

EFEITOS IONOSFÉRICOS NA CAMADA F OBSERVADOS EM REGIÕES EQUATORIAL E DE BAIXA LATITUDE NO SETOR BRASILEIRO DURANTE SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS EM OUTUBRO DE 2003 UTILIZANDO DADOS DE GPS DA REDE RBMC

Alessandro José de Abreu, Yogeshwar Sahai, Paulo Roberto Fagundes, Fábio Becker Guedes, Valdir Gil Pillat

*Universidade do Vale do Paraíba/IP&D, Avenida Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, SP, 12244-000
abreu.alessandro@gmail.com*

Resumo

O objetivo desta investigação consiste em estudar o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante supertempestades geomagnéticas ocorridas nos dias 29 e 30 de outubro de 2003, que é um dos assuntos relevantes relacionados com o Tempo Espacial (“Space Weather”). Durante este período, foram observados dois “sudden storm commencement (SSC)”, (06:11 TU do dia 29/10 e 10:29 TU do dia 30/10) e três intensas tempestades geomagnéticas com $|Dst|_{\max}$ igual a 180 nT às 10:00 TU do dia 29/10, $|Dst|_{\max}$ igual a 363 nT à 01:00 TU do dia 30/10 e $|Dst|_{\max}$ igual a 401 nT às 23:00 TU do dia 30/10. Para investigar os efeitos destas tempestades geomagnéticas sobre a camada F ionosférica no setor brasileiro, foram analisados os dados do sistema de posicionamento global (“Global Positioning System – GPS”) operado em Imperatriz (5,5° S, 47,5° O; lat. dip 2,9° S), Brasília (15,9° S, 47,9° O; lat. dip 11,7° S), Presidente Prudente (22,3° S, 51,4° O; lat. dip 14,9° S) e Porto Alegre (30,1° S, 51,1° O; lat. dip 20,7° S) pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC). Observaram-se grandes aumentos do VTEC (“Vertical Total Electron Content”) nas estações de baixa latitude (Presidente Prudente e Porto Alegre), na qual são regiões afastadas do equador geomagnético, nos dias 30 e 31 de outubro perto da 00:00 TU. Os aumentos no VTEC estão relacionados com a forte diminuição do Dst. Também durante este mesmo período, foram observadas intensas flutuações de fase. Estas observações do VTEC e flutuações de fase mostram uma rápida penetração de campos elétricos magnetosféricos perturbados em direção ao equador geomagnético, indicando rápida subida da camada F, resultando em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixa latitude e a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala.

1 Introdução

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera terrestre e está situada a partir de aproximadamente 70 km de altitude e se estende até uma altitude de aproximadamente 1000 km da superfície da Terra, sendo formada por partículas livres carregadas, ou seja, por partículas ionizadas. As partículas ionizadas são resultantes da ação da radiação solar, devido à absorção dos raios no extremo ultravioleta (EUV) e raios X, pelas partículas neutras.

A ionosfera pode ser classificada conforme a variação vertical da densidade eletrônica n_e em unidades de elétrons m^{-3} . A integral da densidade eletrônica (equação 1) ao longo do caminho percorrido pelo sinal GPS entre o satélite S e o receptor R , numa coluna cilíndrica com seção transversal de $1 m^2$ representa o conteúdo total de elétrons TEC e é medido em unidades de TEC (“TECU – Total Electron Content Unit”) que corresponde a 10^{16} elétrons m^{-2} [1].

$$TEC = \int_R^S n_e ds \quad (1)$$

O conteúdo total de elétrons na direção vertical (“VTEC – Vertical Total Electron Content”) é dado por:

$$VTEC = \cos(z') TEC \quad (2)$$

onde o valor de z' , representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altitude média Hm (altura média da ionosfera com aproximadamente 300 km) [1]. A Figura 1 ilustra as quantidades envolvidas na equação 2.

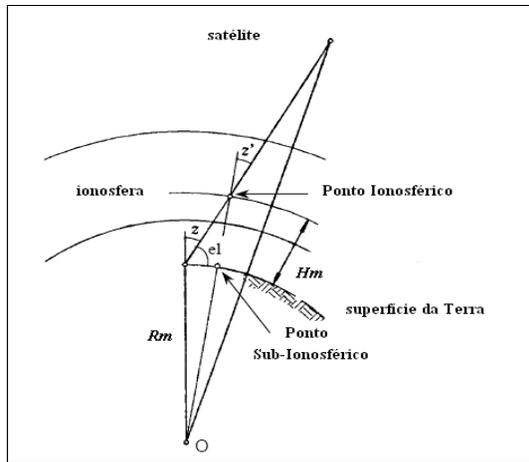


Figura 1: Geometria dos parâmetros observados na definição do VTEC. Fonte: Adaptada de [2].

1.1 Tempo Espacial (“Space Weather”)

Há muitos anos o homem busca novos conhecimentos obtendo assim importantes avanços na área científica, tecnológica e espacial, fornecendo respostas importantes para muitos problemas da humanidade como a origem e evolução do universo, entender o ambiente ao redor da Terra, o conhecimento do Sol e as suas mudanças e efeitos que causam no nosso planeta. Recentemente, baseado em diversos fenômenos característicos do Sol e suas grandes variações, e as formas que estas variações afetam os componentes da magnetosfera, ionosfera e termosfera terrestre, originou-se uma nova forma de estudo denominada Tempo Espacial ou “Space Weather”. Espera-se brevemente que com tantos avanços será possível prever esse Tempo Espacial assim como prevemos as chuvas, tempestades, etc. Os fenômenos do Tempo Espacial podem influenciar o desempenho e a confiabilidade de sistemas tecnológicos (comunicação, navegação, satélites, suprimento de energia, etc), que às vezes podem até colocar em risco a vida ou a saúde humana.

Sendo assim, o objetivo principal da presente investigação consiste em estudar a resposta da camada F em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante períodos de supertempestades geomagnéticas (definido como critério o índice $|Dst|_{\max} > 250$ nT) ocorridas no final de outubro de 2003. Alguns importantes trabalhos realizados e relacionados a este período de outubro podem ser citados como [3] e [4].

Uma tempestade geomagnética inclui geralmente o “sudden storm commencement (SSC)”, na qual ocorre a partir do impacto do vento solar na magnetosfera, podendo variar de minutos a horas caracterizando o início da fase inicial de uma tempestade de grande intensidade [5], não ocorrendo em tempestades de menor intensidade. Inclui também, fase principal e fase de recuperação [6]. A entrada de energia na parte superior da atmosfera maximiza durante a fase principal, enquanto que durante a fase de

recuperação, a atividade geomagnética e a entrada de energia minimizam [7].

Durante as tempestades geomagnéticas, as partículas carregadas do vento solar relacionadas com as erupções solares (“solar flare”) ou ejeções de massa coronal (“coronal mass ejection – CME”), são conduzidas pela nossa magnetosfera na região de alta latitude terrestre. Como foi discutido em [8], durante a tempestade geomagnética, modificações ionosféricas em regiões equatorial e de baixa latitude foram observadas devido à penetração pontual dos campos elétricos perturbados de origem magnetosférica oriundos da região de alta latitude e ao aquecimento da alta atmosfera em altas latitudes em consequência à precipitação de partículas energéticas conhecido como “aquecimento Joule”. O “aquecimento Joule” resulta em modificações da circulação termosférica global e perturbações dos ventos termosféricos (zonal e meridional), modificando a dinâmica da termosfera/ionosfera equatorial.

2 Materiais e Métodos

Nesta investigação foram utilizados os dados do sistema de posicionamento global (“Global Positioning System – GPS”) das estações de Imperatriz (IMPZ), Brasília (BRAZ), Presidente Prudente (UEPP) e Porto Alegre (POAL) (Figura 2), da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC). A Tabela 1 mostra informações sobre cada estação utilizada nesta investigação. As observações são normalmente obtidas 24 horas quase que ininterruptas, independente de condições atmosféricas.

O sistema GPS é composto por uma constelação de 24 satélites operacionais, transmitindo ondas eletromagnéticas na frequência de UHF para a Terra, orbitando a uma altitude de aproximadamente 20.200 km em seis órbitas e com uma inclinação, em relação ao equador geográfico, de 55° [9].

O formato dos dados de GPS utilizados nesta investigação é no padrão RINEX (“Receiver Independent Exchange Format” – formato independente de receptor) e no padrão SP3 (“Standard Product # 3” – produto padrão).



Figura 2: Mapa indicando as estações de GPS utilizadas na investigação.

Tabela 1: Cidade, Sigla, Latitude e Longitude Geográfica e Latitude dip (latitude magnética referente ao equador magnético da Terra) para cada estação utilizada na investigação.

| Cidade | Sigla | Lat. | Long. | Lat. dip |
|----------------|-------|--------|--------|----------|
| Imperatriz | IMPZ | 5,5°S | 47,5°O | 2,9°S |
| Brasília | BRAZ | 15,9°S | 47,9°O | 11,7°S |
| Pres. Prudente | UEPP | 22,3°S | 51,4°O | 14,9°S |
| Porto Alegre | POAL | 30,1°S | 51,1°O | 20,7°S |

O padrão RINEX é composto por três arquivos ASCII: dados de observações, dados meteorológicos e de mensagens de navegação [10]. O arquivo utilizado foi o de dados de observações, em que apresentam importantes parâmetros de dados através das portadoras L_1 e L_2 e dos códigos C/A e P.

As frequências L_1 e L_2 do padrão RINEX referem-se às ondas portadoras, usam frequências na banda UHF do espectro eletromagnético. São geradas a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz e multiplicadas por 154 e 120, respectivamente, obtendo-se então as frequências (L) e comprimentos de onda (λ) [2]:

| | |
|---|-----|
| $L_1 = 1575,42 \text{ MHz}$ e $\lambda \cong 19 \text{ cm}$ | (3) |
| $L_2 = 1227,60 \text{ MHz}$ e $\lambda \cong 24 \text{ cm}$ | (4) |

O código C/A (“Course Acquisition” – fácil aquisição), é utilizado para computar posição a partir do

código gerado pelo satélite GPS e transmitidos para os usuários através de um sinal de rádio. Possui comprimento de onda de aproximadamente 300 m e é transmitido a uma frequência de aproximadamente 1,023 MHz [2]. Trata-se de um código de acesso livre de uso civil.

Por fim, o código P (“Precise or Protected” – preciso ou protegido), é um código reservado para usuários autorizados, é transmitido com frequência de aproximadamente 10,23 MHz com comprimento de onda da ordem de 30 m [2].

O padrão SP3 é referenciado pela hora GPS, velocidade (dm/seg) e posição (km) do centro de massa do satélite para intervalos de 15 minutos [10]. Os dados possuem três formatos: IGS, IGR e IGU. O formato utilizado foi o IGR por possuir órbitas rápidas, disponíveis dentro de até 48 horas.

As variações do campo geomagnético foram analisadas através dos índices AE (“electrojet auroral” – intensidade do eletrojet auroral), K_p (“planetary index” – intensidade da tempestade) e Dst (“disturbance storm time index” – intensidade da corrente de anel). Também foram utilizados para a análise, dados do B (“interplanetary magnetic field - IMF”) - campo magnético interplanetário total) e B_z (componente vertical Z do IMF) [11], obtidas pelo satélite ACE e disponibilizados em (<http://www.srl.caltech.edu/ace/>). Os dados do vento solar não estavam disponíveis para esta tempestade geomagnética. A Figura 3 mostra as variações de B, B_z , AE, K_p e Dst durante o período de 27 a 31 de outubro de 2003.

Pode-se mencionar que durante o período de 29 e 30 de outubro de 2003 foram observadas três intensas tempestades geomagnéticas com $|Dst|_{\max}$ igual a 180 nT às 10:00 TU do dia 29/10, $|Dst|_{\max}$ igual a 363 nT à 01:00 TU do dia 30/10 e $|Dst|_{\max}$ igual a 401 nT às 23:00 TU do dia 30/10, sendo que duas ocorreram com “sudden storm commencement (SSC)”, (06:11 TU do dia 29/10 e 10:29 TU do dia 30/10) [3].

Para o cálculo do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e das flutuações de fase (ROT – taxa de variação do TEC dado em TECU/min), apresentados nas Figuras 4 e 5, foram utilizados programas para análise de dados de GPS desenvolvidos na Universidade de Nagoya no Japão em colaboração com a Universidade do Vale do Paraíba em São José dos Campos – SP.

3 Resultados

A Figura 3 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 4 e 5 apresentam observações do VTEC e flutuações de fase, respectivamente, obtidos em IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL, compondo a rede RBMC do sistema GPS.

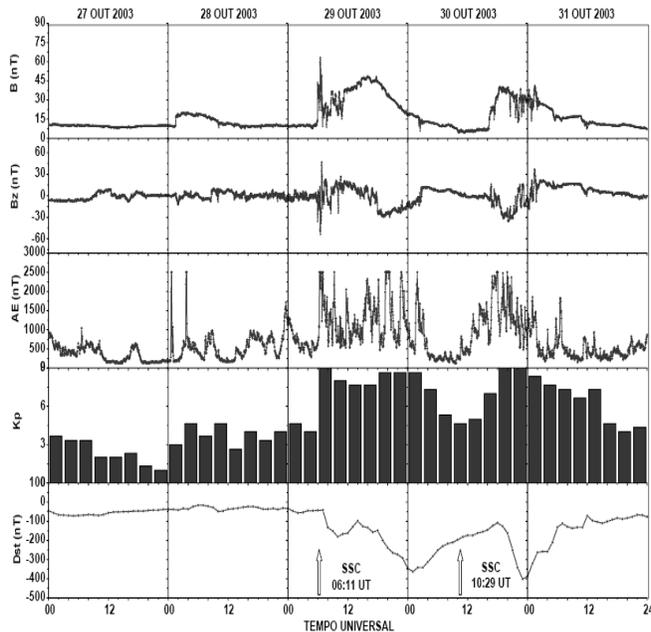


Figura 3: Os gráficos indicam o B (“interplanetary magnetic field” (IMF) - campo magnético interplanetário total), B_z (componente vertical Z do IMF) e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003.

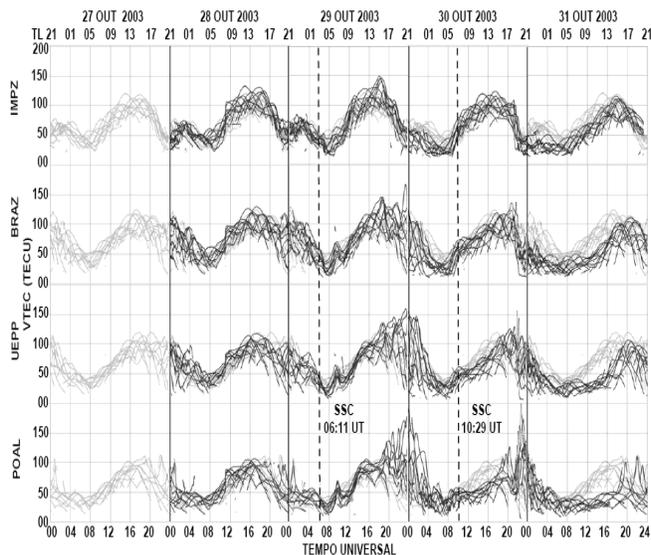


Figura 4: Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC), entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

As estações escolhidas entre aproximadamente 20 estações, tem latitude dip variando de 2,9°S (perto do equador geomagnético terrestre) a 20,7°S (estação mais afastada da região equatorial geomagnética). Uma vez que o ângulo de declinação magnética no setor brasileiro é de aproximadamente 20° a oeste do meridiano geográfico, as estações escolhidas podem ser consideradas

aproximadamente alinhadas ao longo do campo geomagnético terrestre.

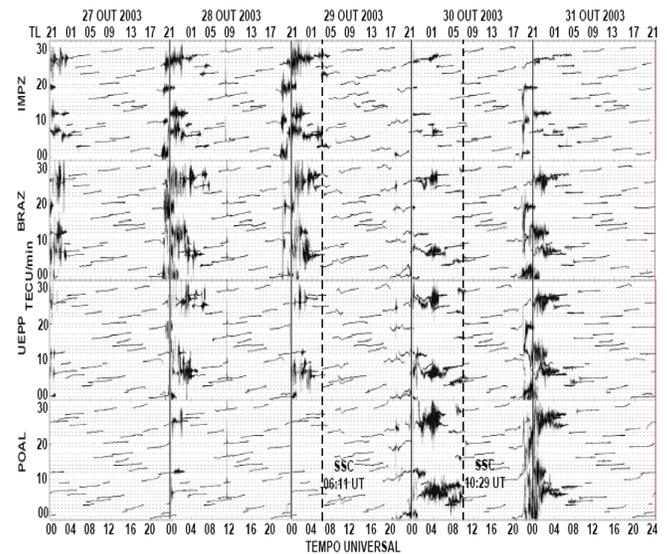


Figura 5: Flutuações de fase (ROT), entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

Os gráficos (Figura 4) para o dia 27 de outubro, são considerados como dias geomagneticamente calmos (como indica também a Figura 3). Os gráficos para os dias 28 a 31 de outubro incluem os dias geomagneticamente perturbados e fases da tempestade geomagnética. A variação dos dias calmos para os perturbados mede a influência da tempestade geomagnética sobre o VTEC. Para o mesmo período citado, a Figura 5 indica as flutuações de fase.

4 Discussão

Os dados (Figura 3) durante as tempestades geomagnéticas indicam que o campo magnético interplanetário total B, principalmente nos dias em que houve tempestade (29/10 e 30/10), foi maior que 10 nT (indicando a presença de nuvem magnética em IMF), chegando a ultrapassar os 60 nT no dia 29 de outubro e 40 nT no dia 30 de outubro. Também mostrado na Figura 3, o campo magnético interplanetário B_z foi negativo (direção sul) nos dias 29 e 30 de outubro, indicando que a magnetosfera terrestre estava aberta para entrada de partículas energéticas denominadas de vento solar. O índice Dst obteve forte diminuição pouco antes da meia noite dos dias 30 e 31 de outubro.

Como foi mostrado por [3], a região equatorial brasileira sofreu rápida subida da camada F após os dois SSC durante as tempestades geomagnéticas perto das 22:00 TU do dia 29 de outubro e 21:30 TU do dia 30 de outubro,

resultando em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixa latitude [3]. Pode-se observar (Figura 4) nos horários perto da 00:00 TU dos dias 30 e 31 de outubro um grande aumento do VTEC em regiões afastadas do equador geomagnético (UEPP e POAL). A Figura 5, indica flutuações de fase, em que mostram a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas de plasma [12], nas noites de 27-28, 28-29, 29-30 e 30-31. Pode-se observar a diferença das flutuações de fase antes e depois da tempestade geomagnética. Após a ocorrência da tempestade geomagnética, as fortes flutuações são mais intensas nas regiões de baixa latitude, onde observou-se presença de grande aumento do VTEC (Figura 4 – grande aumento da densidade eletrônica).

5 Conclusão

Nesta investigação foi estudado o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante as supertempestades geomagnéticas ocorridas nos dias 29 e 30 de outubro de 2003, obtendo assim importantes resultados.

Durante as tempestades geomagnéticas ocorridas em 29 e 30 de outubro de 2003, observou-se que o campo magnético interplanetário total B ultrapassou os 10 nT, indicando a presença de nuvem magnética em IMF. Para o mesmo período, o IMF Bz foi negativo, ou seja, estava direcionado para o sul, na qual mostrou que a magnetosfera terrestre esteve aberta para a entrada de partículas energéticas (vento solar).

Foram observados grandes aumentos do VTEC nas estações de Presidente Prudente e Porto Alegre (regiões afastadas do equador geomagnético), nos dias 30 e 31 de outubro perto da 00:00 TU. Também para esta mesma região e mesmo período, observou-se intensas flutuações de fase. Estas observações do VTEC e flutuações de fase mostraram respectivamente uma rápida penetração de campos elétricos perturbados de origem magnetosférica oriundos da região de alta latitude seguindo para o equador geomagnético indicando rápida subida da camada F na região equatorial que resultou em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixa latitude e a geração de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas de plasma.

Agradecimentos

Este trabalho é parcialmente financiado por projetos FAPESP e CNPq. Os autores agradecem ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pelo fornecimento de dados de GPS da rede RBMC.

Referências

- [1] HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS: Theory and Practice**. 3 ed. Wien: Springer-Verlag, 1994.
- [2] MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2000.
- [3] SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BECKER-GUEDES, F.; BOLZAN, M. J. A.; ABALDE, J. R.; PILLAT, V. G.; DE JESUS, R.; LIMA, W. L. C.; CROWLEY, G.; SHIOKAWA, K.; MACDOUGALL, J. W.; LAN, H. T.; IGARASHI, K.; BITTENCOURT, J. A. Effects of the major geomagnetic storms of October 2003 on the equatorial and low-latitude F region in two longitudinal sectors. **J. Geophysical Research**, v. 110, n. A12S91, 2005.
- [4] LIN, C.H.; RICHMOND, A.D.; LIU, J.Y.; YEH, H.C.; PAXTON, L.J.; LU, G.; TSAI, H.F.; SU, S.Y. Large-Scale variations of the low-latitude ionosphere during the October-November 2003. **J. Geophysical Research-Space Physics**, v. 110, n. A09S28, 2005.
- [5] CAMPBELL, W.H. **Introduction to Geomagnetic Fields**. The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1997
- [6] SCHUNK, R. W.; SOJKA, J. J. Ionosphere-thermosphere space weather issues. **J. Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 14, p. 1527-1574, 1996.
- [7] SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry**. Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- [8] ABDU, M.A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 5, n. 13, p. 1505-1519, 1997.
- [9] ROCHA, J. A. M. R. **GPS: Uma abordagem prática**. Recife: Editora Bagaço, 2003.
- [10] FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados do GPS**. 142f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1999.
- [11] KUMAR, S.; CHANDRA, H.; SHARMA, S. Geomagnetic storms and their ionospheric effects observed at the equatorial anomaly crest in the Indian Region. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, p. 581-594, 2005.
- [12] MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, v. 35, n. 3, p. 885-904, 2000.