

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

*Alessandro José de Abreu<sup>1,2</sup>, Yogeshwar Saha<sup>2,3</sup>, Fábio Becker Guedes<sup>2</sup>, Valdir Gil Pillat<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Bolsista, CAPES, abreu.alessandro@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade do Vale do Paraíba/IP&D, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000

<sup>3</sup>Orientador

**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 super tempestades 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) e três intensas tempestades geomagnéticas. 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, Brasília, Presidente Prudente e Porto Alegre pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC). Observou-se grandes aumentos do VTEC (“vertical total electron content”) nas estações de Presidente Prudente e Porto Alegre nos dias 30 e 31 de outubro perto da 00:00 TU. Estes aumentos são relacionados com a rápida diminuição do Dst. Também durante este mesmo período, foram observadas intensas flutuações de fase em regiões afastadas do equador geomagnético. Estas observações do VTEC e flutuações de fase mostram respectivamente 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 alta-baixa latitude e a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala.

**Palavras-chave:** Camada F, Tempestade Geomagnética, GPS

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra

## Introdução

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”. 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 os efeitos das

super tempestades geomagnéticas ocorridas no final de outubro de 2003 sobre a camada F em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro.

Uma tempestade geomagnética inclui geralmente o “sudden storm commencement” (SSC), na qual ocorre a partir do impacto do vento solar na magnetosfera no lado diurno, podendo variar de minutos a horas caracterizando o início da fase inicial de uma tempestade de grande intensidade, não ocorrendo em tempestades de menor intensidade. Inclui também, fase principal e fase de recuperação [1]. 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 [2].

Durante as tempestades geomagnéticas, as partículas carregadas do vento solar relacionadas com as erupções solares (“solar flare”) ou ejeção de massa coronal (“coronal mass ejection” - CME), são conduzidas pela nossa magnetosfera na região de alta latitude terrestre. O transporte de energia da alta latitude para a baixa latitude ou região equatorial é feito através de: pontual

penetração dos campos elétricos magnetosféricos em direção ao equador; aquecimento da alta atmosfera devido a precipitação de partículas energéticas durante a tempestade geomagnética conhecido como “aquecimento Joule”. Este aquecimento resulta em modificações da circulação termosférica global e perturbações dos ventos termosféricos (zonal e meridional) modificando a dinâmica da termosfera equatorial.

## 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 1), 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 ininterruptas, independente de condições atmosféricas.



Figura 1 – Mapa indicando as estações de GPS.

Tabela 1 – Características das estações da RBMC.

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
Presidente Prudente	UEPP	22,3°S	51,4°O	14,9°S
Porto Alegre	POAL	30,1°S	51,1°O	20,7°S

O sistema GPS é composto por uma constelação de 24 satélites operacionais,

transmitindo informações 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° [4].

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).

O padrão RINEX é composto por três arquivos ASCII: dados de observações, dados meteorológicos e de mensagens de navegação [5]. O arquivo utilizado foi o de dados de observações, em que apresentam importantes parâmetros de dados através das portadoras L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub> e dos códigos C/A e P.

As frequências L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub> 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 ( $\lambda$ ) [6]:

$$L_1 = 1575,42 \text{ MHz e } \lambda \cong 19 \text{ cm.}$$

$$L_2 = 1227,60 \text{ MHz e } \lambda \cong 24 \text{ cm.}$$

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 [6]. 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 [6].

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 [5]. Os dados possuem três formatos: IGS, IGR e IGP. O formato utilizado foi o IGR por possuir órbitas rápidas, disponíveis dentro de até 48 horas.

As variações do campo magnético foram analisadas através dos índices Kp (“planetary index” – valores a cada 3 horas) e Dst (“disturbance storm time index” – valores a cada hora). Também foram utilizados para a análise, dados do B (“interplanetary magnetic field” (IMF) - campo magnético interplanetário total) e Bz (componente Z do IMF) [7], obtidas pelo satélite ACE e disponibilizados em (<http://www.srl.caltech.edu/ace/>). Os dados do vento solar não foram disponíveis para esta tempestade geomagnética. A Figura 2 mostra as

variações de B, Bz, Kp 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 180nT as 10:00 TU do dia 29/10,  $|Dst|_{max}$  igual a 363nT a 01:00 TU do dia 30/10 e  $|Dst|_{max}$  igual a 401nT as 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) [8].

Para o cálculo do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e das flutuações de fase (ROT), apresentados nas Figuras 3 e 4, foram utilizados programas para análise de dados de GPS desenvolvidos em linguagem Fortran pelo Dr. Y. Otsuka da Universidade de Nagoya no Japão e adaptados pelo Dr. F. Becker-Guedes e MSc. V.G. Pillat da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP.

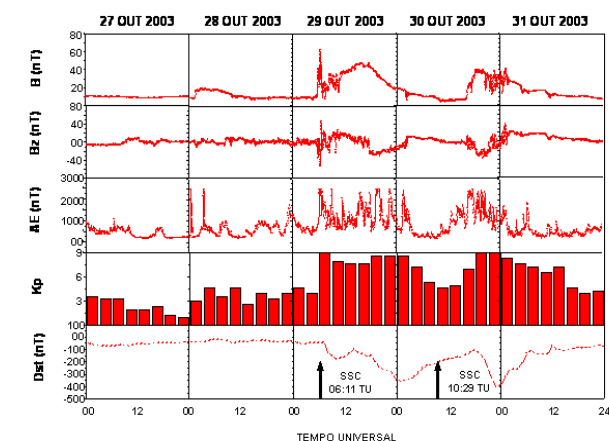


Figura 2 – Os gráficos indicam o B (“interplanetary magnetic field” (IMF) - campo magnético interplanetário total), Bz (componente Z do IMF) e as variações do campo magnético através dos índices Kp e Dst entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003.

## Resultados

As Figuras 3 e 4 apresentam observações do VTEC e flutuações de fase, respectivamente, obtidos em Imperatriz, Brasília, Presidente Prudente e Porto Alegre, compondo a rede RBMC do sistema GPS. As estações escolhidas entre aproximadamente 20 estações, tem latitude dip variando de 2,9°S (perto do equador magnético terrestre) a 20,7°S (estação mais afastada da região equatorial magnética). Uma vez que o ângulo de declinação magnética no setor brasileiro é aproximadamente 20° a esquerda do meridiano geográfico, as estações escolhidas são alinhadas aproximadamente ao longo do campo magnético terrestre.

Os gráficos plotados em verde (Figura 3) para o dia 27 de outubro (dia calmo, como indica a Figura 2) são repetidos para os dias 28 à 31 de outubro

(os gráficos para estes dias são plotados também em vermelho) para verificar a influência da tempestade geomagnética sobre o VTEC. O dia 28 de outubro também é considerado dia calmo. Para o mesmo período citado, a Figura 4 (plotado em azul), indica as flutuações de fase.

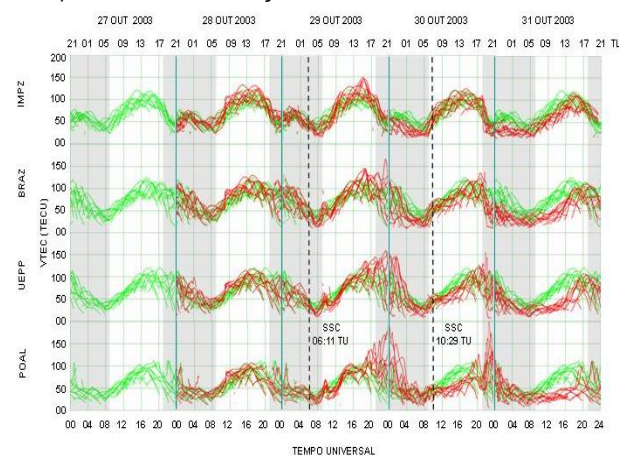


Figura 3 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC), entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

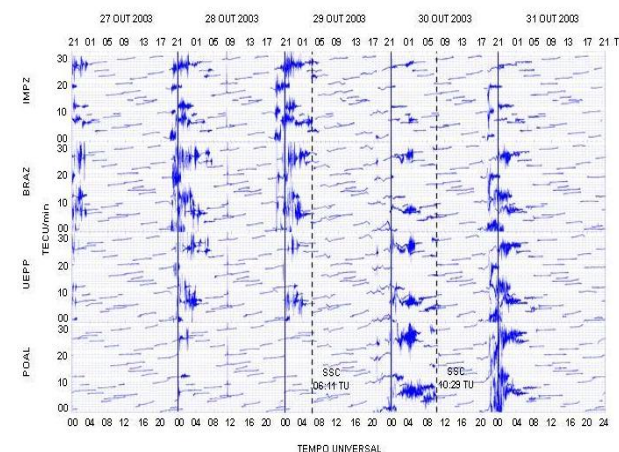


Figura 4 – Flutuações de fase (ROT), entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

## Discussão

Os dados (Figura 2) 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 10nT (indicando a presença de nuvem magnética em IMF), chegando a ultrapassar os 60nT no dia 29 de outubro e 40nT no dia 30 de outubro. Também mostrado na Figura 2, o campo magnético interplanetário Bz foi negativo 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 rápida diminuição pouco antes da meia noite dos dias 30 e 31 de outubro.

Como foi mostrado por [8], 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 alta-baixa latitude. Pode-se observar (Figura 3) nos horários perto da 00:00 TU dos dias 30 e 31 de outubro um grande aumento do VTEC nas regiões de maiores latitude dip (UEPP e POAL). A Figura 4, indica flutuações de fase, em que mostram a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas de plasma [9], 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 alta-baixa latitude, onde obteve-se presença de grande aumento do VTEC (Figura 3 – grande aumento da densidade eletrônica).

## Conclusão

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

Durante as tempestades geomagnéticas ocorridas, observou-se que o campo magnético interplanetário total B ultrapassou os 10nT, indicando a presença de nuvem magnética em IMF. Para o mesmo período, o IMF Bz foi negativo, mostrando 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 nos dias 30 e 31 de outubro perto da 00:00 TU, observou-se também intensas flutuações de fase em regiões afastadas do equador geomagnético. Estas observações do VTEC e flutuações de fase mostraram respectivamente uma rápida penetração de campos elétricos magnetosféricos perturbados em direção ao equador geomagnético indicando rápida subida da camada F na região equatorial que resultou em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para alta-baixa latitude e a geração de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas de plasma.

## Referências

- [1] SCHUNK, R. W.; SOJKA, J. J. Ionosphere-thermosphere space weather issues. **J. Atmospheric and Terrestrial Physics**, V. 58, n. 14, p. 1527-1574, 1996.
- [2] SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry**. Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- [3] 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.
- [4] ROCHA, J. A. M. R. **GPS: Uma abordagem prática**. Recife: Editora Bagaço, 2003.
- [5] FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados do GPS**. 1999. 142f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1999.
- [6] MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, V. 35, n. 3, p. 885-904, 2000.

