

## MODELO DE PREVISÃO DA INTENSIDADE DA ATIVIDADE AURORAL TERRESTRE DURANTE A OCORRÊNCIA DE EVENTOS ASSOCIADOS A ONDAS DE ALFVÉN

Vinicius Augusto de Souza<sup>1</sup>, Fernando Luis Guarnieri<sup>2</sup> e Yogeshwar Sahai<sup>3</sup>

Universidade do Vale do Paraíba / Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento  
Av. Shishima Hifumi, 2911. Urbanova. São José dos Campos – SP – Brasil.

<sup>1</sup>va.vinicius@gmail.com, <sup>2</sup>guarnieri@univap.br, <sup>3</sup>sahai@univap.br

**Resumo-** Neste trabalho será analisada a relação existente entre a componente Bz (norte-sul) do campo magnético do meio interplanetário e os níveis de atividade auroral terrestre, especificamente no intervalo de ocorrência de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração (HILDCAAs) identificados entre os anos de 1998 e 2001, relacionados a ondas de Alfvén no meio interplanetário. Analisando os eventos que apresentaram melhor correlação entre Bz e AE, se propõe, então, um modelo matemático que possibilite estimar a intensidade de atividade auroral com base apenas na componente Bz do campo magnético do meio interplanetário.

**Palavras-chave:** Atividade geomagnética, vento solar, eletrojetos aurorais.

**Área do Conhecimento:** Ciências exatas e da terra.

### Introdução

O Sol emana constantemente um fluxo de plasma denominado vento solar que carrega consigo um campo magnético de origem solar, chamado de campo magnético do meio interplanetário. A Terra está imersa neste fluxo, sendo protegida por um escudo magnético denominado magnetosfera (Stern e Ness, 1982).

A atividade solar exerce influência diretamente no meio interplanetário, sendo responsável pela origem de estruturas que carregam consigo intensos campos magnéticos. A presença destas estruturas no meio interplanetário não é uniformemente distribuída, mas apresenta uma periodicidade de 11 anos, chamado de ciclo de manchas solares, ou, mais popularmente, ciclo solar.

É durante a fase descendente e mínimo do ciclo de atividade solar que se encontram mais presentes feixes de alta velocidade – *high speed streams* – associados a ondas de Alfvén, principais estruturas responsáveis pela ocorrência de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração – HILDCAAs (Tsurutani e Gonzalez, 1987; Guarnieri, 2005). Os feixes rápidos são provenientes de buracos coronais, que migram para menores latitudes e exercem predominante influência no meio interplanetário durante estes períodos (Tsurutani et al., 1997; Gonzalez et al., 1999).

A interação do vento solar perturbado por estas estruturas com a magnetosfera terrestre, sob condições especiais, pode disparar um processo de transferência de energia do vento solar para a magnetosfera chamado de reconexão. A principal causa dessa reconexão está associada à passagem pela Terra de um

campo magnético interplanetário com sua componente Bz orientada para o sul por um intervalo de tempo suficientemente longo (Gonzalez et al., 1994), onde as linhas de campo magnético interplanetário se reconectam às linhas de campo magnético da Terra, que são orientadas para o norte, e são arrastadas por sobre os pólos. Na cauda da magnetosfera ocorre nova reconexão, onde há uma maior injeção de partículas (Gonzalez et al., 1994).

Esse processo ocasiona fortes distúrbios na atividade geomagnética terrestre, caracterizados por variações na atividade dos eletrojetos na região polar (mensurado pelo índice de eletrojeto auroral AE) e na componente horizontal do campo magnético terrestre na região equatorial (mensurado pelo índice Dst – *Disturbance Storm Time*; Lakhina, 2000). Tais distúrbios estão relacionados a eventos denominados tempestades magnéticas, subtempestades e, ainda, HILDCAAs.

Os HILDCAAs se caracterizam por uma intensa e contínua atividade do índice AE que se mantém por dias. Tsurutani e Gonzalez (1987) estabeleceram quatro critérios que definem estes eventos: devem ocorrer picos no AE > 1000 nT e duração mínima de 48 horas, e não devem ocorrer quedas abaixo de 200 nT no índice AE por mais de 2 horas de cada vez. Além disso, estes eventos devem ocorrer fora da fase principal de tempestades magnéticas. Estes eventos estão geralmente associados a flutuações das componentes do campo magnético interplanetário. Estas flutuações foram mostradas por Tsurutani e Gonzalez (1987) e Guarnieri (2005) como sendo ondas de Alfvén. Estas ondas de Alfvén são remanescentes dos processos de aquecimento da coroa solar e aparecem nos

dados do meio interplanetário como flutuações nas componentes de mesma direção de campo magnético e velocidade do plasma.

O objetivo deste trabalho consiste justamente em analisar a característica principal do campo magnético do meio interplanetário para ocorrência de eventos de penetração de partículas (componente Bz orientada para o sul) e sua relação com os níveis de atividade auroral terrestre (mensurados pelo índice AE), na presença de eventos associados a flutuações das componentes do campo magnético interplanetário ocasionadas por ondas de Alfvén, de forma que seja possível, por fim, propor um modelo matemático que interprete esta relação.

### Metodologia

Neste trabalho foram utilizados dados do índice AE para identificação dos eventos HILDCAAS. Estes dados são obtidos por observatórios localizados na oval auroral terrestre (altas latitudes). Foram utilizados índices com resolução temporal de 1 minuto obtidos do site <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>. Os dados da componente Bz foram medidos pelo satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), obtidos do site [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA\\_MAG-SWEPAM.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_MAG-SWEPAM.html). Utilizaram-se dados com resolução temporal de 1 minuto e em sistema de coordenadas GSM (*Geocentric Solar Magnetic*). Neste trabalho, foram processados apenas intervalos de dados que correspondam à ocorrência de eventos HILDCAAS com presença de alfvénicidade. A alfvénicidade do vento solar foi verificada pelo mesmo método empregado por Belcher e Davis, (1971), que faz uso da técnica de correlação cruzada entre componentes de mesma direção do campo magnético e velocidade do vento solar. No total, são 14 eventos, identificados no trabalho de Guarnieri (2005), conforme a Tabela 1.

A primeira técnica utilizada é conhecida por correlação cruzada. Inicialmente, o objetivo da correlação simples entre dois fenômenos X e Y pode ser interpretado como uma análise que busca verificar se as variações de X estão relacionadas a certas variações de Y, de forma que haja, portanto, uma relação linear entre elas. Esta técnica calcula um índice  $r$  para  $n$  observações, denominado coeficiente de correlação linear (Bhattacharyya, 1977). Snedecor (1989) define  $r$  sendo um valor adimensional que está situado entre -1 e 1, onde estes extremos indicam fortes correlações negativa e positiva, respectivamente. Dessa forma, valores positivos indicam a tendência de mútuo crescimento entre X e Y, enquanto valores negativos indicam que ao crescimento de X está associado o decréscimo de Y. A característica *cruzada* permite que uma

Tabela 1 – Eventos HILDCAAs identificados nos anos de 1998 e 2001 (Guarnieri, 2005).

Ev_Ano	Início		Fim	
	Mês / dia	Hora/Min	Mês/Dia	Hora/Min
1_1998	24/04	18:03	27/04	06:05
2_1998	22/07	21:09	25/07	12:25
1_1999	29/04	11:20	03/05	11:16
2_1999	17/08	22:52	20/08	12:00
3_1999	31/08	15:32	02/09	20:30
4_1999	10/10	20:00	14/10	17:38
5_1999	23/10	13:21	25/10	20:57
6_1999	07/11	17:00	10/11	04:47
7_1999	03/12	10:00	06/12	00:15
1_2000	27/01	18:10	31/01	03:15
2_2000	05/02	16:01	08/02	05:33
3_2000	24/02	00:03	27/02	22:10
4_2000	24/05	10:00	26/05	18:07
1_2001	11/05	04:04	14/05	10:51

série se “locomova” sobre a outra, buscando, a cada janelamento, uma nova correlação.

Para filtragem dos dados, de forma a eliminar possíveis ruídos que possam prejudicar uma melhor análise, utilizou-se a técnica *Moving Average* – MA, que consiste em calcular a média aritmética das  $h$  observações mais recentes de uma série  $Z_t$  de tamanho  $N$ , de tal forma que, para  $t = 1, \dots, N$ , um valor  $M_t$  estimado é dado pela média de  $h$  valores sucessivamente (Morettin e Tolo, 1985).

Por fim, a construção de um modelo matemático partiu da regressão linear simples, que relaciona duas variáveis através de uma função  $f(x) = a + bx$ , onde  $a$  é o coeficiente linear e  $b$  o coeficiente angular. O cálculo destes parâmetros foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, um procedimento que minimiza a discrepância total entre os  $n$  pontos cartesianos  $(x, y)$  e a reta estimada (Fonseca, 1985). Ainda foi utilizado um processo aqui denominado *retificação*, que consistiu em eliminar os valores positivos da série da componente Bz, uma vez que durante estes intervalos, com campo magnético orientado para norte, não haveria transferência de energia e, conseqüentemente, sem atividade no AE. Uma rotina computacional foi construída de forma que, dada uma série  $Z_t$  de tamanho  $N$ : se  $Z_t > 0$  então torna-se  $Z_t = 0$ , para  $t = 1, \dots, N$ .

### Resultados

As duas séries foram submetidas a uma rotina computacional que retorna as máximas correlações negativa e positiva entre Bz e AE e seus respectivos tempos de defasagem. Com o propósito de se obter índices mais significativos, aplicou-se a técnica de MA com filtros de 5, 10, 30 e 60 minutos em ambas as séries, uma vez que trabalhos anteriores (Guarnieri, 2005) já

demonstraram que flutuações de menores períodos não afetam significativamente a magnetosfera. A Figura 1 mostra um exemplo de valores encontrados para o evento 1\_1998:

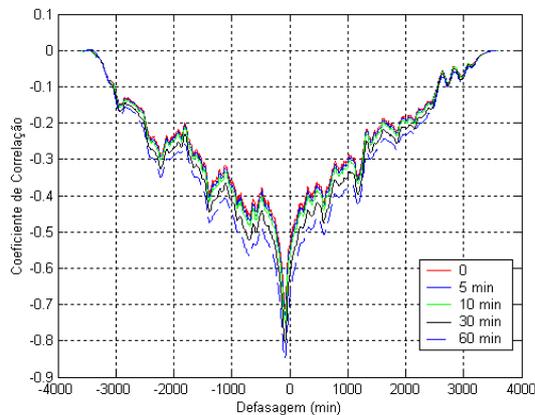


Figura 1 – Gráfico *Lag X* Coeficiente de Correlação para o 1º evento HILDCAA de 1998.

Com exceção dos eventos 1\_2000 e 3\_2000, todos apresentaram a máxima correlação negativa mais significativa do que a positiva para todos os filtros. Este resultado mostra que, como propõe Snedecor (1989), o decréscimo de uma variável resultou em crescimento da outra. Verifica-se, então, que quando o campo magnético do meio interplanetário for orientado para o sul ( $B_z$  negativo) haverá resposta positiva na intensidade da atividade auroral.

A defasagem observada, chamada *lag*, pode ser interpretada como o tempo total entre as medições da intensidade da componente  $B_z$  pelo satélite ACE e da posterior atividade auroral, considerando, portanto, o tempo total de viagem do feixe rápido do ACE até a Terra, o processo de reconexão no lado diurno e na cauda da magnetosfera e, por fim, o depósito de partículas na ionosfera terrestre. Este trajeto relatado praticamente impossibilita, então, encontrar-se valor igual a 0 (zero) para o *lag*.

Os filtros de 10, 30 e 60 minutos produziram coeficientes de correlação mais significativos para todos os demais eventos. Descartou-se, porém, o último citado, por apresentar uma maior perda na resolução dos dados. Dessa forma, foram construídos gráficos de dispersão  $B_z \times AE$  utilizando-se filtros de MA de 10 e 30 minutos para todos os eventos HILDCAAs, exceto os que apresentaram o valor absoluto do coeficiente de correlação menor que 0,3 (2\_1998, e 7\_1999, este último somente para o filtro de 10 minutos) ou os que apresentaram comportamento anômalo (1\_2000 e 3\_2000, que apresentaram máximo coeficiente de correlação positivo) e aplicando-se o procedimento de retificação aos dados da componente  $B_z$ .

Seguinte à construção dos gráficos, efetuou-se o cálculo das retas de regressão linear,

verificando-se que o filtro de 30 minutos apresentou coeficientes de correlação entre a nuvem de dados e a reta de ajuste mais significativos. A média aritmética simples dos coeficientes linear e angular da reta estimada encontrados, então, fornece um primeiro modelo de previsão do índice AE, descrito por:

$$AE = 285,08881 - 64,17828.B_z \quad (1)$$

Alimentando-se o modelo (1) com dados da componente  $B_z$  filtrados por MA de 30 minutos e retificados, calculou-se, então, os valores previstos para o índice AE, que foram comparados aos dados originais deste último. Os valores previstos, em geral, obedecem ao período imposto pela curva do índice AE original, conforme mostrado na Figura 2.

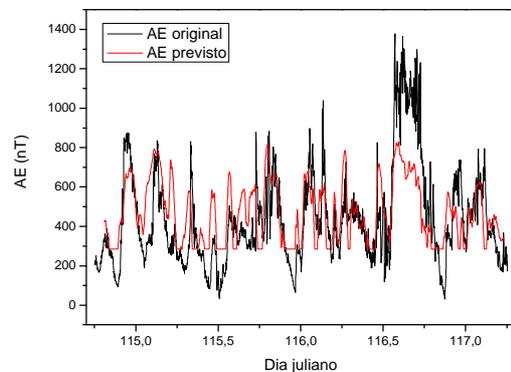


Figura 2 – Curvas de intensidade do índice AE original e previsto para o 1º evento HILDCAA de 1998.

Percebe-se na Figura 2 que a menor intensidade prevista ocorre quando  $B_z = 0$  (restando, pela equação (1), o coeficiente linear = 285,08881), que foi introduzido na série da componente  $B_z$  pelo processo de retificação. Dessa forma, também efetuou-se o cálculo dos valores previstos do índice AE pelo modelo utilizando-se dados da componente  $B_z$  com filtro de 30 minutos sem aplicar retificação. A curva prevista encontrada também obedece ao período imposto pela curva do índice AE original, conforme pode-se observar na Figura 3. As correlações entre os valores dos índices AE previstos e originais são mostradas na Tabela 2.

## Discussão

Os períodos de eventos HILDCAAs são marcados por flutuações nas componentes de campo magnético do meio interplanetário ocasionadas por ondas de Alfvén, conforme já verificado por Tsurutani e Gonzalez (1987) e Guarnieri (2005). O modelo construído assume que períodos em que a componente  $B_z$  do campo magnético do meio interplanetário esteja orientada para o sul produzam contínua atividade no índice AE.

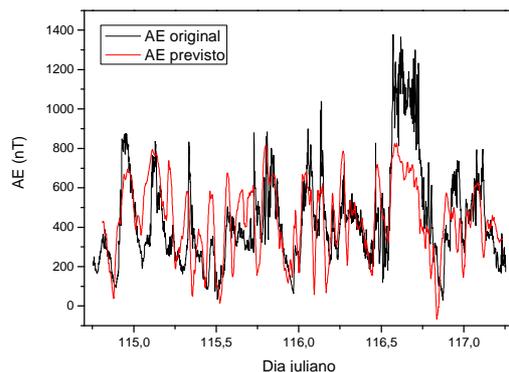


Figura 3 – Curvas de intensidade do índice AE original e previsto para o 1º evento HILDCAA de 1998 sem aplicação de retificação aos dados da componente Bz.

Tabela 2 – Coeficientes de Correlação entre as curvas do índice AE original e previsto alimentando-se o modelo com dados do Bz retificados e não retificados.

Evento	Com retificação		Sem retificação	
	R	Lag	R	Lag
1_1998	0.932009	-10	0.929243	-12
1_1999	0.887396	0	0.879105	-5
2_1999	0.924946	-8	0.911118	-9
3_1999	0.945236	-4	0.945500	-5
4_1999	0.907689	-6	0.889392	-11
5_1999	0.907689	-4	0.915381	-10
6_1999	0.918370	-8	0.896430	-11
7_1999	0.917695	-10	0.864703	-11
2_2000	0.893464	-2	0.860317	-8
4_2000	0.945504	0	0.946780	0
1_2001	0.934363	-8	0.926407	-23

Por isso, sua construção utilizou justamente estes intervalos da componente Bz, condicionando seus dados a um processo de retificação, que eliminou valores positivos da sua série de dados. Alimentando o modelo com esta mesma série, obtém-se valores previstos consideravelmente correlacionados (conforme a Tabela 2) quando comparados aos dados originais do índice AE. Isto deve-se ao fato de que o modelo consegue interpretar uma relação linear entre os períodos de campo magnético orientado para o sul e índices elevados de atividade auroral terrestre. Dessa forma, porém, não se pode afirmar o mesmo para intervalos de intensidade positiva do Bz. Alimentando-se o mesmo modelo com dados não-retificados da componente Bz, pela observação dos gráficos (exemplificados pela Figura 3) de valores estimados *versus* valores reais, observam-se valores de coeficientes de correlação um pouco menores. No entanto, o uso destes valores com coeficientes de correlação um pouco menores do que aqueles obtidos com as séries retificadas, justifica-se plenamente devido a melhor representação do fenômeno físico, como pode ser observado visualmente no gráfico da Figura 3.

## Conclusão

O trabalho desenvolvido construiu um modelo matemático que realiza a previsão do índice AE com base apenas em dados da componente Bz do campo magnético do meio interplanetário, em intervalos de ocorrência de eventos HILDCAAs relacionados a ondas de Alfvén. As técnicas aplicadas permitiram selecionar os eventos que apresentam melhor correlação entre AE e Bz e realizar filtragens que melhoraram a qualidade da previsão. Comparado a dados observados de 14 eventos HILDCAAs identificados entre os anos de 1998 e 2001, o modelo prevê o índice AE com uma correlação superior a 85% para todos os eventos.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao IP&D / Lab. Física e Astronomia - UNIVAP, pela estrutura de trabalho disponibilizada e auxílio dos pesquisadores e ao CNPq, pela bolsa de iniciação científica concedida pelo processo nº 117619/2007-8.

## Referências

- BELCHER, J. W., DAVIS JR., L. . **J. Geophys. Res.**, v. 76, p. 3534, 1971.
- BHATTACHARYYA, G. K.; JOHNSON, R. A. Statistical concepts and methods. 639 p. John Wiley, New York, 1977.
- FONSECA, J. S. Estatística Aplicada. .2. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 1985. 267 p.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. **J. Geophys. Res.**. V.99, p. 5771-5792, 1994.
- GONZALEZ, W. D. ; TSURUTANI, B. T.; CLÚA DE GONZALEZ, A. L.. **Sp. Sci. Rev.** V.88, p. 529-562, 1999.
- GUARNIERI, F. L.. Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração. 2005. 315 f. Tese de Doutorado do curso de pós-graduação em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos.
- LAKHINA, G. S. . **Bul. of the Astr. Soc. of Ind.**, v. 28, p. 593-646, 2000.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. Previsão de Séries Temporais. São Paulo: Ed. Atual, 1985. 436 p.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical Methods. Iowa University Press, 1989. 503 p.
- STERN, D. P.; NESS, N. F.. **An. Rev. of Ast. & Astr.**, v. 20, p. 139-161, 1982.
- TSURUTANI, B. T.; GOLDSTEIN, B. E.; SMITH, E. J.; GONZALEZ, W. D.; TANGE, F.; AKASOFU, S. I.; ANDERSON, R. R.. **Planet. and Space Science.**, v. 38, n. 1, p. 109-126, 1990.
- TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.. **Planet. and Space Science.**, v. 35, n. 4, p. 405-412, 1987.