o número de manchas vai aumentando, conforme descrito pela Lei de Spörer (Matzner, 2001). No início do Ciclo, as manchas tendem a aparecer entre 30° e 45° graus de latitude na superfície solar, e conforme o ciclo progride, as manchas aparecem em latitudes cada vez menores, até que, em média, chegam a 15° de latitude no máximo solar. A latitude média de manchas solares, em seguida, continua a derivar para latitudes menores, até cerca de 7°, e enquanto se encerra um ciclo e o novo se inicia, novas manchas começam a surgir em altas latitudes, acima dos 45°, como visto na figura 2.4.

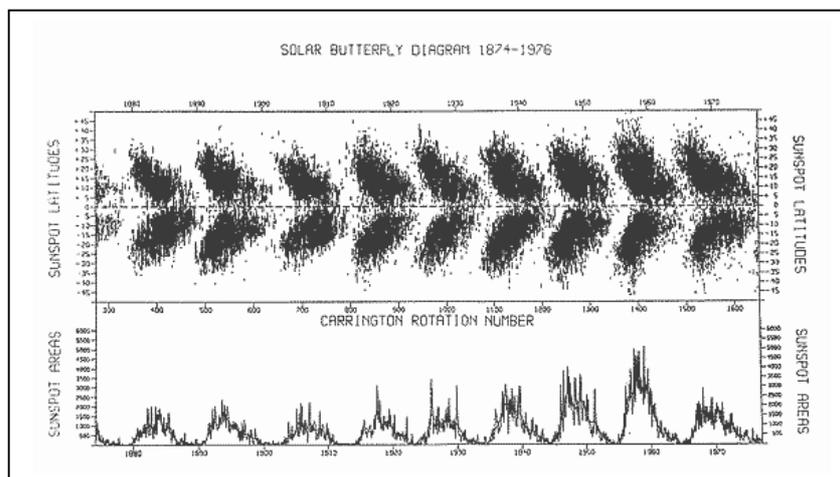


Figura 2.4 - Diagrama de ciclos de manchas solares (diagrama borboleta – acima), representando sua deriva em direção ao equador solar, e o número de rotação de Carrington (abaixo) (<http://www.rmg.co.uk>).

As manchas solares normalmente existem em pares com a polaridade magnética oposta. A polaridade magnética das manchas se alterna a cada ciclo solar, ou seja, em um ciclo solar, a mancha surgida em uma região terá uma polaridade magnética, e no ciclo posterior, a polaridade será inversa.

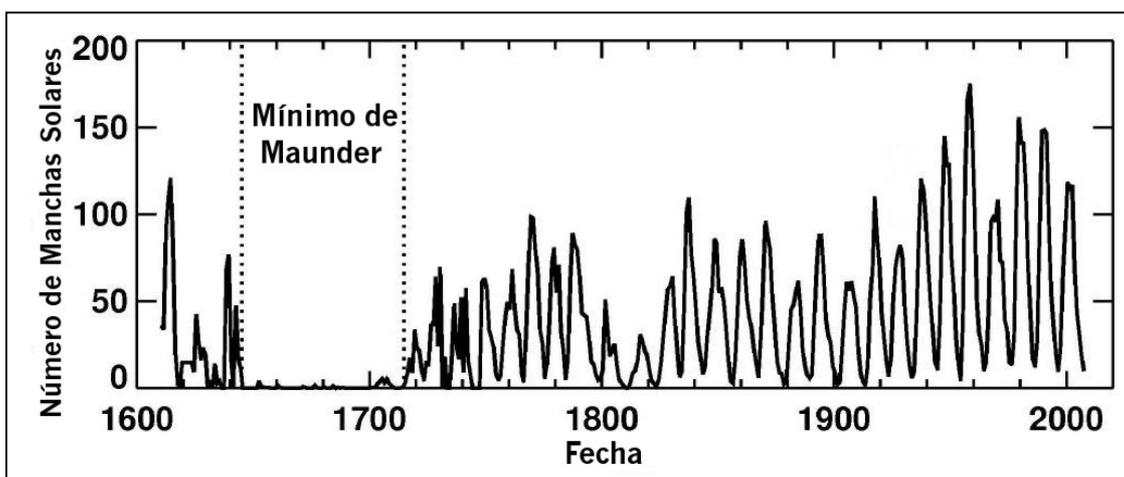


Figura 2.5 - Diagrama de Manchas por em relação ao tempo (em anos), ilustrando o mínimo de Maunder (<http://ciencia.nasa.gov/media/medialibra>).

Tem-se buscado uma correlação com o ciclo solar é alguma influência no clima terrestre, já que a luminosidade do Sol tem relação direta, embora muito pequena, com a atividade heliomagnética. O mínimo de atividade Solar poderia ser correlacionado com baixas temperaturas e maior duração dos invernos, e o oposto para os períodos de verão. No século 17, houve indícios que o ciclo de manchas

havia cessado inteiramente por décadas, como visto na figura 2.5, pois bem poucas manchas solares haviam sido observadas neste período, chamado mínimo de Maunder (ou Pequena Era do Gelo) (Matzner, 2001). Durante este período de mínimo de atividade solar, a Europa registrou temperaturas mais baixas que as costumeiras. Mínimos anteriores prolongados têm sido descobertos por meio de datação em círculos de árvores (análises Dendrocronológicas), e parecem coincidir com temperaturas menores que as médias globais (Heikkilä et al., 2008).

2.2 – Flares

Flares (figura 2.6) são súbitas erupções de energia de grande intensidade que ocorrem na superfície Sol, em geral, acima de zonas ativas (onde manchas solares estão posicionadas), ultrapassando a escala de 6×10^{25} Joules, mas geralmente não sendo visíveis da superfície da Terra. Sua ocorrência registra uma rápida (≈ 1 minuto) alteração na linha vermelha do hidrogênio, emitida na cromosfera, e um súbito crescimento (da ordem de segundos na emissão de raios X nesta mesma região) (Matzner, 2001). Em muitas ocorrências, flares são logo seguidas de ejeções de massa coronal (CMEs).

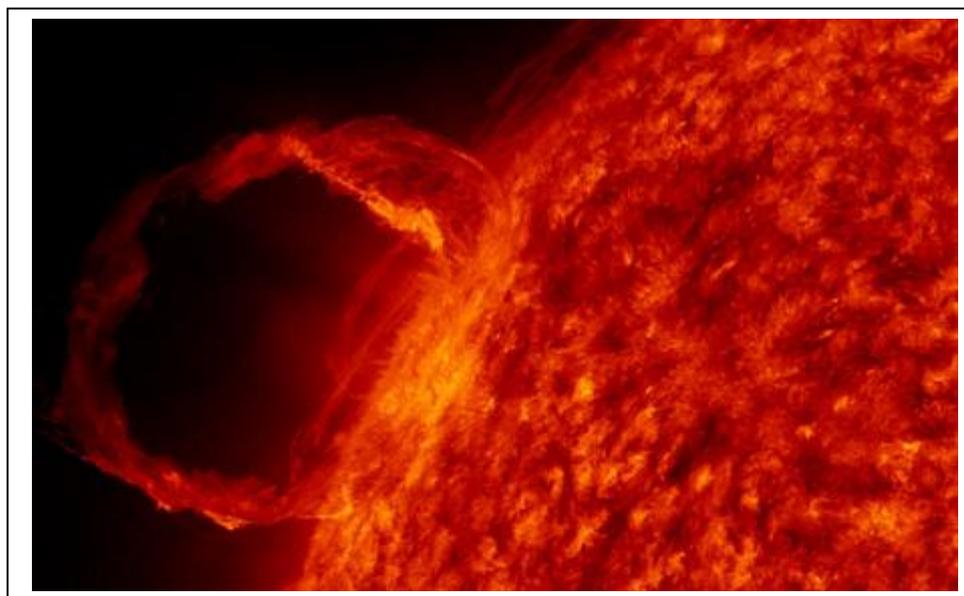


Figura 2.6 - Ocorrência de uma flare (<http://www.telegraph.co.uk>).

Uma única flare expelle nuvens de elétrons, íons, e átomos que atravessa a

coroa solar e segue em direção ao espaço, que atingem a distância da Terra um dia ou dois após o evento. Podem afetar todas as camadas da atmosfera solar (fotosfera, cromosfera e coroa solar), onde o meio é composto por plasma, que acaba sendo aquecido na ordem de milhões de Kelvin, produzindo radiação em todos os comprimentos de onda, embora a maior parte fique fora do espectro visível, o que explica não serem habitualmente visíveis a olho nu.

As radiações UV (ultravioleta) e EUV (ultravioleta extremo), mais os raios X, emitidos por flares solares podem afetar a ionosfera da Terra e perturbar as comunicações de rádio de longa distância, por meio de variação do número de íons nas camadas ionosféricas F (no caso de radiações UV e EUV, que alteram a densidade de partículas, perturbando a rádio comunicação), D e E (no caso de raios X).

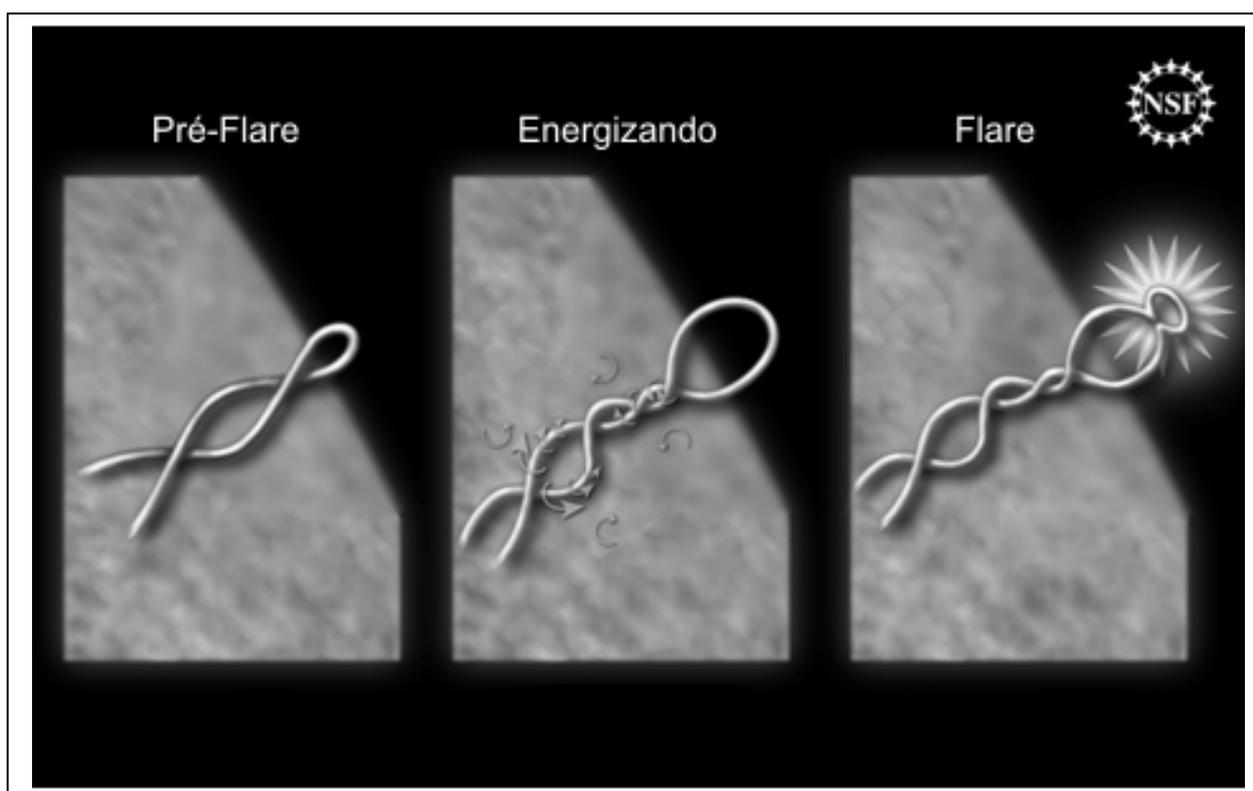


Figura 2.7 - Imagem descritiva da evolução de uma flare, levando em consideração uma descrição magnetohidrodinâmica (<http://www.noaaneews.noaa.gov/stories2010>).

De acordo com pesquisas recentes (Holman, 2006), as flares se dão quando partículas carregadas, na maioria elétrons, interagem com meio plasmático, tendo a

reconexão magnética como responsável pela aceleração das partículas carregadas. No Sol, a reconexão magnética ocorre em 'arcadas solares' (séries de arcos de linhas de campo magnético próximos). Estas linhas rapidamente se reconectam em uma arcada inferior, deixando um campo magnético helicoidal desconectado do resto da arcada, e a súbita liberação de energia nesta reconexão é a origem da aceleração das partículas (figura 2.7). Além disto, o campo helicoidal desconectado, em conjunto com o material que ele contém, pode se expandir violentamente e formar uma CME (mostrado na figura 2.8).

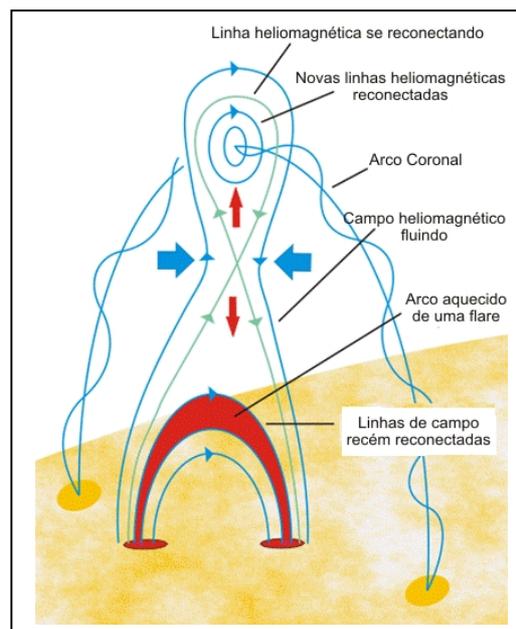


Figura 2.8 - Imagem dos aspectos referentes à reconexão magnética de uma flare, que desencadeia uma CME (<http://science.nasa.gov/media/medialibra>).

Isso explica porque as flares solares ocorrem sobre regiões ativas no Sol, onde os campos magnéticos são mais intensos que a média. Porém, são ainda debatidos os modelos de como a energia magnética se transforma em energia cinética para as partículas, de modo tão eficiente que as partículas são aceleradas a energias de 10 MeV e maiores. Também se tem reportado inconsistências no tocante ao número de partículas aceleradas, que algumas vezes parece ser maior do que o número total no arco coronal (Holman, 2006).

A classificação das Flares é de acordo com seu fluxo de pico (em watts por metro quadrado, W/m^2) de raios X, na faixa de 100 a 800 picômetros próximo à

Terra (Matzner, 2001), como medido no satélite GOES. As Flares são classificadas conforme a tabela abaixo:

Tabela 2.1 - Classificação de flares

Classificação	Faixa de Fluxo de Pico em 100-800 10^{-12} (W/m ²)
A	$< 10^{-7}$
B	10^{-7} a 10^{-6}
C	10^{-6} a 10^{-5}
M	10^{-5} - 10^{-4}
X	$> 10^{-4}$

Dentro desta classificação, existe uma escala linear de 1 a 9, de modo que:

- Uma flare tipo B é 10 vezes mais intensa que uma do tipo A;
- Uma flare tipo C é 10 vezes mais intensa que uma do tipo B;
- Uma flare tipo M é 10 vezes mais intensa que uma do tipo C;
- Uma flare tipo X é 10 vezes mais intensa que uma do tipo M.

Além disso, uma flare X2 é duas vezes mais intensa que uma X1, e flares de classe X, e algumas muito intensas, como a flare X20 de 02 de abril de 2001 (Krucker et al., 2011), já foram detectadas.

Flares da classe X criam tempestades de radiação que produzem auroras e podem banhar os passageiros de voos acima dos polos com pequenas doses de radiação.

2.3 – Ejeções de Massa Coronal (Coronal Mass Ejections – CMEs)

Uma ejeção de massa coronal (CME) é uma massiva liberação de material do Sol para o meio interplanetário (Matzner, 2001), vista na figura 2.9, que, portanto libera grandes quantidades de matéria da coroa solar e radiação eletromagnética no espaço acima da superfície do Sol, tanto próximo à coroa solar ou mais distante, dentro do sistema solar ou além (o que chamamos de CME interplanetária). O material ejetado é plasma solar, com campo magnético associado, que, a priori é constituído de prótons e elétrons, mas pode também contar com pequenas quantidades de elementos mais pesado, como He, O, e até mesmo Fe (Matzner, 2001). CMEs estão associadas a enormes mudanças e perturbações no campo magnético coronal, associadas às regiões ativas da superfície Solar, como nos agrupamentos de manchas solares associadas com flares, embora ainda não exista uma descrição completa sobre tal fato (Holman, 2006).

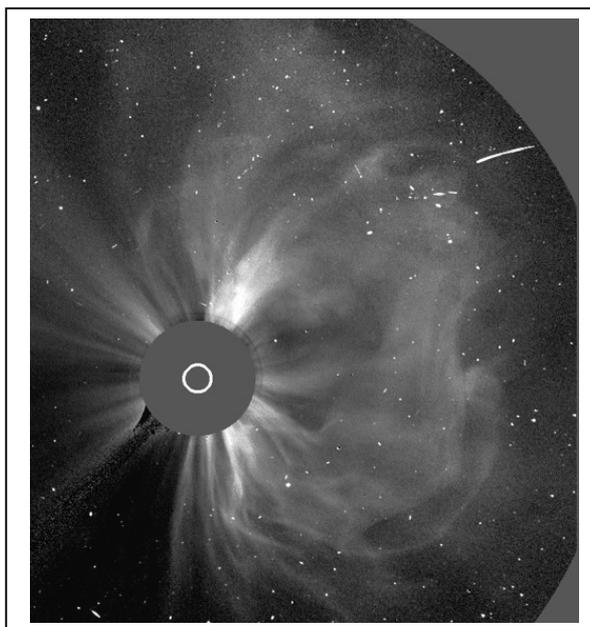


Figura 2.9 - Imagem de uma CME no coronógrafo do LASCO/SOHO (<http://cdn5.thesuntoday.org/>).

Tal como ocorre nas flares, pesquisas recentes mostram que o fenômeno da reconexão magnética (que é o rearranjo de linhas de campo magnético que ocorre quando dois campos diretamente opostos são reunidos, ocasionando liberação de energia armazenada nos campos originais) é a causa da ocorrência de CMEs (figura 2.10), conforme Kane (2006).

Uma CME tipicamente apresenta pelo menos uma das seguintes características, ou pode ter todas: uma cavidade de baixa densidade de plasma, um núcleo denso (uma proeminência, que aparece como uma região brilhante nas imagens dos coronógrafos, embebida nesta cavidade), e uma borda brilhante à frente.



Figura 2.10 - Ilustração da ocorrência de uma flare, e de como a mesma desencadeia a ocorrência de uma CME (<http://science.nasa.gov/media/medialibra>).

A grande maioria das CMEs se origina de regiões magneticamente ativas na superfície solar. Nestas regiões existem linhas de campo magnético fechadas, onde a intensidade do campo magnético é suficiente para enclausurar plasma, mas para que a CME escape para o espaço, é necessário que essas linhas se enfraqueçam ou se rompam. Apesar disso, CMEs podem ocorrer também em partes quietas do Sol, embora na maioria dos casos esta região calma tenha estado ativa recentemente. Durante o mínimo solar, as CMEs se formam primeiramente no cinturão de corrente induzida próximo ao Equador Solar, enquanto que no máximo solar, surgem das regiões ativas cuja distribuição latitudinal é mais homogênea.

As velocidades de CMEs podem ter valores entre 20 km/s até 3.200 km/s, com um valor médio de 489 km/s, baseado nas medidas obtidas pelo SOHO/LASCO entre 1996 e 2003. A massa média é de $1,6 \times 10^{12}$ kg. Os valores dados são apenas os limites inferiores, pois as medidas de coronógrafos (telescópios que foram

desenvolvidos para simular um eclipse solar por meio do bloqueio dos raios solares diretos) só dão análises de dados de duas dimensões.

A frequência em que ocorrem CMEs depende da fase do Ciclo Solar: de por volta de uma a cada 5 dias no mínimo até 3,5 por dia próximo ao máximo. Estes valores também são limites inferiores, já que CMEs se propagam opostas à direção da Terra (ou seja, na parte do Sol que está invisível à Terra) não são detectadas por coronógrafos.

Na figura 2.11, vemos como uma CME, com a orientação voltada para a Terra, causa a perturbação no meio interplanetário e perturba a magnetosfera terrestre.

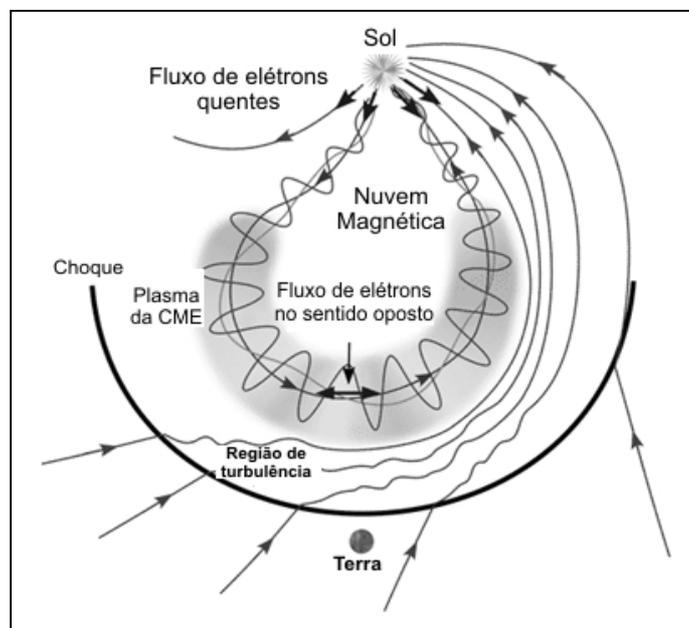


Figura 2.11 - Ilustração de uma CME sendo orientada na direção da Terra (<http://ase.tufts.edu>).

O conhecimento atual da cinemática das CMEs indica que a ejeção começa com uma fase de pré-aceleração, caracterizada por um movimento lento de erguimento, seguido de um período de rápida aceleração enquanto se afasta do Sol, até que uma velocidade quase constante é atingida (Gopalswamy et al., 1998). Algumas CMEs, em geral as mais lentas, não possuem estes três estágios de evolução, tendo uma aceleração bem lenta e contínua enquanto se afastam do Sol, qual a ascensão de um balão. E mesmo para CMEs com uma aceleração bem definida, o estágio de pré-aceleração é comumente ausente, ou não observável.

2.4 – Buracos Coronais

São áreas na coroa solar menos quentes, mais escuras nos comprimentos de onda dos raios X (como visto na figura 2.12) e do Ultravioleta, e que possuem menor densidade de plasma (Kane, 2009). Estão associadas a regiões de campos magnéticos unipolares na fotosfera, os quais se estendem até a coroa e fluem livremente para o espaço interplanetário. Dessa forma, os buracos coronais se tornam fontes de vento solar acelerado, que entra no espaço interplanetário e pode causar alterações nas propriedades do vento solar cotidiano, gerando frentes de choque, que podem causar tempestades geomagnéticas (Kane, 2009).

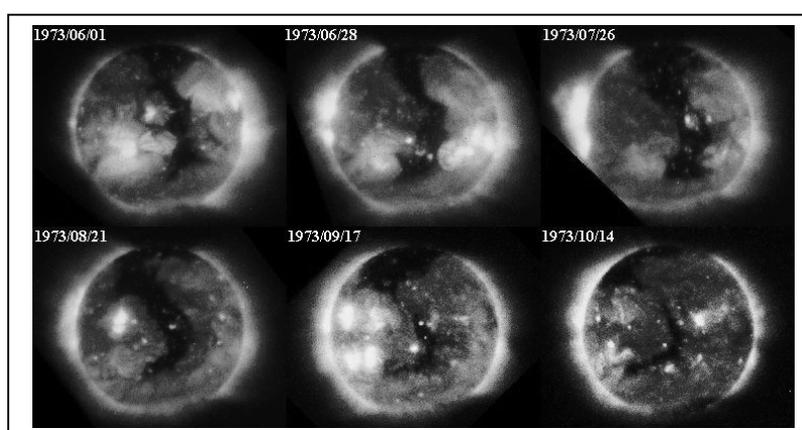


Figura 2.12 - Sequência das primeiras fotos de buracos coronais obtidas pela missão Skylab (<http://solar.physics.montana.edu/nuggets>).

Durante as épocas de baixa atividade solar, os buracos coronais cobrem os polos Norte e Sul do Sol, enquanto que em períodos de mais atividade, podem existir em quaisquer heliolatitudes (a figura 2.13 nos dá uma boa noção disso, em conjunto com a 2.12). Podem ter períodos de vida de algumas rotações solares (27 dias) (Kane, 2009) antes de mudarem para uma configuração magnética diferente, ou mesmo desaparecerem.

Quando observados na luz visível, buracos coronais não podem ser distinguidos das circunvizinhanças, e é apenas nos comprimentos de onda do ultravioleta e dos raios X que eles podem ser vistos como estruturas distintas, pois devido às altas temperaturas da coroa solar o plasma emite a maior parte de sua radiação nas bandas do ultravioleta e raios X. Em contraste, a Fotosfera tem uma

temperatura bem menor, e emite radiação na banda do visível (com pico no amarelo).

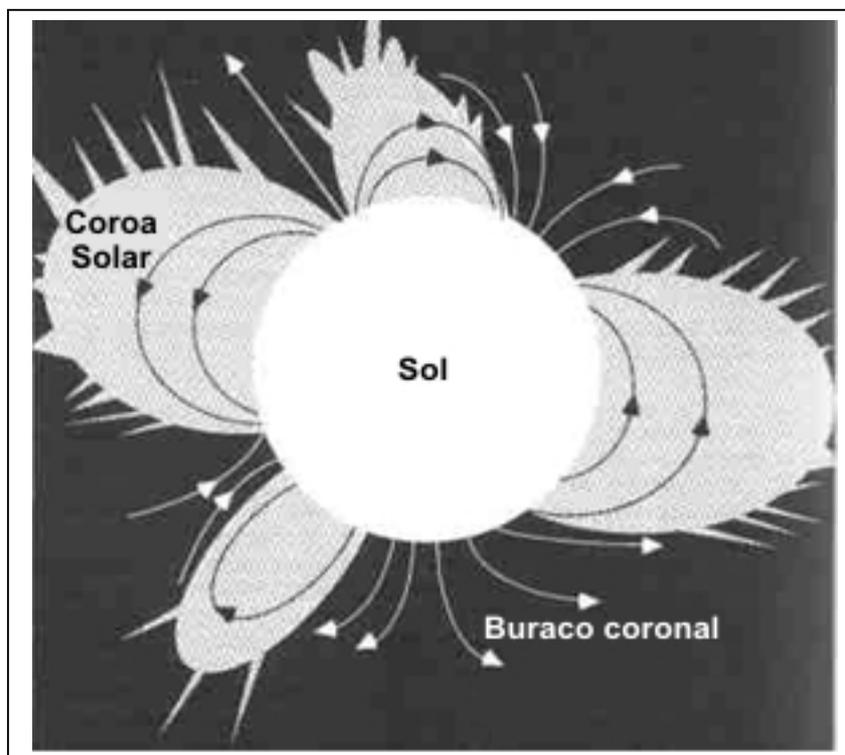


Figura 2.13 - Ilustração artística da coroa solar, e de como buracos coronais aparentam (<http://bdaugherty.tripod.com>).

2.5 – Vento Solar

O conceito de vento solar, ou seja, de um fluxo constante de matéria oriunda do Sol (visualizado na figura 2.14), juntamente com remanescentes magnéticos solares, nasceu dos estudos de Parker (1958), levando em consideração as teses de Biermann (que notou que a cauda de um cometa sempre aponta no sentido oposto ao Sol, não importando de onde ele venha) (Parker, 1958) e Chapman (que criou um modelo de aquecimento do gás que forma a coroa solar, e que por consequência, iria causar a expulsão de material do Sol) (Parker, 1958). Chapman cunha o termo 'vento solar', mostrando que a coroa solar, (embora atraída pela gravidade do Sol e mesmo em grandes distâncias) é um bom condutor de calor. Assim, como a aceleração da gravidade diminui quanto mais distante do Sol se está, o material mais externo da coroa solar flui para o espaço interplanetário com velocidade supersônica (Parker, 1958).

O vento solar, então, é o fluxo de partículas carregadas ejetado do Sol, em geral com energias entre 1,5 e 10 KeV. Tal fluxo sofre variações de temperatura e velocidade à medida que se propaga no espaço interplanetário, ou incitado por eventos explosivos nas camadas mais baixas da atmosfera solar, ou mesmo na superfície do Sol.

As partículas carregadas possuem energia cinética muito elevada, o que as permite fugir da atração gravitacional do Sol, sendo que essa energia é vinda do aquecimento da coroa solar.

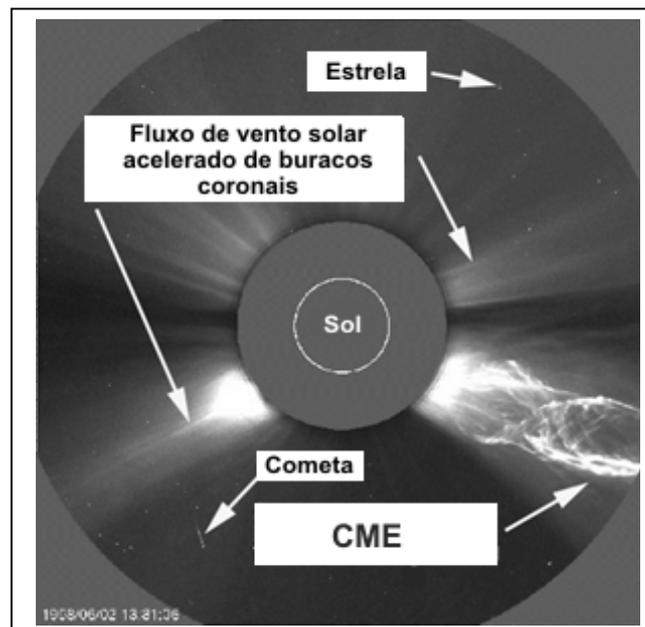


Figura 2.14 - Imagem de um coronógrafo mostrando buracos coronais como fontes de vento solar acelerado e linhas de campo magnético (<http://www.earthlyissues.com/solarevents.htm>).

A velocidade do vento solar cotidiano, em geral, é em torno de 380-400 km/s. No entanto, a ocorrência de eventos solares explosivos (como flares e CMEs) e de estruturas de longa duração que corrotacionam com o Sol (buracos coronais) o vento solar pode ser acelerado e chegar a valores entre 700-800 km/s (Matzner, 2001). Este é o valor característico do vento solar que causa uma ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ou ejeção de massa coronal interplanetária) no espaço, que ao se chocar com a magnetosfera da Terra pode causar uma tempestade geomagnética.

2.6 – Efeitos das alterações no clima espacial

2.6.1 – Problemas em satélites artificiais e missões espaciais

Alguns problemas em equipamentos são atribuídos à influência do clima espacial ou alguma de suas componentes. Um exemplo disso é o de dois satélites canadenses de telecomunicações em órbita geosíncrona, em janeiro de 1994, que durante um período de fluxo de elétrons aumentado tiveram sua funcionalidade comprometida, deixando todo o Canadá sem serviços de comunicação. O primeiro satélite voltou à atividade em algumas horas, enquanto o segundo levou 6 meses, causando um prejuízo estimado entre 50 a 70 milhões de dólares, conforme o estudo realizado pela Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

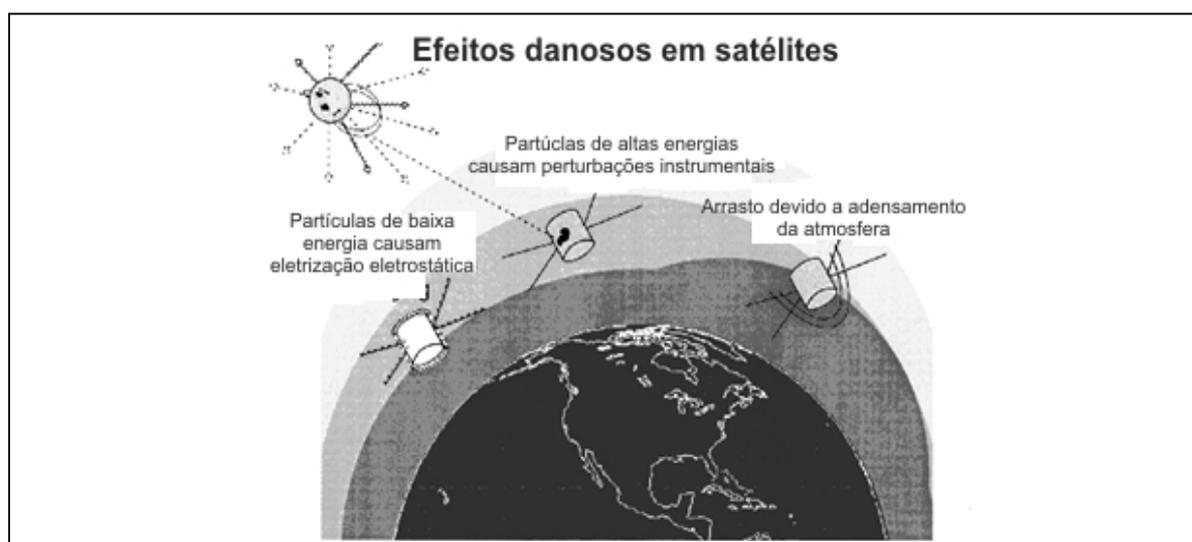


Figura 2.15 - Ilustração de tipos de danos infligidos a satélites devido às alterações no clima espacial (<http://www.swpc.noaa.gov/Media/graphics>).

Os dois efeitos nocivos mais facilmente notados são danos causados pela penetração de radiação e carga elétrica em satélites e aeronaves (figura 2.15), estudado pelo Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

2.6.2 – Mudanças de órbita de Satélites LEO (Low Earth Orbit)



Figura 2.16 - Ilustração para diferenciar satélites LEO dos GEO (<http://mapmaker.meteor.wisc.edu/~jbrunne>).

Satélites LEO (figura 2.16) tendem a se deslocar para órbitas cada vez mais internas (isto é, mais próximas à superfície da Terra) devido ao atrito entre a superfície do satélite e as camadas mais externas da atmosfera terrestre (Termosfera e Exosfera), até que em certo momento o mesmo decai tanto até sair da órbita e cair sobre a Terra, como visto no estudo conjunto realizado por Committee on Solar and Space Physics, Committee on Solar-Terrestrial Research, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council (1997). Atualmente, alguns satélites possuem foguetes pequenos com três finalidades:

- 1 – Compensar a altitude perdida e estender o tempo da missão;
- 2 – Para, durante uma queda, desviar de áreas com população e cair em oceanos;
- 3 – Mudança de órbita para evitar a colisão com outros satélites ou aeronaves.

Para disparar tais foguetes é necessário se conhecer a órbita com bastante precisão. Uma tempestade geomagnética pode causar uma mudança de órbita que pode durar de dois dias, mas que pode se propagar por um ano ou mais. O mecanismo é que a tempestade geomagnética causa aumento de calor na termosfera, fazendo com que a atmosfera suba e aumente a densidade do nível onde o satélite LEO se encontra (figura 2.15), de modo que o atrito entre satélite e a atmosfera aumenta, forçando-o a mudar para órbitas mais internas, como visto no estudo conjunto realizado por Committee on Solar and Space Physics, Committee on Solar-Terrestrial Research, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council (1997).

2.6.3 – Efeitos da radiação em humanos no espaço

Sejam oriundas de equipamentos médicos usados em radioterapias, de uma usina nuclear ou oriunda do espaço, radiações ionizantes tem os mesmos efeitos danosos sobre o corpo humano, sendo que o grau de nocividade é dependente do tempo de exposição e da densidade de energia da radiação, conforme Saiz et al. (2008).

Os cinturões de radiação de Van Allen se estendem de 200 km até 1.000 km, região onde se encontram estações espaciais como a International Space Station (ISS) e os ônibus espaciais. Normalmente, as exposições à radiação nessa região são em regimes toleráveis, mas durante eventos solares que incluem uma rajada de partículas energéticas vindas do Sol, o fluxo aumenta de uma ou muitas ordens de magnitude.

Existem áreas na International Space Station, bem como em outras estações espaciais, onde uma proteção maior pode ser projetada e feita devido à espessura do casco da estação, mantendo doses de radiação abaixo dos limites que o corpo humano pode suportar, mas para missões com aquelas em que se utilizam ônibus espaciais, isso acarretaria no fim da missão, conforme o estudo conjunto realizado por Committee on Solar and Space Physics, Committee on Solar-Terrestrial Research, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications,

Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council (1997).

03 – Campo geomagnético

É o campo magnético da Terra, que se estende do núcleo interno do planeta (onde é gerado devido ao fluxo convectivo de ligas de ferro derretidas no núcleo externo, no que é chamado geodínamo, ou um georeator) (Amit et al., 2006) até o espaço, onde se encontra com o vento solar.

O campo geomagnético se comporta como um dipolo magnético inclinado de 11° em relação ao eixo de rotação da Terra, como mostrado na figura 3.1.

Apesar de seu comportamento dipolar ser bem parecido com o de um ímã em barra, a diferença está no fato que o campo geomagnético é dinâmico, ou seja, varia no tempo, o que é atribuído a mudanças nas colunas convectivas de material ferroso do núcleo interno, como mostrado na figura 3.2. O polo Norte sofre excursões lentas o suficiente para, por exemplo, não atrapalhar bússolas.

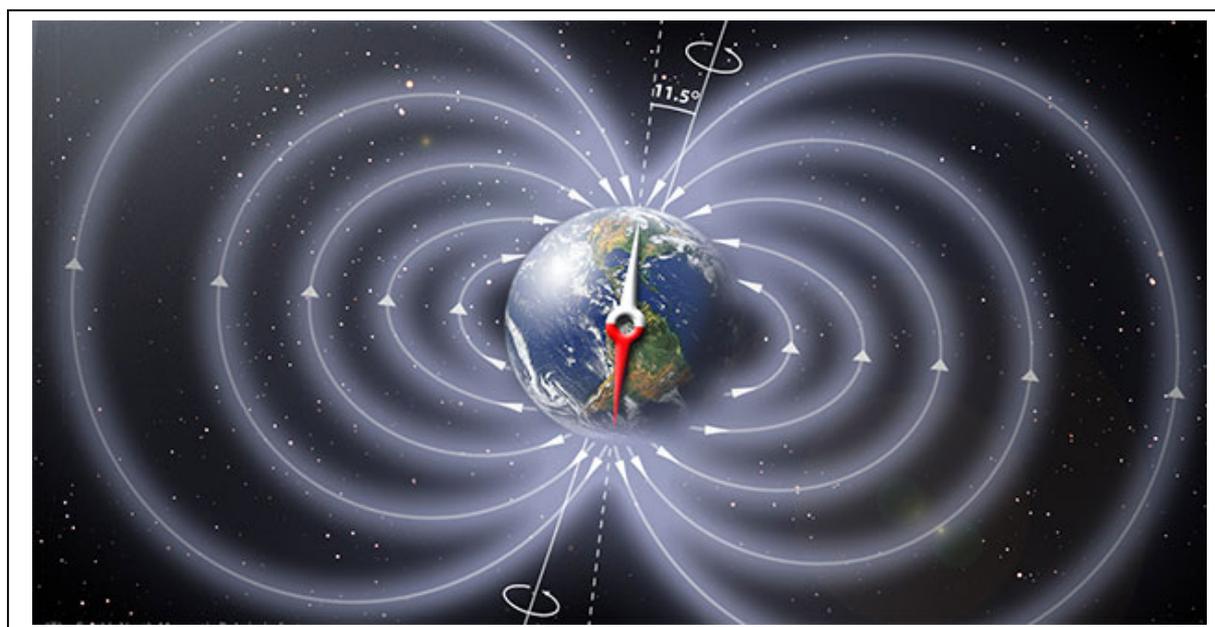


Figura 3.1 - Ilustração do campo geomagnético, mostrando a orientação das linhas, bem como a inclinação entre os polos magnéticos e o eixo de rotação da Terra (<http://www.epa.gov>).

A região acima da Ionosfera, que se estende para dezenas de milhares de quilômetros para dentro do espaço sideral é a Magnetosfera, que será melhor explicada no item 3.5, que protege o planeta do vento solar, e até de raios cósmicos menos energéticos. Tanto o vento solar como os raios cósmicos poderiam provocar

danos às camadas mais altas da atmosfera, inclusive a camada de ozônio que protege a Terra da radiação ultravioleta.

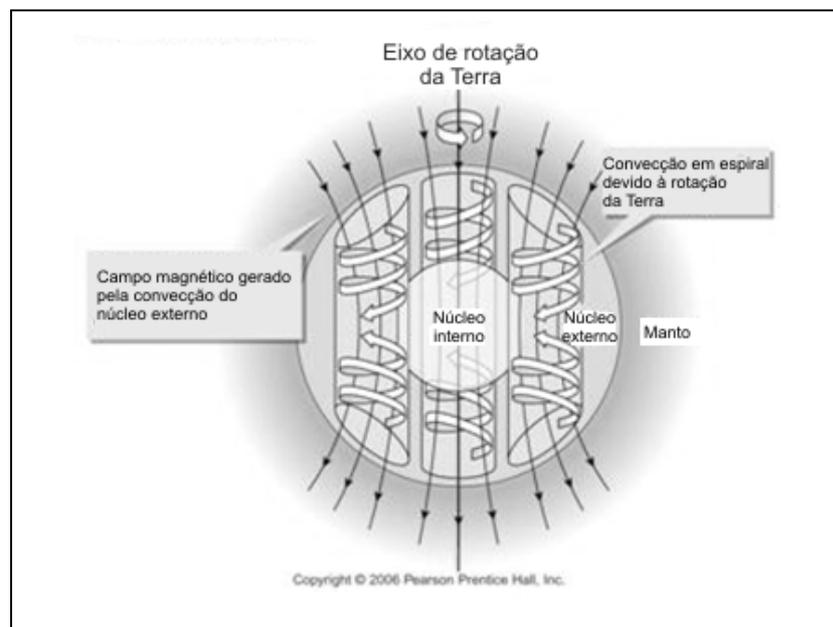


Figura 3.2 - Ilustração do mecanismo do geodínamo (<http://gomyclass.com/geology10>).

3.1 – Componentes Geomagnéticas

O campo geomagnético é sempre representado por um sistema de coordenadas tridimensionais (Merril et al., 1983), visto na figura 3.3:

\vec{F} é a intensidade do campo;

\vec{H} é a componente horizontal;

\vec{D} é a declinação, o ângulo entre o campo e o Norte geográfico;

\vec{I} é a Inclinação ou mergulho;

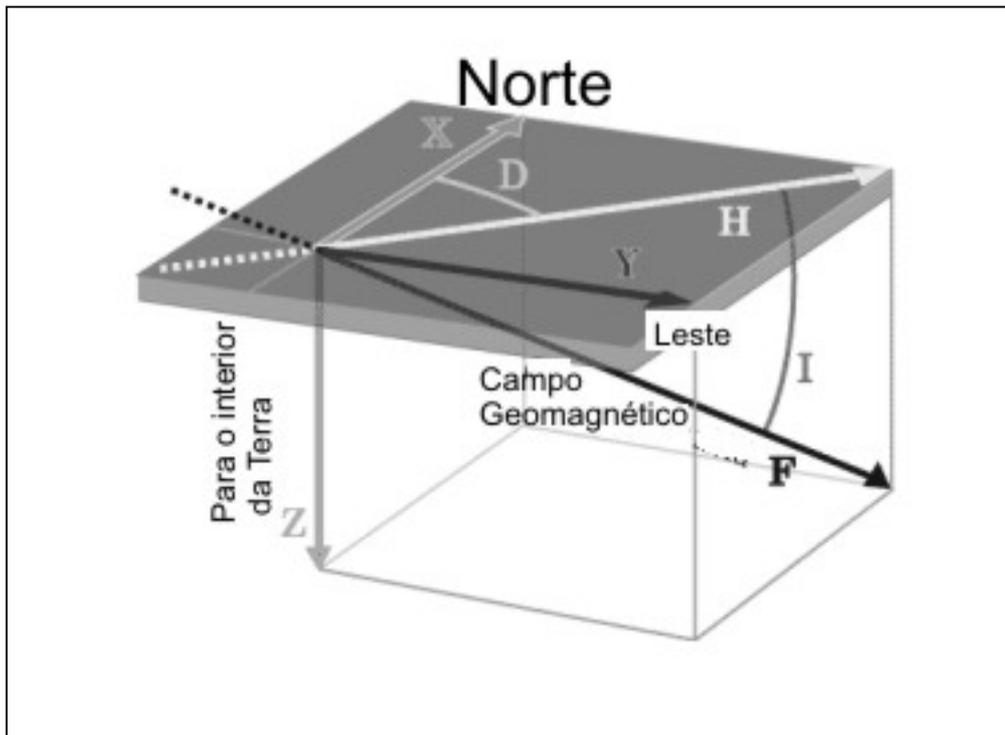


Figura 3.3 - Componentes geomagnéticas (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

A interpretação mais usual nos últimos anos é X (Norte), Y (Leste) e Z (para o interior), que é o padrão IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy).

A intensidade do campo geomagnético é maior nos polos do que em regiões equatoriais, devido à maior concentração de linhas de campo nessas regiões (Merrill et al., 1983).

A intensidade do campo geomagnético é medida em unidades de nanoTesla (nT) ou em gauss (G), sendo $1 \text{ G} = 100.000 \text{ nT}$, e o campo registra valores entre 25.000 e 65.000 nT (ou 0,25 e 0,65 G).

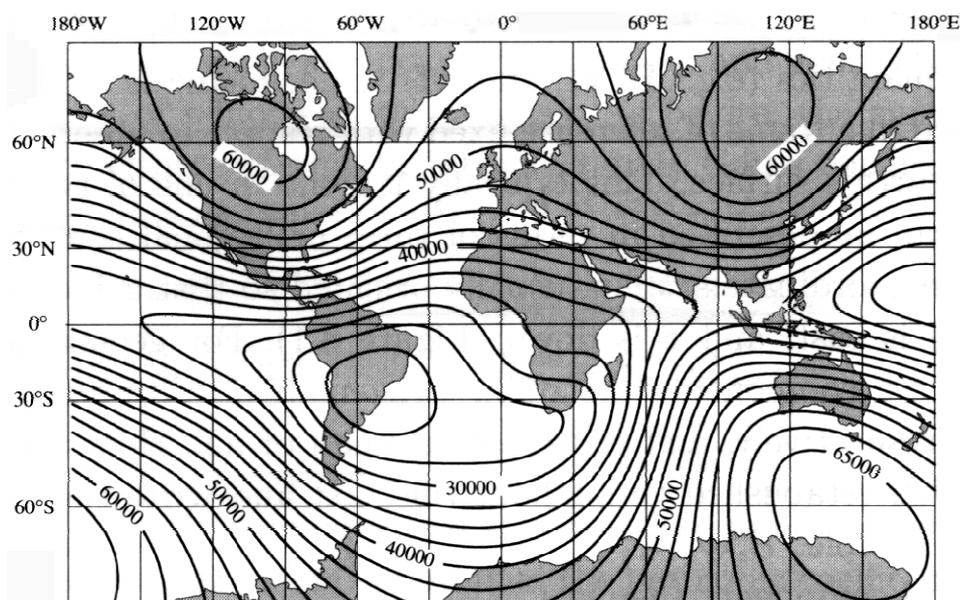


Figura 3.4 - Mapa da componente geomagnética \vec{F} do ano de 1990, com intervalos de 2500 nT. As latitudes e longitudes estão em divisões em 30 graus. (http://gravmag.ou.edu/mag_earth/magnetic_field_a.gif).

Através de medidas, é criado um mapa de contorno de intensidade do campo, chamado carta isodinâmica, onde vemos um mínimo de intensidade na América do Sul (a Anomalia Magnética do Atlântico Sul), enquanto temos valores máximos no Norte do Canadá, Sibéria, na costa da Antártica e Sul da Austrália. A figura 3.4 mostra o mapa da componente geomagnética \vec{F} do ano de 1990.

A componente horizontal do campo geomagnético pode ser vista como a projeção da intensidade do campo geomagnético no plano formado pelas coordenadas geográficas Norte e Leste (Matzner, 2001). Ela é voltada para o sentido Sul-Norte geomagnético, e fica paralela à superfície da Terra, sendo assim, a componente mais sensível às variações geomagnéticas globais.

A inclinação é medida em relação ao plano horizontal em valores que ficam entre -90° (para cima) a 90° (para baixo). No polo Norte magnético, o coseno diretor aponta perpendicularmente para baixo, gira enquanto a latitude diminui até estar horizontal (0°) no Equador magnético (que não coincide com o Equador geográfico), e continua a girar no sentido para cima até estar totalmente virado nesse sentido, logo acima do Polo Sul magnético, conforme Merrill et al. (1983) e Matzner (2001). A figura 3.5 mostra a carta isodinâmica do ano de 1990.

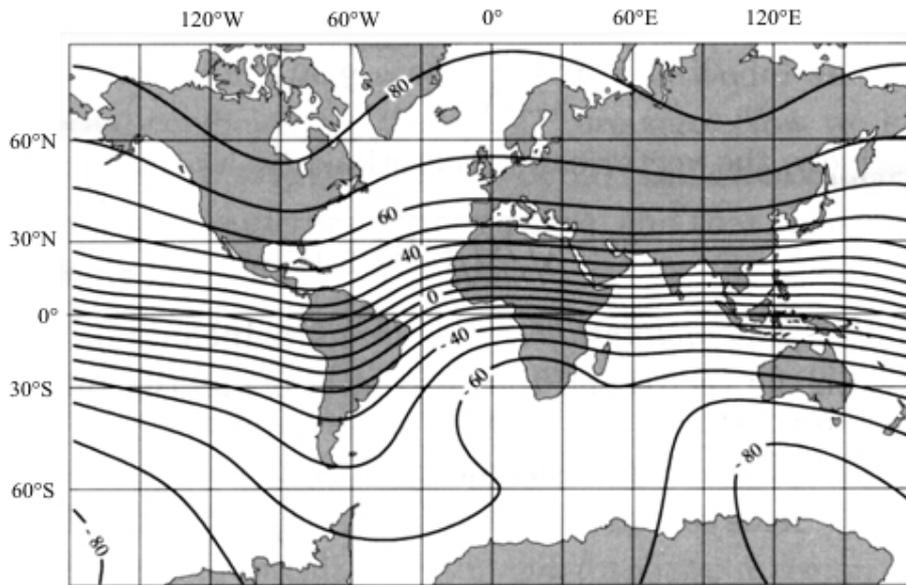


Figura 3.5 - Mapa da componente geomagnética \vec{I} , do ano de 1990, com intervalos de contorno de 10° . As latitudes e longitudes estão em divisões em 30 graus. (http://gravmag.ou.edu/mag_earth/magnetic_field_a.gif).

A declinação é positiva para um desvio na direção Leste do campo geomagnético em relação ao Norte geográfico. Ela pode ser estimada por comparações entre os polos Norte/Sul magnéticos, feitas por uma bússola que aponta na direção de um polo celeste (Merril et al., 1996).

As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram os mapas de contorno da Intensidade, inclinação e declinação do campo geomagnético, sendo referentes ao ano de 1900, conforme o World Magnetic Model (WMM), produzido pelo “National Geophysical Data Center” (NGDC) em colaboração com o “British Geological Survey” (BGS).

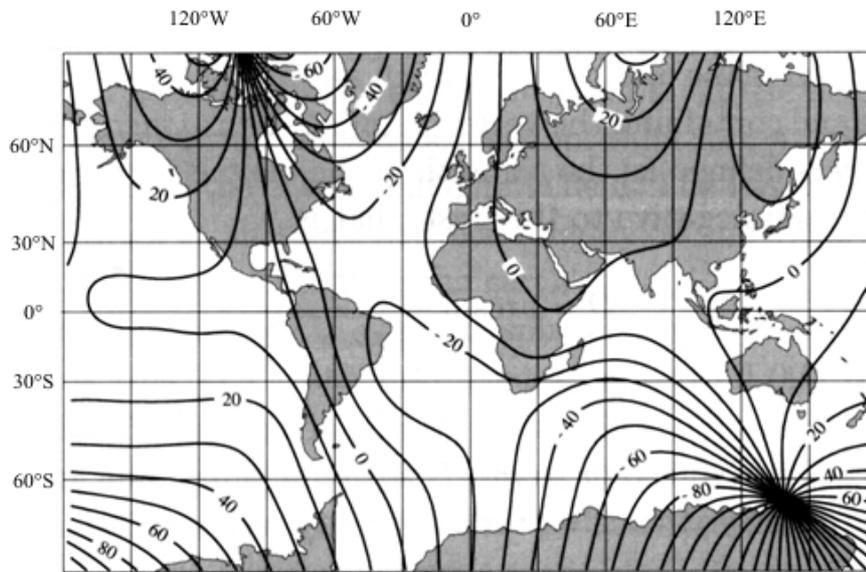


Figura 3.6 - Mapa da componente geomagnética \vec{D} , do ano de 1990, com intervalos de contorno de 10° . As latitudes e longitudes estão em divisões em 30 graus. (http://gravmag.ou.edu/mag_earth/magnetic_field_c.gif).

Os mapas costumam trazer informações sobre a declinação como um ângulo ou um pequeno diagrama mostrando relação entre os polos Norte Magnético e Geográfico. As informações regionais da declinação são vistas em mapas de curvas isogônicas (ou seja, onde cada uma das linhas representa um valor de intensidade).

As relações para a obtenção das intensidades de cada uma das componentes geomagnéticas são dadas pelas equações 3.0:

$$\begin{aligned}
 X &= H \cos D & H &= (X^2 + Y^2)^{1/2} \\
 Y &= H \sin D & F &= (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} & \text{Eq. 3.0} \\
 Z &= F \sin I & \tan D &= Y/X \\
 H &= F \cos I & \tan I &= Z/D
 \end{aligned}$$

3.2 – Aproximação dipolar

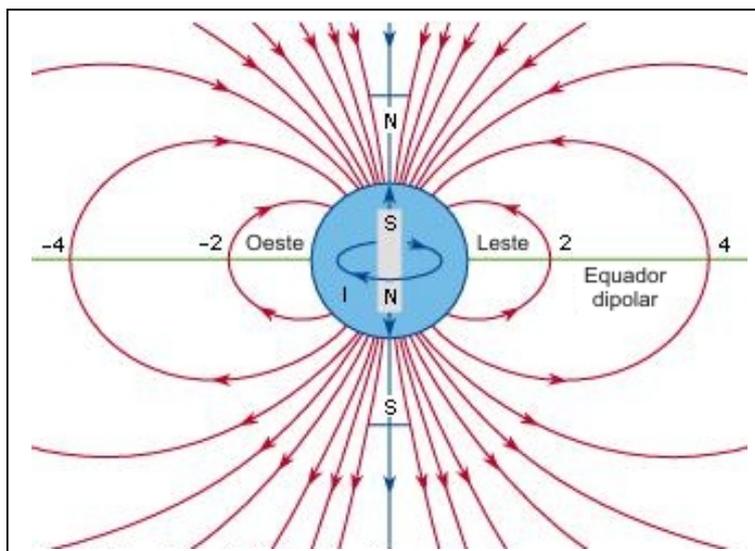


Figura 3.7 - Ilustração da aproximação dipolar do campo geomagnético (<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/229754/geomagnetic-field>).

Próximo à superfície da Terra, o campo geomagnético pode ser aproximado como o campo de um dipolo magnético (figura 3.7), que está posicionado no centro do planeta e inclinado em aproximadamente 11° em relação ao seu eixo de rotação (Merril et al., 1986). O campo dipolar é responsável por aproximadamente 90% do campo geomagnético na maior parte do planeta (Merril et al., 1996). Os outros 10% são devido à contribuição magnética não dipolar. E ambos os campos magnéticos (dipolar e não-dipolar) são variáveis no tempo.

3.3 – Polos Magnéticos

Basicamente, são as posições em que as linhas do campo geomagnético atravessam a crosta terrestre (figura 3.8), aflorando no Sul magnético e penetrando no Norte, sem coincidir com os polos geográficos da Terra, mesmo porque existem termos não dipolares contribuindo para o campo geomagnético.

Os polos magnéticos da Terra podem ser determinados verificando onde o campo geomagnético é completamente vertical, por exemplo, usando de uma bússola.

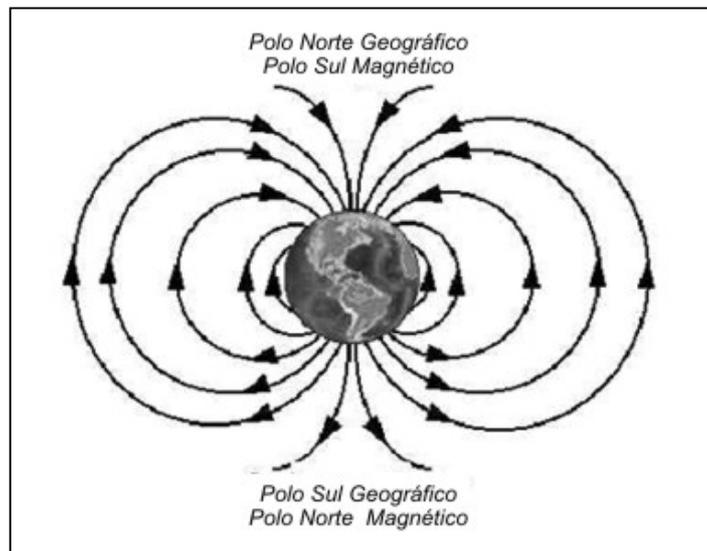


Figura 3.8 - Ilustração dos polos magnéticos da Terra
(http://outreach.phas.ubc.ca/phys420/p420_01/shaun/shaun/why_it_works.htm)

Um fato que ainda deve ser exposto para uma melhor caracterização dos polos magnéticos da Terra é que o Equador Magnético é a linha de referência onde a inclinação é zero, ou seja, o campo é horizontal, conforme Merrill et al. (1986).

3.4 – Variações temporais

O campo geomagnético possui uma dinâmica não só espacial, mas também temporal, sendo que as escalas de tempo vão de milissegundos (10^{-3} s) até milhões de anos (Merrill et al., 1986). As escalas menores estão associadas às variações das correntes elétricas na ionosfera e na magnetosfera, sendo que algumas são indicações de tempestades geomagnéticas. Já as de maior escala, de um ano ou maiores ainda, são atribuídas a variações nas colunas convectivas de ferro do núcleo externo da Terra, e essas formam o conjunto chamado de variação secular.

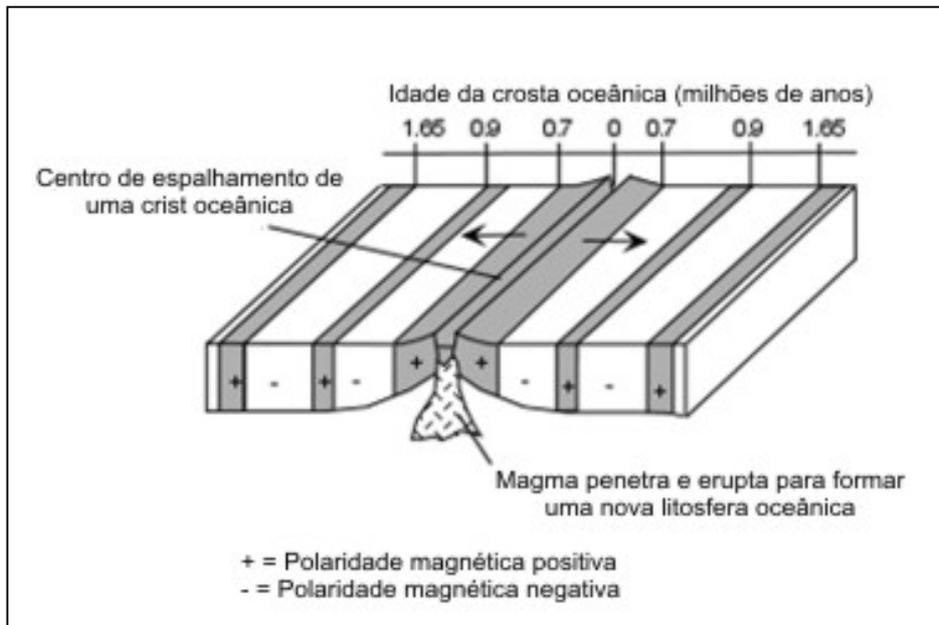


Figura 3.9 - Ilustração do padrão magnético deixado no fundo do oceano devido às reversões de polaridade do campo geomagnético (<http://earthsci.org/education/teacher/basicgeol/platec/platec.html>).

Em escala de milhões de anos, o campo da Terra sofre reversões, cuja prova é encontrada nos padrões de listras presentes em zonas de acreção em cristas oceânicas, conforme a figura 3.9, vistos graças a estudos paleomagnéticos realizados para calcular os movimentos dos continentes e fundos oceânicos devido à tectonia de placas (Turcotte et al., 2002).

A inclinação do campo geomagnético é 90° no polo Norte magnético e -90° no Sul magnético, sendo que os dois variam de posição independentemente, e não estão em posições diametralmente opostas no globo. A excursão de ambos é relativamente rápida em escalas geológicas, já que movimentos acima dos 40 km/ano foram registrados para o polo Norte.

Há também excursões do polo Norte Magnético, conforme ilustra a figura 3.10., sendo estas mais curtas (que vão de anos até décadas).

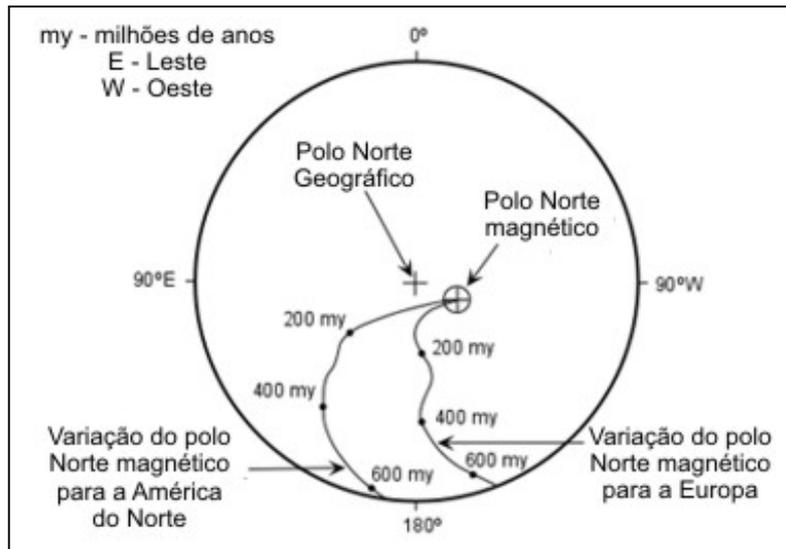


Figura 3.10 - Ilustração da excursão do polo norte magnético da Terra (<http://earthsci.org/education/teacher/basicgeol/platec/platec.html>).

3.5 – Magnetosfera da Terra

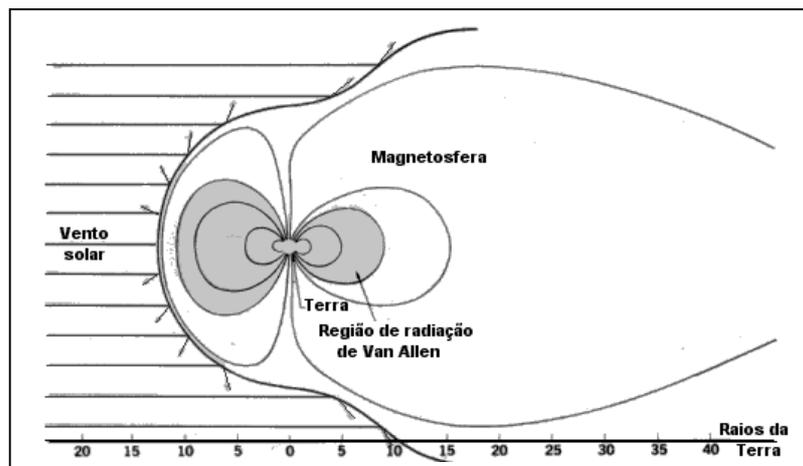


Figura 3.11 - Ilustração da magnetosfera da Terra (http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_T01.asp).

A Magnetosfera de nosso planeta (figura 3.11) é a região no espaço, acima da atmosfera, que é moldada pela interação entre o campo geomagnético, o plasma do vento solar (cuja velocidade é reduzida pelo encontro com as linhas do campo geomagnético), e o campo magnético interplanetário (Koskinen, 2011). Os traços mais distintos de sua geometria são a Magnetopausa e a cauda. A Magnetopausa é a fronteira abrupta entre o campo geomagnético e o vento solar, equilibrada pelas

pressões dinâmicas (ou seja, variáveis no tempo) do plasma vindo do Sol e do campo magnético da Terra. Fica voltada para o Sol e se localizada a aproximadamente $15 R_T$ de distância ($9,56 \times 10^4$ km). A cauda magnética é formada pelas linhas do campo geomagnético que são arrastadas pelo vento solar. Ela assume a forma aproximada de um cilindro com raio de $20-25 R_T$ ($1,27 \times 10^5 - 1,30 \times 10^5$ km), e cuja extensão ultrapassa os $200 R_T$ ($1,3 \times 10^6$ km), já que não se tem conhecimento de onde as linhas de campo se fecham (Matzner, 2001).

Contida dentro da Magnetosfera da Terra, existe a Geocoroa (figura 3.12), uma envoltória de gás neutro composta de átomos leves como H e He, que se estende além de $4-5 R_T$ (entre $2,6 \times 10^4$ e $3,2 \times 10^4$ km), com densidade que vai diminuindo conforme ela se estende. Nela, os íons aquecidos do plasma da Magnetosfera adquirem elétrons devido às colisões com os da Geocoroa, e assim surge o brilho de átomos neutros energizados (ENA, Energized Neutral Atoms), visto em imagens feitas pelos satélites IMAGE e Twins (Brandt et al., 2005).

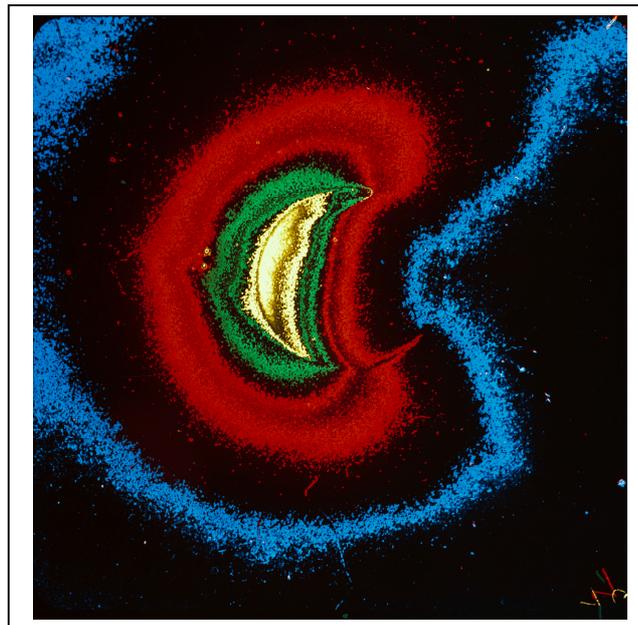


Figura 3.12 - Foto da geocoroa da Terra no Ultravioleta feita pela missão Apolo (<http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/apollo/apollo16/html/s72-40818.html>).

Logo acima da Ionosfera, está a Plasmasfera (Matzner, 2001), mostrada na figura 3.13, que também se estende além de $4-5 R_T$ com densidade que vai diminuindo, além da qual se transforma em um fluxo de íons leves, que é chamado

de vento polar, que sai da Magnetosfera e se funde ao vento solar. A energia aquece os átomos mais pesados da atmosfera (tais como O_2 , e N_2), que comumente não escapam do campo gravitacional da Terra, mas com este aumento de energia provocado pelo aquecimento (que é bastante variável), estes elementos mais pesados que estão na Ionosfera ou na própria atmosfera, durante períodos geomagneticamente perturbados, podem fluir em forma de plasma a partir de zonas aurorais pela Magnetosfera, chegando à Geocoroa, e por vezes flui para fora da Magnetopausa.

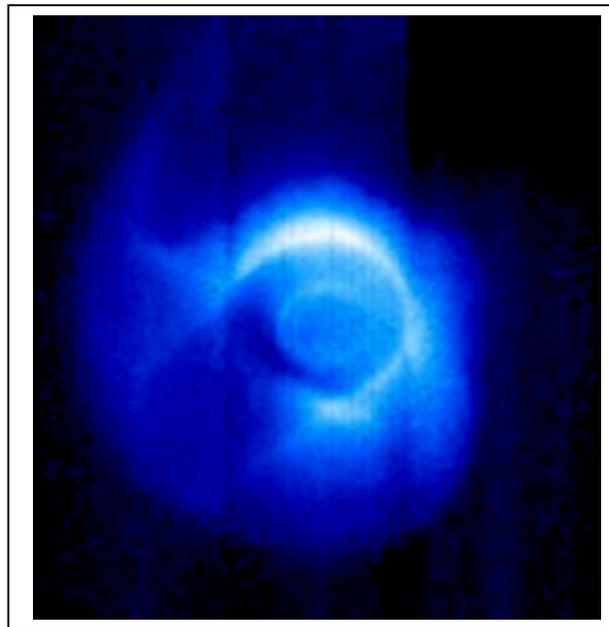


Figura 3.13 - Foto da plasmasfera da Terra (<http://observatorio.info/2001/01/plasmasfera-terrestre/>).

Em síntese, o comportamento da magnetosfera da Terra depende de dois fatores para determinar seu comportamento, geometria e variações: o campo interno do planeta, e o vento solar (Matzner, 2001).

A intensidade do campo dipolar do planeta decai com o inverso do cubo da distância de seu valor original citando anteriormente, enquanto harmônicos esféricos de ordens maiores diminuem muito rapidamente, o que torna o dipolo geomagnético a única fonte interna importante para a magnetosfera.

Já o vento solar, além do que já foi descrito antes, estica e molda as linhas do campo heliomagnético, e são justamente estas linhas que geram o campo

magnético interplanetário. A 1 UA, o vento solar possui uma intensidade média de 5×10^{-5} G, no plano da eclíptica (Matzner, 2001).

O plasma do vento solar, embebido com o campo magnético interplanetário, não se mistura ao plasma terrestre, devido à presença da própria magnetosfera e aos complexos sistemas de correntes elétricas das regiões do campo geomagnético mais externo, e ambas as formas de plasma são separadas por uma fronteira, a Magnetopausa, que confina à Magnetosfera o plasma terrestre. Mas devido a eventos físicos secundários que ocorrem na região – como a reconexão magnética – o isolamento não é pleno, e o plasma do vento solar consegue transmitir energia adentro da Magnetosfera durante variações geomagnéticas globais intensas.

3.6 – Ionosfera da Terra

A ionosfera é a uma das camadas mais externas da atmosfera superior, que se estende de 80-90 até 500 km de altitude (Matzner, 2001), abrangendo partes da mesosfera, termosfera e exosfera (figura 3.14). Ela é caracterizada por ser uma camada ionizada pela radiação solar, formando a parte mais interna da magnetosfera terrestre. Ela é importante no estudo das correntes elétricas atmosféricas, bem como para a propagação de ondas de rádio, pois funcionando como um refletor das ondas permite que comunicações a grandes distâncias sejam possíveis (Matzner, 2001).

Sendo uma camada que envolve a Terra, composta por elétrons, átomos eletricamente carregados e moléculas, a ionosfera existe primariamente devido à radiação ultravioleta do Sol.

Na estratosfera terrestre, acima de 10 km de altitude, a radiação solar cria a camada de ozônio, e em alturas acima de 80 km, já na região da termosfera, a atmosfera é tão tênue que permite a existência de elétrons livres por curtos períodos de tempo, antes que eles sejam capturados por um íon positivo nas vizinhanças. A quantidade desses elétrons livres é suficiente para afetar a propagação das ondas de rádio. No plasma ionosférico, os elétrons livres (com carga negativa) e os íons (carga positiva) embora atraídos pela força de Coulomb, possuem energia cinética muito elevada e não se estabilizam em moléculas neutras.

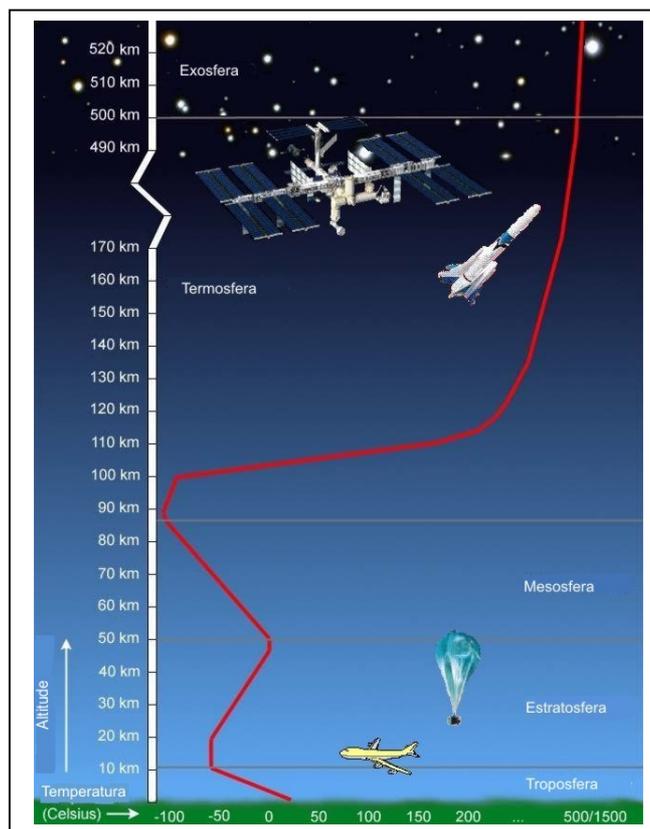


Figura 3.14 - Ilustração da distribuição de temperatura (em °C) na atmosfera da Terra. A Ionosfera se situa na região entre 80-90 e 500 km de altitude (<http://www.dae.inpe.br/~clezio.denardin>).

A radiação ultravioleta (UV), raios X e outros de comprimentos de onda mais curtos provenientes da radiação solar são ionizantes, já que fótons nessas frequências possuem energia suficiente para arrancar um elétron de um átomo de gás neutro. Neste processo, os elétrons, sendo partículas mais leves, ganham uma velocidade alta (e assim, uma energia cinética elevada), de modo a que a temperatura do gás é muito mais elevada (da ordem dos milhares de Kelvin) do que a de íons e partículas neutras. O processo inverso de ionização é o de recombinação, em que um elétron livre é "capturado" por um íon positivo, que ocorre espontaneamente. Esta gera a emissão de um fóton, que leva consigo energia liberada na recombinação. Como a densidade do gás cresce em altitudes mais baixas, o processo de recombinação prevalece, uma vez que os íons e as moléculas de gás são mais próximos. O equilíbrio entre estes dois processos determina a quantidade de ionização que ocorre (Mims, 1994).

A ionização na ionosfera depende principalmente do Sol e sua atividade (Mims, 1994), e assim a quantidade de partículas ionizadas varia muito com a taxa de radiação recebida do Sol. Logo, existe um efeito que depende da hora do dia e um efeito sazonal. No inverno a incidência solar é mais angulada de modo que existe menos radiação solar efetiva disponível para a ionização. Embora bem menor que as modulações diurna e sazonal, a atividade do Sol associada com o ciclo de 11 anos também modula a ionosfera, sobretudo seus níveis mais externos. A radiação recebida igualmente depende da localização geográfica (zonas polares e aurorais, latitudes médias e regiões equatoriais). De particular importância no contexto deste trabalho, erupções solares e a liberação associada de partículas carregadas pelo vento solar, que atingem a Terra e interagem com o campo geomagnético, também causam perturbações ionosféricas.

3.6.1 – Camadas da ionosfera

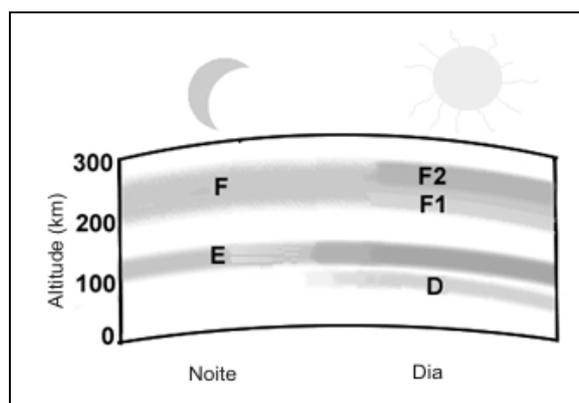


Figura 3.15 - Ilustração das camadas ionosféricas em relação ao período do dia e da noite (<http://www.weather.nps.navy.mil>).

3.6.1.1 – Camada D

A camada D é a parte mais interna da ionosfera (figura 3.15), que se estende de 60 a 90 quilômetros acima da superfície da Terra. A ionização aqui é devido à radiação da série hidrogênio-alfa de Balmer, em $\lambda = 121,5$ nm, ionizando o óxido nítrico (NO). Além disso, com alta atividade solar, raios X duros (que possuem $\lambda < 1$ nm) podem ionizar o óxido nítrico (N_2) e oxigênio molecular (O_2).

Durante a noite, os raios cósmicos produzem uma quantidade residual de ionização. A recombinação é grande na camada D, o efeito líquido de ionização é baixo, bem como ondas incidentes tem grandes perdas de energia da onda devido a colisões frequentes com elétrons (Matzner, 2001). Como resultado, ondas de rádio de alta frequência (HF) não são refletidas pela camada D, mas sofrem a perda de energia nela. Esta é a razão principal para a absorção de ondas de rádio HF, particularmente a 10 MHz e abaixo dessa frequência, com a absorção progressivamente menor à medida que a frequência fica maior. A absorção é pequena à noite, e maior por volta de meio dia. A camada diminui de extensão consideravelmente depois do pôr do Sol, mas uma pequena parte permanece existindo à noite devido aos raios cósmicos galácticos (figura 3.16).

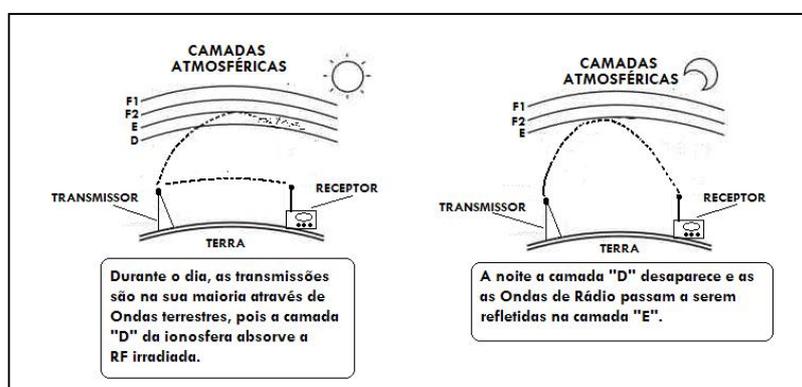


Figura 3.16 - Ilustração das camadas ionosféricas em relação ao período do dia, e sua interferência em sinais de rádio (<http://files.logicamaxtec.webnode.com.br>).

Durante os eventos de solares, a ionização pode chegar a níveis anormalmente elevados na camada D nas mais altas latitudes e regiões polares. Tais eventos muito raros são conhecidos como Polar Cap Absorption (PCA, absorção de capa polar) (Perrone et al., 2004), eventos devidos à alta ionização, que aumentam significativamente a absorção de sinais de rádio que passam através da região. Na verdade, os níveis de absorção podem aumentar durante eventos intensos, o que é suficiente para absorver a maioria (se não todas) as transmissões de HF de sinais de rádio transpolares; felizmente estes eventos geralmente duram menos de 24 horas, mas podem chegar até 48 horas.

3.6.1.2 – Camada E

A camada E é aquela situada no meio da ionosfera (figura 3.15), indo de 90 a 120 km de altitude acima da superfície da Terra (Matzner, 2001). A ionização é devido aos raios-X entre 1 e 10 nm, e raios ultravioleta da radiação solar atuando sobretudo no oxigênio molecular (O_2). Em incidência oblíqua esta camada normalmente só pode refletir ondas de rádio tendo frequências inferiores a cerca de 10 MHz, contribuindo pouco para a absorção de frequências mais altas. No entanto, durante intensos eventos esporádicos, a camada E_s pode refletir frequências de até 50 MHz e superiores. A estrutura vertical da camada E é principalmente determinada pelos efeitos concorrentes de ionização e recombinação. Durante a noite, a camada E desaparece de maneira rápida, pois a principal fonte de sua ionização não está mais presente. Após o pôr do Sol, há um aumento da altura da camada, e no máximo da camada E aumenta o intervalo no qual as ondas de rádio podem viajar por reflexão a partir dela (Koskinen, 2011).

3.6.1.3 – Camada E_s

A camada de E_s (E Sporadic, ou seja, camada E esporádica) é caracterizada por pequenas nuvens tênues de intensa ionização, que podem suportar a reflexão das ondas de rádio, abaixo de 225 MHz. Os eventos esporádicos, mencionados acima, podem durar de alguns minutos até várias horas, e fazem com que a propagação de ondas de rádio amador atinja bandas de frequência que, em geral, são inacessíveis. Existem múltiplas causas para a existência da camada E_s (Shi et al., 2009), desde fenômenos solares, até sísmicos, climáticos e outros ainda em estudo. Essa propagação ocorre mais frequentemente durante os meses de verão, quando níveis elevados de propagação de sinal podem ser atingidos.

3.6.1.4 – Camada F

A camada F estende-se de aproximadamente dos 200 km a mais de 500 km acima da superfície da Terra, sendo a camada mais extensa da ionosfera, o que implica que sinais que consigam penetrar por esta camada são capazes de prosseguir para espaço interplanetário. Esta é a camada mais externa da ionosfera

(Koskinen, 2011). Nela a radiação solar ultravioleta extrema (UV, 10-100 nm) ioniza os átomos de oxigênio, porém nesta altitude a quantidade de íons de oxigênio é pequena, e íons mais leves, como hidrogênio e hélio, se tornam mais proeminentes.

A camada F é constituída por uma única camada à noite, pois durante o dia, surge uma deformação no perfil que é rotulada F1. A camada F2 permanece dia e noite (sendo que no período é chamada apenas de camada F), e é responsável pela propagação de ondas de rádio, facilitando as comunicações que utilizam altas frequências (HF, ou ondas curtas) em longas distâncias (Matzner, 2001).

3.6.2 – Modelo da ionosfera e anomalias

A ionosfera é modelada matematicamente como uma função que tem por variáveis: local, altura, dia do ano, fase do ciclo de 11 anos e atividade geomagnética. Em termos de Geofísica, o estado do plasma ionosférico é descrito pelos seguintes parâmetros: densidade de elétrons, temperatura dos elétrons existentes, temperatura dos íons existentes, e composição iônica, pois vários tipos de íons podem estar presentes. Assinale-se que a propagação das ondas de rádio depende unicamente da densidade de elétrons.

Usando dados vindos de uma rede de ionosondas, analisa-se a densidade de elétrons, e por meio dela, atualiza-se anualmente o modelo IRI (International Reference Ionosphere) (Bilitza et al., 2008), que é um projeto mantido pelo Committee on Space Research (COSPAR) e pela International Union of Radio Science (URSI). Atualmente, este é o modelo ionosférico padrão, mas mesmo ele não consegue descrever algumas anomalias que ocorrem na ionosfera (Bilitza, 2001), como veremos a seguir.

3.6.2.1 – Anomalia de inverno

Picos na intensidade de elétrons no hemisfério onde é inverno em latitudes medianas sofrem um aumento acima dos picos de densidade média de elétrons. Este fenômeno é chamado anomalia de inverno, e é mais evidente durante os períodos diurnos nos máximos dos ciclos solares. As causas da anomalia de inverno

estão ligadas a várias fontes, e mais recentemente, se atribui à variações químicas associadas aos ventos na alta atmosfera. (Matzner, 2001).

3.6.2.2 – Anomalia equatorial

Compreendida na região entre ± 20 graus do equador geomagnético, está a anomalia equatorial (figura 3.17), que é a ocorrência de uma ‘calha’ de ionização.

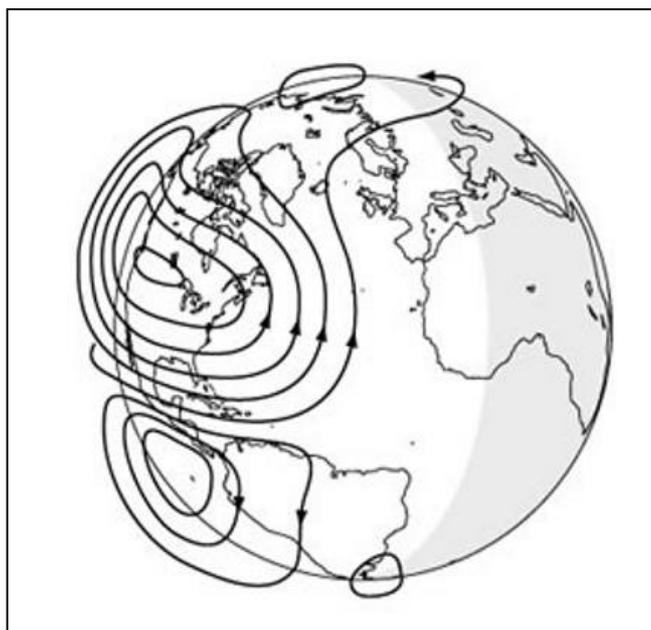


Figura 3.17 - Ilustração anomalia equatorial na ionosfera (<http://www.everythingselectric.com/forum/index.php?topic=170.0>).

No equador geomagnético as linhas do campo magnético da Terra são horizontais. O aquecimento solar e oscilações na parte mais baixa da ionosfera elevam o plasma, que se orienta pelas linhas magnéticas. Isso causa uma faixa de corrente elétrica na camada ionosférica E, que juntamente com as linhas de campo magnético horizontais, força a ocorrência de ionização no interior da camada F. O fenômeno se concentra na região de ± 20 graus a partir do equador geomagnético, sendo chamado de fonte equatorial (Matzner, 2001).

3.6.2.3 – Eletrojato equatorial

O eletrojato equatorial (figura 3.18, a faixa azul denominada EEJ) é uma faixa estreita de corrente que flui de Oeste para Leste na região equatorial da ionosfera durante o período diurno (Matzner, 2001).

A causa do eletrojato equatorial é o efeito do vento solar nos períodos de Sol calmo (SQ – Solar quiet) sobre o sistema de correntes da camada E da ionosfera. Isto resulta em um campo eletrostático dirigido na direção leste-oeste (Dawn-Dusk, ou amanhacer-anoitecer) (Denardini, 2007), no lado diurno equatorial da ionosfera.

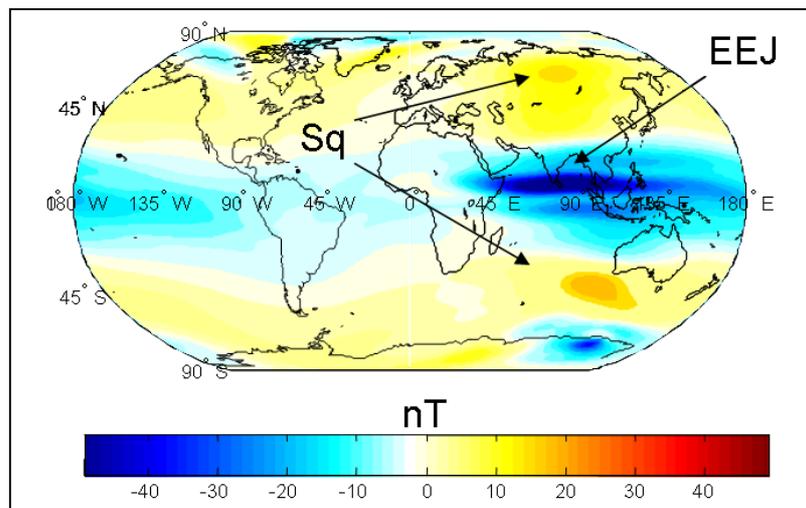


Figura 3.18 - Gráfico mostrando a existência do eletrojato equatorial. Na figura, W – Oeste, E – Leste, SQ – Solar Quiet, EEJ – Equatorial Electrojet) (http://www.absoluteastronomy.com/topics/Equatorial_electrojet).

3.7 – Cinturões de Van Allen

Com o uso dos primeiros satélites artificiais, foram detectados pela primeira vez os cinturões radiativos do planeta Terra, já que os mesmos são confinados acima de 1.000 km pelo campo geomagnético (Baker et al., 2004).

O cinturão interno, detectado pelas missões Explorer I e II (EUA) e Sputnik III (URSS), é formado por prótons tendo energias entre 10 e 100 MeV, através de um efeito secundário da interação da radiação cósmica e a alta atmosfera da terra. O centro deste cinturão está acima do Equador, por volta de 1 R_T de distância da superfície terrestre, conforme Baker et al. (2004) (figura 3.19).

Mais tarde foram observadas quantidades de íons e elétrons enclausurados em linhas de campo cruzando o Equador entre 2,5 e 8 R_T . As partículas de altas energias (≈ 1 MeV) formam o chamado cinturão externo, mas a maior parte é composta de partículas de energias mais baixas (≈ 65 KeV ou menores) formando o anel de corrente de plasma (ring current).

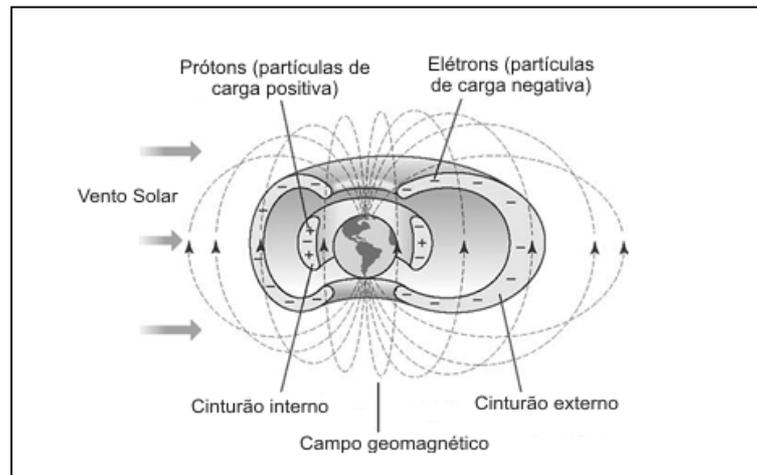


Figura 3.19 - Diagrama dos cinturões de Van Allen (<http://images.yourdictionary.com/images>).

O aprisionamento de partículas carregadas no cinturão interno é bastante estável, pois a criação de prótons aprisionados é lenta, da ordem de anos. O cinturão externo e a corrente de anel são menos resistentes, já que a troca de cargas em colisões de átomos na Geocoroa tendem a remover partículas. Isto sugere a existência de um mecanismo que abastece a região com plasma continuamente, possivelmente a partir de plasma de regiões inferiores, conforme Matzner (2001) e Horne et al. (2005).

3.8 – Correntes elétricas na magnetosfera

Os campos magnéticos que formam a magnetosfera têm sua origem no campo geomagnético interno, bem como nas correntes elétricas que fluem no plasma magnetosférico.

Os campos magnéticos que surgem das correntes elétricas que circulam no plasma magnetosférico estendem o magnetismo da Terra para além do previsto, tendo em vista apenas o campo interno.

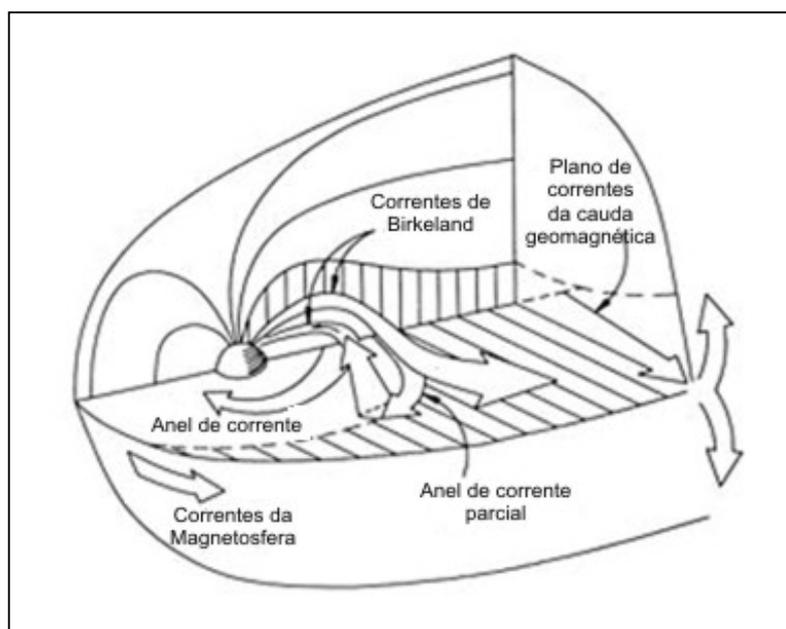


Figura 3.20 - Diagrama das correntes elétricas na atmosfera da Terra (lado diurno) (http://www.redorbit.com/education/reference_library/earth/atmosphere/2574990/ring_current/).

Correntes elétricas na Magnetosfera são causadas pela estrutura e movimento do plasma no campo magnético associado. Elétrons e íons positivos aprisionados no campo dipolar próximo à superfície tendem a circular em torno do eixo magnético do dipolo (a linha que liga os polos magnéticos) em um anel em torno do planeta, sem ganhar ou perder energia. Visto de cima do polo norte magnético (geográfico Sul), os íons circulam no sentido horário, e elétrons no sentido oposto, produzindo o conhecido anel de corrente (Matzner, 2001).

Esta corrente, por sua vez, modifica o campo geomagnético, pois o anel de corrente fortalece o campo magnético da Terra em seu exterior, o que ajuda a aumentar as dimensões da Magnetosfera. Mas ao mesmo tempo, enfraquece o campo dentro da Magnetosfera. Durante uma tempestade magnética o anel de corrente recebe mais plasma, fortalecendo-o um pouco mais, fazendo com que o campo geomagnético enfraqueça em torno de 1 a 2% de sua intensidade normal (Matzner, 2001).

A deformação do campo geomagnético e o fluxo de correntes elétricas nela estão ligados, sendo árduo se nominar qual efeito foi em decorrência do outro. Frequentemente, como visto em relação à Magnetopausa e à Magnetocauda, é bem mais usual adotar a distribuição e fluxo de plasma como efeito primário, sendo a produção da estrutura magnética que é observada, e de decorrentes correntes elétricas, sendo apenas uma manifestação da primeira.

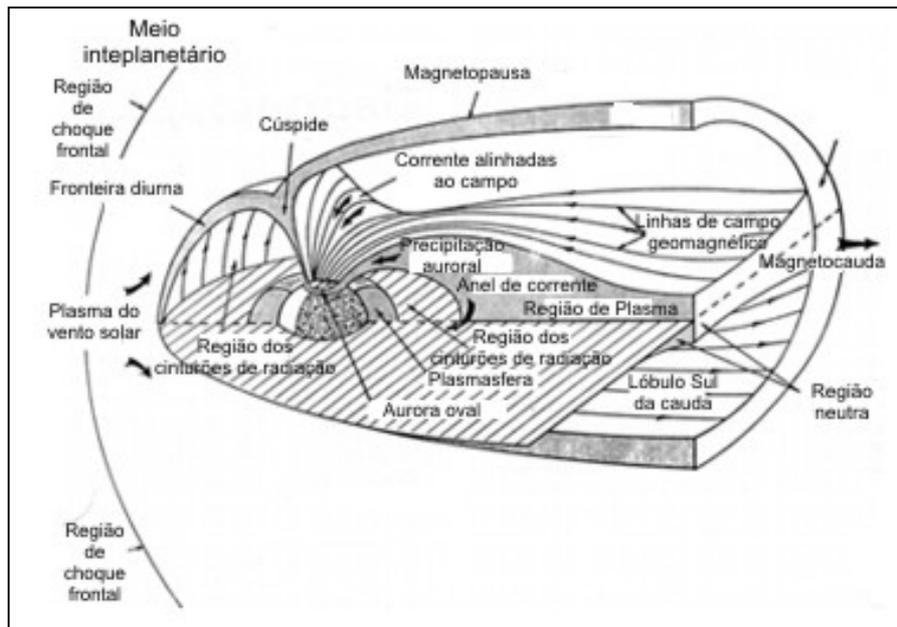


Figura 3.21 - Diagrama das correntes elétricas na atmosfera (lado noturno) (http://www.redorbit.com/education/reference_library/earth/atmosphere/2574990/ring_current/).

Além disso, existem correntes induzidas na Terra que são geradas por tensão elétrica, como as de Birkeland, (Matzner, 2001). Estas fluem do espaço interplanetário para o interior da ionosfera próximo aos polos, penetram um pouco na ionosfera, e retornam ao espaço.

Em escala global há dois tipos de correntes magnetosféricas que podem ser identificados:

1 - Um campo convectivo de correntes, que se origina da interação do plasma do vento solar com o campo magnético dos polos, que se direciona da alvorada para o anoitecer;

2 - Um campo co-rotacional, que é gerado em um referencial que a co-rotaciona, para compensar a força de Lorentz.

O plasma termal co-rotaciona dentro da magnetosfera com a Terra, logo, reage com a soma desses dois campos. A configuração da soma desses dois potenciais tem uma região interna parecida com a de um toro, composta de linhas de potenciais elétricos fechadas, nas quais partículas ionizadas de energia térmica são enclausuradas. Fora dela, na região conhecida como plasmopausa, as partículas se propagam para o espaço interplanetário, conforme Matzner (2001) e Koskinen (2011).

O campo elétrico convectivo causa a separação de cargas na magnetopausa. Logo, as correntes de Birkeland fluem alinhadas ao campo para dentro das zonas aurorais da ionosfera no lado diurno e para o exterior no lado noturno da Terra, e a 100 ou 200 km do solo, na região do dínamo ionosférico, ou seja, o sistema de correntes elétricas na ionosfera.

As correntes elétricas citadas acima podem ser vistas nas figuras 3.20 e 3.21.

3.9 – Classificação dos campos de correntes da magnetosfera

Sejam fontes ou consequências da estrutura do campo da magnetosfera, as correntes elétricas fluem em circuitos fechados, úteis para mapear a própria magnetosfera. Uma classificação das diferentes partes do campo magnético da magnetosfera é útil, cada um associado com um tipo distinto de circuito. Deste modo, o campo da magnetosfera é muitas vezes resolvido em 5 partes distintas, como se segue.

01 - O campo interno, já comentado anteriormente, que surge das correntes elétricas no núcleo externo convectivo do planeta.

02 - O campo associado ao anel de correntes: arrastado pelo plasma enclausurado pelo campo dipolar da Terra (Matzner, 2001), que dista de 4 a 6 R_T , sendo menor que isso durante grandes tempestades geomagnéticas. A corrente flui quase paralela ao Equador magnético, girando no sentido horário quando observado do hemisfério Norte.

03 - O campo que confina o plasma da Terra e o campo magnético dentro da cavidade magnetosférica: Estas correntes fluem na magnetopausa, a região entre a magnetosfera e o vento solar. O fluxo das correntes pode ser visto como uma extensão do campo geomagnético, em uma consequência da Lei de Ampère, no qual, neste caso, requer uma corrente elétrica para fluir por qualquer interface.

04 - O sistema de corrente na cauda: A cauda magnética consiste em dois lóbulos gêmeos de sentidos opostos do campo geomagnético, um na direção da Terra na metade norte, e para longe dela na metade do sul. Entre os dois feixes, existe uma camada de plasma (chamada 'plasma sheath'), composta de material mais denso (entre 0,30 e 0,50 íons/cm³) contrastando com a densidade menor do plasma existente nos lóbulos (0,01-0,02 íons/cm³), sendo que esse contraste de densidade é devido à diferença entre os campos magnéticos adjacentes, e há uma corrente elétrica, que se dirige na direção Leste-Oeste (amanhecer-anoitecer), decorrente da Lei de Ampère.

05 - Campo advindo das correntes de Birkeland: circuito associado com auroras polares. Diferente dos processos anteriores, este requer uma alimentação de energia constante para que ocorra o aquecimento da ionosfera e a aceleração dos elétrons das auroras e íons positivos existentes nela. Esta energia, provavelmente, vem de um processo de dínamo, seja alimentado pelo vento solar ou por plasma em movimento na cauda geomagnética.

04 - Tempestades Geomagnéticas



Figura 4.1 - Visão da ocorrência de uma aurora, observada do espaço (<http://rainydayss.com.br/nasa-grava-video-da-aurora-boreal-vista-do-espaco/>).

São perturbações na magnetosfera da Terra causadas por variações magnéticas no meio interplanetário. Constituem os maiores eventos do Clima Espacial, sendo causadas pelo choque do vento solar rápido e lento, ou por uma nuvem de campo magnético (formada pela interação do campo heliomagnético com o campo do meio interplanetário) que impinge e interage com o campo geomagnético. Gera-se uma estrutura que, quando possui uma componente magnética B_z orientada na direção do polo Sul (descrita muitas vezes na literatura como 'B_z negativa'). Esta estrutura, uma ICME (conferir 2.5), ao se chocar no lado diurno (magnetopausa) há a erosão das linhas de campo no lado diurno, uma vez que o campo geomagnético tem orientação para o Norte. Logo, as linhas se rompem e se reconectam magneticamente no lado noturno (voltado para a cauda geomagnética), conforme Kane (2006). A ocorrência de auroras (como mostrado na figura 4.1) é um indicativo que uma tempestade geomagnética está em curso, uma vez que as partículas energizadas do plasma devido à reconexão magnética são orientadas pelas linhas do campo geomagnético, espiralando em torno destas, e chegam aos polos, (Kane, 2006), liberando fótons de vários comprimentos de onda diferentes. Na figura 4.2, vemos a ilustração da ocorrência, e uma correspondente queda no valor do campo geomagnético.

O aumento da pressão do vento solar comprime a magnetosfera, e o campo magnético do vento solar interage com o da Terra e transfere uma quantidade de

energia para a magnetosfera, causando um aumento nas correntes elétricas da mesma e da ionosfera.

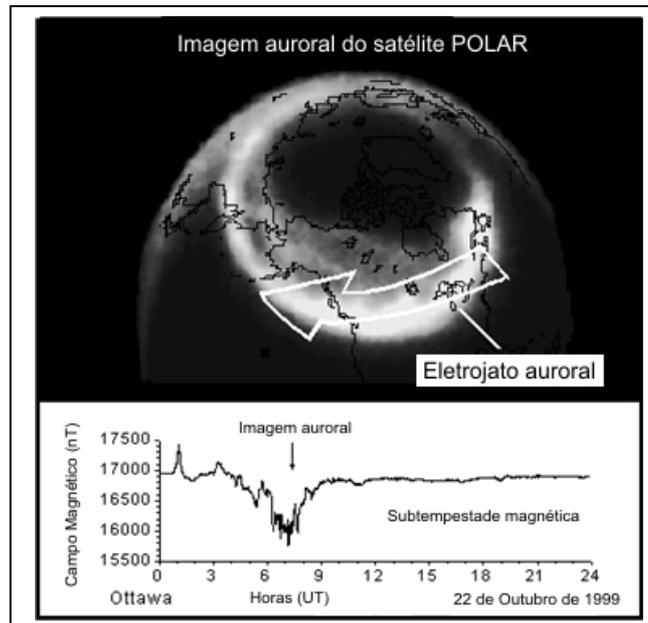


Figura 4.2 - Diagrama da ocorrência de uma aurora, mostrando o eletrojato auroral, e gráfico mostrando a relação entre o pico magnético negativo (em nT) e uma tempestade geomagnética (<http://www.spaceweather.gc.ca/svr-eng.php>).

As perturbações no clima espacial são, portanto, variações causadas nas características cotidianas do vento solar, decorrentes de eventos violentos no Sol. Estes são, como já citados antes, Flares (desde que estas tenham associadas a si uma ejeção de massa coronal), CMEs, além de buracos coronais. Manchas solares numerosas ou de grande extensão são sinais de que o campo heliomagnético está ficando perturbado.

A ocorrência de tempestades geomagnéticas possui associação com o ciclo solar se desenvolve, com mais ocorrência no período de crescimento e no máximo, mas mesmo assim, ainda ocorrem no mínimo, mas em menor número. Tempestades causadas por CMEs (Kane, 2006) são mais comuns durante o máximo solar, enquanto que durante o mínimo as tempestades ocorrem devido à presença de buracos coronais (Kane, 2009).

4. 1 – Caracterização

Uma tempestade geomagnética é vista como variações ocorridas no índice DST (Disturbance – Storm Time), que estima a variação média da componente horizontal do campo geomagnético no Equador magnético, baseado em algumas estações com magnetômetros. O índice DST é computado a cada hora e reportado em tempo real, sendo que em tempos sem atividade o valor do índice DST fica entre 20 nT e -20 nT.

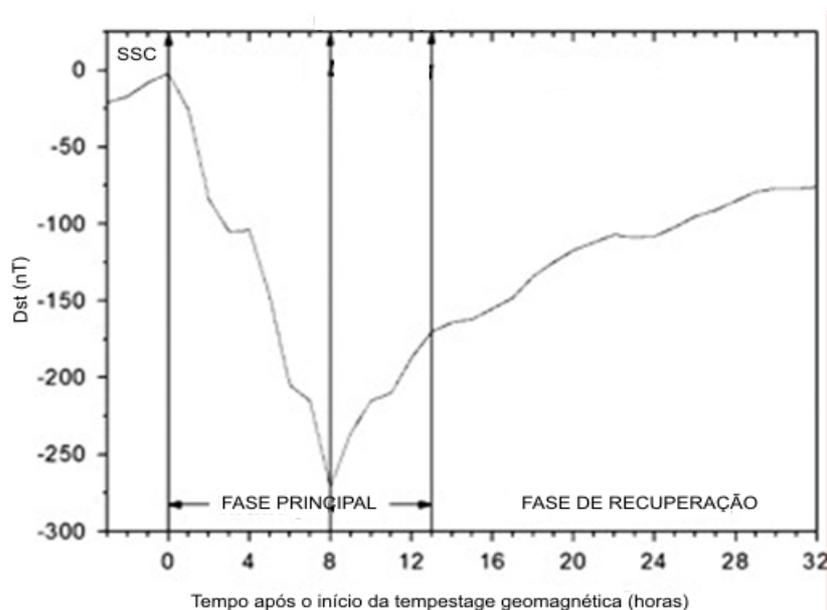


Figura 4.3 - Gravura mostrando a evolução de uma tempestade geomagnética no índice DST. (<http://www.spaceweather.gc.ca/svr-eng.php>).

Uma tempestade geomagnética possui três fases bem distintas: a inicial, onde o índice DST mostra um crescimento de 20 nT para 50 nT em alguns minutos. Esta fase é chamada de SSC (Sudden Storm Commencement), e pode estar ausente de algumas tempestades, enquanto algumas outras podem não apresentar aumento no índice DST (Gonzales et al., 1994). Tal evolução no campo magnético é vista na figura 4.3.

A fase principal é vista como uma queda no índice DST para valores menores que -50 nT. Valores referentes à uma tempestade geomagnética podem variar de -50 nT até -600 nT. A duração da fase principal pode durar entre duas e oito horas.

A fase de recuperação, como próprio nome já diz, é aquela em que os valores de picos negativos no índice DST retornam aos valores normais, e cuja duração pode levar de 8 horas a até 7 dias em média.

4.2 – Índices usados na detecção e caracterização de tempestades geomagnéticas

O índice geomagnético K é o resultado de 3 horas de medida de magnetômetros, comparando a orientação e intensidade da corrente do campo geomagnético ao que teria sido em condições geomagnéticas 'quietas'. As medidas de índice K são feitas em locais ao longo do globo e cada um é cuidadosamente ajustado para as características de sua localidade. A escala usada é quase-logarítmica, aumentando conforme o campo geomagnético se torna mais perturbado. O intervalo do índice K varia de 0 a 9 (Perrone et al., 1998).

Em alertas geofísicos, o índice K usado é geralmente derivado de medidas feitas pelo magnetômetro localizado no Observatório de Table Mountain, ao norte de Boulder, Colorado. A cada 3 horas novos índices K são determinados e as transmissões são atualizadas.

Semelhante ao anterior, o índice A mede uma atividade geomagnética equivalente em amplitude de 3 horas para uma estação específica ou rede de estações expressando o alcance do distúrbio do campo geomagnético.

K_p e A_p são índices planetários derivados dos que estão descritos acima, referindo-se à média de valores de 13 estações padrão ao longo do Equador terrestre. Eles são usados para a detecção de variações geomagnéticas globais apreciáveis, e assim, para a detecção de tempestades geomagnéticas de pequenas e grandes intensidades (Kane 2006).

O índice A é obtido a partir de índice K a cada 3 horas, de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 4.1 - Relação entre os índices geomagnéticos K e A:

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

Os índices K_p e A_p são obtidos a partir do índices K, e a relação entre os dois, juntamente com a classificação de tempestades geomagnéticas a partir deles, é:

Tabela 4.2 - Relação entre os índices geomagnéticos K_p e A_p , e sua relação com o tipo de tempestade geomagnética que indicam

Índice A_p	Índice K_p	Atividade
0-7	0-1	Quieto
8-15	2-3	Perturbado
16-29	4	Ativo
30-49	5	Tempestade pequena
50-99	6	Tempestade grande
100-400	7-9	Tempestade severa

4.3 – Danos causados por tempestades geomagnéticas

4.3.1 – Riscos de contaminação por radiação

A liberação de partículas de altas energias, oriundas de flares intensas, pode causar contaminação radioativa em seres humanos (bem como em mamíferos em

geral) de forma semelhante àquelas vistas em explosões nucleares de baixa energia.

A magnetosfera terrestre e sua atmosfera protegem-nos das consequências desses eventos ao nível do solo, mas em grandes altitudes astronautas ficam expostos a doses que potencialmente são perigosas à vida humana (Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events, 2008). Tais doses causam danos aos cromossomos no interior das células, o que pode levar ao câncer e outros tipos de doenças, sendo que exposições altas podem ser fatais em curto lapso de tempo ou mesmo quase que imediatamente.

4.3.2 – Formas de vida

Cada vez mais tem crescido o número de evidências que variações no campo geomagnético causam alterações em sistemas biológicos (Kirschvink et al., 1981), e alguns estudos já se referem à resposta de sistemas biológicos humanos a flutuações no campo geomagnético.

Um dos estudos mais mencionados é o da perturbação do sistema de navegação de pombos durante tempestades geomagnéticas. Igualmente para baleias e golfinhos, que possuem bússolas internas compostas de magnetita em suas células neurais. A abelha guiruçu (*Schwarziana quadripunctata*) é outro exemplo de espécie animal que pode ser afetada, pois tem em seu organismo nanopartículas magnéticas que podem ser afetadas por uma tempestade geomagnética e assim influenciar em seu voo próximo à colmeia (Darci et al., 2007).

4.3.3 – Comunicações

Como muitos sistemas de comunicação globais usam a ionosfera para refletir as ondas de rádio por longas distâncias, sendo que algumas frequências são absorvidas e outras refletidas, tempestades geomagnéticas levam a flutuações muito rápidas ou desaparecimento do sinal. Sinais de transmissão de TV e de rádios comuns são pouco afetados por efeitos do clima espacial, mas aqueles que são usados para comunicações de aviões para o solo e vice-versa, de navios para a

costa, de radiodifusão por ondas curtas, e de comunicações por rádio amador (que estão em faixas inferiores a 30 MHz) sofrem interferências frequentemente, conforme o relatório do estudo realizado pelo Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

Outro sistema que sofre com a interferência causada pela atividade solar é o de detecção de aparatos militares, e aqueles que são usados para alarmes de situações de risco. Os radares lançam o sinal para a ionosfera para monitorar o lançamento de mísseis e aeronaves a longa distância, e durante uma tempestade geomagnética este sinal pode sofrer distorções devido ao problema com as ondas de rádio.

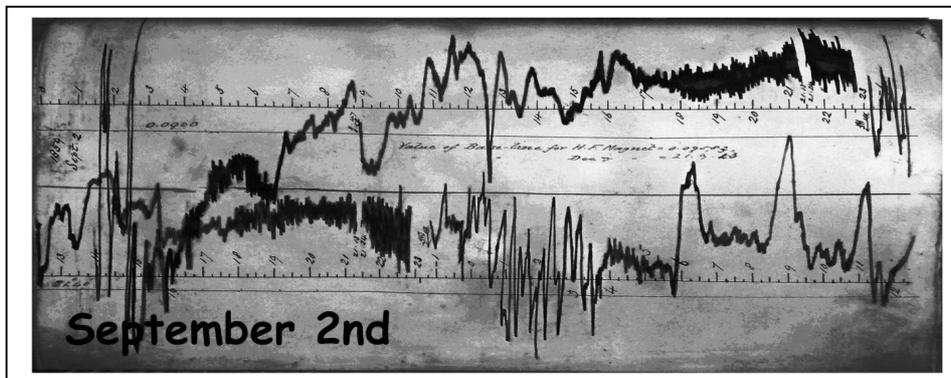


Figura 4.4 - Evento de Carrington, detectado nas leituras de dados do observatório geomagnético de Kew, em Londres, na data de 02 de Setembro de 1859 (<http://frogstorm.com/?p=2338>).

No passado, as linhas de telégrafos eram afetadas por tempestades geomagnéticas, uma vez que as linhas usavam longos cabos suspensos que estendiam por quilômetros, para a transmissão dos pulsos eletromagnéticos a serem captados em outras estações, e eram alimentados por baterias de corrente contínua. Essas duas condições (suspensos ao ar livre e alimentados por CC) tornavam esta forma de comunicação à distância mais suscetível às flutuações no anel de corrente, já que a corrente induzida pela tempestade geomagnética leva a uma variação do sinal. Em casos extremos, as bobinas dos receptores explodiam em chamas, ou os operadores levavam descargas elétricas intensas, como o ocorrido no Evento de Carrington (figuras 4.4 e 4.5), em setembro de 1859, quando a maior tempestade geomagnética catalogada ocorreu (Tsurutani et al., 2003).

Linhas telefônicas, e mesmo cabos de transmissão no fundo do oceano, também são afetados por tempestades geomagnéticas, excetuando-se quando os mesmos são confeccionados com fibra óptica.

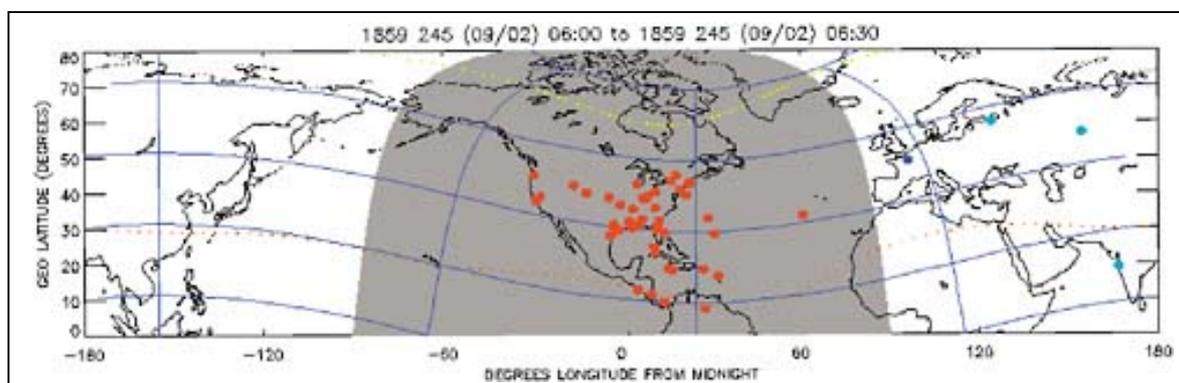


Figura 4.5 - Localização de observações aurorais durante as primeiras horas de 02 de setembro de 1859, data do evento de Carrington (<http://www.wunderground.com>).

Os satélites de telecomunicações podem ser danificados, e assim, comprometer as comunicações de telefones, televisão, rádio e internet que são feitas por eles, conforme o estudo do Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

4.3.4 – Sistemas de navegação

Sistemas como o GPS e LORAN sofrem efeitos adversos quando ocorre atividade solar, pois durante tempestades geomagnéticas e variações no clima espacial tais sistemas são propensos a concederem informações inexatas. Isto se dá porque durante a ocorrência de eventos solares (em especial, de Flares) são causadas variações na densidade de partículas na ionosfera, fazendo com que o sinal de GPS tenha problemas devido a rápidas variações em seu fluxo, conforme o relatório do estudo realizado pelo Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

4.3.5 – Danos a satélites

Tempestades geomagnéticas causam o aquecimento das camadas superiores da atmosfera, fazendo com que estas se expandam. O ar aquecido sobe, aumentando a densidade de partículas na região onde satélites orbitam (em torno de 1000 km), em decorrência aumentando o arrasto sofrido por eles. Isto resulta em significativas mudanças de órbita, o que se torna ainda mais grave no caso de satélites do tipo LEO (Low Earth Orbiting), que caem lentamente e se queimam na atmosfera. Este foi o caso do Skylab em 1979 (Rylaarsdam, 1996), que em decorrência da atividade solar reentrou na atmosfera antes do término da missão. A tempestade geomagnética de 13 de Março de 1989 foi responsável por danos em quatro satélites de comunicação da Marinha americana. A missão Solar Maximum em Abril de 1990 também se encerrou mais cedo devido à saída do satélite de sua órbita e sua prematura reentrada na atmosfera (Rylaarsdam, 1996).

A vulnerabilidade dos satélites depende de dois aspectos: sua posição e sua tecnologia.

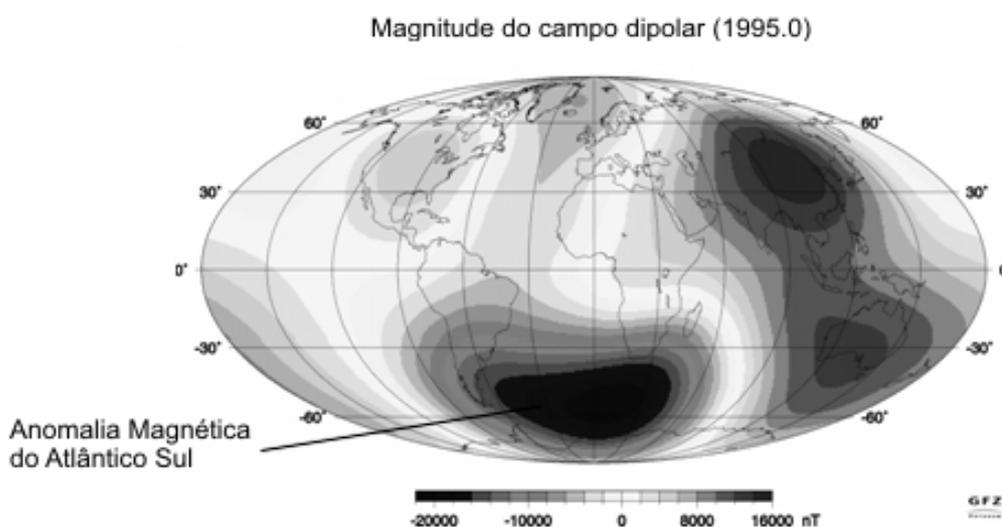


Figura 4.6 - Gráfico que mostra o posicionamento da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (http://op.gfz-potsdam.de/champ/science/magnetic_SCIENCE.html).

No primeiro, a SAMA (South Atlantic Magnetic Anomaly – Anomalia Magnética do Atlântico Sul) (figura 4.6) se torna uma barreira perigosa a ser

transposta. Devido às baixas intensidades geomagnéticas em sua região pode haver a uma maior exposição aos efeitos do clima espacial.

O segundo, tendo em vista que a evolução tecnológica dos últimos 20 anos decorre de cada vez mais terem diminuído as dimensões dos componentes eletrônicos usados na construção de satélites. A par das vantagens de peso e espaço, eles se tornam mais vulneráveis aos efeitos do clima espacial, em especial às partículas energéticas que podem causar danos à estrutura física de microchips, bem como alterações em comandos nos programas dos computadores.

4.3.6 – Redes de transmissão elétrica

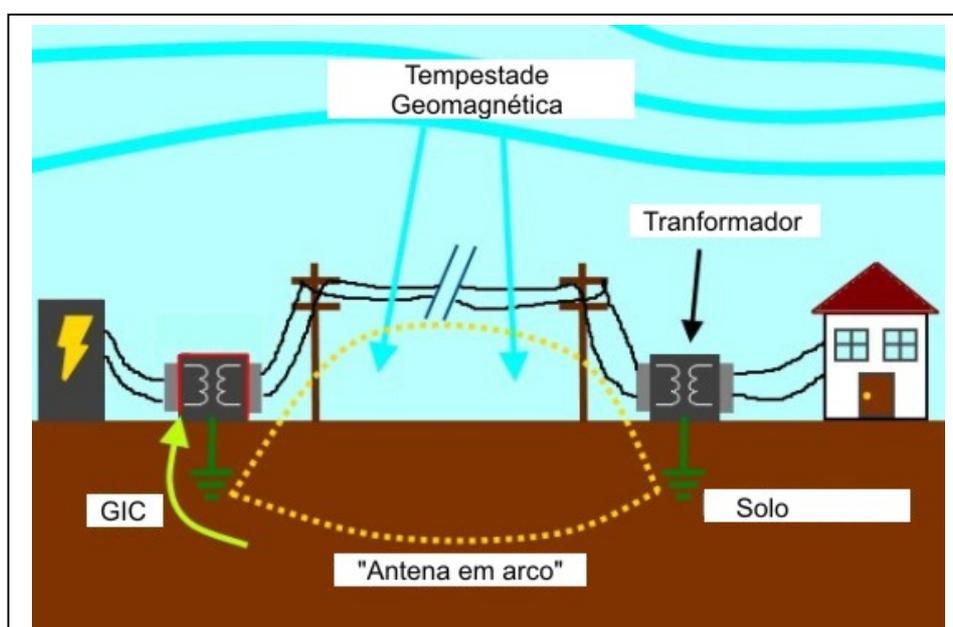


Figura 4.7 - Ilustração de como surgem as GICs, e de como estas interferem nas redes de distribuição de energia elétrica (<http://scottiestech.info/2011/02/08/ghost-in-the-machine-solar-flares-the-electrical-grid-and-what-it-all-means-to-you/>).

As variações no campo geomagnético, causadas por alterações no Clima Espacial, induzem correntes elétricas na crosta terrestre, e este fenômeno ocorre durante tempestades magnéticas. Estas são as GICs (Geomagnetically induced currents).

Da mesma maneira em que surgem correntes elétricas em condutores quando colocado próximo destes um campo magnético variante, o mesmo pode ocorrer em redes de transmissão elétrica. Redes com fios que se estendem por muitos quilômetros de distância estão expostas a danos graças a este efeito (figura 4.7). Isto é particularmente relevante no caso do Brasil, que tem linhas de transmissão a distâncias muito longas das geradoras (James, 2007).

Estas correntes induzidas nos cabos das redes são extremamente danosas para dispositivos de transmissão elétrica, em especial transformadores e geradores. A saturação induzida do núcleo condiciona o desempenho do dispositivo e ativa dispositivos de segurança existentes, como as chaves de um transformador de rua, fazendo com que bobinas e núcleos aqueçam, conforme estudo do Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

Tais eventos podem desativar o equipamento ou até mesmo causar sua perda, bem como induzir uma reação em cadeia que venha a afetar outros transformadores do sistema. O exemplo clássico é o ocorrido em 13 de Março de 1989 em Quebec, no Canadá, que afetou partes do Nordeste norte-americano, destruindo transformadores, como visto nas figuras 4.8 e 4.9. Algumas áreas na Suécia foram afetadas da mesma forma.

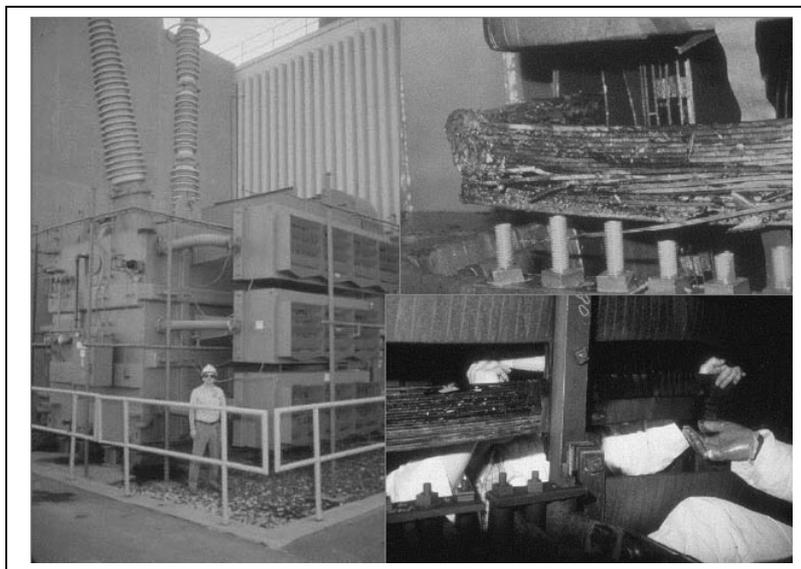


Figura 4.8 - Transformadores danificados devido ao evento de Quebec. (<http://www.wunderground.com>).

Uma tempestade geomagnética como a ocorrida em 1921 destruiria mais de 300 transformadores e deixaria 130 milhões de pessoas sem energia elétrica, com um custo de vários trilhões de dólares, conforme estudo realizado pelo Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events (2008).

Por prevenção, para evitar que GICs (Ground Induced Currents) fluam para dentro da rede por meio dos cabos de aterramento, existem medidas de segurança as quais também acarretam em custo adicional dos sistemas.

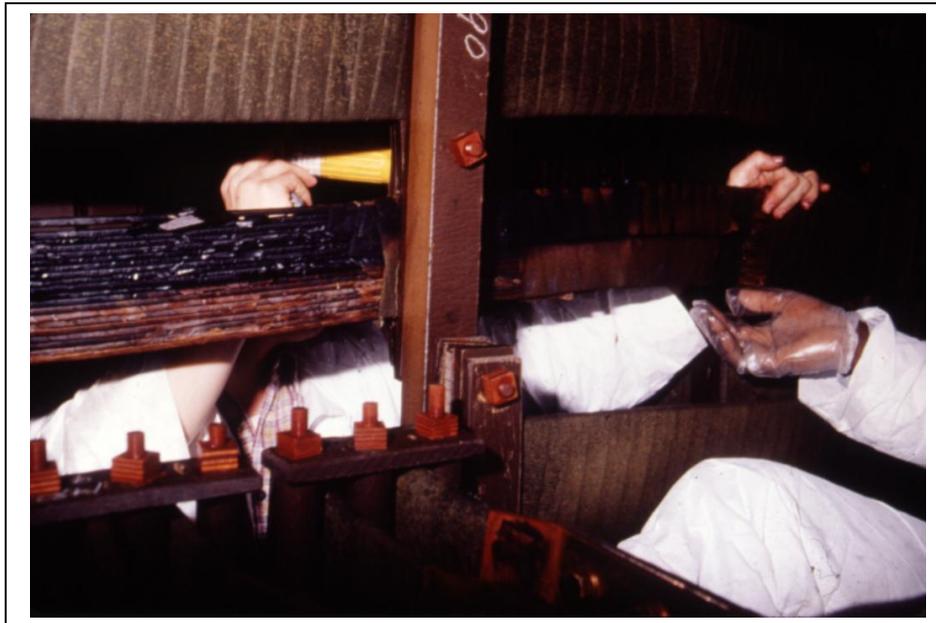


Figura 4.9 – Danos internos acontecidos em um transformador durante a tempestade geomagnética de 13/03/1989, o evento de Quebec, Canadá. (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/suntime/images/trans1.jpg>).

4.3.7. – Oleodutos

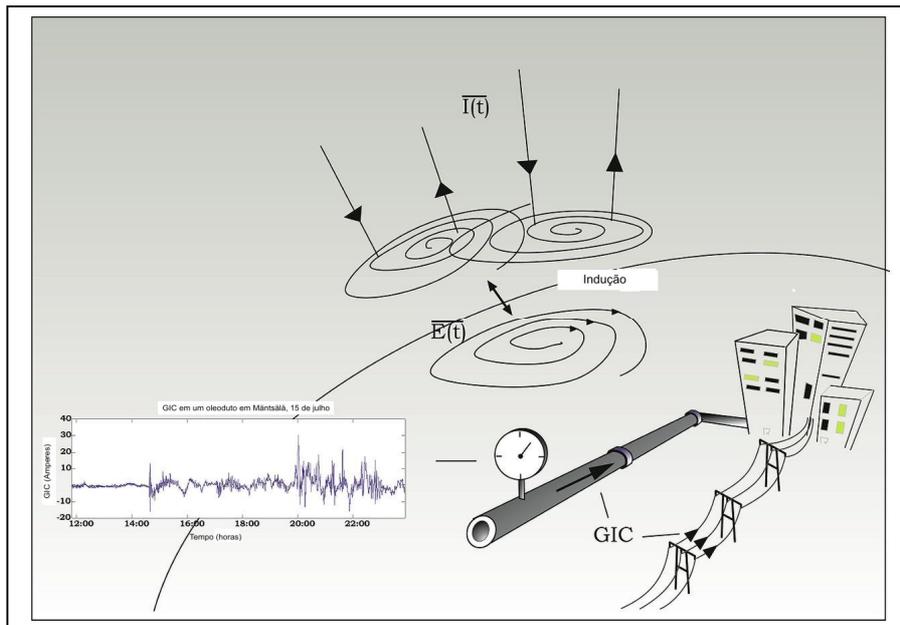


Figura 4.10 - Ilustração de como as correntes induzidas por tempestades geomagnéticas influem em oleodutos subterrâneos (http://disel.ifa.hawaii.edu/Pages/Education/space_weather_geomagnetic.php).

As GICs produzidas por variações rápidas no campo geomagnético poderiam afetar oleodutos (figura 4.10), pois medidores de fluxo de petróleo passariam a dar informações errôneas, bem como pode aumentar a taxa de corrosão do material do qual os tubos são confeccionados, o que os levaria a ter danos que necessitariam de manutenção antes do tempo previsto, conforme Osella et al. (1997) e Gummow et al. (2002), sendo fonte de gastos além dos previstos.

5 - Análise de dados e resultados

Ao longo dos capítulos anteriores, foi apresentado o desenvolvimento do Clima Espacial – os fenômenos solares que o deflagram, as condições de propagação no espaço interplanetário, e o impacto na magnetosfera causando perturbações no campo geomagnético e chegando a tempestades magnéticas, que tem uma série de repercussões na vida e sociedade humana.

Neste capítulo, vamos analisar a resposta geomagnética a fenômenos solares, à luz dos resultados obtidos no Observatório Nacional, consistindo em trechos inéditos das séries da componente H do campo magnético medido no Observatório de Vassouras e do diâmetro solar medido pelo Heliômetro. Em especial, será deduzida a função de probabilidade de variações do índice A_p em resposta a diferentes classes de fenômenos solares (manchas solares, flares, CMEs). A partir disto procuramos situar variações súbitas do diâmetro fotosférico como precursor de tempestades geomagnéticas por estar associado a mega eventos solares.

5.1 – Dados solares e índices geomagnéticos globais

Uma vez que a descrição fundamental do estado do clima espacial demanda dados da atividade solar e índices geomagnéticos globais, eles são aqui apresentados e analisados em conjunto. A relevância, tanto científica quanto prática, dos efeitos do clima espacial faz com que os dados e índices relativos a eles sejam coligidos e armazenados por diversas instituições em todo o mundo. Escolhemos, pela ampla aceitação científica, pela extensão das séries, e pela facilidade de acesso, utilizar sempre que possível os dados do NGDC (National Geophysical Data Center) e do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Center), órgãos da administração federal Norte-Americana. Neste caso estão as séries temporais do número de manchas solares, índices geomagnéticos K_p e A_p , contagem de flares e de buracos coronais. Outros índices vieram do Large Angle Spectroscopic Coronagraphs (LASCO), que é um satélite de observação solar, projeto em conjunto da “European Space Agency” (ESA) e a “National Aeronautics and Space

Administration” (NASA), lançado em 02 de dezembro de 1995 e dedicado ao estudo do Sol. Neste caso estão os dados de CMEs.

5.1.1 - O índice A_p

As variações geomagnéticas são descritas pelo índice A_p (Figura 5.1), obtidas no site do NOAA, entre os anos de 1998 e 2008. Nela, vemos grandes valores do índice geomagnético A_p durante o período de máximo do Ciclo 23 (marcado pelo círculo em vermelho). O período compreende os anos de 2002 e 2003). Mas ao mesmo tempo, vemos grandes valores de A_p (círculos em verde) fora do máximo. Por isso, a série temporal de A_p por si só não traz informações sobre as fontes dessas variações.

Inspecionamos a seguir como as variações de A_p se relacionam com índices da atividade solar, de modo a estabelecer a função de probabilidade da ocorrência de tempestades geomagnéticas em função dos índices da atividade solar.

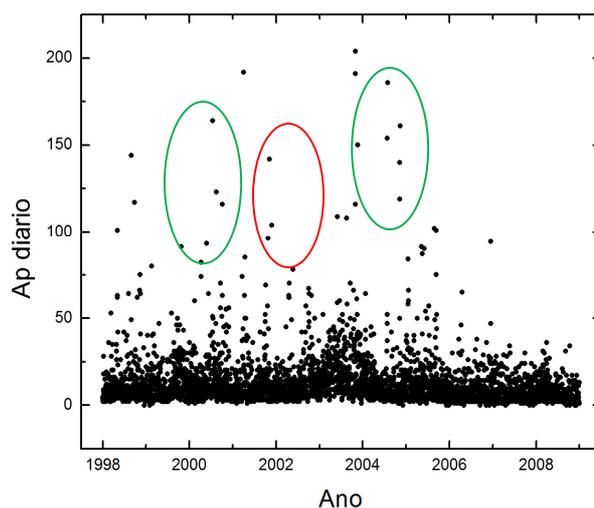


Figura 5.1 - Distribuição dos valores diários de A_p . Nota-se o incremento de valores grandes de A_p no máximo do ciclo solar (entre os anos de 2002 e 2003, destacado em vermelho), porém com valores igualmente elevados aparecendo ao longo de todo o período (destacados em verde).

5.1.2 – Comparação entre os índices A_p e SSN (sunspot number) da contagem de manchas solares

Para comparar os índices A_p e SSN, estes foram normalizados (N) pela relação dada pelo z-score (comparação estatística entre um valor, a amostragem e levando-se em conta a dispersão):

$$N = (B - M) / \sigma \quad (\text{eq 5.1})$$

Onde B representam os dados brutos, M a média desses valores e σ é o desvio padrão.

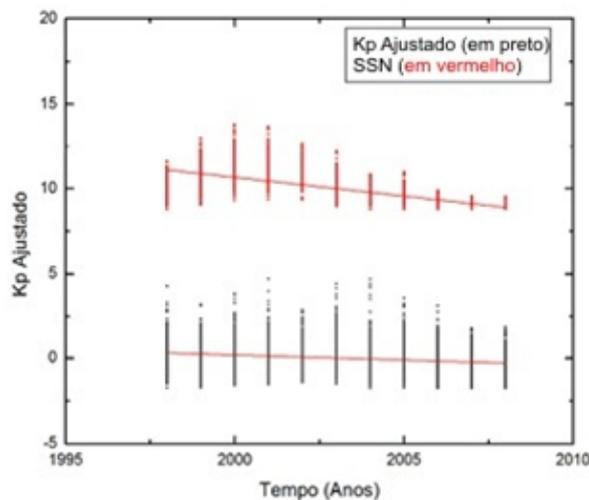


Figura 5.2 - Dados normalizados e disponibilizados por ano. Em vermelho, as medidas da contagem de manchas solares. Em preto, aparecem as medidas do índice geomagnético K_p , acrescidos de uma constante arbitrária (13) para que os pontos dos dois índices não se sobrepusessem.

Note-se que para este primeiro gráfico (figura 5.2) da investigação de correlações e probabilidades, preferiu-se utilizar o maior detalhamento do índice K_p (a partir do qual A_p é calculado como médias intra-diárias), por este gerar uma série temporal mais contínua que A_p . Isto nos permitiu observar que embora as tendências lineares sejam concordantes, não o são as dispersões dentro de cada ano. Enquanto que o número de manchas diminui acentuadamente fora do máximo do ciclo de atividades (entre 2002 e 2003), o índice K_p é maior no máximo solar, mas

mesmo no mínimo aparecem altos valores e a flutuação anual é sempre muito semelhante. Isto indica que se deve buscar um elemento adicional à atividade solar para explicar a geração de grandes perturbações ou mesmo tempestades geomagnéticas.

A figura 5.3 mostra o valor médio da medida diária de A_p por classes de contagem de número de manchas, tomadas entre os anos de 1998 e 2008. Nota-se mais claramente que a curva ajustada cresce de forma bem suave, ou seja, a resposta das variações geomagnéticas à atividade solar caracterizada pelo número de manchas, mas não é um crescimento abrupto.

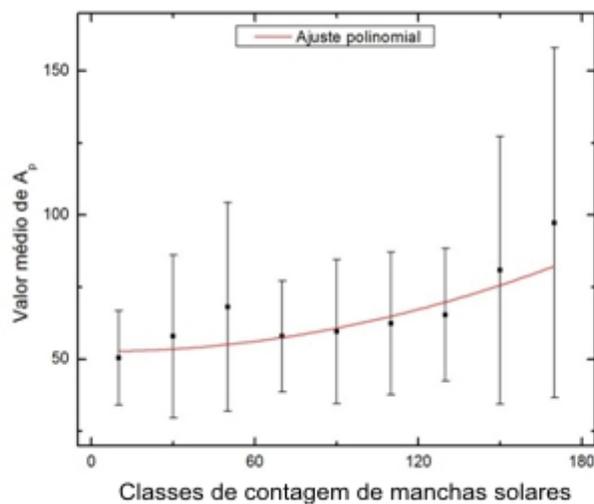


Figura 5.3 - Valores médios da medida diária de A_p por classes do número de manchas, no período compreendido entre 01/01/1998 e 31/12/2008. As classes de número de manchas avançam em intervalos de 20 contagens. O polinômio ajustado é de segundo grau.

5.1.3 - Probabilidade de tempestades geomagnéticas

Determinamos as probabilidades de ocorrência de tempestades geomagnéticas (equivalentes a valores de A_p maiores que 16, onde o campo geomagnético começa a ficar perturbado, conforme a tabela 4.2) em relação ao número de manchas. O número de manchas segue a divisão em intervalos de 20 contagens, como feito anteriormente. A probabilidade é calculada pela esperança

matemática do número de dias com eventos divididos pelo número total de dias em cada classe de contagem de manchas solares (Figura 5.4), obedecendo a equação 5.2, onde P é a probabilidade da ocorrência de tempestades geomagnéticas, T é o número de dias com índice $A_p \geq 16$, e N é o número total de dias, para cada contagem de manchas:

$$P = T/N \quad (\text{eq. 5.2})$$

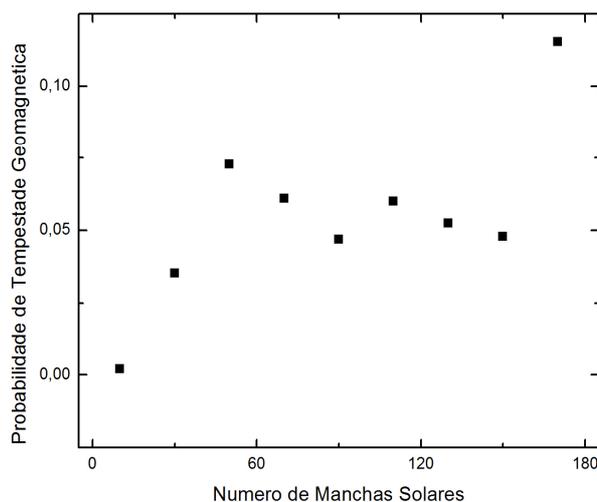


Figura 5.4 - Probabilidade de efetiva ocorrência de uma tempestade magnética (caracterizada como evento de $A_p \geq 16$), para intervalos de contagens de manchas solares (em passos de 30 unidades). Note-se que tempestades geomagnéticas são fenômenos raros. Exceto na quase ausência de manchas ou quando são muito numerosas, a probabilidade de eventos depende fracamente da contagem de manchas.

A figura 5.4 mostra claramente que, de modo geral, é pequena a probabilidade de ocorrência de tempestades geomagnéticas. Neste universo de pequenas probabilidades, elas têm um mínimo quando é mínimo o número de manchas, e no outro extremo a probabilidade é máxima quando é máximo o número de manchas. No entanto, existe um amplo plateau intermediário, que corresponde ao que havia sido descrito na análise das manchas solares, ou seja, que em toda extensão do ciclo de atividades acontecem tempestades geomagnéticas com quase

igual baixa probabilidade – requerendo, por conseguinte um mecanismo adicional de desencadeamento de tempestades geomagnéticas.

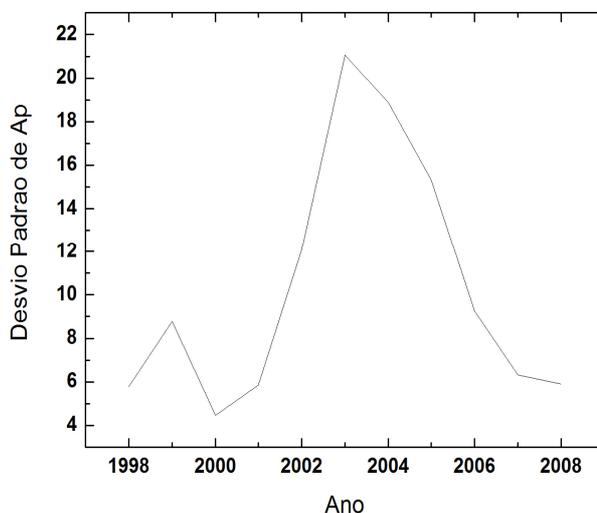


Figura 5.5 - Distribuição do desvio padrão anual de A_p .

Por outro lado, como visto na figura 5.3, a dispersão dos valores de A_p cresce ao longo do ciclo solar. Note-se a dispersão anualizada tem importante obliquidade, e baixa correlação com o número de manchas. Novamente isto aponta para um pico estreito de alta probabilidade de tempestades magnéticas localizado no máximo do ciclo solar, que é visto na figura 5.5, na qual está a distribuição do desvio padrão entre os anos de 1998 e 2008.

5.1.4 - Flares e Índices Geomagnéticos

Já seria de se esperar que as manchas solares efetivamente se mostrassem como indicador de natureza fracamente probabilística, uma vez que estas são apenas um indício da atividade solar diferente da que é vista no cotidiano, as flares solares podem causar perturbações significativas no meio espacial, se forem de grande intensidade.

Comparamos o índice de flares com os índices geomagnéticos. Primeiramente, com dados brutos, as relações não ficaram muito explícitas, como é

visto na figura 5.6. Assim, para melhor ser compreendida a eficiência de flares solares como deflagraadoras de tempestades magnéticas, então, foi realizada uma normalização, seguida de uma contagem de eventos relevantes.

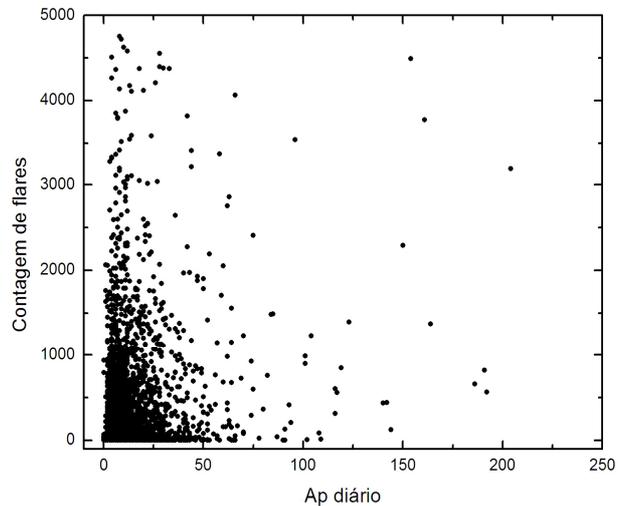


Figura 5.6 - Comparação direta entre valores brutos da intensidade de flares diários e valores médios do índice A_p , também diários para o período 1998 a 2008. Apenas para uns poucos e isolados flares de grande intensidade aparecem correspondentes tempestades geomagnéticas (grandes valores de A_p), ou seja, não há relação explícita clara entre os dois indicadores.

Na figura 5.7, o período se estende além do que é examinado neste trabalho (o qual compreende as épocas de monitoramento do diâmetro solar, entre 1998 e 2008), com dados vindos desde 01/01/1970 até 31/12/2008. Mesmo neste período extenso, normalmente as flares não desencadearam tempestades magnéticas - exceto no caso dos mais intensos.

Foi procedida uma divisão de flares em 13 classes de intensidade (cuja escolha foi feita apenas para melhor visualização) e calculada a esperança estatística de ocorrência de tempestades geomagnéticas – canonicamente o número de dias em que houve eventos verificados dividido pelo número de dias na classe de flares. A figura 5.7 mostra que, da mesma forma que para a contagem de manchas, na região das flares mais fracas não se registra tempestade geomagnética, enquanto que na região das flares mais intensas, a probabilidade de tempestades

geomagnéticas é máxima. Porém estas regiões extremas são pequenas (neste gráfico, reduzidas a um só ponto). Na maior parte do intervalo de flares, a probabilidade de tempestade magnética oscila sem preferência em torno de uma probabilidade média. A baixa performance das flares como previsor da tempestade magnética, foi discutida por Kane (2011), que analisa a flare de fevereiro de 2011, quando houve um evento do tipo intenso, mas nenhuma tempestade geomagnética se observou após dois dias, pois a flare não teve uma CME associada.

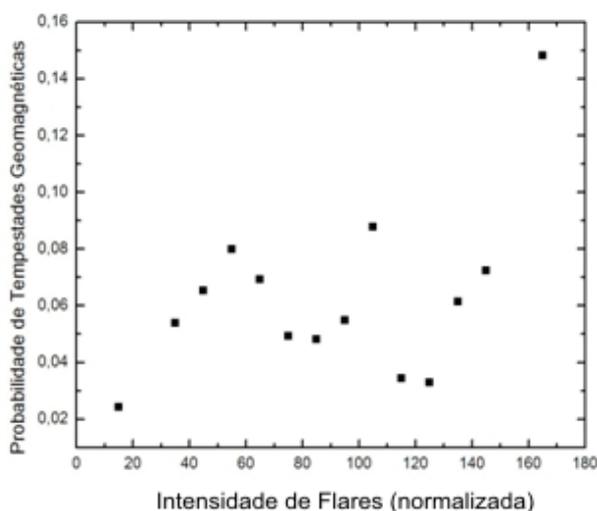


Figura 5.7 - Probabilidade de ocorrência de tempestade geomagnética por classe de intensidade de flares. As classes têm passo de 10 unidades, exceto nas iniciais e finais onde o passo foi 20 unidades, para englobar um maior número de eventos.

Este comportamento pode ser justificado por três características:

- 1 – A intensidade das tempestades geomagnéticas não depende de forma única e exclusiva do número de flares, mas que exista a necessidade da flare estar direcionada para a Terra para que exista uma resposta da magnetosfera;
- 2 – Nem todas as flares que podem causar variações no campo geomagnético, já que flares do tipo X (as mais intensas, vide tabela 2.1) não são eventos comuns de acontecerem;
- 3 – Isoladamente, as flares não são capazes de, somente por elas mesmas, causarem tempestades geomagnéticas.

5.1.5 – Explorando as CMEs

As ejeções de massa coronal (CME - Coronal Mass Ejection) constituem o principal deflagrador de tempestades geomagnéticas. Elas e seus efeitos sobre o clima espacial foram descritos em (2.3). Seguindo o raciocínio delineado pelo item (2.3), mais a análise do item anterior, que flares por si mesmas não causam tempestades geomagnéticas, e de modo geral, as flares só causam tempestades quando seguidas de CMEs. Verifiquemos agora diretamente a recorrência de tempestades magnéticas em função de CMEs.

Exploramos as propriedades de CMEs em relação ao índice A_p , após dois dias da ocorrência do evento no Sol, que é o tempo médio que uma CME leva até alcançar a Terra. Utilizamos três características da velocidade para definir a CME: velocidade inicial, última velocidade medida (antes que se lance ao meio interplanetário), e um valor padrão a vinte raios solares. Com estes valores, quantificamos a intensidade da CME. Vemos que, para um dado evento, as três características mostram igual descrição. Dividimos os eventos em quatro quadrantes, correspondentes a CMEs e tempestades magnéticas fortes e mais fracas. No canto superior direito aparecem CMEs que não geraram importantes tempestades geomagnéticas; correspondem aos casos em que a CME não estava direcionada à Terra. No canto inferior direito aparecem os eventos e reações fracos. Porém nasce também o ramo principal de correlação entre CMEs e tempestades magnéticas, o qual se estende por todo o regime mostrado no gráfico. No canto inferior direito, é visto que grandes tempestades magnéticas não se resumem às grandes CMEs. Aparece um ramo mais baixo, no qual CMEs geram tempestades geomagnéticas, devido às condições de chegada do choque e do trem de partículas carregadas, bem como da orientação do campo magnético associado.

Observando o gráfico da figura 5.8, temos constatações interessantes sobre CMEs como evento físico responsável pela ocorrência de tempestades geomagnéticas:

1 – Mesmo eventos desse tipo que possuem características menos intensas são capazes de provocar grandes variações geomagnéticas, ou seja, são eficazes na geração de tempestades geomagnéticas;

2 – Por outro lado, outros eventos de características mais intensas não causam necessariamente grandes variações no índice A_p , ou seja, possuem pouca probabilidade de causarem grandes tempestades geomagnéticas.

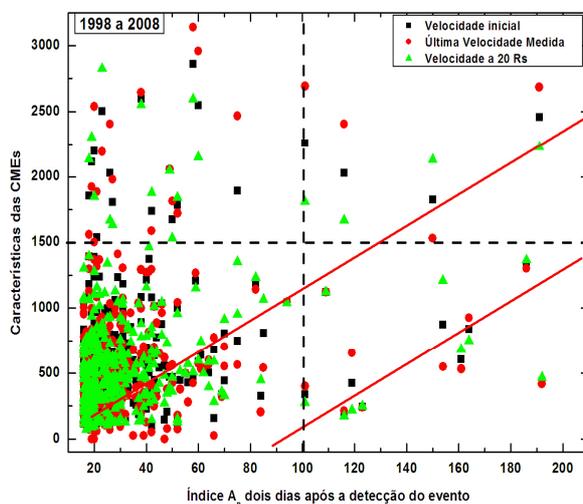


Figura 5.8 - Intensidade de A_p conforme intensidade de CMEs, caracterizadas por três velocidades. Veja o texto para descrição das subdivisões em quadrantes, e para a descrição dos ramos apontados em vermelho.

Ambos os efeitos mostram a importância do posicionamento da CME em relação ao planeta Terra, bem com a necessidade da existência da componente B_z negativa na ICME formada pelo impacto do vento solar alterado (que possui maior velocidade) com o cotidiano pré-existente, já que sem esta componente, apenas um leve decréscimo no campo geomagnético irá acontecer (Kane, 2006).

Ao mesmo tempo a literatura é rica em claras associações entre CMEs e tempestades magnéticas, como os de Kane (2006), Kane (2007), e Zang et al. (2007). Deste modo, a conclusão qualitativa que se impõe, ou melhor, na qual este trabalho acompanha o modelo padrão de perturbações no Clima Espacial e na Magnetosfera, é que CMEs se constituem no mais efetivo indutor de tempestades geomagnéticas, embora não haja determinismo no seu grau ou mesmo efetiva ocorrência (ver cap. 4).

Portanto, para dar um passo avante à descrição físico-qualitativa, e buscar a conexão entre variações do diâmetro solar, eclosão de CMEs e instalação de tempestades geomagnéticas, contamos o número e intensidade das CMEs no período 1998-2008 - ou seja, os dados que se extraem da figura 5.8.

A partir destas contagens pode-se calcular a possibilidade de ocorrência de tempestades magnéticas, conforme crescentes intensidades de CMEs. Do mesmo modo que feito nos sub-itens anteriores quanto à contagem de manchas e flares, tomamos os dias em que ocorreram CMEs, intervaladas em passos de 200 unidades da velocidade inicial da ejeção (exceto para os maiores valores que foram agrupados como maiores que 1200 para evitar intervalos muito rarefeitos). Tais resultados estão dispostos no histograma da figura 5.9, com dados provenientes do satélite SOHO, datados entre 1998 e 2008. Defasamos em três dias a comparação para levar em conta o tempo de percurso Sol-Terra, e calculamos canonicamente a probabilidade de ocorrência de tempestades geomagnéticas como a razão entre a quantidade de dias em que estas ocorreram e não ocorreram para cada um dos intervalos de intensidade em que subdividimos as CMEs.

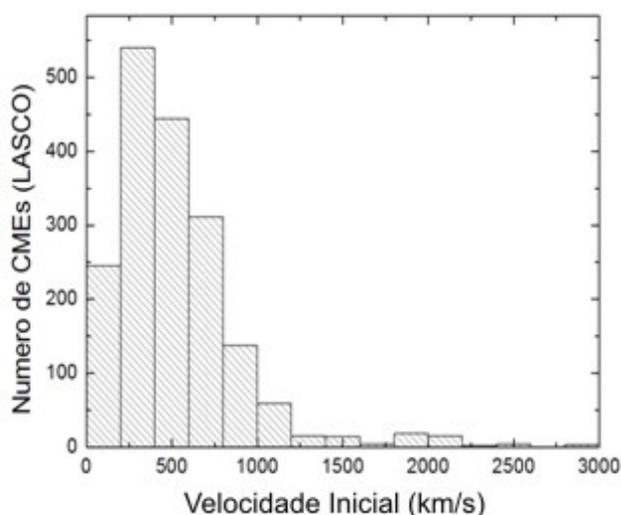


Figura 5.9- Histograma da ocorrência de CMEs observada, entre 1998 e 2008 pelo coronógrafo LASCO do satélite SOHO.

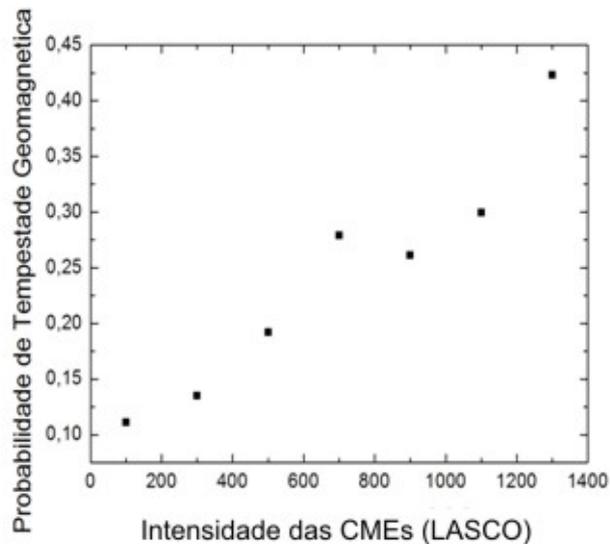


Figura 5.10 - Probabilidade de ocorrência de tempestades geomagnéticas (definidas como $A_p \geq 16$) em função da intensidade de CMEs (definida por intervalos da velocidade inicial de ejeção) no período 1998-2008. Esperança observada a partir dos dados do LASCO/SOHO.

A figura 5.10 é eloquente, e claramente se distingue das análogas distribuições de probabilidade para manchas e flares solares. Notemos que ela não conflita com a figura 5.8, porque aquela distinguia também intensidades de tempestade magnética. A escala de probabilidades, mesmo no avizinhamento do máximo solar, não assegura causalidade, mas quantifica o risco da tempestade magnética, algumas como se sabe de monta.

O primeiro elemento da cadeia de relacionamento que este trabalho investiga fica assim verificado: a efetividade de fenômenos explosivos solares como deflagadores de tempestades geomagnéticas. Claro que este é um fato não só conhecido, mas basilar no conceito de clima espacial. Nossa contribuição está na determinação da esperança estatística para elementos fundamentais da atividade solar, quais sejam manchas, flares, e CMEs – para o ciclo de atividades 23, o qual foi bastante mediano.

5.2 – Dados Geomagnéticos Locais:

Como apontado, o objetivo do programa descrito nesta monografia é de discutir a pertinência das medidas de diâmetro solar como estimador, ou mesmo previsor, de tempestades geomagnéticas. Além disso, nos interessa utilizar os dados do Observatório Magnético de Vassouras, os quais possuímos com todos os detalhes da aquisição e toda rapidez de informação. Investigamos a sensibilidade dos dados obtidos no Observatório Magnético de Vassouras (VSS) no tocante a variações globais do campo magnético da Terra, bem como a influência de estruturas locais nos mesmos, em especial a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Foram usados os dados de outro Observatório Magnético pertencente à rede internacional de observatórios geomagnéticos INTERMAGNET (“International Real-time Magnetic Observatory Network”). O INTERMAGNET é a rede que monitora o campo geomagnético em escala global. O observatório usado para a comparação foi o de Adis Abeba, na Etiópia, que está sob efeitos locais totalmente diversos de VSS.

Tendo por sigla AAE no “International Association of Geomagnetism and Aeronomy” (IAGA), o Observatório Geomagnético de Adis Abeba foi fundado em 01 de janeiro de 1958, estando situado na latitude de $9,035^\circ$ Norte e na longitude de $38,766^\circ$ Leste, e na altitude de 2441 metros, estando filiado a INTERMAGNET deste 1998. Primariamente, é filiado ao Geophysical Observatory of Addis Ababa University, na Etiópia, e ao Institut de Physique du Globe de Paris, na França. São usados para as medidas do campo geomagnético um magnetômetro homocêntrico fluxgate vetorial (IPGP VM391) para as medidas vetoriais de H, D, e Z, e um magnetômetro Overhauser de próton (GEOMAG SM90R) para as medidas absolutas de F.

A escolha de Adis Abeba foi realizada em virtude de seu posicionamento na Terra, estando fora da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, bem como acima do Equador magnético da Terra.

A comparação se reduz um pouco, atingindo o período de 2001 a 2008, em virtude da ausência de dados do Observatório de Adis Abeba no período de 18,5 meses entre julho de 1999 até fevereiro de 2001. Uma tempestade magnética engloba uma série de estruturas, em escalas de tempo de minutos, horas, e dias (cf

cap. 4), conforme Tusuutani et al. (1998). Na presente discussão, nos interessam as escalas mais longas, e foram feitas médias diárias para a componente H do campo geomagnético (aquela que é a mais sensível às variações causadas pelo vento solar que impacta a magnetosfera) de Vassouras e Adis Abeba. Em seguida foi retirada a tendência secular (variações de longo período, cujas causas físicas ainda não são completamente conhecidas) dos dados, que introduziriam uma componente de correlação indesejável à comparação investigada, por meio de um ajuste linear. Denominamos dados horizontalizados (HORZ) àqueles nos quais a tendência secular é retirada dos dados originais (ORIG). A partir do coeficiente linear A e do angular B, com o tempo como variável, empregamos a seguinte equação:

$$\text{HORZ de dados} = (\text{ORIG} - A) - B * t \quad (\text{eq 5.3})$$

Com os dados isentos da variação secular, foram realizadas duas formas para detecção dos valores extremos das variações geomagnéticas.

5.2.1 - Detecção por segregação de vales:

O primeiro método emprega uma busca direta dos vales nas duas distribuições. Um vale será um trecho da curva de valores médios diários da componente H (após tratada pela eq. 5.3) contendo um mínimo local dentro de uma janela de busca. A janela de busca avança sucessivamente centrada em cada ponto.

Uma vez horizontalizados, as séries de Vassouras e Adis Abeba se assemelham visualmente. O teste-F suporta a Hipótese Nula que as duas séries representem a mesma distribuição, a significância maior que 0,99. Com a mesma significância a correlação de Pearson é de 0,62, ressalvando-se que ambas as séries não representam distribuições normais, nem certamente lineares (fig. 5.11). Alisando ambas as séries através de uma média corrida de 180 pontos, a natureza símile de ambas fica evidente e a correlação de Pearson passa a 0,71 (fig. 5.12).

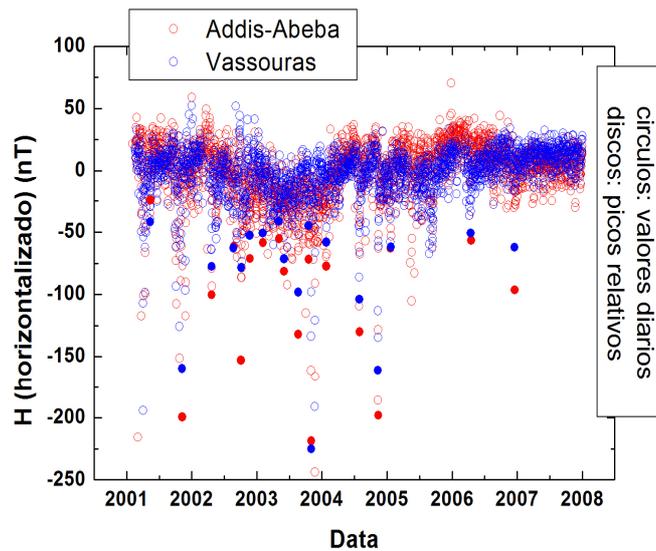


Figura 5.11 - Medidas na forma de média diária horizontalizada da componente H (em nT) do campo geomagnético, segundo medido nas estações dos Observatórios Geomagnéticos de Vassouras e Adis Abeba, na Etiópia. A correlação entre as duas séries é de 0,62. Os elementos do gráfico são comentados no texto.

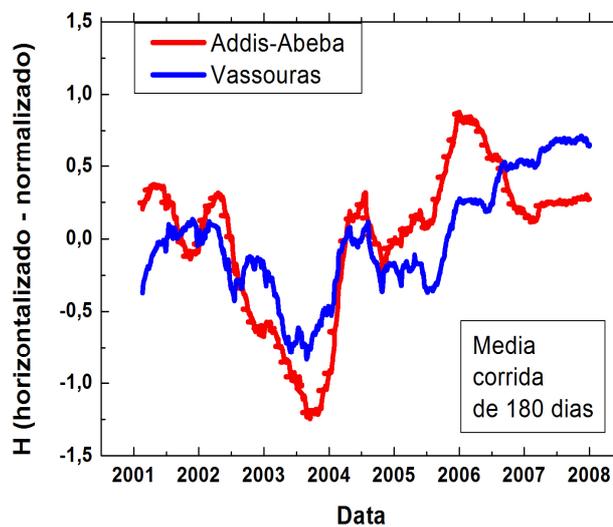


Figura 5.12 - Séries da componente H (em unidades de desvio padrão, correspondente a medidas diárias e horizontalizadas, referentes ao Observatório Geomagnético de Vassouras e Observatório de Adis Abeba, Etiópia, alisadas por média corrida de 180 pontos. A correlação obtida é 0,71.

Tabela 5.1 - Variações da componente H do campo geomagnético, entre os anos de 2002 e 2008, conforme medidas no Observatório Magnético de Vassouras e no Observatório de Adis Abeba, Etiópia. Note-se a boa proximidade das datas.

Vassouras		Adis Abeba	
Data	H (nT)	Data	H(nT)
2001,36071	-41,69957	2001,36482	-24,14515
2001,84976	-159,55911	2001,85387	-199,41579
2002,30476	-77,41516	2002,30339	-100,32082
2002,64083	-62,79316	2002,64493	-61,53771
2002,76095	-78,44856	2002,75684	-152,98553
2002,89083	-52,57925	2002,89493	-71,22719
2003,09155	-50,73186	2003,09292	-58,51419
2003,33881	-41,32598	2003,34018	-55,23595
2003,41821	-71,42362	2003,41958	-81,48313
2003,63535	-98,19157	2003,63672	-132,07899
2003,79381	-44,81703	2003,79517	-71,76966
2003,83487	-225,0996	2003,83624	-218,63525
2004,06571	-58,11039	2004,06708	-77,23338
2004,57666	-103,76219	2004,57803	-130,11107
2004,85797	-161,04679	2004,86482	-197,85126
2005,06023	-62,01279	2005,05339	-62,86072
2006,28833	-50,78294	2006,29244	-56,67598
2006,95773	-62,26798	2006,96184	-96,46963

A determinação dos vales foi realizada através de uma varredura de mínimos locais tanto para os dados de Adis Abeba quanto para os de Vassouras, pois as variações características causadas por uma tempestade geomagnética são negativas (da ordem de vários nT). As varreduras para localização dos vales mais relevantes foram feitas usando três diferentes janelas de busca. Em todos os casos, a largura foi de 1% do intervalo temporal, ou seja, da ordem de 8 dias – logo, englobando mesmo as tempestades magnéticas mais longas; enquanto que a altura da janela correspondeu a 2% do intervalo em nT, ou seja, de pouco menos que 4 nT, logo englobando mesmo as tempestades geomagnéticas menos intensas. No entanto, colocamos um parâmetro adicional para evitar eventos contíguos ou espúrios, impondo um valor mínimo relativo aos pontos vizinhos de, respectivamente, 30%, 5%, 3%. Os vales encontrados formam conjuntos muito semelhantes. Na figura 5.11, os vales encontrados com a janela mais ampla (1×2×30) são mostrados. A Tabela 5.1 os mostra e a figura 5.13 traz o gráfico

cartesiano dos vales das séries de Vassouras e de Adis Abeba - ou seja, as tempestades magnéticas que se destacam mais claramente. A correlação linear é de 0,95.

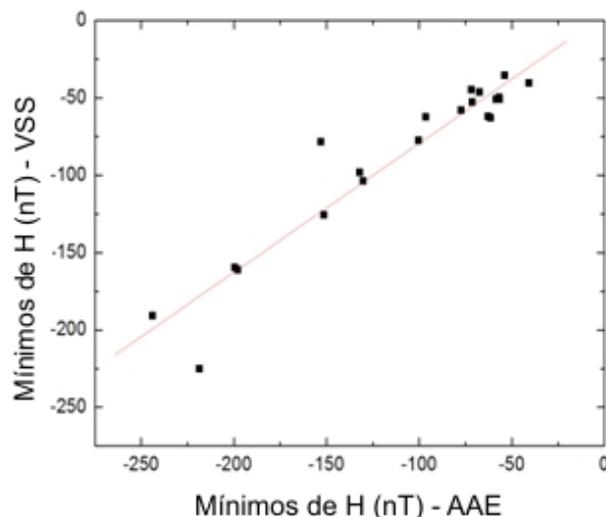


Figura 5.13 - Mínimos relativos - vales encontrados com uma janela de busca 2×3X30% respectivamente da duração temporal e das variações geomagnéticas - da componente H do campo magnético medido no Observatório Magnético de Vassouras e Observatório Magnético de Adis Abeba, Etiópia. A correlação é de 0,95.

Assim, pelo primeiro método, pela concordância apresentada pelos resultados, comprova-se a globalidade das medidas feitas em VSS.

5.2.2 – Detecção por derivadas:

Desenvolvemos este segundo método para localizar mínimos da componente H, independentemente das variações em períodos mais longos, ou das alterações em intervalos temporais mais longos. O método é de aplicabilidade geral – por exemplo, variações geomagnéticas súbitas em decorrência ou em complemento a processos de sondagem subterrânea. Aqui é aplicado para variações da ordem de dias, típicas de tempestades magnéticas.

Inicialmente procedemos a uma derivada numérica da série num entorno de um ponto para a direita e para a esquerda. Esta escolha se impunha no caso de médias diárias - mas não há perda de generalidade, uma vez que o intervalo pode ser ampliado, ou a média tomada em outra unidade de tempo, para qualquer outra aplicação. Aqui, a derivação foi feita sobre igual extensão de tempo das séries de Vassouras e Adis Abeba. As figuras 5.14 e 5.15 trazem a derivação temporal. Na duração de um dia aparecem componentes ruidosas e de pequena amplitude, devidas às flutuações da resposta dos magnetômetros, e com assinaturas devidas à variação dos polos de rotação da Terra, dos polos magnéticos, magnetismo local de fontes em sub-superfície, irregularidades do vento solar, etc (Merril et al., 1996). Estes termos foram retirados pela aplicação de um filtro passa-baixa na frequência de **30 Hz**, ou seja, **T>12dias**. Acima desta duração, não se observam tempestades magnéticas, que de outro modo teriam efeitos catastróficos para toda a Terra.

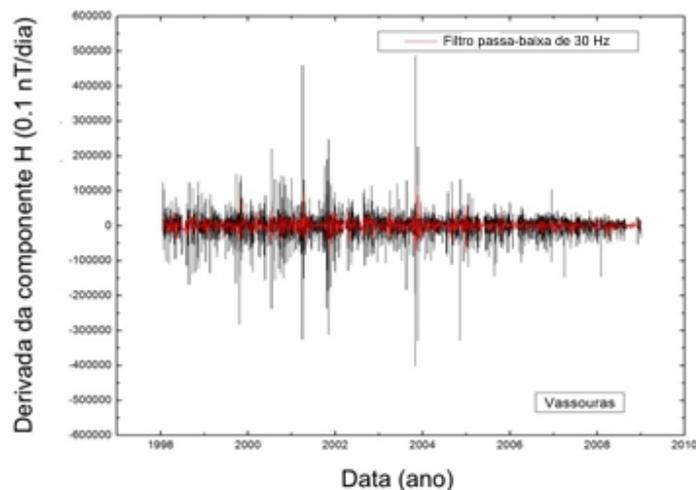


Figura 5.14 - Derivada temporal da componente H do campo magnético medido no Observatório Geomagnético de Vassouras. O desvio-padrão é de 3773 nT. Em vermelho a aplicação de um filtro passa-baixa em 30 Hz (12 dias), que exclui variações não representativas de tempestades geomagnéticas.

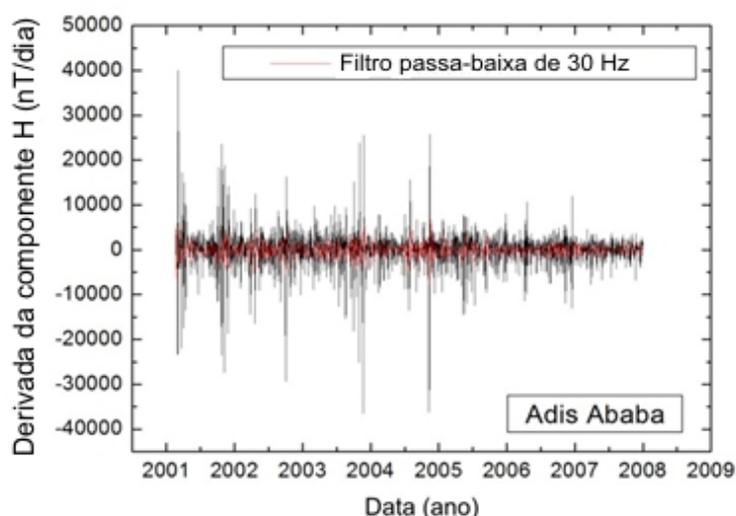


Figura 5.15 - Derivada temporal da componente H do campo magnético medido no Observatório de Adis Abeba. O desvio-padrão é de 3950 nT. Em vermelho a aplicação de um filtro passa-baixa em 30 Hz (12 dias), que exclui variações não representativas de tempestades geomagnéticas.

Para reter apenas os pontos estatisticamente mais significativos, adotamos uma linha de corte em três desvios padrão, correspondente a significância de 0.99. Os resultados são visualizados nas figuras 5.16 e 5.17, e assim, a evidente concordância de eventos detectados e datas onde estes ocorreram torna supérflua sua quantificação.

Vale citar que as figuras 5.14 e 5.15, bem como 5.16 e 5.17 possuem escalas diferentes, uma vez que a visualização dos resultados em mesma escala seria dificultada, além de que buscamos variações mais intensas em ambas as séries.

Estes mesmos eventos intensos encontrados nas figuras 5.15 e 5.16 foram visualizados anteriormente na série temporal de A_p , na figura 5.1.

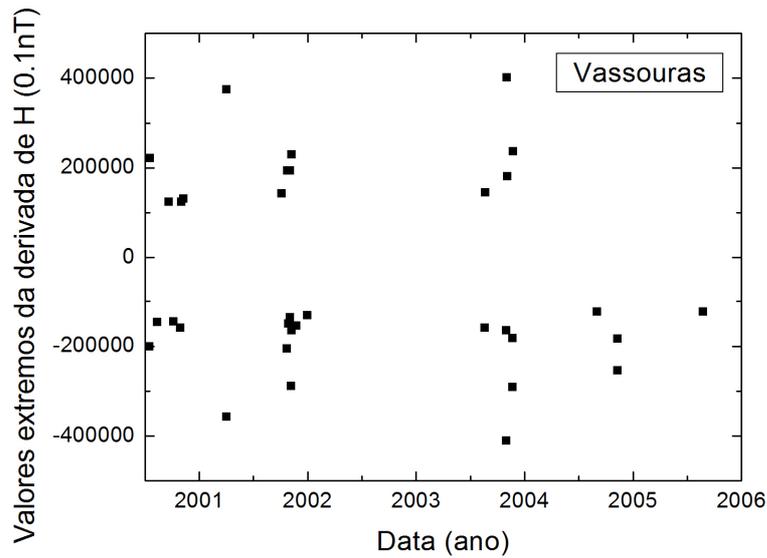


Figura 5.16 - Distribuição das principais tempestades geomagnéticas medidas pelo Observatório Geomagnético de Vassouras, determinadas pelo método de derivada da componente H.

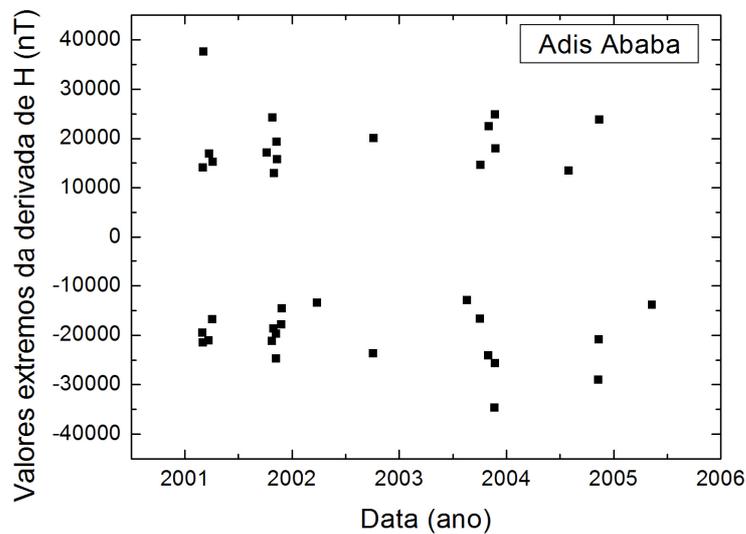


Figura 5.17 - Distribuição das principais tempestades geomagnéticas medidas pelo Observatório Magnético de Adis Abeba, determinadas pelo método de derivada da componente H.

Antes de concluir este item, porém, acompanhemos duas continuações do estudo das séries derivadas, mostradas na figura 5.18.

A figura traz a série de CMEs observadas no intervalo correspondente pelo coronógrafo LASCO do satélite SOHO, caracterizadas pela velocidade inicial da ejeção (Vourlidas et al., 2010). Inicialmente recolhemos os picos, utilizando o método de janelas descrito no item 5.2.1.

Na figura, são mostrados os picos mais extremos. Vê-se que eles se referem aos picos de variação geomagnética da componente H encontrados nas figuras 5.16 e 5.17, mas com a notável ausência de picos, nominalmente CMEs, extremos em 2002, ano do máximo do ciclo solar. A figura traz também uma série (mostrada em azul) onde os eventos são agrupados de 10 em 10. A escolha é arbitrária, decidida a partir dos agrupamentos percebidos nas figuras anteriores, mas ressalta que aglutinações de CMEs apontam para o surgimento de CMEs muito intensas.

Este resultado não é trivial do ponto de vista heliofísico. Dado que a coroa solar é uma camada muito rarefeita, uma sequência de CMEs combinada com uma CME de grande amplitude só pode ser compreendida a partir de um entendimento muito mais amplo sobre a esfera solar. Recentes resultados do satélite Solar Dynamics Observatory (SDO), vistos nos trabalhos de Sangeetha et al. (2012) e Ambastha et al. (2012), colocam na baixa cromosfera ou na fotosfera esta rede de dispositivos heliofísicos que energizam a ejeção de matéria coronal, e estes resultados são obtidos a partir de medidas profundidade óptica. Ora, este é exatamente um dos mecanismos propostos para a variação observada do diâmetro solar fotosférico, presumido por Andrei et al. (2006).

No entanto, mais uma vez aparece a notável exceção de 2002, em que existem grupos de eventos, mas são modestos e sem que se associem a CMEs de alta intensidade. Finalmente, da mesma forma que acima, passamos um filtro passa-baixa de 30 Hz (em vermelho) para a série de CMEs. Naturalmente, este filtro passa-baixa aparece em anti-fase com os picos de CMEs e com os agrupamentos de CMEs, indicando que períodos longos não são bons estimadores da eclosão de CMEs, o que tem consonância com os resultados do item em que se determinava a esperança de tempestades magnéticas condicional à contagem de manchas (figura 5.3). Contudo, igualmente neste caso temos uma exceção notável no final de 2003, em que simultaneamente o filtro passa-baixa e a aglutinação de eventos aponta para uma CME de alta intensidade.

Destes estudos adicionais se verifica que CMEs de alta intensidade são eventos que podem ser ancorados na compreensão heliofísica, mas sua previsão permanece elusiva, de modo a reforçar o interesse de qualificar as variações do diâmetro solar como previsor.

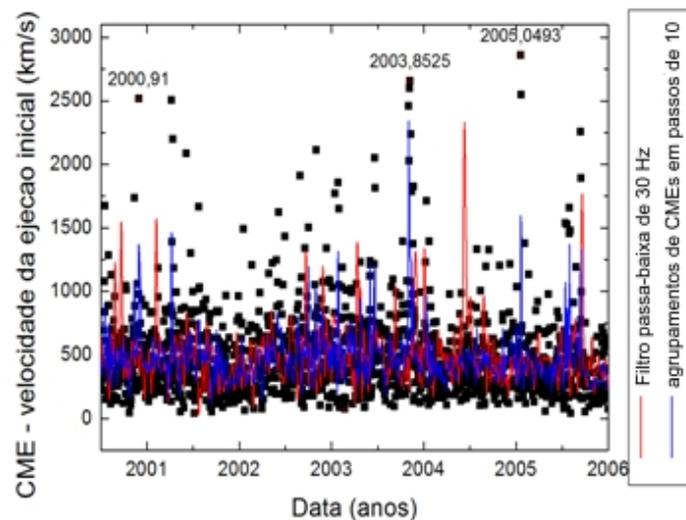


Figura 5.18 - Série temporal de CMEs, caracterizadas pela velocidade inicial da ejeção (km/s). As CMEs mais intensas são assinaladas por suas datas. Em vermelho um filtro passa-baixa em 30 Hz (12 dias). Em azul a aglutinação das CMEs em passo de 10 eventos. Fica evidente que as maiores ocorrências, em consonância com as variações da componente geomagnética H estão associadas à aglomerações de CMEs.

5.3 – Os dados solares do Heliômetro

5.3.1 – A série temporal

Observando os dados solares em comparação com as variações da componente geomagnética H, vemos que a contagem de manchas permite não mais que uma indicação da época em que aparecerá um maior número de tempestades geomagnéticas; e que o índice de flares deixa a desejar mesmo quanto a relacionar diretamente flares maiores a tempestades geomagnéticas. Nossa análise se perfila às de outros grupos e ao modelamento heliofísico, como por exemplo, a de Kane

(2006). A contribuição original foi indicar um método para definir as funções de probabilidade. Estas mostram, novamente trilhando a literatura da área, que o quadro é claramente mais determinístico para as CMEs. No entanto, não existe método heliofísico que seja capaz de provê-las. Os trabalhos anteriores com o monitoramento do diâmetro fotosférico, apontam que súbitas e intensas perturbações daquele são bem relacionadas com a eclosão de CMEs ou grandes flares.

Os trabalhos anteriores utilizaram a série de dados do Astrolábio Solar, análise feita por Reis Neto et al. (2012). Esta é razão da escolha do período analisado. Nos itens precedentes estudamos as variações do campo geomagnético medido globalmente e localmente, em particular no Observatório Magnético de Vassouras, e as ocorrências dos fenômenos solares que mais definem e impactam o clima espacial. A partir daqui, mostram-se dados inéditos do diâmetro solar, produzidos pelo Heliômetro do Observatório Nacional, com o que se ganha simultaneamente em precisão e em medição do entorno do limbo solar. A descrição instrumental do Heliômetro é apresentada no Apêndice 1.2, e os detalhes teóricos, experimentais e técnicos em Reis Neto (2009).

A série temporal do Heliômetro foi iniciada no mês de junho do ano de 2011, quando o mesmo se tornou plenamente operacional, sendo que suas medidas são tomadas diurnamente. Nesta tese, utilizam-se os dados até abril de 2012. A série temporal com os dados do diâmetro solar do Heliômetro se encontra na figura 5.19.

Embora o presente ciclo 24 da atividade solar se apresente como o mais brando dos últimos 200 anos, e o biênio 2011/2012 tenha sido dramaticamente variado, no que concerne ao clima espacial e tempestades geomagnéticas, o período considerado neste trabalho contém eventos capazes de caracterizar os dados aqui discutidos.

A evolução dos valores diários da série heliométrica do diâmetro solar é mostrada na figura 19. Um ajuste de primeira ordem resulta numa tendência crescente, com aumento linear anualizado de 0,17 arcsec. Este valor concorda com a análise de Boscardin (2011), a qual prevê importantes aumentos do diâmetro solar neste período por combinar a chegada ao máximo do ciclo de atividades, com a chegada de um mínimo do envelope secular de ciclos solares. Também à luz das

abruptas e intensas variações na contagem de manchas nos anos de 2011 e 2012 grandes variações do diâmetro fotosférico devem ser tomadas como localmente plausíveis. Mais adiante veremos que a abordagem do Clima Espacial enseja uma interpretação menos cataclísmica. No presente item desta monografia, porém, nos interessa é apontar que o trecho de série, tal como é utilizado, coincide com as análises do grupo de estudos solares do ON e com o regime de atividade do ciclo solar no mesmo trecho.

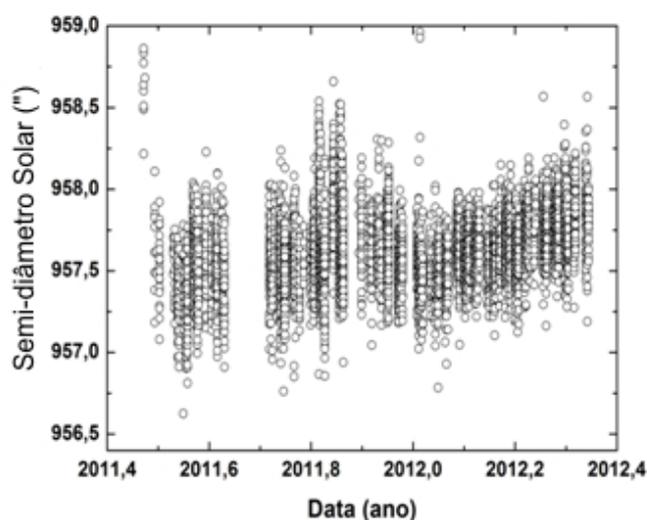


Figura 5.19 - Série de medidas do diâmetro solar fotosférico obtidas pelo Heliômetro no campus do Observatório Nacional. O vazio de dados representa um período em que alguns ajustes foram feitos no Heliômetro.

O ajuste linear serve para qualificar comparativamente a série usada aqui. Mas, evidentemente, não é uma representação adequada dela (tomando a parte pelo todo, se estendêssemos a variação anual linearizada obtida acima, teríamos uma variação de mais de duas vezes a escala de altura da própria fotosfera num ciclo de atividades). A correlação entre os dados observados e o ajuste linear é de 0,26 e 0,33, respectivamente utilizando abordagens paramétricas e não-paramétricas. Enquanto que, os valores que se deveriam esperar seriam 0,70, coincidente para as duas abordagens, tomando uma distribuição normal de valores em torno do ajuste linear, com desvio padrão dado pela dispersão observada das medidas. Por outro lado a representação das medidas observadas é muito bem indicada pelas médias diárias (figura 5.20). Adotando a significância estatística de

3σ , obtém-se χ^2 de 0,857 para 127 graus de liberdade em 132 dias possíveis, o que leva a uma excelência de ajuste melhor que 0,999.

A média diária das medidas do Heliômetro é de particular interesse, por um lado, porque é o dia a medida adequada para prescutar as séries das CMEs, de A_p , e em relação àquelas a série da componente H do campo geomagnético medida em Vassouras . Mais interessante ainda, quanto ao Heliômetro, é que tomando a média diária levamos em conta a varredura do limbo solar que é uma das vantagens do instrumento – ao contrário de apenas uma faixa estreita de heliolatitudes como se apresentava no Astrolábio Solar. A extensão das medidas do Heliômetro, então, deve ser inquirida para afastar a possibilidade de efeitos sistemáticos de origem atmosférica (o aspecto instrumental é visto no apêndice 1.1).

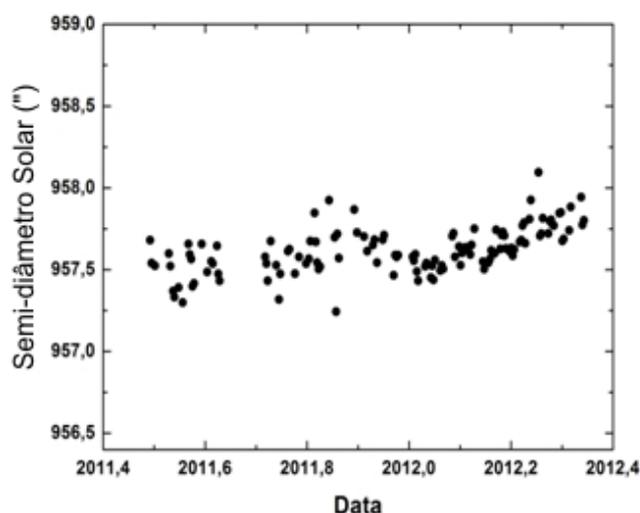


Figura 5.20 - Média diária das medidas do diâmetro solar fotosférico obtidas pelo Heliômetro no campus do Observatório Nacional.

5.3.2 – Inexistência de contribuição atmosférica:

Para comprovar a irrelevância de efeito de natureza meteorológica, buscamos os dados de condições climáticas referentes ao Aeroporto Internacional Tom Jobim, estação meteorológica do Galeão, vindos do site da University of Wyoming. Esta é a estação meteorológica mais próxima do Observatório Nacional a dar o perfil em altura das principais variáveis meteorológicas (Reis Neto, 2009). A série de dados

meteorológicos foi coligida de junho de 2011 até abril de 2012, em consonância com os dados do Heliômetro.

Utilizamos a série temporal do Heliômetro contra as séries meteorológicas em dois regimes distintos:

- A 42 metros de altura, ou seja, no primeiro degrau da troposfera acima da turbulência de solo.
- A 12000 metros de altura, ou seja, na região de inversão térmica acima da tropopausa.

A escolha reflete os dois principais tipos de influências atmosféricas que poderiam afetar as medidas.

Abaixo de 7 km de altitude, ocorre 50% do efeito refracional, sendo quase 90% devido a tropopausa e quase nenhum a 20 km de altitude. O efeito refracional diferencial entre os dois limbos solares, se não for corretamente modelado, introduz termos sistemáticos que se comportarão como variáveis em heliolatitude, uma vez que são dependentes da distância zenital. A refração depende em primeira ordem da temperatura e da pressão atmosférica, que foram as grandezas estudadas para o regime mais baixo, conforme Lutgens et al. (2012).

Em princípio, a estratosfera tem como regime principal, após a sazonalidade, a oscilação bi-anual. Ela é tipicamente 100 vezes mais forte que um termo undecenal que tem sido detectado, conforme Lutgens et al. (2012). Este termo undecenal levou a que alguns autores propusessem variações da velocidade dos ventos na baixa estratosfera como uma fonte de mimetização do sinal solar sobre as observações do diâmetro, como Rozelot et al.(2010). Muito embora não exista mecanismo, nem tenha sido apresentada qualquer hipótese que sustente esta proposta. Deste modo verificamos as velocidades das correntes no regime mais alto.

Os dados meteorológicos da Estação do Galeão são disponibilizados para dois horários distintos: 0Z e 12Z, adotando o jargão aeronáutico de Hora Zulu, a qual corresponde ao UTC (Tempo Universal Coordenado), referido ao Meridiano Inicial, de Greenwich, ou seja no tempo civil legal, Rio de Janeiro, das 03h00min e 15h00min. Na prática, só os dados de 12Z tem relevância para investigar influências atmosféricas sobre as medidas solares feitas com o Heliômetro. As medidas de 0Z

funcionaram como contraprova, bem como seriam úteis caso fosse interessante a interpolação de uma série meteorológica – mas, como era esperado, os valores noturnos não trouxeram qualquer tipo de informação e não são aqui detalhados.

Para as medidas com o Astrolábio Solar, Penna et al.(2012) mostraram que efetivamente não aparecia nenhuma relação, correlação, ou mínima inferência entre as variações meteorológicas na estratosfera e os resultados do monitoramento solar de mais de dez anos com aquele instrumento. Ao contrário, Reis Neto (2002) e Boscardin (2005) mostraram que as influências da meteorologia troposférica existem, podem ser explicadas instrumentalmente em função de gradientes térmicos, de modo que tem natureza sistemática e podem ser modelizadas, ajustadas, e compensadas nas medidas brutas.

Tabela 5.2 – Correlação de Pearson entre o diâmetro solar medido pelo Heliômetro e as grandezas meteorológicas relevantes na base da troposfera (42m)

	Pressão atmosférica (hPa)	Temperatura do ar (°C)
Diâmetro medido (")	0,20 ± 0,03	-0,14 ± 0,12

A correlação entre a Pressão Atmosférica e a Temperatura do ar é encontrada

Notando-se que tanto para o Astrolábio Solar quanto para o Heliômetro, os elementos de cálculo da refração são tomados durante as medidas do diâmetro, e considerados independentemente para cada bordo, fazendo com que apenas as flutuações da refração anômala diferencial devam ser investigadas. Para o Heliômetro, Andrei et al. (2012) mostram que a refração anômala não pode ter consequência diante da rapidez de cada aquisição (2 s), o que faz com apenas as altas frequências importem, e estas não respondem à sazonalidade e altura. Além do que, todo o instrumento – tanto as partes mecânicas como as ópticas – é construído em materiais com grande estabilidade térmica. As tabelas 5.2 e 5.3, e as figuras 5.21, 5.22, 5.23, e 5.24 exibem a inexistência de influências atmosféricas.

Tabela 5.3 – Correlação de Pearson entre o diâmetro solar medido pelo Heliômetro e as grandezas meteorológicas relevantes na base da estratosfera (12000m)

	Direção do Vento (°)	Intensidade do Vento (Nós)
Diâmetro medido (")	$0,19 \pm 0,06$	$-0,10 \pm 0,30$

A correlação entre a direção e intensidade do vento é encontrada em $-0,50$. Em contraponto ao diâmetro ela é significativa, embora seu valor sofra da constância do vento diurno sudoeste, já que a estação meteorológica do Galeão é debruçada sobre o Atlântico. Como comprovação adicional, a correlação entre a intensidade

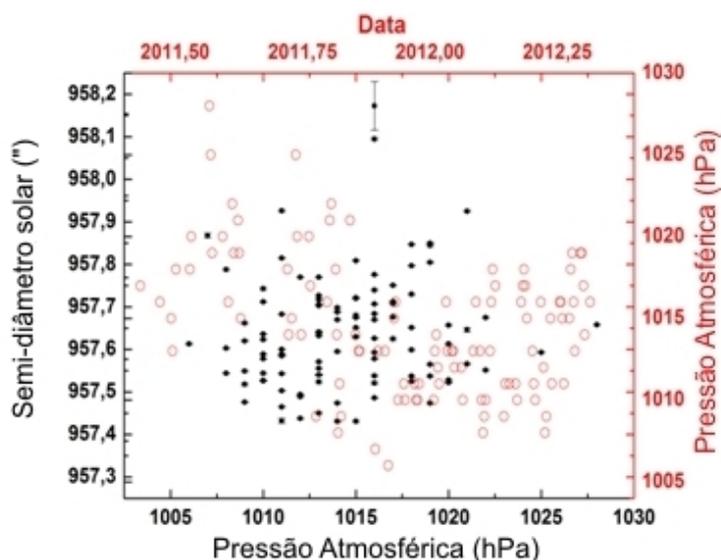


Figura 5.21 - Variação da pressão atmosférica com a época do ano (em vermelho), e ausência de dependência do diâmetro solar medido com o Heliômetro à pressão atmosférica (em preto). Valores relativos à base da troposfera.

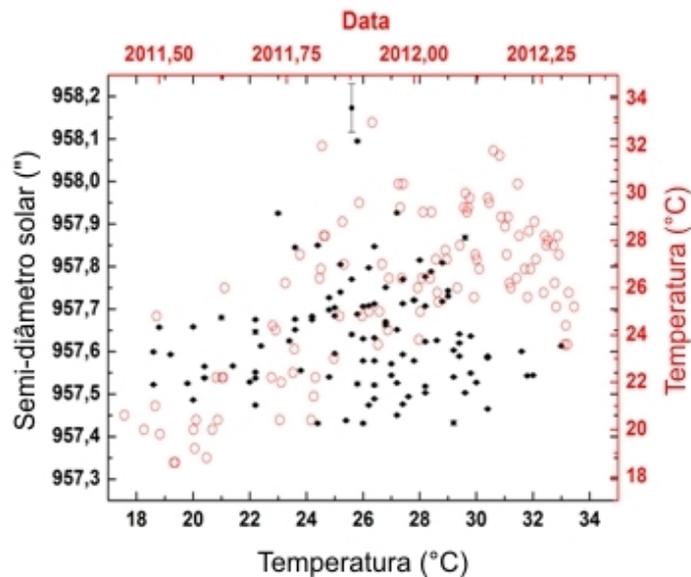


Figura 5.22 - Variação da temperatura do ar com a época do ano (em vermelho), e ausência de dependência do diâmetro solar medido com o Heliômetro à temperatura do ar (em preto). Valores relativos à base da troposfera.

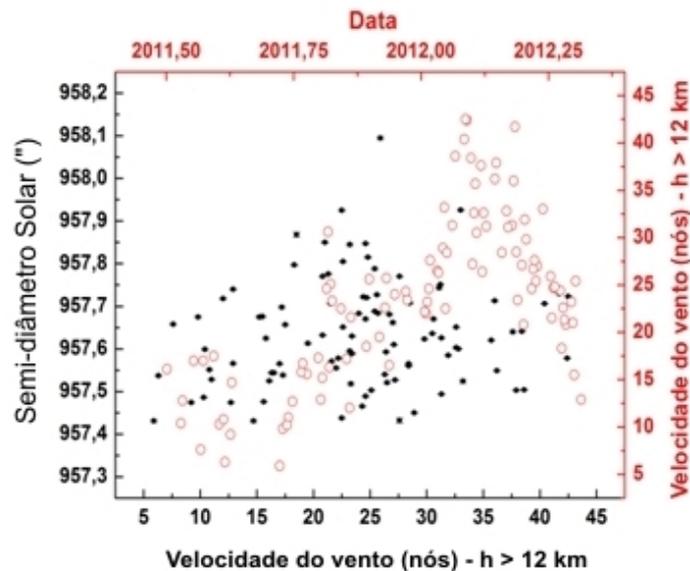


Figura 5.23 - Variação da velocidade do vento com a época do ano (em vermelho), e ausência de dependência do diâmetro solar medido com o Heliômetro à velocidade do vento (em preto). Valores relativos à base da estratosfera.

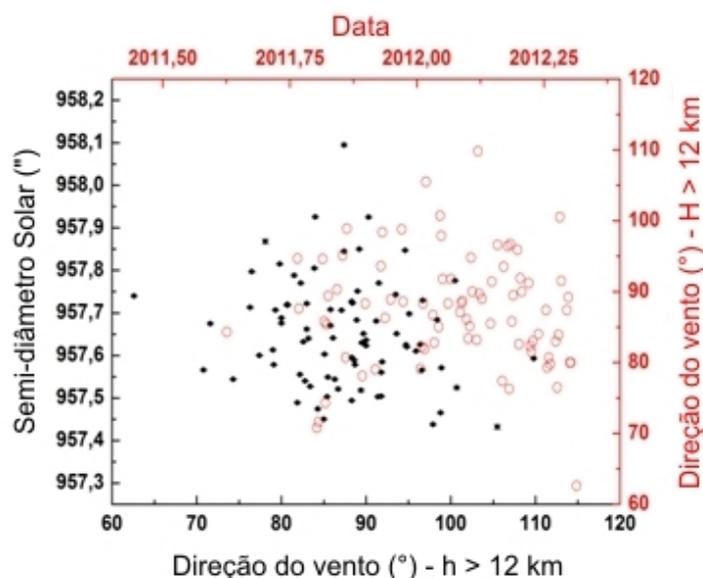


Figura 5.24 - Variação da direção do vento com a época do ano (em vermelho), e ausência de dependência do diâmetro solar medido com o Heliômetro à direção do vento (em preto). Valores relativos à base da estratosfera.

5.3.3 – A Relação com as CMEs

A variação do diâmetro solar dentro do ciclo de atividades foi inicialmente postulada por Laclare (1983), no CERGA – Observatório de la Cote d’Azur e por Chollet et al. (1978) no Observatório de Paris. Diversos resultados de solo confirmaram-na, em especial pela longa extensão e copioso número de medidas a série do Observatório Nacional, visto em Reis Neto et al. (2012), a qual permitiu enunciar modelos que a explicavam Andrei et al. (2004).

Os resultados mais recentes de observações por satélites confirmam a realidade daquelas variações, como Khun et al. (2012). Nas altas frequências, Boscardin (2011) e Reis Neto et al. (2012) começam a se encontrar relações pontuais entre mega eventos solares e picos na variação do diâmetro medido. Mas são os resultados do Heliômetro que podem permitir tipificar e quantificar tal relação, uma vez que as medidas se dão ao redor do limbo solar num mesmo dia – enquanto o Astrolábio Solar recobria o limbo numa varredura de seis meses.

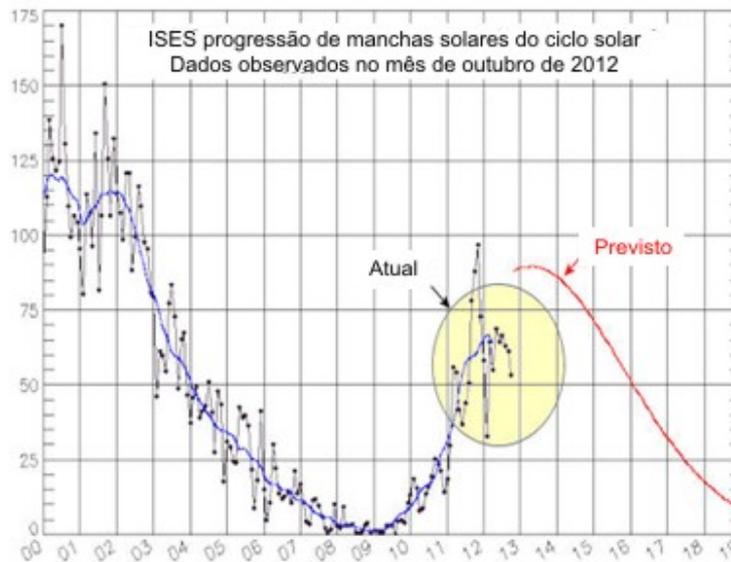


Figura 5.25 - Ciclo solar 24, representado pela contagem de manchas solares – NOAA, Estados Unidos.

A série temporal do Heliômetro, discutida no item 5.3.1, é ainda pouco extensa e transcorre num ciclo solar anormalmente brando (mostrado na figura 5.25). Ainda assim, notam-se períodos de crescimento rápido na figura 5.27.

No item 5.1.3, verificamos que as CMEs são, dentre os fenômenos explosivos solares, aqueles mais eficientes na construção de estruturas do Clima Espacial que causam tempestades magnéticas. Ao mesmo tempo sabe-se – veja-se, por exemplo, a figura 5.8 – nem todas as CMEs, conquanto violentas, vão estar na origem de uma tempestade geomagnética. Assim tomamos todos os eventos de CMEs registrados pelo coronógrafo LASCO do satélite SOHO, para o mesmo período de observações do Heliômetro. Por esta estratégia, estão representadas todas as CMEs que vão originar tempestades geomagnéticas, mas num quadro de excitação solar, particularmente da fotosfera – conforme discutido em 5.2.2. Fez-se então uma série temporal de CMEs referente ao período de atividade do Heliômetro do ON/MCTI, e procuraram-se trechos em que acontece um número maior de eventos de maior intensidade. A janela de busca segue a metodologia utilizada em (5.2.1). Os picos de CMEs encontrados são mostrados na figura 5.26.

Da mesma forma, tomou-se a série temporal do Heliômetro, já introduzida em (5.3.1) para encontrar os máximos locais, utilizando o método da janela móvel. A série de variação do diâmetro traz diferentes medições do diâmetro, ou seja, é

inerente uma dispersão que não aparece na contagem discreta de eventos da série das CMEs. Em paralelo, a hipótese que baseia esta comparação é que o estado da fotosfera forma uma matriz extensa que vai dar origem a diversas CMEs na coroa solar. Por consequência devemos esperar não exatamente picos locais, mas elevações localizadas. Ou seja, é preciso utilizar janelas de busca mais largas.

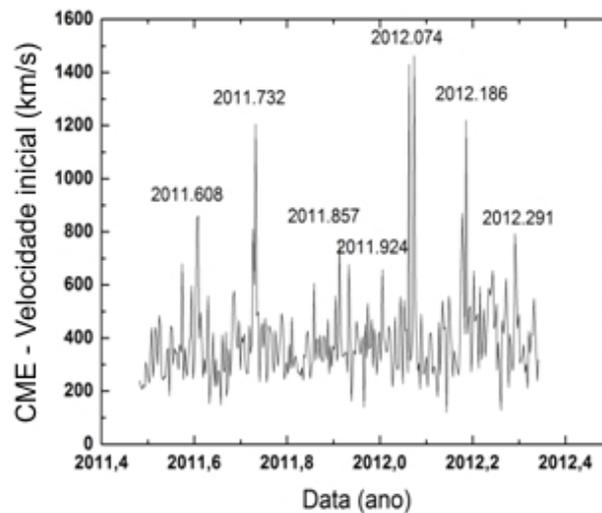


Figura 5.26 - Série temporal de CMEs observadas pelo instrumento LASCO/SOHO, no período equivalente às observações heliométricas. São assinalados os picos, caracterizados por alto número e intensidade de eventos.

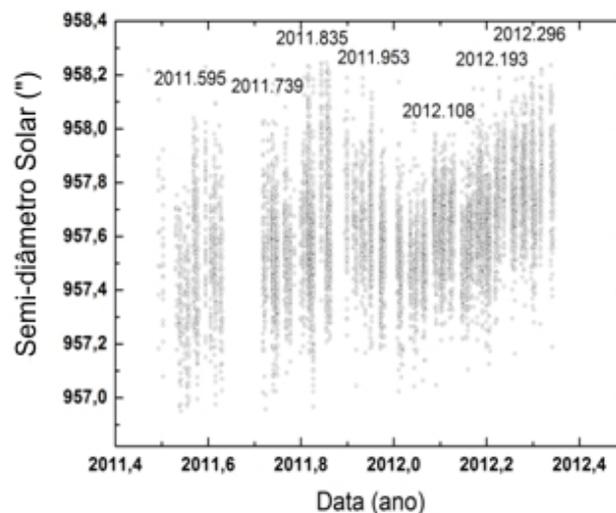


Figura 5.27 - Série heliométrica de medidas do diâmetro solar. Marcados o centro dos máximos locais da série.

Foi empregada a largura de 6% da distribuição, equivalente a cerca de 20 dias (comensurável com a duração de grupos de manchas, e fornecendo igual número de pontos ao da série de CMEs), e com esta, se determina também o início de cada elevação localizada. A figura 5.27 traz a série heliométrica e as elevações locais.

A correlação numa série temporal é difícil de ser estabelecida. Existe sempre o risco de relacionar os pontos a partir da própria hipótese - relação entre variações do diâmetro e eclosão de CMEs – que se quer verificar. Testes não-paramétricos de ranqueamento iriam sofrer do mesmo viés. Assim, foi produzida a tabela 5.4, que traz os picos, e no caso do diâmetro o início, da elevação.

Tabela 5.4 - Comparação entre a datação de picos da série temporal de CMEs e máximos locais da série heliométrica do diâmetro solar.

CMEs	Medidas heliométricas do diâmetro solar		Diferenças (dia)	
	Data do pico	Data do máximo	Início da elevação	Coluna 1 - Coluna 2
2011,608	2011,595	2011,569	+4.4	+14.2
2011,732	2011,739	2011,709	-2.6	+8.4
2011,857	2011,835	2011,817	+8.0	+14.6
2011,924	2012,953	2011,923	-10.6	+0.4
2012,074	2012,108	2012,082	-12.4	-2.9
2012,186	2012,193	2012,174	-2.6	+4.4
2012,291	2012,296	2012,285	-1.8	+2.2

As últimas colunas à direita (Diferenças) são sempre no sentido de pico das CMEs menos localização (máximo ou início) da elevação local do diâmetro solar.

Os elementos que imediatamente ressaltam da tabela são que há uma inquestionável proximidade entre os picos das CMEs e as elevações locais do diâmetro solar; que usualmente os picos das CMEs antecedem os máximos locais do diâmetro; mas que o início da elevação local do diâmetro, via de regra, precede o pico das CMEs.

Estas verificações são postas à prova fixando-se os picos das CMEs e sorteando elevações falsas – porém de mesmas características, quais sejam, sequenciamento temporal e máximo local conforme o método da janela de busca - ao acaso por um mecanismo de Monte Carlo (com 130000 sorteios, para 130 graus de liberdade). São aplicados testes com significância estatística de 0,05 para as diferenças mimetizando as duas últimas colunas da tabela 5.4. O teste t-Student mostra que a probabilidade de serem obtidas aquelas localizações para o máximo e início das elevações do diâmetro são, em ambos os casos, 0,20. A probabilidade baixa, mas não excludente, reflete ainda que ambas as séries são progressões temporais – e a série fabricada pelos sorteios de Monte Carlo também o é para formar uma simulação correta. Porém o teste-F, ou seja, de diferença das variâncias, dá probabilidade menor que 0,0001 em ambos os casos de que as diferenças realmente observadas sejam produto do acaso fabricado pelos sorteios de Monte Carlo. Deste modo a Hipótese Nula, qual seja de que as duas séries de datas, relativas às CMEs e ao diâmetro, sejam provenientes da mesma população estatística não pode ser recusada. Pode-se então arguir que deve existir uma ligação causal entre elas, a qual é trazida pelo modelo segundo o qual perturbações fotosféricas provêm o mecanismo disparador de CMEs quase simultâneas, algumas delas intensas, em pontos afastados do Sol. No que atina a este trabalho, variações do diâmetro solar, ao longo do entorno do limbo, podem ser precursoras de CMEs capazes de gerar tempestades geomagnéticas.

5.4 – Os dados magnéticos de Vassouras e os dados solares heliométricos

No apêndice 1.1, a capacidade operacional do Observatório Magnético de Vassouras é descrita. Naturalmente, no que tange a atestar qualidade dos resultados supridos seria supérfluo, uma vez que a estação faz parte da INTERMAGNET, que é “International Real-time Magnetic Observatory Network”. No

item 5.2, ademais, os resultados de Vassouras foram comparados com os de outra estação da INTERMAGNET – a de Adis Abeba - obtendo-se excelente concordância entre eles, e de ambos para as medidas globais fornecidas por A_p , índice planetário diário de perturbações do campo geomagnético.

Em particular, a componente H – horizontal – é tipicamente deprimida quando da ocorrência de uma tempestade magnética, ou dito de outra forma, de perturbações importantes do índice A_p , perdurando por dias (Mayaud, 1980). Em baixas latitudes, como é o caso do Observatório Magnético de Vassouras, a componente H fica caracteristicamente mais deprimida quando a corrente de anel é intensificada por uma tempestade geomagnética, já que o campo que esta gera é quase paralelo ao eixo do dipolo magnético terrestre (McPherron, 1997). Muito embora, correspondentemente, também seja grande a influência do eletrojato equatorial e das correntes ionosféricas de Sol calmo, ambas independentes das grandes perturbações do meio interplanetário. E a maior parte do fluxo de partículas carregadas trazidas naquelas perturbações é conduzida em direção aos polos, como exemplificado pela atividade auroral característica das altas latitudes.

Em resumo, deve-se observar mínimos localizados na série da componente H medida em Vassouras, bem como a glosa da variação intradiária característica. Porém levando em conta outras anomalias presentes na série, em virtude da localização do observatório, e que nem toda CME causará uma tempestade geomagnética, devido ao direcionamento espacial e magnético.

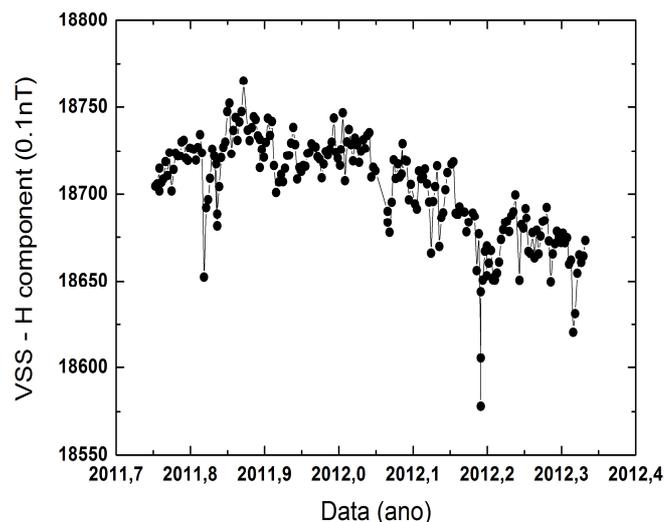


Figura 5.28 - Série temporal preliminar (dados não tratados) da componente H do campo geomagnético medida pelo Observatório Magnético de Vassouras – ON/MCTI. Dados em 0,1 nT.

Ainda, é desejado investigar o período de funcionamento do Heliômetro. Como visto nos itens anteriores, as características de sensibilidade e omni-direcionalidade daquele monitor da variação do diâmetro solar permitiu detectar-se antecipadamente picos de eclosões de CMEs em grupos numerosos e intensos, deste modo aumentando substancialmente a probabilidade de aparecimento de tempestades ou sub-tempestades geomagnéticas. No entanto este período, de meados de 2011 a meados de 2012, coincide com problemas e substituição instrumental em Vassouras, de modo que a série temporal da componente H de que dispomos é ainda preliminar e incompleta. Estas circunstâncias devem ser levadas em conta.

A série temporal bruta da componente H medida na estação geomagnética de Vassouras é apresentada na figura 5.28. Nela, percebem-se trechos de alto nível de ruído e deriva instrumental intermitente. Medidas isoladas diferindo fortemente da vizinhança imediata foram retiradas em dois casos. O trecho inicial, ascendente em oposição ao presente estado do termo secular da componente H é de difícil tratamento ad-hoc e foi todo retirado.

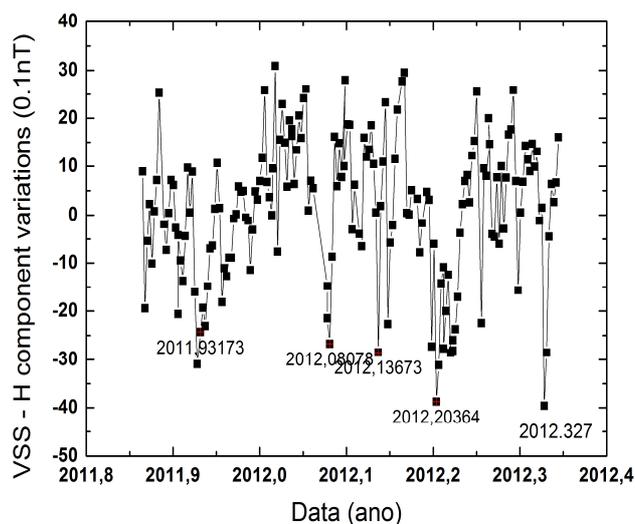


Figura 5.29 - Depressões locais da componente Geomagnética H de VSS (ver texto para detalhamento do método de escolha através de janela deslizante). A série difere dos dados brutos pela remoção da primeira parte e remoção linear da tendência secular.

A série foi então expurgada da tendência puramente linear representando o termo de decréscimo secular. Os pontos de depressão foram localizados pelo sistema de janela deslizante, conforme empregado anteriormente para as séries temporais das CMEs e do diâmetro fotosférico observado. Além da coerência de metodologia, o sistema traz a vantagem de naturalmente filtrar mínimos situados em trechos em que existem ausências de dias de medidas, pois não são percebidos como mínimos locais. A figura 5.28 mostra as depressões detectadas.

A tabela 5.5 compara as datas encontradas na série temporal de componente H, referentes às depressões locais mais importantes, com as eclosões de CMEs no período, escolhidas por sua intensidade e agrupamentos. Embora todos os eventos de CMEs mais importantes no período, caracterizadas por grupos numerosos de eventos quase-simultâneos com pelo menos um deles de grande intensidade, tenham correspondência imediatamente posterior nas depressões mais importantes da componente H do campo geomagnético medido em Vassouras, note-se que há um mínimo local de H sem correspondência nas CMEs selecionadas. Existem várias razões às quais isto pode ser atribuído, desde as acima citadas de outras respostas do campo geomagnético em baixas latitudes e defeitos da série preliminar, ou

mesmo outras formas de injeção de partículas carregadas de alta velocidade por sobre o vento solar do Sol calmo. A origem deste valor desemparelhado, no entanto, não é de interesse aqui. O que se está investigando é o caso contrário: se serão as medidas da variação do diâmetro solar capazes de prever as CMEs mais importantes, as quais possuem alta possibilidade de causar tempestades geomagnéticas de grande intensidade. Portanto o que queremos verificar é se este grupo de CMEs, para o qual uma previsão através do diâmetro solar foi obtida, aparece associado a variações tão claras do campo geomagnético que são visíveis mesmo numa série não tratada da componente H.

Tabela 5.5 - Comparação entre a datação das CMEs mais importantes, caracterizadas por grupos numerosos de eventos quase-simultâneos com pelo menos um deles de grande intensidade, e as maiores depressões da componente H do campo geomagnético medido na estação de Vassouras.

CMEs	Depressão local de H	Diferença (dia)
Data do pico	Data do mínimo	Coluna 2 - Coluna 1
2011,924	2011,932	+2.9
2011,074	2011,081	+2.6
	2012,137	
2012,186	2012,204	+6.5
2012,291	2012,327	+13.2

A última coluna à direita (Diferença) é sempre no sentido de data do mínimo local da componente H menos data da CME mais intensa do grupo. Existe um mínimo local de H sem correspondente CME intensa.

Para os quatro pontos coincidentes, calculamos a probabilidade de ocorrência randômica da mesma forma que antes, para as CMEs e diâmetro solar. A partir da construção de quatro datas fictícias, adequadas a serem aceitas como mínimos locais da componente H pelo método das janelas deslizantes, através de 130.000 sorteios de Monte Carlo para todas as datas do intervalo, os testes Student-t e F-test mostram respectivamente que a diferença média pode ser atribuída ao acaso com significância de 0,11 para o limite de 1σ e significância de 0,32 para o limite de 3σ , e que a variância das diferenças pode ser atribuída ao acaso com significância de 0,0001. Os testes estatísticos, portanto, indicam que os mínimos locais da componente H encontrados estão associados às CMEs. No entanto, como efetivamente dispomos apenas de quatro pontos, tomamos este resultado como sugestivo e encorajador da continuidade destas medidas e linha de análise. Formalmente fiquemos com a definição padrão da Hipótese Nula, de que os testes não permitem rejeitar a hipótese de acordo entre as distribuições de CMEs e mínimos locais da componente H do campo geomagnético, na amostra de intervalo de tempo considerada.

6 – Conclusões

Neste trabalho de mestrado, realizamos uma vasta pesquisa bibliográfica, no tocante ao embasamento teórico necessário nos vários pontos importantes do contexto do Clima Espacial para este trabalho, ou seja, o ambiente formado pelo Sol (fonte das perturbações que resultam em uma tempestade geomagnética), meio interplanetário (por onde as perturbações se propagam), e Terra (que sofre as consequências). Assim, confirmamos a necessidade de uma compreensão mais ampla, e essa, por sua vez, demanda a interdisciplinaridade de vários campos científicos (Astronomia Solar, Heliosismologia, Magnetohidrodinâmica, Física de Plasmas, Geomagnetismo, climatologia, Engenharias, entre outros), uma vez que o saber de um único pesquisador cada vez mais é insuficiente para explicar toda a gama de fenômenos que o ambiente Sol-Meio Interplanetário-Terra abrange, necessitando o amplo debate entre equipes de pesquisadores para que a compreensão fenomenológica fique cada vez mais clara, palpável e inteligível.

Fizemos um trabalho estatístico que quantifica eventos que antes eram delineados em outros estudos, mostrando que a efetividade maior no que tange a ocorrência de uma tempestade geomagnética são as CMEs, justamente devido à diferença de suas propriedades (mais notadamente as velocidades) são as estruturas heliofísicas mais efetivas na geração de tempestades geomagnéticas. Flares, como visto no trabalho, tem pouca efetividade somente por elas mesmas, mas podem causar alterações na ionosfera da Terra, causando perturbações nas comunicações. As manchas solares são as fontes de campo heliomagnético concentrado, ou seja, são regiões favoráveis a ocorrência de processos de reconexão magnética, fenômeno responsável pela ocorrência de flares e CMEs.

Buscamos então investigar a relevância do Observatório Geomagnético de Vassouras no contexto das variações geomagnéticas globais. Assim, fizemos a comparação entre os dados das séries históricas da componente geomagnética H (a mais sensível às variações de curto período do campo geomagnético) de Vassouras com o Observatório Geomagnético de Adis Abeba, na Etiópia. Fizemos análises estatísticas por dois métodos diferentes (segregação de vales, e derivadas temporais), e em ambos os casos, comprovou-se que os dois observatórios são

concordantes no tocante à ocorrência de tempestades geomagnéticas (ou seja, picos negativos), mostrando que os dados de VSS possuem sensibilidade às variações geomagnéticas de escala global, logo, podem ser usados em trabalhos futuros referentes à ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Buscamos também aferir a qualidade dos dados do diâmetro solar vindos do Heliômetro do ON/MCTI, e na ausência de uma série heliométrica independente para se realizar a comparação, resolvemos investigar se a interferência de grandezas atmosféricas em dois regimes (42 m e 12000 m de altitude em relação ao nível do mar), uma vez que grandezas como pressão e temperatura, no regime de 42 m, bem como a velocidade e intensidade dos ventos (no regime de 12000 m), tais grandezas poderiam interferir nos dados por meio de criação de eventos lenticulares que viriam a mimetizar as medidas do diâmetro solar. Em ambos os regimes, a interferência atmosférica é desprezível, mostrando que os dados do diâmetro solar tomados no Heliômetro são confiáveis.

Com todas estas análises realizadas, buscando conhecer os eventos heliofísicos mais relevantes na geração de tempestades geomagnéticas, bem como a da globalidade dos dados do Observatório Magnético de Vassouras e a qualidade dos dados do Heliômetro, restou apenas verificar se as variações súbitas do diâmetro solar realmente precedem a eclosão de agrupamentos de CMEs (que como visto na figura 5.18, são causadores de tempestades geomagnéticas). E foi comprovado que as variações do diâmetro solar precedem a ocorrência de CMEs, pois conforme modelo que nos apoiam e mostram que a alimentação de eventos na coroa solar possuem origens na fotosfera, e nossa análise estatística mostra que as séries temporais da eclosão de CMEs e variações do diâmetro solar não são diferentes, ou seja, que a proximidade entre os eventos de ambas as séries sejam produto do acaso.

Usando a série de CMEs previstas pelo Heliômetro, fomos então comprovar a sensibilidade dos dados da componente geomagnética H de Vassouras à estas CMEs, e vimos que VSS realmente pôde perceber tais eventos. Novamente, com uma análise criteriosa, comprovamos que as séries temporais da eclosão de CMEs e da componente geomagnética H não são diferentes, ou seja, que a proximidade entre os eventos de ambas as séries sejam produto do acaso.

Ou seja, a relação variação súbita no diâmetro solar precede a eclosão de CMEs, e que podem causar tempestades geomagnéticas, está comprovada.

Finalmente, mencionamos que durante a realização deste trabalho de mestrado, também foram analisados estatisticamente a eficiência de buracos coronais para a geração de tempestades geomagnéticas. Os resultados deste estudo foram apresentados como parte de trabalhos nas reuniões do 39th COSPAR (Garcia et al., 2012) e da IAU (Penna et al., 2012). No entanto, como as séries de medidas de localização, extensão e ocorrência de buracos coronais são precárias nos bancos de dados geofísicos e heliofísicos, a análise estatística não pode ser feita nos moldes utilizados para os outros tipos de eventos solares. Assim, preferimos na tese limitarmo-nos à descrição qualitativa do capítulo 3.

Vale neste ponto mencionar que as discussões e resultados deste trabalho foram também apresentados no I Magnet Brazil – State of the Art and Future Challenges (Garcia et al., 2011) e no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (Garcia et al., 2012), com grande proveito para enriquecimento de nossas análises. Da mesma forma, o trabalho foi substancialmente acrescentado pelas missões científicas de curta duração às sedes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Santa Maria e São Jose dos Campos e esclarecedoras discussões com os respectivos corpos de pesquisa.

Os estudos, análises e resultados apresentados nesta tese apontam para a relevância da continuidade da pesquisa em Clima Espacial no Observatório Nacional, em consonância com o resto da comunidade brasileira, bastante ativa na área. E apontam também para o desenvolvimento de métodos originais combinando as expertises existentes em heliofísica e geomagnetismo.

Bibliografia:

ABHYANKAR, K.D., 1977, A Survey of the Solar Atmospheric Models, *Astronomical Society of India*, 5, pp. 40–44.

AMBASTHA, A., MAURYA, R. A, PANDITI, V. T., 2012, Photospheric Transients and Spectral Line Changes Associated with a Large X2.2 Flare, In: 39th COSPAR, E2.3-0007-12, Mysore, July.

AMIT, H., OLSON, P., 2006, Time-Average and Time-Dependent Parts of Core Flow, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 155, pp. 120–139.

ANDERSON, D., ROWELL, T.F, 1999, *Space Environment Topics: The Ionosphere*, Space Environment Center, pp. 1-4.

ANDREI, A. H., BOSCARDIN, S., CHOLLET, F., DELMAS, C., GOLBACI, O., JILINSKI, E. G., KILIC, H., LACLARE, F., MORAND, F., PENNA, J.; REIS NETO, E., 2004, Comparison of CCD Astrolabe Multi-site Solar Diameter Observations, *Astronomy & Astrophysics (Berlin)*, v. 12, pp. 1-10.

ANDREI, A. H., D'ÁVILA, V., REIS NETO, E., PENNA, J., BOSCARDIN, S., COLETTI, A., OLIVEIRA, L. C., SIGISMONDI, C., 2012, The Development and First Year of Results from the Heliameter of the Observatorio Nacional, In: I 39th COSPAR, PSW.3-0014-12, Mysore, July.

ANDREI, A.H., BOSCARDIN, S.C., REIS NETO, E., PENNA, J.L., D'ÁVILA, V.A. D'ÁVILA, A Bi-modal Description for the Correlation between the Semi-diameter and Solar Activity Variations, IN: "Investigating Solar Diameter, Shape, and Irradiance, International Space Science Institute, Berna, Suíça. 2006.

ANTIA, H. M.; BASU, S.; HILL, F.; HOWE, R.; KOMM, R. W.; SCHOU, J., 2001, Solar-Cycle Variation of the Sound-Speed Asphericity from GONG and MDI data 1995-2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 327, Issue 3, pp. 1029-1040.

BAKER, D. N., KANEKAL, S. G., LI, X., MONK, S. P., GOLDSTEIN, J., BURCH, J. L., 2004, An Extreme Distortion of the Van Allen Belt Arising from the 'Halloween' Solar Storm in 2003. *Nature*, vol 432, pp. 878-881.

BILITZA, D., 2001, International Reference Ionosphere 2000. Radio Science, Vol. 36, nº 2, pp. 261-275.

BILITZA, D., REINISCH, B. W., 2008, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters, Advances in Space Research 42, pp. 599–609.

BOSCARDIN, S. C., 2005, Análise de Observações do Diâmetro no Contexto da Atividade Solar, Dissertação de Mestrado, Observatório do Valongo, Rio de Janeiro, Brasil.

BOSCARDIN, S. C., 2011, Um Ciclo de Medidas do Semidiâmetro Solar com Astrolábio, Dissertação de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

BOTELER, D. H., PIRJOLA, R. J., NEVANLINNA, H. 1998, The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth's Surface. Advances in Space Research, Vol. 22, no 1, pp. 17-27.

BRANDT, P. C., MITCHELL, D. G., ROELOF, E. C., STAMATIOS, M. K., PARANICAS, C. P., MAUK, B. H., SAUR, J., DEMAJISTRE, R., 2005, ENA Imaging: Seeing the Invisible. Johns Hopkins Apl. Technical Digest, 26, number 2, pp. 143-155.

CHOLLET, F., DEMARQ, J., LACLARE, F., 1978, Experimental Observations of the Sun with the Astrolabe at Cerga Observatory During the Summer of 1976, Astronomy and Astrophysics, 33, pp. 7-9.

COMMITTEE ON SOLAR AND SPACE PHYSICS, COMMITTEE ON SOLAR-TERRESTRIAL RESEARCH, COMMISSION ON PHYSICAL SCIENCES, MATHEMATICS, AND APPLICATIONS, COMMISSION ON GEOSCIENCES, ENVIRONMENT, AND RESOURCES, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1997, Space Weather: A Research Perspective, 1st ed, The National Academies Press, Washington D.C., USA.

COMMITTEE ON THE SOCIETAL AND ECONOMIC IMPACTS OF SEVERE SPACE WEATHER EVENTS: A WORKSHOP, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, Severe Space Weather Events--Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report, 1st ed, The National Academies Press, Washington D.C., USA

D'ÁVILA, V., REIS NETO, E., PENNA, J., OLIVEIRA, L. C., COLETTI, A., MATIAS, V., ANDREI, A. H., BOSCARDIN, S., 2009, The Development of the Heliometer of the Observatório Nacional, In: Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 264, p. 487-492.

DAGON, K. E., 2010, Statistics of a Solar Tachocline Model with Stochastic Forcing. Undergraduate Senior Thesis. Brown University, Providence, Rhode Island, USA.

DENARDINI, C. M., 2007, A Conductivity Model for the Brazilian Equatorial E-Region: Initial Results, Revista Brasileira de Geofísica, 25 (supl.2), pp-87-94

DWIVEDI, B. N., 2006, Our Ultraviolet Sun, Current Science, vol. 91, pp. 587-595.

ELLIOT, J. R., GOUGH, D. O., 1999, Calibration of the Thickness of the Solar Tachocline, The Astrophysical Journal, Volume 516, Issue 1, pp. 475-481.

EMSLIE, A. G. , KUCHAREK, H. , DENNIS, B. R., GOPALSWAMY, N., HOLMAN, G. D., SHARE, G. H. , VOURLIDAS, A., FORBES, T. G., GALLAGHER, P. T., MASON, G. M. , METCALF, T. R. , MEWALDT, R. A. , MURPHY, R. J. , SCHWARTZ, R. A. , ZURBUCHEN, T. H., 2004, Energy Partition in Two Solar Flare/CME Events. Journal of Geophysical Research, Vol. 109, A10104, pp. 15.

ERDÉLYI, R., BALLAI, I., 2007, Heating of the Solar and Stellar Coronae: A Review. Astronomische Nachrichten, 328, 8, 726 – 733.

GARCIA, M., ANDREI, A. H., PENNA, J. L., PAPA, A. R. R., D'ÁVILA, V. A., REIS NETO, E., BOSCARDIN, S. C., FIGUEIREDO, I., 2011, Space Weather: Mechanisms and On-Earth Geomagnetic Effects. In: I Magnet Brazil – State of the Art and Future Challenges, 10, Búzios, June.

GARCIA, M., ANDREI, A. H., PENNA, J. L., PAPA, A. R. R., D'ÁVILA, V. A., REIS NETO, E., BOSCARDIN, S. C., FIGUEIREDO, I., SIGISMONDI, C., 2012, Variations of the Solar Diameter as Precursor for Solar Activity and Bursts, In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, 02, São Paulo, September.

GARCIA, M., ANDREI, A. H., PINHEIRO, K., PAPA, A. R. R., BOSCARDIN, S., PENNA, J., REIS NETO, E., SIGISMONDI, C., D'ÁVILA, V., FIGUEIREDO, I., 2012, The SIDAMAS Project and a Brazilian Program of Geomagnetic Storms Warning, In: 39th COSPAR, STW-C-097 PSW.1-0035-12, Mysore, July.

GARCÍA, R. A., TURCK-CHIÈZE, S., JIMÉNEZ-REYES, S.J., BALLOT, J., PALLÉ, P. L., EFF-DARWICH, A., MATHUR, S., PROVOST, J., 2007, Tracking Solar Gravity Modes: The Dynamics of the Solar Core. *Science*, 316, 5831, pp. 1591.

GONZALEZ, W. D., JOSELYN, J. A., KAMIDE, Y., KROEHL, H. W., ROSTOKER, G., TSURUTANI, B. T., VASYLIUNAS, V. M., 1994, What is a Geomagnetic Storm?, *J. Geophys. Res.*, 99(A4), pp. 5771–5792.

GOPALSWAMY, N., HANAOKA, Y., KOSUGI, T., LEPPING, R. P., STEINBERG, J. T., PLUNKETT, S., HOWARD, R. A., THOMPSON, B. J., GURMAN, J., HO, G., NITTA, N., HUDSON, H. S., 1998, On the Relationship Between Coronal Mass Ejections and Magnetic Clouds, *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 14, pp. 2485-2488.

GUMMOW, R. A., 2002, GIC effects on pipeline corrosion and corrosion control systems. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64, pp. 1755 – 1764.

GUMOW, R.A., ENG, P. GIC, 2001, Effects on Pipeline Corrosion and Corrosion Control Systems. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, pp. 1755 – 1764.

HANSTEEN, V. H., LEER, E., HOLZER, T. E., 1997, The Role of Helium in the Outer Solar Atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 482, pp. 498-509.

HEIKKILÄ, U., BEER, J., FEICHTER, J., 2008, Modeling Cosmogenic Radionuclides ^{10}Be and ^7Be during the Maunder Minimum using the ECHAM5-HAM General Circulation Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, pp. 2797–2809.

HOLMAN, G. D. 2006, The Mysterious Origins of the Solar Flares, *Scientific American*, 294, pp. 38-45.

HORNE, R. B., THORNE, R. M., SHPRITS, Y. Y., MEREDITH, N. P., GLAUERT, S. A., SMITH, A. J., SHRIKANTH, G. K., BAKER, D. N., ENGBRETSON, M. J., POSCH, J. L., SPASOJEVIC, M., INAN, U. S., PICKETT, J. S., DECREAU, P. M. E., 2005, Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature*, Vol 437/8, pp. 227-230.

JAMES, C. R., 2007, Solar Forecast: Storm Ahead. *Sky & Telescope*, vol. 114, n° 7, pp. 24-30.

KANE, R. P., 2006, Long Term Variations of Solar, Interplanetary, Geomagnetic Indices and Cosmic Ray Intensities - A Brief Tutorial. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, v. 35, p. 312-323.

KANE, R. P., 2008, Prediction of Solar Cycle Maximum Using Solar Cycle Lengths. *Solar Physics*, 248, pp. 203–209.

KANE, R. P., 2009, Evolution of Dst and Auroral Indices During Some Severe Geomagnetic Storms. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(2), pp. 151-163.

KANE, R. P., 2009, Fluctuations of Solar Activity During the Declining Phase of the 11-year Sunspot Cycle, *Solar Physics* , v. 255, p. 163-168.

KANE, R. P., 2009, Fluctuations of Solar Activity during the Declining Phase of the 11-Year Sunspot Cycle. *Solar Physics*, 255, pp. 163–168.

KAPPENMAN, J., 2010, In: *Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid*, Metatech Corporation, Meta-R-319, Goleta, USA.

KARACHIK, N. V., PEVTSOV, A. A., ABRAMENKO, V. I., 2010, Formation of Coronal Holes on the Ashes of Active Regions. *The Astrophysical Journal*, 714, pp.:1672–1678.

KIRSCHVINK, J. L., GOULD, J. L., 1981, Biogenic Magnetite as a Basis for Magnetic Field Detection in Animals. *BioSystems*, 13, pp. 181-201.

KOCHHAR, R. K. 1991, *French Astronomers in India During the 17th-19th Centuries*, British Astronomical Association, 101, 2, pp. 95-100.

KOSKINEN, E. J., 2011, *Physics of the Space Storms - From the Solar Surface to the Earth*, 1 ed. New York, EUA, Springer-Verlag.

KUHN, J. R., BUSH, R., EMILIO, M., SCHOLL, I. F., 2012, The Precise Solar Shape and Its Variability, *Science* 28, vol 337, no 6102, pp. 1638-1640.

KRUCKER, S., RAFTERY, C. L., HUDSON, S. H., 2011, Temperature and Density Estimates of Extreme-Ultraviolet Flare Ribbons derived from trace diffraction patterns. *The Astrophysical Journal*, 734:34 (5pp).

LACLARE, F., 1983, Astrolabe Measurements of the Solar Diameter, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 125, no. 2, pp. 200-203.

LANGLEY, R. B., 2000, GPS, the Ionosphere, and the Solar Maximum. *GPS World*, July, pp. 44-49.

LUTGENS, F. K., TARBUCK, E. J., TASA, D., 2012, *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*, 12 ed. th Edition, Boston, USA, Pearson.

MATZNER, R. A., 2001, *Dictionary of Geophysics, Astrophysics, and Astronomy (Comprehensive Dictionary of Physics)*, 1st ed, CRC Press, New York, USA.

MAYAUD, P. N., 1980, Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, *Geophysics Monographs Series*, vol. 22, 154 pp., AGU, Washington, D. C.

MCPHERRON, R.L., 1997, The Role of Substorms in the Generation of Magnetic Storms. In: TSURUTANI, B. et al. (eds). *Magnetic Storms*. Washington: American Geophysical Union, pp.131-147.

MERRILL, RONALD T., MCELHINNY, MICHAEL W., 1983, *The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective*. Academic Press. *International Geophysics Series*, Volume 38.

MERRILL, RONALD T., MCELHINNY, MICHAEL W., MACFADDEN, P.L., 1996, *The Earth's Magnetic Field: The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. Academic Press. *International Geophysics Series*.

MIMS III, F. M., 1994, What is the Ozone Layer and how does It affect you?, *Access Research Network*. Volume 3, Number 1, pp.1-16.

MORAN, T., GOPALSWAMY, N., DAMMASCH, I. E., WILHELM, K., 2001, A Multi-Wavelength Study of Solar Coronal-Hole Regions Showing Radio Enhancements. *Astronomy and Astrophysics* 378, pp. 1037-1045.

MOUSSAS, X., POLYGIANNAKIS, J. M., PREKA-PAPADEMA, P., EXARHOS, G., 2005, Solar Cycles: A Tutorial. *Advances in Space Research*, 35, pp. 725–738.

MOUSSAS, X., POLYGIANNAKIS, J.M., PREKA-PAPADEMA, P., EXARHOS, G., 2005, Solar Cycles: A tutorial, *Advances in Space Research* 35, pp; 725–738.

NISTIC, G., BOTHMER, G., PATSOURAKOS, S., ZIMBARDO, G., 2010, Observational Features of Equatorial Coronal Hole Jets. *Annales Geophysicae*, 28, pp. 687–696.

OSELLA, A., FAVETTO A., LOPEZ, E., 1998, Currents Induced by Geomagnetic Storms on Buried Pipelines as a Cause of Corrosion. *Journal of Applied Geophysics* 38, pp. 219–233.

OSELLA, A., FAVETTO, A., LOPÉZ, E., 1998, Currents Induced by Geomagnetic Storms on Buried Pipelines as a Cause of Corrosion. *Journal of Applied Geophysics* 38, pp. 219–233.

PANIVENI, U., KRISHAN, V., SINGH, J., SRIKANTH, R., 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 402, Issue 1, pp. 424–428

PARKER, E. N., 1958, Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *The Astrophysical Journal*, 128, pp. 664-676.

PENNA, J. L., ANDREI, A. H., GARCIA, M. A., BOSCARDIN, S. C., PAPA, A. R. R., SIGGISMONDI, C., REIS NETO, E., D'AVILA, V. A., FIGUEIREDO, I., 2012, The Space Weather and Geomagnetic Storms Program of the ON/MCTI - Instrumental Network, Plans and First Findings. In: IAU XXVIII General Assembly, 6397, Beijing, August.

PERRONE, L., ALFONSI, L., ROMANO, V., DE FRANCESCHI, G., 2004, Polar Cap Absorption Events of November 2001 at Terra Nova Bay, Antarctica. *Annales Geophysicae* 22, pp. 1633–1648. 2004.

PERRONE, L., DE FRANCESCHI, G., 1998, Solar, Ionospheric and Geomagnetic Indices, *Annali di Geofisica*, v. 41, no. 5-6, pp. 843-855.

POOLE, I., 1999, *Radio Waves and the Ionosphere*, QTS, 11/1999. pp.3.

REIS NETO, E., 2002, *Observações Solares: Estudo das Variações do Diâmetro*. Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

REIS NETO, E., 2009, *Desenvolvimento do Heliômetro do Observatório Nacional e Aplicação ao Estudo do Sistema Sol-Terra*, Dissertação de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

REIS NETO, E., DIAS V. H. A., PAPA, A. R. R. , ANDREI, A. H., PENNA, J. L., I. FIGUEIREDO, I., BOSCARDIN, S.C. , D'ÁVILA. V. A., 2012, Correlation Between Solar Semi-Diameter and Geomagnetic Time Series. *International Journal of Geosciences (IJG)*, 3, pp. 321-328.

ROZELOT, J. -P., DAMIANI, C., LEFEBVRE, S., 2010, New Findings Increasing Solar Trend that can Change Earth Climate Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 264*, pp. 301-309

RUSSELL, C.T., 2001, *Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field: A Tutorial. Space Weather (Geophysical Monograph). American Geophysical Union*, pp.73–88.

RYLAARSDAM, J. B., 1996, *International Space Station Traffic Modeling and Simulation. Master Dissertation, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, USA.*

SAIZ, E., CERRATO, Y., CONSUELO, C., AGUADO, J., 2008, Why Are Intense Geomagnetic Storms So Important For Human Life? *Lecture Notes and Essays in Astrophysics*, 3, pp. 163-176.

SANGEETHA, C. R., RAJAGURU, S.P.; RAVINDRA, B., 2012, Relating Photospheric Dynamics to Chromospheric UV Emissions using SDO/HMI and SDO/AIA (1700 and 1600A) Observations, In: 39th COSPAR, E2.3-0007-12, Mysore, July.

SHI, J., WANG, G., 2009, An Investigation on Properties of Ionospheric Es in Hainan Region. *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March.*

SHRIVASTANA, P. K., 2008, Relationship of Interplanetary Coronal Mass Ejections with Geomagnetic Activity. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol 37, pp 244-248.

SIMON, G. W., LEIGHTON, R. B., 1964, Velocity Fields in the Solar Atmosphere. III. Large-Scale Motions, the Chromospheric Network, and Magnetic Fields, *Astrophysical Journal*, vol. 140, p.1120.

SPIEGEL, E. A., ZAHN, J.-P. 1992, The Solar Tachocline, *Astronomy and Astrophysics*, 265, pp. 106-114.

STENFLO, J.O., 1990, Time Invariance of the Sun's Rotation Rate, *Astronomy and Astrophysics*, 233, 220-228.

STIX, M. 2003, On the time Scale of Energy Transport in the Sun. *Solar Physics* 212: pp. 3–6.

SUESS, S. T., TUSURUTANI, B.T., 1998, In: *From the sun: auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays*, 1st ed., American Geophysics Union eds., 57, Washington D.C., USA.

TSURUTANI, B. T., GONZALEZ, W. D. LAKHINA, G. S., ALEX, S., 2003 The Extreme Magnetic Storm of 1–2 September 1859, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, N° A7, pp. 1268-1265.

TURCOTTE, D. L., SCHUBERT, G., 2002, *Geodynamics*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

USOSKIN , I.G., MURSULA, K., ARLT, R., KOVALTSOV, G. A., 2009, A Solar Cycle Lost In 1793–1800: Early Sunspot Observations Resolve the Old Mystery. *The Astrophysical Journal*, 700, pp. L154–L157.

VOURLIDAS, A., HOWARD, R. A., ESFANDIARI, E., PATSOURAKOS, S., YASHIRO, S., MICHALEK, G. Comprehensive Analysis of Coronal Mass Ejection Mass and Energy Properties Over a Full Solar Cycle. *The Astrophysical Journal* 722, pp. 1522-. 2010.

WANG, Y.-M. SHEELEY JR. N. R., 2003, Modeling the Sun's Large-Scale Magnetic Field During the Maunder Minimum. *The Astrophysical Journal*, 591, pp. 1248–1256.

WANG, Y.-M., ROBBRECHT, E., ROUILLARD, A. P., SHEELEY, JR., N. R., THERNISIEN, A. F. R., 2010, Formation and Evolution of Coronal Holes Following the Emergence of Active Regions. *The Astrophysical Journal*, 715, pp. 39–50.

ZHANG, J., RICHARDSON, I. G., WEBB, D. F., GOPALSWAMY, N., HUTTUNEN, E., KASPER, J. C., NITTA, N. V., POOMVISES, W., THOMPSON, B. J., WU, C.-C., YASHIRO, S., ZHUKOV, A. N., 2007, Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, A10102, 19 PP.

Apêndices

Apêndice 1: Equipamento usado

1.1 – Magnetômetros



Figura A.1.1: Magnetômetro LEMI-417 (<http://www.isr.lviv.ua/lemi417.htm>)

As medidas geomagnéticas aqui usadas são provenientes do Observatório Magnético de Vassouras (latitude $-22,40^\circ$, longitude $316,35^\circ$, altura de 457 metros), filiado à rede INTERMAGNET desde 01/01/1999. O Observatório Geomagnético de Vassouras está em funcionamento desde 1915, tendo como instalações a casa do variômetro, onde são feitas as medidas dos valores de X, Y e Z (antes H, D e Z), e casa absoluta, onde está o magnetômetro de prótons, que nos dá as medidas referentes a F. Ambas as construções são feitas em madeira e distam 90 m uma da outra.

As medidas usadas nesta tese são referentes à componente H, obtidas usando o magnetômetro vetorial tipo Fluxgate LEMI-417, fabricado na Ucrânia pelo National Academy of Sciences of Ukraine/National Space Agency of Ukraine, que são tomadas diariamente neste observatório.

O magnetômetro LEMI-417 usado nas instalações do Observatório Magnético de Vassouras tem por especificações:

Alcance de medidas de variações magnéticas por cada componente: $\pm 68\ 000$ nT

Resolução 10 pT

Nível de ruído em frequências da banda de (0,03 – 0,3) Hz: < 15 pT rms

Deriva zero de longo termo: $< \pm 5$ nT/ano

Deriva de temperatura: $< 0,2$ nT/°C

Fator de erro de transformação linear: $< 0,01\%$

Erro da ortogonalidade entre as components (sem calibração): < 30 min de arco

Alcance de voltagem total medida: ± 600 mV

Resolução: $0,07$ μ V

Resistência de entrada: 10 GOhm

Taxa de amostragem: $1\ s^{-1}$

Médias das amostras (por software em PC): 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60

Volume de CompactFlash CARD (FAT16): ≤ 2 GB

Alcance de temperatura em operação: de -20°C até $+50^{\circ}\text{C}$

Fonte de alimentação: 10-18 V

Consumo de energia: $< 1,2$ W

Peso da unidade eletrônica com sensor magnético: 2,7 kg

Tamanho do cabo de conexão entre o sensor magnético e a unidade eletrônica: 10 m (mas que pode ser alterado conforme a encomenda)

Tamanho do cabo de conexão entre a antena GPS e a unidade eletrônica: 3 m (mas que pode ser alterado conforme a encomenda)

O magnetômetro de prótons (usado para se tomar medidas absolutas) é um Overhouser GSM-19T, fabricado pela GSM Systems Inc., do Canadá, e tem as seguintes especificações:

Sensibilidade: 0,15 nT @ 1 Hz / 0,05 nT @ 4 Hz

Resolução: 0,01 nT (gama) para campo magnético e gradiente.

Acuraria: 0,2 nT @ 1 Hz

Alcance: de 20.000 nT até 120.000 nT

Tolerância de Gradiente: acima de 7.000 nT/m

1.2 – Heliômetro

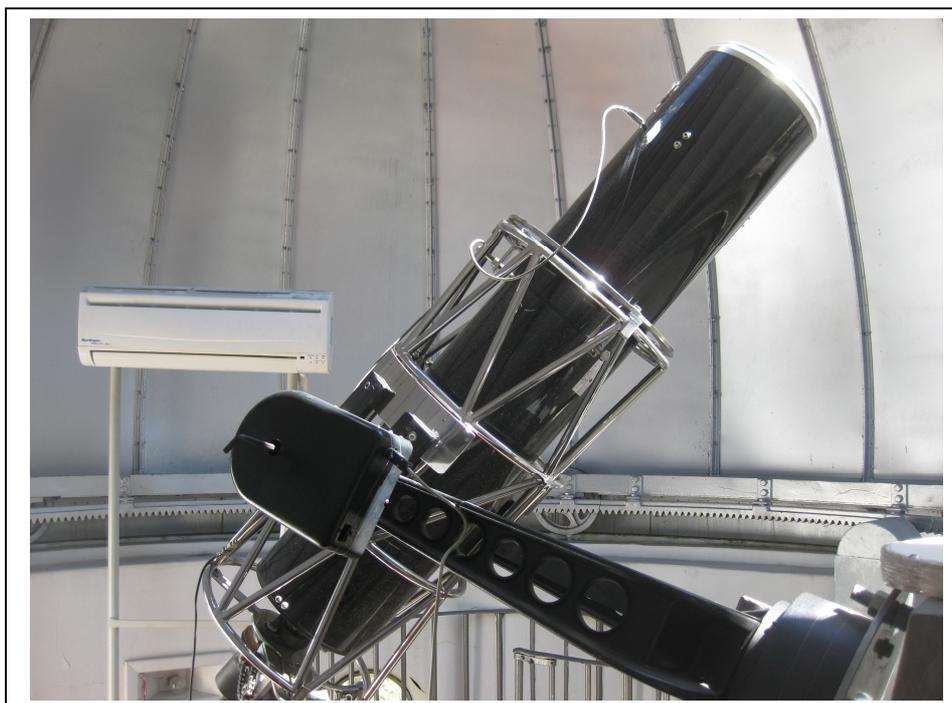


Figura A.1.2 – Heliômetro do Campus do Observatório Nacional

Desenvolvido no campus de São Cristóvão do Observatório Nacional, a idéia fundamental do Heliômetro (figura A.1.2) é projetar no plano focal único, as imagens de dois campos de observação de um telescópio e aplicar um deslocamento relativo

entre eles. Assim, se podem simultaneamente observar objetos bem próximos, que no caso do Heliômetro são os limbos solares, e medir sua distância relativa.

Conforme os estudos de D'Ávila et al. (2009), a dificuldade de se fazer medidas de um ângulo pequeno por métodos ópticos é devido ao fato de que a medição depende do posicionamento do plano focal do instrumento, e a solução usada no Heliômetro foi a usando um espelho bipartido, com ambas as partes inclinadas em $0,125^\circ$ em relação a outra, para que exista um deslocamento entre as imagens formadas em aproximadamente um diâmetro solar. Assim, as imagens dos limbos do Sol ficam opostas, quase em tangência no plano focal. Com esta configuração, pode-se tirar proveito da estabilidade mecânica dos espelhos.

Reis et al., (2009) mostram que a metodologia de observação usada no dispositivo possui duas vantagens claras em relação à outras, vistas por (Reis et al., 2011):

01. A redução do ângulo medido de alguns graus para algo mais conveniente e pequeno, da ordem de um minuto de arco ou menor ainda. No caso do Heliômetro do Observatório Nacional, foram corrigidas da seguinte forma: a separação entre os limbos solares das imagens foi escolhida de maneira que a distância mínima medida entre eles é aproximadamente igual à variação aparente do diâmetro do Sol entre o afélio e o periélio, ou seja, os pontos de mínimo e máximo diâmetro medido.

02. Podemos medir em quaisquer heliolatitudes que desejarmos;

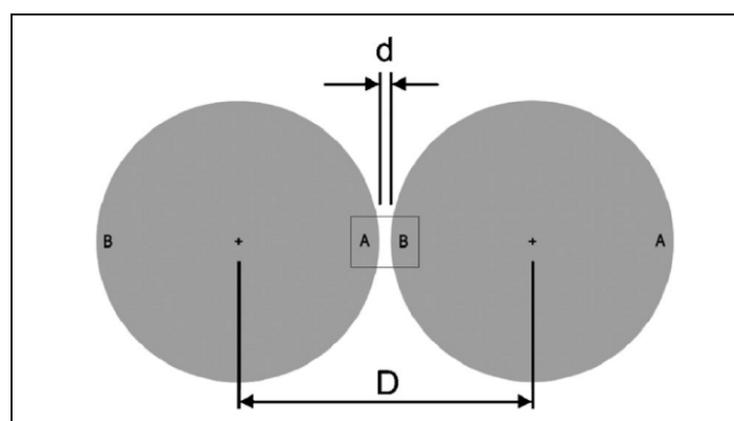


Figura A.1.3 - Esquema observacional de como o heliômetro determina o diâmetro solar.

Uma terceira vantagem que poderia ser atribuída é a quantidade de dados que é obtida, bem maior que a fornecida pelo Astrolábio CCD.

Um cuidado necessário é com a refração diferencial do Sol, conforme a altura e heliolatitudes observadas, para a qual um modelo mais completo está sendo desenvolvido.

Com dito anteriormente, o Heliômetro usa duas partes de um espelho circular inclinadas em um ângulo de 0,125 graus, permitindo assim que se possam aproximar as imagens dos limbos do Sol. Medindo a diferença $D - d$, se deriva o valor do diâmetro solar, como ilustra a figura A.1.3.

As características do espelho do heliômetro são:

Diâmetro: 150 mm

Distância Focal: 986 mm

Relação focal f/D : 6,53

Qualidade óptica da superfície: $\lambda/30$ (erro pico-vale da frente de onda)

Razão de Strehl: 0,99

Defeito máximo da superfície: 20 nm

A aquisição e análise das imagens, para termos dados digitalizados, é um processo automatizado, feito por uma rotina computacional adaptada por Reis Neto et al. (2010), a partir do programa 'Pixel Profile', escrita em Delphi. A aquisição, datação, nomeação e armazenamento das imagens são processos automatizados. Após estes, chegam as fases de análise e a aquisição de dados em arquivos, outro processo automatizado, onde seleciona-se as imagens que são efetivamente utilizadas para encontrar-se os valores do semi-diâmetro.