



## Análises do VTEC ionosférico obtido por GPS durante intensa tempestade geomagnética sobre o setor brasileiro

Alessandro J. de Abreu, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil.

Emília Correia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie, Universidade Presbiteriana Mackenzie, SP, Brasil.

Marisa Roberto e José Ricardo Abalde, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil.

Clezio Denardini e Rodolfo de Jesus, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil.

Kavutarapu Venkatesh, Physical Research Laboratory, Navrangpura, Ahmedabad, Índia.

Paulo Roberto Fagundes, Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José dos Campos, SP, Brasil.

Maurício Bolzan, Universidade de Federal de Jataí (UFJ), Goiás, Brasil.

Maurício Gende, Universidade Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina.

Copyright 2022, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.*

### Resumo

Nós apresentamos e discutimos as observações da camada F ionosférica sobre o setor brasileiro durante uma intensa tempestade geomagnética ocorrida entre 27 e 29 de maio de 2017. Durante essa tempestade geomagnética, o índice Dst atingiu um mínimo de  $-125$  nT às 0700 UT em 28 de maio. Para esta investigação, nós analisamos as observações do VTEC de aproximadamente 120 estações de GPS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Os resultados mostram uma fase ionosférica positiva durante a fase de recuperação da tempestade em 28 de maio. A fase positiva está possivelmente associada aos efeitos dos distúrbios dos ventos termosféricos.

### Introdução

A interação entre magnetosfera e ionosfera durante tempestades geomagnéticas continua sendo uma questão importante relacionada aos estudos do clima espacial. Segundo Tsurutani e Gonzalez (1997), as tempestades geomagnéticas são devidas à entrada do vento solar na magnetosfera através do processo de reconexão. Durante as ejeções de massa coronal (*Coronal Mass Ejection*), as linhas de campo magnético interplanetário (sentido sul) se interconectam com as linhas de campo geomagnético da Terra (sentido norte) no lado dia, transportando a energia sobre a calota polar em direção a cauda da magnetosfera. Dessa maneira, um novo processo de reconexão ocorre e a energia é injetada na magnetosfera. Gonzalez et al. (1994) mencionam que uma tempestade geomagnética intensa ( $Dst \leq -100$  nT) requer um campo magnético interplanetário  $B_z$  de pelo menos  $-10$  nT mantido por um intervalo de 3 horas ou mais. Tempestades geomagnéticas são definidas por três fases distintas: (1) fase inicial caracterizada por um início súbito (*Sudden Storm Commencement* - SSC), (2) fase principal e (3) fase de recuperação (de Abreu et al., 2010a, 2010b, 2014). O SSC ocorre a partir da compressão do vento solar na magnetosfera e pode variar de minutos a horas, causando um aumento no índice de atividade

geomagnética Dst. A fase principal dura cerca de meia hora a várias horas e causa uma diminuição no índice Dst. Durante esta fase, a entrada de energia na alta latitude da atmosfera é maximizada devido ao transporte realizado pela magnetosfera. Finalmente, a fase de recuperação é caracterizada por uma normalização após um período que varia de dezenas de horas (Gonzalez et al., 1994).

Durante períodos de intensas tempestades geomagnéticas, distúrbios ionosféricos comumente denominados por tempestades ionosféricas podem ocorrer. Assim, se a densidade de elétrons aumentar em relação à média de um período geomagneticamente calmo, isso é denominada de tempestade ionosférica positiva ou fase positiva. Por outro lado, se a densidade de elétrons diminuir, é denominada tempestade ionosférica negativa ou fase negativa (Danilov e Morozova, 1985; Bauske e Proiss, 1998). No entanto, estudos contínuos sobre a resposta ionosférica durante tempestades geomagnéticas complementarão nosso entendimento sobre as causas das tempestades ionosféricas.

Portanto, nesta investigação apresentamos e discutimos os impactos de uma intensa tempestade geomagnética ocorrida em maio de 2017. Para a presente investigação, calculamos e analisamos o conteúdo total de elétrons na direção vertical (VTEC) de aproximadamente 120 estações do sistema de posicionamento global (GPS) que abrangem as regiões equatorial e baixas latitudes no setor brasileiro.

### Metodologia

O GPS é composto por 24 satélites orbitando ao redor da Terra a uma altitude de aproximadamente 20.200 km e distribuídos em 6 órbitas com ângulo de inclinação em relação ao equador geográfico de  $55^\circ$ , transmitindo ondas eletromagnéticas nas frequências L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz) (Warninger, 1993; Kaplan and Hegarty, 2006).

Os dados de GPS de aproximadamente 120 estações são do formato padrão RINEX (*Receiver Independent Exchange*). As estações pertencem à Rede Brasileira de

Monitoramento Contínuo (RBMC), operada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os dados de GPS foram utilizados para obter as medidas do conteúdo total de elétrons na direção vertical (VTEC) calculados em unidades de TEC (1 TECU =  $\sim 10^{16}$  elétrons  $m^{-2}$ ) (Hofmann-Wellenhof et al., 1994). As estações escolhidas no setor brasileiro cobrem as regiões equatorial e baixas latitudes (Figura 1).

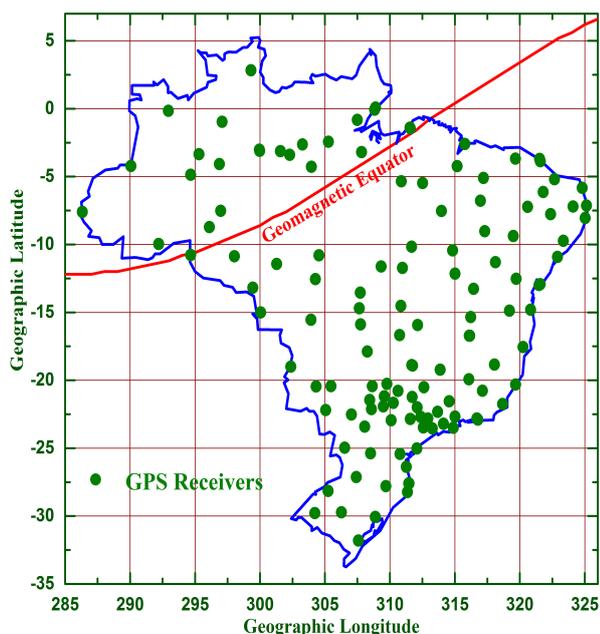


Figura 1 – Distribuição geográfica das estações de GPS.

A intensidade dos índices geomagnéticos, eletrojato auroral no intervalo de 1 minuto (AE, AU e AL) e intensidade da corrente de anel no intervalo de 1 hora (Dst), utilizados na presente investigação foram obtidos através do site <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>. O índice AE é definido usando a relação:  $AE = AU - AL$ . O índice geomagnético indicando a intensidade da tempestade no intervalo de 3 horas (Kp) foi obtido no site <http://ftp.gwdg.de/pub/geophys/kp-ap/tab/>. O índice magnético da calota polar localizado nas regiões próximas ao polo sul no intervalo de 1 minuto (PCS) foi obtido no site <http://www.pcindex.org>. A componente Bz do campo magnético interplanetário (*Interplanetary Magnetic Field – IMF*) nas coordenadas magnetosféricas solares geocêntricas (*Geocentric Solar Magnetospheric – GSM*), a velocidade de próton do vento solar (Vp) e a densidade de íon do vento solar (Np) foram obtidas do satélite *Advanced Composition Explorer Satellite (ACE)* através do site <http://www.srl.caltech.edu/ace/>. O campo elétrico interplanetário no sentido leste (IEFy) é definido por:  $IEFy = -Vx \times Bz$ .

## Resultados

A Figura 2 apresenta os parâmetros do campo elétrico na direção leste (IEFy), da componente vertical do campo magnético interplanetário (Bz), da velocidade (Vp) e densidade de prótons (Np) do vento solar (com resolução

temporal de 64 segundos) e os índices geomagnéticos AE, AU, AL e PCS (valores a cada um minuto), Kp (valores a cada 3 horas) e Dst (valores a cada hora). A Figura 3 apresenta o conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC). Os valores do VTEC em faixas cinzas escuras referem-se a  $\pm 1$  desvio padrão das médias dos dias geomagneticamente calmos. Os valores do VTEC em linhas laranjas, vermelhas, amarelas, azuis e verdes referem-se aos dias geomagneticamente perturbados (fases principal e recuperação da tempestade geomagnética), abrangendo as regiões equatorial e de baixas latitudes. A Figura 4 mostra os mapas do VTEC em função da longitude e latitude geográfica usando aproximadamente 120 estações de GPS sobre o setor Brasileiro.

## Discussão e Conclusões

A Figura 2 mostra que o SSC começou às 1534 UT em 27 de maio e atingiu o pico às 2039 UT, indicando a fase inicial da tempestade. Durante a fase inicial, os parâmetros interplanetários e os índices geomagnéticos exibem rápidas flutuações. Posteriormente, durante a fase principal da tempestade, são observadas grandes mudanças na IMF-Bz, Vp e Np. A IMF-Bz aponta para o sul com um valor em torno de -20 nT. O Vp aumentou para  $\sim 400$  km/s, enquanto o Np variou em torno de  $50 \text{ cm}^{-3}$ , diminuindo rapidamente para  $10 \text{ cm}^{-3}$  durante a fase principal. Portanto, esse cenário indica a chegada de uma ejeção de massa coronal (CME) levando à formação de uma intensa tempestade geomagnética (veja a Figura 2). Além disso, durante a fase principal da tempestade, o índice Kp atingiu  $7^+$  às 0430 UT em 28 de maio e o índice Dst começou a diminuir de 43 nT às 2100 UT em 27 de maio para -125 nT às 0700 UT em 28 de maio. No entanto, durante a fase principal, o Dst mostra uma rápida e curta recuperação, possivelmente indicando a ocorrência de sub-tempestade. Então, o índice Dst mostra uma longa fase de recuperação da tempestade até 0900 UT em 29 de maio. Após 0900 UT, o índice Dst mostra uma pequena redução até 1500 UT e, novamente, aumenta às 1400 UT em 30 de maio. No mesmo período, é possível observar que o IMF-Bz aponta para o sul por quase 3 horas. Isso indica outra tempestade geomagnética fraca em 29 de maio de 2017. Os índices AE, AU e AL apresentados na Figura 2 mostram fortes flutuações durante as fases principal e recuperação da tempestade, de 27 a 28 de maio de 2017. Pode-se observar que o AE (AL) atingiu um máximo (mínimo) de 1960 nT (-1643 nT) às 0533 UT em 28 de maio de 2017 durante a fase principal da tempestade. Durante a fase inicial, o AE (AL) alcançou cerca de 400 nT (-324 nT) e antes do SSC alcançou ao redor de 70 nT (-35 nT). Como observado por Aksnes et al. (2004), fortes flutuações do AE são um importante indicador de grande injeção de energia em latitudes aurorais devido ao aquecimento Joule durante eventos de tempestades geomagnéticas. Por outro lado, o AE (AL) apresentou flutuações também durante a fraca tempestade geomagnética, atingindo 967 nT (-629 nT) e 807 nT (-473 nT) às 1427 UT de 29 de maio e 0358 UT de 30 de maio, respectivamente. Da mesma forma, o

PCS mostra fortes flutuações após o SSC durante as fases principal e recuperação da tempestade, semelhante ao índice AE. É possível observar que, antes do SSC, o PCS fica próximo de 0 mV/m e durante o período da tempestade, chega próximo de 9 mV/m. Pode-se dizer que os índices AE e PCS são fortes indicadores de atividade geomagnética nas regiões polares norte e sul, respectivamente.

O campo elétrico interplanetário para leste (IEFy) é apresentado no topo da Figura 2. É possível observar que o IEFy é estável em torno de zero antes do SSC. Durante a fase inicial, o IEFy alterna entre valores positivos e negativos. No entanto, durante as fases principal e recuperação da tempestade, ocorrem as maiores variações. O IEFy é positivo de 2039 UT em 27 de maio a 1429 UT em 28 de maio de 2017, durante o qual o IMF-Bz está apontado para o sul (Figura 2). Posteriormente, observa-se o oposto, no qual o IEFy é negativo, o IMF-Bz aponta para o norte até 0900 UT em 29 de maio. O mesmo cenário é observado durante a fraca tempestade geomagnética, mas de menor intensidade.

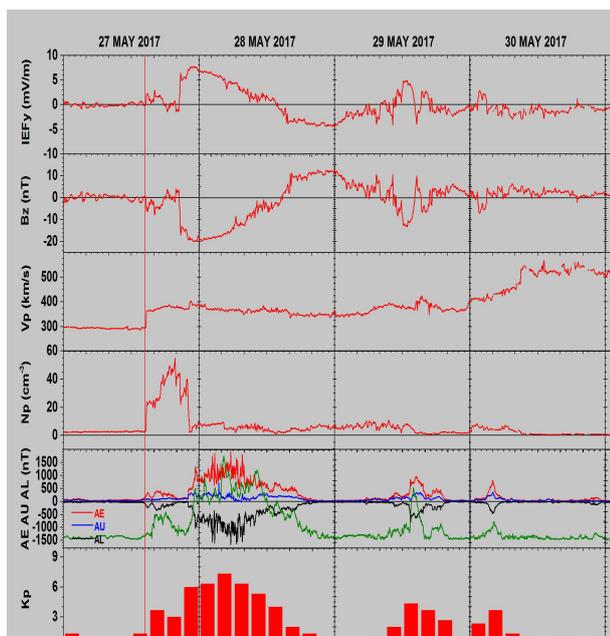


Figura 2 – Parâmetros interplanetários IEFy, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, AU, AL, PCS, Kp e Dst entre os dias 27 e 31 de maio de 2017. A seta e a linha vertical indicam início subido da tempestade (sudden storm commencement - SSC).

A Figura 3 mostra as variações do VTEC nas regiões equatorial e de baixas latitudes no setor brasileiro. Pode-se observar nesta figura que há uma fase positiva mais forte durante a fase de recuperação da tempestade (~ 0900-2000 UT em 28 de maio; linha vermelha) das regiões equatorial para baixas latitudes. Na região equatorial (de BEPA a PAAT), a fase positiva ocorre com variações do VTEC próximas ao período

geomagneticamente calmo. A medida que nos afastamos da região equatorial, a fase positiva se torna mais forte com valores mais altos de VTEC quando comparado ao período geomagneticamente calmo, especialmente das estações de GOGY até POAL. Em 31 de maio (linha verde), é observada uma fase negativa no VTEC, mas isso não indica nenhum efeito de tempestade, como pode ser afirmado observando os parâmetros interplanetários e geomagnéticos (veja a Figura 3). Pode-se dizer que os efeitos de fase positiva observados durante a fase de recuperação da tempestade se deve à modificação global dos ventos termosféricos devido ao aquecimento Joule em altas latitudes, como pode ser observado pelas fortes variações apresentadas pelos índices AE e PCS (de Abreu et al., 2017).

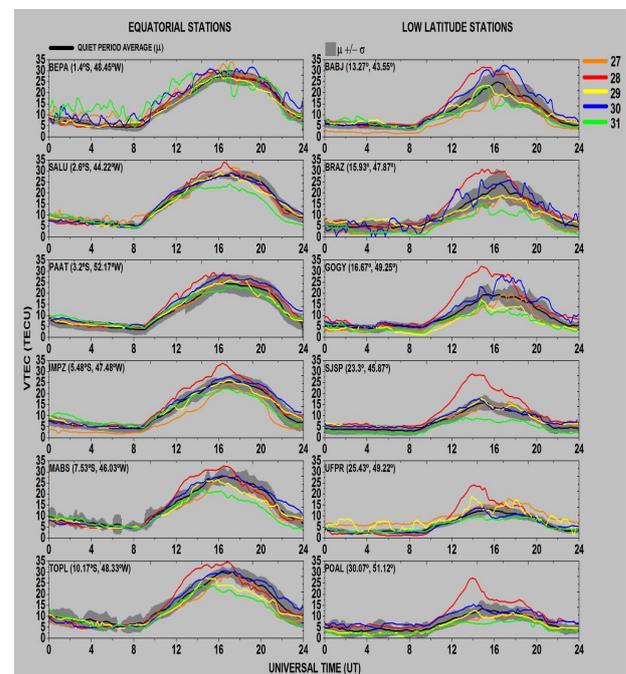


Figura 3 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) de 12 estações de GPS obtidos entre os dias 27 e 31 de maio de 2017 (linhas laranjas, vermelhas, amarelas, azuis e verdes) sobre o setor brasileiro. A faixa cinza escura corresponde a  $\pm 1$  desvio padrão das médias dos dias geomagneticamente calmos.

Os mapas do VTEC em função da longitude e latitude geográfica usando quase 120 estações GPS no setor brasileiro (veja Figura 1) são apresentados na Figura 4. Os mapas do VTEC apresentam variações durante o SSC, fase de recuperação e após a tempestade geomagnética de 1530 UT à 2100 UT em 27, 28 e 29 de maio de 2017, respectivamente. Esses períodos foram escolhidos de acordo com os resultados apresentados na Figura 3. Os mapas mostram fortes mudanças no VTEC entre os dias 27, 28 e 29. Um aumento no VTEC é evidente após SSC (1600 UT) no dia 27 em comparação para o período anterior (1530 UT). No entanto, é durante a fase de recuperação que as maiores variações no

VTEC são observadas em uma grande área do setor brasileiro. O contrário é observado após a fase de recuperação (29 de maio), onde existe uma grande diminuição nos valores de VTEC. Esses mapas do VTEC destacam as variações latitudinais e longitudinais da densidade de elétrons durante diferentes fases da tempestade geomagnética, especialmente durante a fase de recuperação.

Portanto, nesta investigação analisamos o VTEC ionosférico de aproximadamente 120 estações de GPS durante uma intensa tempestade geomagnética ocorrida em maio de 2017 sobre o setor brasileiro. Pode se concluir uma fase positiva acentuada durante a fase de recuperação da tempestade, possivelmente devido a ação dos ventos termosféricos (Abdu, 1997). Não foi possível observar resultados de fases positivas ou negativas durante a fase principal, concluindo que esta tempestade não gerou efeitos durante esse período.

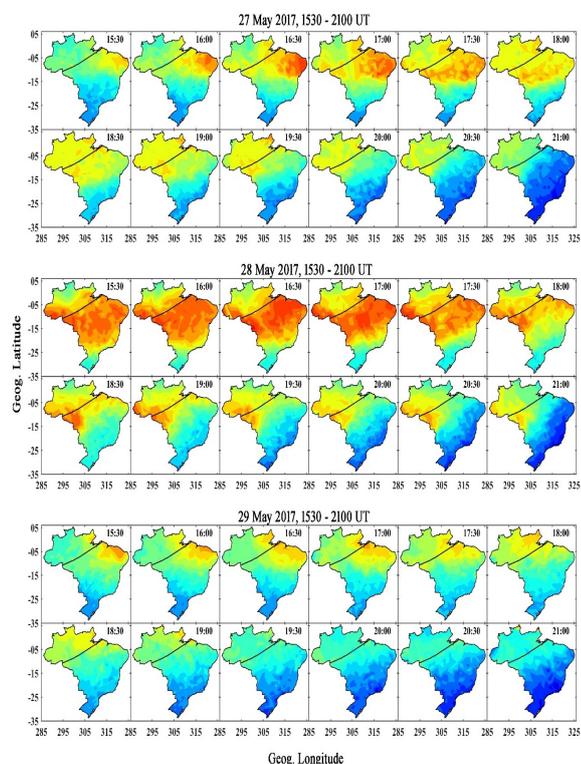


Figura 4 - Mapas do VTEC em função da longitude e latitude geográfica sobre o setor brasileiro de aproximadamente 120 estações GPS. Os mapas são de 27 a 29 de maio de 2017 entre 1530 UT e 2100 UT.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro. Também a rede RBMC pelos dados de GPS.

#### Referências

ABDU MA. 1997. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 5, n. 13, p. 1505-1519.

AKSNES A, STADSNES J, LU G, ØSTGAARD N, VONDRACK RR, DETRICK DL, ROSENBERG TJ, GERMANY GA & SCHULZ M. 2004. Effects of energetic electrons on the electrodynamics in the ionosphere. *Ann. Geophys.* 22, 475–496.

BAUSKE R & PROLSS GW. 1998. Numerical simulation of long - duration positive ionospheric storm effects. *Adv. Space Res.*, 22(1), 117 – 121.

DANILOV AD & MOROZOVA LD. 1985. Ionospheric storms in the F2 region — Morphology and physics (review), *Geomagn. Aeron.*, 25, 593 – 605.

de ABREU AJ, FAGUNDES PR, SAHAI Y, de JESUS R, BITTENCOURT JA, BRUNINI C, GENDE M, PILLAT VG, LIMA WLC, ABALDE JR & Pimenta AA. 2010a. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, v. 115, A12312.

de ABREU AJ, SAHAI Y, FAGUNDES PR, BECKER-GUEDES F, de JESUS R, GUARNIERI FL & Pillat VG. 2010b. Response of the ionospheric F-region in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm in April 2000 observed by GPS. *Advances in Space Research*, v. 45, p. 1322-1329.

de ABREU AJ, FAGUNDES PR, GENDE M, BOLAJI OS, de JESUS R & BRUNINI C. 2014. Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24. *Advances in Space Research*, v. 53, p. 1313-1328.

de ABREU AJ, MARTIN IM, FAGUNDES PR, VENKATESH K, BATISTA IS, de JESUS R, ROCKENBACK M, COSTER A, GENDE M, ALVES MA & WILD M. 2017. Ionospheric F-region observations over American sector during an intense space weather event using multi-instruments. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 156, 1–14.

GONZALEZ WD, JOSELYN JA, KAMIDE Y, KROEHL HW, ROSTOKER G, TSURUTANI BT & VASYLIUNAS VM. 1994. What is a magnetic storm? *J. Geophysical Research*, v. 99, n. A4, p. 5771-5792.

HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H & COLLINS J. 1994. *Global Positioning System: Theory and Practice*. 3. ed. Wien: Springer-Verlag.

KAPLAN ED & HEGARTY CJ. 2006. Understanding GPS: Principles and Applications. 2. ed. Artech House, Inc.

TSURUTANI BT & GONZALEZ WD. 1997. The interplanetary cause of magnetic storms: a review. In: Tsurutani, B. T; Gonzalez, W. D; Kamide, Y; Arballo, J. K. ed. Magnetic storms. Washington, DC, v. 98.

WANNINGER L. 1993. Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS. GPS World, p. 48-54, July.