



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.18.49-TDI

**EFEITOS DE EVENTOS HILDCAA NA IONOSFERA  
EQUATORIAL SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA:  
COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS**

Régia Pereira da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial , orientada pelos Drs. José Humberto Andrade Sobral, e Daiki Koga, aprovada em 26 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DHNE3S>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.18.49-TDI

**EFEITOS DE EVENTOS HILDCAA NA IONOSFERA  
EQUATORIAL SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA:  
COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS**

Régia Pereira da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial , orientada pelos Drs. José Humberto Andrade Sobral, e Daiki Koga, aprovada em 26 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DHNE3S>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Si38e Silva, Régia Pereira da.  
Efeitos de eventos HILDCAA na ionosfera equatorial sobre a região brasileira: comparação de metodologias / Régia Pereira da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2013.  
xxii + 90 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.14.18.49-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. José Humberto Andrade Sobral, e Daiki Koga.

1. ionosfera equatorial. 2. HILDCAA. 3. CIRs. 4. penetração direta de campo elétrico. 5. digissonda I.Título.

CDU 550.388.2

---


Copyright © 2013 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2013 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

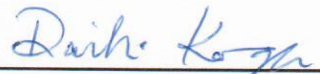


Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Geofísica Espacial**

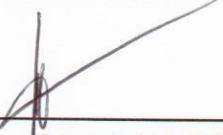
Dr. Alisson Dal Lago

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

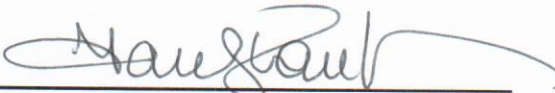
Dr. Daiki Koga

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

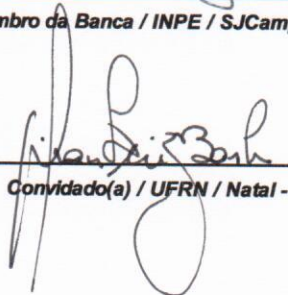
Dr. José Humberto Andrade Sobral

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Ivan Jelinek Kantor

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Gilvan Luiz Borba

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Régia Pereira da Silva**

São José dos Campos, 26 de Fevereiro de 2013



*“O sertanejo é, antes de tudo, um forte”.*

*Euclides da Cunha (Os Sertões)*



*Dedico a meus pais e a meu noivo, Manilo Soares. Minha verdadeira estrutura  
para seguir sempre adiante.*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a todas as intempéries que surgiram na minha vida ao longo dessa caminhada. Elas me tornaram uma pessoa mais forte e, com certeza, mais madura.

Agradeço aos meus orientadores, o Dr. José Humberto Andrade Sobral e o Dr. Daiki Koga, pela paciência e também pela ausência dela. Mas principalmente quero agradecer-los por terem acreditado em mim, e assim me incentivado a perseverar.

Agradeço aos meus amigos de turma, o Jonah, a Bárbara, o Ronald, a Carina, o André e o Jeferson, pelo companheirismo e cooperação mútua. Mas quero agradecer principalmente ao Ricardo Paes, ao Jonas Sousa, à Ângela Santos e ao Paulo Alexandre, pelo auxílio, ensinamentos e até mesmo as nossas conversas em momentos que tudo parecia sem sentido. Obrigada.

Agradeço a minha amada família. A minha mãe, sempre presente e disposta a me dar um bom conselho e a melhorar o meu ânimo, é a minha força em tempo de desalento. A meu pai, que acreditou em mim desde que me ouviu falar de ciência pela primeira vez (na quinta série!). A meus irmãos pelo exemplo, a meus sobrinhos pelo afeto. E a meu noivo pela compreensão, companheirismo e principalmente pelo amor que me reserva.

Sou grata à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela estrutura e suporte que tem me dado no desenvolvimento de meus estudos em Geofísica Espacial.





## RESUMO

Há muitos estudos sobre os efeitos das tempestades magnéticas na ionosfera equatorial, mas pouco se sabe sobre os efeitos de eventos HILDCAA (High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity) na região. É um fenômeno geomagnético durante o qual o índice AE apresenta atividade intensa e contínua e pode ocorrer tanto durante períodos geomagneticamente calmos quanto durante a fase de recuperação de uma tempestade magnética. Esta dissertação compara dois métodos de cálculo dos efeitos da penetração do campo elétrico interplanetário para a ionosfera equatorial durante o evento HILDCAA. Examina-se aqui como a ionosfera equatorial no setor brasileiro se comportou em termos da altura do pico da camada F2 (hmF2) durante a ocorrência de uma série de eventos HILDCAA. Para este propósito foram utilizadas duas metodologias, uma delas apresentada por Koga et al. (2011) e a outra por Kelley e Dao (2009). Foram usados dados de digissonda observados em São Luís, Maranhão, em períodos em que houve HILDCAA no ano de 2006 e também índices geomagnéticos e parâmetros do meio interplanetário têm sido utilizados na presente análise dos efeitos HILDCAA na equatorial ionosfera sobre São Luís. A primeira metodologia por Koga et al. (2011), que consiste de uma análise de correlação entre o componente  $E_y$  do campo elétrico interplanetário e variações de altura de pico região F, mostrou que, para todos os três eventos ocorreu penetração do campo elétrico do tipo overshielding e a segunda metodologia, por Kelley e Dao (2009), que consistiu em filtrar e processar os dados de uma forma diferente, concluímos que a penetração do campo elétrico está dependente do hora local, mas não foi possível encontrar um padrão de penetração tal como o overshielding ou undershielding .



# **EFFECTS OF HILDCAA EVENTS ON THE EQUATORIAL IONOSPHERE OVER THE BRAZILIAN REGION: A COMPARISON BETWEEN TWO METHODOLOGIES FOR DATA ANALYSIS**

## **ABSTRACT**

There are many studies about the effects of magnetic storms on the equatorial ionosphere, but little is known about the effects of the HILCAA (High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity) events in that region. It is a geomagnetic phenomenon, during which the AE index displays intense and continuous amplitude and may occur either during geomagnetic quiet time or during the recovery phase of a magnetic storm. This dissertation compares two methods of calculating the effects of penetration of interplanetary electric field to the equatorial ionosphere during the HILDCAA event. We have examined here how the equatorial ionosphere over the Brazilian region behaved in terms of the peak height of the F2 layer (hmF2) during the occurrence of a series of events HILDCAA. For this purpose, we have used two methodologies one of them presented by Koga et al. (2011) and another one by Kelley and Dao (2009). Digisonde data from the equatorial stations São Luís observed during the occurrence of the three distinct periods of HILDCAA events in the year of 2006 and also geomagnetic indices and parameters of the interplanetary medium, have been used in the present analysis of the HILDCAA effects on the equatorial ionosphere over São Luís. The first methodology by Koga et al. (2011), which consists of a correlation analysis between the  $E_y$  component of the interplanetary electromagnetic field and F-region peak height variations, showed that for all three events occurred penetration of electric field of the type of overshielding and the second methodology, by Kelley and Dao (2009), that consisted on filtering and processing the data in a different way we conclude that the penetration of electric field is dependent on the local time, but it was not possible to find a pattern of penetration such as the overshielding or undershielding.



## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2-1: Tanto a pressão quanto a densidade do ar diminuem com o aumento de altitude. ....   | 4           |
| Figura 2-2: Camadas da atmosfera baseadas na temperatura (linha vermelha), composição (linha verde) e propriedades elétricas (linha azul) .....   | 6           |
| Figura 2-3: Camadas da atmosfera em relação ao perfil de temperatura acima da superfície terrestre. A linha vermelha ilustra a variação de temperatura varia em cada camada. ....   | 7           |
| Figura 2-4: Fotoionização do átomo neutro. ....   | 9           |
| Figura 2-5: Exemplo de ionograma mostrando a camada F3 sobre Fortaleza .....  | 12          |
| Figura 2-6: Ilustração das camadas da atmosfera neutra em função (a) da temperatura e (b) da densidade eletrônica mostrando a localização da ionosfera em alturas da termosfera .....   | 12          |
| Figura 2-7: Modelo simples do campo magnético da Terra .....  | 13          |
| Figura 2-8: Divisões da magnetosfera .....  | 15          |
| Figura 2-9: Diferença na distribuição e intensidade de emissão de fótons durante tempestades, subtempestades e HILDCAAs. ....   | 18          |
| Figura 2-10: Região de interação corrotante (CIR). ....   | 19          |
| Figura 2-11: Esquema de tempestades magnéticas formadas por ICME e por CIRs.....  | 21          |
| Figura 2-12: Ilustração do plano equatorial mostrando um decréscimo na convecção magnetosférica e conseqüente campo elétrico dentro da plasmasfera .....  | 22          |
| Figura 2-13: Ilustração do mecanismo de geração do dínamo perturbado.....   | 23          |
| Figura 2-14: Distribuição do potencial elétrico de 90 km a 500 km às 0000UT .....   | 24          |
| Figura 3-1: Ionossonda CADI. ....   | 28          |
| Figura 3-2: Digissonda 256. ....  | 29          |
| Figura 3-3: Digissonda DPS. ....  | 29          |
| Figura 3-4: Exemplo de ionograma sobre São Luis. A curva preta representa o perfil de densidade da ionosfera.....   | 31          |
| Figura 4-1: Exemplos de ionogramas onde a camada F se encontra obstruída. ....  | 34          |
| Figura 4-2: Gráfico dos coeficientes de correlação para os períodos diurno e noturno (painel superior) e de correlação cruzada (painel inferior) entre a variação de altitude perturbada e a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ..... | 36          |
| Figura 4-3: Filtro passa alta em $\Delta hmF2$ .....  | 37          |
| Figura 4-4: Filtro passa alta em $E_y$ .....  | 37          |
| Figura 4-5: Comparação entre o campo elétrico observado pelo satélite ACE e o campo elétrico observado em Jicamarca. ....   | 38          |
| Figura 4-6: Filtro passa banda em $\Delta hmF2$ .....   | 39          |
| Figura 4-7: Filtro passa banda em $E_y$ .....   | 39          |
| Figura 5-1: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de março. ....   | 44          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5-2: Evento HILDCAA. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno.....   | 45 |
| Figura 5-3: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de março. ....   | 46 |
| Figura 5-4: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . ....            | 47 |
| Figura 5-5: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período diurno. ....  | 48 |
| Figura 5-6: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período noturno. ....   | 48 |
| Figura 5-7: Dados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário e da altitude perturbada para o evento de março, incluindo os quatro dias anteriores e posteriores.....  | 50 |
| Figura 5-8: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.....  | 51 |
| Figura 5-9: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . ....           | 52 |
| Figura 5-10: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de março. ....  | 53 |
| Figura 5-11: Resultados para o evento HILDCAA de março. ....   | 54 |
| Figura 5-12: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de março. ....   | 55 |
| Figura 5-13: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de junho. ....   | 58 |
| Figura 5-14: Evento HILDCAA de junho. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno.....   | 59 |
| Figura 5-15: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de junho. ....  | 60 |
| Figura 5-16: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . ....           | 61 |
| Figura 5-17: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período diurno. ....   | 62 |
| Figura 5-18: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período noturno. ....  | 62 |
| Figura 5-19: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.....   | 63 |
| Figura 5-20: Dados não filtrados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário (painel superior) e da altitude perturbada (painel inferior) para o evento de junho. .... | 64 |
| Figura 5-21: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . ....          | 65 |
| Figura 5-22: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de junho. ....  | 66 |
| Figura 5-23: Resultados para o evento HILDCAA de junho. ....   | 67 |
| Figura 5-24: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de junho. ....   | 68 |
| Figura 5-25: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de dezembro.....   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5-26: Evento HILDCAA de dezembro. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno. ....  | 72 |
| Figura 5-27: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de dezembro.....   | 73 |
| Figura 5-28: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta para o evento de dezembro, incluindo os dias antecedentes e subsequentes ao evento. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . .... | 74 |
| Figura 5-29: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período diurno. ....  | 75 |
| Figura 5-30: Análise de correlação entre $\Delta hmF2$ e $E_y$ para o período noturno. ....   | 75 |
| Figura 5-31: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.....  | 76 |
| Figura 5-32: Dados não filtrados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário (painel superior) e da altitude perturbada (painel inferior) para o evento de dezembro.....  | 77 |
| Figura 5-33: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de $\Delta hmF2$ e o da direita os dados de $E_y$ . ....   | 77 |
| Figura 5-34: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de dezembro. ....  | 78 |
| Figura 5-35: Resultados para os quatro dias referentes ao evento HILDCAA de dezembro. ....  | 80 |
| Figura 5-36: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de dezembro. ....   | 81 |





## LISTA DE TABELAS

|  | <b><u>Pág.</u></b> |
|--|--------------------|
| Tabela 3-1: Parâmetros ionosféricos .....                | 32                 |
| Tabela 5-1: Dias de referência para o período calmo..... | 42                 |



## SUMÁRIO

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....</b>  | <b>3</b>    |
| 2.1 Atmosfera neutra.....  | 3           |
| 2.2 Ionosfera.....   | 6           |
| 2.2.1 Formação da ionosfera .....  | 8           |
| 2.2.2 Estrutura da ionosfera.....  | 9           |
| 2.3 Magnetosfera.....  | 13          |
| 2.3.1 Divisões da magnetosfera.....  | 14          |
| 2.4 HILDCAA.....   | 16          |
| 2.4.1 Mecanismo de formação dos eventos HILDCAAs .....                       | 18          |
| 2.5 As respostas da ionosfera equatorial durante tempestades magnéticas..... | 21          |
| 2.5.1 Penetração direta do campo elétrico.....                               | 21          |
| 2.5.2 Dínamo perturbado.....   | 22          |
| <b>3 INSTRUMENTAÇÃO .....</b>  | <b>25</b>   |
| 3.1 Ionossonda.....  | 25          |
| 3.1.1 Ionossonda digital CADI.....   | 27          |
| 3.2 Digissonda.....  | 28          |
| 3.2.1 Digissonda 256 (DGS 256) .....   | 28          |
| 3.2.2 Digissonda DPS .....   | 29          |
| 3.3 Ionograma .....  | 30          |
| <b>4 METODOLOGIA.....</b>  | <b>33</b>   |
| 4.1 Sobre os dados.....  | 33          |
| 4.2 Metodologia .....  | 35          |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                       | <b>41</b>   |
| 5.1 Evento de Março de 2006.....   | 41          |
| 5.1.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera .....         | 41          |
| 5.1.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011) .....              | 47          |
| 5.1.3 Resultados segundo a metodologia Kelley a Dao (2009).....              | 52          |
| 5.2 Evento de Junho de 2006 .....  | 56          |
| 5.2.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera .....         | 56          |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.2.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011) .....      | 61        |
| 5.2.3 Resultados segundo a metodologia Kelley a Dao (2009).....      | 64        |
| 5.3 Evento de Dezembro de 2006 .....                                 | 69        |
| 5.3.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera ..... | 69        |
| 5.3.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011) .....      | 74        |
| 5.3.3 Resultados segundo a metodologia Kelley a Dao (2009).....      | 77        |
| <b>6 CONCLUSÕES.....</b>   | <b>83</b> |
| 6.1 Evento HILDCAA de Março .....                                    | 84        |
| 6.2 Evento HILDCAA de Junho .....                                    | 85        |
| 6.3 Evento HILDCAA de Dezembro .....                                 | 85        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                              | <b>87</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos trabalhos nos dão conhecimento sobre as consequências de tempestades magnéticas na ionosfera equatorial (DE PAULA, 1987; FESEN et al. 1989; BATISTA et al., 1991; SOBRAL et al. 1997; SOBRAL et al. 2001; ABDU et al., 2006, entre outros), porém pouco se tem publicado sobre as implicações de eventos HILDCAAs (*High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity*) na região equatorial (SOBRAL et al. 2006; WEI et al. 2008; KELLEY E DAO 2009; KOGA et al. 2011). HILDCAA se trata de um fenômeno geomagnético onde o índice AE mostra uma intensa e contínua atividade, em conjunto com o índice Dst, o qual apresenta longa fase de recuperação devido à contínua injeção de energia na corrente de anel (TSURUTANI E GONZALEZ, 1987). É importante mencionar que os eventos HILDCAA acontecem fora da fase principal das tempestades magnéticas.

O objetivo geral do trabalho deste Mestrado foi investigar como a ionosfera na região brasileira se comporta durante eventos HILDCAAs selecionados no ano de 2006.

Foram usados dados de digissonda obtidos na estação equatorial no Brasil (São Luís) em períodos que houve HILDCAA no ano de 2006, além de quatro dias anteriores e quatro dias posteriores aos eventos a fim de comparação. Foram utilizadas duas metodologias diferentes para calcular coeficiente de correlação entre o campo elétrico interplanetário e variação da altura do pico de densidade eletrônica da camada F2 (hmF2): a primeira descrita em Koga et al. (2011) onde foi feita uma análise estatística da altura do pico da região F equatorial durante cinco dias de evento HILDCAA. A segunda metodologia está exposta em Kelley e Dao (2009) e investiga a dependência da hora local da penetração de campos elétricos em período de evento HILDCAA, através do uso de correlação entre o campo elétrico interplanetário e a deriva vertical obtida em Jicamarca, Peru. No nosso trabalho foi utilizada a variação de altura do pico camada F2 para a estação equatorial brasileira de São Luís, Maranhão, ao invés da deriva vertical de Jicamarca.

O objetivo específico foi comparar as correlações mencionadas em ambos os trabalhos, para todos os eventos HILDCAAs em estudo, tanto quanto para quatro dias anteriores e quatro dias posteriores, e confrontar os resultados para poder determinar se há diferença, semelhança ou alguma relação. E também verificar efeitos da componente norte-sul do campo magnético interplanetário (Bz).

No capítulo 2 desta dissertação é feita uma revisão bibliográfica de conceitos importantes abordados neste trabalho. Meios como atmosfera neutra, ionosfera e magnetosfera são brevemente discutidos a fim de se ter uma perspectiva para o evento HILDCAA, bem como as respostas da ionosfera equatorial durante tempestades magnéticas, visto que o comportamento da ionosfera diante de tais eventos é semelhante.

O capítulo 3 apresenta o instrumento utilizado para a obtenção dos dados ionosféricos deste trabalho. É feita uma breve exposição do princípio de funcionamento das ionossondas e digissondas, bem como dos seus resultados gráficos (ionogramas).

O capítulo 4 trata das metodologias aplicadas, bem como informações sobre os dados, índices geomagnéticos e parâmetros do meio interplanetário utilizados neste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos seguidos de discussões. Para cada evento são mostrados os resultados obtidos segundo a metodologia utilizada.

O capítulo 6 é dedicado à conclusão do trabalho, retomando e apontando os principais resultados. E para finalizar, são dispostas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho, como material de apoio, consulta e construção do aprendizado.

## 2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Neste capítulo faremos um desenvolvimento dos conceitos abordados neste trabalho, como atmosfera neutra, ionosfera, magnetosfera, HILDCAA e outros.

### 2.1 Atmosfera neutra

A atmosfera terrestre consiste em uma tênue camada gasosa em comparação com a dimensão da Terra. Ela envolve o planeta devido à ação da força de gravidade e que se estende por várias centenas de quilômetros de altitude. É um fluido e mau condutor. Características como pressão, temperatura, densidade e umidade variam tanto vertical quanto horizontalmente (OXFORD AVIATION ACADEMY, 2008).

A atmosfera da Terra pode ser classificada de acordo com alguns parâmetros, como composição química, temperatura e propriedades elétricas.

Em termos de composição química, podem distinguir-se duas camadas da atmosfera:

- Homosfera: camada atmosférica até 80 km da superfície do planeta, onde a concentração dos componentes majoritários é constante.
- Heterosfera: camada acima da homosfera. As concentrações de oxigênio e de azoto moleculares diminuem significativamente e predomina o oxigênio atômico, resultante da fotodissociação do  $O_2$ .

A concentração dos componentes químicos é maior próximo à superfície, tanto a pressão quanto a densidade diminuem com a altitude, como ilustrado na Figura 2.1. Na homosfera a composição química da atmosfera não depende do peso molecular; os gases são misturados pela turbulência. Na heterosfera os gases não são bem misturados porque a distância de colisão entre as partículas é muito grande.

A Figura 2.1 apresenta uma coluna com sessão de corte de uma polegada quadrada (no inglês *square inch*), tendo como base o nível do mar e topo 500 km de altitude, mostrando que próximo do nível do mar a pressão atmosférica é 14,7 libra por polegada quadrada, o mesmo que  $1,03 \text{ kg/cm}^2$  fazendo a devida conversão. 99% de toda a massa da atmosfera concentra-se até 50 km de altitude (HARGREAVES, 1992).

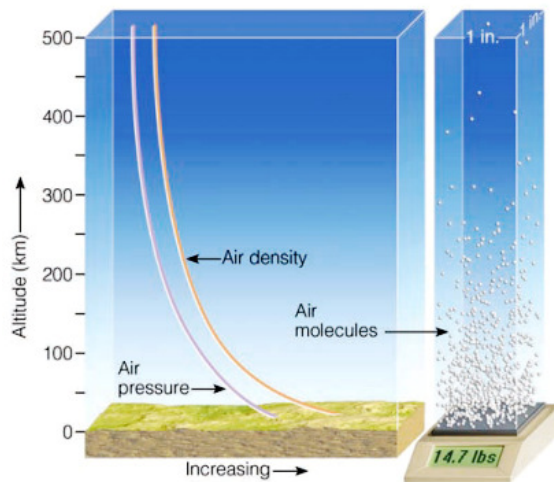


Figura 2.1: Tanto a pressão quanto a densidade do ar diminuem com o aumento de altitude.

Fonte: Ahrens (2009)

O perfil da atmosfera em termos de temperatura distingue-se em quatro camadas diferentes:

- Troposfera (0 – 12 km): Camada atmosférica imediatamente acima da superfície. Caracteriza-se pelo decréscimo da temperatura com a altitude, onde o gradiente térmico atinge valores médio de 6 a 7 °C/km. Podem ocorrer zonas onde a temperatura aumenta com a altitude, denominadas inversões térmicas. Dentre as camadas é a mais tênue, no entanto é a que concentra maior parte da massa da atmosfera e praticamente todo o vapor de água.
- Estratosfera (12 – 50 km): Camada atmosférica acima da Troposfera. Por uma faixa que vai de 10 a quase 20 km de altitude a temperatura permanece quase constante, esta camada isotérmica chama-se tropopausa. Após a Tropopausa a temperatura aumenta até o limite superior da estratosfera devido à existência de ozônio que absorve a radiação ultravioleta (UV) oriunda do Sol. A radiação UV é muito energética e como nessa camada a densidade é reduzida, uma parte da energia é absorvida por um número pequeno de moléculas que adquirem energia cinética elevada provocando o aumento da temperatura do ar nesta camada.

Um ponto interessante a respeito da troposfera e da estratosfera é que elas apresentam condições meteorológicas diferentes justamente devido ao perfil da temperatura. A troposfera inicia-se com diminuição de temperatura, e por este



motivo os movimentos de convecção resultam em nuvens, o que praticamente inexistente na Estratosfera (AHRENS, 2009).

Também é importante mencionar que a altura da Tropopausa varia de acordo com a temperatura próximo à superfície. Isso significa que ela atinge alturas diferentes para regiões como o Equador e Polos. A temperatura próxima à superfície varia devido à latitude, sazonalidade, região de terra ou mar. Por exemplo, no inverno a Tropopausa é mais baixa que no verão (OXFORD AVIATION ACADEMY, 2008).

- Mesosfera (50 – 80 km): A cerca de 50 km de altitude a temperatura deixa de aumentar. Este nível marca a Estratopausa e indica o limite inferior da Mesosfera onde a temperatura decresce com a altura. A cerca dos 80 km de altitude a temperatura atinge um valor mínimo de, aproximadamente  $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A Mesopausa marca o fim da Homosfera, as suas temperaturas são mais baixas do que qualquer outro nível da atmosfera superior. O fato de nessa camada a temperatura diminuir com a altura se deve a pequena quantidade de moléculas no ar para absorver a radiação solar. O dióxido de carbono presente na mesosfera também contribui para esta ser a camada mais fria. As moléculas de  $\text{CO}_2$  absorvem energia térmica de colisões com outras moléculas e depois a expõem em forma de fótons para regiões de mais alta latitude. Isso significa que as moléculas perdem mais energia do que absorvem o que causa déficit de energia e conseqüente resfriamento.
- Termosfera (80 - 500 km): Por volta dos 80 km de altitude a temperatura volta a ficar constante, região conhecida como Mesopausa (marca o fim da Homosfera e início da Heterosfera). Logo após a Mesopausa a termosfera é caracterizada por aumento de temperatura com a altitude. Como é relativamente pequena a quantidade de átomos e moléculas nesta região, a absorção de uma pequena quantidade de energia solar pode causar um grande aumento de temperatura. Além do mais, o efeito da radiação solar nesta camada depende fortemente do período de atividade solar (ver Figura 2.2). Além disso, é nesta camada onde as partículas carregadas do Sol interagem com as moléculas do ar produzindo as auroras<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> As auroras são um fenômeno luminoso, que acontecem tanto na Terra quanto em outros planetas, decorrente da colisão de partículas energéticas do vento solar com os átomos presentes na atmosfera do planeta.

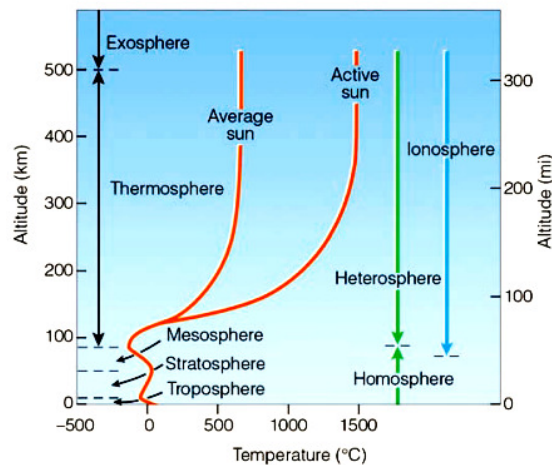


Figura 2.2: Camadas da atmosfera baseadas na temperatura (linha vermelha), composição (linha verde) e propriedades elétricas (linha azul).

Fonte: Ahrens (2009)

- Exosfera (acima de 500 km): Acima da Termosfera vem a Exosfera onde a densidade é ainda mais reduzida, as colisões entre as partículas neutras são cada vez mais raras, pois o livre caminho médio torna-se tão grande que as partículas podem escapar da atração gravitacional terrestre.

A Figura 2.3 mostra o perfil da atmosfera em termos de temperatura *versus* altitude (em quilômetros e em milhas).

Em termos de propriedades elétricas temos a ionosfera, a qual é uma região da alta atmosfera onde a existência de íons e elétrons livres lhe confere condutividade.

## 2.2 Ionosfera

A ionosfera é uma região da atmosfera onde partículas carregadas (íons e elétrons) são formadas por fotoionização decorrente da radiação solar. A primeira ideia a respeito da existência da ionosfera está ligada ao geomagnetismo. Pequenas variações diárias no campo magnético da Terra são conhecidas desde o século XVIII e C. F. Gauss especulou que a causa de tais variações poderia ser correntes elétricas na atmosfera (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Lorde Kelvin, Balfour Stewart e outros defendiam a hipótese de uma camada condutora que só pode ser estabelecida com a descoberta do

elétron por Thomson em 1900 na experiência com o tubo de raios catódicos e com a bem sucedida experiência de Marconi, onde sinais de rádio cruzaram o Atlântico em 1901. Desde então trabalhos e aprimoramento da teoria da existência de uma camada condutora vinham sendo publicados até 1932 quando Appleton e colaboradores desenvolveram a teoria magneto-iônica <sup>2</sup> que vem sendo utilizada até hoje (BATISTA, 2011).

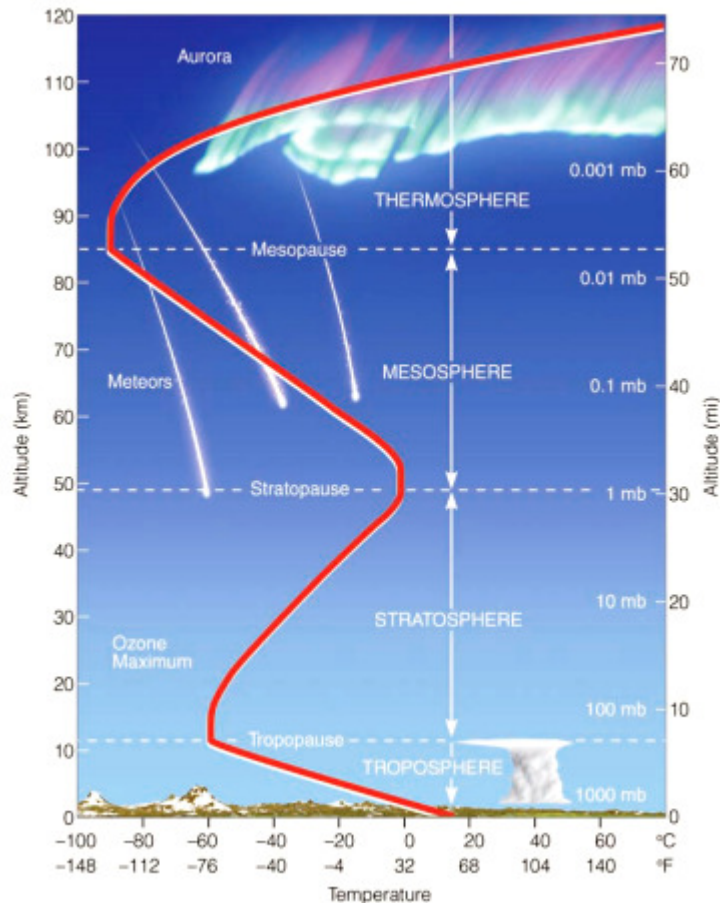


Figura 2.3: Camadas da atmosfera em relação ao perfil de temperatura acima da superfície terrestre. A linha vermelha ilustra a variação de temperatura em cada camada. Fonte: Ahrens (2009)

<sup>2</sup> A teoria magneto-iônica prevê que ondas eletromagnéticas se propagando em um meio ionizado, em presença de campo magnético e com colisões entre elétrons e partículas neutras, possuem somente dois modos possíveis de propagação conhecidos como ordinário e extraordinário. Estes aparecem nos ionogramas como os traços ordinário e extraordinário dando à Ionosfera a característica de ser um meio birrefringente. (Bertoni, 2004)

Apesar do nome ionosfera está relacionado à produção de íons, são os elétrons que refletem as ondas de rádio. Por serem mais leves, conseguem responder mais rapidamente às oscilações de campos eletromagnéticos de uma onda de rádio. Atualmente, além das ionossondas e digissondas, descrito no capítulo 3 que fala sobre a instrumentação, tem-se outros equipamentos para monitorar a ionosfera, a saber: polarímetros, carga útil de foguetes, receptores de GPS, satélites etc. Outras técnicas para medidas ionosféricas ver em Whitten e Poppoff, 1971.

### 2.2.1 Formação da ionosfera

A ionosfera está sujeita a variações do tipo de localização geográfica, temporais, bem como às variações ocasionadas pelas anomalias geomagnéticas a exemplo das anomalias equatorial e do Atlântico Sul.

A composição iônica é determinada pelas influências das radiações e partículas solares e cósmicas energéticas incidentes. A ionosfera é mantida através do equilíbrio entre a produção e a perda de íons e elétrons. A principal fonte de produção está associada à absorção da radiação solar na faixa de frequências do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X, ambas de alta energia e baixo comprimento de onda. A radiação ioniza os constituintes da atmosfera neutra criando um par elétron – íon. Este processo é conhecido como fotoionização e está ilustrado na Figura 2.4. Outra fonte de produção é a ionização corpuscular (ou secundária). Quando as partículas ionizadas possuem alta energia cinética, elas podem ionizar outras partículas neutras por colisão (KIRCHHOFF, 1991). A difusão dos íons produzidos ocorre de baixas para altas latitudes, podendo ocorrer por ação dos ventos neutros. Assim, os ventos neutros deslocam a camada ionizada para altitudes mais elevadas ajudando a permanência da ionosfera no período noturno.

O processo de perda geralmente ocorre através da recombinação entre elétrons e íons positivos resultando em um átomo ou molécula neutra. Ao contrário da fotoionização, a recombinação ocorre tanto durante o dia quanto durante a noite.

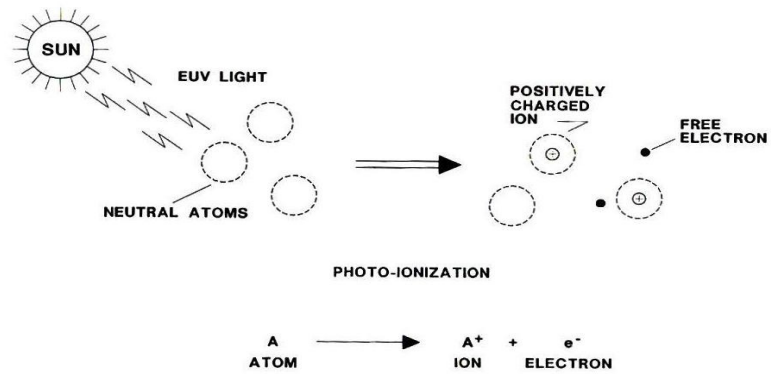
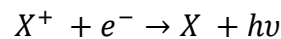


Figura 2.4: Fotoionização do átomo neutro.

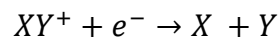
Fonte: McNamara (1994)

Um elétron livre pode desaparecer seguindo três diferentes tipos:

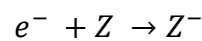
- a) Recombinação radioativa



- b) Recombinação dissociativa



- c) Attachment



### 2.2.2 Estrutura da ionosfera

Levando-se em conta a distribuição e densidade iônica, a ionosfera é dividida por camadas (ou regiões), suas separações são determinadas segundo a natureza físico-química e densidade iônica:

- Região D

A região D demonstra grande variabilidade e sua estrutura é tênue. Está presente apenas durante o dia e se distribui entre 50 e 90 km de altura. Após o por do Sol ela desaparece devido à rápida recombinação de íons.

As únicas radiações ionizantes que penetram nas camadas superiores e contribuem para a formação da camada D são os raios X, cujos comprimentos de onda menores chegam a 20 Å e a radiação ultravioleta Lyman- $\alpha$  em 1216 Å que ioniza o O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO em torno dos 85 km. Na parte inferior da camada D a ionização é produzida principalmente pelos raios cósmicos.

As densidades eletrônicas na parte superior da camada D são aparentemente encadeadas com as da camada E, pois existem variações sistemáticas latitudinais, temporais e de ciclo solar.

Esta camada tem a capacidade de refratar os sinais da baixa frequência e deixar passar os de alta, porém com fortes atenuações prejudicando a propagação de ondas de rádio (WHITE, 1970). Ela também demorou a ser detectada por causa da dificuldade de medidas. As primeiras ionossondas não eram capazes de verificá-la por causa da baixa densidade de elétrons e da necessidade de maiores comprimento de onda para checá-la.

- Região E

A região E se estende de 90 km até os 150 km da altitude. Apresenta dependência sistemática de densidade eletrônica com o ângulo do zênite solar, cujas variações são diurnas, sazonais e geográficas.

A região E é formada pelas radiações solares na faixa entre 800 e 1027 Å que é absorvida pelo oxigênio molecular para formar o íon O<sub>2</sub><sup>+</sup>. Os principais íons primários dessa região são: N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup> e O<sup>+</sup> (HARGREAVES, 1992). A região ainda é caracterizada pela presença de íons metálicos como Mg<sup>+</sup>, Fe<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e o Si<sup>+</sup> devido à desintegração de meteoros na atmosfera. Estes íons podem causar o surgimento de camadas E esporádicas. A camada E esporádica, ou Es, é caracterizada por um adensamento do plasma. São detectadas pelas ionossondas a uma altura de 100 a 120 km e demonstram um comportamento não regular, diferente da camada E normal. (RISHBETH; GARRIOTT, 1969). Uma característica importante é que elas apresentam propriedades diferentes dependendo da latitude e da altitude em que são observadas, sendo assim classificadas em tipos distintos de acordo com o mecanismo de formação.

A região E possui a máxima condutividade elétrica, portanto é nela que se desenvolvem as correntes ionosféricas. Já a região F engloba as partes superiores da Ionosfera

incluindo o pico de densidade. Appleton descobriu e definiu os nomes das regiões E e F para designar regiões da ionosfera com diferentes picos de densidade. A escolha da letra “E” foi para denotar o campo elétrico (*Electric Field*) dos sinais refletidos pela camada (MUELLA, 2004).

- Região F

Na região F, temos variações temporais de sua divisão em F1 e F2. Esta divisão ocorre durante o dia, sendo a F1 a mais baixa, e a F2 a mais alta. O mecanismo que gera a divisão surge devido o processo de troca íons - átomos, seguido pela recombinação dissociativa. Embora a produção máxima de íons seja sempre na camada F1, a máxima densidade elétron-iônico está na camada F2, onde as taxas de perdas iônicas são mais baixas. Ao meio-dia o grau de ionização é máximo e assim como as camadas D e E, a camada F1 só é observada durante o dia. Ela estende-se de 150 a 200 km de altitude e sua principal radiação ionizante é o ultravioleta. A camada F2 estende-se a partir de 200 km de altitude, tendo pico em torno de 350 km. Acima do pico a densidade da camada F2 diminui exponencialmente até perder sua identidade (PAPAGIANNIS, 1972; MCNAMARA, 1994).

A camada de ionização permanece presente o tempo todo, mesmo depois do por do Sol, porém, sem processo de ionização atuante. Já o processo de recombinação continua atuante mesmo depois do poente. Decorrente disso, o perfil de densidade eletrônica nesta camada varia com a altitude sofrendo mudanças, especialmente do dia para a noite (RISHBETH e GARRIOTT, 1969; MCNAMARA, 1994).

Trabalhos recentes de modelagem e dados de digissonda (ionogramas) vêm mostrando ocorrências de uma camada adicional em regiões equatoriais no período da manhã, designada por camada F3. Efeitos combinados da deriva  $E \times B$  no equador geomagnético e ventos neutros meridionais fornecem uma subida no plasma próximo ao pico da camada F2 (BATISTA et al., 2002; BARBOSA, 1999). O pico da camada F2 sobe para maiores altitudes formando a camada F3 e abaixo dela, na altura original da camada F2 forma-se a nova camada F2 através de processos fotoquímicos e dinâmicos da região equatorial. Quando a ionosfera ganha energia suficiente o pico de densidade eletrônica da camada F3 decresce. A Figura 2.5 mostra um exemplo de ionograma com a ocorrência da camada F3.

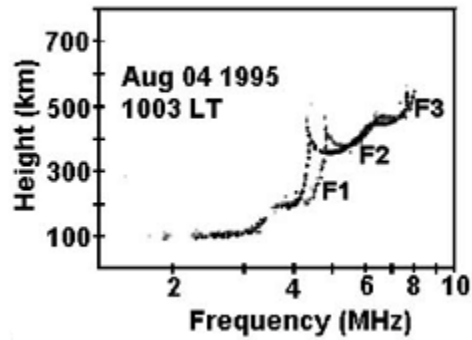


Figura 2.5: Exemplo de ionograma mostrando a camada F3 sobre Fortaleza.

Fonte: Batista et al. (2002)

Em todas as latitudes, as densidades eletrônicas na camada F2, assim como nas camadas E e F1, aumentam com o aumento do número das manchas solares. As densidades dos elétrons em alturas acima do máximo da camada F2 são controladas principalmente pelos processos de difusão.

A Figura 2.6 mostra a distribuição vertical da ionosfera junto da atmosfera neutra, em função, respectivamente, da densidade eletrônica e da temperatura para efeito de comparação:

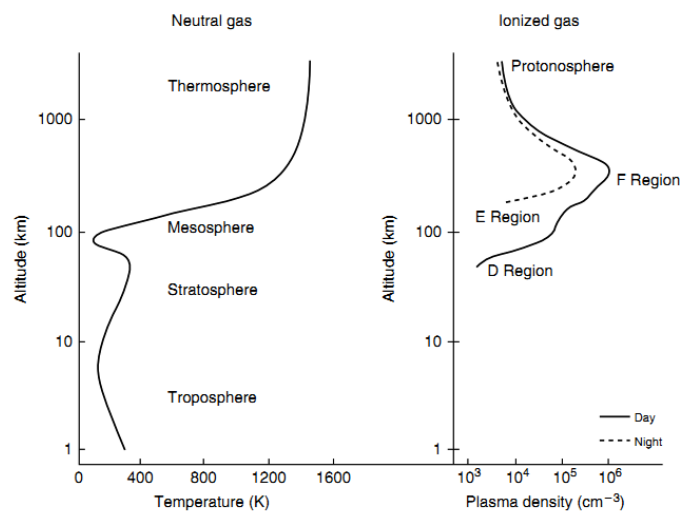


Figura 2.6: Ilustração das camadas da atmosfera neutra em função (a) da temperatura e (b) da densidade eletrônica mostrando a localização da ionosfera em alturas da termosfera.

Fonte: Kelley (2009)



### 2.3 Magnetosfera

A magnetosfera é uma região de entorno de um corpo celeste onde as condições são controladas pelo campo magnético do próprio astro. Elas são estruturas magnéticas que foram descobertas na era espacial por instrumentos a bordo de satélites capazes de fazer medidas em regiões distantes do planeta, antes não acessíveis (PARKS, 2003). A primeira magnetosfera descoberta foi a da Terra. Esta descoberta mostrou que o espaço não era vazio. Com exceção de Marte e Venus, que não possuem campo magnético próprio, todos os demais planetas do sistema solar possuem magnetosfera. Em relação ao campo magnético da Terra, sabe-se que o interesse pelas propriedades magnéticas começou com a observação da magnetita pelos gregos em 800 A.C. e por volta do século V os chineses já utilizavam a bússola. Mas foi com o *De Magnete*, publicado em 1600 por William Gilbert que foi reconhecido que a Terra se comportava como um ímã (WALT, 1994).

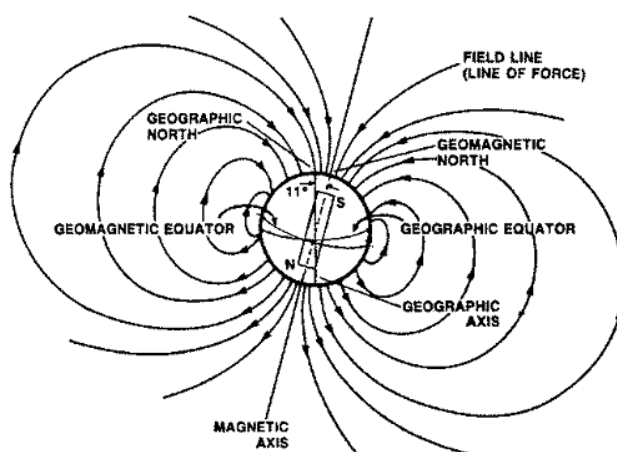


Figura 2.7: Modelo simples do campo magnético da Terra.

Fonte: McNamara (1994)

Para entendermos um pouco da estrutura da magnetosfera terrestre vamos descrever o ambiente em que ela se encontra. A atmosfera mais externa do Sol é chamada de corona, ela é dinâmica, possui alta temperatura ( $\sim 10^6$  K) e se expande pelo espaço. A

expansão da atmosfera solar pelo meio interplanetário é chamada de vento solar<sup>3</sup>, e todos os planetas imersos na atmosfera coronal do Sol interagem com ele o tempo todo.

O vento solar é formado devido à alta pressão na corona em relação à baixa pressão fora do Sol, no meio interestelar. Este gradiente de pressão vence a gravidade solar e acelera o vento solar de baixas velocidades na corona até atingir velocidades supersônicas em torno de 2 a 10 raios solar ( $R_S$ ) (SUESS e TSURUTANI, 2003). Ao atingir o campo magnético da Terra, este se deforma diferindo da forma de dipolo (visto na Figura 2.7) ficando achatado no lado diurno em direção ao Sol e alongado no lado noturno.

O limite exterior da magnetosfera é chamado de magnetopausa. A sua localização é determinada pelo balanço de pressão entre vento solar e o campo geomagnético. Em média, a magnetopausa cruza o plano equatorial em torno de aproximadamente 10 raios terrestres ( $R_E$ ) no lado iluminado do planeta, e em torno de 20  $R_E$  nos setores amanhecer e anoitecer. No lado noturno a magnetosfera tem uma cauda magnética que esse estende além de 100  $R_E$ .

O limite inferior da magnetosfera terrestre é mais difícil de definir. Parks (2003) considera esse que limite começa em torno de 100 km de altitude, pois a partir deste ponto os constituintes ionizados da atmosfera desempenham um papel importante na dinâmica da alta atmosfera. Sendo assim, a ionosfera faria parte da magnetosfera. Porém Kirchhoff (1991) considera que este limite começa em torno de 1000 km, acima das camadas ionosféricas convencionais. A dificuldade de se definir este limite é devido ao movimento de ionização ser dominado pelo campo geomagnético para todas as alturas acima de 150 km, ou um pouco antes (RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

### 2.3.1 Divisões da magnetosfera

Quando o vento solar se choca com a magnetosfera surge uma onda de choque (*Bow shock*) na região diurna. A região entre a onda de choque e a magnetopausa é chamada de bainha magnética ou *magnetosheath*. É uma região turbulenta permeada por ondas de grande amplitude e partículas aquecidas na onda de choque. Boa parte da energia do

---

<sup>3</sup> Apesar do nome “vento”, o vento solar difere dos ventos na atmosfera terrestre por apresentar um fluxo contínuo, visto que os ventos terrestres apenas acontecem quando existe gradiente de temperatura ou pressão em uma determinada região. (AHRENS, 2009).

vento solar é convertida em energia térmica e por essa razão a sua velocidade é bastante reduzida. Dentro da magnetosfera temos os cinturões de radiação de Van Allen (*Van Allen Belts*) que se dividem em um mais interno (da ionosfera até aproximadamente 4 – 5  $R_E$ ) que consiste basicamente de prótons altamente energéticos que se originam pelo decaimento de nêutrons, produzidos quando raios cósmicos vindos do espaço exterior colidem com átomos e moléculas da atmosfera terrestre. O outro mais externo (de 4 – 5  $R_E$  até a magnetopausa) contém partículas eletricamente carregadas, com origem na atmosférica ou trazidas pelo vento solar.

De modo geral não existe um limite físico entre os dois cinturões que se fundem em altitudes variáveis. Durante os períodos de intensa atividade solar, grande parte das partículas eletricamente carregadas vindas do Sol consegue romper a barreira formada pelos cinturões de radiação de Van Allen. Ao atingirem a alta atmosfera produzem os fenômenos das auroras polares e das tempestades magnéticas.

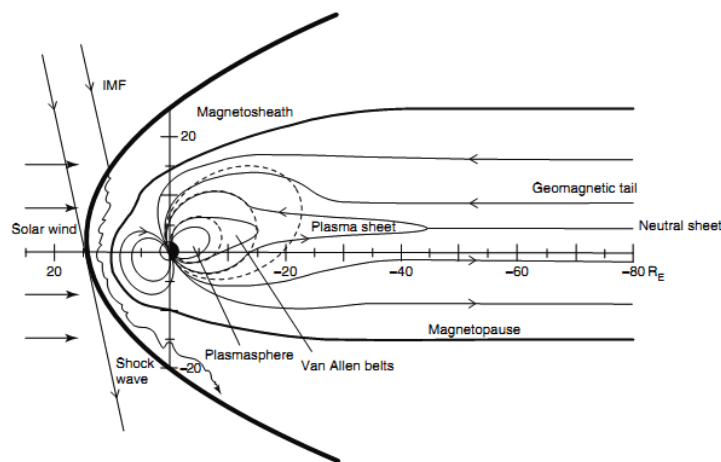


Figura 2.8: Divisões da magnetosfera.

Fonte: Parks (2003)

A plasmasfera (*plasmasphere*) é a região interna da magnetosfera. É caracterizada por possuir o plasma mais denso que nas regiões vizinhas. Isso acontece devido as linhas do campo geomagnético aprisionarem o plasma que flui da ionosfera.

A folha de plasma (*plasma sheet*) é uma lâmina de plasma que se estende até a cauda magnética dividindo os dois lóbulos do campo magnético da Terra.

## 2.4 HILDCAA

Dentre os principais eventos na magnetosfera causados pela atividade solar estão as tempestades magnéticas, as subtempestades e os HILDCAAs. Os HILDCAAs são definidos como “atividades contínuas do índice AE, de longa duração e de grande intensidade” (do inglês *High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity*) e foram descobertas por Tsurutani e Gonzalez em 1987.

Os HILDCAAs foram identificados durante o estudo de algumas tempestades magnéticas que apresentavam a fase de recuperação muito prolongada, a qual podia durar mais de uma semana. Nesses períodos o índice AE apresentava uma atividade intensa e contínua. De acordo com Tsurutani e Gonzalez (1987) alguns critérios foram definidos para identificar o fenômeno:

1. Durante o evento a intensidade do índice AE deveria alcançar um pico maior ou igual a 1000 nT;
2. O evento deveria ter a duração de, no mínimo, dois dias;
3. A atividade auroral deveria ser aproximadamente contínua, ou seja, o índice AE nunca deveria cair para valores menores que 200 nT por mais de duas horas seguidas;
4. O fenômeno deveria ocorrer fora da fase principal das tempestades magnéticas.

Koga et al. (2011) afirma que outros requisitos também se fazem necessários para uma completa descrição do fenômeno:

5. A variação do índice SYM-H deve ser moderada, não passando de -100 nT;
6. Aumento da velocidade do vento solar;
7. Flutuações da componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário em torno de zero com amplitudes entre  $\pm 10$  nT.

É importante ressaltar que os critérios adotados para se classificar os eventos HILDCAAs foram arbitrários, e posteriormente considerados um pouco extremos pelos próprios autores (TSURUTANI, et al., 2004). O critério que se mostra mais restritivo, segundo estudos feitos por Guarnieri (2005), é o de não permitir quedas no índice AE abaixo de 200 nT por mais de duas horas seguidas. Sendo assim, é possível que o

evento ocorra mesmo quando um ou mais dos critérios listados acima não forem estritamente seguidos. Neste trabalho não seguimos a restrição do terceiro critério citado acima, portanto, consideramos como final do evento quando o índice AE assume valores abaixo de 200 nT por várias horas seguidas.

Tsurutani e Gonzalez (1987) enfatizaram que o mecanismo de formação dos eventos HILDCAAs era diferente do que causava as tempestades magnéticas, uma vez que ainda não se conhecia a hipótese física que explicasse uma fase de recuperação tão longa com duração de dias ou semanas (TSURUTANI et al., 2004). Todos os processos físicos mais importantes para o decaimento da corrente de anel (mudança de carga, colisões colombianas, interação onda-partícula, etc.) tinham uma escala de tempo de horas ou frações de dia (SORAAS, et al., 2004).

Soraas et al. (2004) mostraram que a longa fase de recuperação se deve à contínua injeção de íons na corrente de anel, o que impede o decaimento natural da corrente de anel e que estas injeções ocorrem mesmo que o sentido do campo orientado para a direção sul não seja contínuo. Em relação à atividade do índice AE, por muito tempo pensou-se que os HILDCAAs eram uma sequência de subtempestades. Tsurutani et al. (2004) e Guarnieri (2005) mostraram que os aumentos no índice AE não correspondiam a ocorrências de subtempestades as quais foram identificadas pelo imageador ultravioleta UVI a bordo do satélite POLAR.

Os HILDCAAs são uma forma própria de eventos, apesar de poder acontecer subtempestades durante a ocorrência de HILDCAAs. Uma comparação entre as formas aurorais que ocorrem durante tempestades, subtempestades e HILDCAAs pode ser vista na Figura 2.9. As cores quentes indicam maior precipitação de fótons. Durante os eventos HILDCAAs as formas aurorais se mostram distribuídas tanto no lado diurno quanto no lado noturno, podendo algumas vezes elas ser mais fortes no lado do dia. Isto por si só indica que deve haver algum mecanismo de transferência de energia para dentro da magnetosfera sem armazenamento de energia na cauda. A hipótese mais provável apontada por Guarnieri (2005) é que se Bz apontar para norte, a reconexão pode ocorrer nas cúspides do lado diurno. Assim, quase ao mesmo tempo ocorreria penetração de energia tanto no lado diurno através das cúspides produzindo as auroras na frente da magnetosfera, quanto no lado noturno ocorrendo a penetração de energia através da reconexão.

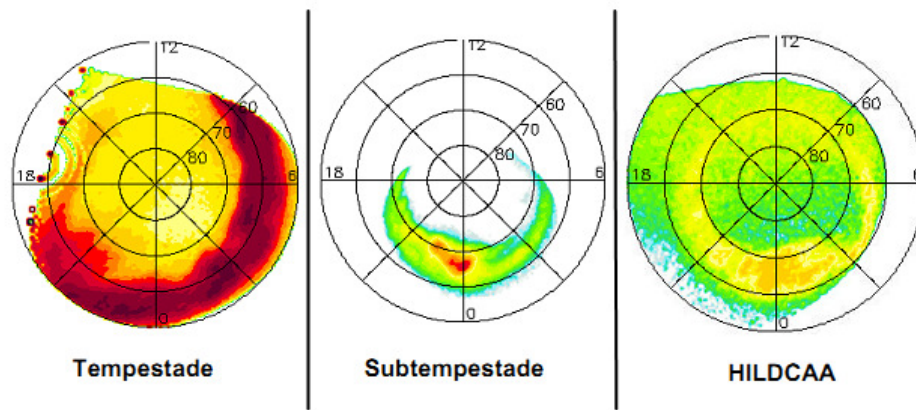


Figura 2.9: Diferença na distribuição e intensidade de emissão de fótons durante tempestades, subtempestades e HILDCAAs.

Fonte: Guarnieri (2005)

#### 2.4.1 Mecanismo de formação dos eventos HILDCAAs

Já no seu descobrimento foi mostrado que os HILDCAAs estão correlacionados com flutuações alfvênicas presentes no vento solar. Como estas flutuações aparecem mais frequentemente em feixes rápidos provenientes de buracos coronais, sua ocorrência é mais comum na fase descendente e do mínimo solar (GUARNIERI, 2005).

Durante e alguns anos depois do máximo solar, o fenômeno solar dominante que causa atividade geomagnética na Terra são as ejeções de massa coronal (CME, do inglês *Coronal Mass Ejection*). Porém, durante o mínimo solar, os fluxos de alta velocidade provenientes de buracos coronais<sup>4</sup>, são predominantes no meio interplanetário (TSURUTANI E GONZALEZ, 1997). Os buracos coronais também estão presentes durante o máximo solar, mas são pequenos e não se estendem dos polos para o equador como acontece na fase descendente do ciclo solar. Nessa fase os buracos coronais migram para latitudes mais baixas e o fluxo que emana deles corrota em um intervalo de 27 dias, ou seja, eles reaparecem a cada rotação solar dando a impressão que eles corrotam com o Sol. Quando o fluxo de alta velocidade encontra o fluxo de baixa velocidade, a interação entre eles resulta em compressões do campo magnético e do plasma. Essas regiões de campo magnético intenso são denominadas de região de interação corrotante (*corotating interaction region*) ou CIRs (TSURUTANI, et al., 2006).

<sup>4</sup> Os buracos coronais são regiões de baixa temperatura, em relação às outras regiões do Sol. Eles apresentam linhas de campo magnético abertas.

As regiões de interação corrotantes são importantes por suas implicações na atividade geomagnética da Terra. Guarnieri (2005) estudou eventos HILDCAAs ocorridos entre os anos de 1998 a 2001 seguindo estritamente a classificação proposta por Tsurutani e Gonzalez em seu trabalho pioneiro sobre o assunto em 1987. Verificou-se que os feixes rápidos das regiões de interação corrotantes estavam relacionados à ocorrência de HILDCAAs em uma proporção de 71,42% do total de eventos. As flutuações do IMF Bz presentes nas CIRs através de reconexão magnética causam a transferência de energia para a magnetosfera. A natureza dessas flutuações é devido a ondas de Alfvén<sup>5</sup>. A Figura 2.10 mostra a interação do fluxo de alta velocidade (B) com o de baixa velocidade (A) e a região de interação corrotante na área sombreada. FS, RS e IF são respectivamente choque frontal (*forward shock*), choque posterior (*reversal shock*) e a superfície de interface (*interface surface*).

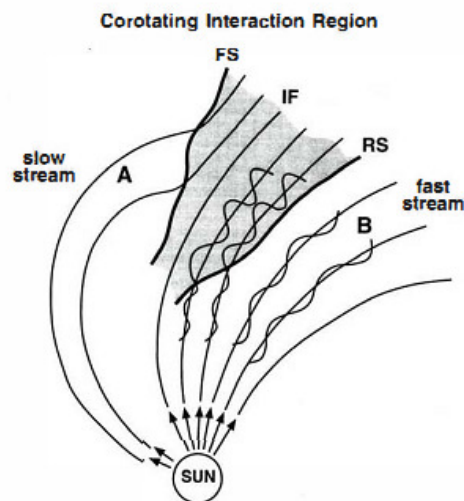


Figura 2.10: Região de interação corrotante (CIR)

Fonte: Tsurutani et al. (1995)

Em geral, os feixes que se propagam logo após a ocorrência de uma CIR tem maior probabilidade de produzir HILDCAAs. Isso porque as instabilidades e compressões geradas podem amplificar as ondas de Alfvén presentes nos fluxos de alta velocidade. Ao atingirem a magnetosfera terrestre, se a velocidade do vento solar for muito alta ou uma série de ondas de Alfvén estiver presente com grandes amplitudes, estas poderão

<sup>5</sup> As ondas de Alfvén são ondas transversais que se propagam paralelamente ao campo magnético externo. Apesar da oscilação das linhas de campo magnético, as ondas de Alfvén não provocam variações na densidade e pressão do meio para o caso estacionário (BITTENCOURT, 2003).

levar a ocorrência de uma tempestade fraca ou moderada. Porém, mesmo com ocorrência de tempestade, o processo de produção do HILDCAA seria o mesmo processo de um evento HILDCAA que não tivesse uma tempestade antecedendo-o.

Apesar dos eventos HILDCAAs apresentarem intensidade de fraca a moderada, eles podem ter emissões de fótons muito elevadas por evento, chegando a ser mais intensos que algumas tempestades geomagnéticas. O ponto importante considerado aqui é a duração do evento, pois mesmo fracas ou moderadas as emissões de HILDCAAs são observadas de forma quase constante ao longo de vários dias, e por vezes, até semanas. Por esta razão, em relação às consequências na ionosfera, os efeitos apresentam intensidade reduzida (SOBRAL et al., 2006).

É interessante mencionar que as tempestades magnéticas formadas pelas CIRs ou pelas CME possuem três características diferentes, como mostrado na Figura 2.11. A primeira é que a intensidade das tempestades causadas pelas CIRs varia de fraca a moderada. A segunda é que geralmente a fase principal apresenta um perfil irregular no índice de Dst. A terceira é que nem sempre o início súbito da tempestade (SSC, do inglês *Storm Sudden Commencement*) está presente (TSURUTANI et al., 2006). Uma possível explicação para tais características seria que a uma distância de uma unidade astronômica (AU, do inglês *Astronomical Unit*) as CIRs não estão completamente desenvolvidas (TSURUTANI E GONZALEZ, 1997).



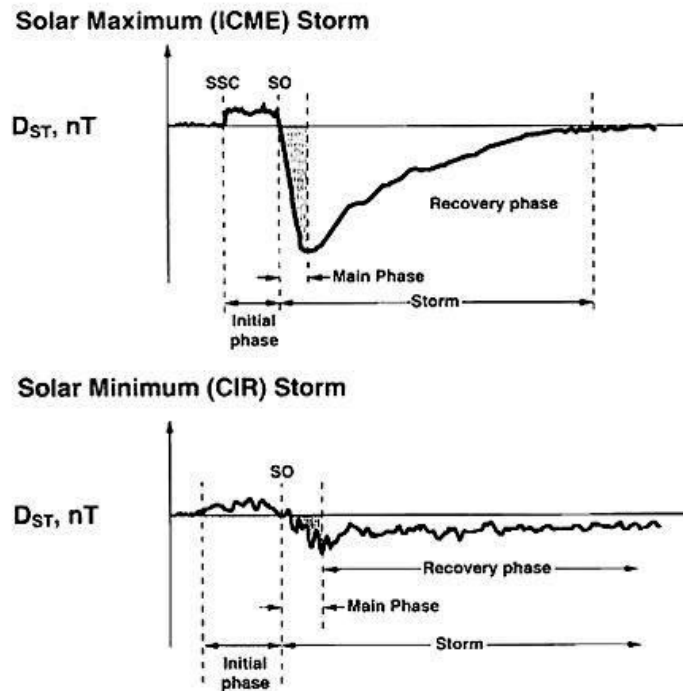


Figura 2.11: Esquema de tempestades magnéticas formadas por CME e por CIRs.

Fonte: Tsurutani et al. (2006)

## 2.5 As respostas da ionosfera equatorial durante tempestades magnéticas

### 2.5.1 Penetração direta do campo elétrico

O campo magnético interplanetário pode gerar um campo elétrico amanhecer-anoitecer na magnetosfera quando sua componente norte-sul ( $B_z$ ) inverte para sul, facilitando a penetração de campos elétricos, de plasma e de energia. Após a reconexão, o campo elétrico amanhecer-anoitecer mapeia-se diretamente para a ionosfera auroral.

As respostas da ionosfera equatorial resultam da termosfera e de campos elétricos que se propagam da região auroral para a equatorial. A Figura 2.12 representa os campos elétricos dentro da plasmapausa.

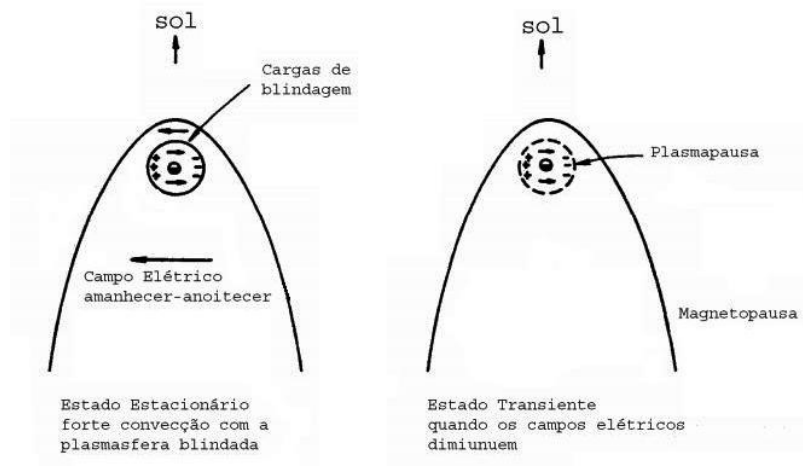


Figura 2.12: Ilustração do plano equatorial mostrando um decréscimo na convecção magnetosférica e consequente campo elétrico dentro da plasmasfera.

Fonte: Kelley (2009).

Quando o  $B_z$  inverte para sul, o campo elétrico amanhecer-anoitecer se intensifica, o que corresponde a um campo elétrico para leste no lado do dia e para oeste no lado da noite (“undershielding”), ou seja, mesma polaridade dos campos elétricos equatoriais durante períodos calmos. Sendo assim, a contribuição desse campo na ionosfera será de intensificar o campo elétrico zonal devido ao dínamo dos dias calmos.

Quando  $B_z$  inverte para norte ocorre um desequilíbrio entre as cargas da convecção magnetosférica e as cargas da corrente de anel. O equilíbrio blindava os campos elétricos magnetosféricos e de altas latitudes e impede que eles penetrem na ionosfera de médias e baixas latitudes. A imagem da esquerda da Figura 2.12 mostra a blindagem do campo elétrico externo. Quando ocorre o desequilíbrio uma nova configuração se forma, então um campo elétrico de blindagem é estabelecido e pode penetrar nas baixas latitudes. Esse campo é conhecido como “overshielding” e sua direção é para oeste durante o dia e para leste durante a noite. Este desequilíbrio é representado na imagem da direita da Figura 2.12.

### 2.5.2 Dínamo Perturbado

Inicialmente a teoria da geração dos campos elétricos e dínamo perturbado foi sugerida por Blanc e Richmond (1980). O mecanismo do dínamo perturbado pode ser mais facilmente compreendido com a ilustração da Figura 2.13. Durante atividade

geomagnética a injeção de energia em altas latitudes provoca aquecimento auroral, e decorrente disso, ventos termosféricos perturbados se propagam em direção ao equador. Porém, devido ao movimento de rotação da Terra os ventos adquirem velocidade para oeste por causa da força de Coriolis. Os ventos perturbados para oeste em conjunto com a direção das linhas de campo produzem uma corrente Pedersen para o equador, o qual tende a se carregar positivamente. Devido ao aparecimento da polaridade, um campo elétrico resultante surge para cessar o fluxo de corrente. Como esse campo elétrico é perpendicular às linhas de campo magnético ocorre a produção de uma deriva de plasma para oeste e a corrente Hall.

Como a corrente Hall é interrompida nos terminadores, ocorre a formação de dois laços de correntes que estabelecem o campo elétrico anoitecer-amanhecer. Este campo tem a polaridade oposta ao campo elétrico dos dias calmos e se estende para regiões equatoriais e de baixas latitudes através da Ionosfera.

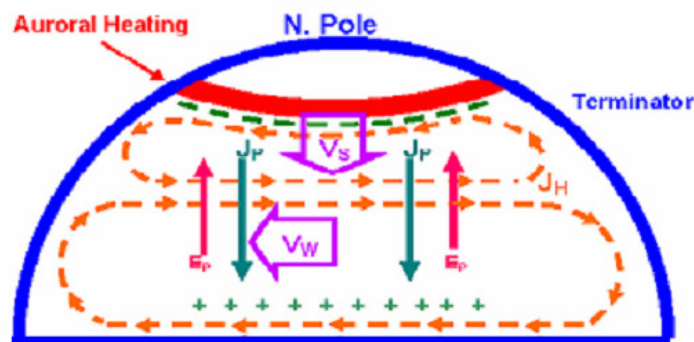


Figura 2.13: Ilustração do mecanismo de geração do dínamo perturbado.

Fonte: Modificada de Abdu et al. (2006)

Como resultado do acúmulo de cargas positivas em baixas latitudes, os maiores potenciais elétricos aparecem nas regiões equatoriais. De acordo com Huang et al. (2005) o campo elétrico do dínamo perturbado aponta para oeste durante o dia e para leste no lado da noite, porém, um pouco antes da meia-noite o campo elétrico já se apresenta para oeste como mostra a Figura 2.14.

Apesar da Figura 2.14 apresentar a distribuição do potencial elétrico, podemos utilizá-la para analisar o comportamento do campo elétrico devido ao fato do campo elétrico ser o gradiente do potencial elétrico ( $\vec{E} = -\nabla V$ ).

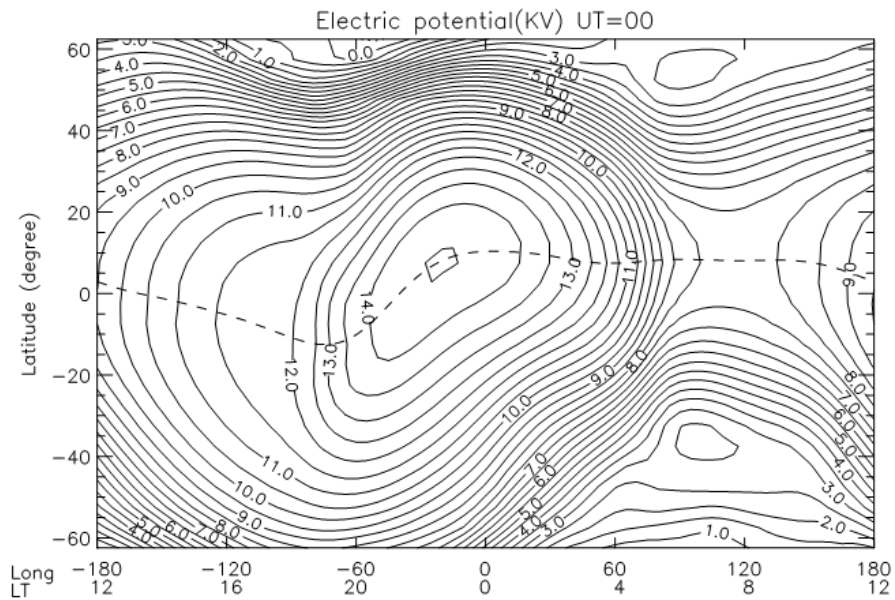


Figura 2.14: Distribuição do potencial elétrico de 90 km a 500 km às 0000UT.

Fonte: Huang et al. (2005).

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo é apresentado o instrumento utilizado para a obtenção dos dados ionosféricos deste trabalho. Será feita uma breve exposição do princípio de funcionamento das ionossondas e digissondas, bem como dos seus resultados gráficos (ionogramas).

#### 3.1 Ionossonda

Ionossondas são instrumentos que fazem varredura em frequência HF pulsada usadas para monitorar a ionosfera. Os pulsos são transmitidos e a ionossonda registra o tempo de atraso dos ecos retornados. As ionossondas normalmente varrem frequências de aproximadamente 1 a 30 MHz. Naturalmente a varredura completa pode ter que ser feita por uma série de faixas de frequência. Uma descrição detalhada da ionossonda é dada por Wright e Pitteway (1979). Ela usa medida direta do tempo  $t$  que um pulso de onda de rádio que propaga até a ionosfera e volta em função da frequência.

Os pulsos transmitidos são refletidos em regiões onde a frequência do plasma ionosférico é igual à frequência do pulso. As alturas de reflexão apresentadas nos ionogramas são calculadas com base no intervalo de tempo decorrido entre a transmissão do pulso e a recepção do eco, supondo-se que a velocidade de propagação seja igual à velocidade da luz no vácuo ( $c$ ), sendo dada pela expressão:

$$h' = \frac{1}{2} ct \quad (3.1)$$

Como os pulsos se propagam através da ionosfera em velocidades menores que em meios como o ar neutro, ou mesmo o vácuo, à medida que os pulsos avançam até a região de reflexão dentro do plasma sua velocidade de grupo tende a sofrer um retardo. Por este motivo, a altura calculada segundo a expressão acima é aparente e, portanto, chamada de altura virtual ( $h'$ ).

Na ionossonda analógica, o transmissor e o receptor eram mantidos em sintonia por processos eletrônicos apropriados. O sinal era transmitido por um sistema com uma antena log-periódica. Este sinal era refletido na ionosfera e captado por quatro ou mais antenas, do tipo loop-cruzado, por exemplo. Os sinais recebidos eram mostrados em gráficos de frequência versus altura através de um osciloscópio. Os sinais eram enviados na forma de pulsos estreitos e eles interrompem o traço de varredura cada 1/3,

2/3, e 6 2/3 ms que corresponde ao grupo de altura de 50, 100 e 1000 km, respectivamente. Além disso, a frequência do transmissor é variada, portanto o traço inteiro do sinal pode ficar interrompido por curtos intervalos das passagens de frequência a cada 0,1 MHz. Assim as grades de linhas de referência são produzidas com grupos de altura virtuais que podem ser determinadas em qualquer frequência.

Desprezando-se colisões entre elétrons e partículas neutras assim como os efeitos do campo geomagnético, o índice de refração do plasma ionosférico pode ser obtido por (BERTONI, 2004):

$$\mu^2 = 1 - X \quad (3.2)$$

$$\mu^2 = 1 - \left(\frac{f_N}{f}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$\mu^2 = 1 - \kappa \frac{N}{f^2} \quad (3.4)$$

Onde  $\kappa$  é uma constante expressa por:

$$\kappa = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m} \quad (3.5)$$

As grandezas e variáveis descritas nas expressões acima são:

$f_N$  é a frequência do plasma;

$f$  é a frequência da onda;

$N$  é a densidade eletrônica;

$e$  é a carga elétrica;

$\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo, e

$m$  é a massa do elétron.

Quando  $f_N = f$  ocorre reflexão da onda no meio. Essa relação entre frequência do plasma e frequência da onda permite determinar a densidade eletrônica. Conhecendo-se os valores das constantes e da frequência da onda, traça-se o perfil da densidade eletrônica que pode ser calculado por:

$$f_N = 0,009 (N_\epsilon)^{1/2} \quad (3.6)$$

$$N_\epsilon = 1,24 \cdot 10^4 f_N^2 \quad (3.7)$$

Sendo  $f_N$  em MHz e  $N_\epsilon$  em elétrons/cm<sup>3</sup>.

### 3.1.1 Ionossonda Digital CADI

A CADI foi instalada no Brasil em setembro de 1994, durante a campanha Guará, cujos objetivos principais eram estudar o eletrojato equatorial e as bolhas de plasma (BERTONI, 1998). Ela consiste basicamente dos seguintes equipamentos: receptores e sintetizadores de frequência, um módulo transmissor e um conjunto de softwares. Seus receptores e sintetizadores de frequência são montados em placas embutidas (cartões eletrônicos) em um microcomputador e seu conjunto de softwares foi desenvolvido em colaboração com pesquisadores da Universidade de Western Ontario.

A CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) foi desenvolvida pela CNSR (*Canadian Network for Space Research*) tornando possível o monitoramento da ionosfera local medindo:

- O retardo da onda refletida na vertical, sendo a altura virtual versus a frequência;
- A fase e amplitude da onda refletida;
- O ângulo de chegada e a polarização da onda;
- A deriva, usando o método de antena espaçada.

Essas informações são úteis tanto em radiocomunicação de ponto a ponto quanto em relação à física da ionosfera por possibilitar a verificação das condições ionosféricas.

As ionossondas possuem limitações. Não fornecem informações diretas sobre o perfil acima do pico de máxima densidade eletrônica e sobre vales que apareçam entre camadas. Para frequências mais baixas, próximo ao limite inferior de varredura e usando potência mais alta, muitas informações sobre a camada D também não são obtidas. Outra questão é que quando surge a camada esporádica E acontece um tipo de “blindagem” da camada F e informações desta acabam sendo impossibilitadas. As ionossondas também podem ser afetadas por transmissões em MF, que podem obliterar os traços ionosféricos. Além de tudo o que foi citado, ainda há a questão sobre a

confiabilidade nos ecos. Para isto, cuidados são tomados desde a construção, instalação e calibração das antenas.



Figura 3.1: Ionossonda CADI.

Fonte: Scientific Instrumentation Ltd (2012)

## 3.2 Digissonda

As digissondas são exemplos de ionossondas digitais e seu funcionamento é basicamente semelhante. O sistema da digissonda é constituído por uma antena transmissora, antenas receptoras, um computador para controle da transmissão-recepção e outro para transmissão e armazenamento dos dados. As sondagens de densidade eletrônica são feitas, em geral, em intervalos de 15 minutos. As ondas refletidas em diferentes alturas, de acordo com a densidade eletrônica, são captadas pelas antenas receptoras. Elas sofrem um pré-processamento digital e são arquivadas diretamente no formato de ionogramas em arquivos binários. Os dados obtidos permitem a inferência de perfis de densidade eletrônica da ionosfera e o software de redução é o SAO Explorer.

### 3.2.1 Digissonda 256 (DGS 256)

Este modelo trata-se de uma versão atualizada da digissonda 128 OS, sendo um dos sistemas em operação mais utilizados pelas diversas estações ao redor do mundo. O modelo é robusto e confiável. Emite pulsos de HF que atendem tanto as necessidades



ligadas à pesquisa ionosférica quanto à engenharia de comunicações. Nesta dissertação foram usados dados obtidos por uma digissonda deste mesmo modelo, DGS 256, instalada em São Luís, Maranhão.



Figura 3.2: Digissonda 256.

Fonte: INTA (2012)

### 3.2.2 Digissonda DPS

A Digissonda DPS (*Digissonde Portable Sounder*) é capaz de realizar medidas da ionosfera, fornecendo o processamento e análise em tempo real do local onde está instalada. Isto inclui a medida simultânea de sete parâmetros observáveis dos sinais refletidos e refratos pela ionosfera, a saber: frequência, altura vertical, amplitude, fase, deslocamento Doppler e espalhamento, ângulo de chegada e polarização da onda.



Figura 3.3: Digissonda DPS.

Fonte: INPE. DAE (2012)

### 3.3 Ionograma

De forma simplificada, ionogramas são registros gráficos que mostram a variação da altura virtual de reflexão das ondas de rádio em função da frequência do pulso. Na Figura 3.4 mostramos um exemplo de ionograma. A abscissa representa a frequência, a ordenada representa a altura virtual de reflexão (que pode ser transformada em tempo com a simples suposição de que a onda se propaga com  $3 \cdot 10^8$  m/s). A amplitude do sinal é representada pela intensidade (ou pixels) da curva, o desvio Doppler pela cor da curva e a polarização pelo gradiente de cores (as cores “frias” – escalas de azul, verde, cinza – mostram polarização do modo extraordinário, e as cores “quentes” – escalas de vermelho amarelo, branco – mostrando polarização ordinária).

A altura real, onde a reflexão realmente aconteceu, é sempre menor que a altura virtual devido ao retardo pelo sinal e pela ionização existente abaixo do ponto de reflexão.

Quando a frequência da onda aumenta, a altura virtual mostrada no ionograma também aumenta. Quando a reflexão alcança a altura máxima, a onda incidente transpassa a camada não havendo retorno do pulso incidente (a sonda mede a altura virtual como infinita). Essa frequência é chamada de frequência crítica.

Através do estudo dos ionogramas é possível observar que os ecos, dentro de certa faixa de frequência se separam em dois traços, um representando a componente ordinária (traço *O*) e outro a componente extraordinária (traço *X*). O traço *O* associa-se a menor frequência, enquanto que o traço *X* a maior. Estas frequências diferem por um valor da ordem  $f_b$ , sendo este:

$$f_b \cong \frac{\text{frequência de giro do elétron}}{2} \quad (3.8)$$

Também é possível observar traços repetidos em alguns ionogramas. Isto acontece devido a possibilidade de múltiplas reflexões entre ionosfera e a Terra.

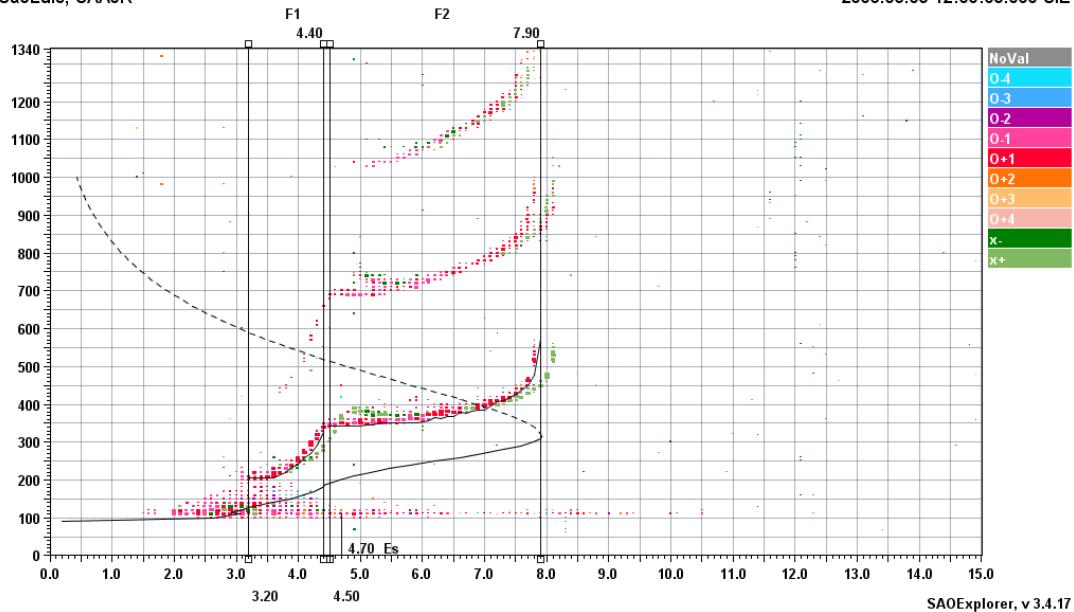


Figura 3.4: Exemplo de ionograma sobre São Luis. A curva preta representa o perfil de densidade da ionosfera.

Um ionograma contém uma quantidade muito grande de informações. Por isso são definidos parâmetros ionosféricos os quais fornecem uma análise geral do ionograma. Os parâmetros ionosféricos mais importantes são listados na Tabela 3.1.

Todos os parâmetros são acompanhados das letras qualitativas e descritivas. A letra qualitativa informa uma incerteza, enquanto que a letra descritiva informa a causa desta incerteza. O uso das letras é importante, pois ao se analisar um gráfico obtido de um ionograma, caso seja observado algum comportamento fora do padrão, o usuário terá condições de saber as causas da alteração do comportamento.

Neste estudo foi utilizado o parâmetro hmF2, o qual representa a altura do pico de densidade eletrônica da ionosfera, obtido da digissonda DGS instalada em São Luís. Pois o objetivo geral do trabalho deste mestrado foi investigar como a ionosfera na região brasileira se comporta durante eventos HILDCAAs selecionados no ano de 2006.

Tabela 3.1 Parâmetros ionosféricos

| Parâmetro | Definição   |
|-----------|---|
| $f_{min}$ | Menor frequência no qual o traço do eco foi observado                                     |
| $fbE_s$   | Frequência de Blanketing da camada esporádica E   |
| $h'E_s$   | Altura virtual mínima da camada esporádica observada.                                     |
| $f_oE$    | Frequência crítica da onda ordinária correspondente a camada densa mais baixa da região E |
| $f_oEs$   | Frequência crítica da camada esporádica E   |
| $h'E$     | Altura virtual mínima da camada E   |
| $h'F1$    | Altura virtual mínima do traço ordinário da região F1.                                    |
| $h'F3$    | Altura virtual mínima do traço ordinário da região F3.                                    |
| $f_oF1$   | Frequência crítica da onda ordinária da camada F1   |
| $h'F2$    | Altura virtual mínima do traço ordinário da região F2.                                    |
| $f_oF2$   | Frequência crítica da onda ordinária da camada F2   |
| $hmF1$    | Altura do pico da camada F1   |
| $hmF2$    | Altura do pico da camada F2   |

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Sobre os dados

Os períodos de 18 a 22 de março, 06 a 11 de junho e 18 a 26 de dezembro de 2006 foram classificados como eventos HILDCAA. Além desses períodos, foram selecionados quatro dias antes e quatro dias depois do evento por motivo de comparação com efeitos do fenômeno. O ano de 2006 foi escolhido por se tratar da fase descendente do ciclo solar 23, onde é mais comum a ocorrência do fenômeno estudado.

O parâmetro ionosférico usado neste trabalho é a altura do pico de densidade eletrônica da camada F, ou seja, o hmF2. Os dados foram obtidos da digissonda 256 (DGS 256) instalada em São Luís, Maranhão (44,6O, 2,33S, dip angle 1,5S). Eles apresentam resolução temporal de 15 minutos.

Os dados de digissonda dos meses de março e junho apresentavam mais ionogramas do que os habituais para um dia, no que se refere à medida a cada 15 minutos totalizando 96 ionogramas por dia. No período que vai do meio-dia até 17h os ionogramas estavam a cada 10 minutos, possivelmente devido a alguma campanha, a qual não foi identificada. Para o tratamento dos dados foi feita uma interpolação para o ajuste de resolução temporal de 15 minutos, a qual não prejudicou a acurácia dos mesmos. Os dados de hmF2 do mês de junho apresentam falha sempre em torno das 4h até ~ 8:30h. O motivo das falhas geralmente alternou entre surgimento de uma camada E esporádica muito forte, a qual bloqueou a percepção da região F pelo aparelho, ou a frequência crítica da camada F se apresentou abaixo do limite mínimo de percepção do aparelho. A Figura 4.1 mostra um exemplo de ionogramas onde a camada F se encontrou obstruída. A partir de 19/12/2006 os dados apresentaram resolução de 5 minutos durante um período do dia. Também foi utilizada a interpolação no tratamento desses dados por não haver continuidade nos valores apresentados para cada 15 minutos, ou seja, algumas vezes não tinha dado a cada 15 minutos, mas tinha para 5 minutos antes ou depois. O dia 30/12/2006 só apresenta dados disponíveis até às 1400 UT.

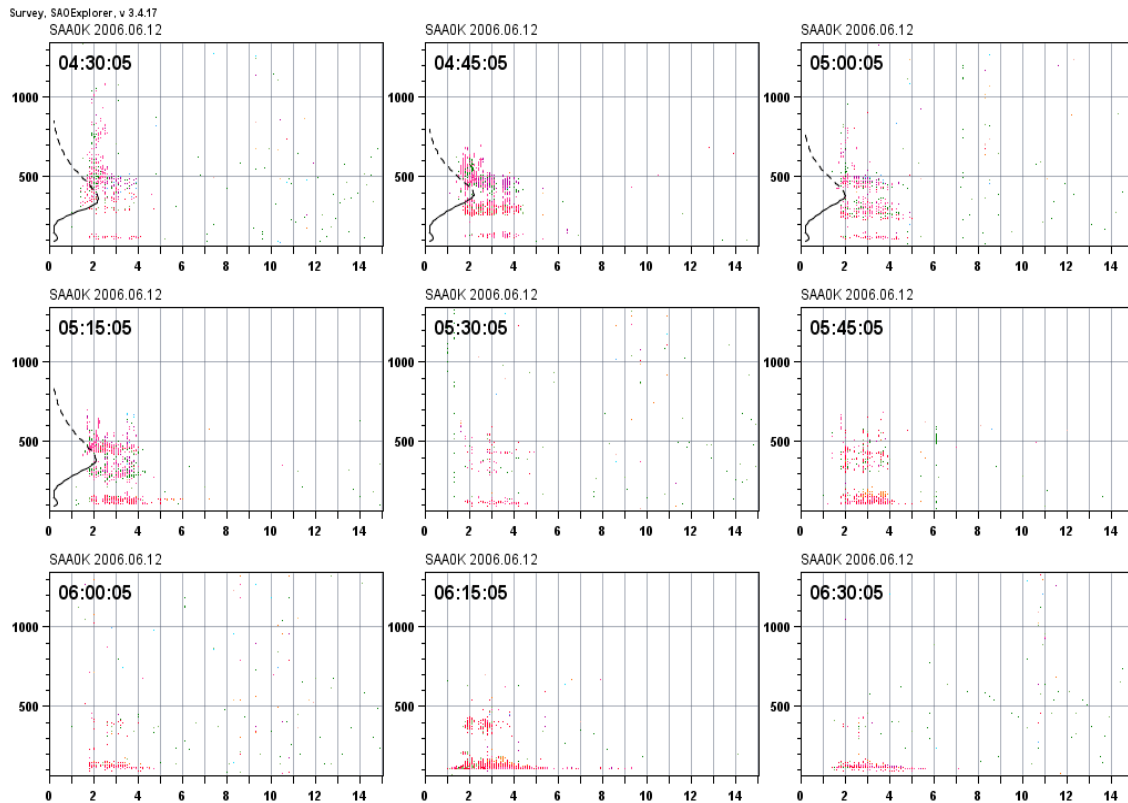


Figura 4.1: Exemplos de ionogramas onde a camada F se encontra obstruída.

Outros parâmetros utilizados foram os índices AE, Kp, SYM-H, a velocidade do vento solar ( $V_{sw}$ ), o fluxo solar (F10.7), a componente norte-sul do campo magnético interplanetário Bz em sistema de coordenadas GSM (*geocentric solar magnetospheric*) e a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário IEF ( $E_y$ ).

O índice AE mede o nível de perturbação do eletrojato auroral e é obtido usando-se apenas a perturbação da componente H do campo, adquirida de observatórios. Ele representa a diferença entre os índices AU (representa a perturbação do eletrojato para leste) e AL (representa a perturbação do eletrojato para oeste).

O índice Kp fornece uma medida qualitativa do nível de perturbação planetária causada pelo vento solar. Sua escala varia entre 0 e 9, e sua resolução temporal é de três horas.

O índice SYM-H mede a corrente de anel. É semelhante ao índice Dst, porém com resolução temporal de um minuto.

O índice F10.7 é uma medida de emissão do fluxo de radiação solar em um comprimento de onda igual a 10.7 cm (2800 MHz,  $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ) e representa o fluxo de radiação solar ultravioleta responsável pela ionização e aquecimento da termosfera (TAPPING, 1987). Ele também está relacionado com o número de manchas solar, e conseqüentemente ao ciclo solar.

Os dados de F10.7 foram obtidos do site <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/home.do> com resolução de 15 minutos. Apesar disso, eles se mostraram sem alteração diária, permanecendo um único valor por dia.

Os dados de Bz, SYM-H, AE e Ey apresentam resolução temporal de 5 minutos e os dados de Vsw apresentam resolução temporal de 1 minuto. Todos estes foram obtidos de OMNIWeb da NASA no site [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html). E os dados de Kp foram obtidos do WDC Kyoto no site <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>.

## 4.2 Metodologia

O presente trabalho se concentrou no estudo da resposta da ionosfera equatorial durante períodos de evento HILDCAA, tema bastante interessante, mas que foi muito pouco estudado. Para esta finalidade o trabalho de mestrado se alicerçou na comparação entre duas metodologias apresentadas em artigos científicos distintos. A primeira, descrita em Koga et al. (2011) e a outra em Kelley e Dao (2009).

A metodologia exposta por Koga et al. (2011) representa uma análise estatística da deriva vertical da altura do pico da região F equatorial durante cinco dias de evento HILDCAA. A penetração do campo elétrico interplanetário (em inglês, *interplanetary electric field*: IEF) foi identificada por meios de análise de correlação realizada entre as variações de altura ( $\Delta h_m F2$ ) acima da estação de São Luís, no Maranhão, e a magnitude do IEF. Os resultados estão apresentados na Figura 4.2. O trabalho realizado neste mestrado foi refazer estas correlações para os eventos HILDCAA em estudo.

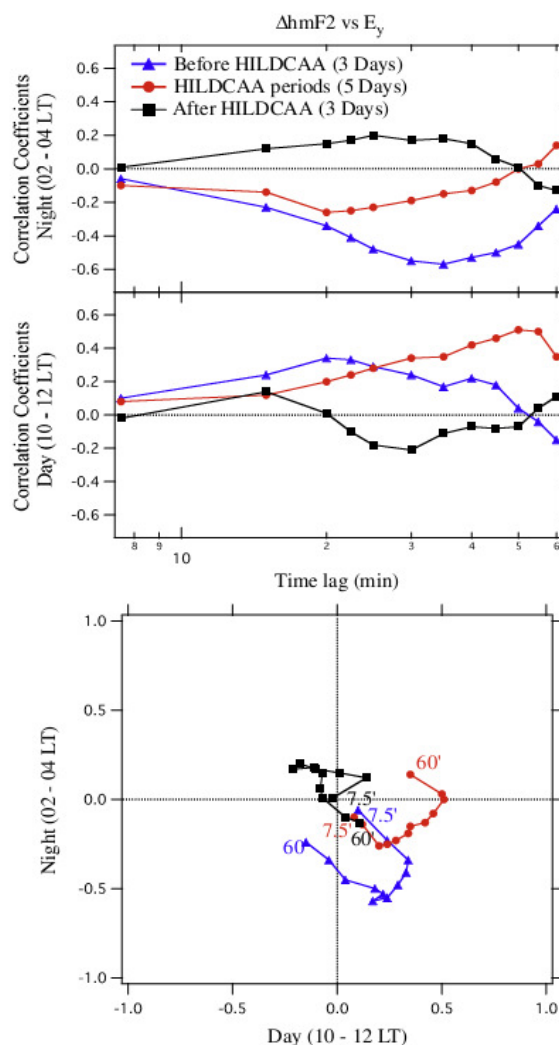


Figura 4.2: Gráfico dos coeficientes de correlação para os períodos diurno e noturno (painel superior) e de correlação cruzada (painel inferior) entre a variação de altitude perturbada e a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário.  
Fonte: Koga et al. (2011)

Tanto os dados da variação de altura ( $\Delta hmF2$ ) quanto os dados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) foram filtrados com filtro passa alta (são filtros os quais deixam passar apenas frequências acima de uma determinada frequência de corte) a fim de se permitir apenas efeitos da penetração direta de campos elétricos, com frequência de corte referente à  $9,26 \cdot 10^{-5}$  Hz ( $T = 3h$ ). Os gráficos das Figuras 4.3 e 4.4 mostram os dados do evento HILDCAA de junho após serem filtrados com filtro passa alta.



Ao rodar o modelo empírico do Fejer and Scherliess (1997) o FS97, Koga et al. (2011) verificaram que ocorriam picos em determinados intervalos durante o dia. Próximo do horário que vai das 02 h às 04 h LT e próximo do horário que vai das 10 h às 12 h LT. Estes intervalos foram escolhidos como representativos para os períodos noturno e diurno, respectivamente.

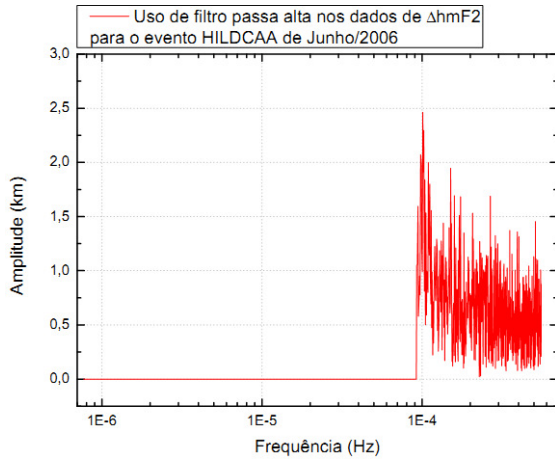


Figura 4.3: Filtro passa alta em  $\Delta hmF2$

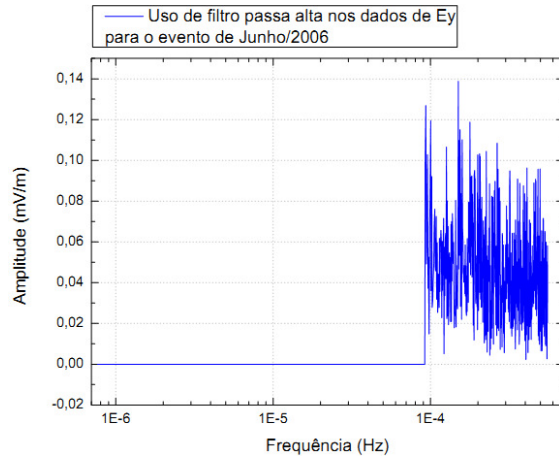


Figura 4.4: Filtro passa alta em  $E_y$

Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para estes horários mantendo-se os valores de  $\Delta hmF2$  fixos e antecedendo os valores do  $E_y$  para cada 15 minutos, isto é, os valores de correlação foram calculados para os atrasos de  $\tau = 15, 30, 45$  e  $60$  min. Feito isso, foram elaborados os gráficos dos coeficientes de correlação com os respectivos atrasos temporais, dados em horas decimais. Também foram feitos os gráficos de correlação cruzada, onde a ordenada representa os coeficientes de correlação para o período representativo da noite e a abscissa representa os coeficientes de correlação para o período representativo do dia. Os resultados estão no capítulo 5, o qual se refere aos resultados e discussões.

A metodologia apresentada em Kelley e Dao (2009) buscou explorar o efeito da hora local da penetração de campos elétricos no período que foi de 11 até 16 de novembro de 2003, onde se verificou que representava um evento HILDCAA. Para isto o trabalho estabeleceu a correlação entre o campo elétrico interplanetário, obtido pelo satélite ACE, e a deriva vertical obtida em Jicamarca, considerando o atraso de tempo que o campo elétrico interplanetário gasta para passar do ponto do satélite ACE até atingir o observatório de Jicamarca, além do atraso adicional do vento solar, o qual é retardado pela onda de choque (*bow shock*) onde ocorre transferência de campo para a cauda

geomagnética. Geralmente este último atraso fica em torno de 10 a 20 minutos. Para escolher o alcance de frequência desejado, foi utilizado um filtro passa banda para filtrar os efeitos diurnos, e para quantificar a correlação para uma dada hora foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson<sup>6</sup> dentro de uma janela que abrange quatro horas centradas na hora dada. Ou seja, para calcular o coeficiente de correlação para as 09:00 hs, por exemplo, é utilizado uma janela que abrange das 07:00 hs até às 11:00 hs. Para o nosso estudo reduzimos o tamanho da janela. Utilizamos uma janela que abrange duas horas centradas na hora dada a fim de se obter melhores resultados. O resultado do trabalho apresentado por Kelley e Dao (2009) é uma alta correlação durante o dia e uma alta anti-correlação durante a noite, mostrado na Figura 4.5.

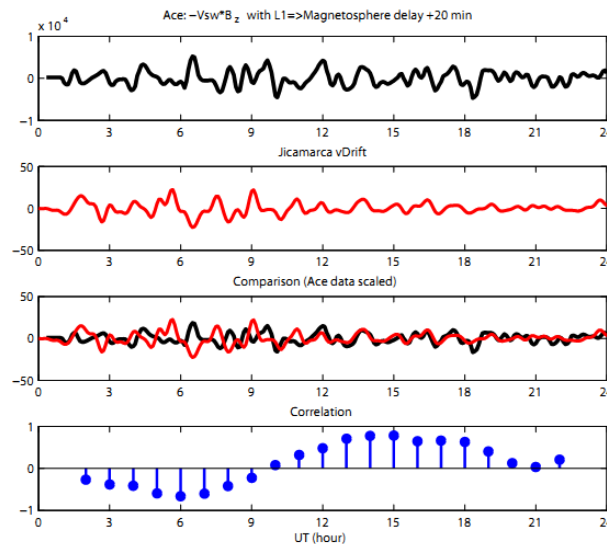


Figura 4.5: Comparação entre o campo elétrico observado pelo satélite ACE e o campo elétrico observado em Jicamarca.

Fonte: Kelley e Dao (2009)

O trabalho desenvolvido no Mestrado foi a reprodução das correlações descritas no trabalho de Kelley e Dao (2009) para todos os eventos HILDCAA do presente estudo, tanto para quatro dias antes quanto para quatro dias depois, com a finalidade de comparação.

<sup>6</sup> Existem outros coeficientes de correlação menos conhecidos, como o de Kendall (descrito como uma medida de concordância entre dois conjuntos) e o de Spearman (que não requer a suposição que a relação entre as variáveis é linear), porém o de Pearson é mais tradicional para o estudo de correlação.

O filtro passa banda (são filtros os quais deixam passar apenas uma faixa de frequência dentro de duas determinadas frequências de corte) foi utilizado em ambos os conjuntos de dados, tanto em  $\Delta hmF2$  quanto em  $E_y$ , e para tal foram usados como frequência de corte as seguintes frequências;  $2 \cdot 10^{-5}$  Hz para o corte em passa alta, e  $2 \cdot 10^{-4}$  Hz para o corte em passa baixa a fim de rejeitar ruídos de alta frequência que não são mapeados. Os gráficos 4.6 e 4.7 mostram como os dados para o evento de Junho ficaram após o uso do filtro.

A partir dos dados filtrados foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson dentro de uma janela que abrange duas horas e é centrada na hora dada, como foi citado anteriormente, para o dia inteiro, e não apenas para uma determinada faixa horária do dia, como determina o método realizado em Koga et al. (2011).

Pretendia-se conferir se ocorria a perfeita correlação apresentada no trabalho do Kelley e Dao (2009), visto que a expectativa era que tal feito não acontecesse, uma vez que não foi utilizada a deriva vertical de Jicamarca e sim a altura perturbada ( $\Delta hmF2$ ) da região de São Luís, Maranhão.

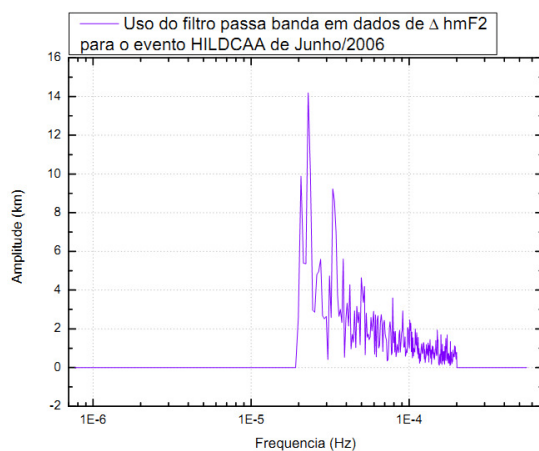


Figura 4.6: Filtro passa banda em  $\Delta hmF2$

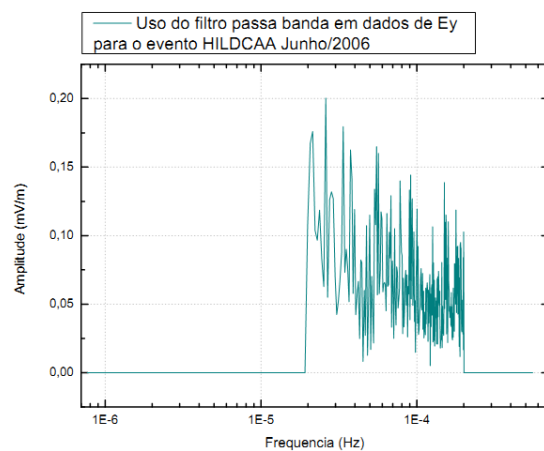


Figura 4.7: Filtro passa banda em  $E_y$

Uma semelhança entre as duas metodologias abordadas é o uso de processamento de sinais através de algum tipo de filtragem. O processamento de sinais lida com a representação, transformação e manipulação dos sinais e da informação que eles contêm. A maior parte do processamento de sinais envolve processar um sinal para se obter outro sinal. Em ambas as metodologias, os sinais foram convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. Normalmente isso é conseguido com o processo de filtragem. Os filtros são classificados de acordo com suas características no

domínio da frequência como passa baixa, passa alta, passa banda, rejeita faixa, etc. Em Koga et al. (2011) foi utilizado o filtro passa alta, e em Kelley e Dao (2009) filtro passa banda. O uso dos filtros é importante no que se refere à remoção de ruídos, análise espectral de sinais, equalização, entre outras. No caso das metodologias em estudo, o intuito era a remoção do ruído o qual prejudicaria a análise do sinal proveniente da penetração de campos elétricos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo geral desta dissertação de mestrado foi verificar as repostas da ionosfera equatorial ao campo elétrico interplanetário (IEF) em termos de variações de altura do pico da camada F, utilizando dois métodos distintos, aos eventos HILDCAA. Um dos dois métodos acima citados é o proposto por Koga et al. (2011) e o outro por Kelley e Dao (2009). Foram analisadas também as repostas ionosféricas para quatro dias antes e para quatro dias depois dos dias com eventos HILDCAA para fins de comparação das repostas com e sem eventos HILDCAA. Em seguida discutem-se aqui os resultados obtidos pelas duas metodologias mencionadas acima para poder determinar se há diferença, semelhança ou alguma relação entre elas.

### 5.1 Evento de Março de 2006

#### 5.1.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera

Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, referentes ao sumário dos parâmetros, mostramos os dados de digissonda juntamente com os outros parâmetros a fim de se ter o discernimento da situação em que cada evento ocorreu. Para tanto, foi utilizado o modelo FS97, proposto por Fejer e Scherliess (1997) apresentado no quarto painel das figuras citadas acima. Este modelo mostra perturbações causadas tanto por penetração de campo elétrico, quanto de dínamo perturbado durante períodos geomagneticamente ativos. Este modelo não mostra completamente as repostas da ionosfera, mas podemos usá-lo como uma referência estatística baseada em 20 anos de dados de Jicamarca, Peru.

Nos primeiros painéis dos gráficos dispostos entre as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são mostradas a altura do pico de densidade eletrônica da camada F2 (linha vermelha), a média de referência para período calmo (linha azul) e o  $\Delta hmF2$  (linha preta) que representa as altitudes perturbadas, ou seja  $\Delta hmF2 = hmF2 - hmF2 \text{ calmo}$ . Para a média de referência de dia calmo foram usados dados de hmF2 de três dias centrados 15 dias de cada evento HILDCAA, onde o somatório diário do índice Kp fosse menor ou igual a 24 ( $\sum Kp \leq 24$ ).

Os dias de referência para período calmo escolhidos para os eventos de março, junho e dezembro estão destacados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dias de referência para o período calmo

| Março    |                 | Junho    |                 | Dezembro |                 |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
| 05/03/06 | $\sum K_p = 2o$ | 27/05/06 | $\sum K_p = 3+$ | 02/12/06 | $\sum K_p = 4o$ |
| 01/04/06 | $\sum K_p = 1+$ | 04/06/06 | $\sum K_p = 3o$ | 04/12/06 | $\sum K_p = 1-$ |
| 01/04/06 | $\sum K_p = 2o$ | 23/06/06 | $\sum K_p = 3+$ | 07/01/07 | $\sum K_p = 2-$ |

Para os quatro dias anteriores ao evento, no segundo painel da Figura 5.1 vemos que o índice AE permanece calmo por longos períodos atingindo por vezes picos de até 700 nT por poucas horas. No terceiro painel Bz apresenta grandes variações, principalmente para norte quando a velocidade do vento solar começa a aumentar. A velocidade do vento solar permanece entre 400 e 500 km/s na maior parte do tempo como apresentado no quinto painel. No sexto painel o SYM-H não apresenta geofetividades significativas, embora tenha chegado um fluxo de alta velocidade (*high-speed stream*). O índice Kp permanece baixo, em torno de 2, atingindo valor 3 às 14h do dia 15/03 no sétimo painel. Como o índice Kp é proporcional ao grau de perturbação global do campo magnético terrestre, observa-se que neste período não houve perturbações relevantes. O índice F10.7 permaneceu em valores abaixo de 80 durante o período no último painel. Como o ano de 2006 se encontra em fase descendente do ciclo solar 23, os valores de F10.7 neste estudo se mostraram sempre baixos.

No primeiro painel vemos a inibição do pico pré-reversão (PRE) em três dias (14, 16 e 17 de março). A causa se deve, possivelmente, a reversão para norte do Bz.

Na Figura 5.2 temos plotados todos os parâmetros para o período HILDCAA. As linhas verticais tracejadas, que incluem todos os painéis da figura, sinalizam o início e o término do evento. Vemos que todos os requisitos que definem o fenômeno foram atendidos. O índice AE apresenta-se bem perturbado, atingindo pico acima de 1000 nT no dia 19/03 às 08:50 (1017 nT) e às 18:55 (1006 nT), e no dia 21/03 às 13:20 (1149 nT), às 14:15 (1167 nT) e às 14:45 (1092 nT). As flutuações de Bz ficaram em torno de zero com amplitudes entre  $\pm 10$  nT. Suas oscilações são bem mais relevantes do que comparadas com os períodos anteriores e posteriores ao evento. A causa possivelmente se deve a ondas de Alfvén presentes no vento solar (GUARNIERI, 2005). A velocidade do vento solar teve um aumento permanecendo por várias horas em volta de 700 km/s.

O SYM-H mostrou que o evento encontra-se durante a fase de recuperação da tempestade magnética que o antecedeu. O índice Kp atingiu valores acima de 4 algumas horas antes do início do evento, mas durante o evento ele não ultrapassou aquele valor. Os valores de F10.7 ficaram em torno de 75. O modelo FS97 mostrou que durante o evento HILDCAA de março houve influência tanto de penetração de campo elétrico quanto de dínamo perturbado. O hmF2 se mostrou um pouco mais elevado que a média de dia calmo, com exceção da noite do dia 20/03, no qual a partir das 18 h o hmF2 apresentou uma queda de elevação, isto é, inibição PRE.

Na Figura 5.3 apresentamos as condições para quatro dias após o evento. Notamos que o índice AE voltou a ficar sem grandes alterações. Bz voltou a ter oscilações menos expressivas comparadas com o período anterior. A velocidade do vento solar ficou em torno de 380 km/s. O índice Kp mostrou que não houve inquietações e o F10.7 ficou em torno de 75. O modelo FS97 mostrou que não aconteceram grandes transtornos. O hmF2 se apresentou menor que a média de referência para dia calmo no dia 22/03 a partir das 20h, possivelmente devido a continuação do campo elétrico de dínamo perturbado e no dia 23/03 por efeito conjunto de penetração de campo elétrico e dínamo perturbado.

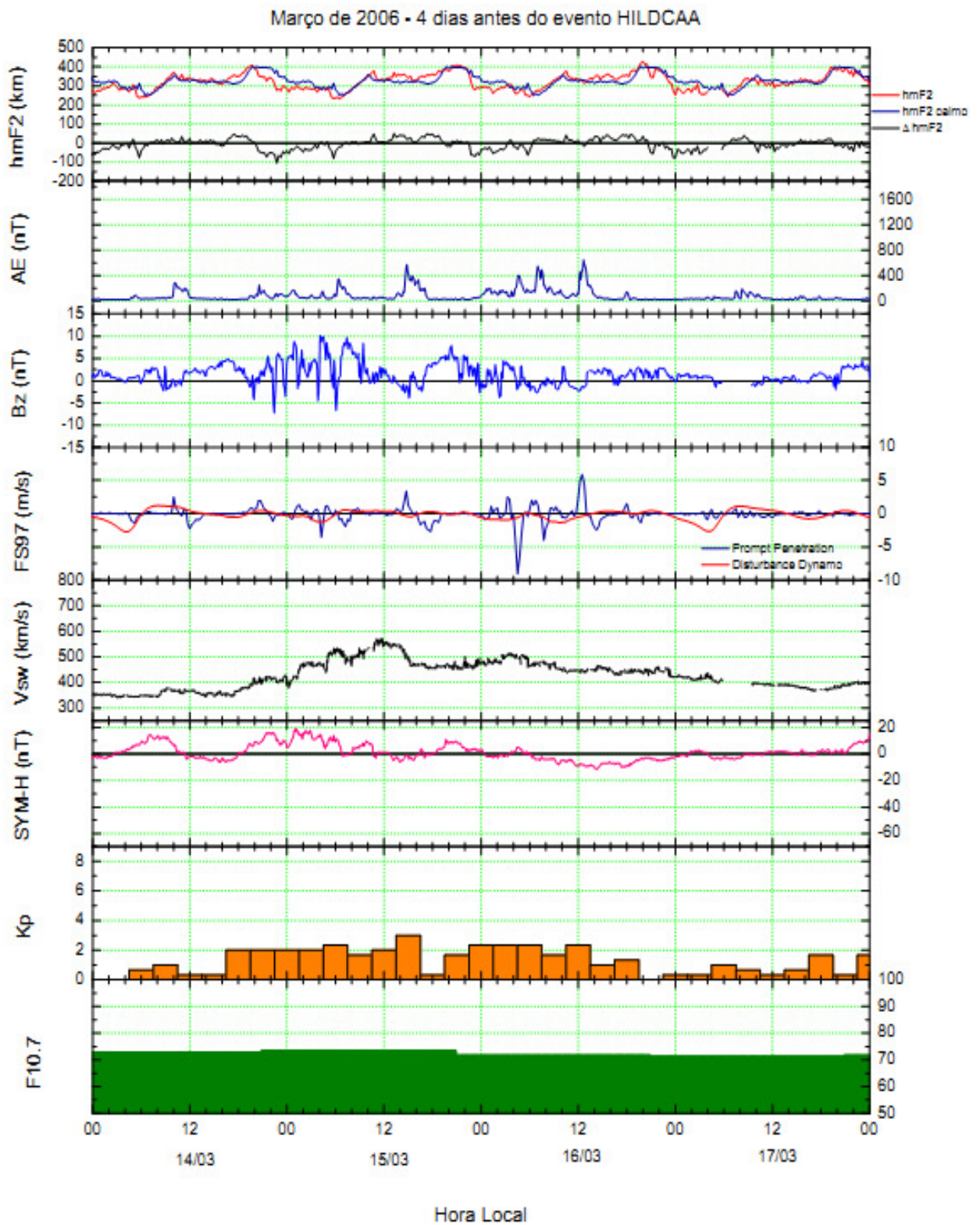


Figura 5.1: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de março.



Março de 2006 - Evento HILDCAA

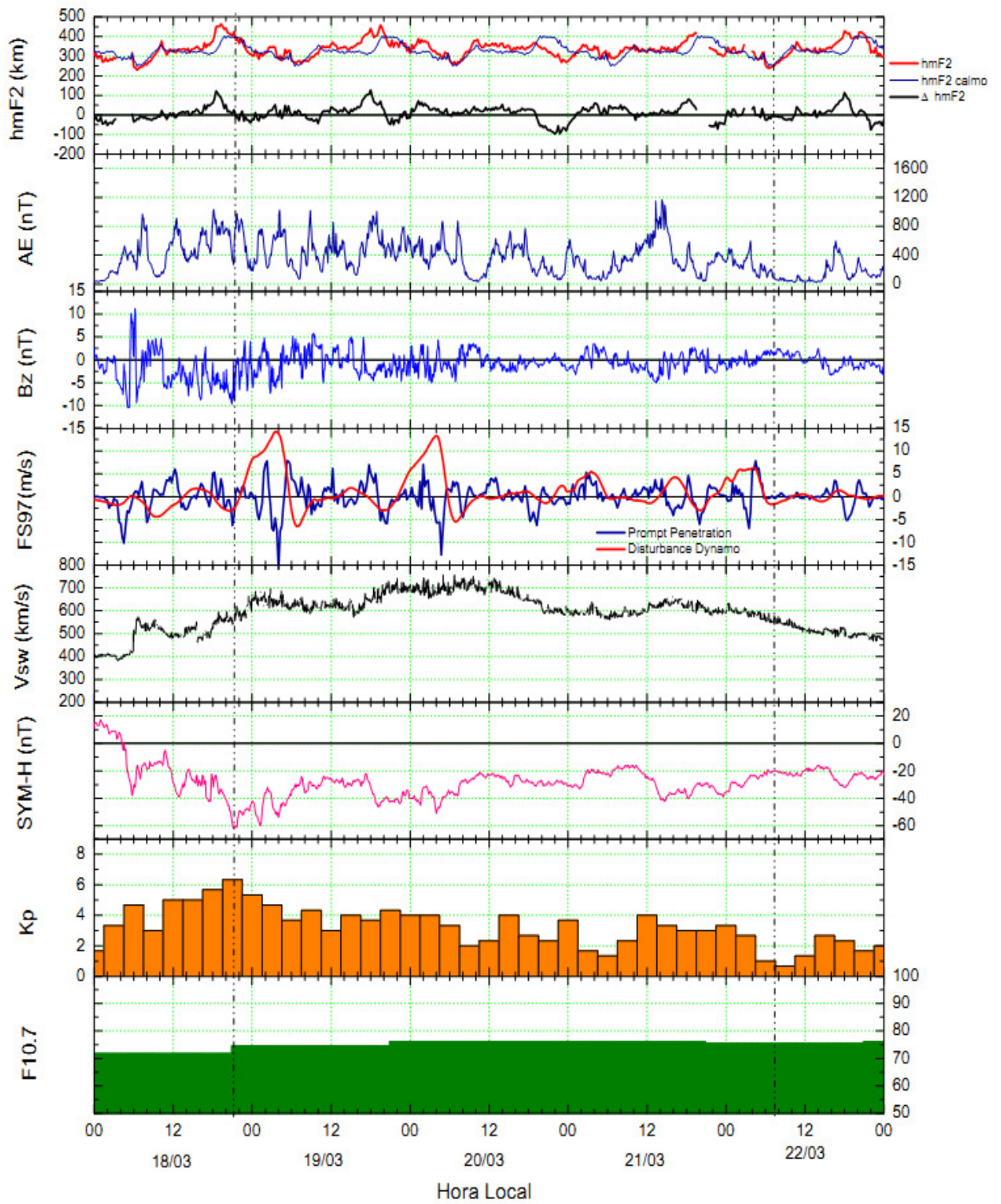


Figura 5.2: Evento HILDCAA. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno.

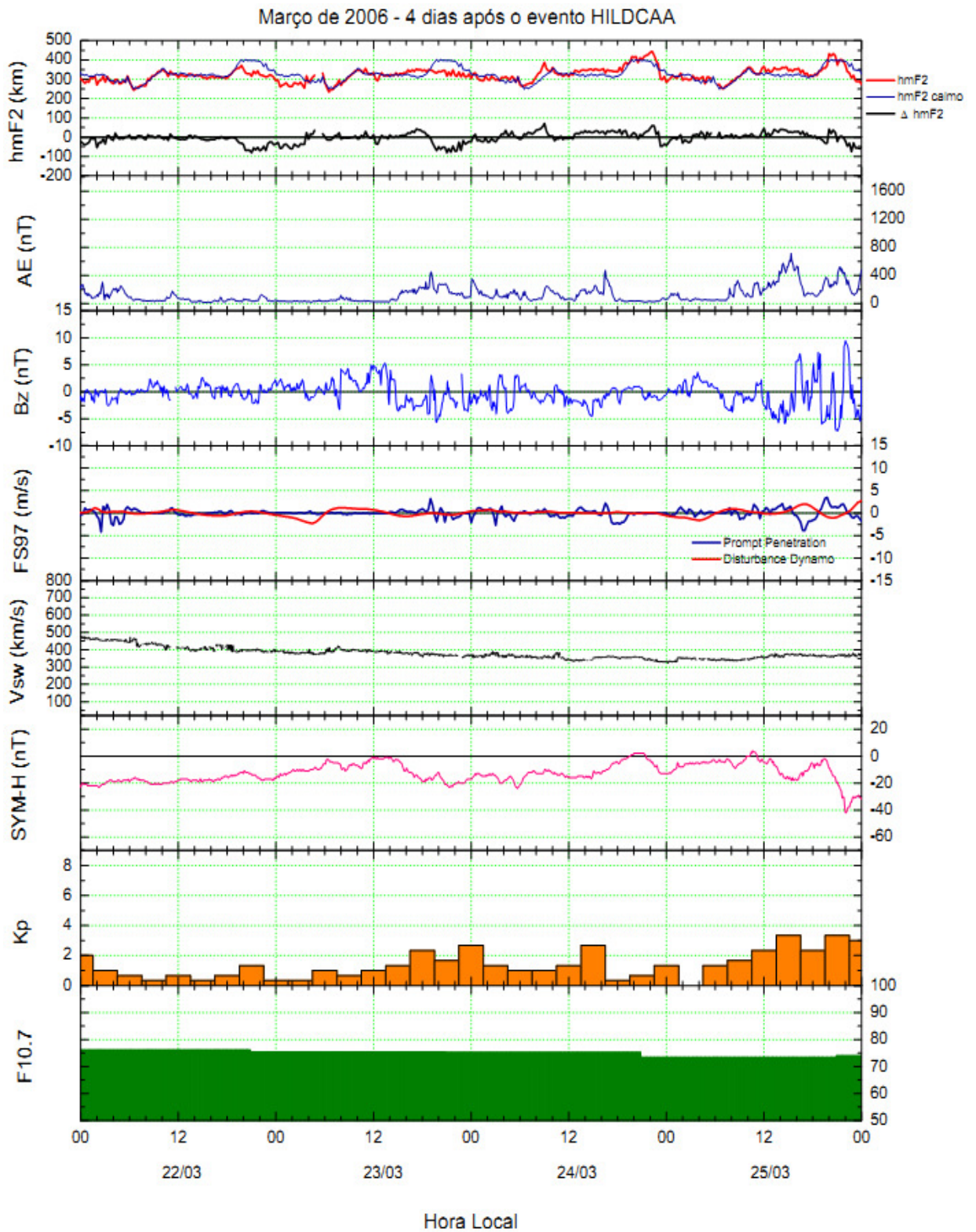


Figura 5.3: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de março.



### 5.1.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011)

Como foi descrito anteriormente, no capítulo 4, a metodologia citada em Koga et al. (2011) representa uma análise estatística da altitude perturbada do pico da região F equatorial sob a região de São Luís em decorrência do campo elétrico interplanetário estimado na localidade da “bowshock” a partir de medidas do satélite ACE na posição Lagrangiana 1 durante evento HILDCAA.

Os dados da variação de altura ( $\Delta h_{mF2}$ ) em São Luís e os dados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) na localidade da “bowshock” foram filtrados com filtro passa alta a fim de se permitir apenas efeitos da penetração direta de campos elétricos, visto que os efeitos de dínamo perturbado são de longa duração e, portanto, de baixa frequência. A frequência de corte foi referente a  $9,26 \cdot 10^{-5}$  Hz ( $T = 3h$ ). Os gráficos da Figura 5.4 mostram as amplitudes no espaço Fourier durante o evento de março (incluindo os dias pré e pós-HILDCAA) após serem filtrados com filtro passa alta. Verificamos que realmente as frequências indesejadas foram cortadas.

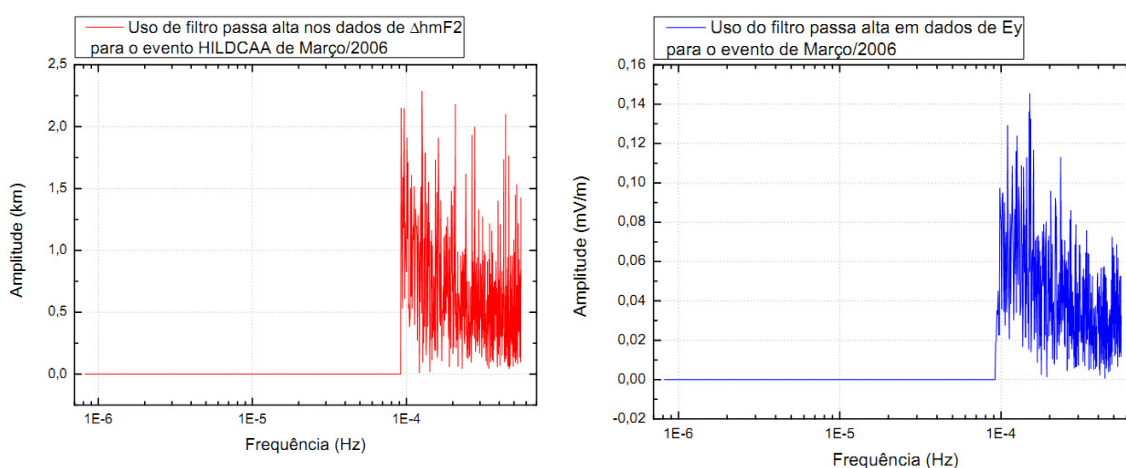


Figura 5.4: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta h_{mF2}$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

Foram escolhidos dois horários representativos para os períodos diurno e noturno para se fazer a análise de correlação de Pearson. Estes horários são os mesmos descritos segundo a metodologia em questão. Gostaríamos de lembrar que esses horários não foram escolhidos aleatoriamente. Eles foram estabelecidos por terem apresentado picos quando se fez uso do modelo empírico do Fejer e Scherliess (1997). Estes horários estão entre a faixa que vai das 02 h até às 04 h LT (noite) e entre 10 h até às 12 h LT (dia). Os

coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para estes horários mantendo-se os valores de  $\Delta hmF2$  fixos e antecedendo os valores do  $E_y$  para cada 15 minutos para os atrasos de  $\tau = 15, 30, 45$  e 60 min. Feito isso, foram elaborados os gráficos dos coeficientes de correlação com os respectivos atrasos temporais, dados em horas decimais. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6.

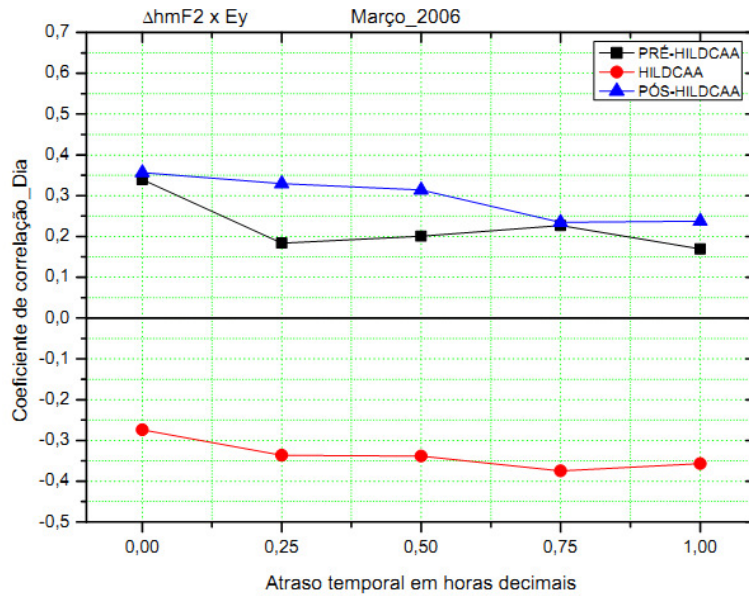


Figura 5.5: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período diurno.

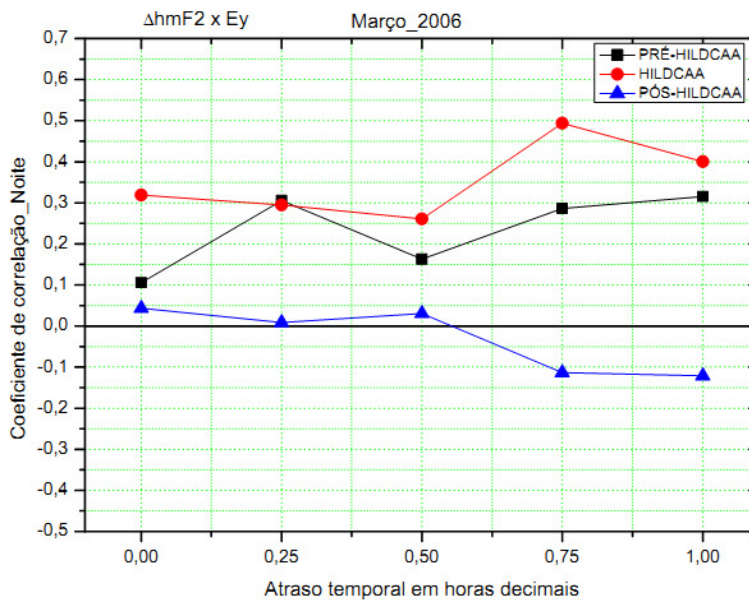


Figura 5.6: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período noturno.

Os gráficos das Figuras 5.5 e 5.6 representam a análise de correlação. A ordenada mostra os valores do coeficiente de correlação, enquanto que a abscissa indica a atraso temporal em horas decimais. Ou seja, para o tempo de 0,00 temos os valores simultâneos, para 0,25 os valores para um atraso de 15 minutos e assim sucessivamente. A linha vermelha representa o período do evento HILDCAA, e as linhas preta e azul os períodos pré e pós-HILDCAA, respectivamente. Percebemos que para os dias do evento o coeficiente permaneceu negativo durante o dia e positivo durante a noite. O valor dos coeficientes de correlação se mostra pequeno, porém a intenção era observar o comportamento do fenômeno, e para este fim o resultado foi apropriado. Comparando os valores de correlação para este evento vemos que eles se mostram menores para o período representativo do dia do que para o da noite. Este resultado sugere que a resposta da ionosfera equatorial em relação à penetração de campo elétrico interplanetário é um pouco mais rápida durante a noite, atingindo seu máximo para um atraso de 45 minutos, decaindo após esse período. Como o ano de 2006 se trata de fase descendente do ciclo solar 23 os valores de F10.7 se mostraram pequenos, o que resultaria em uma ionosfera menos condutora do que em períodos de máximo solar, porém isso não altera o fato de que durante o dia os processos de ionização devido à radiação solar são efetivos. Conseqüentemente a ionosfera se mostra mais sensível à penetração de campo elétrico durante a noite.

Este resultado difere do resultado apresentado em Koga et al. (2011). Neste, o evento HILDCAA e o pré-HILDCAA se mostram com correlações positivas durante o dia e correlações negativas durante a noite, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.2. No pós-HILDCAA ocorre o inverso. A explicação se deve possivelmente ao efeito de um valor médio efetivo do campo elétrico interplanetário, cuja hipótese não será aqui estudada em detalhe. Quando o campo elétrico interplanetário  $E_y$  (IEF) apresenta variação positiva (amanhecer-anoitecer), a penetração de campo elétrico para a ionosfera equatorial é positiva (leste-oeste) durante o dia, conseqüentemente a correlação é positiva durante o dia (WEI et al., 2008). Já para o período noturno a situação se mostra de correlação negativa. Portanto, apesar do nosso resultado ser diferente do apresentado em Koga et al. (2011) a metodologia se mostra satisfatória por ter explicado de maneira eficiente o evento em questão, o que pode ser constatado comparando os gráficos das Figuras 5.5 e 5.6 com os gráficos da Figura 5.7.

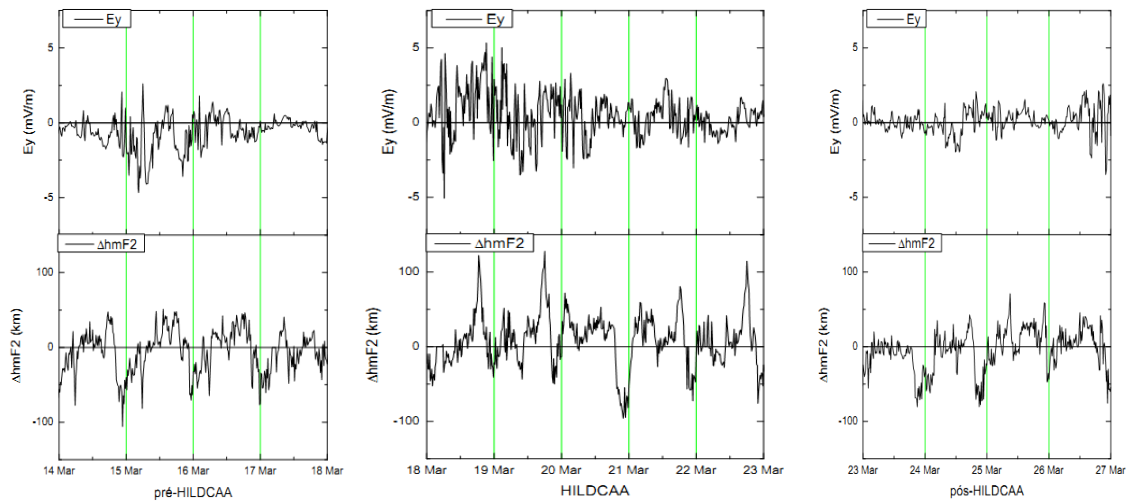


Figura 5.7: Dados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário e da altitude perturbada para o evento de março, incluindo os quatro dias anteriores e posteriores. Comparando-se com o resultado obtido pela metodologia Koga et al. (2011) podemos comprovar sua eficiência para análise desse tipo de evento.

Com os resultados da correlação foi feita a análise da correlação cruzada que está demonstrada na Figura 5.8. A ordenada representa os coeficientes de correlação para o período representativo da noite e a abscissa representa os coeficientes de correlação para o período representativo do dia. Os valores ao lado dos símbolos indicam o atraso entre os valores médios de  $E_y$  tomados numa certa faixa de tempo e o valor de  $\Delta hmF2$ , sabendo que a variação de  $E_y$  ocorre antes da variação de  $\Delta hmF2$ , já que esta é consequência daquela. Portanto 60' significa atraso de 60 minutos. Sendo assim, a partir de 00' tem-se a cada símbolo o valor do coeficiente de correlação, tanto para o dia quanto para a noite, seguindo a sequência de atrasos. O gráfico da correlação cruzada mostra mais rapidamente os valores adotados e o comportamento do fenômeno em comparação com os dias anteriores e posteriores. Para este evento HILDCAA a correlação se mostra oscilatória de noite (0,3 ~ 0,5), enquanto que de dia predomina na faixa de -0,35.

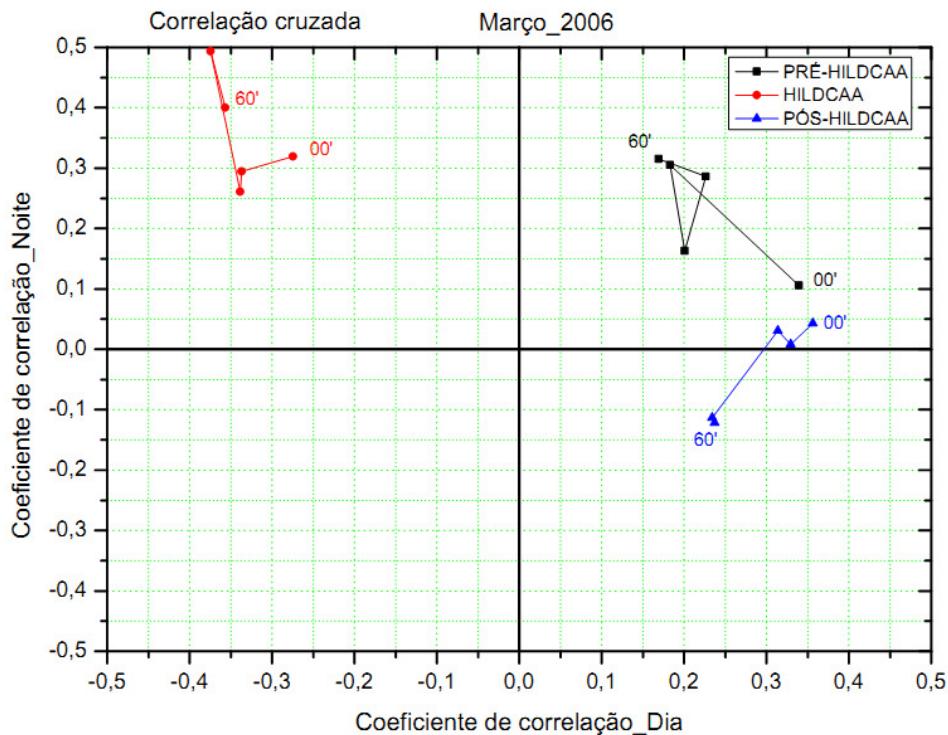


Figura 5.8: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.

Uma reversão abrupta do Bz para a direção sul causa aumento de convecção do plasma na magnetosfera através da reconexão magnética o que pode criar um efeito equivalente a um campo elétrico de penetração do tipo undershielding. Neste caso a penetração do IEF é classificada como “penetração simples” de acordo com Wei et al. (2008). No caso em estudo, ocorre a “penetração múltipla”. Isso se dá quando ocorre oscilação do Bz entre as direções norte e sul. Para o evento HILDCAA de março a análise da correlação cruzada mostra que os coeficientes de correlação foram positivos e negativos durante a noite e durante o dia, respectivamente, correspondendo ao caso de penetração de campo elétrico overshielding. Sendo assim, a contribuição desse evento na ionosfera foi o de enfraquecer o campo elétrico zonal devido ao dínamo dos dias calmos. Este fato é mostrado como inibição do PRE no horário do anoitecer.

Nota-se que os sinais opostos dos coeficientes de correlação para o caso HILDCAA (linha e pontos vermelhos da Figura 5.8), isto é, positivos durante a noite e negativos durante o dia, são coerentes com uma penetração de campo elétrico overshielding. Para o caso de pós-HILDCAA a maioria dos pontos apresentou correlações do mesmo sinal, ou seja, coeficientes positivos tanto durante o dia quanto durante a noite. Isto é incompatível com a configuração de penetração de campo elétrico. Este fato

possivelmente mostra a ocorrência de penetração de campo elétrico durante o período HILDCAA e praticamente nada de penetração no pré e pós-HILDCAA.

### 5.1.3 Resultados segundo a metodologia Kelley e Dao (2009)

A metodologia apresentada em Kelley e Dao (2009) estabeleceu a correlação entre o campo elétrico interplanetário, e a deriva vertical obtida em Jicamarca. No nosso caso a correlação foi feita entre a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) e a altitude perturbada ( $\Delta hmF2$ ) sobre a região de São Luis, Maranhão, obtida pela diferença do parâmetro ionosférico hmF2 entre os dias em estudo e uma média para dias calmos, como já foi explicitado anteriormente.

O filtro passa banda foi utilizado em ambos os conjuntos de dados, tanto em  $\Delta hmF2$  quanto em  $E_y$ , e para tal foram usados como frequência de corte as seguintes frequências;  $2 \cdot 10^{-5}$  Hz para o corte em passa alta, e desse modo obstruir as interferências de efeitos diurnos, e  $2 \cdot 10^{-4}$  Hz para o corte em passa baixa a fim de rejeitar ruídos de alta frequência que não são mapeados. Os gráficos da Figura 5.9 mostram como os dados do evento de março ficaram após o filtro passa banda.

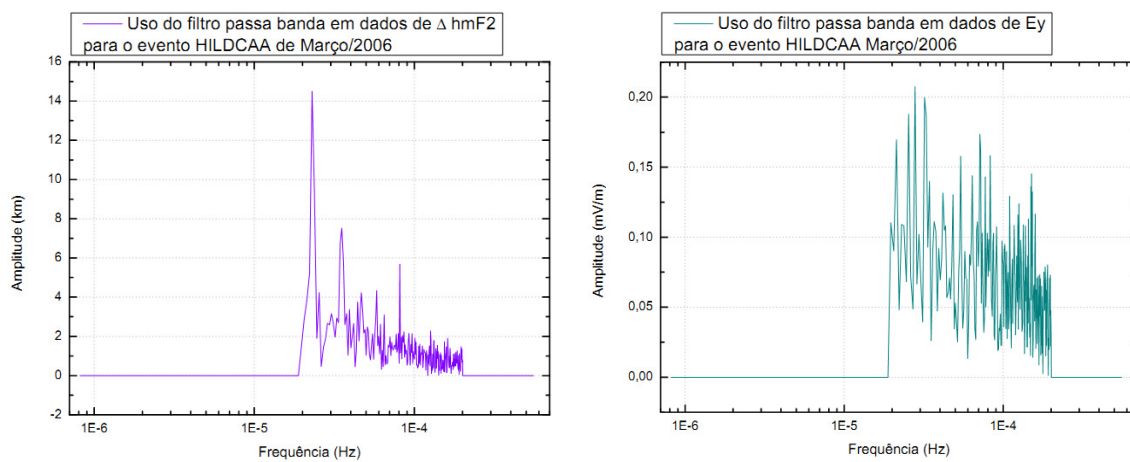


Figura 5.9: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta hmF2$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

A partir dos dados filtrados foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson dentro de uma janela que abrange duas horas e é centrada na hora dada, como já foi explicitado anteriormente, para o dia inteiro, e não apenas para uma determinada faixa horária do



dia, como determina o método realizado em Koga et al. (2011). Os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12. É válido lembrar que nos gráficos apresentados nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 o painel da base representa a correlação para os dados filtrados, enquanto que o painel do topo os dados se apresentam inalterados, sem nenhum uso de filtro.

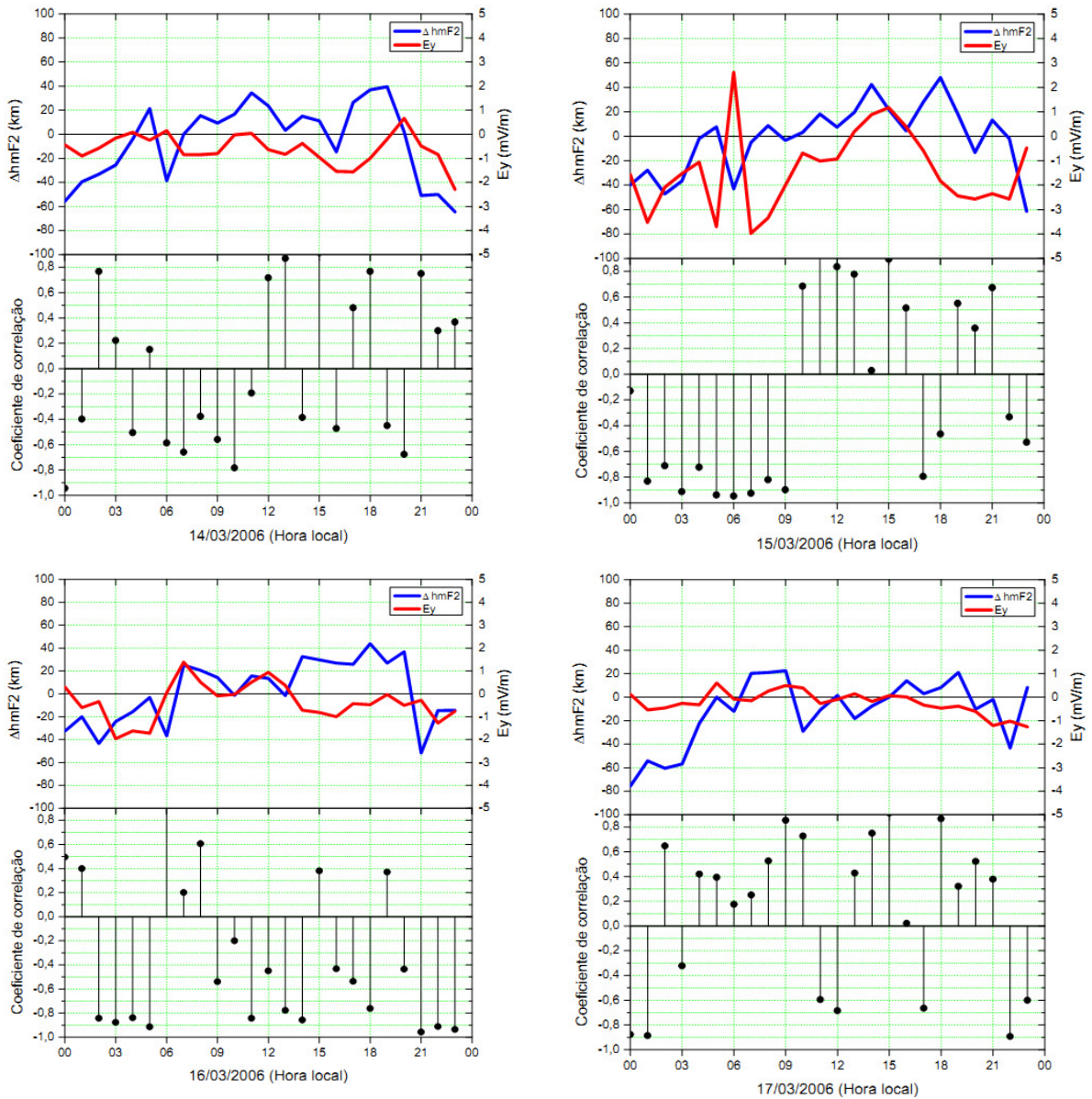


Figura 5.10: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de março.

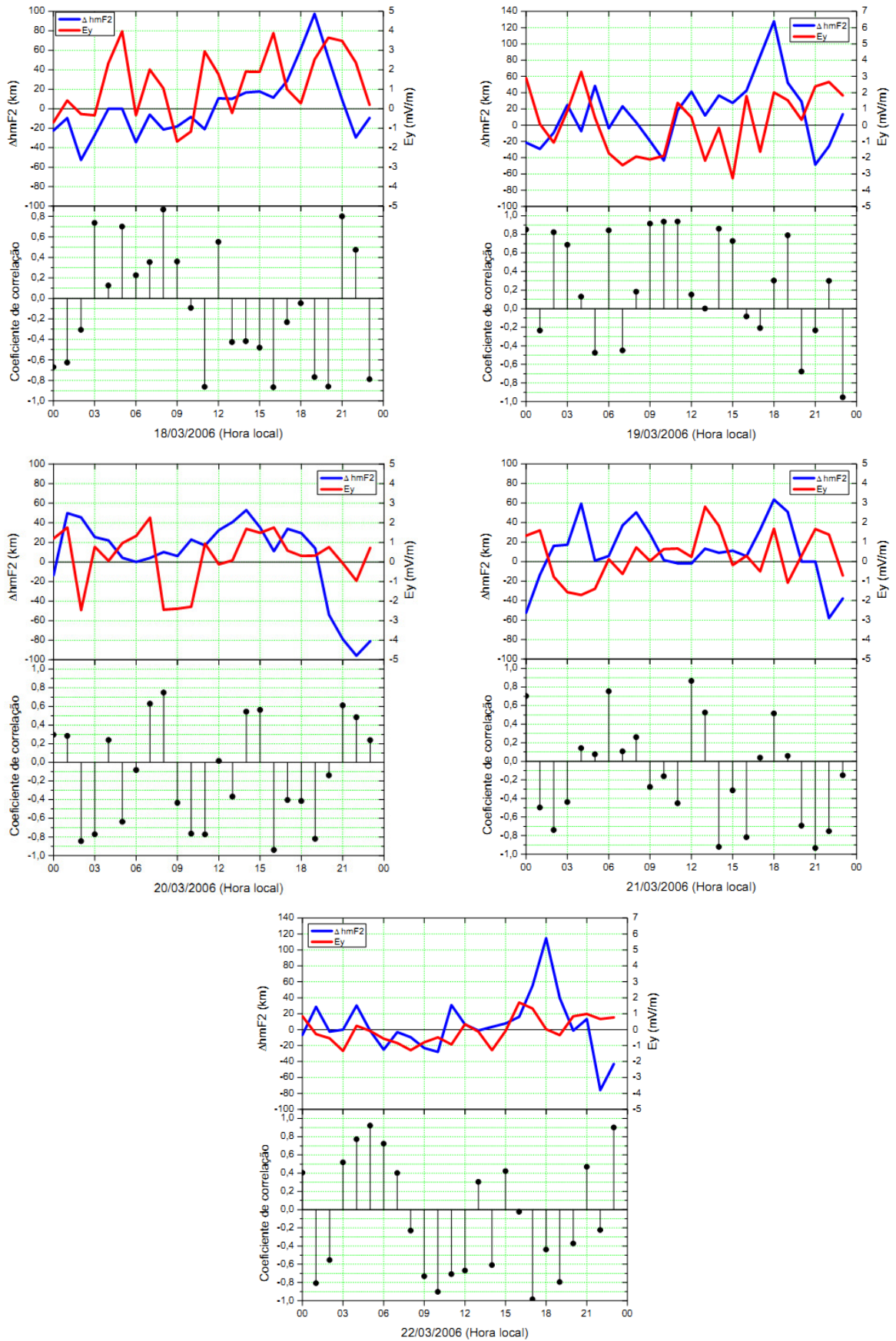


Figura 5.11: Resultados para o evento HILDCAA de março.

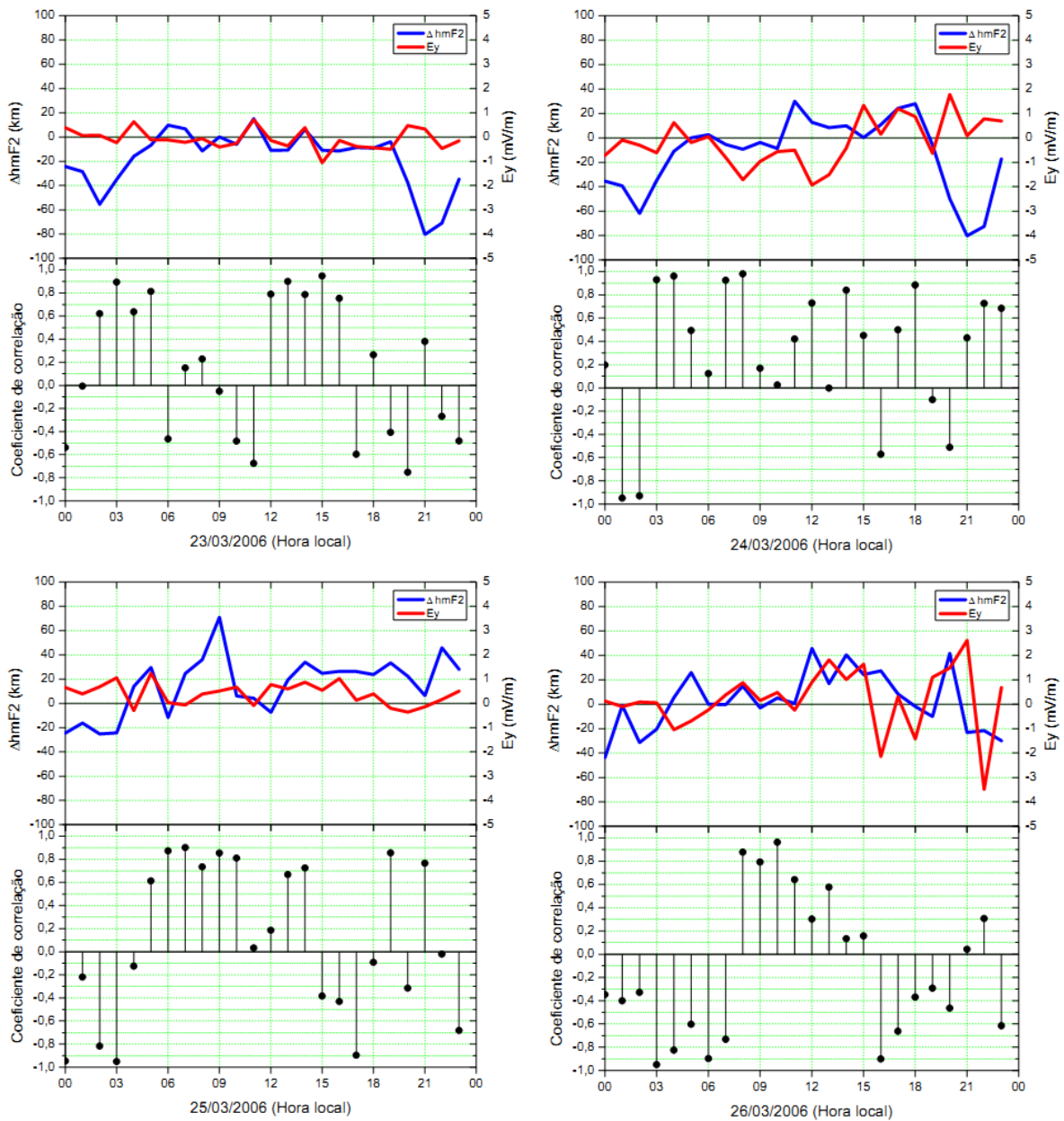


Figura 5.12: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de março.

A perfeita correlação apresentada nos resultados do Kelley e Dao (2009) não se repetiu. É válido ressaltar que essa correlação perfeita só ocorreu em um único dia, os demais dias do evento estudado pelos autores da metodologia em questão apresentaram correlações bastante oscilatórias, das quais os nossos resultados se aproximam.

O foco da metodologia vigente é explorar a dependência da hora local da penetração. Na Figura 5.10 vemos que os valores de correlação permaneceram bastante elevados, e que geralmente ficaram negativos durante a noite e positivos durante o dia. A exceção se deu para o dia 16/03/2006, onde praticamente o dia inteiro a correlação foi negativa.

Os gráficos da Figura 5.11 representam os dias do evento HILDCAA. Geralmente das 21h até às 03h os valores se apresentaram negativos, porém durante o dia há muita variabilidade. Não foi encontrado um padrão para o período diurno durante o evento.

A conclusão admitida pelos autores da metodologia corrente é que a penetração de campos elétricos é dependente da hora local, sendo anti-correlacionada no período noturno e correlacionada para os demais horários. Para este evento HILDCAA, tanto para os quatro dias anteriores e posteriores ao evento, só podemos concluir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não há nenhum padrão.

Este mesmo período que foi estudado por Kelley e Dao (2009), o qual lhes permitiu tal conclusão, também foi estudado por Wei et al (2008). Estes últimos também verificaram uma alta dependência com a hora local, porém para mais precisamente o dia 15 de novembro de 2003, que é o caso da perfeita correlação mostrada na Figura 4.5.

## 5.2 Evento de Junho de 2006

### 5.2.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera

A Figura 5.13 representa quatro dias antes do evento de junho. Vemos que o índice AE se apresenta bastante calmo. Bz oscilou em torno de pequenos valores positivos. A velocidade do vento solar, Vsw, apresentou-se em decréscimo de 600 km/s a 300 km/s. O SYM-H não apresentou alterações significativas, o Kp está em torno de 2 e o índice F10.7 apresentou valores por volta de 79. O modelo FS97 não apresentou perturbações e a altura do pico da camada F2 se comportou muito semelhantemente à média de referência para dia calmo.

A Figura 5.14 apresenta as condições nas quais aconteceu o evento HILDCAA de junho. Novamente as condições para definição do fenômeno foram atendidas. O índice AE permaneceu durante todo o período em alta atividade, porém só atingiu pico de 1000 nT apenas uma vez, o que é suficiente pela definição dada em Tsurutani e Gonzalez (1987), no dia 06/06 às 16:15 (1035 nT). O Bz oscilou significativamente durante a maior parte do período. A Vsw teve um acréscimo em relação ao período anterior, ficando em torno 650 km/s. O índice SYM-H mostra que o evento aconteceu

na fase de recuperação da tempestade magnética. O índice Kp também se mostra abaixo de 4, com exceção do dias 06/06 às 14h e 07/06 às 18h, mas que pode ser explicado por erros na medição como por exemplo, caso ocorra uma subtempestade em um dos setores onde estão concentrados alguns dos observatórios, podem ocorrer pequenas perturbações na computação dos dados (ROSTOKER, 1972). O índice F10.7 atingiu valor máximo de 85, mas foi decrescendo no decorrer dos dias. O modelo FS97 mostrou grande agitação com penetração de campo elétrico e dínamo perturbado. Durante o evento HILDCAA de junho o hmF2 se mostrou bem mais elevado que a média de dia calmo. Note que as variações no campo elétrico de dínamo perturbado no modelo reproduzem bem a subida da camada. E como já foi mencionado anteriormente, o motivo das falhas de hmF2 geralmente alternou entre surgimento de uma camada E esporádica muito forte, ou presença da frequência crítica da camada ser abaixo do limite mínimo de percepção da digissonda.

Na Figura 5.15 temos representadas as condições para quatro dias após o evento, as quais se apresentaram calmas em todas as características até a chegada de uma nova tempestade que ocorreu às 0h do dia 15/06. A partir deste momento, todos os parâmetros se mostraram alterados.



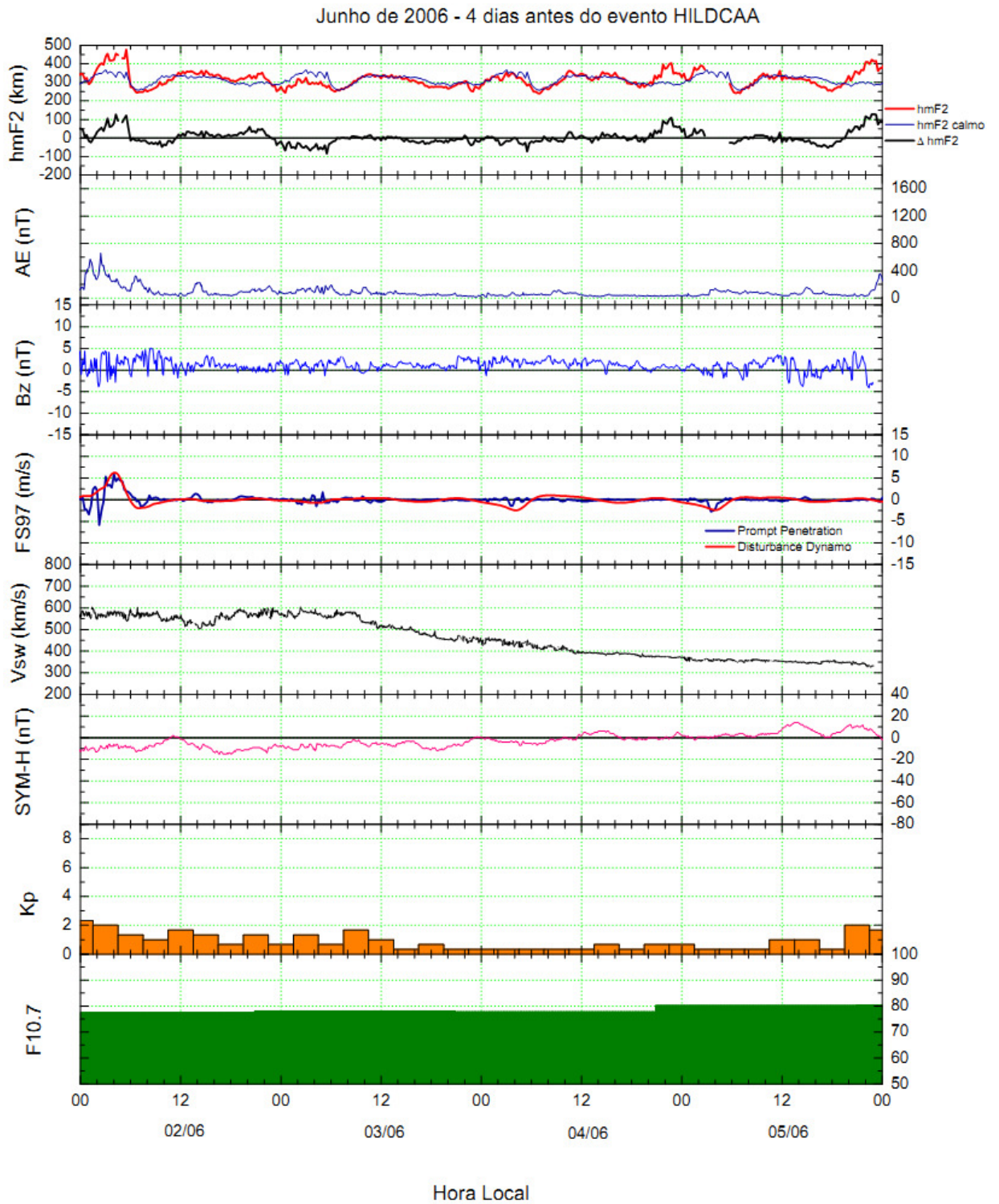


Figura 5.13: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de junho.

Junho de 2006 - Evento HILDCAA

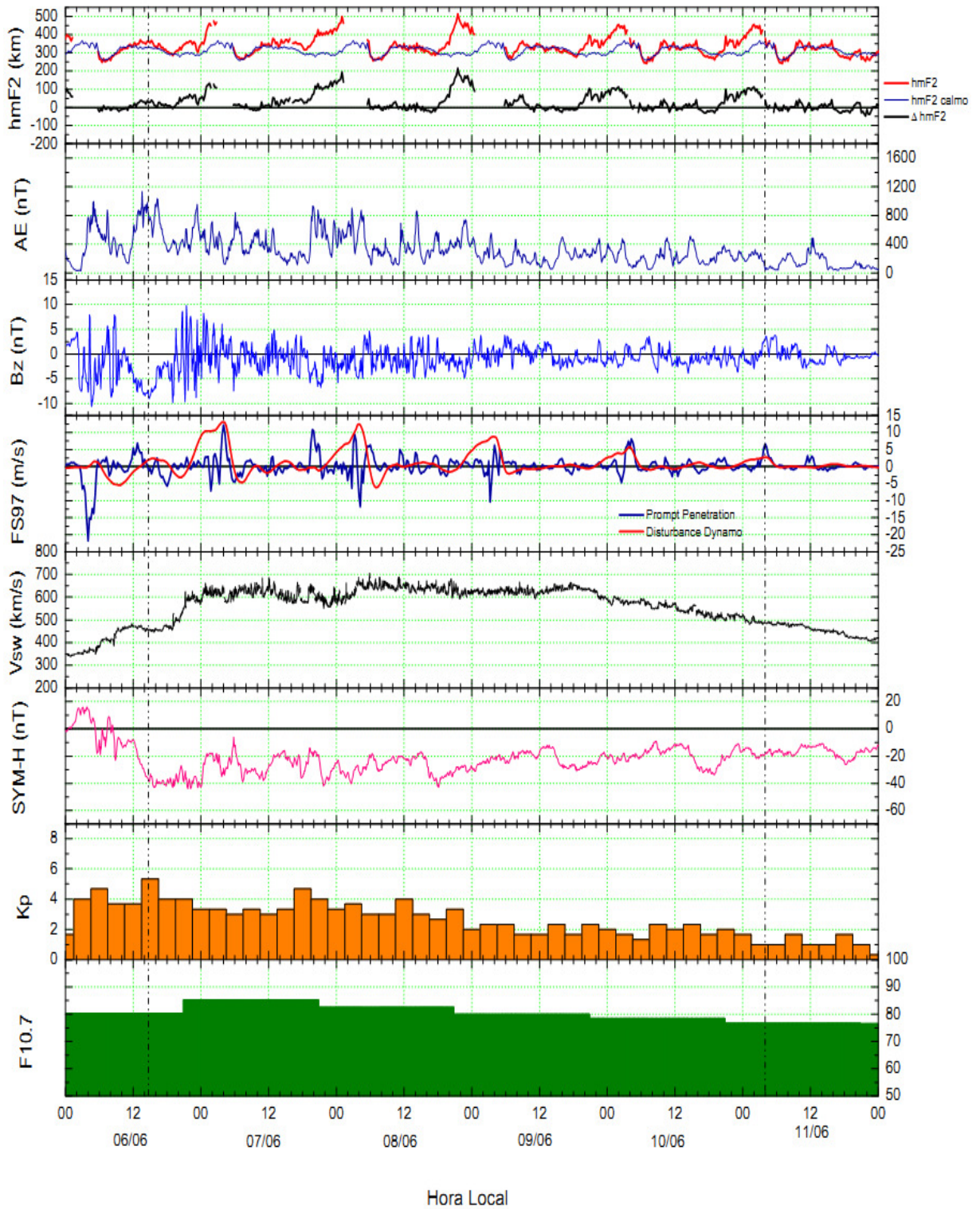


Figura 5.14: Evento HILDCAA de junho. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno.



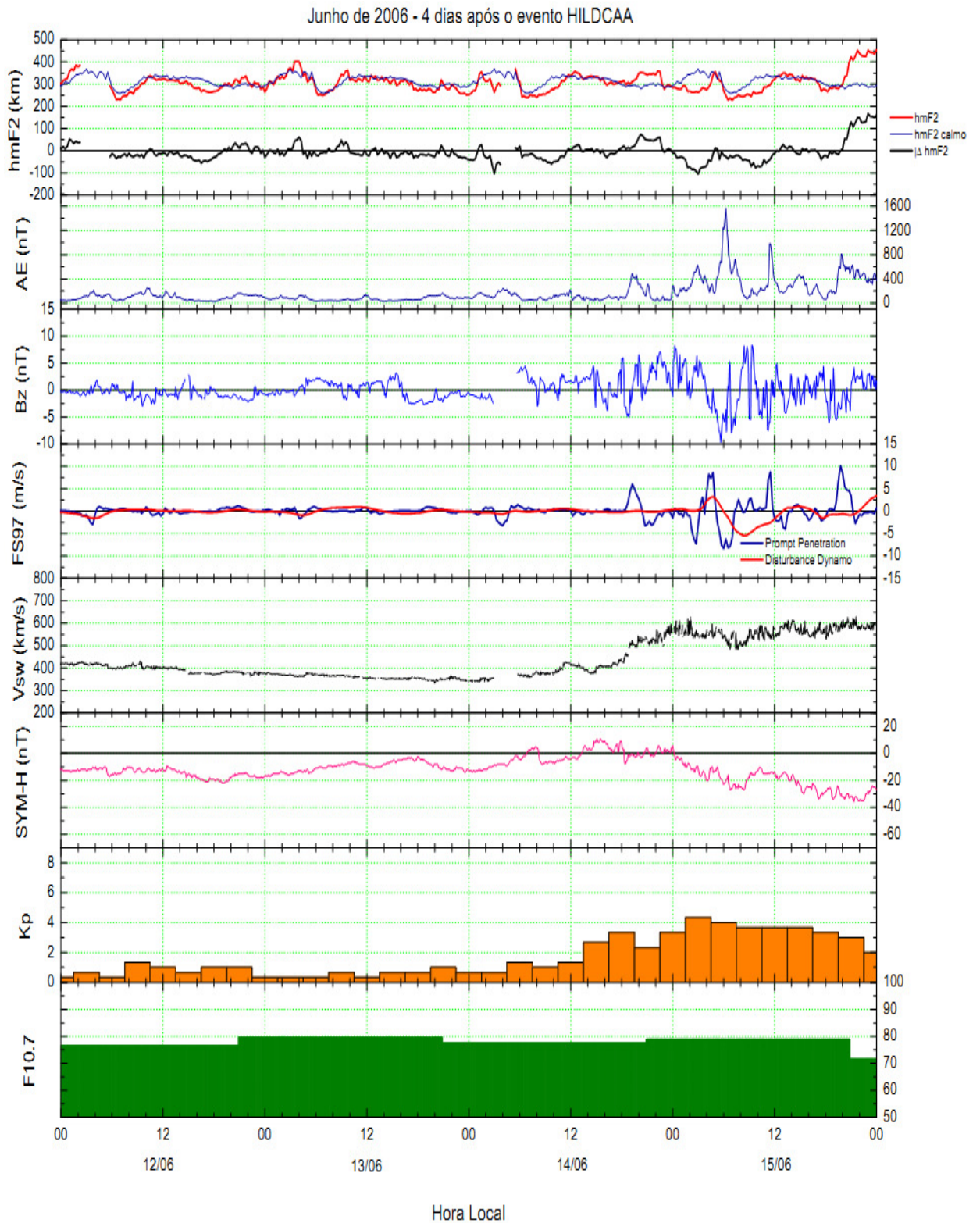


Figura 5.15: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de junho.



### 5.2.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011)

Semelhantemente ao evento de março, os dados da variação de altura ( $\Delta h m F 2$ ) em São Luís e os dados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) na magnetopausa foram filtrados com filtro passa alta, com frequência de corte de  $9,26 \cdot 10^{-5}$  Hz ( $T = 3$ h). A Figura 5.16 é semelhante a Figura 5.4, mas para o evento HILDCAA de junho (incluindo os dias pré e pós-HILDCAA).

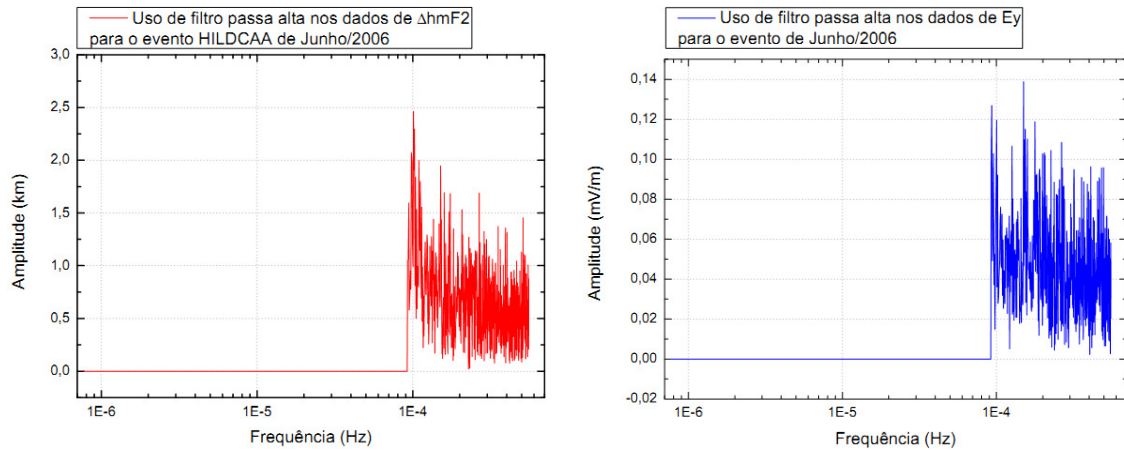


Figura 5.16: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta h m F 2$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

Os dois horários representativos para os períodos diurno e noturno, nos quais foi feita a análise de correlação de Pearson, continuam sendo os que vão entre a faixa que vai das 02 h até às 04 h LT e entre 10 h até às 12 h LT. Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para estes horários mantendo-se os valores de  $\Delta h m F 2$  fixos e antecedendo os valores do  $E_y$  para cada 15 minutos para os atrasos de  $\tau = 15, 30, 45$  e 60 minutos, dado em horas decimais. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.17 e 5.18.

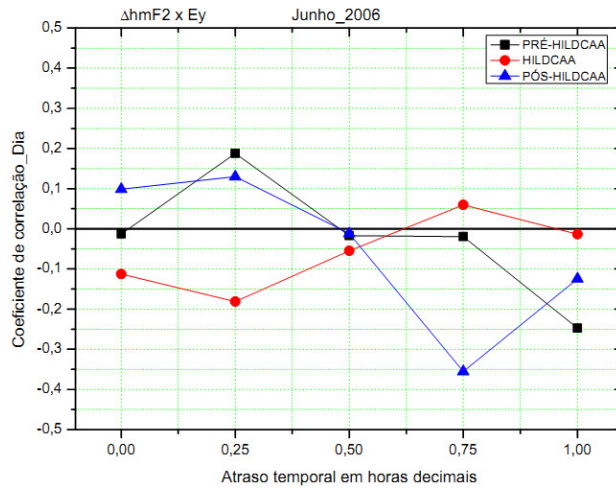


Figura 5.17: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período diurno.

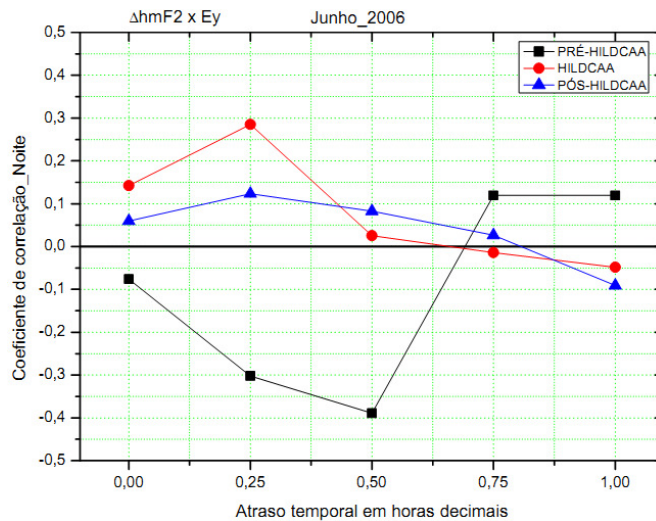


Figura 5.18: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período noturno.

Os gráficos das Figuras 5.17 e 5.18 representam a análise de correlação, onde a ordenada representa os valores do coeficiente de correlação e a abscissa indica a atraso temporal em horas decimais. A linha vermelha representa o período do evento HILDCAA, e as linhas preta e azul os períodos pré e pós-HILDCAA, respectivamente.

Logo após foi feita a análise da correlação cruzada que está mostrada na Figura 5.19, onde a ordenada representa os coeficientes de correlação para o período representativo da noite e a abscissa representa os coeficientes de correlação para o período representativo do dia. Novamente os valores ao lado dos símbolos indicam o atraso entre os valores médios de  $E_y$  e o valor de  $\Delta hmF2$ .

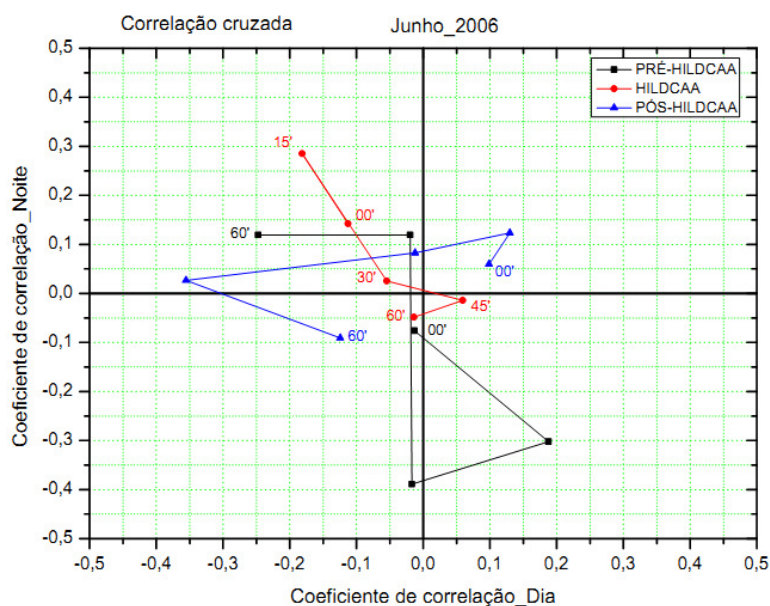


Figura 5.19: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.

Geralmente o gráfico da correlação cruzada mostra mais rapidamente os valores adotados e o comportamento do fenômeno em comparação com os dias anteriores e posteriores. Porém, para este evento ele é melhor retratado pelos gráficos da Figuras 5.17 e 5.18.

Este evento se mostrou diferente do evento de março, onde o coeficiente tinha permanecido totalmente negativo durante o dia e totalmente positivo durante a noite. Aqui, o evento HILDCAA mostra mudança de correlação tanto para o dia (de negativo a positivo) quanto para a noite (de positivo a negativo) após 30 a 45 min. Como os valores dos coeficientes de correlação foram semelhantes, não dá para sugerir que para este evento a resposta da ionosfera equatorial em relação à penetração de campo elétrico tenha sido ligeiramente mais rápida em um dos períodos. Durante o dia até os primeiros trinta minutos de atraso o coeficiente se mostrou negativo com valores baixos. Durante a noite aconteceu o mesmo comportamento durante os primeiros trinta minutos, porém com coeficientes positivos. Este resultado indica que para os primeiros trinta minutos de atraso o comportamento é semelhante ao evento de março. Sendo assim, para este período, a análise da correlação mostra penetração de campo elétrico do tipo overshielding durante o evento HILDCAA. A penetração do tipo undershielding ocorre quando há uma reversão súbita do Bz para a direção sul. Neste caso a penetração do IEF seria do tipo “penetração simples” de acordo com Wei et al. (2008). Porém, no caso em estudo, ocorre a “penetração múltipla”. Isso se dá quando Bz oscila entre as direções

norte e sul, que pode ser constatado no gráfico da Figura 5.14 e no gráfico da Figura 5.20 durante o evento HILDCAA.

Sendo assim, os sinais opostos dos coeficientes de correlação para o caso HILDCAA durante os primeiros trinta minutos, isto é, positivos durante a noite e negativos durante o dia, são coerentes com uma penetração de campo elétrico overshielding. Portanto, a metodologia em questão se mostra adequada para explicar eventos deste tipo.

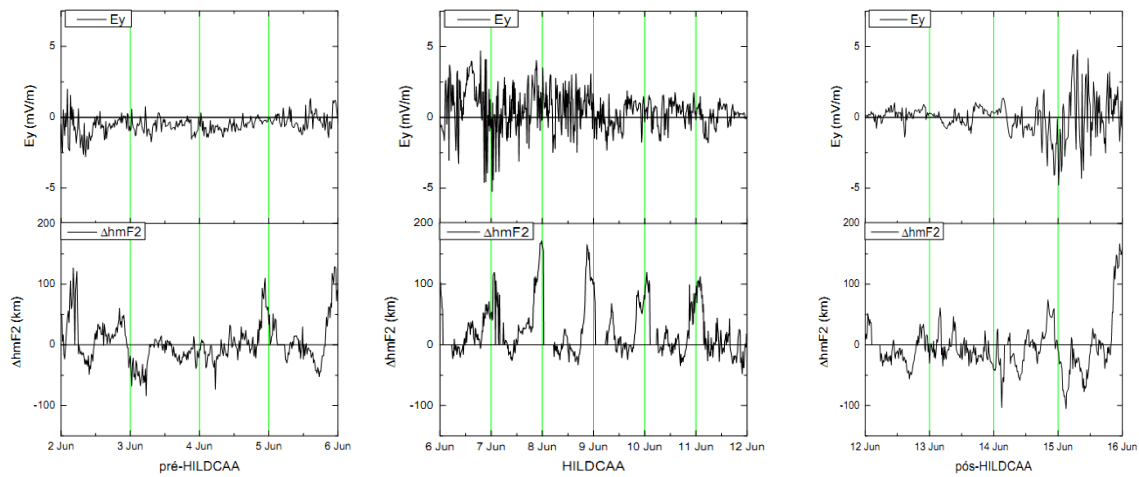


Figura 5.20: Dados não filtrados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário (painel superior) e da altitude perturbada (painel inferior) para o evento de junho.

### 5.2.3 Resultados segundo a metodologia Kelley e Dao (2009)

Nesta subseção foi estabelecida a correlação entre a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) e a altitude perturbada ( $\Delta hmF2$ ) sob a região de São Luis, Maranhão, obtida pela diferença do parâmetro ionosférico hmF2 entre os dias em estudo e uma média para dias calmos.

Os gráficos da Figura 5.21 mostram como ficaram os dados após o uso do filtro como na subseção 5.1.3.

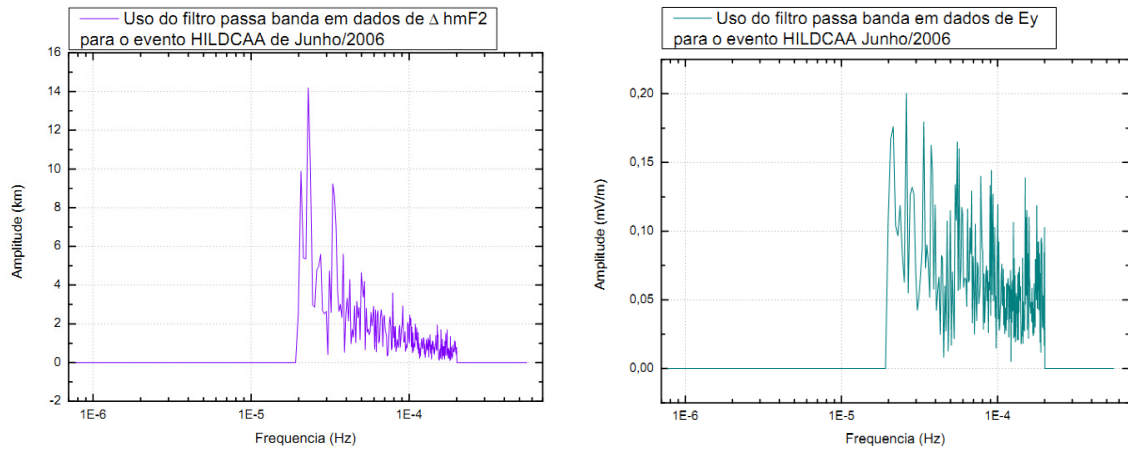


Figura 5.21: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta hmF2$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

A partir dos dados filtrados foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson dentro de uma janela que abrange duas horas, e é centrada na hora dada, como já foi explicitado anteriormente, para o dia inteiro, e não apenas para uma determinada faixa horária do dia, como determina o método realizado em Koga et al. (2011). Os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, lembrando que o painel da base representa a correlação para os dados filtrados, enquanto que o painel do topo os dados se apresentam inalterados, sem nenhum uso de filtro.



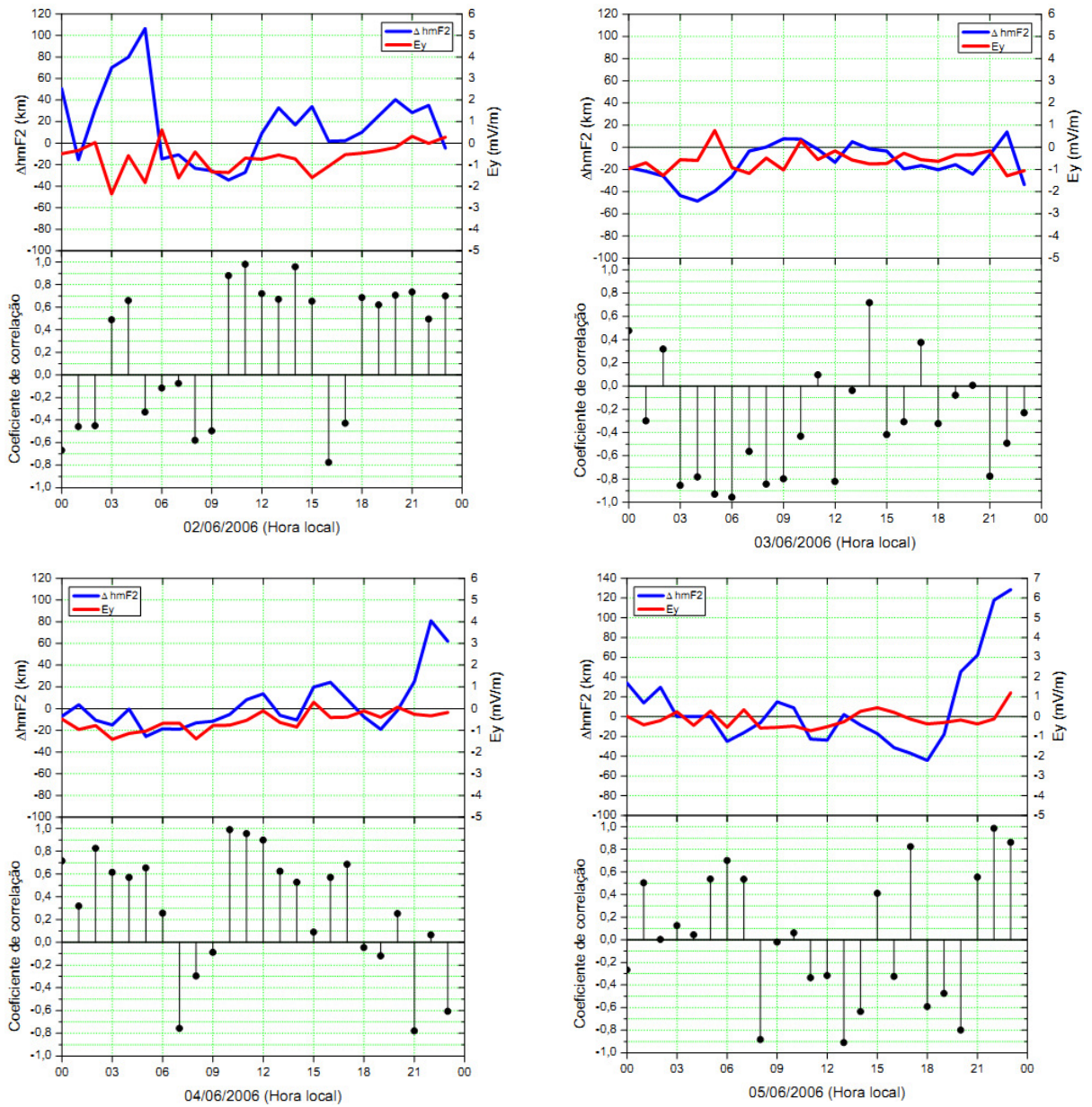


Figura 5.22: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de junho.

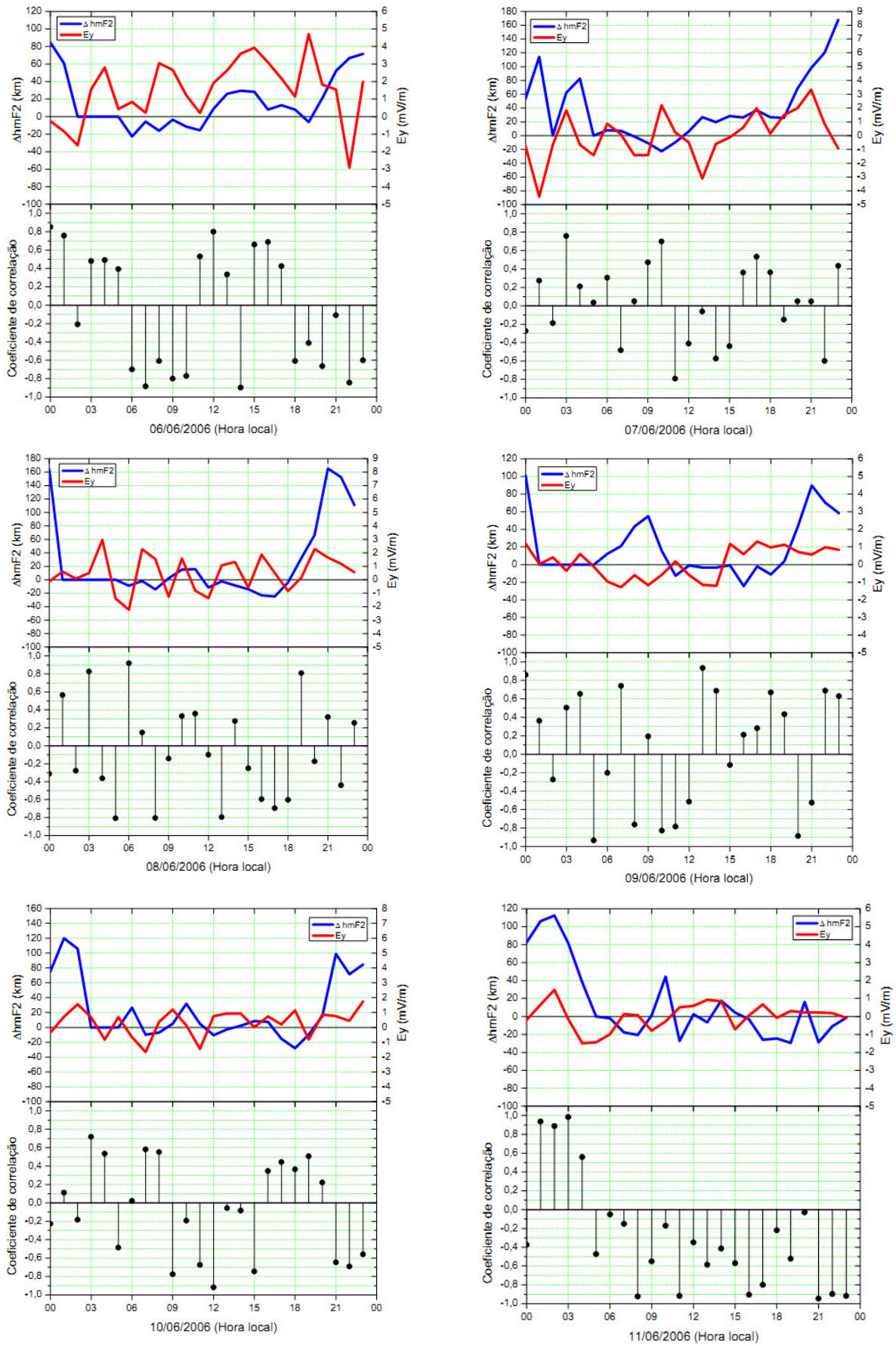


Figura 5.23: Resultados para o evento HILCAA de junho.



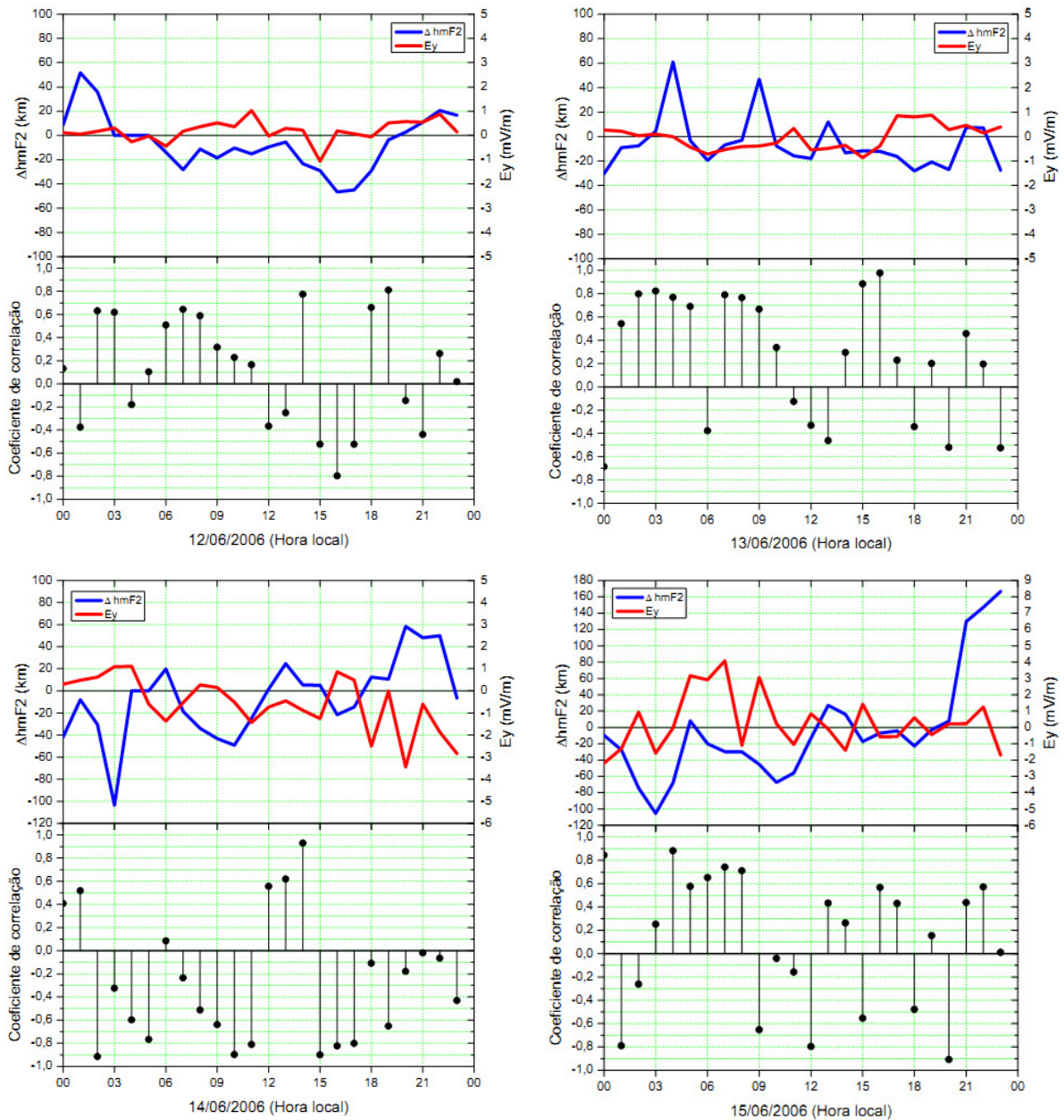


Figura 5.24: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de junho.

Também neste evento a correlação tão acurada apresentada nos resultados do Kelley e Dao (2009) não se repetiu. Os resultados gerados por esta metodologia novamente apresentaram correlações bastante oscilatórias.

Na Figura 5.22 apresentamos os resultados para os quatro dias anteriores ao evento. Vemos que, com exceção do dia 03/06/2006, a maioria dos dias apresentou correlações positivas na maior parte do dia. Os gráficos da Figura 5.23 representam os dias do evento HILDCAA. O evento de junho teve a duração de seis dias. Verificamos que os coeficientes de correlação se apresentam com certa periodicidade durante o decorrer do



dia, com exceção do último dia do evento, o dia 11/06/2006. A Figura 5.24 exibe os resultados para os quatro dias posteriores. Análogo aos quatro anteriores, a maioria dos dias apresentou correlações positivas. Mais uma vez, nenhum padrão foi encontrado.

Para este evento HILDCAA, tanto para os quatro dias anteriores e posteriores ao evento, só podemos concluir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não há nenhum padrão foi formado.

### 5.3 Evento de Dezembro

#### 5.3.1 Sumário dos parâmetros do interplanetário e da ionosfera

A Figura 5.25 apresenta as condições para quatro dias antes do evento de dezembro. Neste gráfico vemos que pouco antes do meio-dia do dia 14/12 houve a chegada de um choque interplanetário, o qual fez o SYM-H atingir valor de -206 nT às 21:55h. O choque deste acontecimento causou variações quase que simultaneamente no AE, Bz e Vsw. O índice SYM-H apresentou início súbito e pequena variação na fase inicial da tempestade (sudden storm commencement). Logo após o dia 16 as condições voltaram a ficar mais calmas.

A Figura 5.26 apresenta o período HILDCAA de dezembro. Este é o mais extenso de todos os eventos deste ano, contando com mais de oito dias. Percebemos que a tempestade iniciada no dia 14/12 completou a sua fase de recuperação, e logo em seguida uma nova tempestade ocorreu, porém bem menos intensa que a anterior (atingiu valor de SYM-H = -50 nT no dia 20/12 às 20:45h). O índice AE ultrapassou pico de 1000 nT algumas vezes, sendo que às 06:10h do dia 22/12 atingiu o valor de 1538 nT. Bz flutuou em torno de  $\pm 10$  nT com oscilações intensas, possivelmente devido a ondas de Alfvén. Vsw se mostrou crescente, e durante todo o período do evento variando sempre entre altas velocidades (acima de 500 km/s). O índice F10.7 ficou abaixo de 75 e o Kp ficou em uma média de 3.5 durante todo o evento. O modelo FS97 mostrou ocorrência de dínamo perturbado, mas durante toda a ocorrência do fenômeno os valores de hmF2 não se diferenciaram muito dos valores para dia calmo.

O último gráfico representado na Figura 5.27 mostra a situação para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de dezembro. O índice AE se mostra expressivamente

calmo.  $B_z$  não apresenta flutuações intensas, e  $V_{sw}$  decresce até atingir um nível quase estável em torno de 340 km/s. O modelo FS97 não apresenta perturbações significativas. Em relação ao hmF2 ele não se difere muito da condição para dia calmo. A falha na continuidade dos dados se deve a ausência de ionogramas a partir das 11h.

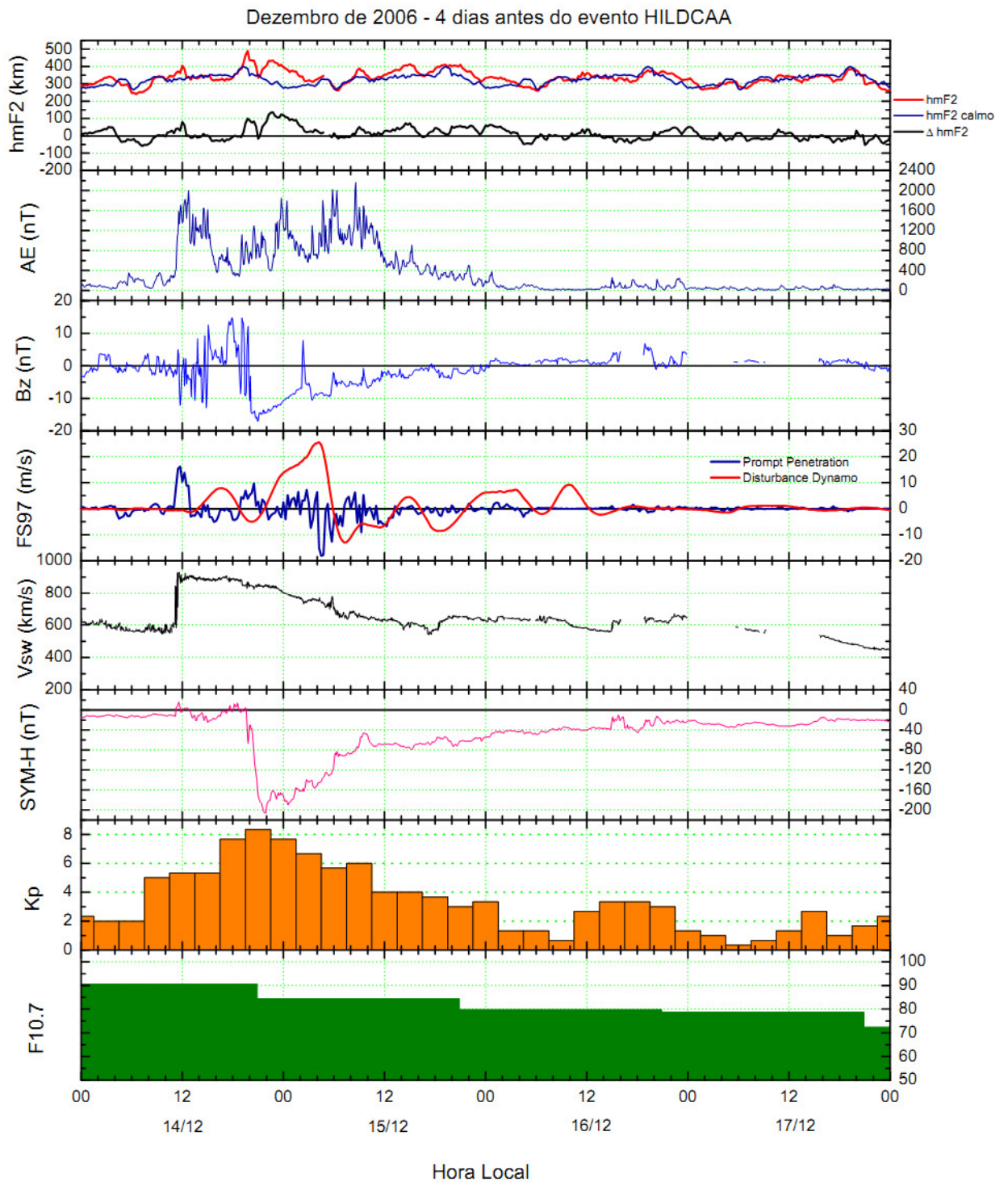


Figura 5.25: Gráfico representativo das condições para quatro dias anteriores ao evento de dezembro.

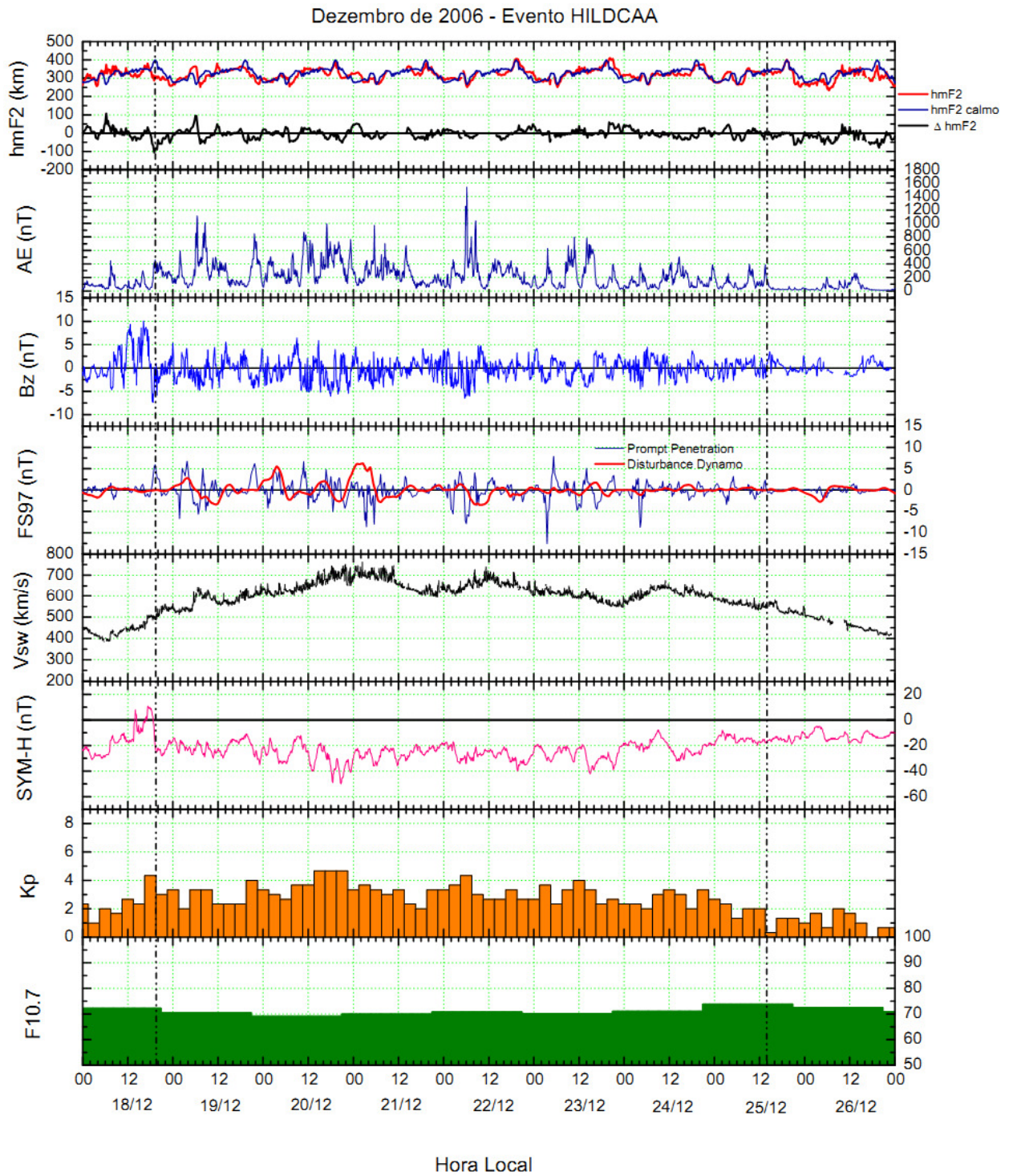


Figura 5.26: Evento HILDCAA de dezembro. As linhas tracejadas verticais representam o início e o fim do fenômeno.



Dezembro de 2006 - 4 dias após o evento HILDCAA

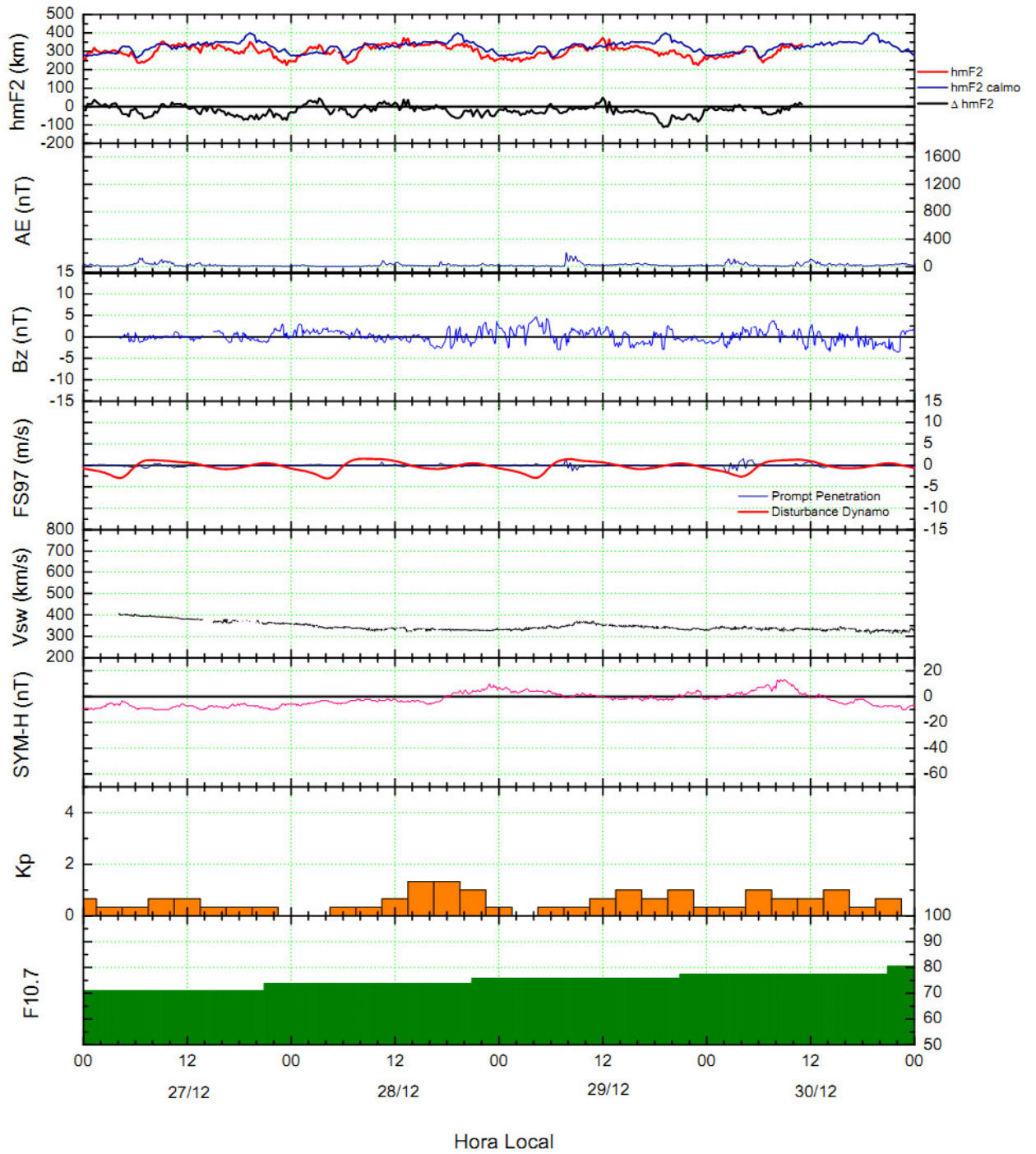


Figura 5.27: Gráfico representativo das condições para quatro dias posteriores ao evento de dezembro.

### 5.3.2 Resultados segundo a metodologia Koga et al. (2011)

A metodologia em questão se baseia na análise de correlação entre os dados de altitude perturbada ( $\Delta hmF2$ ) em São Luís e o campo elétrico interplanetário  $E_y$ .

Os dados filtrados estão dispostos na Figura 5.28.

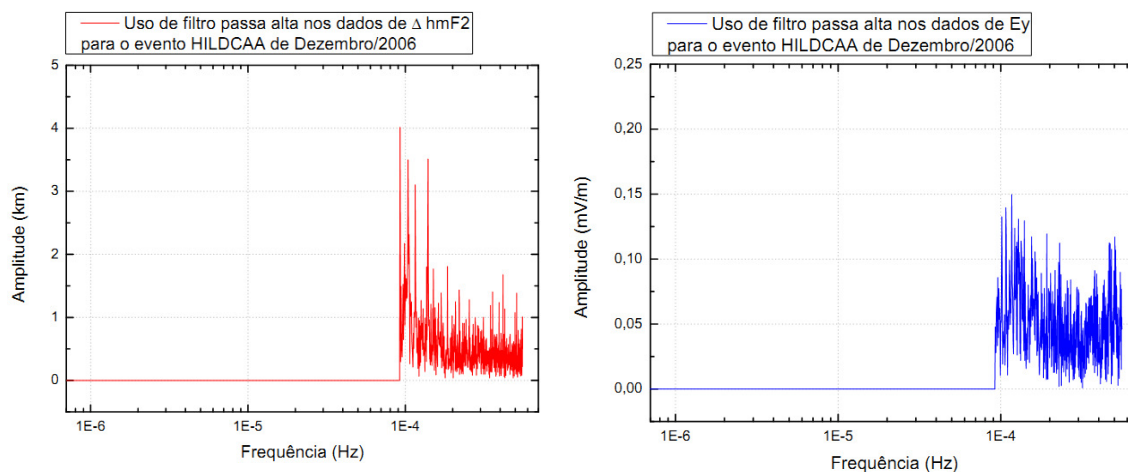


Figura 5.28: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa alta para o evento de dezembro, incluindo os dias antecedentes e subsequentes ao evento. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta hmF2$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

Gostaríamos de enfatizar que a análise de correlação de Pearson foi realizada para dois horários representativos para os períodos diurno (das 10 h até às 12 h LT) e noturno (das 02 h até às 04 h LT). Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para estes horários mantendo-se os valores de  $\Delta hmF2$  fixos e antecedendo os valores do  $E_y$  para cada 15 minutos para os atrasos de  $\tau = 15, 30, 45$  e 60 minutos, dado em horas decimais. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.29 e 5.30. A ordenada representa os valores do coeficiente de correlação e a abscissa indica a atraso temporal em horas decimais. A linha vermelha representa o período do evento HILDCAA, e as linhas preta e azul os períodos pré e pós-HILDCAA, respectivamente.

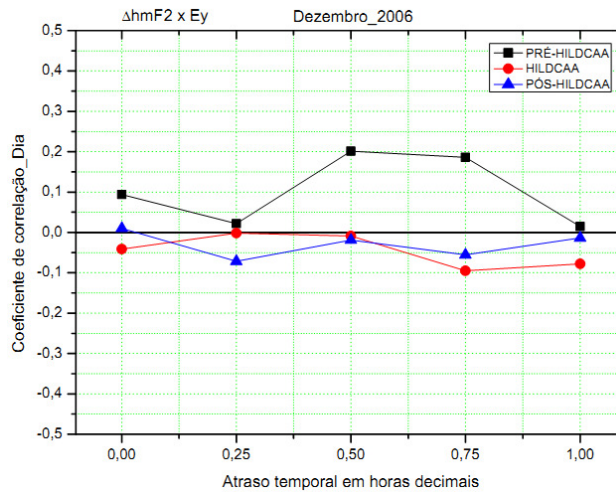


Figura 5.29: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período diurno.

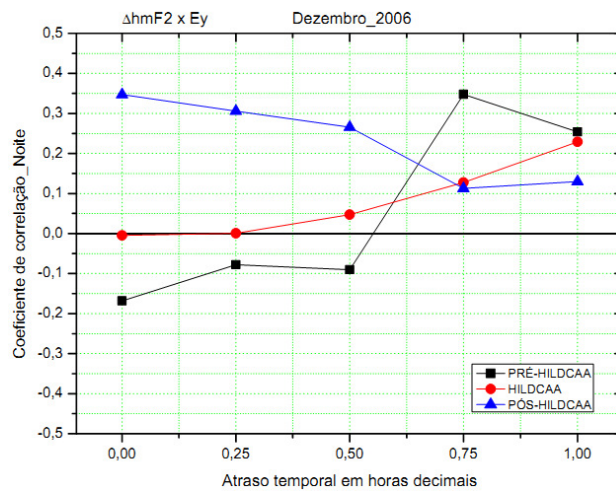


Figura 5.30: Análise de correlação entre  $\Delta hmF2$  e  $E_y$  para o período noturno.

Em seguida a correlação cruzada entre os coeficientes para o período diurno (abscissa) e noturno (ordenada) está demonstrada na Figura 5.31. Os valores ao lado dos símbolos indicam o atraso entre os valores médios de  $E_y$  e o valor de  $\Delta hmF2$ .

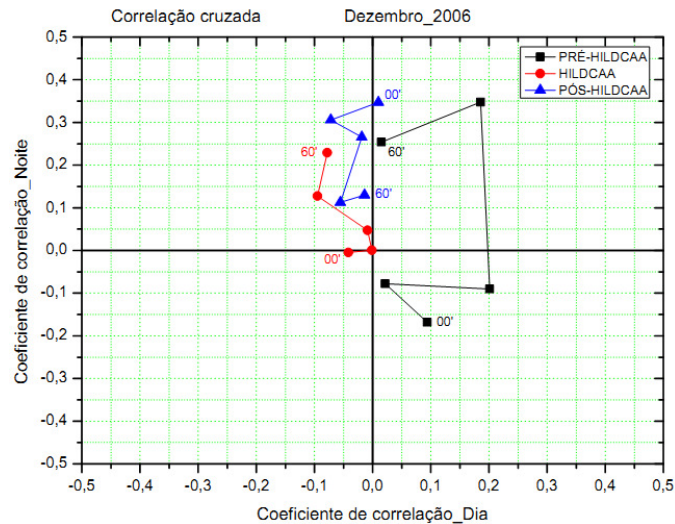


Figura 5.31: Análise da correlação cruzada entre os períodos representativos diurno e noturno.

O gráfico da correlação cruzada representa a mesma análise de correlação para o dia e para a noite, e por esse motivo apresenta mais rapidamente o comportamento do fenômeno em comparação com os dias anteriores e posteriores.

Durante o evento HILDCAA os coeficientes de correlação negativos durante o dia, com valores bem baixos, alcançando o máximo de -0,1. Durante a noite os coeficientes de correlação se mostraram positivos, também com valores baixos, porém se mostrando crescentes à medida que aumenta o atraso temporal.

Sabendo que quando o  $E_y$  apresenta variação positiva (sentido amanhecer-anoitecer), a penetração de campo elétrico na ionosfera durante o dia é positiva (sentido leste-oeste), consequentemente a correlação é positiva. Neste caso a penetração de campo elétrico é do tipo undershielding. Porém, em nossos resultados a correlação se deu negativa durante o dia e positiva durante a noite. Analisando o comportamento do  $B_z$  no terceiro painel do gráfico da Figura 5.26 e o comportamento do  $E_y$  disposto na Figura 5.32 podemos dizer que ocorreu penetração de campo elétrico do tipo overshielding durante o evento HILDCAA de dezembro.



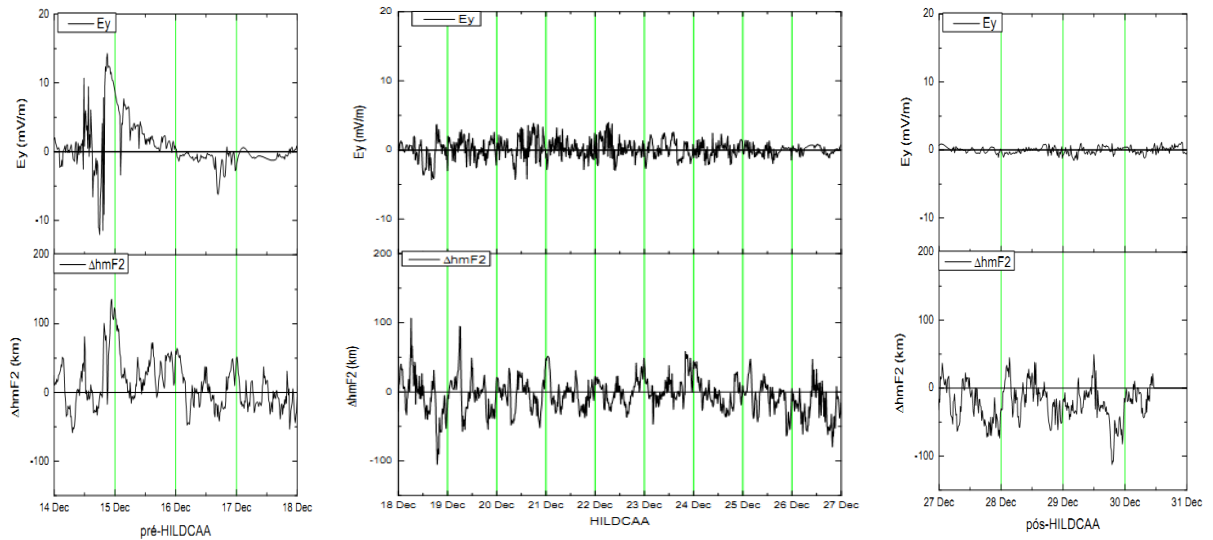


Figura 5.32: Dados não filtrados da componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário (painel superior) e da altitude perturbada (painel inferior) para o evento de dezembro.

### 5.3.3 Resultados segundo a metodologia Kelley e Dao (2009)

A metodologia em questão busca analisar uma possível dependência da hora local para a penetração de campo elétrico. Para tanto foi realizada a correlação entre a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) e a altitude perturbada ( $\Delta hmF2$ ) sob a região de São Luis, Maranhão.

Os gráficos da Figura 5.33 mostram como ficaram os dados após o uso do filtro.

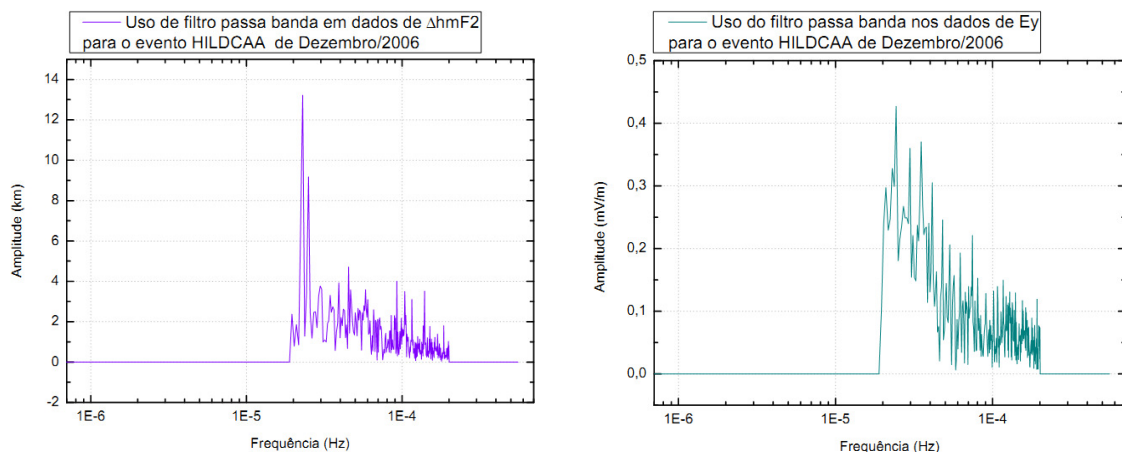


Figura 5.33: Os gráficos mostram os dados filtrados com filtro passa banda. O painel da esquerda representa os dados de  $\Delta hmF2$  e o da direita os dados de  $E_y$ .

Após o processamento de filtragem, o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado dentro de uma janela que abrange duas horas, e é centrada na hora dada, como já foi explicado para os casos anteriores. Os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 5.34, 5.35 e 5.36, sabendo que o painel da base representa a correlação para os dados filtrados, enquanto que o painel do topo os dados se apresentam inalterados, sem nenhum uso de filtro.

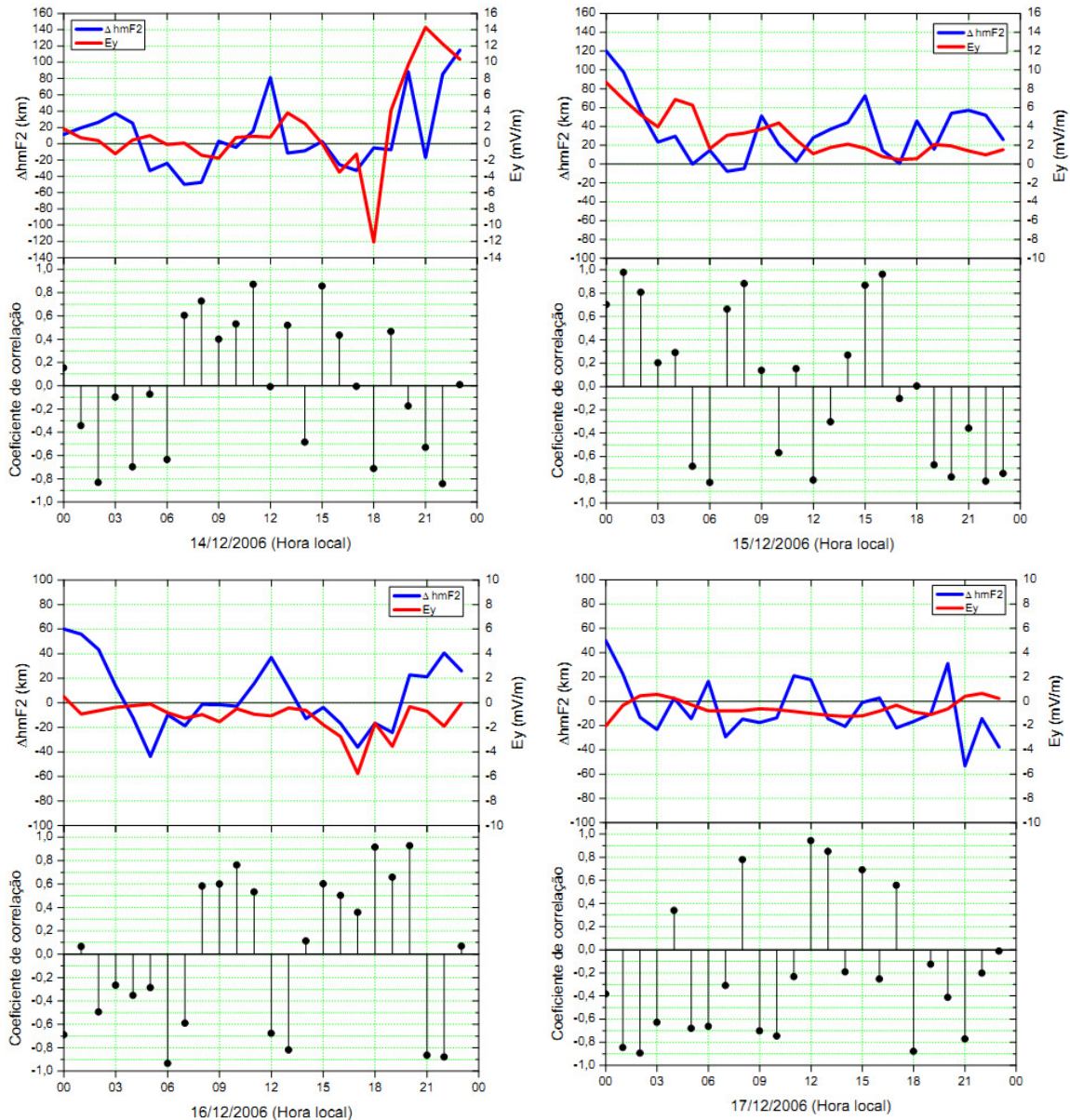
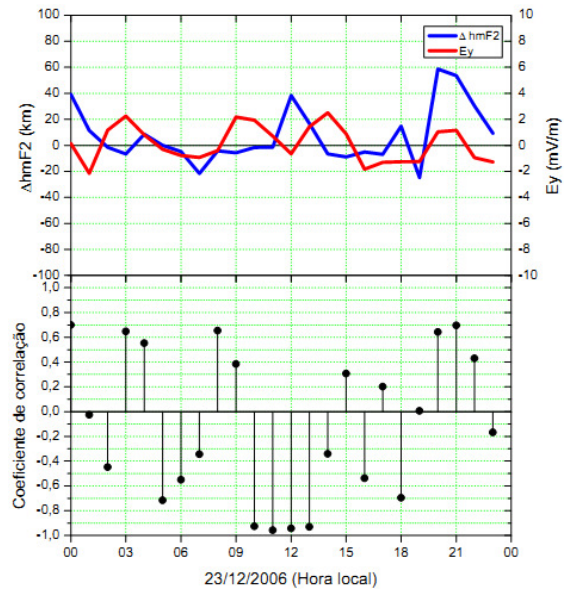
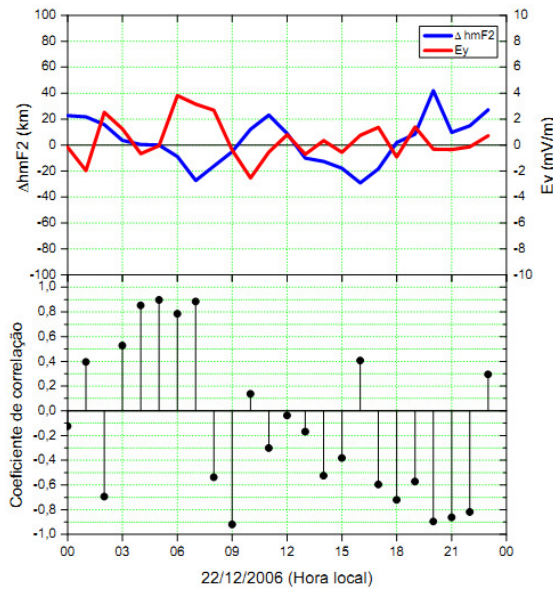
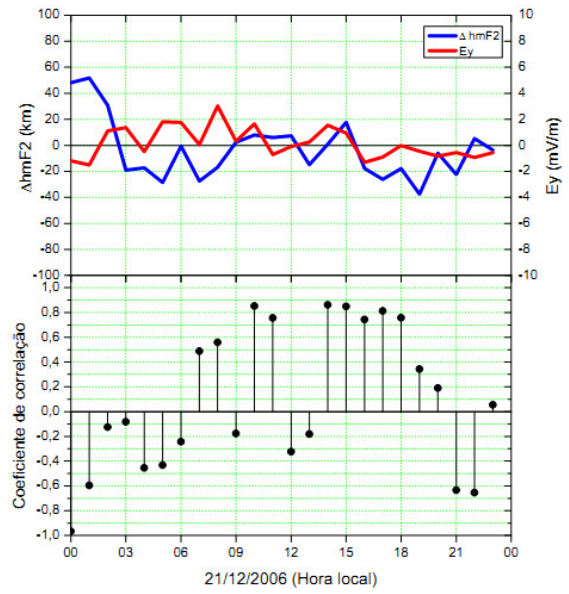
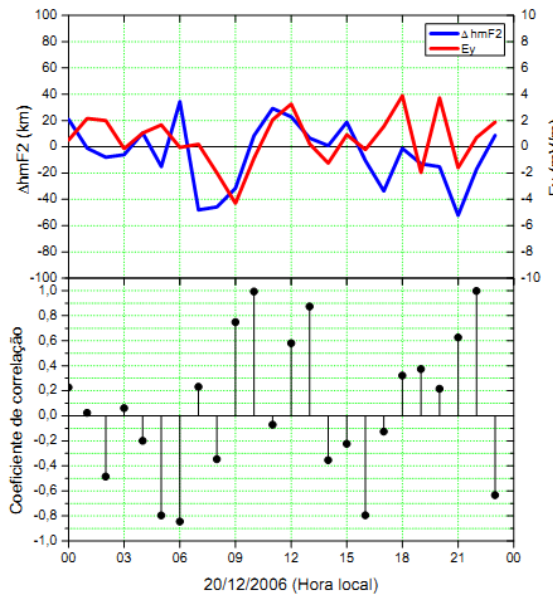
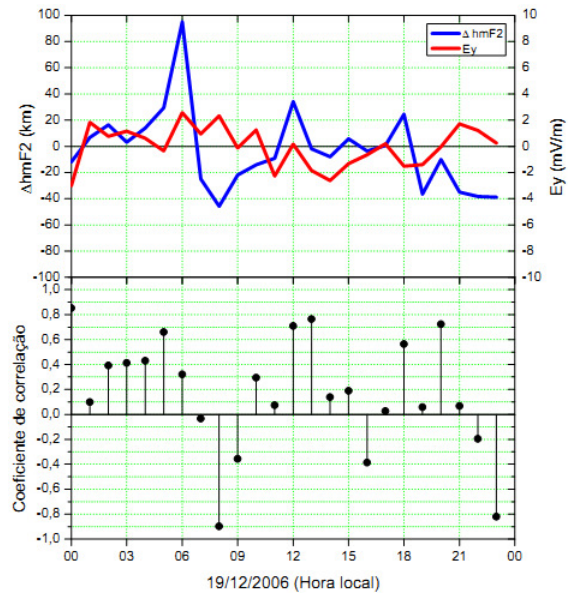
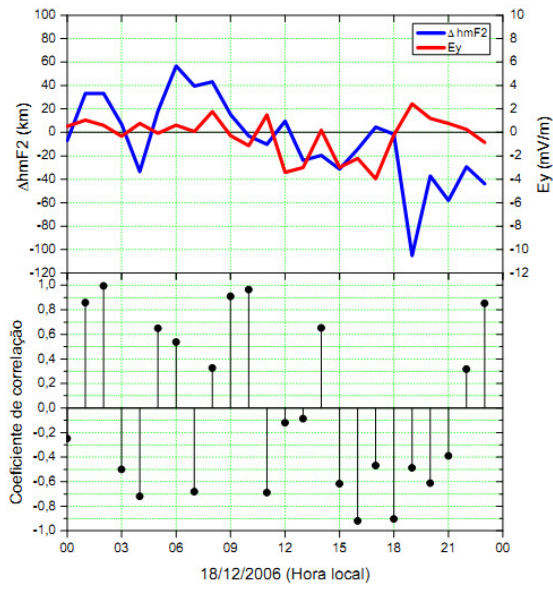


Figura 5.34: Resultados para os quatro dias anteriores ao evento HILDCAA de dezembro.





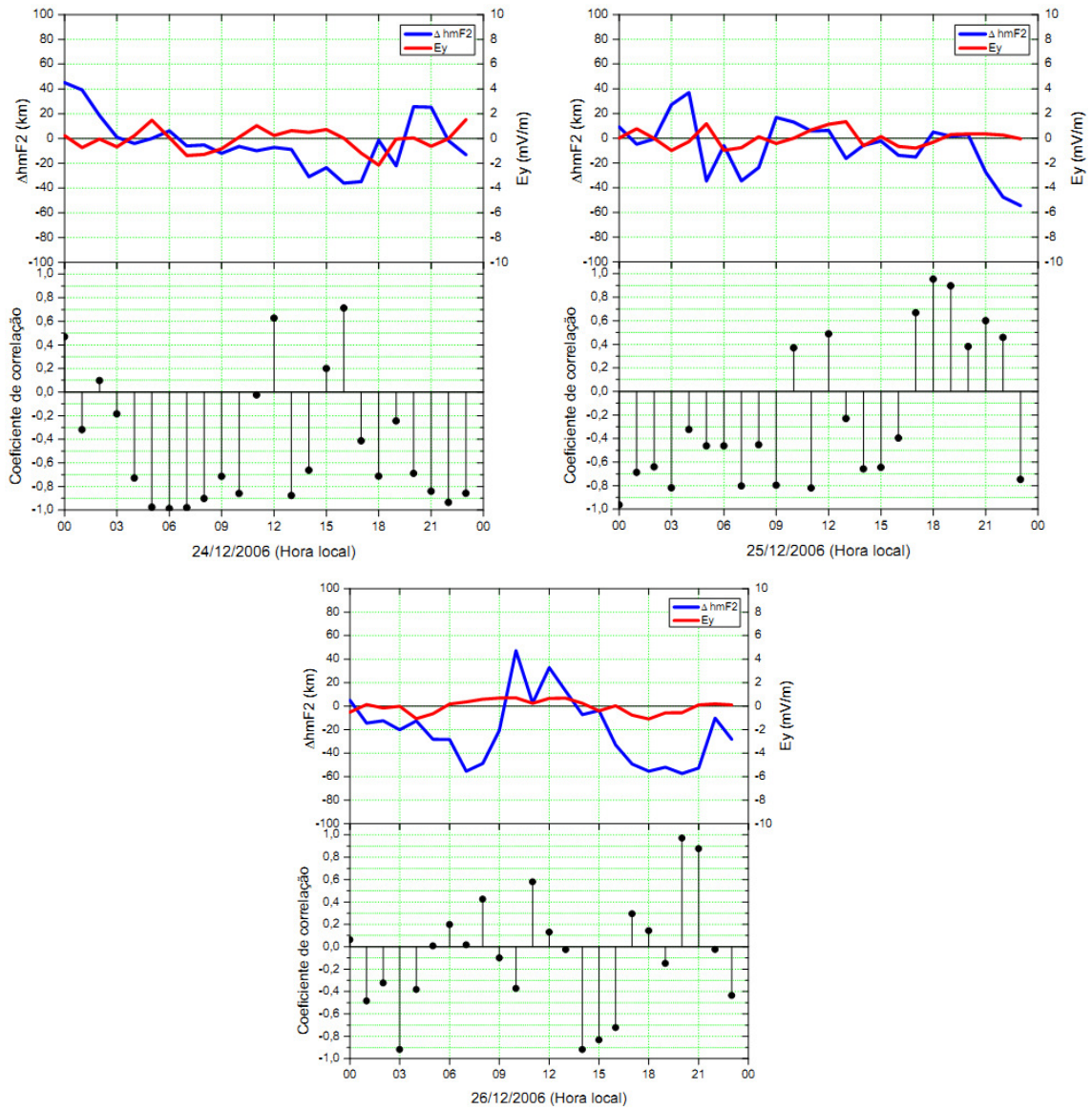


Figura 5.35: Resultados para os quatro dias referentes ao evento HILDCAA de dezembro.



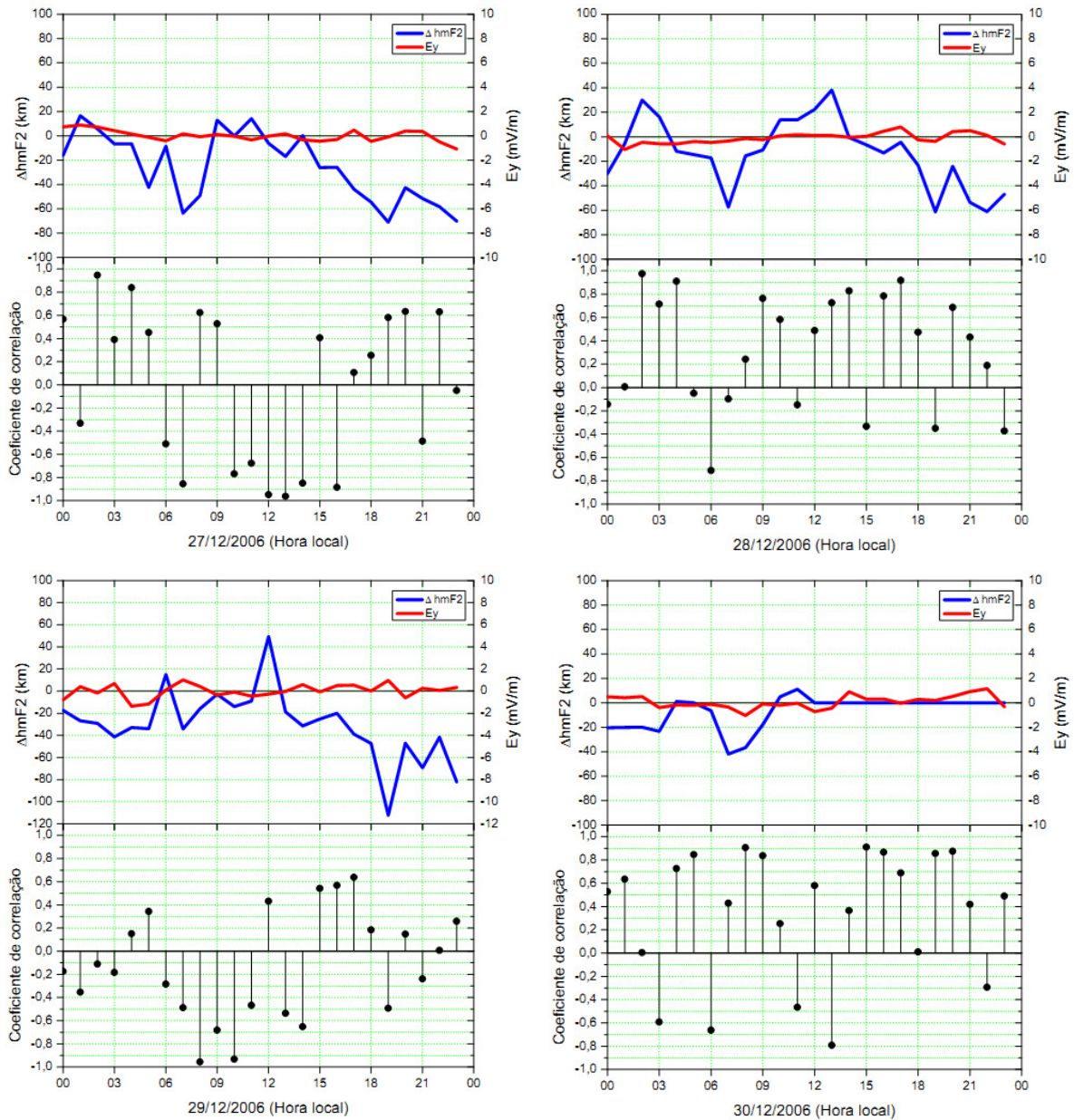


Figura 5.36: Resultados para os quatro dias posteriores ao evento HILDCAA de dezembro.

Também neste evento a correlação tão acurada apresentada nos resultados do Kelley e Dao (2009) não se repetiu. Os resultados gerados por esta metodologia novamente apresentaram correlações bastante oscilatórias.

Na Figura 5.34 vemos os resultados para os quatro dias anteriores ao evento. Entre as 20h e as 04h as correlações foram predominantemente negativas. Durante o dia, com poucas oscilações, as correlações prevaleceram positivas. Os gráficos da Figura 5.35 representam os dias do evento HILDCAA. Este evento foi o que apresentou maior duração, contando mais de oito dias. Durante a noite não vemos a mesma regularidade

que observamos para os quatro dias anteriores. Durante o período diurno, vemos que os primeiros dias apresentaram correlações positivas, enquanto que os últimos apresentaram correlações negativas. A Figura 5.36 exibe os resultados para os quatro dias posteriores. Nestes últimos dias percebemos que o Ey não sofreu perturbações significativas comparadas aos dias anteriores e a altitude perturbada sofreu oscilações, porém de baixa amplitude. O que configura período calmo.

A proximidade com o padrão enunciado no trabalho Kelley e Dao (2009), ou seja, negativo durante a noite e positivo durante o dia, ocorreu para os quatro dias anteriores, mas não no vigor da forma (uma senóide praticamente perfeita) como vista na Figura 4.5.

Novamente, com os resultados adquiridos para este evento, apenas podemos sugerir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não apresenta o padrão esperado. Gostaríamos de lembrar que o evento estudado pelos autores da metodologia em questão apresenta o perfil senoidal, com valores negativos durante a noite e positivos durante o dia, para apenas um único dia.

## 6 CONCLUSÕES

Neste estudo partimos do princípio de que um dado evento de penetração de campo elétrico magnetosférico para a região equatorial deverá causar uma variação de hmF2 durante o dia em sentido oposto ao da noite, ou seja, se a ionosfera sobe durante o dia, então ao mesmo tempo ela desce durante a noite e vice-versa. Isso se deve ao simples fato de que apesar de o sentido da variação do campo elétrico magnetosférico (causador original do efeito) ser um só, ou seja, ou amanhecer-anoitecer ou vice-versa, a posição do observador em solo durante o dia é oposta a da durante a noite.

Os efeitos de penetração de campos elétricos de origem magnetosférica para a região equatorial foram muito pouco estudados pela comunidade científica internacional até o momento. Neste trabalho se compara de forma inédita dois métodos de cálculo dos efeitos de penetração durante o evento HILDCAA. Examinou-se aqui como a ionosfera equatorial no setor brasileiro se comportou em termos da altura do pico da camada F2 (hmF2) durante a ocorrência de uma série de eventos HILDCAA. Foram usados dados de digissonda no setor brasileiro (São Luís, Maranhão) em períodos em que houve HILDCAA no ano de 2006. Para tanto utilizamos duas metodologias diferentes, uma descrita em Koga et al. (2011), com a qual foi feita uma análise estatística da deriva vertical do pico da região F equatorial em detrimento do campo elétrico interplanetário (IEF) durante evento HILDCAA. A outra metodologia está descrita em Kelley e Dao (2009). Nesta foi analisado o efeito da hora local da penetração de campos elétricos durante evento HILDCAA usando dados da deriva vertical de Jicamarca, Peru. Nesta dissertação, porém, utilizamos altitude perturbada ao invés da deriva vertical de Jicamarca. A altitude perturbada foi obtida por  $\Delta hmF2 = hmF2 - hmF2_{calmo}$ .

Além de dados de digissonda, também utilizamos parâmetros interplanetários tais como a velocidade do vento solar ( $V_{sw}$ ), a componente norte-sul do campo magnético interplanetário ( $B_z$ ) e a componente leste-oeste do campo elétrico interplanetário ( $E_y$ ) e os índices geomagnéticos AE, SYM-H, F10.7 e Kp. Além disso, também foi feito uso do modelo empírico FS97 descrito em Fejer and Scherliess (1997). Este modelo mostra perturbações causadas tanto por penetração de campo elétrico, quanto por dínamo perturbado durante períodos geomagneticamente ativos.

No ano de 2006 houve três eventos HILDCAAs, nos meses de março, junho e dezembro. Logo a seguir vamos descrever as principais conclusões obtidas pelo uso das metodologias referidas.

### 6.1 Evento HILDCAA de Março

Utilizando a metodologia Koga et al. (2011), após a filtragem dos dados, verificamos que os coeficientes de correlação permaneceram negativos durante o dia e positivos durante a noite, durante evento HILDCAA. Apesar do valor dos coeficientes serem pequenos, ele foi apropriado para observar o comportamento do fenômeno, devido à regularidade estatística desses coeficientes. Como os valores de correlação foram menores para o período representativo do dia do que para o da noite, uma possível explicação deste resultado seria que a resposta da ionosfera equatorial em relação à penetração de campo elétrico interplanetário foi um pouco mais efetiva durante a noite, no decorrer do evento de março.

Wei et al., 2008 mostraram que quando o campo elétrico interplanetário  $E_y$  (IEF) apresenta variação positiva (amanhecer-anoitecer), a penetração de campo elétrico para a ionosfera equatorial é positiva (leste-oeste) durante o dia, conseqüentemente a correlação é positiva durante o dia. Já para o período noturno a situação se mostra de correlação negativa.

No caso do evento aqui estudado, a variação de  $E_y$  causou variação negativa durante o dia para a maioria dos dias do evento. Aconteceu penetração múltipla do IEF, de acordo com a classificação dada por Wei et al. (2008), pelo fato de o  $B_z$  ter oscilado entre as direções norte e sul. Portanto, a metodologia se mostra satisfatória por ter explicado de maneira eficiente o evento em questão. Já para o período noturno a situação se mostra de correlação negativa. A análise da correlação cruzada mostra que os coeficientes de correlação foram positivos e negativos durante a noite e durante o dia, respectivamente, correspondendo ao caso de penetração de campo elétrico *overshielding*. Sendo assim, a contribuição desse evento na ionosfera foi o de enfraquecer o campo elétrico zonal devido ao dínamo dos dias calmos. Este fato é mostrado como inibição do PRE no horário do anoitecer.

Ao se analisar os resultados aqui obtidos utilizando a metodologia Kelley e Dao (2009) percebemos que não ocorreu o padrão senoidal de correlação, onde os valores seriam



positivos durante o dia e negativos durante a noite. Para este evento HILDCAA, tanto para os quatro dias anteriores e posteriores ao evento, só podemos concluir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não há nenhum padrão que os relacione.

## 6.2 Evento HILDCAA de Junho

No que se refere à metodologia Koga et al. (2009), este evento se mostrou diferente dentre os três analisados. O evento estudado aqui mostrou correlações tanto negativas quanto positivas durante o dia e também tanto positivas quanto negativas durante a noite após 30 a 45 min. Durante o dia até os primeiros trinta minutos de atraso o coeficiente se mostrou negativo com valores baixos. Durante a noite aconteceu o mesmo comportamento durante os primeiros trinta minutos, porém com coeficientes positivos. Sendo assim, para este período, a análise da correlação mostra coerência com uma penetração de campo elétrico do tipo overshielding durante este evento HILDCAA.

Utilizando-se aqui a metodologia Kelley e Dao (2009) os resultados gerados, novamente, apresentaram correlações bastante oscilatórias. O evento de junho teve a duração de seis dias. Verificamos que os coeficientes de correlação se apresentam com certa periodicidade durante o decorrer do dia, com exceção do último dia do evento, porém sem a formação do padrão senoidal mencionado pelos autores da metodologia. Desse modo, para este evento HILDCAA, tanto para os quatro dias anteriores e posteriores ao evento, só podemos concluir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não há nenhum padrão foi formado.

## 6.3 Evento HILDCAA de Dezembro

De acordo com a metodologia Koga et al. (2011), durante evento HILDCAA os coeficientes de correlação foram negativos de dia, com valores bem baixos, alcançando o máximo de -0,1, e no decorrer da noite os coeficientes de correlação se mostraram positivos, também com valores baixos. Este evento foi o que apresentou maior duração, contando mais de oito dias, e é válido lembrar que devido à duração do evento, suas consequências na ionosfera apresentam efeitos de penetração de intensidade reduzida (Sobral et al., 2006).

Decorrente dessas indicações e analisando o comportamento oscilante do Bz nas direções norte e sul, podemos dizer que ocorreu penetração de campo elétrico do tipo *overshielding* durante o evento HILDCAA de dezembro.

Segundo a metodologia Kelley e Dao (2009) a proximidade com o padrão enunciado, ou seja, negativo durante a noite e positivo durante o dia, ocorreu para os quatro dias anteriores, mas não no rigor da forma (uma senóide praticamente perfeita). Novamente, com os resultados adquiridos para este evento, apenas podemos sugerir que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não apresenta o padrão esperado.

Comparando-se os resultados obtidos pelas duas metodologias para os três eventos estudados, podemos constatar os seguintes pontos:

- A metodologia apresentada em Koga et al. (2011) se mostrou mais efetiva para a análise desse tipo de evento. Mesmo com os três eventos aqui estudados apresentando penetração de campo elétrico do tipo *overshielding*, ou seja, diferentes do resultado apresentado pelos autores da metodologia, ela se mostrou satisfatória por ter explicado o evento de maneira eficiente. Pela metodologia Kelley e Dao (2009) apenas podemos verificar que a penetração de campo elétrico é dependente da hora local, mas que não há formação do padrão enunciado.
- As metodologias apresentam semelhanças no que se refere ao processamento dos dados disponíveis para o estudo. Em ambas foi utilizado o processamento de sinais por meio de filtragem, desse modo os sinais foram convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. Em Koga et al. (2011) foi utilizado o filtro passa alta, e em Kelley e Dao (2009) filtro passa banda.

Como trabalhos futuros propõem-se a investigação de outros eventos, a fim de se realizar estudos estatísticos sobre efeito dos HILDCAAs. Nos eventos estudados aqui, todos foram precedidos de tempestades magnéticas e ocorridos durante fase descendente do ciclo solar. Uma sugestão seria estudar casos onde não houvesse tempestade magnética antecedendo o evento, bem como eventos ocorridos em períodos mais próximos do máximo solar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; DE SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I.S. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere. In: TSURUTANI, B.; MCPHERRON, R.; GONZALEZ, W.; LU, G.; SOBRAL, J. H. A.; GOPALSWAMY, N. (Ed.). **Recurrent magnetic storms: corotating solar wind Streams**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 283-304. ISBN 0-87590-432-7, AGU Code GM1674327. Geophysical Monograph Series, v. 167, 2006.

AHRENS, C. D. **Meteorology Today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Belmont: Brooks/Cole Cengage Learning, 2009. 9<sup>th</sup> Ed. p 549. ISBN(978-0-495-55573-5).

BARBOSA NETO, P. F.; STACIARINI, B. I.; ABDU, M. A. A camada ionosférica F3. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1977, São Paulo. **Resumos Expandidos...** 1997. p. 116-1117. (INPE-8824-PRE/4543).

BATISTA, I. S. **Ionossonda digissonda**. São José dos Campos: INPE, 2011. Notas de aula do curso de Instrumentação.

BATISTA, I. S., ABDU, M. A., MACDOUGALL, J., SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F<sub>3</sub> layer over Fortaleza, Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v. 64, n. 12, p. 1409-1412, 2002.

BATISTA, I.S, DE PAULA, E.R, ABDU, M. A, TRIVEDI, N. B. Ionospheric effects of the march 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.96, n. A8, p. 13943-13952, 1991.

BERTONI, F. C. P. **Derivas ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem**. 2004. 150 p. (INPE-11240-TDI/946). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

BERTONI, F. C. P. **Estudos de derivas ionosféricas por meio de ionossondas digitais**. 1998. 135 p. (INPE-7169-TDI/675). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose Campos, 1998.

BITTENCOURT, J. A. **Fundamental of plasma physics**. São José dos Campos, SP: José Augusto Bittencourt, 2003.

BLANC, M. AND RICHMOND, A. D. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 1669 – 1686, 1980.

DE PAULA, E. R. **Resposta da região F ionosférica às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil**. São José dos Campos – SP. 210 p. (INPE - 4106 - TDL/259). Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Fev. 1987.

- FEJER, B. G., SCHERLISS, L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields. **Journal of Geophysical Research**. v. 102, n A11, p. 24047 – 24056, 1997.
- FESEN, C. G., CROWLEY, G., ROBLE, R. G., Ionospheric effects at low latitudes during the March 22, 1979, geomagnetic storm. **Journal of Geophysical Research**. v.94, p 5404,1989.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to electrodynamics**. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall.1999.
- GUARNIERI, F. L. **Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração**. 315p. (INPE – 13604 – TDI/1043). São José dos Campos: INPE, 2005.
- HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- HUANG, C. M., RICHMOND, A. D., CHEN, M. –Q, Theoretical effects of geomagnetic activity on low-latitude ionospheric electric fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, A05312, doi:10.1029/2004JA010994, 2005.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. DIVISÃO DE AERONOMIA (INPE.DAE). **Imagem da digissonda DPS**. São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://www.dae.inpe.br/iono/index.php?page=eires>. Acessado em 24 de julho de 2012.
- INVESTIGACIÓN E INSTRUMENTACIÓN ATMOSFÉRICA (INTA). Título do Assunto. **Imagem da digissonda 256**. Disponível em: <http://www.inta.es/atmosfera/28/56/139/contenidos.aspx>. Acessado em: 24 de julho de 2012.
- KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere**. Plasma physics and electrodynamics. New York: Academic Press, 2009.
- KELLEY, M. C. AND DAO, E., On the local time dependence of the penetration of solar wind-induced electric fields to the magnetic equator. **Annales Geophysicae**, v. 27, p. 3027 – 3030, 2009.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo 1991.
- KOGA, D.; SOBRAL, J. H. A.; GONZALEZ, W. D.; ARRUDA, S. C. S.; ABDU, M. A.; CASTILHO, V. M.; MASCARENHAS, M.; GONZALEZ, A. C.; TSURUTANI, B. T.; DENARDINI, C. M.; ZAMLUTTI, C. J. Electrodynamics coupling process between the magnetosphere and the equatorial ionosphere during a 5-day HILDCAA event. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, p. 148-155, 2011.
- MCNAMARA, L. F. **Radio amateurs guide to the ionosphere**. Flórida, Malabar: Krieger publishing company, 1994.
- MUELLA, M. T. A. H. **Ventos termosféricos meridionais inferidos por meio de sondagens ionosféricas**. 215p. (INPE – 14201 – TDI/1102). São José dos Campos: INPE, 2004.

- OXFORD AVIATION ACADEMY. **Ground Training Series: meteorology**. Shoreham: Transair (UK) Ltd, v. 9, 2008. 4. ed.
- PAPAGIANNIS, M. D. **Space physics and space astronomy**. New York: Gordon and Breach Science, 1972.
- PARKS, G. K. **Magnetosphere, encyclopedia of atmospheric sciences**. New York: 2003. p. 1229-1237, 2003.
- PARKS, G. K. **Physics of space plasma, an introduction**. Redwood City-CA: Addison-Wesley Publishing Company. 1991.
- PROLSS, G. W. **Physics of the Earth's space environment**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York; London: Academic Press, v. 14, 1969.
- ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Geophysical space physics**, v. 10, n. 4, p. 935 – 950. 1972
- SCIENTIFIC INSTRUMENTATION LTD (2012). Imagem da ionossonda CADI. Disponível em: <http://www.sil.sk.ca/cadi.html> acessado em: 26 de julho de 2012.
- SOBRAL, J. H. A., ABDU, M. A., GONZALEZ, W. D., GONZALEZ, A. C., TSURUTANI, B. T., DA SILVA, R. R. L, BARBOSA, I. G., ARRUDA, D. C. S., DENARDINI, C. M., ZAMLUTTI, C. J., GUARNIERI, F. Equatorial ionospheric responses to high-intensity long-duration auroral electrojet activity (HILDCAA), **Journal of Geophysical Research**, v.111, A07S02, doi:10.1029/2005JA011393, 2006.
- SOBRAL, J. H. A., ABDU, M. A., GONZALEZ, W. D., TSURUTANI, B. T., BATISTA, I. S., GONZALEZ, A. L. C. Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A7, p. 14.305 - 14.313, 1997.
- SOBRAL, J. H. A., ABDU, M. A., YAMASHITA C. S., GONZALEZ, W. D., GONZALEZ, A. L. C., BATISTA, I. S., ZAMLUTTI, C. J., TSURUTANI, B. T. Responses of the low-latitude ionosphere to very intense geomagnetic storms, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.63, p. 965 – 974, 2001.
- SORAAS, F.; AARSN, K.; OKSAVIK, K.; SANDANGER, M. I.; EVANS, D. S.; GREER, M. S. Evidence for particle injection as the cause of Dst reduction during HILDCAA events. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 177- 186, 2004.
- SUESS, S. T.; TSURUTANI, B. T. **Solar wind, encyclopedia of atmospheric sciences**. New York: Elsevier, 2003. p. 2078 –2085.
- TAPPING, K. F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelengths: the temporal variability of 10.7-cm flux. **Journal of Geophysical Research**, p. 829 – 838, 1987.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The cause of high intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA): interplanetary Alfvén wave trains. **Planet Space Science**, v. 35, p. 405-412, 1987.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The interplanetary causes of magnetic storms: a review. **Magnetic storms, Geophysical Monograph Series**, v. 98, p. 77- 89, 1997.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; GUARNIERE, F. L.; GOPALSWAMY, N.; GRANDE, M.; KAMIDE, Y.; KASAHARA, Y.; LU, G.; MANN, I.; MCPHERRON, R.; SORAAS, F.; VASYLIUNAS, V. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, A07S01, 2006.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; GUARNIERE, F.; KAMIDE, Y.; ZHOU, X.; ARBALLO, J. K. Are high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events substorm expansion events? **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 167-176, 2004.

TSURUTANI, B. T.; HO, C. M.; ARBALLO, J. K.; GOLDSTEIN, B. E.; BALOGH, A. Large amplitude IMF fluctuations in Corotating interaction regions: Ulysses at midlatitudes. **Geophysical Research Letters**, v. 22, p. 3397-3400, 1995.

WALT, M. **Introduction to geomagnetically trapped radiation**. New York: Cambridge University Press, 1994.

WEI, Y.; HONG, M.; WAN, W.; DU, A.; LEI, J.; ZHAO, B.; WANG, W.; REN, Z.; YUE, X. Unusually long lasting multiple penetration of interplanetary electric field to equatorial ionospheric under oscillating IMF Bz. **Geophysical Research Letters**, v. 35, L02102, 2008.

WHITE, R. S. **Space physics: the study of plasmas in space**. London: Oxford University, 1970.

WHITTEN, R. C.; POPPOFF, I.G. **Fundamentals of aeronomy**. New York: John Wiley & Sons, 1971.

WRIGHT, J. W., PITTEWAY, M. L. V. Real-time acquisition and interpretation capabilities of the dynasond 2. Determination of magnetoionic mode and echolocation using a small spaced receiving array. **Radio Science**. v. 14, p. 815-835, 1979.