



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO
MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA
MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE
ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.**

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

PROCESSO: CNPq N° 109968/2009-3

Níkolos Kemmerich – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas
LCEPTM/CRS/CCR/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

Dr. Alisson Dal Lago - Orientador
Divisão de Geofísica
DGE/CEA/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE - MCT
E-mail: dallago@dge.inpe.br

Santa Maria, Junho de 2010

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE - CNPq/MCT**

PROJETO

**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO
MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA
MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE
ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.**

Processo: CNPq N° 109968/2009-3

Relatório elaborado pelo bolsista:

Níkolos Kemmerich - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

Dr. Alisson Dal Lago – Orientador
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT
E-mail: dallago@dae.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Nivaor Rodolfo Rigozo - Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: rigozo@lcesm.ufsm.br

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título: AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.

Processo: CNPq N° 109968/2009-3

Aluno Bolsista no período de Agosto/2009 a Junho/2010:

Níkolás Kemmerich

Curso de Física – Bacharelado, Matrícula: 2951106

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Alisson Dal Lago

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT

Co-orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT

Nivaor Rodolfo Rigozo

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT

Colaboradores/:

Dr. Kazuoki Munakata

Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University - Japan

Dr. John W. Bieber

Bartol Research Institute, University of Delaware (BARTOL/UDEL), Newark (DE), USA

Dr. Takao Kuwabara

Bartol Research Institute, University of Delaware (BARTOL/UDEL), Newark (DE), USA

Dr. Marlos Rockenbach da Silva

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT

Carlos Roberto Braga

Mestrando - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Marcos Vinicius Silveira

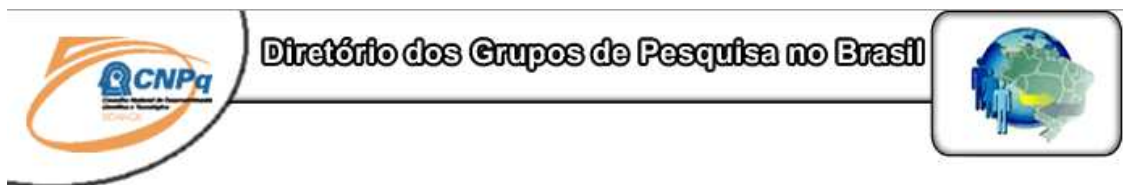
Mestrando - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas – LCEPTM/CRS/CCR/INPE-MCT, Santa Maria, RS.

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m acima do nível do mar), São Martinho da Serra, RS.

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas - LCEPTM/CRS/CCR/INPE - MCT com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



Estudante
Nikolas Kemmerich



[Link para Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#)

[Indicadores de produção C, T & A](#)

Dados gerais

Identificação do estudante

Nome: Nikolas Kemmerich

Nível de treinamento: Graduação

Currículo Lattes: 07/06/2010 13:06

E-mail:

Homepage:

Grupos de pesquisa que atua na instituição

[Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#) - INPE

Linhas de pesquisa que atua

[Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR](#)

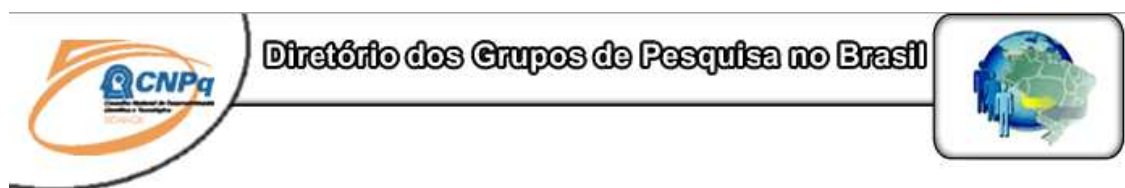
[MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição

[Alisson Dal Lago](#)

Indicadores de produção C, T & A dos anos de 2007 a 2010

Tipo de produção	2007	2008	2009	2010
Produção bibliográfica	8	16	5	0
Produção técnica	1	1	1	0
Orientação concluída	0	0	0	0
Produção artística/cultural e demais trabalhos	0	0	0	0



Grupo de Pesquisa
Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações
Terra - Sol, NanoSatC-Br



Identificação	Recursos Humanos	Linhas de Pesquisa	Indicadores do Grupo
-------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 29/05/2010 18:15

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch
Natanael Rodrigues Gomes

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE, CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, mecanismos de geração de energia no Sol, Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra, Eletricidade Atmosférica e seus Eventos Luminosos Transientes (TLEs). As Pesquisas base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, e de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.

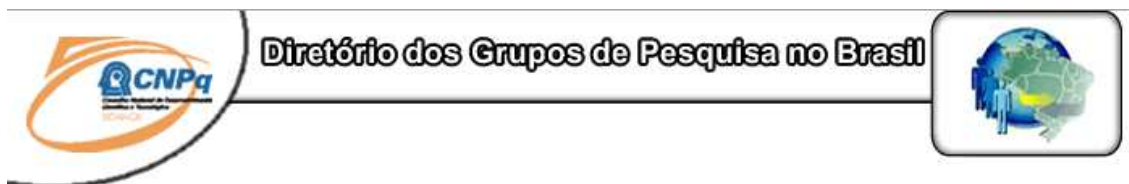
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE - MCT

Recursos humanos	
Pesquisadores	Total: 46
Ademar Michels Alan Prestes Alicia Luisa Clúa de Gonzalez Alisson Dal Lago Antonio Claret Palerosi Barclay Robert Clemesha Caitano Luiz da Silva Carlos Roberto Braga Cassio Espindola Antunes Clezio Marcos De Nardin Cristiano Max Wrasse Cristiano Sarzi Machado Delano Gobbi Eurico Rodrigues de Paula Ezequiel Echer Fabiano Luis de Sousa Fábio Augusto Vargas dos Santos Fernanda de São Sabbas Tavares Fernando Luís Guarnieri Gelson Lauro Dal' Forno Hisao Takahashi Ijar Milagre da Fonseca Jean Carlo Santos	Jean Pierre Raulin Joao Paulo Minussi Jose Humberto Andrade Sobral Juliano Moro Lucas Ramos Vieira Mangalathayil Ali Abdu Marcelo Barcellos da Rosa Marco Ivan Rodrigues Sampaio Marcos Vinicius Dias Silveira Nalin Babulal Trivedi Natanael Rodrigues Gomes Nelson Jorge Schuch Nivaor Rodolfo Rigozo Odim Mendes Junior Osmar Pinto Junior Otavio Santos Cupertino Durão Pawel Rozenfeld Petrônio Noronha de Souza Polinaya Muralikrishna Rafael Lopes Costa Rajaram Purushottam Kane Severino Luiz Guimaraes Dutra Walter Demetrio Gonzalez Alarcon
Estudantes	Total: 22
Carlos Pinto da Silva Neto Cássio Rodinei dos Santos Claudio Machado Paulo Dimas Irion Alves Edson Rodrigo Thomas Eduardo Escobar Bürger Eduardo Weide Luiz Felipe Cipriani Luzzi Fernando de Souza Savian Guilherme Grams Guilherme Simon da Rosa	Igor Freitas Fagundes Lucas Antunes Tambara Lucas Lopes Costa Lucas Lourencena Caldas Franke Luciano Homercher Dalsasso Nikolas Kemmerich Rubens Zolar Gehlen Bohrer Tardelli Ronan Coelho Stekel Thalis José Girardi William do Nascimento Guareschi Willian Rigon Silva
Técnicos	Total: 2
Fernando Sobroza Pedroso - Graduação - \Outra Função Henrique Sobroza Pedroso - Graduação - Analista de Sistemas	

Linhas de pesquisa	Total: 4
<ul style="list-style-type: none">• AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA• Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR• MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO• MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL	

Relações com o setor produtivo	Total: 0
--------------------------------	----------

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	46
Estudante(s)	22
Técnico(s)	2



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil

Linha de Pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Linha de pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Nome do grupo: [Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

Palavras-chave: Campo Magnético Interplanetário; Muons; Raios Cósmicos; Tempestade Geomagnética;

Pesquisadores:

- [Alan Prestes](#)
- [Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)
- [Alisson Dal Lago](#)
- [Carlos Roberto Braga](#)
- [Cassio Espindola Antunes](#)
- [Ezequiel Echer](#)
- [Fernando Luís Guarnieri](#)
- [Jean Pierre Raulin](#)
- [Juliano Moro](#)
- [Lucas Ramos Vieira](#)
- [Marcos Vinicius Dias Silveira](#)
- [Nelson Jorge Schuch](#)

[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Rajaram Purushottam Kane](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Claudio Machado Paulo](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Guilherme Grams](#)
[Lucas Antunes Tambara](#)
[Luciano Homercher Dalsasso](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)

Árvore do conhecimento:

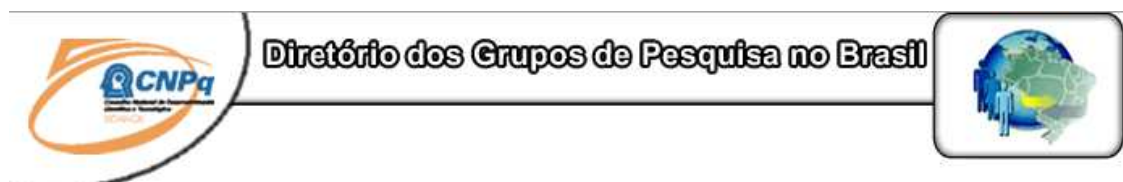
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;
Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e Espaço

Objetivo:

Pesquisar e prover em tempo real com o Telescópio Multidirecional de Raios Cômicos-Muons, 2x(4mx7m), >50GeV, no Observatório Espacial do Sul, o monitoramento de muons e fenômenos das interações Sol-Terra, a previsão no Geoespaço de eventos solares e distúrbios geofísicos, graves efeitos das tempestades e subtempestades geomagnéticas sobre dispositivos e sistemas tecnológicos afetando equipes de trabalho e equipamentos na superfície da Terra e no Espaço. Vice-Líder: Alisson Dal Lago.



Linha de Pesquisa

Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

Linha de pesquisa

Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

Nome do grupo: [Clima Espacial](#), [Magnetosferas](#), [Geomagnetismo](#); [Interações Terra - Sol](#), [NanoSatC-Br](#)

Palavras-chave: CubeSats; Desenvolvimento de Engenharias - Tecnologias; Miniaturização; Nanosatélites; Nanotecnologia; Pesquisa do Geoespaço;

Pesquisadores:

[Ademar Michels](#)
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)
[Alisson Dal Lago](#)
[Antonio Claret Palerosi](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Clezio Marcos De Nardin](#)
[Cristiano Sarzi Machado](#)
[Ezequiel Echer](#)
[Fabiano Luis de Sousa](#)

[Fernando Luís Guarnieri](#)
[Ijar Milagre da Fonseca](#)
[Jean Pierre Raulin](#)
[Jose Humberto Andrade Sobral](#)
[Lucas Ramos Vieira](#)
[Nalin Babulal Trivedi](#)
[Natanael Rodrigues Gomes](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Odim Mendes Junior](#)
[Otavio Santos Cupertino Durão](#)
[Pawel Rozenfeld](#)
[Petrônio Noronha de Souza](#)
[Rafael Lopes Costa](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Dimas Irion Alves](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Fernando de Souza Savian](#)
[Guilherme Grams](#)
[Guilherme Simon da Rosa](#)
[Igor Freitas Fagundes](#)
[Lucas Antunes Tambara](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)
[Willian Rigon Silva](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;
Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e Espaço

Objetivo:

Pesquisas: Geoespaço e em Engenharias/Tecnologias: eletrônica, comunicações, mecânica, lançamento de pequenos satélites científico universitário - iniciação científica: CubeSat (100g-1Kg, 10x10x10cm), Nanosatélite (1Kg-10Kg); Carga útil: magnetômetro e detector de partículas; Desenvolvimentos: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração, sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, controle: atitude, térmico, Vice-Líder: Otávio Santos Cupertino Durão

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao apoio de meus pais Luceno Kemmerich e Tânia Elisete Malheiros dos Santos, pelo total apoio em minha decisão de estudar.

Ao meu Orientador, Doutor Alisson Dal Lago, pela sua atenção e disposição em auxiliar-me durante a realização de minhas atividades de iniciação científica. Em especial, ao Doutor Nelson Jorge Schuch, pelos seus ensinamentos, pelas inúmeras oportunidades oferecidas.

Professor Kazuoki Munakata e sua equipe científica da Universidade de Shinshu, pela doação do Detector Direcional de Muons (DMM) do Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE – MCT)

Jairo Francisco Savian (IAG/USP), egresso da UFSM e do CRS/INPE – MCT que me recebeu e me oportunizou os primeiros apoios junto ao Laboratório e ao desenvolvimento do meu Projeto de Pesquisa. Aos meus colegas de Laboratório de Clima Espacial pelo companheirismo e apoio. Aos mestrandos Marcos Vinícius Dias Silveira, Carlos Roberto Braga e Lucas Ramos Vieira.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, pelo suporte técnico. Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/CCR/INPE - MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Sra. Egidia Inácio da Rosa, Secretária do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/CCR/INPE - MCT.

Resumo

O Relatório apresenta as atividades de pesquisa vinculadas ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT realizadas pelo aluno Níkolás Kemmerich, durante o período de agosto de 2009 a junho de 2010, no Projeto “**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS**” junto ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT. As atividades relativas ao Projeto foram desenvolvidas pelo bolsista no Laboratório de Clima Espacial do CRS/CCR/INPE-MCT, no âmbito da Parceria: INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.

Clima Espacial é o nome dado à área de conhecimento que estuda os processos físicos envolvendo as interações Sol-Terra. Um dos objetivos do Clima Espacial é encontrar mecanismos que possibilitem previsões de tempestades geomagnéticas. Tempestades geomagnéticas ocorrem devido a estruturas originadas no Sol, e.i., CMEs (*Coronal Mass Ejections*), que atravessam o meio interplanetário e atingem a Terra. Os anéis de corrente na magnetosfera da Terra são intensificados durante estas tempestades e induzem campos magnéticos que enfraquecem o campo magnético da Terra. Raios cósmicos galácticos primários, com energia em torno de 50 GeV, detectados através de suas partículas secundárias consequentes da precipitação na atmosfera terrestre, muons, parecem mostrar resposta às estruturas solares – interplanetárias que causam as tempestades geomagnéticas. Os muons são gerados pelas colisões inelástica dos raios cósmicos primários com as partículas da atmosfera. Com o objetivo de estudar os fenômenos ligados as interações Sol-Terra que afeta a distribuição dos raios cósmicos galácticos primários no meio interplanetário foi instalado em 2001 um detector multidirecional de muons, protótipo, de raios cósmicos no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.), no âmbito da Parceria INPE-UFSM, através da cooperação: Brasil – Japão – EUA em Clima Espacial. O sistema detector multidirecional de muons foi expandido em 2005. O detector protótipo era formado por duas camadas de quatro detectores com uma resolução temporal de uma hora. O novo detector expandido é formado de duas camadas de 28 detectores com resolução temporal de um minuto. O Projeto de Pesquisa utiliza e analisa dados de plasma e de campo do meio interplanetário, medidos pelo satélite ACE - NASA, e de Dst para identificar distúrbios magnéticos e efetua comparações com as análise dos dados de muons do OES. A expansão proporcionou redução nos erros experimentais de 0,16% a 0.06%. Conclui-se que raios cósmicos podem apresentar decréscimos antes que estruturas provoquem tempestades na Terra, possibilitando um caminho para realizar previsões de tempestades magnéticas.

Sumário

1	CLIMA ESPACIAL	17
1.1	Raios Cósmicos e Clima Espacial	21
2	FENOMENOLOGIA SOLAR	24
2.1	Atividade Solar	26
2.2	Atividade Solar e Variação de Raios Cósmicos	29
2.3	Vento Solar e Campo Magnético Interplanetário	31
2.4	Regiões de Interação co-rotante (CIRs).....	33
2.5	Ejeções de Massa Coronais e “Flares”	34
2.6	Nuvens Magnéticas	36
2.7	Tempestades Geomagnéticas.....	37
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	Satélite Ace.....	40
3.2	Detector Multidirecional de Muons: Protótipo (DMM-P)	43
3.3	Detector Multidirecional de Muons Expandido (DMM-E).....	47
3.3.1	Plástico Cintilante e Fotomultiplicadoras.....	49
3.3.2	Fonte de alimentação, sistema de processamento e armazenagem de dados. ...	52
3.3.3	Dados do DMM-E	57
3.4	Rede Mundial de Detectores de Muons GMDN (Ground Muons Detector Network)	
	60	
4	ANÁLISE DE DADOS	62
4.1	Análise de dados do DMM-P	62
4.2	Análise de dados do DMM-E.....	71
5	CONCLUSÕES FINAIS	78
6	REFERÊNCIAS	81
	ANEXOS	84
	ANEXO 1 – RELATÓRIO PARCIAL	85
	ANEXO 2 – CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO DE CONGRESSOS.....	91

Índice de Ilustração

Figura 1 – Ilustração artística do cinturão de radiação de Van Allen. Fonte: http://srag-nt.jsc.nasa.gov/SpaceRadiation/What/What.cfm	17
Figura 2 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS. A Figura mostra dados do satélite <i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i> (MISR) de radiação produzida pela passagem de prótons energéticos. Fonte: http://earthobservatory.nasa.gov	22
Figura 3 – Estrutura clássica do sol. Fonte: Kivelson e Russell, 1995.....	25
Figura 4 – Mancha solar obtida no dia 23 de setembro de 2000. A foto compara o tamanho da Terra com uma mancha solar. Fonte: SOHO - NASA – ESA.....	27
Figura 5 – Diagrama da Borboleta. É possível ver o ciclo solar através das cores em azul e amarelo pares de manchas. As manchas nascem em altas latitudes e migram para o equador. Campo magnético medido em Gauss. FONTE: http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/solar_cycle_graphics.html	27
Figura 6 – Ilustração da origem das manchas solares. FONTE: Dal Lago, 2004.	28
Figura 7 – Em azul dados obtidos pelo monitor de nêutrons – Climax da Universidade de Chicago. Em amarelo dados de manchas solares. Os círculos vermelhos mostram a variação de 22 anos.	29
Figura 8 – Esquema identificando a estrutura magnética solar. Em “a” sol em mínimo e $A > 0$. Em “b” máximo solar. Em “c” fase de mínimo, mas com $A < 0$. O vermelho representa linhas “Toward” que entram e azul representa “away”, que saem do sol. FONTE: HTTP://www.sp.ph.ic.ac.uk/	30
Figura 9 – Lâmina de Corrente Heliosférica. Fonte: http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/	31
Figura 10 – A região escura no pólo do sol é um buraco coronal visto pelo telescópio de raios x do satélite Yohkoh. O Vento Solar que flui para fora é rápido. Não há emissão de raios x na região.	32
Figura 11 – Ilustração artística de regiões de interação co rotante. Fonte: Hundhausen, 1972.	33
Figura 12 – A explosão solar (“flare”) na figura é o ponto mais brilhante da imagem. Obtida pelo instrumento EIT em 04 de novembro de 2003, a bordo do satélite SOHO, em 195 A.	34
Figura 13 – Ejeção de Massa Coronal em 27 de fevereiro de 2000 observada por LASCO C2 e C3, satélite SOHO. FONTE: http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/las02.html	35
Figura 14 – Geometria de uma nuvem magnética. Fonte: Adaptado de Burlaga et al. – 1990.	37
Figura 15 – Fases do decréscimo do índice Dst. Fonte: Autor.....	39
Figura 16 – Ilustração artística do satélite ACE da NASA.	40
Figura 17 – Página onde dados do satélite ACE estão disponíveis.	41
Figura 18 – Pannel de seleção dos dados de interesse.....	42
Figura 19 – Arquivo de dados de parâmetros de plasma e de campo.	42
Figura 20 – Foto de DMM-P instalado no OES/CRS/CCR/INPE – MCT.....	43
Figura 21 – Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m ² . Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm.	44
Figura 22 – Arquivo que era gerado para armazenar dados do DMM -P.	46
Figura 23 – Fotos do DMM-E.	47

Figura 24 – Canais direcionais possíveis no DMM-E composto por 36 detectores em cada uma das duas camadas.....	49
Figura 25 – Foto da fotomultiplicadora utilizada no DMM-P e DMM-E.....	50
Figura 26 – Racks que suportam os potenciômetros, sistemas de processamento de dados e fontes de baixa e alta tensão.	53
Figura 27 – Computador utilizado para gravação dos dados.....	54
Figura 28– Display de verificação da contagem de muons.....	54
Figura 29 – Arquivo de Dados do DMM-E.....	58
Figura 30 – Antiga falha existente na região do Atlântico e Europa. Fonte: Munakata et al, 2000.	61
Figura 31 – Atual rede de detectores e as diferenças direcionais entre o detector protótipo e expandido. Bolinha aberta representa as direções do protótipo e bolinhas fechadas representam as direções do expandido.	61
Figura 32 – De cima para baixo, densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético, contagem de muons na direção vertical e índice geomagnético Dst.....	64
Figura 33 – De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético e índice geomagnético Dst.....	65
Figura 34 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.....	66
Figura 35 – De cima para baixo campo magnético interplanetário nas direções x e y, variação percentual na contagem de muons na direção vertical, módulo do campo magnético, direção z do campo magnético e índice Dst.....	67
Figura 36 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.....	68
Figura 37 – De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético e índice geomagnético Dst.....	69
Figura 38 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.....	70
Figura 39 – Tempestade intensa ocorrida em dezembro de 2006. A variação anisotrópica na contagem de muons é indicada no círculo vermelho. De cima para baixo, densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético, contagem de muons na direção vertical e índice geomagnético Dst.....	72
Figura 40 – Tempestade moderada ocorrida em novembro de 2007. De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, módulo do campo magnético, componente z do campo magnético, índice geomagnético Dst, contagem de muons na direção vertical, norte e sul.	74
Figura 41 – De cima para baixo contagem de muons na direção leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste, sudoeste, norte 2, sul 2 e leste 2.	75

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Alguns dados estatísticos do Sol. FONTE: Introduction to space physics, Margaret G. Kivelson, Christopher, T. Russell. Cambridge, 1995.	24
Tabela 2 – Reação de fusão nuclear no interior solar.	26
Tabela 3 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.	39
Tabela 4 – Dados específicos do detector protótipo.	45
Tabela 5 – Direções, contagem e erro na contagem do DMM-E.	48
Tabela 6 – Características do plástico cintilante usado para detecção de partículas. FONTE: Munakata, K.	49
Tabela 7 – Dados específicos das fotomultiplicadoras.	50
Tabela 8 – Quadro branco referente à Figura 26.	55
Tabela 9 – Significado dos números referentes à Tabela 8.	55
Tabela 10 – Significado dos números nos quadros vermelho (detectores superiores) e verde (detectores inferiores) da Figura 28.	56
Tabela 11 – Significado dos números da Figura 26.	56
Tabela 12 – 119 direções do DMM-E.	57
Tabela 13 – Descrição dos dados do DMM-E, tanto para dados de dez ou um minuto.	58
Tabela 14 – Descrição dos dados do DMM-E que estão no diretório do professor Takao. Fonte: Takao.	59
Tabela 15 – Resultados de contagem, erro de contagem do DMM-P no dia 11 de abril de 2001.	71
Tabela 16 – Erros na contagem de para o dia 08 de outubro de 2008.	76
Tabela 17 – Análise de erros para o dia 7 de janeiro de 2009.	77

1 CLIMA ESPACIAL

Clima Espacial é a área do conhecimento que estuda a dinâmica e as condições do ambiente interplanetário incluindo o Sol e sistemas como magnetosfera e ionosfera. Os processos físicos no ambiente próximo da Terra podem e afetam o funcionamento de satélites, clima, sistemas de comunicação global e outros sistemas tecnológicos. Para o bom funcionamento dos sistemas tecnológicos é necessário o conhecimento das condições do geoespaço. Geoespaço é definido como a região do espaço onde os campos eletromagnéticos da Terra (ou de outro corpo celeste) e o do sol confundem-se. Os conhecimentos das condições incluem atividade solar, densidade eletrônica ionosférica, níveis de distúrbios na magnetosfera (ou campo magnético da Terra) identificados pelos índices Dst (em nano tesla, nT) e Kp (varia de 0 a 9), além de fluxo de raios cósmicos.

O campo magnético da Terra pode e confina íons e elétrons energéticos. Os íons e elétrons ao interagirem com o campo magnético terrestre se movem de tal forma que geram correntes elétricas, na alta atmosfera na região equatorial, chamada cinturão de radiação de Van Allen, Figura 1.

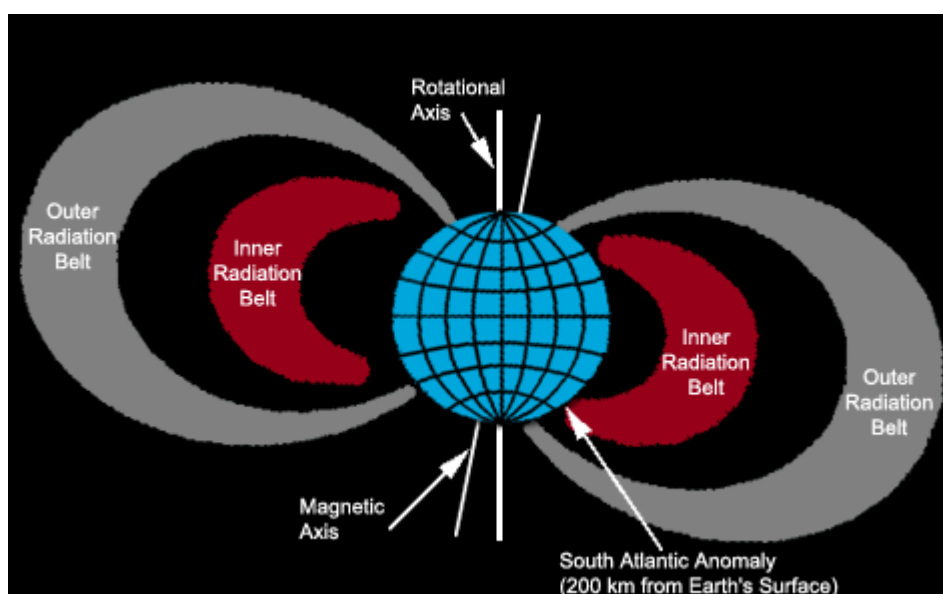


Figura 1 – Ilustração artística do cinturão de radiação de Van Allen. Fonte: <http://srag-nt.jsc.nasa.gov/SpaceRadiation/What/What.cfm>

O cinturão é dividido grosseiramente em dois anéis, o primeiro é interno compreendido entre a altitude de 700 a 10.000 quilômetros (0,01 a 1,5 Raios Terrestres), a intensidade máxima ocorre em média aos 3.000 quilômetros, confina partículas principalmente prótons com energia de 10 – 50 MeV ($M = 10^6$). O segundo cinturão ou anel externo é compreendido entre a altitude de 13.000 a 65.000 quilômetros (3 a 10 Raios Terrestres) e confina principalmente elétrons de alta energia 0,1 – 10 MeV. Existe, numa região entre os cinturões interno e externo (3 a 5 Raios Terrestres), uma corrente de anel devido à deriva longitudinal de prótons aprisionados pelo campo geomagnético. Quando uma ejeção de massa coronal atinge a Terra, há injeção de íons e elétrons energéticos que intensificam a corrente de anel, cuja qual, gera um campo magnético que se opõem ao campo magnético da Terra. As tempestades magnéticas podem ser detectadas através da medição do campo magnético na superfície através de magnetogramas. O cinturão de radiação pode ser perigoso para o homem e máquinas no espaço.

As regiões internas do cinturão são aproximadamente estáveis com o tempo fazendo com que as doses de radiação nos satélites possam ser conhecidas. À medida que nos afastamos da Terra o campo geomagnético torna-se fraco e sujeito a fácil variação. A dose de radiação flutua de maneira mais drástica com o tempo e partículas energéticas solares e raios cósmicos podem penetrar na magnetosfera (Barker, 1998).

O Sol e sua atmosfera são origens de energia. O espaço interplanetário (ambiente de propagação de estruturas), a magnetosfera terrestre e a alta atmosfera são como sistemas forçados onde a energia originada do Sol é depositada (Echer, 2005).

Tempestades geomagnéticas são definidas a partir da variação da componente horizontal do campo magnético terrestre e manifestam-se na natureza como, por exemplo, auroras nos pólos devido a um aumento da população de plasma presentes na atmosfera. As tempestades ocorrem devido à presença da componente do campo magnético interplanetário apontar para o sul relativo ao sul geográfico da Terra, em consequência o pólo sul terrestre é o pólo norte magnético e predominantemente as linhas de campo geomagnético apontam para o norte geográfico ou sul magnético na alta atmosfera terrestre. Esta configuração de campos possibilita a transferência de energia para a magnetosfera da Terra através do mecanismo de reconecção magnética (Dungey, 1961; Gonzalez et al., 1994, 1999; Kamide et al., 1998).

Alguns efeitos solares em sistemas naturais terrestres (Echer, 2005):

- Eventos com liberação de prótons tais como ejeções de massa coronais (CME) podem alcançar a Terra 30 minutos depois de vistos por satélites tal como satélite SOHO. Algumas partículas penetram na alta atmosfera e movem-se em espiral em torno das linhas de campo magnético da Terra e produzem ionização podendo produzir aumento de radiação. Pode também afetar localmente a química da atmosfera ocasionando diminuição de ozônio, principalmente em latitudes polares.

- Clima: a radiação solar é bem conhecida por regular as características do clima e da atmosfera, como é mostrado pelos ciclos diurnos e anuais de temperatura da superfície. A especulação de se a variação da atividade solar pode afetar o tempo e clima é um tópico controverso desde 150 anos atrás. O problema é que os dados científicos, i.e., satélites, presentes são das últimas duas décadas fazendo com que uma conclusão definitiva do assunto seja inviável. Acredita-se que a variação do clima terrestre possa variar com a radiação solar por um longo período, de décadas a séculos. Uma forte evidencia da modulação do clima devido à modulação da atividade solar é a proximidade na escala de tempo dos eventos da atividade solar do mínimo de *Maunder* com o período de uma leve era glacial. Outro mecanismo possível é variabilidade do plasma solar afetar os raios cósmicos e os mesmos influenciarem os campos elétricos atmosféricos e cobertura de nuvens. Mas, estes mecanismos ainda estão em fase de pesquisa e especulação, por isso, nada se pode afirmar a respeito do clima variar com a variabilidade solar.

- Efeitos indiretos da atividade solar em anéis de árvores. Pode-se saber a atividade solar de anos muito remotos através da leitura dos anéis dos troncos das árvores. Há também evidencias em que a variação no campo geomagnético pode afetar sistemas biológicos. Um dos efeitos seria perturbação das habilidades de orientação de pombos durante tempestades geomagnéticas, e outros animais migratórios como baleias e golfinhos.

Efeitos em Sistemas Tecnológicos (Echer, 2005):

- Distúrbios ionosféricos: súbitos distúrbios ionosféricos (SIDs – *Sudden ionospheric disturbances*) que acontecem em poucos minutos depois de algum forte “*solar flare*”. Há forte atenuação ou absorção das ondas de radio de telecomunicação de longa distancia no período diurno da Terra. O efeito de absorção de ondas curtas é causado pelo forte aumento da densidade eletrônica em certas camadas da atmosfera devido à penetração de raios X produzidos pelo *solar flare*. Ondas de alta frequência que passariam na região D da atmosfera são absorvidas ao invés de refletidas.
- Danos em sistemas espaciais: *Space Charging* é a variação do potencial eletrostático na superfície dos artefatos espaciais com respeito ao plasma circundante. Durante uma tempestade geomagnética o número e energia dos elétrons e íons aumentam. Satélites que viajam através de ambientes energizados como o meio interplanetário, partículas carregadas acertam o satélite deixando-o carregado. Descargas elétricas devido aos diferentes potenciais na superfície destes satélites podem danificar ou até mesmo destruir seus componentes internos (*Single event upsets*), comprometendo sua utilização.

Danos em sistemas terrestres:

- Comunicação: Vários sistemas de comunicação utilizam a ionosfera para refletir sinais de ondas de rádio de longas distâncias e tempestades ionosféricas comprometem a comunicação por ondas de rádio em todas as latitudes. Algumas frequências de radio são absorvidas e outras refletidas, levando a flutuações nos sinais.
- Sistemas de Navegação: como um exemplo tomamos o sistema LORAN e OMEGA que foram largamente usados até alguns anos atrás, eram afetados quando a atividade solar cortava seus sinais. Aeronaves e navios usaram por vários anos sinais de baixa frequência daqueles transmissores para determinar suas posições. Durante eventos solares e tempestades geomagnéticas os sistemas poderiam dar informações aos navegadores imprecisões de vários quilômetros. Sistemas de GPS usados atualmente também são afetados quando a atividade solar causa súbita variação na densidade ionosférica.
- Energia Elétrica: quando campo magnético variado é aplicado na vizinhança de um condutor, uma corrente elétrica é induzida no condutor. Isto acontece em larga escala em uma tempestade geomagnética. As correntes diretamente induzidas nas linhas de

transmissões de energia elétrica a partir de tempestades geomagnéticas são perigosas para equipamentos de transmissão de energia. Em 13 de março de 1989 nas cidades de Quebec e Montreal seis milhões de pessoas ficaram sem energia elétrica por nove horas como resultado de uma tempestade super intensa.

Assim, o Clima Espacial comporta uma vasta gama de fenomenologia que envolve o planeta Terra e o Sol. Mas a ênfase no relatório será dada aos raios cósmicos galácticos, pois existem várias relações entre eles e a física do meio interplanetário. Os GCRs podem ser ferramentas úteis para previsão de tempestades geomagnéticas.

1.1 Raios Cósmicos e Clima Espacial

Raios Cósmicos Galácticos (GCR – *Galactic Cosmic Rays*) são principalmente prótons e partículas Alfa originados fora do sistema solar. Atravessam o meio interplanetário seguindo as linhas do campo magnético interplanetário (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*). A modulação dos GCR próximo a Terra e além é bem conhecido pelos modelos de difusão dos raios cósmicos no meio interplanetário. GCR com baixa energia são impedidos de alcançar a atmosfera neutra. Entretanto, nas regiões polares e em altas altitudes em regiões equatoriais raio cósmico tem fácil acesso, e satélites e seres humanos podem ser diretamente afetados pela precipitação de partículas. Raios Cósmicos também são de origem solar, por isso a definição mais geral para raios cósmicos é, toda partícula que se movimenta no meio interplanetário com velocidade maior que a velocidade do vento solar.

Idealmente a Terra pode ser considerada como um dipolo magnético, mas é bem conhecido que a Terra não é um dipolo magnético e existem regiões ao qual o campo magnético é mais intenso e menos intenso. As linhas de campo podem sair de uma região equatorial e entrar na região de um dos pólos, por exemplo. Partículas energéticas podem precipitar nas regiões de Anomalia Magnética como mostra a Figura 2. A região do AMAS (Anomalia Magnética do Atlântico Sul) é responsável pela perda dos dados de satélites que sobrevoam a região. A radiação espacial é constituída de um sistema não homogêneo e dinâmico altamente influenciado pela atividade solar. É caracterizada por várias faixas de energia e fluxos direcionais.

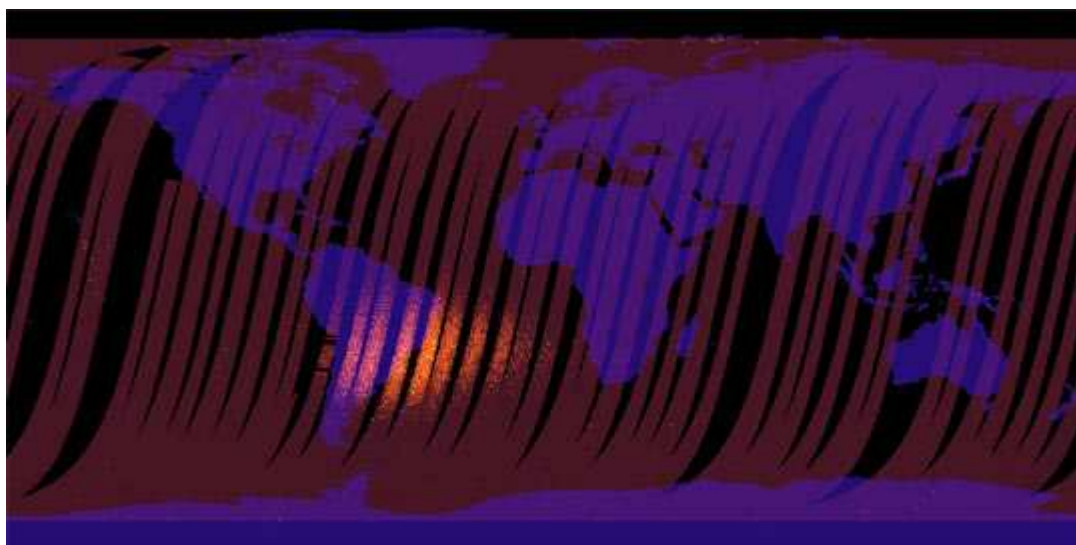


Figura 2 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS. A Figura mostra dados do satélite *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR) de radiação produzida pela passagem de protons energéticos. Fonte: <http://earthobservatory.nasa.gov>.

A variabilidade solar afeta a modulação de GCRs no meio interplanetário e também aqueles gerados pelo sol. Usa-se a modulação de raios cósmicos para estudar estruturas geofetivas e de alguma forma prever estruturas solares que podem causar tempestades geomagnéticas.

Munakata et al. (2000) observaram pela primeira vez de forma sistemática precursores de tempestades geomagnéticas usando rede de detectores (localizados na superfície terrestre) de raios cósmicos de alta energia (muons), mostrando que esta rede de detectores pode ser poderosa ferramenta para previsão de Clima Espacial.

Devido à inviabilidade de lançar detectores de GCRs ao espaço, instrumentos localizados em superfície terrestre continuam sendo o estado da arte para estudar estas partículas, visto que a massa de equipamentos no espaço deve ser a menor possível, e detectores na superfície terrestre trazem a vantagem de fácil manutenção.

Existem algumas vantagens na utilização de muons para estudos baseados em instrumentos de superfície terrestre quando comparados com outras partículas resultantes da chegada dos raios cósmicos na atmosfera terrestre: a) grande poder de penetração e b) manutenção da direção e do sentido de chegada do raio cósmico primário que os originou, enquanto que as outras partículas, em geral, são desvios da partícula primária.

Com o objetivo de estudar as causas dos efeitos vistos acima e tentar prevê-los ou evitá-los, foi instalado em 2001 um protótipo do Detector Direcional de Raios Cósmicos – muons no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, Brasil no estado do Rio Grande do Sul, através de uma parceria entre Brasil, Japão e EUA, e apoio INPE-UFSM. O protótipo era formado por duas camadas de 4 detectores e resolução temporal de uma hora, integrando uma rede de detectores que estão distribuídos pelo planeta GMDN (*Ground Muon Detector Network*). O protótipo foi expandido em dezembro de 2005 com a diferença de ser constituída de 56 detectores com resolução temporal de um minuto e melhor integrando a rede mundial de detectores – muons de alta energia.

Assim, os objetivos do projeto envolvem participar do desenvolvimento técnico e de engenharia, análise preliminar dos dados oriundos da ampliação do Telescópio Multi-direcional de Raios Cósmicos de Alta Energia – Muons (DDM) e avaliar a modulação dos raios cósmicos de alta energia devida à variabilidade do Clima Espacial, utilizando dados tanto do protótipo de detector que operou de 2001 ao início do ano de 2005, quanto dados do novo detector que foi instalado em dezembro de 2005. Pretende-se analisar eventos de tempestades geomagnéticas utilizando dados de satélites do meio interplanetário, índices geomagnéticos, e dados (de superfície) de raios cósmicos secundários do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

2 FENOMENOLOGIA SOLAR

As observações mostraram que o Sol é uma estrela ordinária em uma galáxia que apresenta de 100-400 bilhões de estrelas. Ao longo do tempo foi constatada uma periodicidade nas manchas negras que havia no Sol, e hoje se sabe que as manchas seguem um ciclo de 11 anos durante os quais passa por períodos de máximos e mínimos. Com avanço na tecnologia ficou claro que ocorrem processos físicos no Sol que influencia todo meio interplanetário e conseqüentemente a Terra.

Para astrônomos o Sol é uma estrela ordinária com tipo espectral de G2V, G2 porque possui temperatura efetiva de aproximadamente 5785 K e V indica a classe espectral da estrela, e o sol está na classe de astro que gera energia por processo de fusão de núcleos de hidrogênio, com magnitude absoluta 4,8 que serve para comparar o brilho das estrelas sem levar em conta as distâncias a que se encontram. O Sol sendo a estrela mais próxima da Terra, faz dele importante objeto de estudo principalmente na interação Sol-Terra. Na Tabela 1 abaixo são dados alguns dados estatísticos do Sol.

Tabela 1 – Alguns dados estatísticos do Sol. FONTE: Introduction to space physics, Margaret G. Kivelson, Christopher, T. Russell. Cambridge, 1995.

Idade	$4,5 \times 10^9 \text{ anos}$
Massa	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$696,000 \text{ km}$
Densidade média	$1,4 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
Distância média da Terra (1 UA)	$150 \times 10^6 \text{ km} (250 \text{ raios solares})$
Aceleração gravitacional na superfície	274 m.s^{-2}
Radiação emitida (Luminosidade)	$3,86 \times 10^{26} \text{ W}$
Período de rotação equatorial	26 dias terrestres
Composição	Aproximadamente 90% de H (hidrogênio), 10% He (hélio), 0,1% outros elementos

A atmosfera solar é dividida em principalmente três partes. A **Fotosfera**, com 500 km de espessura de onde vem a maior parte da luz visível e vista a olho nu. É formada por gás opaco que nos impede de ver o interior solar, sua densidade é cerca de 10^{23} m^{-3} (partículas por centímetro cúbico), é na fotosfera que Manchas Solares podem ser observadas. A temperatura mínima é de 4.200K. A **Cromosfera** estende-se cerca de 10.000 km acima da Fotosfera e

possui uma temperatura que varia de 4300 a 106 K que aumenta do interior para exterior. Apresenta densidade de 10^{17} m^{-3} e pode ser observado com um filtro solar conhecido como H-alfa. Num eclipse solar esta camada revela uma coloração alaranjada e essa camada brilhante e colorida é de onde partem raios luminosos revelando a presença de Cálcio, Helio e Hidrogênio como constituintes. E a **Coroa**, com densidade de aproximadamente 10^{15} m^{-3} próximo do Sol e estendendo-se até a órbita terrestre (onde a densidade é 10^{17} m^{-3}). Pode ser vista em um eclipse solar. O sol tem radiancia espectral como de um corpo negro e obedece a equação de Stefan-Boltzmann $R\sigma = T^4$, onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} . \text{K}^{-4}$.

Devido a alta temperatura emite grande quantidade de raios-x sendo constituída por gás ionizado chamado de plasma. Todo Sol é composto de plasma e por não ser sólido tem uma rotação diferencial com velocidade angular maior em baixas latitudes e velocidade angular menor em altas latitudes até os pólos. A Figura 2.1 ilustra artisticamente as camadas constituintes do Sol.

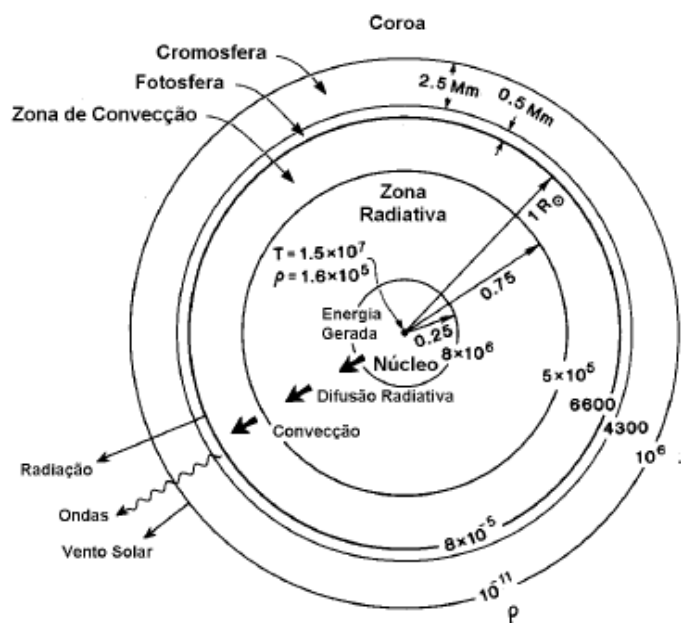


Figura 3 – Estrutura clássica do sol. Fonte: Kivelson e Russell, 1995.

Dividindo-se o raio solar em três partes observa-se que a primeira parte externa da divisão é convectivamente instável e turbulenta, chamada **zona convectiva**. O interior solar é muito opaco, como uma névoa espessa, e se a trajetória desta radiação fosse retilínea ela chegaria à superfície em 2 segundos, mas, existe muita radiação que pode levar 10 milhões de anos para chegar à superfície. A região que esta entre o núcleo e a zona convectiva é a **zona radiativa**.

Modelos teóricos sugerem que no interior solar há um reator de fusão nuclear operando a temperatura de $1,5 \times 10^7 K$ e gerando energia através da fusão de 5 milhões de toneladas de hidrogênio por segundo para formar hélio. A Tabela 2 dá informações da reação de fusão nuclear do interior do Sol.

Tabela 2 – Reação de fusão nuclear no interior solar.

$2(^1H + ^1H) \rightarrow 2(^2H + e^+ + e^- + \nu)$
$2(e^+ + e^-) \rightarrow 2\gamma$
$2(^2H + ^1H) \rightarrow 2(^3He + \gamma)$
$^3He + ^3He \rightarrow ^4He + 2^1H + \nu$
$4^1H \rightarrow ^4He + 5\gamma + 2\nu$

O produto da fusão nuclear é o fluxo de neutrinos. A temperatura no interior solar decresce com o raio rapidamente. A fotosfera está no topo da zona convectiva e é fechado uniformemente com um leve borbulho granular. É na fotosfera que se enxergam as manchas solares que aparecem aos pares. É possível enxergar com um filtro H α a cromosfera e envolta das manchas existem regiões que brilham mais que o normal chamado de regiões ativas. Ocasionalmente tais regiões brilham rapidamente dando origem a uma explosão solar (*flare*). Também há estruturas escuras e finas chamadas de filamentos ou proeminências.

2.1 Atividade Solar

A existência de manchas solares era conhecida a centenas de anos. Elas podem chegar a 1000 km de diâmetro, cada um consistindo de uma região central escura com temperatura de 4100 K e campo magnético de 0,3 T (tesla) envolto pela penumbra, região um pouco mais clara que a escura. A Figura 4 mostra a mancha comparada com o tamanho de Terra. O campo é quase vertical na sombra e quase horizontal na penumbra. Existe saída radial de gás através da superfície fotosférica da penumbra do contorno interno da sombra de 6 km/s, chamado efeito *Evershed*.

Algumas manchas são unipolares, outras bipolares e outras mais complexas. Podem durar até 100 dias e elas ocorrem em um ou outro lado do equador. A atividade solar varia com um período de 11 anos, mas houve um período de mínimo chamado mínimo de *Maunder* (1645-1715), quando o clima da Terra foi mais frio do que o normal. Pode-se observar a atividade solar observando o número de manchas na superfície do sol, como mostra o

diagrama da borboleta na Figura 5. Pode-se ver a regularidade das manchas solares com o ciclo solar. Elas aparecem em médias latitudes e migram para o equador solar, baixas latitudes. Este processo leva em média 11 anos.

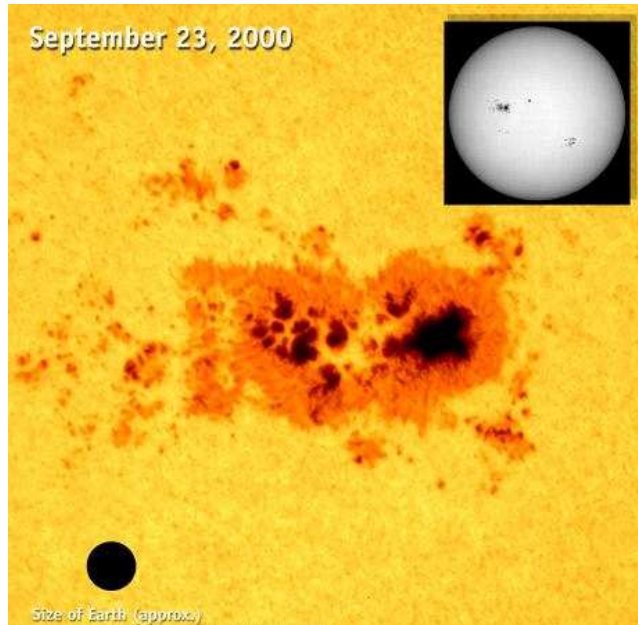


Figura 4 – Mancha solar obtida no dia 23 de setembro de 2000. A foto compara o tamanho da Terra com uma mancha solar. Fonte: SOHO - NASA – ESA.

As cores azuis e amarelas da Figura 5 representam polaridades diferentes. Acima do gráfico há uma escala que dá a diferença da intensidade magnética, em Gauss. Nota-se claramente que as manchas aparecem aos pares e com polaridades diferentes.

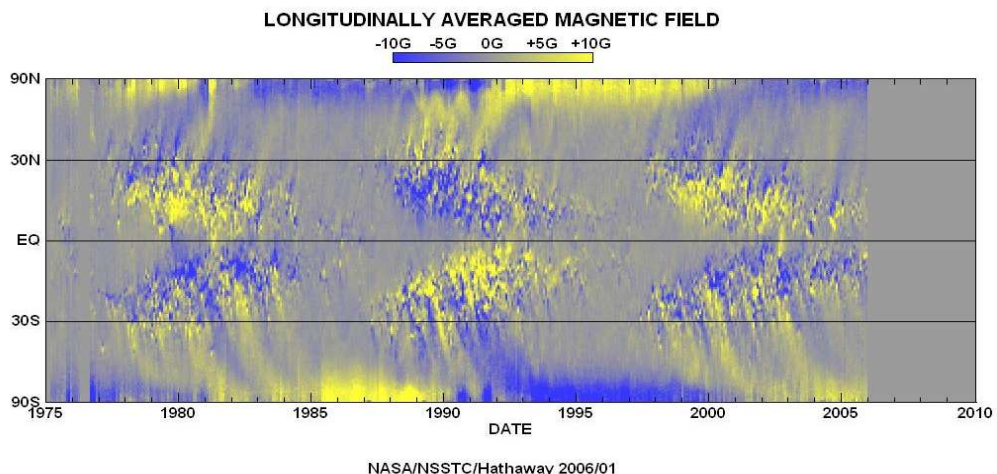


Figura 5 – Diagrama da Borboleta. É possível ver o ciclo solar através das cores em azul e amarelo pares de manchas. As manchas nascem em altas latitudes e migram para o equador. Campo magnético medido em Gauss. FONTE: http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/solar_cycle_graphics.html

Outra conclusão importante da Figura 5 é que os pares das manchas exibem regras de polaridade. Os pares de manchas em um hemisfério tendem a apresentar a mesma polaridade

no mesmo ciclo solar, enquanto as outras manchas tem polaridade oposta no hemisfério oposto. No início de um novo ciclo, as polaridades das novas manchas trocam.

O mecanismo gerador do campo magnético solar é o de um dínamo. Como um modelo ideal pode-se pensar que o sol tem linhas de campo magnético bem alinhado de norte para sul ou de sul para norte dependendo da polaridade solar. Devido à rotação solar diferenciada, velocidade angular maior no equador e menor nos pólos, as linhas torcem-se ocasionando acúmulo de linhas de campo magnético de modo que o fluxo magnético e por empuxo força as linhas a emergirem para a superfície originando as manchas (Hoyt e Schatten, 1997). Resumindo, as manchas solares são geradas por campos magnéticos toroidais que são trazidos à superfície solar, por efeito de empuxo (Echer, 2003). A Figura 6 mostra o modelo da descrição anterior.

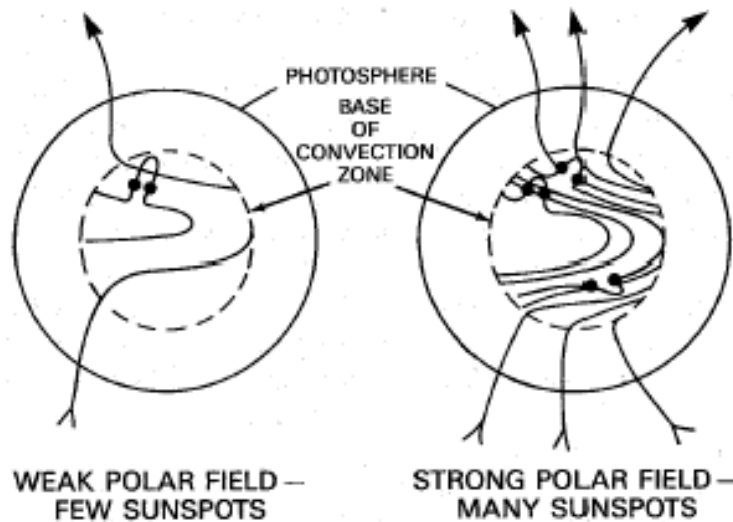


Figura 6 – Ilustração da origem das manchas solares. FONTE: Dal Lago, 2004.

Após 11 anos o campo magnético inverte a polaridade e conseqüentemente a polaridade dos pares de manchas também se inverte para o dos hemisférios. As regiões de acúmulo de linhas de campo se aproximam gradativamente ao equador ao longo de 11 anos, assim à medida que se observa as manchas, elas migram para o equador solar.

2.2 Atividade Solar e Variação de Raios Cósmicos

Intensidades de raios cósmicos medidas na superfície da Terra mudam com várias escalas de tempo. Há uma relação entre intensidade de raios cósmicos medidas na superfície da Terra e o ciclo solar de 11 anos. Pode-se dizer que quando a atividade solar é máxima a intensidades de raios cósmicos medida é mínima. Quando a atividade solar é mínima a intensidade é máxima. Acredita-se que intensidade de GCR (*Galactic Cosmic Rays*) é reduzida no máximo solar devido à forte turbulência do campo magnético interplanetário (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*). Pode-se ver na Figura 7 que a intensidade dos GCR exibe variação de 11 anos e é anti-correlacionada com atividade solar de 11 anos quando vista pelas manchas solares. Em contraste com a variação de 11 anos, GCR exibe variação de 22 anos em conexão à inversão da polaridade magnética solar. Os círculos vermelhos apontam a variação da intensidade com a polaridade solar.

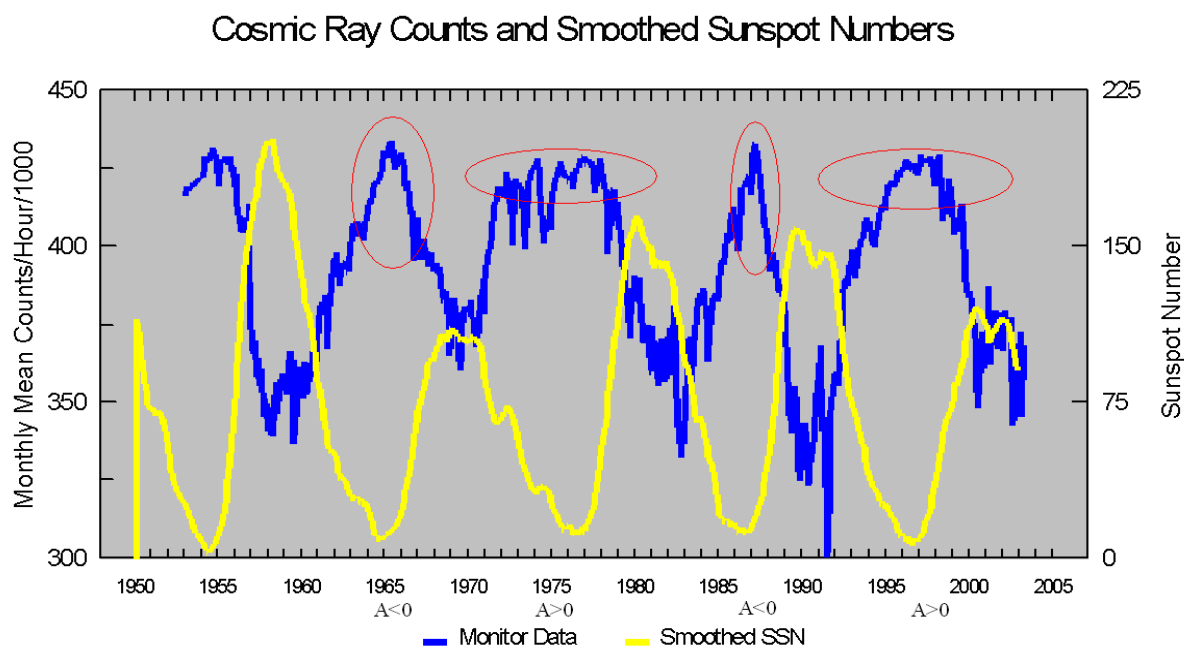


Figura 7 – Em azul dados obtidos pelo monitor de nêutrons – Climax da Universidade de Chicago. Em amarelo dados de manchas solares. Os círculos vermelhos mostram a variação de 22 anos.

FONTE: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/image/cr_ssn.gif

A polaridade é definida pelo produto interno entre o vetor velocidade angular do sol e o momento magnético do sol, isto é,

$$\vec{A} \equiv \vec{\Omega} \cdot \vec{M} .$$

Como pode ser visto na Figura 7, a intensidade de GCR tem pico achatado no mínimo solar quando a polaridade é $A > 0$, enquanto o pico é bem definido quando $A < 0$. Não é possível ver a variação de 22 anos pelo número de manchas solares.

A estrutura global do Campo Magnético Solar e suas variações são descritas a seguir.

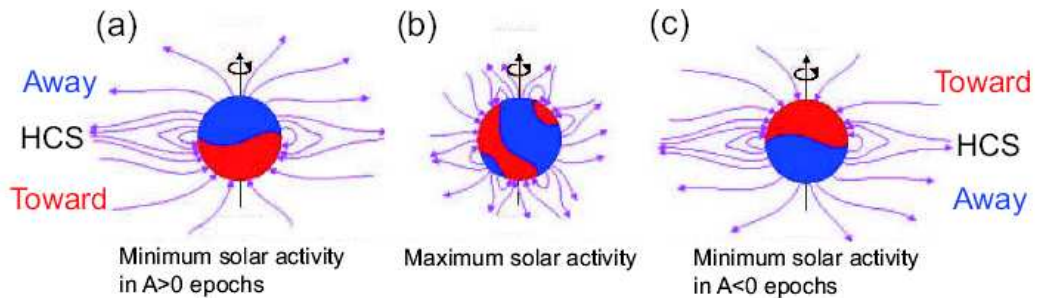


Figura 8 – Esquema identificando a estrutura magnética solar. Em “a” sol em mínimo e $A > 0$. Em “b” máximo solar. Em “c” fase de mínimo, mas com $A < 0$. O vermelho representa linhas “Toward” que entram e azul representa “away”, que saem do sol. FONTE: [HTTP://www.sp.ph.ic.ac.uk/](http://www.sp.ph.ic.ac.uk/).

Durante o período de mínimo a coroa é dominada por buracos coronais dos pólos, por onde feixes rápidos de vento solar flui ao longo das linhas abertas de campo magnético, com hemisférios de polaridades opostas. A Lâmina de Corrente Heliosférica (HCS – *Heliospheric Current Sheet*) é o limite onde as linhas de campo magnético interplanetário são opostas, que se originam como a expansão do dipolo magnético solar. Na Figura 8, “a” mostra o campo magnético interplanetário apontando para fora (*Away*) em azul, ou seja, afastando-se do Sol no norte e “toward” em direção ao Sol ao sul na época de $A > 0$. Na mesma Figura 8, “b” representa fase de máximo solar dificultando a identificação do eixo magnético. A direção do IMF nos dois hemisférios é invertida em $A < 0$ em “c” na Figura 8.

A lâmina de corrente heliosférica encontra-se próximo ao equador solar. Como mostra a figura 10, as linhas saem em cima da lamina e entram em baixo da mesma. A posição média da lamina de corrente está inclinada relativo ao equador solar e a lamina possui deformações. Quando o sol rotaciona, um observador na eclíptica irá de maneira alternada estar acima ou abaixo da HCS e irá ver o setor trocar de padrão (*Smith et al., 1978*).

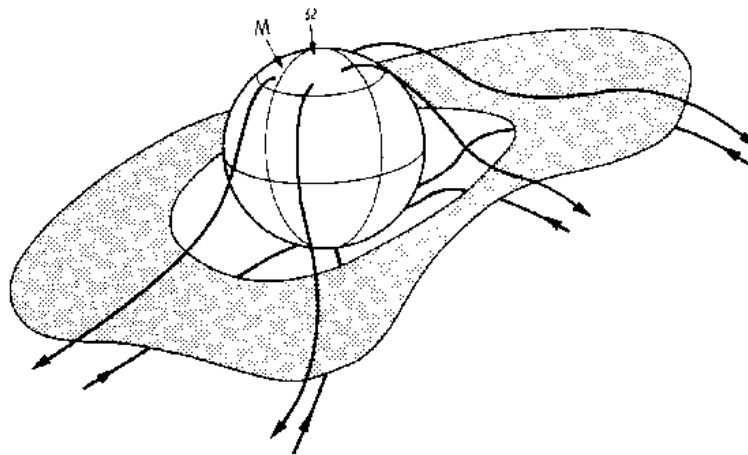


Figura 9 – Lâmina de Corrente Heliosférica. Fonte: <http://lepmpi.gsfc.nasa.gov/>.

2.3 Vento Solar e Campo Magnético Interplanetário

O vento solar é um fluxo de gás solar ionizado (plasma) e um remanescente campo magnético solar que permeia o meio interplanetário. Nas palavras de Parker, o vento solar é em gás ionizado que se origina da diferença de pressão dos constituintes da Coroa Solar e o meio interestelar que continuamente acelera o fluxo de partículas para fora do Sol (E. N. Parker, 1958). Constituído por prótons e elétrons, o Vento Solar flui passando constantemente pela Terra com uma velocidade média de 400 a 500 km/s e com densidade média de prótons e elétrons de 5 partículas por centímetro cúbico (Brandt, 1970). Por que o vento solar, distante e tênue plasma é de interesse para a comunidade científica? Existem dois aspectos importantes. Primeiro deles preocupa-se com o entendimento do vento solar na interdisciplinaridade conhecida como relação sol-terra, pois o vento solar é influenciado pela atividade solar e transmite esta influencia para os planetas, cometas, partículas de poeira e raios cósmicos imersos no ventos solar. O segundo aspecto importante é o vento solar ajuda a entender os processos físicos que ocorrem na formação e expansão da coroa solar “quente” para ”fria” e para regiões mais distantes para fora do sistema solar.

O fato observacional de que a cauda ionizada dos cometas tem uma direção radial ao Sol, independente da direção de seu movimento fez Ludwig Birmann propor em seus trabalhos publicados entre 1951 e 1957 a existência do Vento Solar. Além disso, o Vento Solar foi sugerido por outros cientistas pelo fato de grandes explosões solares (“*flares*”) provocarem mudanças no campo magnético da Terra (Burlaga, 1995).

O vento solar não é emitido uniformemente devido ao campo magnético do Sol estar altamente estruturado em algumas regiões e em outras não. O gás fica aprisionado nas regiões de campo magnético forte que emite grande quantidade de raios x, associada à formação de laços, formando um fluxo coronal que se expande para o espaço. Dependendo da intensidade de campo estas linhas podem se desprender caracterizando o Vento Solar lento geralmente observada na região equatorial solar. Onde não há formação de laços indica um campo magnético não aprisionado. Há um **Buraco Coronal** por onde o gás escapa junto ao campo magnético que constitui o Vento Solar Rápido. Na Figura 9, visto por telescópio de raios-x, a região escura no pólo caracteriza o buraco coronal, nesta região o vento solar é rápido. Na região equatorial as linhas de campo confinam o plasma originando o vento solar lento.

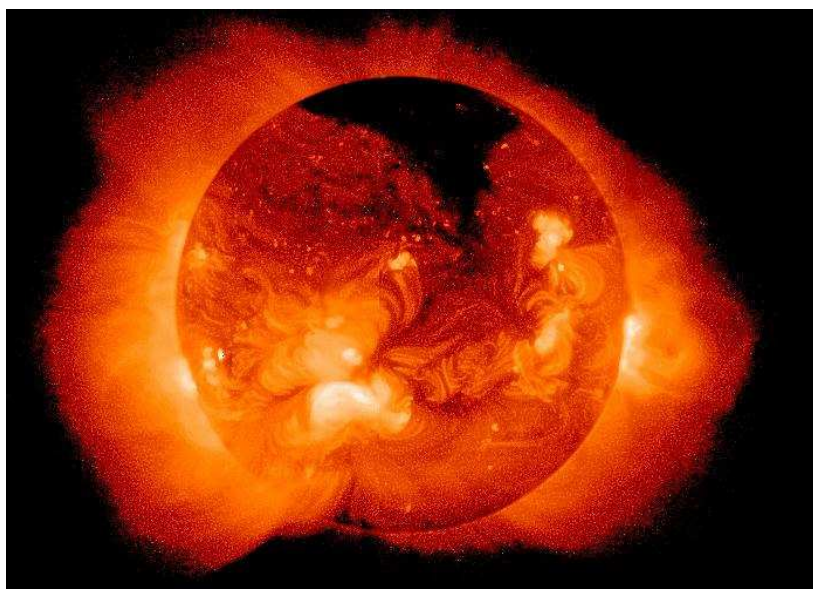


Figura 10 – A região escura no pólo do sol é um buraco coronal visto pelo telescópio de raios x do satélite Yohkoh. O Vento Solar que flui para fora é rápido. Não há emissão de raios x na região.

Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature3.shtml>

No início os cientistas acharam que as explosões solares, os “*flares*”, eram responsáveis pela mudança intensa na magnetosfera terrestre, mas após o início da década de 1970 as observações mostraram que além de explosões ocorria ejeção de grande quantidade de massa solar (CME). Em certos casos o campo que acompanha a ejeção se conecta com o campo magnético da Terra (Tempestade Magnética) causando o efeito das auroras, perdas de dados nos satélites, *black-out*, e grandes conseqüências que comprometem a manutenção da tecnologia.

As sondas Soviéticas Lunik 2 e Lunik 3 em 1960 primeiramente fizeram a medida do Vento Solar, e em 1962 a sonda norte americana Mariner 2 confirmou as previsões de E.N. Parker. Observações indicam que o Vento Solar se estende além de 50 UA (unidades

astronômicas). Foi sugerido em 1960 que o Vento Solar termina em uma grande onda de choque (Parker, 1961). Com muita incerteza foi estimado que a fronteira de grande onda de choque do Vento Solar encontra-se a 100 UA. Em 30 de agosto de 2007 a esperada candidata sonda Voyager 1 entra na região chamada “*Heliosheath*” e atualmente atravessa a chamada “*Termination Shock*”.

2.4 Regiões de Interação co-rotante (CIRs)

As Regiões de interações co-rotantes são formadas a partir de feixes rápidos dos buracos coronais que colidem com o vento solar lento. A colisão provoca regiões de aumento de pressão e de campo magnético. A maioria das CIRs são reversões da direção do campo magnético interplanetário na passagem de um setor para outro na lâmina de corrente heliosférica que está na região de vento solar lento. Entretanto, CIRs podem ocorrer não necessariamente nestas condições, durante períodos de alta atividade solar os satélites observam feixes de vento solar com o mesmo setor magnético (Neugebauer et. al., 2004).

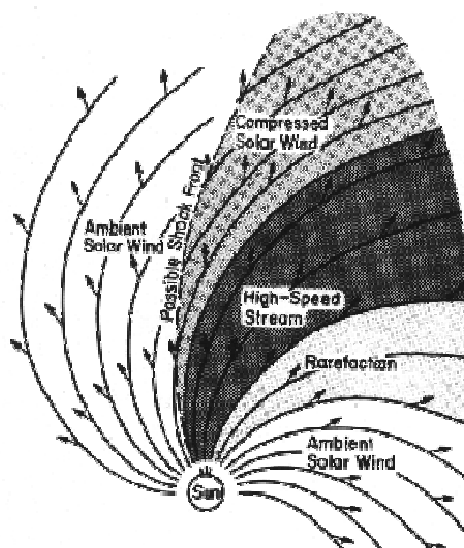


Figura 11 – Ilustração artística de regiões de interação co rotante. Fonte: Hundhausen, 1972.

Devido a rotação solar, CIRs tendem a passar pela Terra a cada 27 dias. É conhecido que a passagem de CIRs causam decréscimos recorrentes na densidade de GCR (Richardson, 2004).

2.5 Ejeções de Massa Coronais e “Flares”

Explosões Solares (*flares*) são fenômenos caracterizados pela emissão de grande quantidade de energia (10^{26} a 10^{32} ergs) em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas para os fenômenos mais intensos. A Figura 12 mostra um *flare* observado pelo instrumento EIT 195 a bordo do satélite SOHO em 04 de Novembro de 2003. *Flares* liberam energia em forma de aquecimento, sendo eventos locais de baixa escala, aquecendo o material a sua volta em poucos minutos.

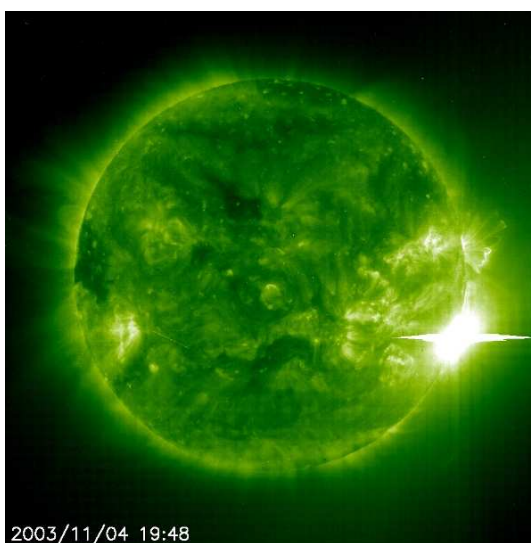


Figura 12 – A explosão solar (“*flare*”) na figura é o ponto mais brilhante da imagem. Obtida pelo instrumento EIT em 04 de novembro de 2003, a bordo do satélite SOHO, em 195 Å.

A primeira Ejeção de Massa Coronal (CME) foi observada pela *Orbiting Solar Observatory*, OSO-7 (Howard et al., 1997) em 14 de dezembro de 1971. O termo “Ejeções de Massa Coronais” foi primeiramente usada por Gosling et al. (1975). Estudos mostraram que as CMEs muitas vezes estavam associadas a explosões solares e proeminências. A primeira idéia era de que as CMEs eram causadas pelas Explosões Solares (Dryer, 1982; Dryer e Wu, 1985). Uma CME também libera uma energia de 10^{31-32} ergs (Illing e Hundhausen, 1986) sendo juntamente com as *flares* os dois fenômenos mais energéticos da coroa solar. CMEs liberam energia em forma de trabalho (Low, 1996) e, em comparação com *flares*, são fenômenos de grande escala. São grandes bolhas de gás magnetizado que podem levar diversas horas para serem expelidas ao espaço. A Figura 13 mostra uma CME observada em 27 de fevereiro de 2000.

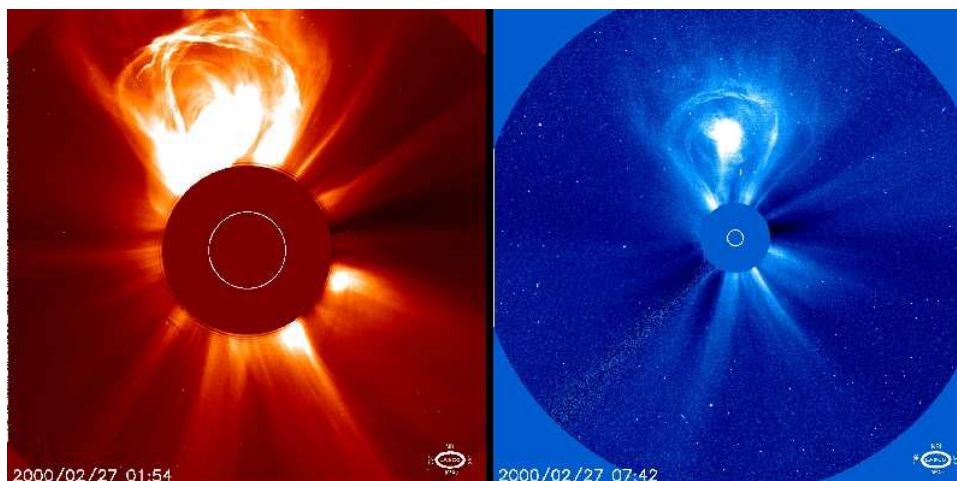


Figura 13 – Ejeção de Massa Coronal em 27 de fevereiro de 2000 observada por LASCO C2 e C3, satélite SOHO. FONTE: <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/las02.html>.

CMEs estão diretamente relacionadas com o ciclo solar. Elas tem frequência de um evento por semana no mínimo e de 2 a 3 eventos por dia nos períodos de máximo solar. A grande quantidade de material que carrega as linhas de campo magnético do Sol que é ejetada para o meio interplanetário com uma CME é chamada de Ejeção de Massa Coronal Interplanetária (ICME). A interação da ICME com a magnetosfera terrestre causa distúrbios geomagnéticos devido à velocidade das partículas ejetadas do Sol ter várias centenas de km/s. As ICMEs geralmente estão acompanhadas de ondas de choque.

Ejeções de Massa Coronais podem alterar o fluxo do Vento Solar e produzir alterações que atingem a Terra e as vezes com resultados nocivos e perigosos às atividades humanas. A identificação no Vento Solar do material ejetado em um CME é ainda um desafio. Não há uma característica única exibida por todas as nuvens de Plasma resultantes de CME Solares. Segundo Neugebauer e Goldstein (1997), varias características podem aparecer juntas ou isoladas. São elas:

1. Temperatura cinética de íons ou elétrons baixa para uma dada velocidade do Vento Solar. Esta característica baseia-se na expansão da estrutura;
2. Anisotropia não usual da distribuição de prótons com temperatura paralela superior a temperatura perpendicular ao Campo Magnético Interplanetário, causado pela conservação do momento magnético dos íons à medida que o Plasma se expande;
3. Abundancia de Helio não usual.
4. Abundancia de outras espécies iônicas;

5. Feixes bidirecionais de elétrons supra-termais e íons energéticos. Ao caracterizar uma configuração de Campo Magnético Interplanetário, é possível que seja o campo magnético interno de uma injeção, fechado e com extremidades presas no Sol;

6. Suave e intenso Campo Magnético interfere nos valores de parâmetro β de Plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro β a baixos valores. Este parâmetro é geralmente menor que 0,1;

7. Presença de rotação do Campo Magnético, algumas destas configurações são chamadas de Nuvens Magnéticas quando possuem: aumento de seu campo magnético por um fator maior que 2; suave rotação por um amplo intervalo de ângulo; e baixa temperatura iônica;

8. Decréscimo do fluxo de Raios Cósmicos;

Cerca de 1/3 das estruturas identificadas no meio Interplanetário são Nuvens Magnéticas (Gosling, 1990). Estruturas que apresentam as características necessárias para uma tempestade geomagnética são estruturas “geoefetivas”.

2.6 Nuvens Magnéticas

Nuvens Magnéticas foram descobertas por Burlaga et al. (1981). Segundo Klein e Burlaga (1982), uma Nuvem Magnética é definida como sendo uma estrutura com extensão radial de aproximadamente 0,25 UA - em 1 UA -, Campo Magnético mais intenso do que o Vento Solar normal, tipicamente $B > 10nT$, suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a 180° , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta, $B \sim 0,1$. As Nuvens Magnéticas são ideais para estudos das interações Sol-Terra, devido a sua simplicidade e extensos intervalos de campo magnético na direção sul e norte ou vice-versa (Burlaga et al., 1997).

Medidas dos parâmetros de Plasma – velocidade do Vento Solar, temperatura e densidade de prótons – e Campo Magnético – componentes $|B|$, B_x , B_y , B_z – possibilitam identificação de Nuvens Magnéticas. Tais medidas são feitas diariamente por vários satélites presentes no Meio Interplanetário.

Nuvens Magnéticas são originadas nas CMEs. A relação entre uma CME, observada pelo satélite SOHO em 6 de janeiro de 1997, e a chegada de uma Nuvem Magnética na Terra, quatro dias depois, observada pelo satélite WIND, foi descrita por Fox et al., 1998. A região

da cavidade interna da CMEs foi identificada como possível origem desta Nuvem Magnética por Gopalswamy et al. (1998).

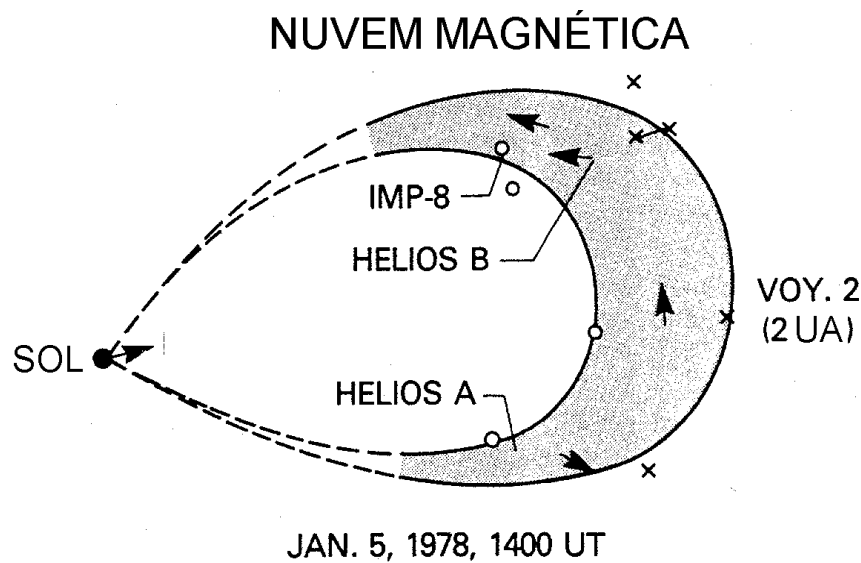


Figura 14 – Geometria de uma nuvem magnética. Fonte: Adaptado de Burlaga et al. – 1990.

Uma Nuvem Magnética observada por vários satélites possibilitou o estabelecimento de sua geometria, ilustrada no diagrama da Figura 14, adaptado de Burlaga et al., 1990. Nela estão indicados os satélites que observaram o evento ocorrido em 5 de Janeiro de 1978: IMP-8, Hélios A e Voyager 2. Os “x” representam a fronteira dianteira da Nuvem Magnética vista por cada um dos satélites, e os círculos, a fronteira traseira. As setas indicam a direção do campo magnético observado por cada um dos satélites. Esta situação é bastante rara, pois normalmente não é possível observar Nuvens Magnéticas com mais de um satélite simultaneamente.

2.7 Tempestades Geomagnéticas

Tempestades Geomagnéticas são eventos de grande perturbação no campo magnético Terrestre, onde a Terra fica vulnerável à precipitação de partículas energéticas do Vento Solar e a raios cósmicos, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez et. al, 1994). A característica principal de uma Tempestade Geomagnética é o decréscimo acentuado da componente horizontal, H, do Campo Magnético e a posterior fase de recuperação (Kamide et al., 1998). O decréscimo atribui-se a um aumento da população de partículas aprisionadas na magnetosfera. Derivas devido ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura produzem a chamada “Corrente de Anel”.

A Corrente de Anel é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, íons de Leste para oeste e os elétrons de oeste para leste, em torno da Terra devido à distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. A perturbação do Campo Magnético gerado por essa corrente reflete a condição do campo magnético interplanetário (IMF) que controla o suprimento de energia para o interior da magnetosfera (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Lyons e Willians, 1984; Nishida, 1978).

Para medir a intensidade da Corrente de Anel é utilizado o chamado índice Dst. O índice Dst é uma medida quantitativa da ocorrência de tempestades geomagnéticas. É calculado a partir de dados de magnetômetros de superfície em observatórios próximos ao Equador.

Em baixas latitudes a perturbação da componente horizontal do campo geomagnético H é dada pela intensidade da corrente de anel magnetosférica. “Corrente de anel magnetosférica” é um sistema de correntes que circula a Terra no plano equatorial, que são geradas pela deriva longitudinal de partículas energéticas (de 10 a 200 keV) carregadas, aprisionadas no campo magnético terrestre a uma distância entre 2 e 7 raios terrestres. Durante uma Tempestade Magnética, o fluxo de partículas da corrente de anel é dramaticamente aumentado. Este aumento tem sido atribuído a dois diferentes processos:

1. A injeção de plasma para dentro da magnetosfera interna durante a fase de expansão de uma subtempestade magnetosférica;
2. Aumento do transporte convectivo de partículas vindas da lâmina de plasma do lado noturno para dentro da magnetosfera interna, como resultado de uma intensificação do campo elétrico de convecção amanhecer-entardecer da Terra durante longos períodos de intenso Campo Magnético Interplanetário na direção Sul (reconexão magnética).

Como o Índice Dst é uma média da medida direta das perturbações causada na magnetosfera, tomando-se a superposição dos dados de todas as estações, a diferença entre os maiores e menores valores corresponde ao índice Dst, que mede a assimetria da corrente de anel. As variações negativas muito grandes indicam um aumento da intensidade da corrente de anel, pois, a corrente gera um campo magnético oposto ao campo geomagnético, diminuindo seu valor original. As perturbações duram em torno de uma hora, e caracterizam a fase principal de uma Tempestade Geomagnética. Uma tempestade Geomagnética caracteriza-se por três fases. A Figura 15 apresentada as fases.

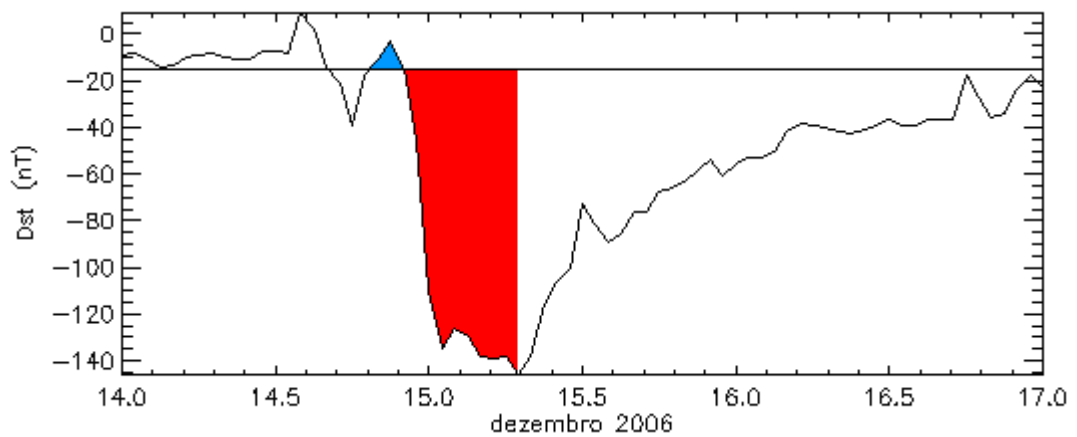


Figura 15 – Fases do decréscimo do índice Dst. Fonte: Autor.

1. Um início súbito (**em azul**) - *Sudden commencement* – e/ou fase inicial, está associada ao aumento da pressão dinâmica – incidência de partículas – do Vento Solar, que comprime a magnetosfera, indicando um aumento brusco no campo magnético;
2. Uma fase principal (**em vermelho**) – *main phase* – é caracterizada por uma redução da intensidade do campo na Superfície Terrestre, essa redução está associada à intensificação da Corrente de Anel e conseqüentemente um alto decréscimo no índice Dst;
3. Uma fase de recuperação (**após vermelho**) – *recovery phase* – caracteriza-se pela diminuição e eliminação gradual da pressão, passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel.

A faixa de observação do índice Dst é de 100 nT até -600 nT. Condições não perturbadas são representadas por um índice Dst de 0, mas isto não é o que realmente ocorre, pois a corrente de anel não desaparece, ela existe sempre, mas com uma intensidade muito menor do que durante uma Tempestade Magnética. Neste trabalho foi utilizado índice Dst oriundo do World Data Center for Geomagnetismo (Kyoto, Japão) disponível no site <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>. A Tabela 3 abaixo mostra a classificação das Tempestades Geomagnéticas de acordo com a intensidade. As intensidades seguem de acordo com critérios de Gonzalez et. al., 1994.

Tabela 3 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.

INTENSIDADE DA TEMPESTADE	DEFINIÇÃO
Atividade normal	Dst > -30 nT
Fracas	-50nT < Dst ≤ -30nT
Moderadas	-100nT ≤ Dst ≤ -50nT
Intensas	Dst < -100nT

3 METODOLOGIA

Descrevem-se no capítulo os instrumentos de medida e os sistemas utilizados para adquirir e gravar os dados. Os dados são gravados em arquivos de texto (.txt) no formato ASCII que podem ser lidos por diversos compiladores como fortran, IDL, Matlab etc. O satélite ACE será apresentado primeiro, logo mais aparecerá a descrição do Detector Multidirecional de Muons (DMM) Protótipo e Expandido.

3.1 Satélite Ace

Dados de plasma e de campo são obtidos pelos instrumentos a bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*) da NASA. O satélite ACE orbita o ponto de Lagrange L1, ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra. A Figura 16 ilustra a localização do satélite ACE.

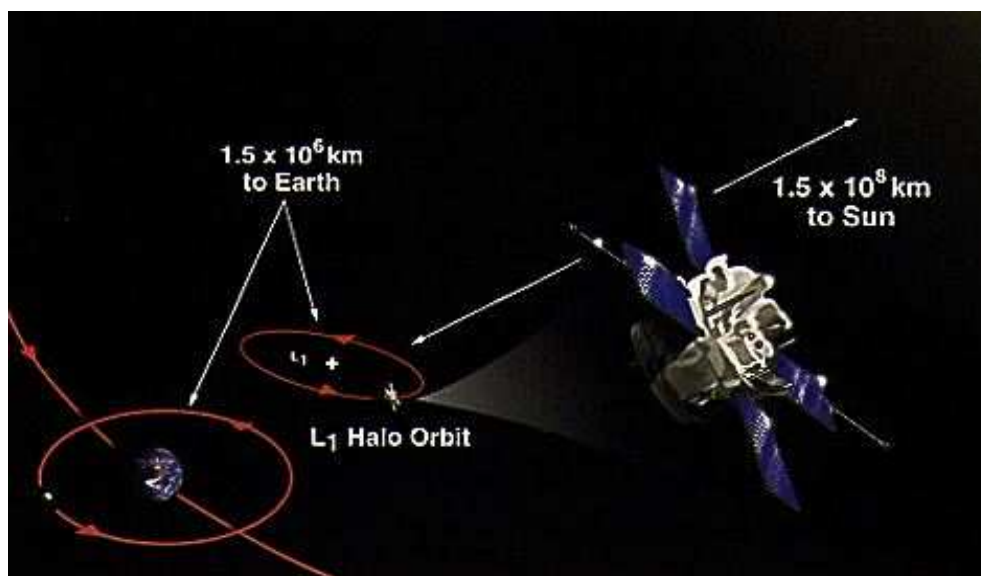


Figura 16 – Ilustração artística do satélite ACE da NASA.

O satélite ACE fica em média a $1,5 \times 10^6$ km da Terra e a $1,5 \times 10^8$ km do sol. Os instrumentos que medem os parâmetros de plasma e campo magnético interplanetário local são o SWEFAM (*The Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*) e MAG (*Magnetometer*).

O SWEFAM mede o fluxo de elétrons e íons do vento solar como função da direção e energia. Os dados detalham o conhecimento das condições do vento solar a cada minuto. Os dados de elétrons e íons são feitos separadamente por diferentes sensores:

1. O sensor de íons mede partículas de energia entre 0,26 a 36 KeV;

2. O sensor de elétrons mede energia dos elétrons entre 1 e 1350 eV.

O instrumento MAG é constituído de uma caixa eletrônica montada no satélite e os sensores estão montados na margem dos espelhos solares.

Para analisar os dados obtidos pelo ACE acessa-se o site <http://www.srl.caltech.edu/ACE/> e seleciona-se na plataforma a opção “*Online Data*”. Logo após seleciona-se novamente na plataforma “*LEVEL 2 (verified)*”. No site, procuro por “*Merged IMF and Solar Wind 64-second Averages*” e seleciono o *link* ao lado, ou seja, “**MAG/SWEPAM Data**”. O painel da Figura 17 abaixo vai aparecer.

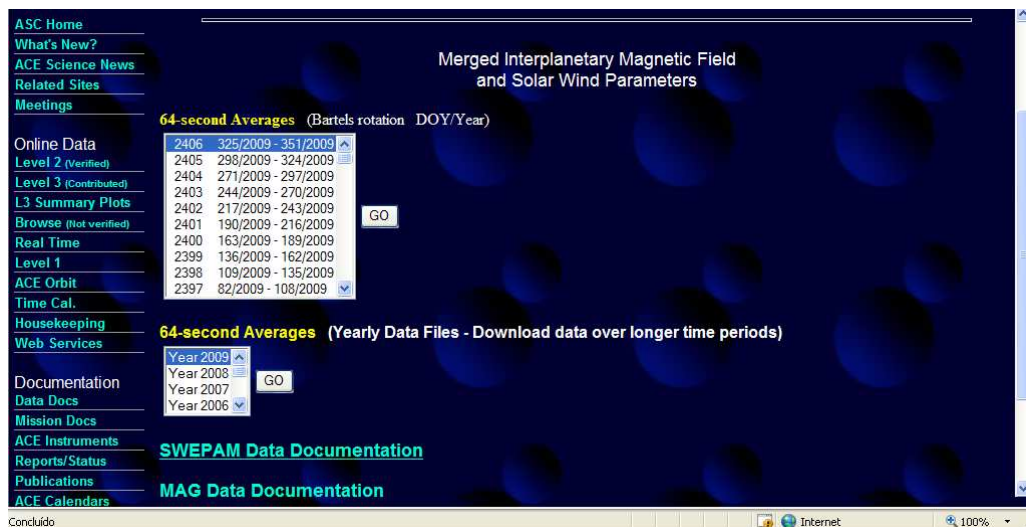


Figura 17 – Página onde dados do satélite ACE estão disponíveis.

No parte da Figura 17 onde diz “*64-second Averages*”, dá os dados por períodos, em dias do ano. Por exemplo, dados do dia do ano 271 de 2009 (271/2009) a dia 297 de 2009 (297/2009). Ou podem-se obter dados do ano inteiro selecionando “*Year 2009*”. Logo após, acessa-se a página como mostra a Figura 18.

Select the data items you want to retrieve.
For more information, click on items in the first column.

Time (UT)	<input checked="" type="checkbox"/> year	<input checked="" type="checkbox"/> day	<input checked="" type="checkbox"/> hour	<input checked="" type="checkbox"/> min	<input checked="" type="checkbox"/> sec	
	<input type="checkbox"/> year (float)	<input checked="" type="checkbox"/> day (float)	<input type="checkbox"/> ACE epoch			
Solar Wind Ions	<input checked="" type="checkbox"/> H ⁺ density	<input checked="" type="checkbox"/> H ⁺ temp	<input type="checkbox"/> ⁴ He/H ⁺	<input checked="" type="checkbox"/> H ⁺ speed		
	<input type="checkbox"/> velocity _R RTN	<input type="checkbox"/> velocity _T RTN	<input type="checkbox"/> velocity _N RTN	<input type="checkbox"/> velocity _X GSE	<input type="checkbox"/> velocity _Y GSE	<input type="checkbox"/> velocity _Z GSE
	<input type="checkbox"/> velocity _X GSM	<input type="checkbox"/> velocity _Y GSM	<input type="checkbox"/> velocity _Z GSM			
Magnetic Field (nT)	<input type="checkbox"/> B _R (RTN)	<input type="checkbox"/> B _T (RTN)	<input type="checkbox"/> B _N (RTN)	<input type="checkbox"/> B _x (GSE)	<input type="checkbox"/> B _y (GSE)	<input type="checkbox"/> B _z (GSE)
	<input checked="" type="checkbox"/> B _x (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B _y (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B _z (GSM)			
	<input checked="" type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> RTN Long.	<input type="checkbox"/> RTN Lat.	<input type="checkbox"/> delta-B (rms)		
Spacecraft Position	<input type="checkbox"/> GSE_x	<input type="checkbox"/> GSE_y	<input type="checkbox"/> GSE_z	<input type="checkbox"/> GSM_x	<input type="checkbox"/> GSM_y	<input type="checkbox"/> GSM_z
	<input type="checkbox"/> HS_x	<input type="checkbox"/> HS_y	<input type="checkbox"/> HS_z			

or check here to select all fields

Starting "YR.DOY": 09/325 Ending "YR.DOY": 09/351 (Example: 98/37, note: no leading zeros)

Choose Data Format: X-Y Plot Text file download Text on Screen

Figura 18 – Pannel de seleção dos dados de interesse.

Na página mostrada na Figura 18 é onde se seleciona as colunas de dados que se quer para serem escritos no arquivo texto. Para o projeto, os dados utilizados são: colunas de tempo, densidade de prótons, temperatura, velocidade e campo magnético e suas componentes. Por último clica-se em “Retrieve data”. A Figura 19 mostra como são os dados no arquivo de texto.

```

year day hr min sec fp_doy Np Tp Vp B_gsm_x B_gsm_y B_gsm_z Bmag
BEGIN DATA
2009 325 0 0 3.024 325.000035 5.180 4.7758e+04 413.64 7.089 -2.993 -6.206 9.886
2009 325 0 1 7.046 325.000776 5.686 4.2897e+04 415.11 7.053 -2.797 -6.301 9.865
2009 325 0 2 10.982 325.001516 5.007 4.8032e+04 414.34 6.972 -2.795 -6.323 9.820
2009 325 0 3 15.005 325.002257 6.044 4.2602e+04 415.06 7.076 -2.724 -6.214 9.805
2009 325 0 4 19.027 325.002998 4.752 4.8904e+04 414.11 7.234 -3.152 -6.093 9.976
2009 325 0 5 23.050 325.003739 5.480 4.1289e+04 410.19 7.197 -3.327 -6.121 10.024
2009 325 0 6 26.986 325.004479 4.280 5.2510e+04 411.62 6.955 -3.556 -6.066 9.911
2009 325 0 7 31.008 325.005220 4.438 4.4399e+04 412.30 6.923 -3.992 -5.882 9.930
2009 325 0 8 35.030 325.005961 4.399 4.9254e+04 411.31 6.851 -3.978 -5.870 9.871
2009 325 0 9 39.053 325.006702 5.530 4.4315e+04 413.58 6.820 -3.514 -5.858 9.656
2009 325 0 10 42.989 325.007442 4.884 4.9728e+04 413.45 6.803 -3.596 -5.826 9.654
2009 325 0 11 47.011 325.008183 5.957 4.3604e+04 415.97 6.514 -3.641 -6.013 9.586
2009 325 0 12 51.034 325.008924 -9999.900 -9.9999e+03 -9999.900 6.201 -3.206 -6.170 9.331
2009 325 0 13 55.056 325.009665 7.332 4.4370e+04 413.06 6.240 -2.508 -6.173 9.133
2009 325 0 14 58.992 325.010405 5.985 5.2381e+04 412.75 6.101 -2.090 -6.351 9.055
2009 325 0 16 3.014 325.011146 7.274 4.0804e+04 412.07 5.275 -1.568 -7.353 9.200
2009 325 0 17 7.037 325.011887 6.309 4.5043e+04 413.47 5.841 -0.745 -6.689 8.962
2009 325 0 18 10.973 325.012627 6.668 5.1902e+04 411.24 6.332 -1.181 -6.031 8.829
2009 325 0 19 14.995 325.013368 5.986 5.4271e+04 411.18 6.802 -1.917 -4.986 8.729
2009 325 0 20 19.018 325.014109 6.907 4.9241e+04 405.71 6.122 -1.760 -5.573 8.489
2009 325 0 21 23.040 325.014850 5.857 5.0407e+04 406.12 6.695 -1.042 -5.301 8.655
2009 325 0 22 26.976 325.015590 6.476 4.4274e+04 407.22 6.797 -0.155 -5.468 8.750
2009 325 0 23 30.998 325.016331 6.317 5.4490e+04 408.99 6.589 -2.080 -5.098 8.595
2009 325 0 24 35.021 325.017072 7.088 5.0485e+04 410.75 6.635 -1.632 -5.279 8.685
2009 325 0 25 39.043 325.017813 6.306 5.6531e+04 410.46 6.739 -2.629 -4.817 8.691
2009 325 0 26 42.979 325.018553 6.813 4.7189e+04 410.99 6.637 -2.849 -4.524 8.526
2009 325 0 27 47.002 325.019294 6.084 5.7219e+04 410.95 6.470 -2.999 -4.473 8.420
2009 325 0 28 51.024 325.020035 7.254 5.1306e+04 410.39 6.406 -2.978 -4.543 8.400
2009 325 0 29 55.046 325.020776 6.006 6.0096e+04 412.62 6.416 -3.277 -4.418 8.452
2009 325 0 30 58.982 325.021516 7.597 4.2302e+04 412.16 6.448 -3.076 -4.888 8.699
2009 325 0 32 3.005 325.022257 5.660 5.3840e+04 417.07 6.844 -3.863 -4.155 8.892
2009 325 0 33 7.027 325.022998 6.058 4.2832e+04 415.92 7.042 -3.631 -4.120 8.934
2009 325 0 34 11.050 325.023739 6.480 4.8188e+04 417.25 6.832 -3.249 -4.776 8.955
2009 325 0 35 14.986 325.024479 6.918 4.4831e+04 417.97 6.742 -3.099 -4.865 8.876
2009 325 0 36 19.008 325.025220 6.375 4.8587e+04 419.74 6.693 -3.201 -4.738 8.806
2009 325 0 37 23.030 325.025961 7.619 4.6736e+04 420.51 6.556 -3.384 -4.855 8.834
2009 325 0 38 27.053 325.026702 5.980 4.8525e+04 420.44 6.669 -3.302 -4.872 8.896

```

Figura 19 – Arquivo de dados de parâmetros de plasma e de campo.

Os dados são depositados em um arquivo de texto e cada coluna representa uma grandeza física. O arquivo pode ser lido por algum compilador como MATLAB ou IDL. Gráficos são confeccionados a partir destes dados, e que, mostrarão alterações nos parâmetros indicando perturbação no meio interplanetário indicando uma CME ou CIR. Os gráficos serão mostrados no próximo capítulo.

3.2 Detector Multidirecional de Muons: Protótipo (DMM-P)

Em março de 2001 foi instalado um protótipo detector multidirecional de muons no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE – MCT), em São Martinho da Serra, RS, Brasil (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O, altitude 492m acima do nível do mar) no âmbito da parceria INPE/MCT – LACESM/CT-UFSM através da colaboração Brasil – Japão – EUA em Clima Espacial.

O Detector Multidirecional de Muons Protótipo (DMM-P) era formado por duas camadas de 4 detectores, como mostrado na Figura 20. As camadas são sustentadas por uma estrutura de ferro e intermediadas por uma camada de chumbo de alta pureza de 5cm de espessura usada para absorver os componentes de mais baixa energia dos Raios Cósmicos. Cada um dos 8 detectores são compostos por uma caixa metálica onde no topo localiza-se uma fotomultiplicadora com a área de detecção voltada para baixo, juntamente com os circuitos relacionados.

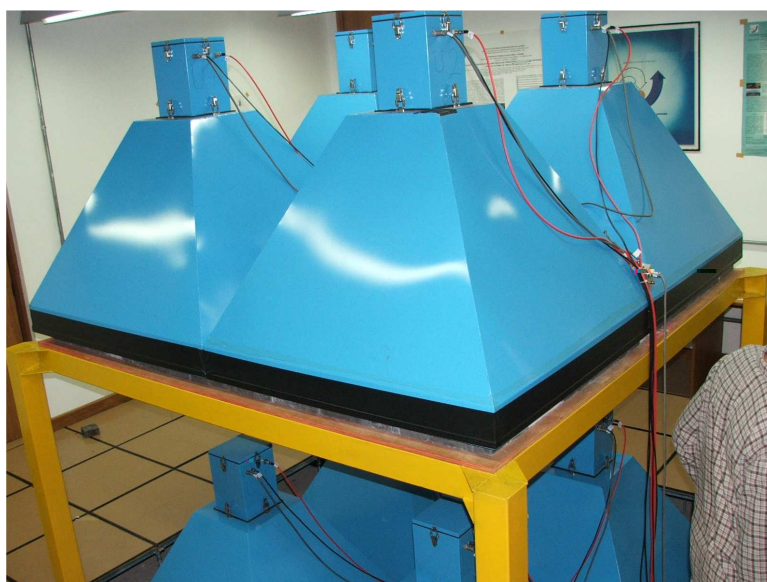


Figura 20 – Foto de DMM-P instalado no OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

Na porção inferior da caixa metálica está localizado um plástico cintilante que libera ftons na passagem de raios cósmicos secundários. O plástico tem área de 1m^2 e espessura de 5 cm. A foto dos plásticos é mostrado na Figura 21. Os detectores estão dispostos na forma de

quadrado de lado 2m^2 em cada camada. Cada detector é identificado por um uma letra seguida de um número (U1, U2, U3, U4 e L1, L2, L3, L4), sendo que U refere-se a camada superior (do inglês, *upper*), e L refere-se a camada inferior (do inglês, *lower*).

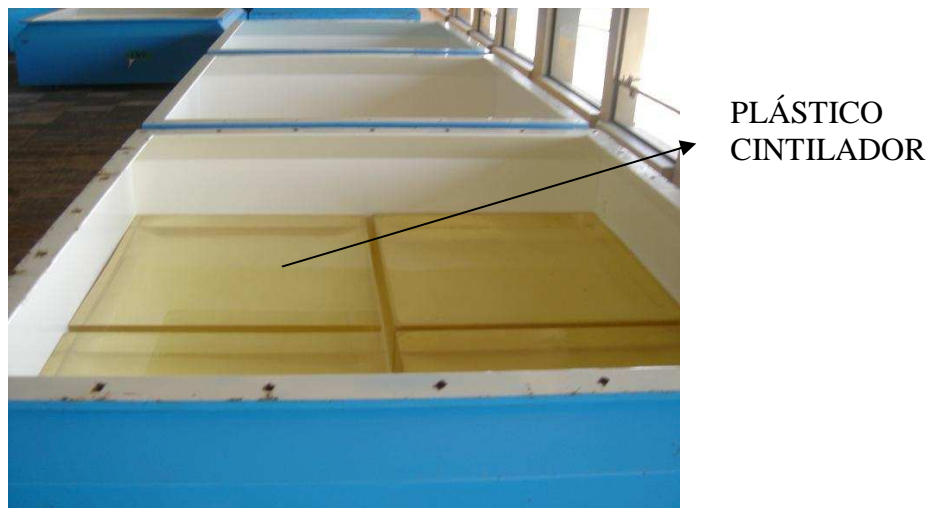


Figura 21 – Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m^2 . Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm.

Cada detector é alimentado por dois condutores, sendo um para alta tensão (para a fotomultiplicadora) e outro de baixa tensão (para o circuito eletrônico de pré-amplificação). De cada detector parte um cabo coaxial para os circuitos de coincidência, que correlacionam os dados aos pares provenientes da incidência de muons nos detectores superiores e inferiores.

Somente são contados como muons partículas que passam tanto por algum detector da camada superior como por algum detector na camada inferior, de forma a produzir pulsos elétricos nos dois circuitos correspondentes. Se uma partícula passar apenas em uma das camadas, esta não será contada como muon.

Existe duas possibilidades para que não ocorra a contagem:

- a) a partícula foi blindada pela camada de chumbo, sendo sua energia inferior a $\sim 50\text{GeV}$;
- b) a trajetória da partícula não coincide com a posição dos dois detectores em razão do ângulo em relação à vertical ser superior a $49,14^\circ$.

A primeira possibilidade é desejada visto que atua como um filtro para outras partículas de energia menor que $\sim 50\text{GeV}$ que podem não ser muons ou, se forem muons, não são desejados para o estudo em questão. A energia limite de blindagem é função do grau de pureza da camada de chumbo disposta entre os detectores. Em razão disso todo o chumbo tem grau de pureza aproximadamente igual em toda a extensão da camada. A segunda

possibilidade limita a área de cobertura do detector. Esta segunda possibilidade é indesejada, pois limita a cobertura de ângulos de *pitch*.

Juntamente com a fotomultiplicadora encontra-se um pré-amplificador, responsável por amplificar aproximadamente 300 vezes os pulsos provenientes da fotomultiplicadora.

O suprimento de alta tensão é realizado pelo HV *power supply SPELLMAN SL15*, que recebe energia do estabilizador em 110V e fornece 1KVA para um distribuidor de alta tensão. A função do distribuidor é fazer ajuste fina na tensão de cada fotomultiplicadora e compensar diferenças de ganho entre as 8 fotomultiplicadoras do detector, mesmo se tratando de fotomultiplicadoras de mesmo modelo e fabricante e sob mesmas condições de temperatura.

A partir da combinação dos 8 pulsos de 2 a 2, sendo um na camada superior e outro na inferior, formam-se 16 maneiras de coincidência diferentes. Destas coincidências, formam-se 9 detectores direcionais.

Tabela 4 – Dados específicos do detector protótipo.

Detector direcional	Combinação de detectores	Contagem horária (fator 10^4)	Erro de Poisson (%)	P_m (GV)
Vertical (V)	U1-L1 U2-L2 U3-L3 U4-L4	39	0,16	53
30° Norte (N)	U1-L3 U2-L4	11	0,30	58
30° Sul (S)	U4-L2 U3-L1	11	0,30	57
30° Leste (L)	U2-L1 U4-L3	11	0,30	59
30° Oeste (O)	U1-L2 U3-L4	11	0,30	56
39° Nordeste (NE)	U2-U3	4,7	0,46	64
39° Noroeste (NO)	U1-U4	5,4	0,43	61
39° Sudeste (SE)	U4-L1	5,3	0,43	63
39° Sudoeste (SO)	U3-L2	5,5	0,43	60

A Tabela 4, as componentes estão acompanhados de um valor de ângulo (em graus), com exceção feita para o vertical. Esse ângulo é a inclinação do dado componente em relação à direção vertical. Percebe-se que quanto menor é a contagem de muons para um dado canal direcional, maior é o seu ângulo de inclinação. Isso é explicado pela rigidez de corte geomagnética (dado em GV), quanto mais inclinado o raio cósmico chega à atmosfera maior é a energia mínima que o mesmo necessita para atravessar a atmosfera e alcançar a superfície terrestre.

Os dados são transferidos dos circuitos contadores para um computador pessoal e gravados em forma de texto a cada hora, acompanhados da informação da hora universal

(UT), da pressão atmosférica local e da temperatura da sala. Como o DMM-P tinha resolução temporal de uma hora, geravam-se 24 dados em um arquivo por dia. Assim, totalizava-se 30 a 31 arquivos de dados dependendo do mês. A Figura 22 mostra uma imagem do arquivo gerado.

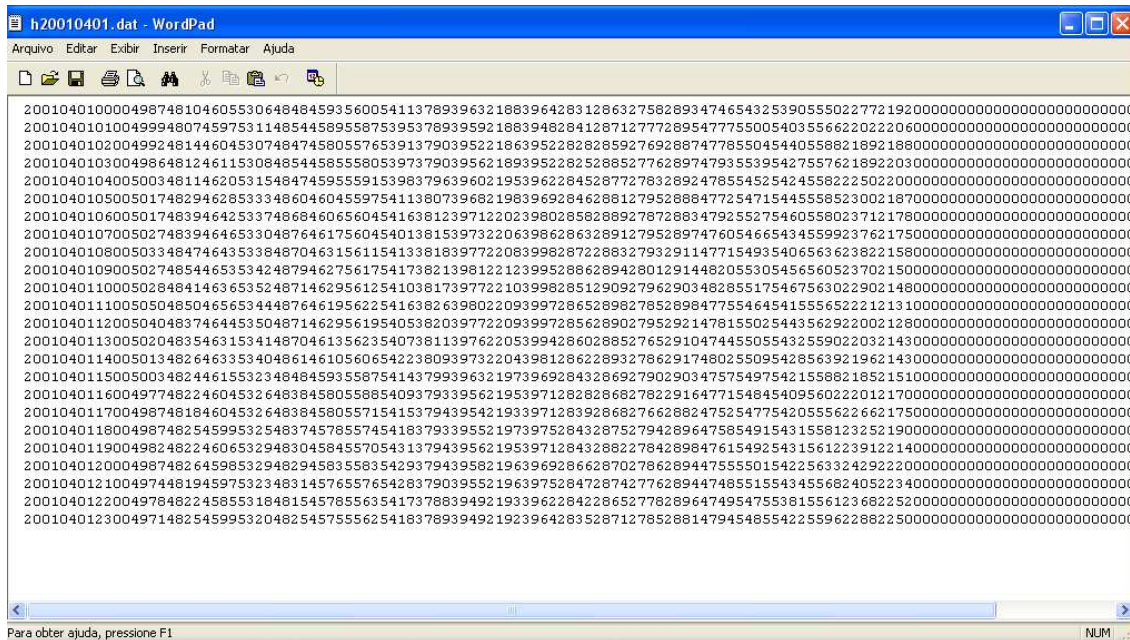


Figura 22 – Arquivo que era gerado para armazenar dados do DMM -P.

O nome do arquivo gerado diz a data em que os dados foram gravados. Para o nome como na imagem acima “h20010401.dat”, “h” significa que os dados são de uma hora, “2001” que são do ano 2001, “04” do mês abril e “01” dia primeiro. As colunas do arquivo significam: Ano (4 dígitos), mês (dois dígitos), dia (2 dígitos), hora (2 dígitos), minuto (2 dígitos), U1 (4 dígitos), U2 (4 dígitos), U3 (4 dígitos), U4 (4 dígitos), L1 (4 dígitos), L2 (4 dígitos), L3 (4 dígitos), L4 (4 dígitos), Us (4 dígitos), Ls (4 dígitos), WT (4 dígitos), V (4 dígitos), N (4 dígitos), S (4 dígitos), E (4 dígitos), W (4 dígitos), NE (4 dígitos), NW (4 dígitos), SE (4 dígitos), SW (4 dígitos), PR (4 dígitos) e RT (4 dígitos).

- U1, U2, U3, U4, L1, L2, L3 e L4 – são as contagens individuais de cada detector.
- Us, Ls e WT são dados das partículas que respectivamente passam somente na camada de cima, de baixo e em ambas as camadas.
- V (vertical), N (norte), S (sul), E (leste), W (oeste), NE (nordeste), NW (noroeste), SE (sudeste), SW (sudoeste) – são dados de cada direção.

Para trabalhar com os dados, se deve separar as colunas no arquivo de dados. Para isso, utiliza-se um programa de tabelas como, por exemplo, Excel.

3.3 Detector Multidirecional de Muons Expandido (DMM-E)

O detector expandido possui um total de 56 detectores dispostos em duas camadas de 4x7 detectores separadas por uma distância de 1,73m, totalizando uma área de 28 m² de placas cintiladoras para cada camada. Da mesma forma que no protótipo, as duas camadas estão separadas por outra de chumbo com 5cm de espessura. As numerações dos detectores estão nas faixas 3 a 9, 12 a 16, 19 a 25 e 28 a 34 acompanhados da letra U, se estiverem na camada superior, ou L, se estiverem na camada inferior.



Figura 23 – Fotos do DMM-E.

A expansão do DMM-P possibilitou a ampliação de 09 para 13 canais direcionais (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2). Na primeira coluna da Tabela 5 são apresentados os ângulos de inclinação dos canais direcionais em relação a direção vertical. Os ângulos são calculados da seguinte forma:

1. tomando a separação entre a camada inferior e superior de 1,73m;
2. tomando-se a distância de 1m entre dois detectores adjacentes.

Na terceira coluna são dadas as contagens para os detectores, com fator 10⁶. Tratam-se de médias de contagens horárias baseadas em dados de contagens de 10 minutos do detector durante o dia 08/04/2006. O erro de Poisson é dado, em porcentagem, por $\sigma = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot 100$. Onde s é a contagem média em uma dada direção.

Tabela 5 – Direções, contagem e erro na contagem do DMM-E.

Detector direcional	Número de sub-detectores	Contagem horária (fator 10^6)	Erro de Poisson (%)
Vertical (V)	28	2,56	0,06
30° Norte (N)	21	1,03	0,10
30° Sul (S)	21	1,06	0,10
30° Leste (L)	24	1,19	0,10
30° Oeste (O)	24	1,20	0,10
39° Nordeste (NE)	18	0,51	0,14
39° Noroeste (NO)	18	0,53	0,14
39° Sudeste (SE)	18	0,53	0,14
39° Sudoeste (SO)	18	0,54	0,14
49° Norte (NN)	14	0,36	0,17
49° Sul (SS)	14	0,35	0,17
49° Leste (EE)	20	0,49	0,14
49° Oeste (WW)	20	0,48	0,14

Com a instalação de um sistema de captura baseado em dispositivos de hardware específicos FPGA (Field Programmable Gate Array) é possível ter informações de cantagens de várias direções. O número total de canais direcionais distintos é de 91 em contraste com as 13 direções do detector protótipo. O DMM-E futuramente poderá ser novamente atualizado, com 36 detectores por camada (4x9), suportando 119 canais direcionais. A Figura 22, retirado de “BANCO DE DADOS PARA O TELESCÓPIO CINTILADOR DE MUONS INSTALADO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL” por Dr. Adriano Petry, Tecnologista do CRS/CCR/INPE- MCT, ilustra os possíveis canais direcionais para o DMM-E devido ao novo sistema de contagem de dados. A Figura 24 é um esquema do DMM-E visto de cima. As flechas mostram as possíveis direções (menos a vertical) combinando um detector de camada superior com uma inferior, ao qual não aparece na Figura. Note que quanto maior a inclinação de uma direção maior é a distancia que um detector está um do outro (no par de detectores “cima e baixo”). É possível ter 36 combinações da direção vertical. Podemos ter 27 canais direcionais para a direção norte. A combinação norte é um detector na camada de cima e um detector adjacente ao da direção vertical voltado para o sul.

A linha que une os detectores forma a direção norte, pois a partícula veio do norte. E assim por diante se pode obter outras direções.

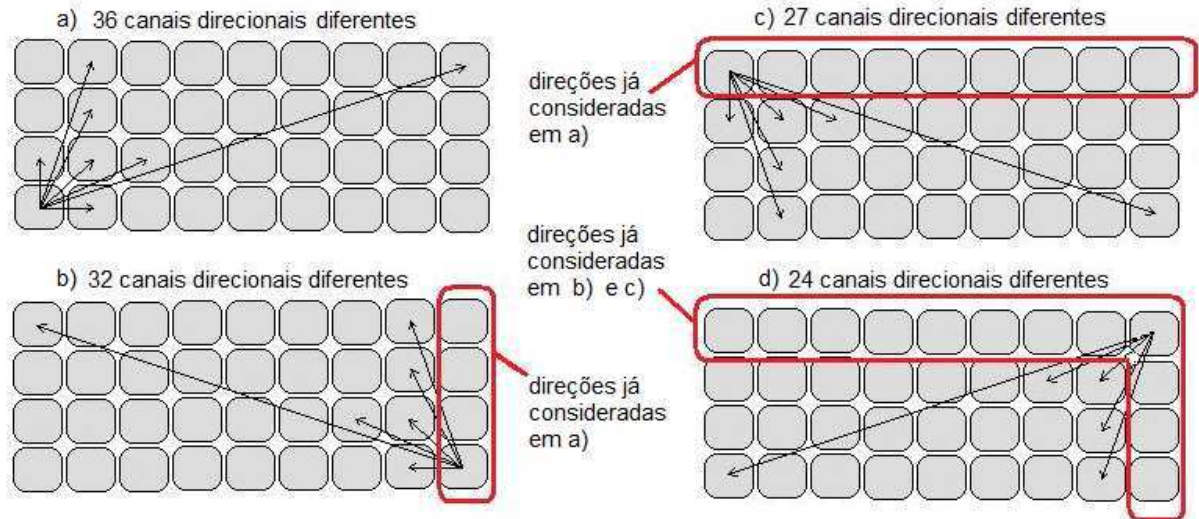


Figura 24 – Canais direcionais possíveis no DMM-E composto por 36 detectores em cada uma das duas camadas.

3.3.1 Plástico Cintilante e Fotomultiplicadoras

As diferenças entre os detectores protótipo e expandido, então, estão no número de detectores, e no sistema usado para operar e captar os dados do DMM-E. Da mesma forma que o DMM-P, o detector expandido utiliza plásticos cintilantes para detectar as partículas secundárias. Os plásticos são produzidos pela companhia japonesa C. I. Industrial Company Co. Todos os cintiladores tem dimensões 50x50x10cm, sendo que para um detector de área 1m² são necessários 4 cintiladores dispostos lado a lado como na Figura 21. Suas principais características são dadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do plástico cintilante usado para detecção de partículas. FONTE: Munakata, K.

Característica	Valor
Comprimento de onda de máxima cintilação	420 nm
Tempo de decaimento da luz emitida	3.0-3.2 ns
Eficiência de cintilação	50-60%
Comprimento de atenuação da luz	90-110cm
Índice de Refração	1.50-1.58
Densidade	1.04

Para que seja possível detectar muons é preciso algum instrumento que transforme energia de radiação em sinal elétrico para fazer a medida da contagem. Baseado no efeito fotoelétrico se utiliza as chamadas fotomultiplicadoras, sigla PMT (do inglês, *photomultiplier tube*). O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons de um material devido à incidência de radiação ou fóton.

Nos Detectores Multidirecionias de Muons é utilizada a fotomultiplicadora fabricada pela *Hamamatsu Photonics* modelo n°. R877. Trata-se de um modelo projetado para contagem por cintilação do tipo *head-on*. Maiores detalhes dessa fotomultiplicadora são dados na Tabela 7, e a Figura 25 mostra a fotomultiplicadora instalada no DMM-E.

Tabela 7 – Dados específicos das fotomultiplicadoras.

Parâmetro	Descrição/Valor	Unidade
Resposta Espectral	300 a 650	Nm
Comprimento de onda com máxima resposta	420	Nm
Número de multiplicadores de elétrons	10	-
Máxima tensão fornecida entre cátodo e ânodo	1500	Vdc
Sensibilidade de radiação do cátodo a 25°C, 420 nm	80	MA/W
Tempo de trânsito dos elétrons a 25°C	90	ns
Ganho típico a 25°C	5E5	-



Figura 25 – Foto da fotomultiplicadora utilizada no DMM-P e DMM-E.

Dentre os diversos dispositivos fotossensíveis disponíveis no mercado, as fotomultiplicadoras são dispositivos versáteis com resposta extremamente rápida e altíssima

sensibilidade. As fotomultiplicadoras, ou células fotoelétricas, são tubos de vidro de vácuo. Dentro deste tubo existe um foto-cátodo (negativo) recoberto por material que absorve a luz e emite elétrons, que são acelerados em direção a um ânodo (positivo). Estes elétrons se chocam com dinodos que estão progressivamente a potenciais mais altos, e em cada um destes um elétron desloca 3 a 4 novos elétrons, que são acelerados até o próximo dinodo. Desta maneira, após 10 estágios, os elétrons foram multiplicados por um fator de $4^{10}=10^6$. Assim, a luz incidente produz uma corrente que pode ser medida eletronicamente. O fator de amplificação é extremamente sensível às mudanças na tensão (cerca de 1kV), que precisa ser altamente estabilizada. Por isso é controlada por potenciômetro. Ao aumentar a tensão na fotomultiplicadora, conseqüentemente a contagem de partículas aumenta consideravelmente. Portanto a partir de tensões bem ajustadas é possível contar a passagem de raios cósmicos secundários.

Em razão da emissão-secundária de multiplicação, as fotomultiplicadoras possibilitam sensibilidades extremamente altas e ruído extremamente baixo, se comparado a outros dispositivos fotosensíveis usados atualmente para detectar energia radiante na faixa de ultravioleta, visível e próxima ao infravermelho. As fotomultiplicadoras permitem respostas rápidas no tempo e vasta disponibilidade de áreas fotossensíveis.

O fotocátodo é uma superfície fotoemissiva que consiste usualmente de metais alcalinos com baixa função trabalho. Dentre os diversos materiais utilizados, pode-se citar: liga prata-oxigênio-césio (Ag-O-Cs), liga gálio-arsênio (Ga-As), liga Antimônio-Césio (Sb-Cs). Para se realizar contagem por cintilação, como é o caso do DMM costuma-se utilizar material bialcalino formado pelas ligas Antimônio-Rubídio-Césio (Sb-Rb-Cs) e Antimônio-Potássio-Césio (Sb-K-Cs). Sua resposta está na faixa visível e ultravioleta.

Fotoelétrons emitidos pelo fotocátodo são acelerados por um campo elétrico de forma a colidirem com o primeiro dinodo e produzirem emissão secundária de elétrons. Estes elétrons secundários alcançam o próximo dinodo e produzirem uma emissão secundária de elétrons. Repetindo esse processo sobre sucessivos estágios de dinodos obtem-se elevada amplificação de corrente. Dessa forma, uma pequena corrente fotoelétrica do fotocátodo pode produzir uma alta corrente de saída no ânodo do tubo fotomultiplicador.

Ganho (Amplificação de corrente) é simplesmente a relação entre a corrente de saída do ânodo e a corrente fotoelétrica do fotocátodo. De um modo ideal, o ganho de uma fotomultiplicadora com n dinodos é uma taxa de emissão secundária δ por estágio é δ^n . A taxa de emissão secundária de elétrons é dada por $\delta = A \cdot E^\alpha$ onde A é uma constante, E é a

tensão entre dois estágios consecutivos de multiplicadores de elétrons e α é um coeficiente determinado pelo material e pela geometria do dinodo. Em geral α está entre 0,7 e 0,8.

Quando uma tensão V é aplicada entre o cátodo e o ânodo de uma fotomultiplicadora possuindo n estágios de dinodo, o ganho μ é dado por:

$$\mu = \delta^n = (A \cdot E^n) = \left\{ A \cdot \left(\frac{V}{n+1} \right)^\alpha \right\}^n = \frac{A^n}{(n+1)^{\alpha n}} \cdot V^{\alpha n} K \cdot V^{\alpha n}$$

onde K é uma contante.

Visto que fotomultiplicadoras geralmente possuem entre 9 e 12 dinodos, a saída do ânodo é diretamente proporcional a nona até a décima potência da tensão de alimentação. Isso mostra que uma fotomultiplicadora é extremamente susceptível a flutuações na fonte de tensão. Dessa forma, a fonte de tensão deve ser extremamente estável e prover o mínimo de *ripple* e coeficiente de temperatura.

Uma pequena quantidade de corrente circula em uma fotomultiplicadora mesmo quando é operada em completo estado de escuro. Esta corrente de saída é chamada **corrente “de escuro” do ânodo** e se trata de fator crítico na determinação do limite inferior de determinação de luz.

A corrente “de escuro” originária de emissões termiônicas pode ser reduzida ao se reduzir a temperatura ambiente de um tubo fotomultiplicador. A sensibilidade de um tubo fotomultiplicador também varia com a temperatura, mas estas alterações são menores que os efeitos da temperatura na corrente “de escuro”, dessa forma, resfriar uma fotomultiplicadora irá aumentar significativamente sua razão sinal-ruído.

Em razão destes fatores a sala onde se encontra o detector de muons tem sua temperatura mantida aproximadamente constante em 20° através de aparelhos de ar condicionado.

3.3.2 Fonte de alimentação, sistema de processamento e armazenagem de dados.

O sistema está montado em circuitos lógicos, disponíveis em chips da família 74XX. Existe, como foi dito antes, outra forma de coincidência dos dados baseada em FPGA (*Field Programmable Gate Array*) e VHDL (*Verilog Hardware Description Language*). O modelo utilizado é o XC2S200 de fabricação da Xilinx que suporta 32 canais direcionais. Dessa forma basta utilizar-se 4 placas para se ter as 119 canais direcionais. A Figura 26 apresenta o sistema de processamento de sinais provenientes das fotomultiplicadoras e as fontes de alimentação de todo o detector.

Na porção superior dos racks da Figura 26 estão as fontes de alta (esquerda) e baixa (direita) tensão. A fonte de alta tensão (que alimenta as fotomultiplicadoras) é do tipo DC (corrente contínua) controlado e monitorado por computador de tensão máxima de 1500 V. A fonte de baixa tensão alimenta os 56 amplificadores de corrente (placas eletrônicas). Na parte inferior do rack a esquerda da Figura 26 estão os potenciômetros para ajuste individual das tensões aplicadas às fotomultiplicadoras. À direita potenciômetros auxiliares, caso algum potenciometro venha a falhar. Um pequeno aumento de tensão aumenta a contagem nas fotomultiplicadoras sem que tenha ocorrido um aumento na quantidade da chegada de muons. Na porção inferior do rack a esquerda está todo o sistema de processamento de dados, inclusive as placas de FPGA.



Figura 26 – Racks que suportam os potenciômetros, sistemas de processamento de dados e fontes de baixa e alta tensão.

O computador utilizado para gravação e monitoramento do sistema é mostrado na Figura 27. O computador pode ser acessado remotamente pelo programa PCAnywere, ou outros, tais como Teamviewer ou VNCViewer .

O sistema de hora do DMM-E é baseado em relógio de computador pessoal. Como esse sistema não possui a precisão desejada, faz-se sincronização periódica e automática desse horário com o horário disponível no sistema de posicionamento global GPS e com o horário

de diversos relógios atômicos disponíveis na internet. Uma vantagem desse sistema é permitir sincronização de horários entre todos detectores da rede internacional.



Figura 27 – Computador utilizado para gravação dos dados.

O monitoramento do sistema é feito através do monitor do computador onde são armazenados os dados. A Figura 28 mostra o painel através do qual é possível monitorar a contagem de muons.

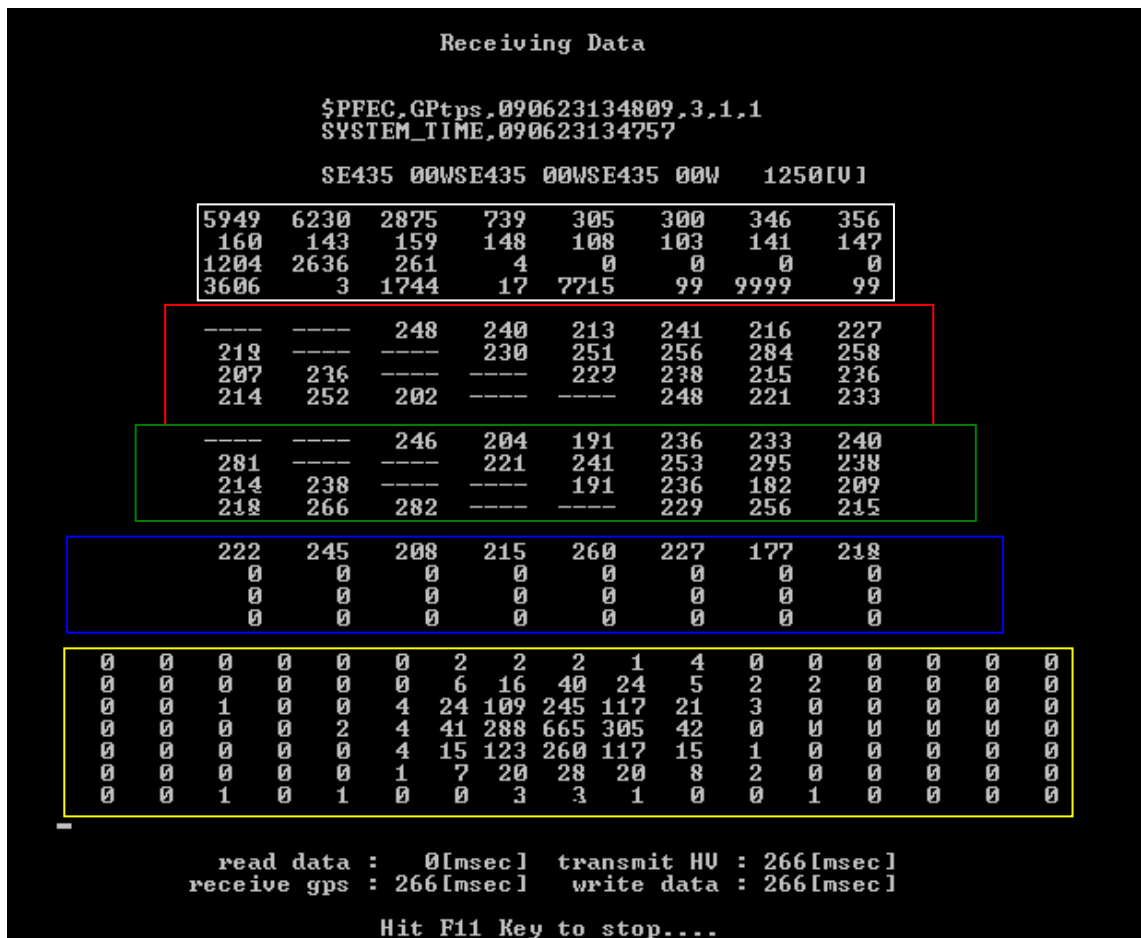


Figura 28– Display de verificação da contagem de muons.

O quadro branco na Figura 28 contém contagens dos componentes direcionais e alguns parâmetros relativos ao sistema. A Tabela 8 abaixo mostra o que cada número da região do quadro branco significa. A o significado dos números na Tabela 8 estão na Tabela 9.

Tabela 8 – Quadro branco referente à Figura 26.

0	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30	31

Tabela 9 – Significado dos números referentes à Tabela 8.

Legenda	Sigla	Descrição
0	UT	Contagem total da camada superior
1	LT	Contagem total da camada inferior
2	WT	Contagem Total
3	V	Componente Vertical
4	N	Componente Norte
5	S	Componente Sul
6	E	Componente Leste
7	W	Componente Oeste
8	NE	Componente Nordeste
9	NW	Componente Noroeste
10	SE	Componente Sudeste
11	SW	Componente Sudoeste
12	NN	Componente Norte
13	SS	Componente Sul
14	EE	Componente Leste
15	WW	Componente Oeste
16	HV	Tensão Fornecida a PMT
17	BSY	Busy event (sistema novo de correção)
18	REJ	Rejent event (sistema novo de correlação)
19	ERR	Error event (sistema novo de corrlação)
20	-	Não utilizado

21	-	Não utilizado
22	-	Não utilizado
23	-	Não utilizado
24	P_I	Pressão atmosférica
25	P_h	Pressão atmosférica
26	T_I	Temperatura
27	T_h	Temperatura
28	G-Mhz_I	Não utilizado
29	G-Mhz_h	Não utilizado
30	Mhz_I	Não utilizado
31	MHz_h	Não utilizado

Os quadros **vermelho** e **verde** mostram as contagem individuais de detectores da camada superior e inferior respectivamente. Os números correspondem aos números de detectores, por exemplo, U1, U2,..., e L1,L2, Os campos com “*” são detectores não utilizados.

Tabela 10 – Significado dos números nos quadros vermelho (detectores superiores) e verde (detectores inferiores) da Figura 28.

1 *	2*	3	4	5	6	7	8
9	10*	11*	12	13	14	15	16
17	18*	19*	20	21	22	23	24
25	26	27*	28*	29	30	31	32

O quadro **azul** mostra a contagem dos quatro últimos detectores da camada superior e inferior que não foram mencionados na Tabela 10, e são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Significado dos números da Figura 26.

U32	U33	U34	U35	L32	L33	L34	L35
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

A região em **amarelo** na Figura 28 mostra a contagem das 119 possíveis direções do detector expandido, como mostra a Tabela 12.

N

Tabela 12 – 119 direções do DMM-E.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
86	87	85	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

W

E

S

Número 60: Contagem Vertical, Num. 43: Contagem Norte, Num. 61: Contagem Leste, Num. 77: Contagem Sul, Num. 59: Contagem Oeste, Num. 44: Contagem NE, Num. 78 SE, etc Num. 26: NN, Num 62: EE, etc. Num. 9: 3N, Num.63: 3E etc.

3.3.3 Dados do DMM-E

Os dados do DMM-E são gravados em arquivos de texto na pasta D:\database e são disponibilizados dois tipos de *arquivos* de dados, um com resolução temporal de um minuto, cujo, o nome do arquivo começa com “m” (*minute*), e de dez minutos, cujo nome do arquivo começa com “t” (*ten*).

O nome dos arquivos de minuto tem a seguinte sintaxe, “mAAAAMMDDHH”, onde “AAAA” é o ano, “MM” é o mês, “DD” é o dia, “HH” é a hora. São gerados 24 arquivos por dia e cada arquivo tem 60 linhas, já que a resolução temporal do DMM-E é de um minuto. A Figura 29 mostra os dados do DMM-E. A descrição do arquivo de dados é dada na Tabela 13.

2006	10	06	02	00	00	60	325825	290229	167108	42276	17077	17620	19353	19848	8386	8730
2006	10	06	02	01	00	60	325869	289152	166648	42051	16846	17547	19609	19845	8689	8674
2006	10	06	02	02	00	60	324969	289388	166756	42463	16834	17707	19614	19858	8465	8796
2006	10	06	02	03	00	60	325896	289869	167130	42721	17006	17313	19644	19738	8462	8674
2006	10	06	02	04	00	60	324889	289135	163616	42343	16983	17292	19319	19904	8519	8582
2006	10	06	02	05	00	60	324394	289000	165508	42166	16926	17379	19502	20000	8431	8751
2006	10	06	02	06	00	60	324329	288859	166223	42311	17018	17407	19288	19716	8454	8600
2006	10	06	02	07	00	60	324992	290079	167112	42311	16874	17581	19596	19792	8646	8627
2006	10	06	02	08	00	60	324365	289736	167047	42409	17031	17363	19730	19922	8404	8747
2006	10	06	02	09	00	60	324941	290160	166894	42174	17266	17656	19533	19991	8654	8815
2006	10	06	02	10	00	60	325652	289454	166871	42319	16808	17368	19511	20020	8613	8885
2006	10	06	02	11	00	60	325924	289318	167149	42411	16970	17814	19392	19739	8320	8779
2006	10	06	02	12	00	60	324763	288809	166066	41904	16932	17490	19455	19641	8440	8636
2006	10	06	02	13	00	60	324431	288665	166277	42459	16962	17446	19472	19770	8633	8484
2006	10	06	02	14	00	60	324983	289735	166811	42402	16938	17359	19526	19681	8498	8736
2006	10	06	02	15	00	60	325475	289885	167252	42652	17049	17374	19661	20091	8463	8742
2006	10	06	02	16	00	60	324461	288583	166328	42058	17074	17424	19453	19653	8707	8576
2006	10	06	02	17	00	60	324795	289706	166544	41913	16767	17569	19714	19775	8556	8752
2006	10	06	02	18	00	60	326324	289831	167162	42249	17141	17565	19689	19882	8520	8708
2006	10	06	02	19	00	60	325189	289878	166831	42440	16999	17369	19699	19854	8479	8786
2006	10	06	02	20	00	60	324895	289366	166795	42366	16873	17604	19498	19687	8636	8495
2006	10	06	02	21	00	60	324029	287496	165338	42125	16832	17256	19223	19707	8464	8667
2006	10	06	02	22	00	60	324413	288460	166459	42347	17007	17308	19470	19751	8316	8643
2006	10	06	02	23	00	60	325521	289356	167099	42215	17108	17769	19687	19759	8412	8544
2006	10	06	02	24	00	60	324999	290260	166964	42275	16838	17597	19434	19952	8596	8805
2006	10	06	02	25	00	60	325189	290299	167461	42234	16944	17636	19621	20250	8404	8726
2006	10	06	02	26	00	60	325216	289647	166800	42009	17126	17600	19554	19645	8588	8757
2006	10	06	02	27	00	60	324094	289272	166844	42248	17054	17486	19543	19824	8674	8641
2006	10	06	02	28	00	60	324954	289068	166779	42410	17005	17544	19496	19767	8477	8596
2006	10	06	02	29	00	60	324515	288989	166280	41902	17123	17486	19556	19934	8426	8746
2006	10	06	02	30	00	60	326508	289979	167198	42318	16985	17597	19537	19944	8532	8849
2006	10	06	02	31	00	60	324098	289368	166377	42065	16764	17268	19698	19704	8703	8632
2006	10	06	02	32	00	60	325074	289007	166475	42455	16908	17548	19292	19596	8544	8653
2006	10	06	02	33	00	60	325116	289375	166816	42532	17097	17405	19495	19620	8559	8591
2006	10	06	02	34	00	60	325557	289970	167189	42531	17129	17490	19552	19583	8557	8678
2006	10	06	02	35	00	60	325658	290287	167435	42438	17019	17692	19600	19626	8401	8883
2006	10	06	02	36	00	60	324369	288967	166472	42624	17060	17693	19317	19696	8480	8583
2006	10	06	02	37	00	60	324727	288891	166604	42336	16873	17494	19445	19992	8321	8653
2006	10	06	02	38	00	60	325148	288904	166264	41859	16926	17607	19651	19759	8458	8758

Figura 29 – Arquivo de Dados do DMM-E.

Tabela 13 – Descrição dos dados do DMM-E, tanto para dados de dez ou um minuto.

Colunas	Descrição
1-6	Ano, Mês, dia, hora, minuto, segundo
7	Número de 1-pps - Período de aquisição em segundos usado para acumular as contagens
8-10	Contagem somente na camada de cima, na de baixo e contagem total.
11-23	Dados direcionais para direções V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2
24, 25	<i>Didi</i> quartz Pressure Sensor (Pressão, Temperatura)
26	Tensão fornecida pela fonte de alta tensão, integrada ao longo do período de aquisição.
27, 28	Número de pulsos fornecido pelo oscilador durante o período de aquisição, e número de pulsos subtraído do tempo não usado.
29-31	Contagens de correlações: bem-sucedidas, rejeitadas entre as camadas superior e inferior e rejeitadas não correlacionadas entre camadas.
32	Contagem total dos 119 canais direcionais.
33-68	Contagem individual dos detectores da camada de superior (<i>Upper 1 - 36</i>)
69-104	Contagem individual dos detectores da camada de inferior (<i>Lower 1 - 36</i>)
105-223	Contagens para cada uma das 119 possíveis direções

As seqüências de direções utilizadas para o registro de contagens até 13/12/2007 era V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, S2, N2, W2, E2. Após essa data, a seqüência passou a ser V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2. O nome dos arquivos de dez minutos tem a seguinte sintaxe, “tAAAAMMDD”, onde “AAAA” é o ano, “MM” é o mês e “DD” é o dia. É gerado um arquivo por dia com 144 linhas cada. A descrição do arquivo “t” é a mesma que “m” dada pela Tabela 13.

Os dados também são enviados para os pesquisadores da *Shinshu University* no Japão. Estes dados são disponibilizados na internet através dos sites ftp://ftp.bartol.udel.edu/takao/muon_data/saomartinho/ e <http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/> (acesso através do link “CR Muon Quasi-Real Time data service”).

Como DMM-E tem dois sistemas diferentes de coincidência, um devido a contagem dos 13 canais direcionais (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2) e o segundo contando com 119 canais direcionais, os arquivos no diretório do professor pesquisador Takao no *ftp* tem dois tipos de dados, intitulados “Directional Data1” e “Directional Data 2”. O primeiro tem um maior número de contagens. A descrição do arquivo é dado na Tabela 14. Os dados são de contagem horária e de dez minutos. No diretório estão arquivos de dados a partir do dia 01 de dezembro de 2006.

Tabela 14 – Descrição dos dados do DMM-E que estão no diretório do professor Takao. Fonte: Takao.

Colunas	Descrição
1-5	Ano, Mês, Dia, Hora, Segundo
6-18	<i>Pressure Corrected Directional data 1 [count/hour]</i> (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2)
19-35	<i>Pressure Corrected Directional data 2 [count/hour]</i> (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2, N3, S3, E3, W3)
36-37	<i>Pressure [hPa], Room Temperature [degree]</i>
38-40	<i>Pressure Un-Corrected data [count/hour]</i> (Upper Total, Lower Total, Wide Total)
41-53	<i>Pressure Un-Corrected Directional data 1 [count/hour]</i> (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2)
54	<i>Pressure Un-Corrected data [count/hour]</i> (Wide Total 2)
55-71	<i>Pressure Un-Corrected Directional data 2 [count/hour]</i> (V, N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, N2, S2, E2, W2, N3, S3, E3, W3)

3.4 Rede Mundial de Detectores de Muons GMDN (Ground Muons Detector Network)

Munakata e colaboradores analisaram os raios cósmicos precursores de tempestades geomagnéticas registrados por uma rede de detectores de muons de superfície terrestre em Nagoya (Japão), Hobart (Austrália) e Mawson-PC (Antártida) (Figura 30). O número total de detectores direcionais em uso neste artigo (Munakata et al, 2000) é 30 para o período posterior à 1992, início da operação de Hobart, e 17 para o período anterior, todos de Nagoya. A rigidez média (P_m) dos raios cósmicos primários registrados varia de 56 a 119 GV e o erro estatístico de contagem horária é estimado estar entre 0.06% e 0.32%. Os símbolos (quadrados, triângulos e losangos) na Figura 30 mostram a direção de visão assintótica para uma partícula incidente para cada detector direcional com rigidez P_m como determinado por um código de trajetória da partícula (Lin et al., 1995). As linhas que atravessam os símbolos representam as extensões de direção de vista para rigidez de partículas entre P_1 e P_2 que concentram 80% da energia central de resposta de cada detector. Para diferentes detectores, P_1 varia entre 16 e 38 GV, enquanto P_2 varia de 356 a 890 GV.

A rede internacional de detectores de muons apresentava uma falha sobre o Atlântico e a Europa, mostrado na Figura 30. A cobertura após a expansão da rede de Detectores com a instalação de um detector protótipo do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra é mostrada na Figura 31 – Bolinhas abertas.

Prof. K. Munakata e co-autores, 2000 sugerem que a rede de detectores de muons pode ser uma boa ferramenta para a previsão do clima espacial. Detectores a serem instalados para preencher a lacuna foram urgentemente requeridos para o melhor entendimento dos precursores e para previsão do Clima Espacial. Conforme afirma Prof. K. Munakata em seu artigo em 2000, um único detector multidirecional estrategicamente situado no Sul do Brasil permitirá grande aumento na cobertura do céu pela rede de detectores de muons (Munakata et al., 2000).

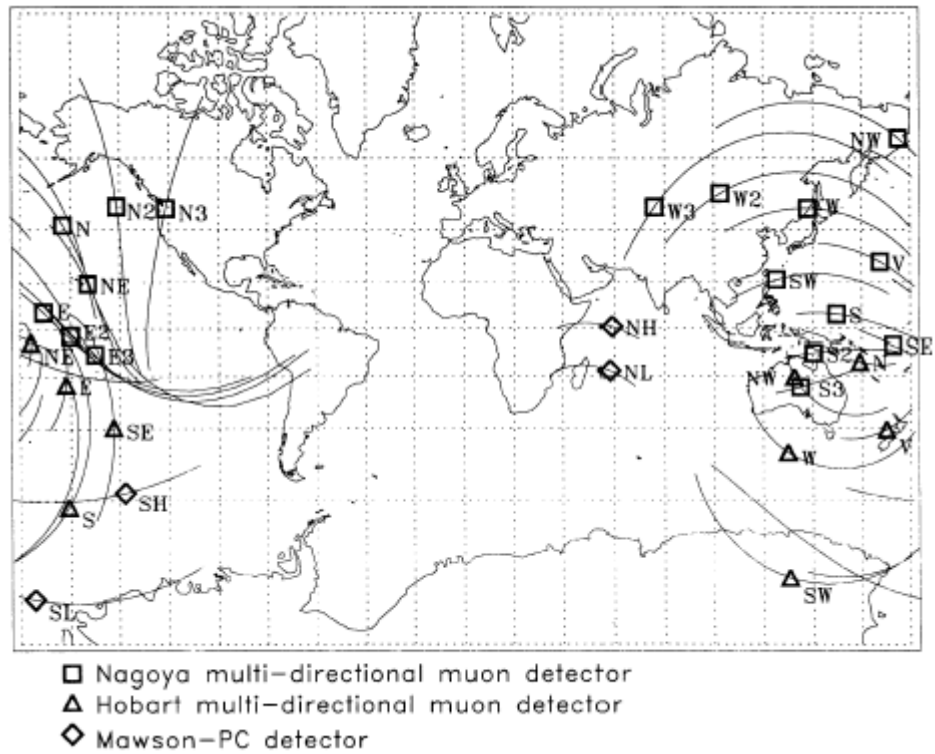


Figura 30 – Antiga falha existente na região do Atlântico e Europa. Fonte: Munakata et al, 2000.

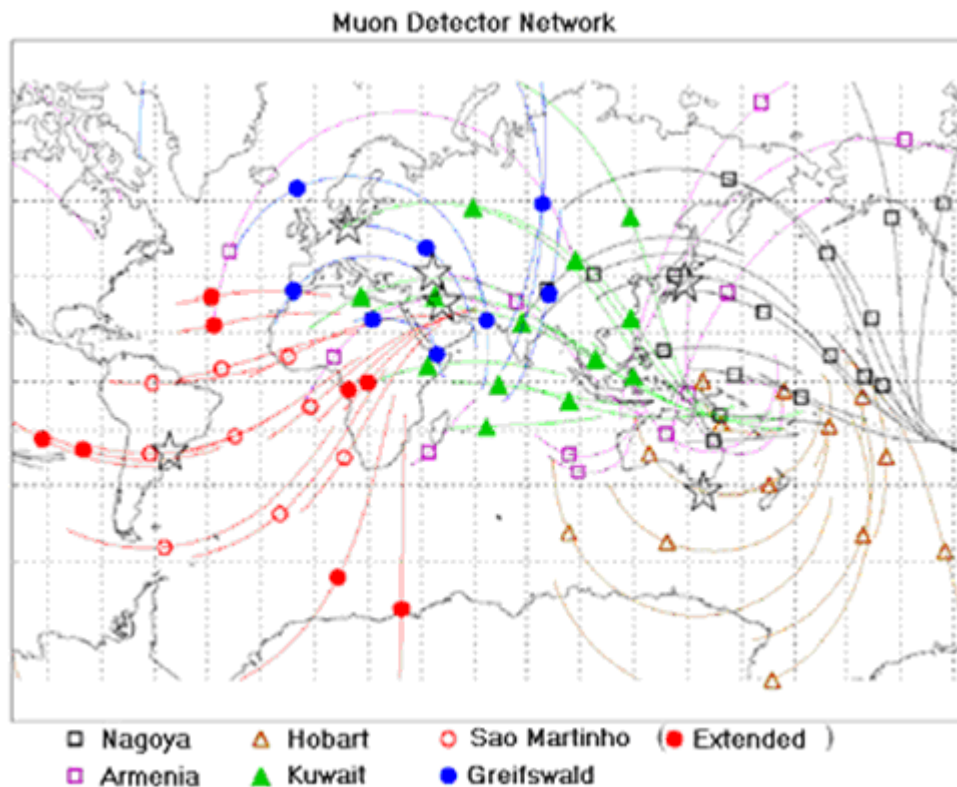


Figura 31 – Atual rede de detectores e as diferenças direcionais entre o detector protótipo e expandido. Bolinha aberta representa as direções do protótipo e bolinhas fechadas representam as direções do expandido.

4 ANÁLISE DE DADOS

Os dados estudados foram organizados em gráficos e tabelas de forma a permitir identificação de estruturas interplanetárias geofetivas na ocorrência de tempestade geomagnética em resposta com decréscimo na contagem de muons. Os gráficos e programas foram desenvolvidos com o programa MATLAB e IDL.

Foram usados dados do Detector Multidirecional de Muons Protótipo DMM-P e Expandido, cujos dados foram descritos no capítulo anterior. Foram analisados dados do satélite ACE localizado no ponto de Lagrange L1. Dados do Índice Dst foram retirado do site <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>. A variação de contagens de muons Δ é representada em forma de percentagem para cada detector: $\Delta M(\%) = \left[\frac{M - \bar{M}}{\bar{M}} \right] \times 100$ onde M é a contagem de muons e \bar{M} é a média de contagens para um período de tempo muito maior do que a duração da tempestade geomagnética. Vamos começar com as análises feitas com o detector protótipo, em seguida será apresentado as análises feitas para o detector expandido.

4.1 Análise de dados do DMM-P

Os evento analisados apresentados no Relatório foram escolhidos através da perturbação geomagnética, ou seja pelo índice Dst, e as tempestades geomagneticas foram classificadas segundo as intensidades de acordo com os critérios de Gonzalez et. al., 1994. Os dados de campo e plasma, de Dst e muons do DMM-P analisadas foram dos períodos: 30 de março a 02 abril de 2001, 11 a 13 de abril de 2001, 05 a 08 de novembro de 2001, 17 a 19 de agosto de 2003 .

Na tempestade ocorrida entre os dias de 30 de março a 2º de abril de 2001, o valor de Dst chegou a -387nT, uma Tempestade Geomagnética classificada como super intensa. Na Figura 32 é possível fazer uma análise gráfica da evolução temporal dos valores dos dados analisados. De cima para baixo na Figura 32, temos $N_p(\text{cm}^{-3})$, Temperatura (Kelvin), velocidade do vento solar (km/s), intensidade do campo magnético medido no meio interplanetário em nano tesla, componente Z do campo magnético em nT, variação percentual de contagem de muons na direção vertical e valores do índice Dst em nT. O período escolhido na análise de dados, 30 de março a 02 abril de 2001, foi motivado para primeiramente observar que antes da linha vermelha, mostrada na Figura 32, os dados de campo e plasma

não variam abruptamente com o tempo. O mesmo ocorre com os valores de índice Dst, sugerindo uma resposta do campo magnético terrestre com a variação solar mediada pelo vento solar. Pode-se notar que a estrutura é identificada pelo satélite ACE, pois ocorrem grandes saltos perturbados nos parâmetros de densidade, temperatura, velocidade do vento solar e intensidade do campo magnético. Minutos depois a estrutura chega a Terra causando uma tempestade geomagnética super intensa. Acompanhado com o decréscimo de Dst, a componente vertical do detector registra variação na intensidade de muons, porém não é possível identificar um decréscimo com certeza na Figura 32.

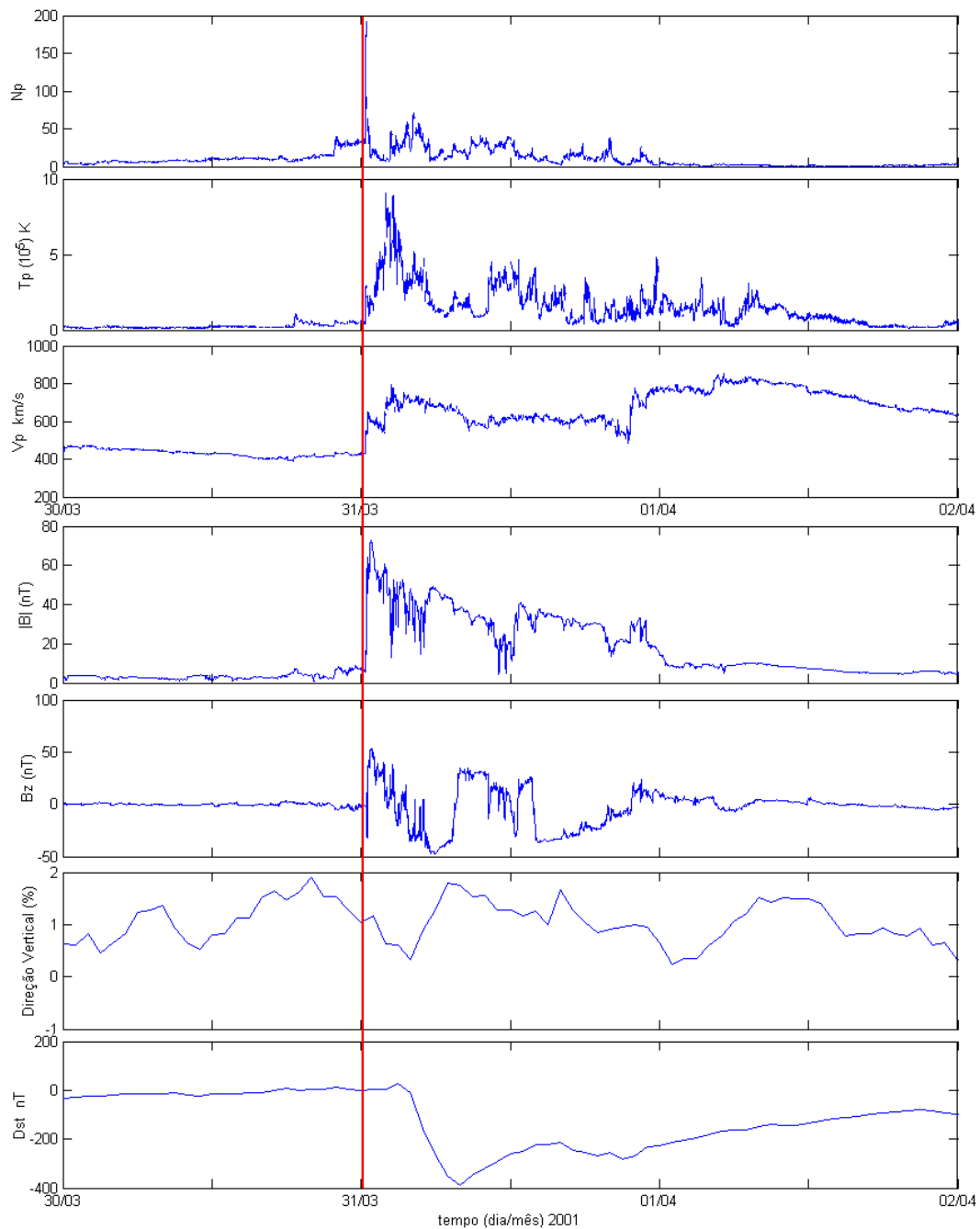


Figura 32 – De cima para baixo, densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético, contagem de muons na direção vertical e índice geomagnético Dst.

Os próximos dados analisados são do período 11 a 13 de abril de 2001. Note que o método da análise dos gráficos é o mesmo para todos os eventos, ou seja, os gráficos são dispostos um abaixo do outro e, visualmente (ou numericamente) é possível ver as alterações dos valores dos dados medidos. Na Figura 33 de cima para baixo são mostrados dados de densidade em cm^{-3} , temperatura em kelvin, velocidade do vento solar em km/s , modulo do campo magnético nT , componente z do campo magnético nT , que são dados obtidos pelo

satélite ACE e índice geomagnético Dst. As linhas vermelhas marcam o início de alterações abruptas dos dados de plasma e de campo. Antes da primeira linha vermelha na Figura 33 é possível perceber que os dados não são alterados abruptamente. Conclui-se a presença de uma ICME através da qual o satélite é atingido.

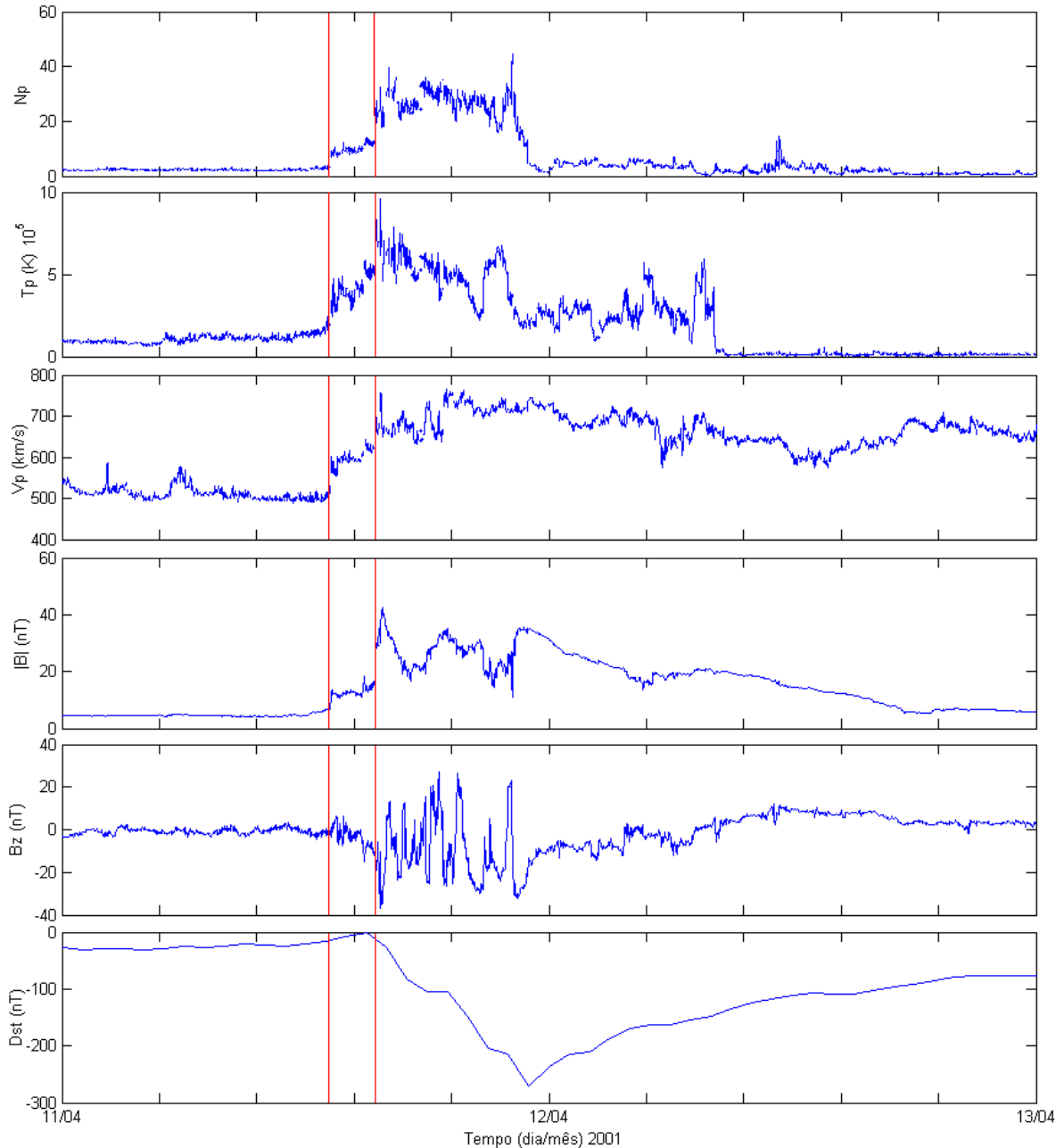


Figura 33 – De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, módulo do campo magnético, componente z do campo magnético e índice geomagnético Dst.

Instantes após a ICME atingir o satélite, alcança a Terra, causando uma Tempestade Geomagnética intensa, com máximo valor de Dst de -271 nT. Dados do DMM-P são apresentados na Figura 34. Na mesma Figura estão marcadas as linhas vermelhas indicando a

passagem da ICME pelo satélite ACE. De cima para baixo na Figura 34 são apresentadas as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul. É possível perceber um decréscimo da contagem de muons de aproximadamente 4%. Os gráficos são de variação percentual, pois é possível ver mais claramente os decréscimos e acréscimos na contagem de muons. Os decréscimos perceptíveis na Figura 34, depois das duas linhas vermelhas, são em todas as direções, caracterizando um decréscimo isotrópico, ou seja, em todas as direções, embora as outras direções do DMM-P não sejam mostradas.

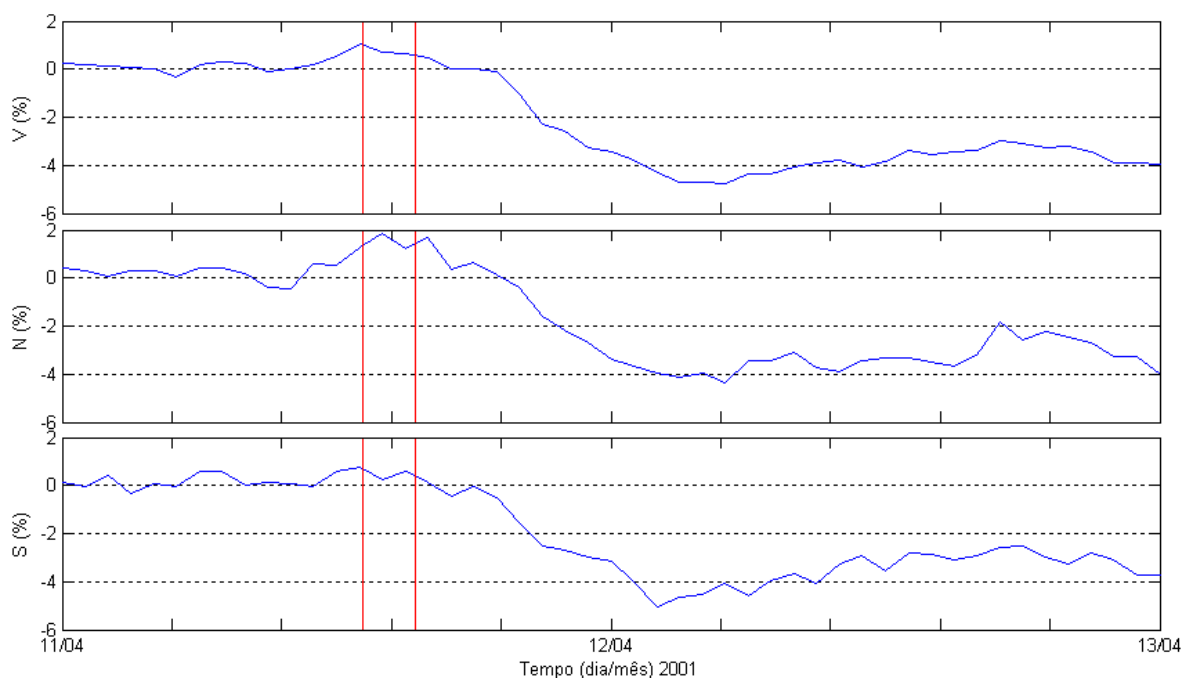


Figura 34 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.

O decréscimo isotrópico, chamado decréscimo de *Forbush*, acontece devido à rarefação de raios cósmicos no *downstream* do choque (ou atrás do choque) causado pela ICME (Munakata, 2000). Com uma Tabela de ocorrências de nuvens magnéticas já registradas pela NASA estimados por campos magnéticos modelos (Lepping et al., 1990) foi possível confirmar que a ICME, cujos dados são apresentadas na Figuras 33, é uma nuvem magnética, com início dia 12 de abril às 7,9 horas e final às 17,9 horas, com qualidade nível 2, ou seja, qualidade boa. Se a qualidade fosse 1, significaria qualidade excelente de ser uma nuvem magnética.

Os próximos dados analisados foram do período 05 a 08 de novembro de 2001. Os dados são apresentados na Figura 35. De cima para baixo são apresentados os dados de campo magnético interplanetário nas direções x e y, variação percentual na contagem de muons na direção vertical, módulo do campo magnético, direção z do campo magnético e índice Dst.

Dados de densidade, temperatura e velocidade do vento solar não foram utilizados porque os mesmos continham erros. A linha vermelha caracteriza a onda de choque da ICME.

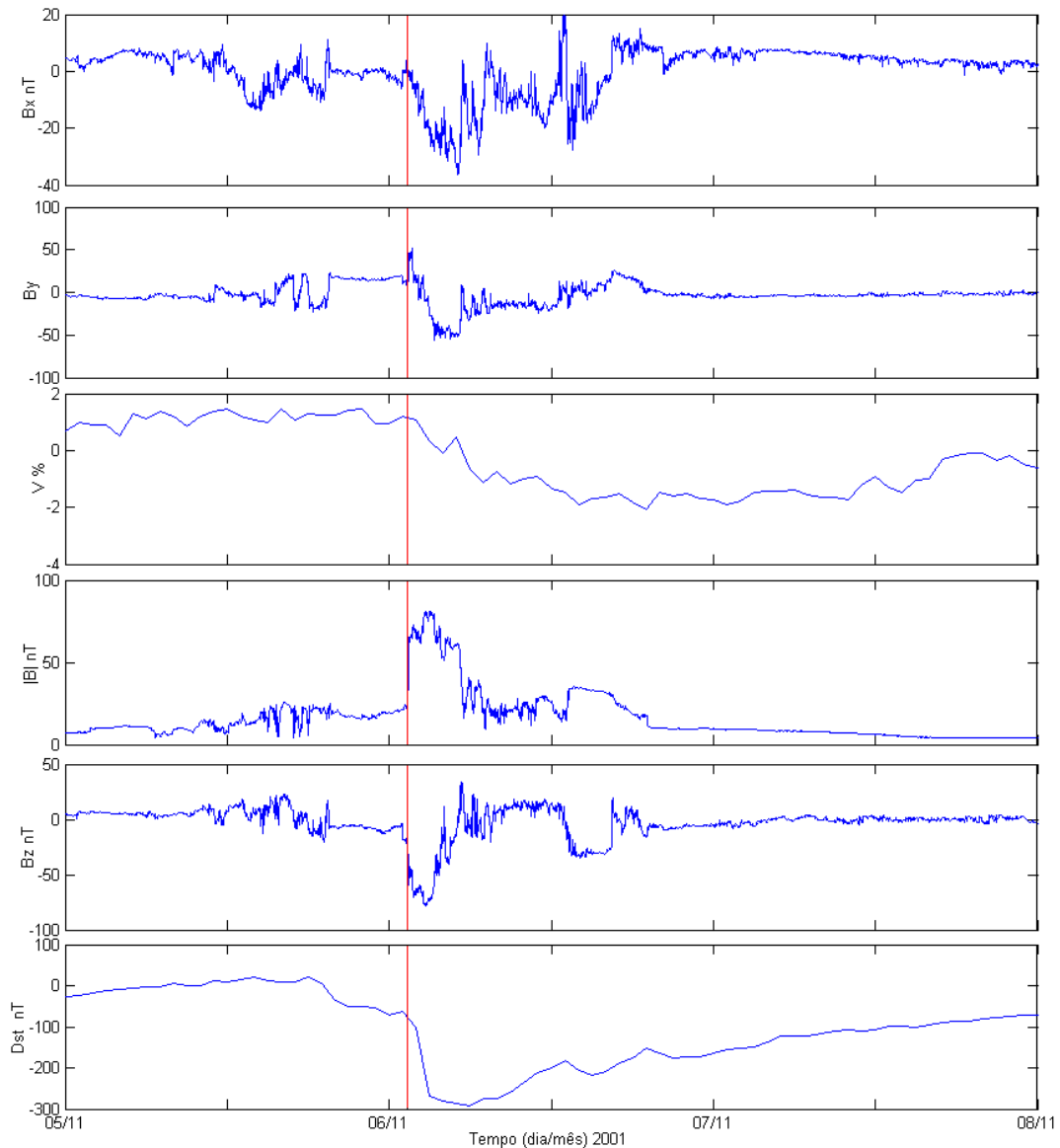


Figura 35 – De cima para baixo campo magnético interplanetário nas direções x e y, variação percentual na contagem de muons na direção vertical, módulo do campo magnético, direção z do campo magnético e índice Dst.

Através do gráfico da Figura 35 é possível notar que a ICME causou uma tempestade geomagnética onde o valor de Dst atinge o valor de -292 nT, classificada como intensa. Segundo a tabela de nuvens magnéticas no site:

http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html

a ICME não se trata de uma nuvem magnética. Junto com a queda do índice Dst, é possível perceber um decréscimo na contagem percentual na direção vertical de

muons.

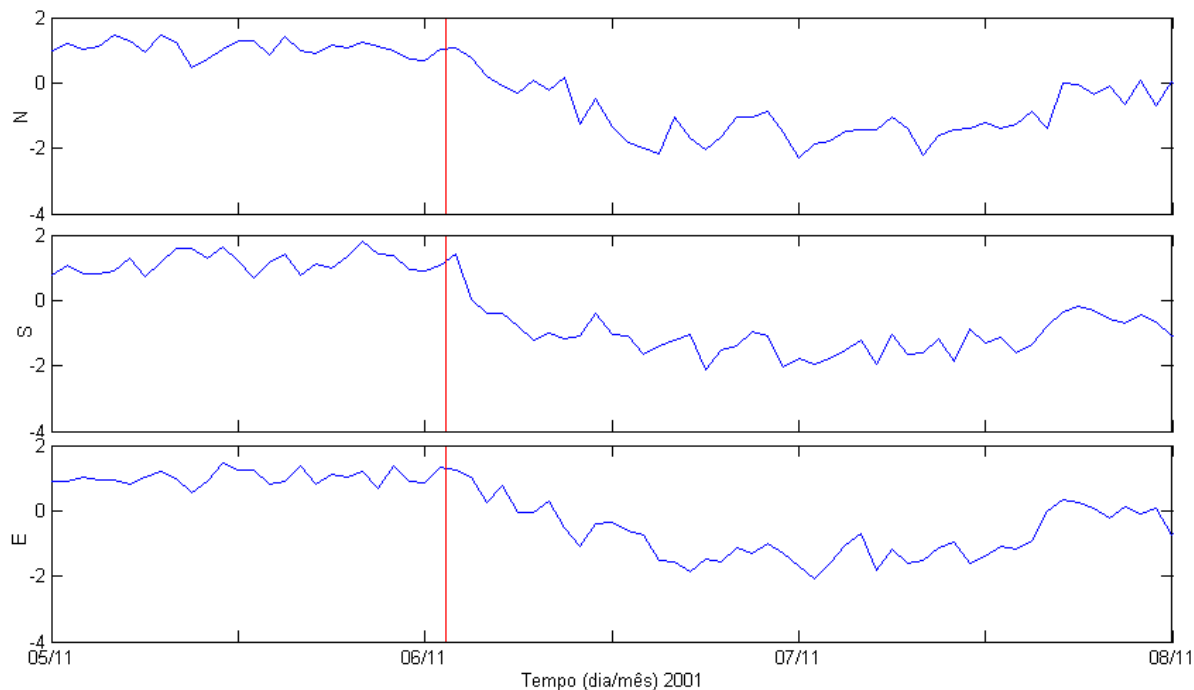


Figura 36 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.

As contagens de muons nas direções norte, sul e leste é apresentada na Figura 36. O decréscimo na contagem de muons não foi só na direção vertical, e sim em todas as direções, caracterizando o decréscimo de *Forbush*. É claro que o detector do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, detecta muons que vem de uma determinada região do céu. Para ter certeza que o decréscimo na contagem de muons é mesmo um decréscimo de Forbush, teria que verificar o decréscimo de muons em todos os detectores da Rede Mundial de Detectores de Muons (GMDN).

Como última análise de dados apresentada neste relatório para o DMM-P, os dados são do período 17 a 19 de agosto de 2001. Na Figura 37 de cima para baixo são mostrados dados de densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético e índice geomagnético Dst. A linha vermelha marca o início das alterações abruptas dos dados de plasma e de campo. É possível notar que a ICME causou uma tempestade geomagnética onde o valor de Dst atinge o valor de -148nT, classificada como intensa. Segundo a tabela de nuvens magnéticas da NASA a ICME é uma nuvem magnética com início dia 18 de agosto às 11,6 horas e final em 19 de agosto às 4,4 horas, com qualidade nível 2.

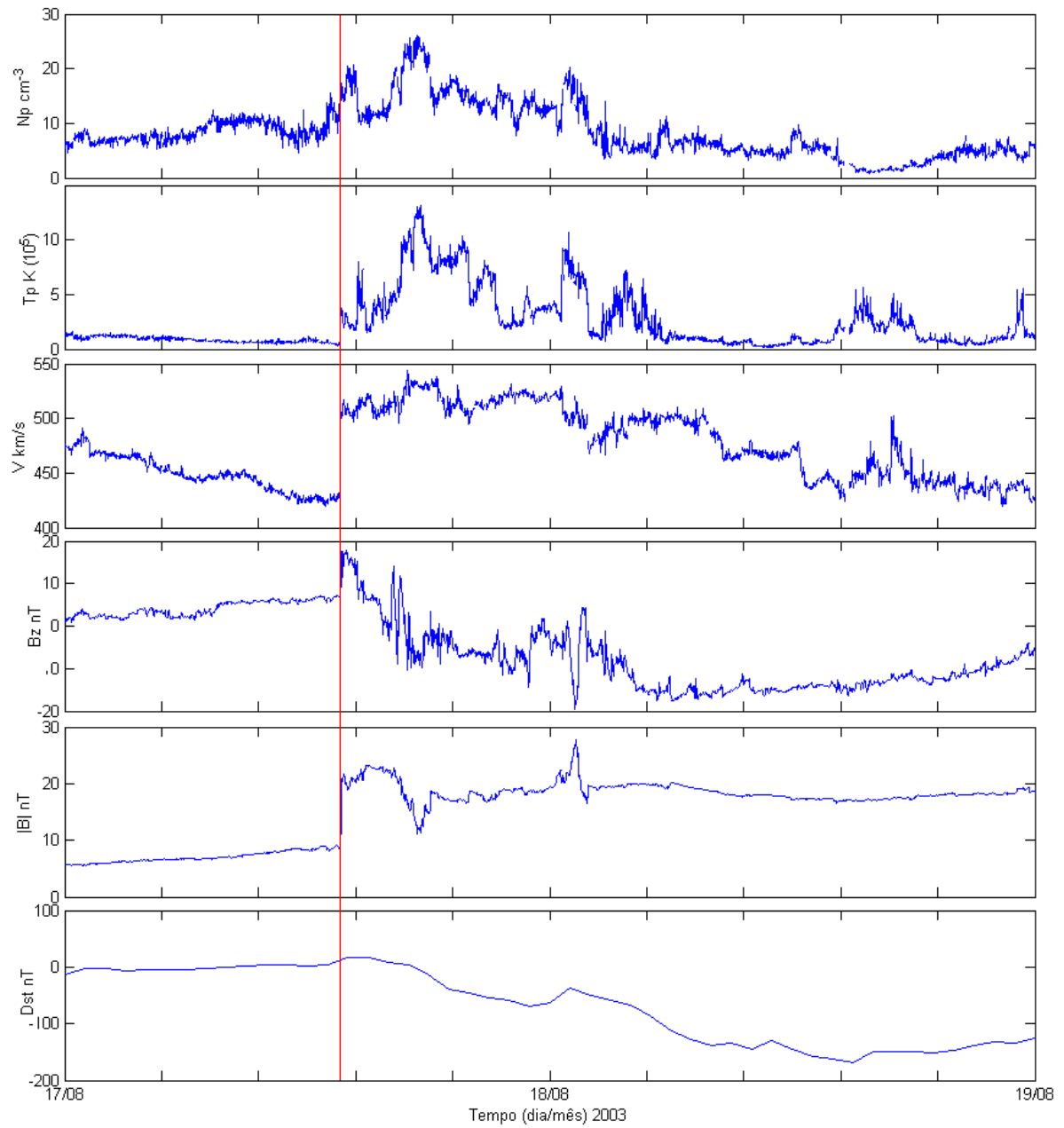


Figura 37 – De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético e índice geomagnético Dst.

As contagens da variação percentual de muons na direção vertical, Norte e Sul, são apresentadas na Figura 38. É possível notar que há decréscimo na contagem de muons de aproximadamente 1%.

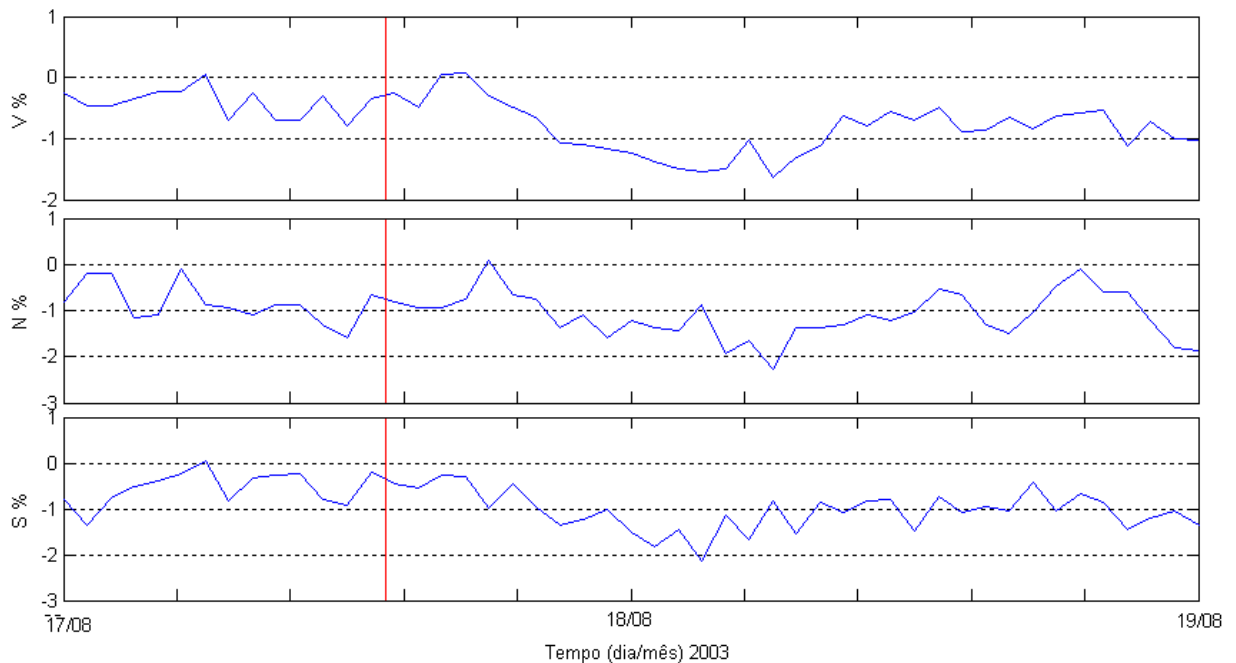


Figura 38 – De cima para baixo as contagens da variação percentual de muons na direção vertical, norte e sul.

Os decréscimos mostrados nas análises feitas para o DMM-P sugerem que se a resolução temporal de muons fosse de um tempo menor, seria possível melhorar a identificação de acréscimos e decréscimos de muons, diminuindo também os erros experimentais. A Tabela 15 mostra a direção dos detectores com o ângulo em relação a vertical, combinação dos detectores que formam a direção, contagem horária, erros na contagem e rigidez de corte geomagnética. Os erros experimentais devem ser bem menores que a variação percentual da contagem de muons. Os valores correspondentes na Tabela 15 são dos dados do dia 11 de abril de 2001.

Tabela 15 – Resultados de contagem, erro de contagem do DMM-P no dia 11 de abril de 2001.

Direção dos detectores	Combinação de detectores	Contagem Horária (fator 10^4)	Erro de contagem(%)	P_m (GV)
Vertical (V)	U1-L1 U2-L2 U3-L3 U4-L4	39.4	0.16	53
30° Norte (N)	U1-L3 U2-L4	11.3	0.30	58
30° Sul (S)	U4-L2 U3-L1	11.4	0.30	57
30° Leste (E)	U2-L1 U4-L3	11.0	0.30	59
30° Oeste (W)	U1-L2 U3-L4	11.5	0.30	56
39° Nordeste (NE)	U2-U3	4.7	0.46	64
39° Noroeste (NW)	U1-U4	5.4	0.43	61
39° Sudeste (SE)	U4-L1	5.3	0.43	63
39° Sudoeste (SW)	U3-L2	5.5	0.43	60

4.2 Análise de dados do DMM-E

Em termos de recursos, o DMM-E têm vantagens sobre o DMM-P no número de canais direcionais e resolução temporal de dados. Enquanto que o DMM-P apresentava 9 direções principais, o detector expandido apresenta 13 direções principais e 119 canais direcionais. Além de fornecer dados de resolução temporal de um minuto tem-se armazenado dados com resolução de 10 minutos. Outra vantagem é que a expansão preencheu a falha existente na Figura 31 (bolinhas fechadas).

Os dados de campo e plasma, de Dst e muons do DMM-E analisadas foram dos períodos: 14 a 16 de março de 2006 e 19 a 21 de novembro de 2007. Estes são os principais eventos com grandes perturbações geomagnéticas em que o DMM-E participou.

Na Figura 39 são comparados alguns parâmetros do meio interplanetário com dados de índice Dst e a variação percentual de contagem de muons na direção vertical. A tempestade

ocorreu entre os dias 14 e 16 de dezembro de 2006. De cima para baixo na Figura 39 são apresentados a evolução temporal dos dados de densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético, contagem de muons na direção vertical e índice geomagnético Dst. Os dados de plasma e de campo são alterados abruptamente devido à presença da ICME. Nota-se que após a onda de choque,

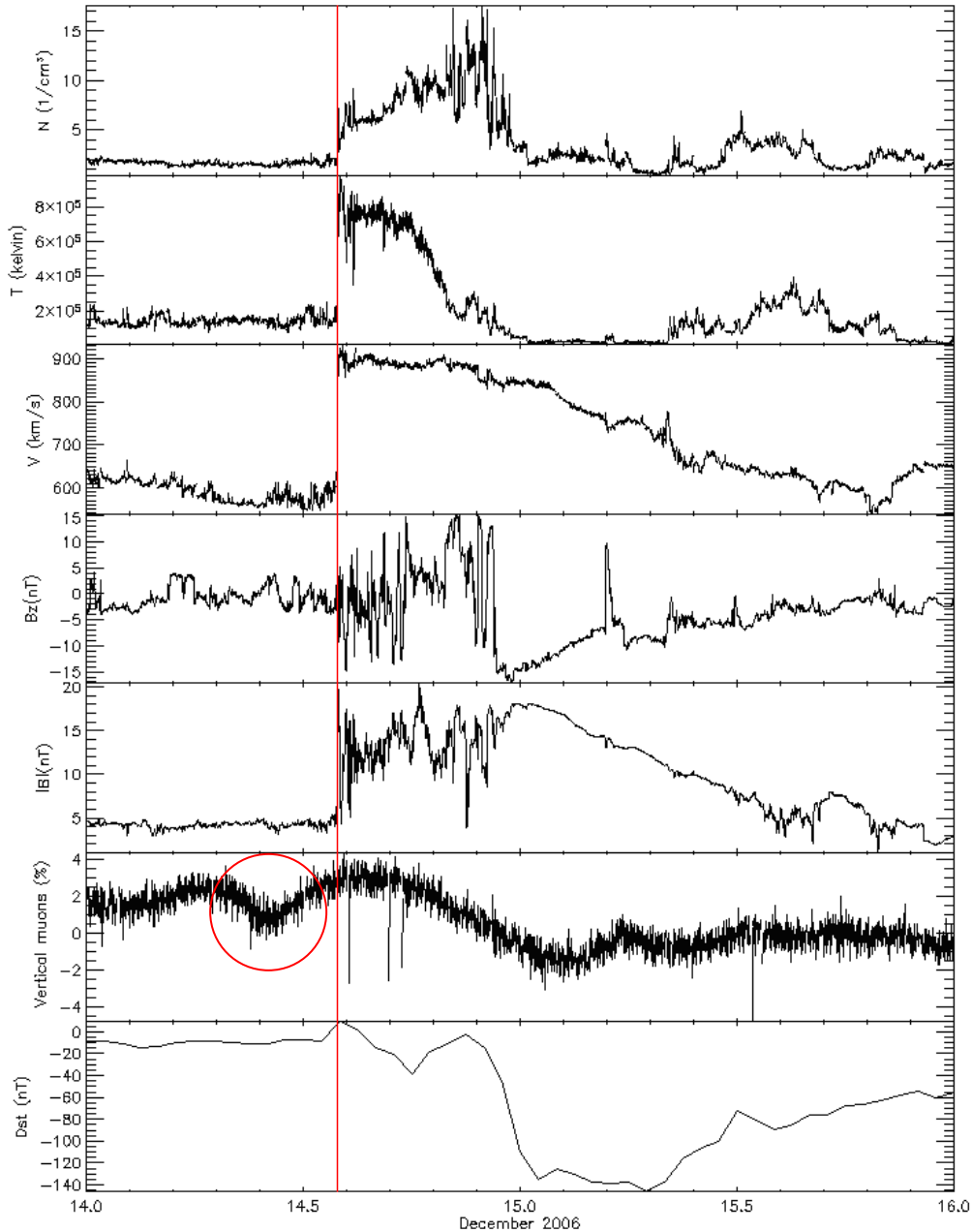


Figura 39 – Tempestade intensa ocorrida em dezembro de 2006. A variação anisotrópica na contagem de muons é indicada no círculo vermelho. De cima para baixo, densidade, temperatura, velocidade do vento solar, modulo do campo magnético, componente z do campo magnético, contagem de muons na direção vertical e índice geomagnético Dst.

representada pela linha vermelha, o DMM-E observou um decréscimo na contagem de muons, que é o decréscimo isotrópico de *Forbush*. A ICME causou uma tempestade

geomagnética intensa com valor de índice Dst de -146nT . Além do decréscimo isotrópico é possível observar um decréscimo anisotrópico da intensidade de muons. Antes do choque ser visto pelo satélite ACE da NASA é possível ver o precursor de tempestades geomagnéticas grifado pelo círculo vermelho. O evento de dezembro de 2006 é um importante resultado do DMM-E, pois o mesmo localizava-se alinhado às linhas de campo magnético interplanetário, possibilitando observar o decréscimo de muons na frente de choque (*upstream* da ICME). A tabela de nuvens magnéticas da NASA classifica o evento como uma nuvem magnética que teve início dia 14 de dezembro às 22,8 horas e término dia 15 de dezembro às 19,8 horas, com qualidade nível 3, ou seja, não muito boa.

Os outros dados analisados foram do período 19 a 21 de novembro de 2007. A Figura 40 mostra dados de densidade, temperatura, velocidade do vento solar, módulo do campo magnético, componente z do campo magnético, índice geomagnético Dst, contagem de muons na direção vertical, norte e sul. Os valores de plasma e de campo são alterados abruptamente na presença da ICME. O valor do índice Dst chega a -63nT , definindo uma tempestade moderada. Mesmo sendo uma tempestade moderada, há queda na intensidade de muons que fica na faixa de aproximadamente 1,5%.

A ICME é classificada como uma nuvem magnética que teve início 19 de novembro de 2007 às 23,4 horas e final em 20 de novembro de 2007 às 12,9 horas.

Na Figura 41 são apresentados gráficos de outras direções do DMM-E. De cima para baixo contagem de muons na direção leste (E), oeste (W), nordeste (NE), noroeste (NW), sudeste (SE), sudoeste (SW), norte 2 (N2), sul 2 (S2) e leste 2 (E2). É possível visualizar o decréscimo de muons em todas as componentes, caracterizando o decréscimo de *Forbush*. Os dados de muons analisados na Figura 40 e 41 são de contagem de 10 minutos, enquanto que na Figura 39 os dados são de um minuto. Percebem-se os detalhes na modulação de raios cósmicos que dados de um minuto podem fornecer.

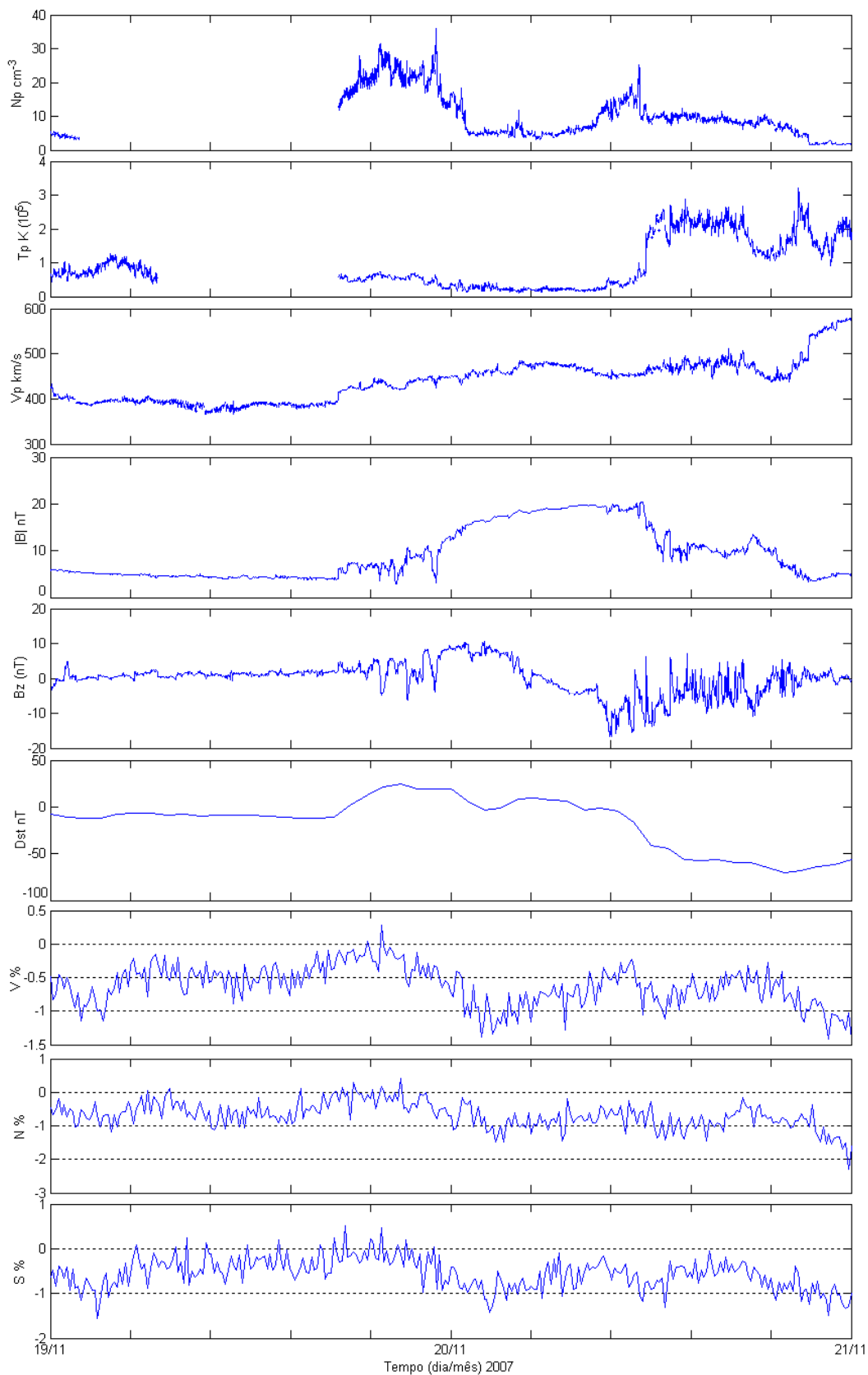


Figura 40 – Tempestade moderada ocorrida em novembro de 2007. De cima para baixo densidade, temperatura, velocidade do vento solar, módulo do campo magnético, componente z do campo magnético, índice geomagnético Dst, contagem de muons na direção vertical, norte e sul.

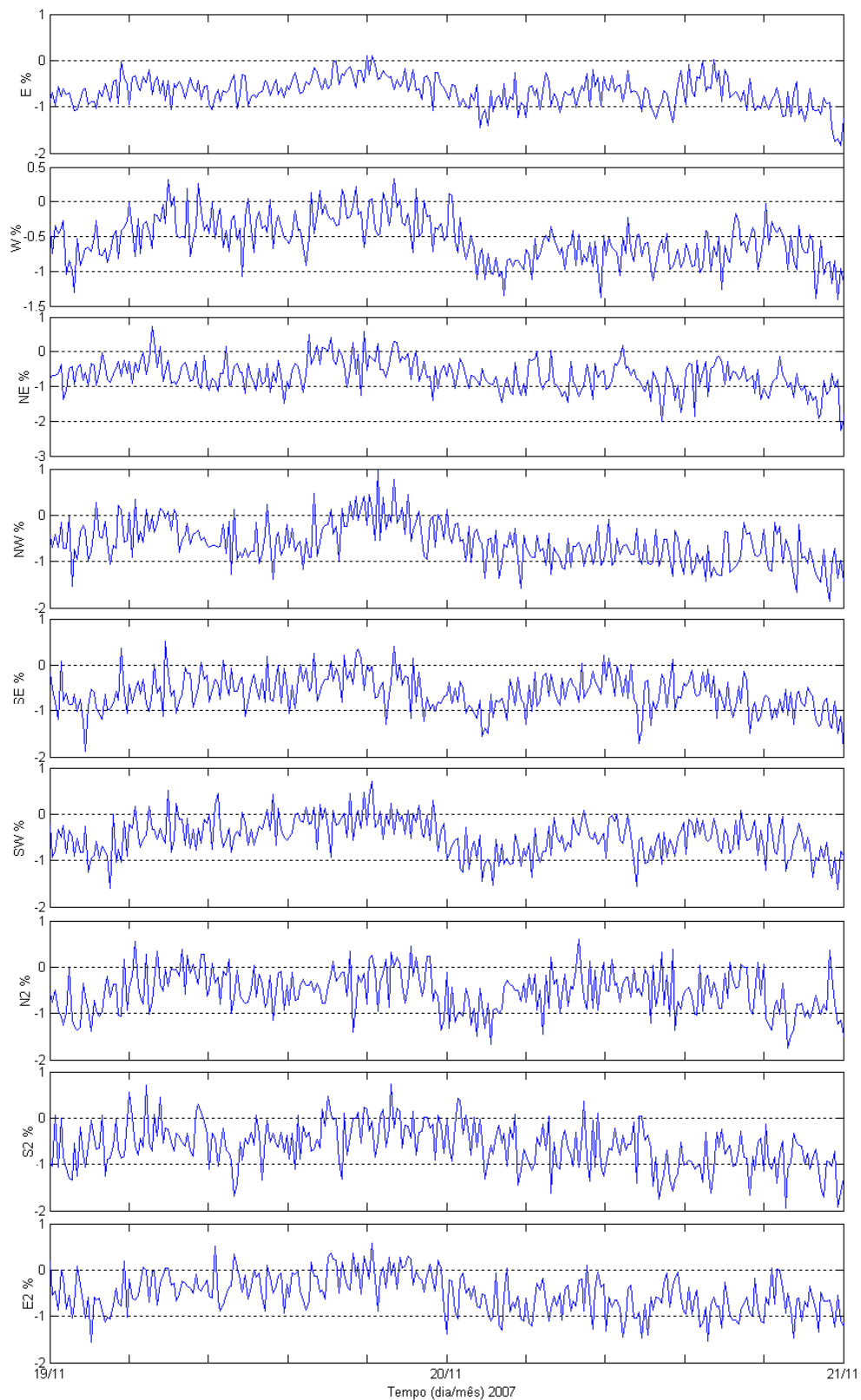


Figura 41 – De cima para baixo contagem de muons na direção leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste, sudoeste, norte 2, sul 2 e leste 2.

Após ter analisado os dados de DMM-E, é importante voltarmos para a análise dos erros experimentais atribuídos ao DMM-E comparando-os com os erros experimentais do DMM-P.

O período de análise de erros foi escolhido sendo o dia 08 de outubro de 2008 e 07 de janeiro de 2009. Estas datas foram escolhidas porque em dezembro de 2008 foi recebida a visita do Prof. K. Munakata juntamente com Marlos Rockenbach da Silva. Eles substituíram os potenciômetros que regulavam a tensão de contagem de muons do DMM-E, ao qual era uma fonte de erro na contagem de muons, pois o tempo de uso dos potenciômetros pode fazer os mesmos se tornarem instáveis quanto a regulagem de tensão.

Os erros das contagens para o período de um dia, 08 de outubro de 2008, antes da substituição, são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Erros na contagem de para o dia 08 de outubro de 2008.

Detector direcional	Número de pares de detectores	Contagem horária (fator 10^6)	Erro de contagem(%)
Vertical (V)	28	2.50	0.06
30° Norte (N)	21	1.01	0.10
30° Sul (S)	21	1.04	0.10
30° Leste (E)	24	1.16	0.10
30° Oeste (W)	24	1.18	0.09
39° Nordeste (NE)	18	0.5	0.14
39° Noroeste (NW)	18	0.51	0.14
39° Sudeste (SE)	18	0.52	0.14
39° Sudoeste (SW)	18	0.52	0.14
49° Norte 2 (N2)	14	0.33	0.17
49° Sul 2 (S2)	14	0.35	0.17
49° Leste 2 (E2)	20	0.45	0.15
49° Oeste (W2)	20	0.46	0.15

Apresenta-se abaixo, na Tabela 17, o erro para os dados de 07 de janeiro de 2009. Pode-se perceber que o erro na contagem não varia muito se comparado com o período de 2006, após a substituição dos potenciômetros.

Tabela 17 – Análise de erros para o dia 7 de janeiro de 2009.

Detector direcional	Número de pares de detectores	Contagem horária (fator 10 ⁶)	Erro de contagem(%)
Vertical (V)	28	2.70	0.06
30° Norte (N)	21	1.07	0.97
30° Sul (S)	21	1.11	0.95
30° Leste (E)	24	1.24	0.09
30° Oeste (W)	24	1.25	0.09
39° Nordeste (NE)	18	0.54	0.14
39° Noroeste (NW)	18	0.55	0.13
39° Sudeste (SE)	18	0.56	0.13
39° Sudoeste (SW)	18	0.56	0.13
49° Norte 2 (N2)	14	0.36	0.17
49° Sul 2 (S2)	14	0.38	0.16
49° Leste 2 (E2)	20	0.48	0.14
49° Oeste 2 (W2)	20	0.49	0.14

Assim, se compararmos os erros experimentais do DMM-P e DMM-E, houve redução de erros de 0,16 a 0,06 % para a direção vertical e uma média de 0,35 em outras direções.

5 CONCLUSÕES FINAIS

No Relatório o aluno demonstra as atividades desenvolvidas no Projeto **“AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.”**, que foi desenvolvido no período de Agosto de 2009 a Junho de 2010, no Laboratório de Clima Espacial do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCETM/CRS/CCR/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

No Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica, foi abordado no Capítulo 1 o que é Clima Espacial, quais são seus objetivos e que fenômenos ele trata. Resumidamente Clima Espacial trata dos fenômenos físicos relacionados com a interação Sol-Terra. Devido à variabilidade solar, vários fenômenos na Terra são induzidos. Devido à grande utilização de instrumentos tecnológicos, tais como satélites, é preciso manter os mesmos em funcionamento constante, porém, os artefatos em órbita são afetados pelo Clima Espacial. Os danos nos sistemas tecnológicos estão diretamente relacionados com a variabilidade solar de 11 anos. Viu-se que a maior perda de dados em satélites se dá na região do AMAS – Anomalia Magnética do Atlântico Sul, por causa da maior precipitação de partículas energética emitidas pelos processos mais energéticos solar, Ejeções de Massa Coronais e “*flares*”. No Capítulo 2 foi apresentada uma revisão da literatura científica estudada pelo aluno sobre o sol e modelos teóricos que auxiliam a construir o conhecimento sobre a interação Sol-Terra. Todo o meio interplanetário está sujeito a variabilidade solar de 11 anos. O ciclo solar exibe alta atividade solar no máximo solar, quando há maiores ocorrências de CMEs, aumentando as chances de causar tempestades magnéticas na Terra, ou seja, evento de grande perturbação do campo magnético terrestre. A perturbação magnética pode ser medida através do índice Dst, e quanto mais negativo os valores de Dst mais intensa é a tempestade. A injeção de partículas da ICME na magnetosfera da Terra ocasiona um enfraquecimento no campo magnético terrestre devido à intensificação da corrente de anel na alta atmosfera da Terra, que induz um campo magnético contrário ao da Terra. Acredita-se que o processo responsável pelas tempestades é o de reconexão de campos.

As estruturas que se propagam no meio interplanetário, as ICME, são acompanhadas por choques, isto é, a velocidade da ICME é maior que a velocidade magnetossônica. As

regiões do choque causam decréscimos na densidade de raios cósmicos atrás do choque (*Downstream*) e na frente de choque (*Upstream*).

No Capítulo 3 descreveu-se a metodologia usada para análise de dados prevista no projeto de pesquisa. Dados de plasma e de campo são obtidos pelo Satélite ACE da NASA, que está localizado orbitando a região de Lagrange L1. O Detector Multidirecional de Muons protótipo (DMM-P) foi instalado em 2001 no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m acima do nível do mar), em São Martinho da Serra, Brasil, RS. O DMM-P era formado por duas camadas de 4 detectores com resolução temporal de uma hora. O protótipo foi expandido em 2005 melhor integrando a rede mundial de detectores de muons GMDN (*Grounds Muon Detector Network*), porque, além de cobrir a falha existente mostrada na Figura 28 aumentou a área de detecção da região do céu como mostrou a Figura 29. O DMM-E é formado por 56 detectores e resolução temporal de um minuto e dez minutos. Os erros experimentais foram reduzidos, como visto nas Tabelas 16 e 17. A expansão do DMM-P permitiu a observação de raios cósmicos de maior energia, ou com maior rigidez de corte geomagnética, porque as novas direções de observação tem maiores inclinações com relação à vertical. O sistema do DMM-E aumentou o número de direções principais de observação de 09 para 13, com possível aumento de direções para 17, pois o sistema ainda não está completamente integrado. Futuramente o DMM-E será expandido para 72 detectores, 36 detectores na camada de cima e 36 na camada de baixo. O DMM-P e DMM-E detectam as partículas, muons, usando um sistema que correlaciona dois pulsos vindos de quaisquer combinações entre dois detectores. As partículas não são detectadas se a camada de chumbo entre quaisquer dois detectores blindar partículas de menor energia que aproximadamente 50 GeV ou se o ângulo de incidência da partícula for maior que 49°, para o protótipo, ou 75° para o expandido em relação à vertical.

As análises de dados do DMM-E e DMM-P, juntamente com dados de plasma e de campo e Dst foram apresentados no Capítulo 4. Os dados analisados para o DMM-P foram do período 30 de março a 02 abril de 2001, 11 a 13 de abril de 2001, 05 a 08 de novembro de 2001, 17 a 19 de agosto de 2003. Os dados de muons apresentaram resposta a tempestades geomagnéticas na forma de decréscimo na contagem de muons em todas as direções. O decréscimo isotrópico é chamado de decréscimo de *Forbush*, e deve-se ao fato de a ICME blindar a passagem dos raios cósmicos atrás do choque. Os dados de uma hora não podem fornecer muita precisão na visualização da modulação dos raios cósmicos.

Dados de muons do DMM-E foram analisados para os períodos 14 a 16 de março de 2006 e 19 a 21 de novembro de 2007. O evento ocorrido em dezembro de 2006 mostra um

precursor anisotrópico de tempestade antes do satélite ACE observar a onda de choque da ICME. Os dados do DMM-E mostra resposta a tempestades geomagnéticas quando comparado com o índice Dst e dados observados pelo satélite ACE do meio interplanetário. Os dados de muons usados para o evento de dezembro de 2006 foram de minuto, e se comparados com os dados horários do DMM-P, a modulação de muons é mais acentuada melhorando a análise gráfica dos eventos. O evento de dezembro de 2006 é um importante resultado do DMM-E, pois o mesmo localizava-se alinhado às linhas de campo magnético interplanetário, possibilitando observar o decréscimo de muons na frente de choque (*upstream* da ICME). A Tabela de nuvens magnéticas da NASA classifica o evento como uma nuvem magnética que teve início dia 14 de dezembro às 22,8 horas e término dia 15 de dezembro às 19,8 horas, com qualidade nível 3, ou seja, não muito boa. O evento ocorrido em novembro de 2007 foram utilizados dados de muons de dez minutos. A tempestade foi classificada como moderada, mas, apesar da intensidade da tempestade houve resposta na modulação de muons. O decréscimo de *Forbush* pode ser percebido neste evento. A ICME é classificada como uma nuvem magnética que teve início 19 de novembro de 2007 às 23,4 horas e final em 20 de novembro de 2007 às 12,9 horas.

Detectores de partículas de alta energia terrestres são ferramentas úteis para estudo de modulação de raios cósmicos e previsão de tempestades geomagnéticas intensas. Como mostra os dados analisados principalmente para o evento de dezembro de 2006. O índice Dst responde pouco antes ao decréscimo da contagem de muons.

Conclui-se que os dados do DMM-E devem ser continuamente acompanhados e analisados, visto que o Projeto de Pesquisa mantém o aluno vinculado a pesquisa propriamente dita, com a geração e manutenção do banco dado e do bom funcionamento próprio detector. O Projeto paralelamente oportunizou ao aluno tomar conhecimento do contínuo desenvolvimento da Ciência e o Meio científico.

6 REFERÊNCIAS

Aline de Lucas. **Estudo da Dinâmica da Corrente de Anel Durante a Fase Principal de Supertempestades Magnéticas**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, aprovada em 31 de maio de 2005.

Brant, J. **Introduction to the solar wind**. San Francisco (1970).

Burlaga, L.F **Interplanetary Magnetohydrodynamics**, New York: oxford University Press, 1995, 256p.

Carlos Roberto Braga, **Instruções para Coleta e Utilização de Dados do Telescópio Cintilador Detector de Muons (TCM) do OES**, Abril de 2007.

Da Silva, M. R., **Contreira, D. B., Monteiro, S., Trivedi, N. B., Munakata, K., Kuwabara, T., Schuch, N. J. Cosmic Ray muon observation at Southern Space Observatory - SSO (29°S, 53°W)**. *Astrophysics and Space Science* 290, 389-397 (2004).

Da Silva, M. R. **Variação da Intensidade dos Raios Cósmicos em Resposta a Diferentes Estruturas Magnéticas do Meio Interplanetário**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo (2005).

Dal Lago, A. **Estudo das estruturas geofetivas no meio interplanetário e de suas causas solares**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2004).

Dal Lago, A. **Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário**. São José dos Campos. 122p. (INPE – 7263 – TDI/705). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

Dryer, M. **Coronal transient phenomena**. *Space Sci. Rev.* v.33, p.233-275, 1982.

Dryer, M.; Wu, S. T. **Comments on “density distribution in looplike coronal transients: a comparison of observations and a theoretical model” by D. G. Sime, R. M. MacQueen, and A. J. Hanhausen**. *J. Geophys. Res.* v.90, n.A1, p.559-561, 1985.

E. Echer, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, A. Dal Lago, L. E. A. Vieira, **Introduction to Space Weather**. *Advances in Space Research*, Volume 35, Issue 5, p. 855-865.

Fox, N. J., M. Peredo, and B. J. Thompson, **Cradle to grave tracking of the January 6–11, 1997 Sun-Earth connection event**, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2461–2464, 1998.

Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; e Vasyliunas, V. M. **What is a magnetic storm?** *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.

Gosling, J. T.; Hildner, E.; Macqueen, R. M.; Munro, R. H.; Poland, A. I.; Ross, C. L. **Direct observations of a flare related coronal and solar-wind disturbance**. *Solar Phys.* v.40, n.2, p.439-448, 1975.

Gosling, J. T. **Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space**. In: Russel, C. T. Priest, E. N. , Lee, L. C. ed. *Physics of magnetic flux ropes*, Washington, DC: AGU, 1990. v.58, p.343-364.

Howard, R. A., et al. **Observations of CME from SOHO/LASCO**. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. *Coronal mass ejections*. Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.17-26.

Illing, R. M.; Hundhausen, A. J. **Disruption of a coronal streamer by an eruptive prominence and coronal mass ejection**. *J. Geophys. Res.* v.91, n.A10, p.10951-10960, 1986.

Jokipii, J. R., and B. T. Thomas, **Effects of drift on the transport of cosmic rays, 5, Modulation by a wavy interplanetary current sheet**, *Astrophys. J.*, 243, 1115, 1981.

Kamide, Y.; Yokoyama, N.; Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Daglis, I. A.; Brekke, A.; Masuda, S. **Two-step development of geomagnetic storms**. *J. Geophys. Res.*, v. 103, A4, 6917-6921 (1998).

Low, B. C. **Solar activity and the corona**. *Solar Phys.* v.167, p.217-265, 1996.

Munakata, K.; Bieber, J.; Yasue, S.; Kato, C.; Koyama, M.; Akahane, S.; Fujimoto, K.; Fujii, Z.; Humble, J.; Duldig, M. **Precursors of Geomagnetic Storms Observed by the Muon Detector Network**. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, A12, 27.457-27.468 (2000).

Munakata, K.; Bieber, J.; Hattori, T.; Inoue, K.; Yasue, S.; Kato, C.; Koyama, M.; Fujii, Z.; Fujimoto, K.; Duldig, M.; Humble, J.; Trivedi, N.; Gonzalez, W.; Da Silva, M.; Tsurutani, B.; Schuch, N. **A Prototype Muon Detector Network Covering a Full Range of Cosmic Ray Pitch Angles**. *Proceedings of ICRC 2001* (2001).

Neugebauer, M.; e Goldstein, R.. **Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar wind**. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. *Coronal mass ejections*, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.245-251.

Neugebauer M., P. C. Liewer, B. E. Goldstein, X Zhou, and J. T. Steinberg (2004), **Solar Wind stream interaction regions without sectors boundaries**, *J. Geophys. Res.*, 109, A10102, 2004.

Parker, E. N. **The stellar-wind regions**. *Astrophys. J.*, v.134, p.20-27, Feb. 1961.

Richardson, I. G. (2004), **Energetic Particles and Corotating Interaction Regions in the Solar Wind**, *Space. Sci. Rev.*, 111, 267-376.

Smith, E. J., B. T. Tsurutani, and R. L. Rosenberg, **Observations of the interplanetary sector structure up to heliographic latitudes of 16°: Pioneer 11**, *J. Geophys. Res.*, 83, 717, 1978.

Yoshitaka Okazaki. **Three dimensional anisotropy and density gradient of galactic Cosmic rays measured by global muon detector network**. Tohoku University. Department of Geophysics. March 2008.

Livros:

Introduction to space physics, Margaret G. Kivelson, Christopher, T. Russell. Cambridge, 1995.

Endereços eletrônicos:

http://lepmpi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>

ANEXOS

ANEXO 1 – RELATÓRIO PARCIAL

RELATÓRIO PARCIAL DE ATIVIDADES PIBIC/INPE – CNPq/MCT FEVEREIRO DE 2010

1. Título do Projeto

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTI-DIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.

2. Identificação do aluno e orientadores

Bolsista: Níkolás Kemmerich

Orientador: Dr. Alisson Dal Lago

Co-orientador: Dr. Nelson Jorge Schuch

Processo: 109968/2009-3

3. Resumo do plano inicial:

Clima Espacial é o nome dado à área de conhecimento que estuda os processos físicos envolvendo as interações Sol-Terra. Estruturas solar interplanetárias tais como Ejeções de Massa Coronais (CME), Ejeções de Massa Coronais Interplanetárias (ICMEs) e explosões solares podem causar tempestades geomagnéticas e outros distúrbios danificando vários instrumentos tecnológicos. Os danos causados incluem perda de dados em satélites, cintilação de sinal, interferência em radares, perturbação em cabos de telecomunicação, *black-out* de energia elétrica e riscos à saúde dos astronautas em órbita. Um dos objetivos do Clima Espacial é encontrar mecanismos que possibilitem previsões de tempestades geomagnéticas. A partir de estudos com variações na intensidade de raios cósmicos secundários, gerados pelas colisões inelásticas dos raios cósmicos primários com partículas da atmosfera, percebeu-se que raios cósmicos são dispersos na região englobada pelas ICMEs. Detectores terrestres de nêutrons e muons detectam uma diminuição na contagem de partículas secundárias, tornando-se úteis na previsão e estudo de tempestades geomagnéticas.

Os objetivos do projeto envolvem participar do desenvolvimento técnico e de engenharia, e análise preliminar dos dados oriundos da ampliação do Detector Multidirecional de Raios Cósmicos de Alta Energia – Muons, instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.), parceria INPE-UFSM, cooperação Brasil-Japão-USA em Clima Espacial. Avaliar a modulação dos raios cósmicos de alta energia devida à variabilidade do Clima Espacial (ou dos **processos físicos** que envolvem as interações Sol-Terra), utilizando dados tanto do protótipo do detector que operou de 2001 ao início do ano de 2005, quanto dados do novo detector que foi instalado em dezembro de 2005 e opera com a participação ativa do aluno. Pretende-se que o aluno realize análise de eventos de tempestades geomagnéticas utilizando dados de satélites do meio interplanetário, índices geomagnéticos, e dados (de superfície) de raios cósmicos do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT.

4. Metodologia

Utilizar rotinas em IDL ou Matlab para análise preliminar de dados do meio interplanetário obtido pelo satélite “Advanced Composition Explorer” – ACE, para identificar estruturas interplanetárias dos distúrbios geomagnéticos originados por Ejeções de Massa Coronais Interplanetárias. Juntamente utilizar dados do Detector Multidirecional de Raios

Cósmicos de Alta Energia – Muons para avaliar a resposta aos eventos interplanetários geomagnéticos em forma de decréscimos na contagem de muons para o detector expandido e comparar com dados do protótipo obtidos antes da expansão em 2005. Utilizar o índice geomagnético Dst fornecido pela Universidade de Kyoto pelo site”<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>”, para identificar a ocorrência de tempestades geomagnéticas. Fazer pesquisa e leitura de artigos científicos a respeito do transporte dos raios cósmicos no meio interplanetário para entender as causas da dinâmica dos raios cósmicos com relação à variabilidade solar.

5. Resultados obtidos até janeiro de 2009 (resumo do que foi realizado no período)

O aluno iniciou busca e leitura de artigos científicos e teses de mestrado e doutorado visando aperfeiçoamento do conhecimento sobre a dinâmica dos raios cósmicos no meio interplanetário. Dentre as teses em processo de leitura estão:

1. DETECCÃO DE DISTURBIOS SOLAR-INTERPLANETÁRIOS COMBINANDO OBSERVACÕES DE SATÉLITE E DE RAIOS CÓSMICOS DE SUPERFÍCIE PARA APLICACÃO EM CLIMA ESPACIAL - Marlos Rockenbach da Silva. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, orientada pelo Prof. Dr. Walter Demetrio Gonzalez e pelo Prof. Dr. Alisson Dal Lago, 2009.
2. THREE DIMENSIONAL ANISOTROPY AND DENSITY GRADIENT OF GALACTIC COSMIC RAYS MEASURED BY GLOBAL MUON DETECTOR NETWORK. Yoshitaka Okazaki. Department of Geophysics - Tohoku University, Março de 2008

E artigos:

1. COSMIC-RAY DIURNAL ANISOTROPY, 1936-1988: IMPLICATIONS FOR DRIFT AND MODULATION THEORIES. John W. Bieber and Jiasheng Chen. The Astrophysical Journal, 372:301-313, 1991 May 1.
2. AN OVERVIEW OF THE TRANSPORT OF GALACTIC AND ANOMALOUS COSMIC RAYS IN THE HELIOSPHERE: THEORY. L.A. Fisk. Adv. Space Res. Vol. 23, No 3, pp. 415-423, 1999.
3. EFFECTS OF PARTICLES DRIFT ON COSMIC-RAY TRANSPORT. I. GENERAL PROPERTIES, APPLICATION TO SOLAR MODULATION. J. R. Jokipih, E. H. Levy, W. B. Hubbard. The Astrophysical Journal, 213:861-868, 1977 May 1.

O aluno aprendeu na prática como lidar com problemas de funcionamento do Detector Direcional de Muons (DDM) revisando o princípio de funcionamento do mesmo, analisou os dados do protótipo com rotinas de programação em IDL produziu gráficos com dados de parâmetros interplanetário do satélite ACE, com dados do detector protótipo e do expandido.

Como exemplos das análises feitas, abaixo são apresentados gráficos do detector expandido e protótipo. Dados de densidade, temperatura, velocidade do Vento Solar, componente “z” e módulo do campo magnético interplanetário obtidos pelo satélite ACE, componente vertical da variação percentual da intensidade de muons do detector expandido e dados de Dst são apresentados na Figura 1. A tempestade geomagnética ocorrida entre os dias 14 e 16 de dezembro de 2006 apresenta decréscimo de raios cósmicos (decrécimo de

Forbush) de aproximadamente 2 %. Pode-se ver a resposta ao decréscimo de muons devido a tempestade comparando com queda do índice Dst que indica a ocorrência da tempestade. Outro fato observado na Figura 1, em especial no sexto gráfico, é o decréscimo de contagem percentual da direção vertical antes da linha vermelha que representa a onda de choque registrado pelo satélite ACE. O decréscimo é chamado decréscimo de cone de perdas, caracterizado por um déficit na intensidade de raios cósmicos que se movem na direção do choque interplanetário ao longo do campo magnético interplanetário com pequeno ângulo de pitch, e tem utilidade para previsão de estruturas transientes do vento solar que podem gerar tempestades geomagnéticas, mostrando a importância do detector de muons para estudo de clima espacial.

De cima para baixo na Figura 2 apresenta dados de densidade, temperatura, velocidade do Vento Solar componente “z” e módulo do campo magnético interplanetário obtidos pelo satélite ACE, da variação percentual da intensidade da direção vertical do detector protótipo de muons que foi desativado em 2005 por motivo de ampliação do seu sistema, e de índice Dst que está indicando resposta a tempestade geomagnética ocorrida entre os dias 11 e 13 de abril de 2001. O decréscimo na intensidade de muons no evento é de aproximadamente 1,5%, e o decréscimo antes da onda de choque, representado pelos saltos abruptos dos parâmetros obtidos pelo satélite ACE, não é muito perceptível.

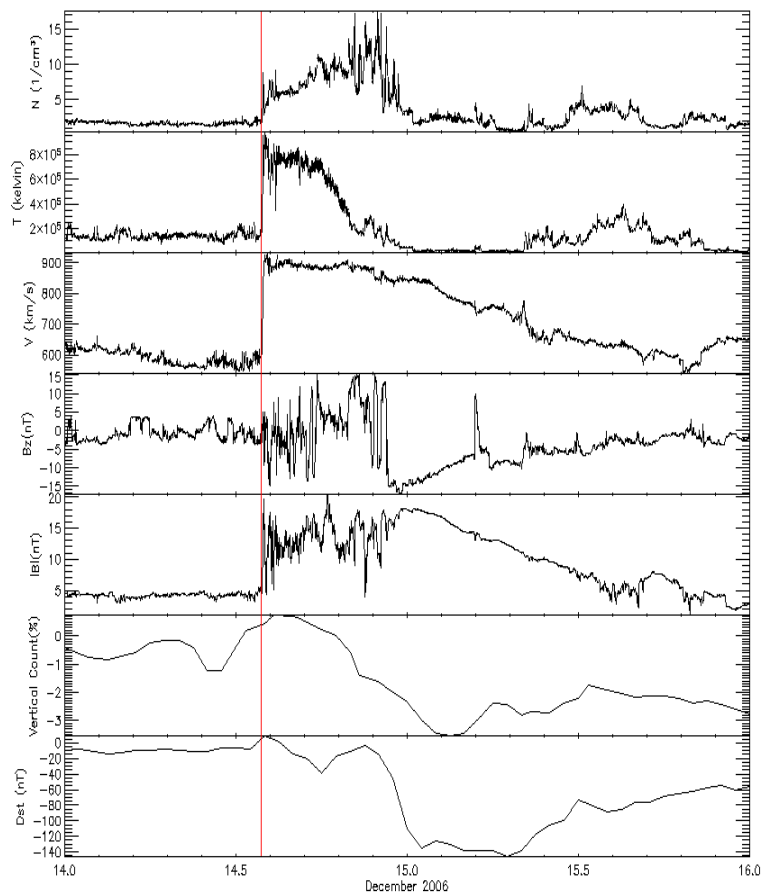


Figura 1 – Dados do Satélite ACE: densidade, temperatura, velocidade, componente z e módulo de campo magnético interplanetário. Dados do DDM expandido: variação percentual vertical. Dados de índice Dst fornecido pela Universidade de Kyoto.

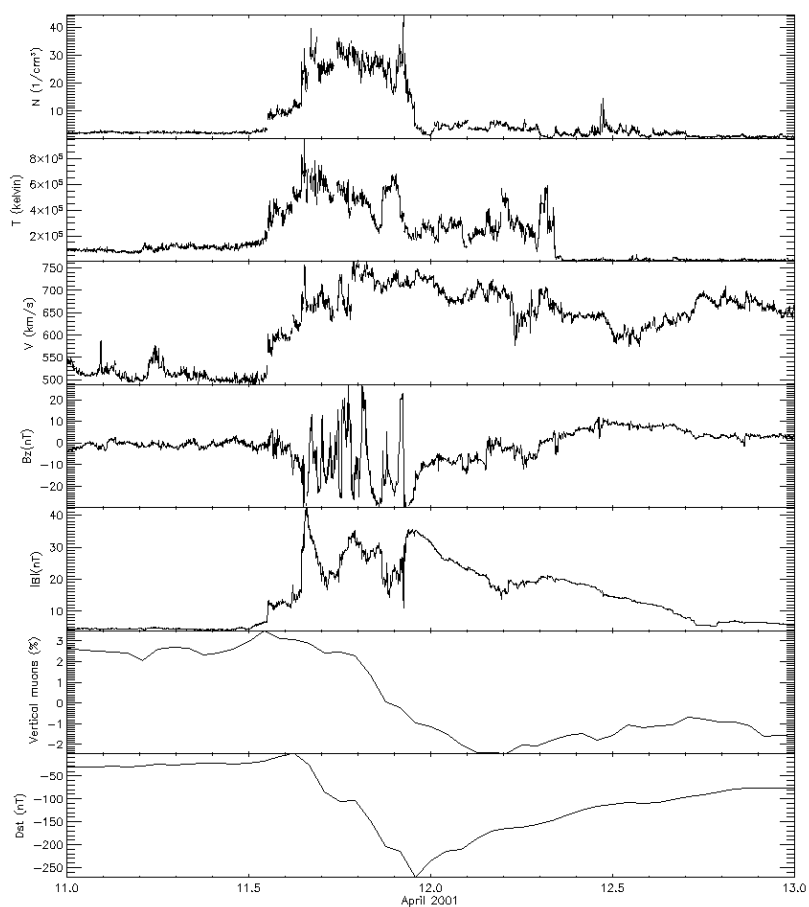


Figura 2 – Dados do Satélite ACE: densidade, temperatura, velocidade, componente z e modulo de campo magnético interplanetário. Dados do DDM protótipo: variação percentual vertical. Dados de índice Dst fornecido pela Universidade de Kyoto

Houve estreita interação com pesquisadores brasileiros e estrangeiros a partir dos contatos estabelecidos durante a participação do acadêmico em eventos científicos, viagem ou visitas de pesquisadores no CRS/INPE – MCT.

O aluno participou dos seguintes eventos e atividades científicas:

- **International Living with a Star (ILWS 2009)**, que foi realizado de 04 a 09 de outubro de 2009 em Ubatuba, SP.

- **24ª Jornada Acadêmica Integrada**, foi realizada no período de 09 a 13 de novembro de 2009. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

- Visita do aluno ao INPE São José dos Campos. O aluno teve oportunidade de conhecer as instalações do INPE, bem como, conhecer o ambiente de trabalho dos pesquisadores e estudantes de pós-graduação do instituto.

Até a presente data o aluno submeteu e apresentou em eventos científicos, como autor ou co-autor, quatro (04) trabalhos científicos:

1 – Níkolás Kemmerich; Alisson Dal Lago; Nelson Jorge Schuch; Marlos Rockenbach da Silva; Lucas Ramos Vieira; Carlos Roberto Braga; Marcos Vinicius Dias Silveira; Tardelli

Ronan Coelho Stekel. **Anisotropy Observed at the Brazilian Southern Space Observatory by the Multidirectional Muon Detector – MMD**. In: International Living With a Star.

2 - Nikolas Kemmerich; Alisson Dal Lago; Nelson Jorge Schuch; Lucas Ramos Vieira; Aline Seeger; Tardelli Ronan Coelho Stekel. **Ampliação do protótipo de telescópio de raios cósmicos de alta energia – muons: participação Do trabalho técnico e de engenharia, e análise preliminar de dados – SICINPE 2009**. In: Jornada Acadêmica Integrada.

3 - Vieira, L. R. ; Echer, E. ; Schuch, N. J. ; Dal Lago, A. ; Thuorst, J. F. ; Silveira, M. V. D. ; Kemmerich, N. ; Stekel, T. R. C. ; Munakata, K.. **Analysis of Cosmic Ray Decreases Caused by Interplanetary Shocks in 2001**. In: XXVII General Assembly - International Astronomical Union, Rio de Janeiro, Agosto de 2009.

4 - Vieira, L. R. ; Rigozo, N. R. ; Schuch, N. J. ; Dal Lago, A. ; Da Silva, M. R. ; Echer, E. Braga, C. R.; Kemmerich, N.; Santos, A. Seeger; Munakata, K. **Correlations Between Interplanetary Shock Parameters And Cosmic Ray Decreases In 2001**. In: International Living With a Star 2009, Ubatuba, SP, Outubro de 2009.

6. Resultados a serem obtidos até julho de 2009.

O aluno dará continuidade ao estudo e leitura de artigos científicos e teses de mestrado e doutorado visando aperfeiçoamento do conhecimento sobre a dinâmica dos raios cósmicos no meio interplanetário, análise de dados do DDM e do satélite ACE. Nos últimos três meses será elaborado relatório final de atividades no Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e serão preparados trabalhos científicos a serem submetidos em congressos ou periódicos nacionais e internacionais.

**ANEXO 2 – CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO DE
CONGRESSOS**



**INTERNATIONAL
LIVING WITH A STAR
2009**

CERTIFICATE

We certify that the paper **Anisotropy Observed at the Brazilian Southern Space Observatory by the Multidirectional Muon Detector – MMD** has been presented by **Nikolas Kemmerich** during the **ILWS - International Living With a Star 2009**, held at the Itamambuca Eco Resort, Ubatuba - São Paulo, Brazil, during October 4-9, 2009.

Ubatuba, October 9, 2009.

Walter Gonzalez / INPE
Conference Convener

INTERNATIONAL
LIVING WITH A STAR
2009



CERTIFICATE

We certify that **Nikolas Kemmerich** attended the **ILWS - International Living With a Star 2009**, held at the Itamambuca Eco Resort, Ubatuba - São Paulo, Brazil, during October 4-9, 2009.

Ubatuba, October 9, 2009.

Walter Gonzalez / INPE
Conference Convener

Certificado

Certificamos que

participou da 24ª Jornada Acadêmica Integrada, da Universidade Federal de Santa Maria, entre os dias 10 e 13 de novembro de 2009, como

