



Seasonal Variation of the Earth's Magnetic Field Measured at Three Different Latitudes in Brazil

S. S. Chen^{1,2}, C. M. Denardini¹, L. C. A. Resende¹, J. Moro¹

¹ National Institute for Space Research (INPE), S. J. Campos-SP, Brazil

² Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté-SP, Brazil

Copyright 2013, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In the current paper we present the study about the seasonal variation of the Earth's magnetic field based on magnetic measurements from the Embrace Magnetic Network at three different latitudes in Brazil (SLZ, EUS and CXP). For this study, we used data covering the period from September 2010 to December 2012. Among the results we show clear seasonal modulation in all components, irrespective the latitude. The H component analysis revealed to have a seasonal dependence in both aspects: the duration of positive excursion along the day and the maximum amplitude.

Introdução

O campo magnético principal da Terra é gerado em seu núcleo e acredita-se que sua formação seja causada pela rotação diferencial entre os núcleos interno e externo. Suas variações têm escalas de tempo de anos e séculos. No modelo mais aceito, as linhas de campo magnético gerado pelo núcleo assemelham-se com um dipolo magnético, no que, os polos magnéticos não coincidem com os polos geográficos (Chapman e Bartels, 1940). Este campo representaria 99% do campo terrestre.

Os campos magnéticos gerados pelas correntes elétricas que fluem na magnetosfera e ionosfera são responsáveis pelo 1% restante. Estes campos variam constantemente devido às condições do cinturão de Radiação de Van Allen (Kivelson e Russel, 1995) e da atmosfera superior (Hargreaves, 1992). Nestes campos geomagnéticos de origem externa as escalas temporais variam na ordem de segundos, horas, dias e meses. Dentre as correntes capazes de gerar campos magnéticos podemos citar: a corrente anelar, a corrente do sistema Sq e as correntes do eletrojato auroral (AEJ) e equatorial (EEJ).

A corrente anelar é uma corrente que flui no cinturão de Van Allen (Hudson et al, 2008). A corrente do sistema Sq é uma corrente movida pela expansão da atmosfera neutra devido ao aquecimento solar (Hargreaves, 1992; Schunk e Nagy, 2004). As correntes dos eletrojato são intensificações causadas pela geometria do campo geomagnético que permite uma organização favorável da condutividade do plasma. Eles são observados, como o nome diz, ao longo do equador magnético

(Denardini, 2003) e em torno das ovas aurorais (Baumjohann, 1983).

Instrumentação e Metodologia de Análise de Dados

Neste trabalho, realizamos um simples estudo estatístico para estudar as variações sazonais das componentes magnéticas em diferentes latitudes do setor brasileiro. Para isso usamos dados coletados com magnetômetros do tipo *fluxgate*. Os magnetômetros usados neste estudo estão localizados nas estações magnéticas da Rede Embrace de Magnetômetros (INPE/MCTI). Dentre as estações magnéticas, temos Cachoeira Paulista, SP (22.70°S, 45.01°W, DIP -36.43°, CXP), Eusébio, CE (3.88°S, 38.42°W, DIP -16.51°, EUS) e São Luís, MA (2.59°S, 44.21°W, DIP -7.26°, SLZ).

O campo geomagnético medido pelos magnetômetros pode ser visto como um vetor de campos, cujas características são: módulo, direção e sentido. A Figura 1 mostra a decomposição do vetor campo geomagnético (F) em suas componentes lineares e angulares nos sistemas de coordenadas geográfico (X,Y,Z) e geomagnético (H,D,Z).

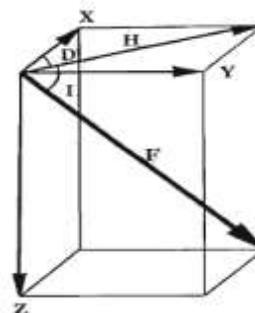


Figura 1: Componentes lineares e angulares do campo geomagnético.

Nesta figura, o vetor do campo geomagnético pode ser obtido através do sistema de coordenadas cartesianas X, Y e Z, onde: X é definido como a componente horizontal em direção do meridiano geográfico, considerada positiva em direção ao norte; Y é definida como a componente horizontal transversal ao meridiano geográfico, considerada positiva em direção ao leste; e Z é definida como a componente vertical, considerada positiva para baixo. Também é possível obtê-lo pelo sistema de coordenadas cilíndricas H, D e Z, onde: H é definida como a magnitude da componente horizontal, considerada positiva em qualquer direção; D é definida como o ângulo de declinação entre as componentes X e H, considerada positiva de norte para leste; e a componente Z é equivalente à mesma do sistema de coordenadas cartesianas.

Os magnetômetros da Rede Embrace medem as variações da intensidade do campo geomagnético ao longo do tempo. Estas

variações são medidas pelo sistema de coordenadas geomagnético (H,D,Z) em intervalos de 1 segundo. Para este estudo utilizou-se o valor médio temporal do campo geomagnético a cada 1 minuto.

Um exemplo de medida da variação diária observada pelos magnetômetros da Rede Embrace no dia 19 de novembro de 2012 é apresentado na Figura 2. O gráfico superior mostra a amplitude da variação diária da componente H medida em nano Teslas (nT). O gráfico central mostra a amplitude da variação diária da componente D medida em graus. Já o gráfico inferior mostra a amplitude da variação diária da componente Z medida em nano Teslas (nT). Os quadrados indicam os dados de SLZ, os círculos referem-se aos dados de EUS e os triângulos mostram os dados de CXP.

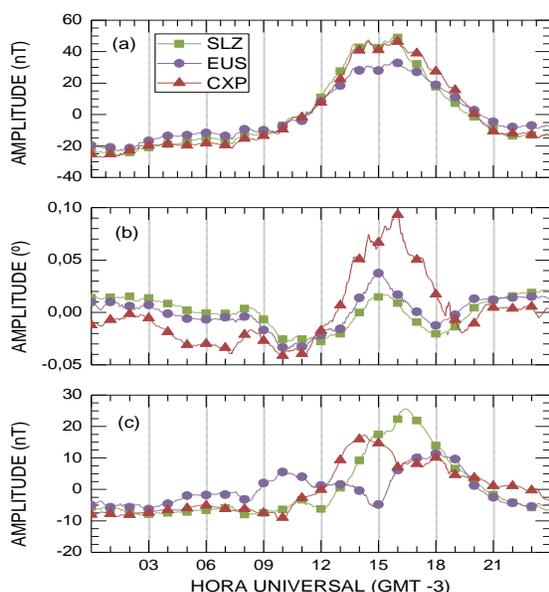


Figura 2: Exemplo de medida diária observada pelos magnetômetros da Rede EMBRACE no dia 19 de novembro de 2012. O eixo vertical do gráfico superior (a) mostra a amplitude em nano Teslas (nT) da variação diária da componente H. O eixo vertical do gráfico médio (b) mostra a amplitude em graus (°) da variação da componente D. O eixo vertical do gráfico inferior (c) mostra a amplitude em nano Testas (nT) da variação diária da componente Z.

Neste estudo foram considerados os dias magneticamente mais calmos. Esses dias foram classificados de acordo com o índice magnético planetário Kp disponível no *World Data Center for Geomagnetism* de Kyoto (WDC, Kyoto). Especificamente, foram utilizados os cinco dias mais calmos de cada mês referente ao período de 30 de setembro de 2010 a 31 de dezembro de 2012.

Os dados são processados através de uma rotina desenvolvida em IDL (em inglês *Interactive Data Language*) para calcular a variação das componentes H, D e Z do campo magnético terrestre e seguem a seguinte sequência de processamento para cada estação: (1) as informações relativas aos dias quietos do mês escolhido são carregadas; (2) os dados magnéticos correspondentes àquela estação para os 5 dias mais calmos do mês são carregados; (3) uma filtragem para eliminar picos espúrios é aplicada a cada dia de dados individualmente; (4) uma média amostral é obtida, representando a variação média

de cada uma das componentes naquele mês; e (5) os resultados são gravados em disco.

Resultados e Discussões

Nos mapas da Figura 3 são apresentadas as variações diurnas médias diárias mensais das componentes H (a esquerda), D (ao centro) e Z (a direita) do campo magnético terrestre para as regiões de SLZ (painéis superiores); EUS (painéis centrais); e CXP (painéis inferiores). A análise é feita em relação à hora universal do dia (*Universal Time*), apresentada no eixo vertical contra o mês no qual a medida foi obtida, apresentada no eixo horizontal. As regiões em branco no mapa correspondem à ausência de dados. O diagrama de cores nos gráficos de contorno refere-se à intensidade das variações das componentes do campo geomagnético, apresentada na escala à direita de cada mapa.

Com relação às variações na amplitude da componente horizontais (H) medida na estação de SLZ podemos afirmar que ocorreram 2 máximos entre as 14 e 15 UT ao longo do ano de 2012. Os 2 máximos atingiram aproximadamente 76 nT, sendo que o primeiro ocorreu no final do solstício de dezembro de 2011 e, o segundo ocorreu no início do equinócio de setembro 2012.

Em relação às variações da amplitude para a mesma componente medida na estação de EUS é possível observar a presença de 4 máximos. Neste caso, o primeiro ocorreu no final do solstício de dezembro de 2011. O segundo ocorreu no início do equinócio de setembro de 2012. Os outros 2 ocorreram entre o equinócio de março de 2012 e o início do solstício de junho de 2012. A maior amplitude é notada no primeiro máximo, atingindo em torno de 73 nT. O restante dos máximos de amplitude atingiram valores próximos de 63 nT.

Para a estação de CXP, pode-se afirmar que ocorreram diversos máximos em relação às amplitudes da componente H. Esses máximos foram encontrados próximos aos equinócios de setembro, representados pelo contorno de 40 nT em 2010; 60 nT em 2011; e 60 nT em 2012. Além disso, há 2 máximos próximos aos equinócios de março, representados pelos contornos de 50 nT em 2011; e 50 nT em 2012. Nota-se no mapa de CXP que geralmente os mínimos de amplitude ocorreram durante os solstícios, atingindo em torno de 30 nT. Contudo, em um caso houve um máximo durante o solstício de dezembro de 2011, a qual a amplitude alcançou 50 nT. Em resumo, com relação à variação sazonal nos dados coletados a CXP, parece haver uma clara modulação, tanto na amplitude quanto na duração ao longo das horas do dia.

Em relação às variações no ângulo de declinação, como mostra a Figura 1, é notável que no sistema de coordenadas apresentado, a declinação é positiva quando a componente H se afasta da componente X. Portanto, as variações na componente D medida na estação de SLZ, uma região próxima ao equador podemos afirmar que a declinação foi positiva durante o final do solstício de dezembro de 2011 até metade do equinócio de março de 2012 principalmente entre 11 e 15 UT; e durante o solstício de junho de 2012 temos o aparecimento da declinação magnética negativa a partir das 9 até 10 UT, seguido pela declinação positiva entre 12 e 17 UT.

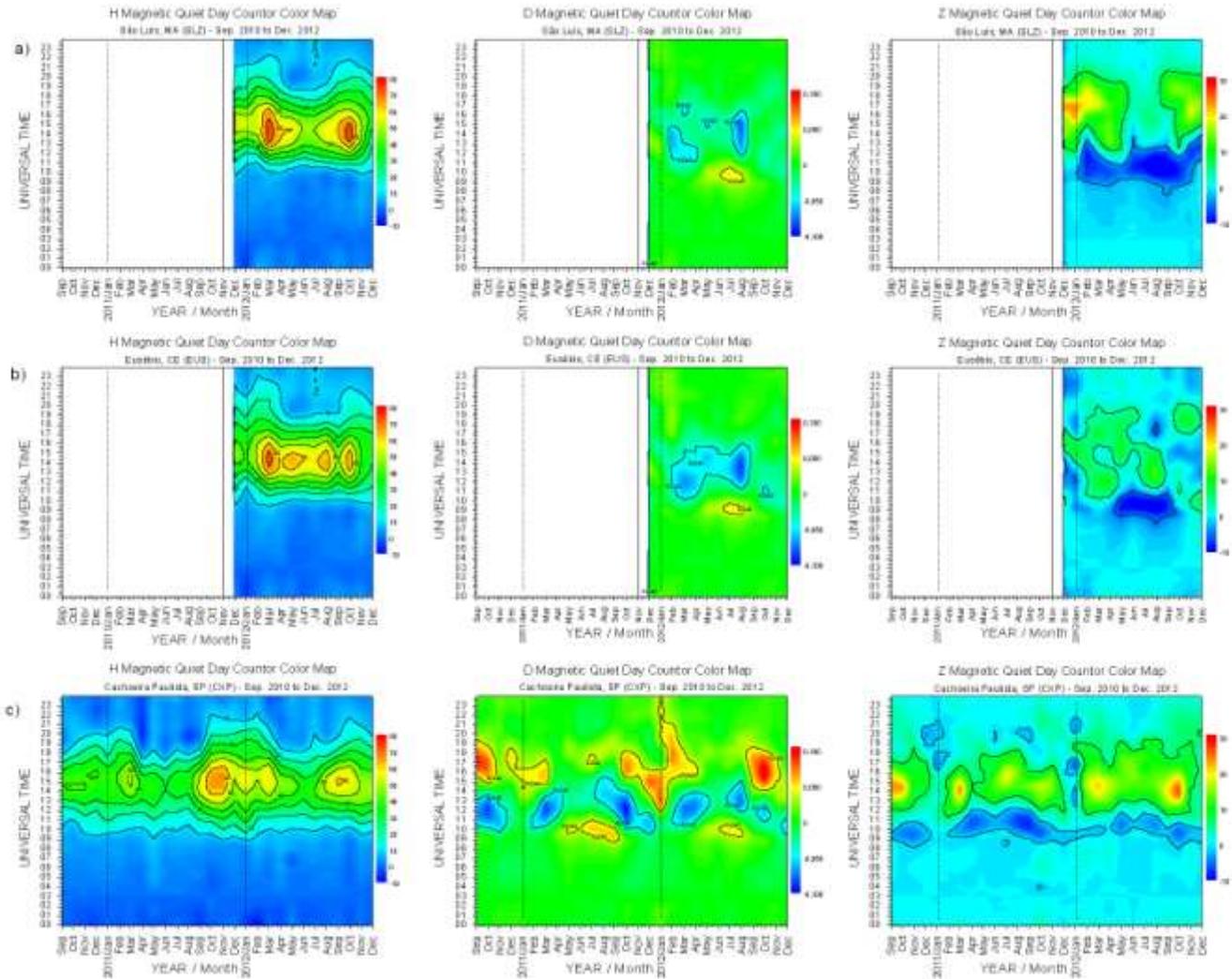


Figura 3: Mapa de contorno das variações diurnas médias diárias mensais das componentes magnéticas H (esquerda), D (centro) e Z (direita) das estações de SLZ (a), EUS (b) e CXP (c).

Com relação às variações na declinação da componente (D) medidas na estação de EUS, podemos afirmar que a variação sazonal da declinação ocorre de maneira semelhante à estação de SLZ. Durante o solstício de 2012 ocorre a variação negativa da declinação magnética, a qual é facilmente percebida.

A análise do mapa da componente D para a estação de CXP revela um comportamento sazonal bem definido que, a grosso modo, pode ser descrito como uma oscilação periódica dos horários nos quais a componente D varia sucessivamente para valores negativos e positivos. Nos solstícios de verão a variação negativa supostamente ocorre em torno das 10:30 UT, contudo ela não é facilmente identificada no mapa. Já a variação positiva pode ser perfeitamente identificada no solstício de 2012. Nos solstício de inverno a variação da componente D inicia-se com uma excursão positiva, a qual ocorre entre as 9 e 10:30 UT, seguida de uma variação negativa próxima das 14 UT e de uma nova excursão positiva em torno das 18 UT. Nos equinócios as variações negativa e positiva da componente D de CXP são bem marcantes. É fácil observar no mapa que há uma clara variação da componente D

para valores negativos, seguido de um retorno para o valor de referência, e uma posterior excursão para valores positivos de declinação. Estas variações tendem a ocorrer nos horários intermediários daqueles observados nos solstícios de verão e de inverno.

Com relação às variações na componente Z observadas na estação de CXP, pode-se verificar um comportamento similar àquele descrito para a componente D da mesma estação. Existe uma dominância de oscilações negativas no período matutino contrastando com as oscilações positivas no período vespertino. As épocas do ano nas quais as oscilações são mais intensas são coincidentes, i.e., nos equinócios é mais fácil de se identificar as variações positivas e negativas. Além disso, as variações também ocorrem mais cedo no verão e mais tarde no inverno. Com relação às variações sazonais de SLZ e EUS, as oscilações positivas e negativas seguem os horários observados na estação de CXP. Contudo, cabe lembrar que o conjunto de dados usado na análise destas estações cobre perto de 1 ano. Deste modo, qualquer conclusão definitiva seria prejudicada pela baixa estatística.

Conclusões

Neste artigo, nós apresentamos os primeiros resultados do estudo das variações sazonais das componentes magnéticas em diferentes latitudes do setor brasileiro realizado com os dados magnéticos coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros. Neste estudo foram considerados os dias magneticamente mais calmos, classificados de acordo com o Kp, referentes ao período de 30 de setembro de 2010 a 31 de dezembro de 2012. Sua análise foi feita com base em mapas de variações diurnas médias diárias mensais das componentes H, D e Z do campo magnético terrestre para as regiões de SLZ, EUS e CXP.

Os resultados revelaram variações sazonais na amplitude H em todas as estações magnéticas. Em SLZ ocorreram 2 máximos, ambos entre as 14 e 15 UT. O primeiro ocorreu no final do solstício de dezembro de 2011 e, o segundo ocorreu no início do equinócio de setembro de 2012. Em EUS foram observados 4 máximos ao longo do ano, todos entre o final do solstício de verão e início do solstício de inverno. Em CXP, a estação com maior disponibilidade de dados, diversos máximos foram observados, sempre próximos aos equinócios de setembro, 2010; 2011; e 2012. Além disso, uma clara modulação, tanto na amplitude quanto na duração ao longo das horas do dia pode ser verificada em todas as estações.

Com respeito à variação da declinação, na estação de SLZ verificamos uma declinação predominantemente positiva durante o final do solstício de dezembro de 2011 até metade do equinócio de março de 2012, principalmente entre 11 e 15 UT. Além disso, observamos uma declinação magnética negativa a partir das 9 até 10 UT, seguido por uma declinação positiva entre 12 e 17 UT durante o solstício de junho de 2012. Para EUS, a variação sazonal da declinação ocorre de maneira semelhante à estação de SLZ. Contudo, a variação em CXP revela um comportamento sazonal bem definido que, a grosso modo, pode ser descrito como uma oscilação periódica dos horários nos quais a componente D varia sucessivamente para valores negativos e positivos.

As variações na componente Z observadas em CXP também apresentaram comportamento periódico sazonal semelhante ao observado na D. Enquanto isso, para SLZ e EUS podemos somente afirmar que as oscilações positivas e negativas seguem os horários observados na estação de CXP.

Agradecimentos

S. S. Chen agradece ao CNPq/MCTI (136457/2012-6). C. M. Denardini agradece ao CNPq/MCTI (305242/2011-3), à FAPESP (2012/08445-9) e ao Governo Federal Brasileiro, o qual provê suporte através do Plano Orçamentário de Pesquisa e Desenvolvimento no Sistema Científico Brasileiro de Previsão do Clima Espacial (08/2013-2017, Ação Orçamentária N387 do Programa 2056).

Referências

- BAUMJOHANN, W. *Ionospheric and field-aligned current systems in the auroral zone: a concise review*. *Advances Space Research*, v.2, n.10, p55-62, 1983.
- CHAPMAN, S.; BARTELS, J. *Geomagnetism: Volume 1 Geomagnetic and related phenomena*. Third published. London: Oxford, 1940.

DENARDINI, C. M. Estudo da eletrodinâmica durante o período de máxima atividade solar (1999-2002) / C. M. Denardini. – São José dos Campos: INPE, 2003. 271p. – INPE-10554-TDI/941.

HARGREAVES, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge; Cambridge University Press, 1992.

HUDSON, M. K.; KRESS, B. T.; MUELLER, H.-R.; ZASTROW, J. A.; BLAKE, J. B. *Relationship of the Van Allen radiation belts to solar wind drivers*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.70, p708-729, 2008.

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press, 2004.