

## ANÁLISE DO TEC E CINTILAÇÕES EM DIFERENTES LATITUDES NO SETOR BRASILEIRO ATRAVÉS DO SISTEMA GPS DA REDE UNIVAP

**Felipe Antonio Cardoso<sup>1</sup>, Yogeshwar Sahai<sup>2</sup>, Fabio Vargas<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba. Departamento de Física e Astronomia, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos 12244-000,

<sup>1</sup>Bolsista CNPq, ([felipe.antonio.cardoso@gmail.com](mailto:felipe.antonio.cardoso@gmail.com)),

<sup>2</sup>Orientador ([sahai@univap.br](mailto:sahai@univap.br)), <sup>3</sup>Co-orientador: ([fabio.vargas@univap.br](mailto:fabio.vargas@univap.br))

**Resumo** - Este estudo apresenta dados de cintilação ionosférica e conteúdo total de eletrônico (TEC) obtido durante dias geomagneticamente calmos através do sistema de posicionamento global (GPS) da rede de sensores ionosféricos nas regiões equatoriais e de baixa latitude pertencentes a UNIVAP localizados em Ji-paraná (10.9°S, 63.3°O; dip lat 0.8°S), Palmas (10.2°S, 42.2°O; dip lat: 7.0°S) e São Martinho da Serra (29.5°S, 53.8°O; dip lat:19.5°S). Os dias estudados são: dia 23 de fevereiro de 2010 em Ji-Paraná e São Martinho da Serra (TEC), e 17 e 18 de março de 2010 em Palmas e São Martinho da Serra (TEC e cintilações). O objetivo principal é investigar os efeitos da anomalia ionosférica equatorial na variação diária do TEC e apresentar dados de TEC e cintilações ionosféricas para 17 e 18 de março de 2010 em Palmas e São Martinho da Serra. Foram verificados picos nos índices de cintilação  $S_4 > 0.25$  em Palmas e São Martinho da Serra entre horários de 2200 e 0100 LT e Efeito Fonte reverso (reverse fountain effect) devido movimento do plasma ao longo das linhas do campo magnético na região equatorial em Ji-Paraná com pico as 2300 LT.

**Palavras-chave:** Ionosfera, densidade eletrônica, GPS, anomalia equatorial, cintilação ionosférica.

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

### Introdução

Este estudo analisa dados de conteúdo eletrônico total (TEC, sigla em inglês para *Total Electron Content*) e cintilação ionosférica durante dias geomagneticamente calmos registrados nas estações de Ji-Paraná, Palmas e São Martinho da Serra, que fazem parte da rede de sensores ionosféricos de baixa latitude pertencentes a Universidade do Vale do Paraíba e que compõe a rede LISN de monitoramento ionosférico. O estudo da ionosfera no setor brasileiro é de suma importância e de grande interesse devido ao fato de encontramos nesta região os maiores valores de conteúdo eletrônico total (TEC) e as maiores variações temporais e espaciais comparadas a outras regiões da esfera terrestre. (KOMJATHY, et al. 2003).

O TEC presente ao longo da ionosfera é o principal parâmetro utilizado em estudos ionosféricos e sofre influências por diversas variáveis tais como: ciclo solar, estação do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, etc... (SKONE, 2000). O TEC é composto pelos elétrons livres na ionosfera, esses elétrons se tornam livres a partir do processo de fotoionização da ionosfera, que acontece pelo processo de absorção de radiação, predominante na faixa de ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991).

A rede de sensores ionosféricos de baixa latitude (LISN, sigla em inglês para *Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*), do qual a UNIVAP faz parte, possui 70 receptores GPS com capacidade de medir o TEC, e a amplitude de fase de cintilações ionosféricas, contando ainda com 5 ionosondas capazes de medir o TEC noturno da camada E ionosférica e 5 magnetômetros que estão posicionados ao longo do mesmo meridiano magnético se estendendo desde da crista norte até a crista sul da anomalia equatorial (Valladares e Dohert, 2009). A LISN é um projeto internacional que monitora a baixa, média e alta atmosfera na região equatorial com o propósito de estudar e prever fenômenos ionosféricos. Para este estudo utilizamos dados obtidos a partir dos receptores GPS (Global Position System) pertencente à rede LISN. Com o GPS podemos obter medições precisas do conteúdo eletrônico total na ionosfera e na região do plasma, revelando depressões associadas com bolhas de plasma e ondas de gravidade como distúrbios que viajam pela ionosfera. Esses equipamentos podem detectar também a amplitude desses fenômenos e fases de cintilações, e podem prover índices de densidade do plasma ionosférico usando técnicas de inversão.

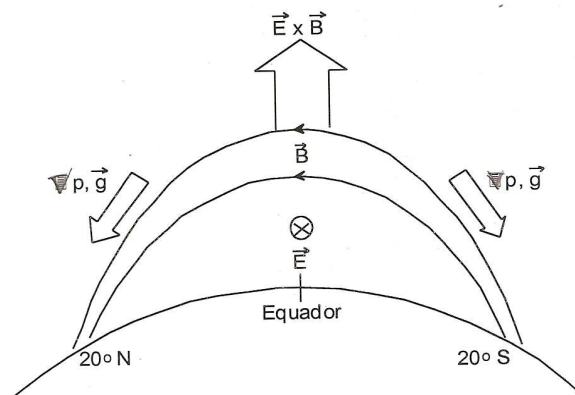
O serviço GPS é baseado em um conjunto de satélites que permite que um usuário consiga determinar a sua posição tridimensional na superfície terrestre (longitude, latitude e

altitude), velocidade e a hora, 24 horas por dia independentemente das condições atmosféricas. Existem três segmentos no qual o GPS é composto: Espacial, Controle e Usuário. O segmento espacial do GPS é composto por 24 satélites operacionais, transmitindo ondas eletromagnéticas na frequência de UHF para a Terra, orbitando a aproximadamente 20.200 km de altitude em 6 órbitas. Cada órbita tem uma inclinação de 55° em relação à linha do equador geográfico, efetuando uma volta em torno da Terra a cada 12 horas aproximadamente. O segmento de controle é o responsável por controlar os 24 satélites. O segmento de usuário é formado por receptores de uso civil e militar que recebem os sinais dos satélites da constelação GPS para calcular a posição em três dimensões e a velocidade do usuário em tempo real. Existem GPS's, que se destinam a propósitos específicos para uso em navegação geodésica ou outra atividade qualquer. A precisão do GPS é um dos principais motivos pelo qual o parâmetro TEC é estudado na Geofísica (Abreu, et al, 2007).

Um dos fenômenos observados neste estudo é a Anomalia Equatorial, ou Anomalia de Appleton. Esta é dada em uma região de alta densidade eletrônica ionosférica observada em torno de 20 graus Norte e Sul de latitude magnética a partir do equador magnético. A principal origem dessa alta densidade eletrônica em baixas latitudes é a deriva vertical  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  do plasma ionosférico da camada F equatorial. Após o pôr-do-Sol o campo elétrico direcionado para o leste, existente durante o dia, é acentuado (efeito chamado de pico pré-reversão) e o plasma da região F deriva até elevadas altitudes. Enquanto esse processo se desenvolve o plasma de baixas latitudes decai rapidamente devido à diminuição da intensidade de radiação solar incidente (Kelley, 1989). Após deriva do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo magnético. Esse efeito é conhecido como "efeito fonte" e pode ser observado em dados TEC entre 2200 LT e 0100 LT e ele ocorre pela ação da gravidade ( $\mathbf{g}$ ) e gradiente de pressão ( $\nabla p$ ). A Figura 1 mostra um esquema de forças agindo no plasma elevado até altas altitudes.

Cintilações ionosféricas são atualmente definidas como flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado de sua propagação através de uma região na qual se encontra irregularidade de densidade eletrônica, e consequentemente de índice de refração. Hoje existem dois motivos principais pelo interesse no estudo deste fenômeno: um científico e um prático. Para a ciência, os dados de cintilação fornecem informações, cuja climatologia ainda não é

totalmente compreendida. Do ponto de vista prático o estudo da cintilação esta diretamente relacionado a problemas de estabilidade de enlaces de comunicação e navegação por satélite.



**Figura 1:** Diagrama de como o plasma é transportado da região equatorial até elevadas altitudes e logo após chega a aproximadamente 20° de latitude magnética através da ação dos campos elétricos e magnéticos ( $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ), gravidade ( $\mathbf{g}$ ) e gradientes de pressão ( $\nabla p$ ). FONTE: Kelley (1989,p .193).

Segundo Basu et al. (1988) e Aarons (1982), existem três regiões principais de ocorrência das cintilações. A primeira região é a região equatorial no período após o pôr-do-Sol. A segunda é a região da oval auroral e o lado diurno do vértice polar. E a terceira região corresponde à área mais interna da calota polar. Nesta ultima região é possível observar cintilações a qualquer hora local.

### Metodologia

O TEC é definido pela integral (Eq. 1) da densidade eletrônica ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite S e o receptor R, numa coluna cilíndrica com seção transversal de área de 1m<sup>2</sup> (KLOBUCHAR, 1991; HOFMANN-WELLENHOF. et al., 1994; ABREU, 2007).

$$TEC = \int_r^s n_e ds \quad (1)$$

O parâmetro ionosférico de conteúdo eletrônico total é apresentado em unidades de TEC (TECU), onde um 1 TECU corresponde a 1x 10<sup>6</sup> elétrons/ m<sup>2</sup>. O principal motivo pelo qual o parâmetro TEC é intensamente estudado é o fato de este interferir diretamente no cálculo de posicionamento através do GPS. Existe um grande interesse em estudar o TEC em um determinado local do globo terrestre e para isso utilizamos o TEC vertical (VTEC).

Considerando uma ionosfera estratificada, o VTEC pode ser obtido pela projeção do TEC vertical de um ponto sub-ionosférico situado no trajeto de propagação do sinal, entre o satélite e o receptor (Hofmann-Wellenhof et al., 1994; Fedrizzi,1999), sendo assim:

$$VTEC = TEC \cos X \tag{2}$$

onde,

$$\cos X = \left[ 1 - \frac{r_e^2 \cos^2(E)}{(r_e + h_m)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

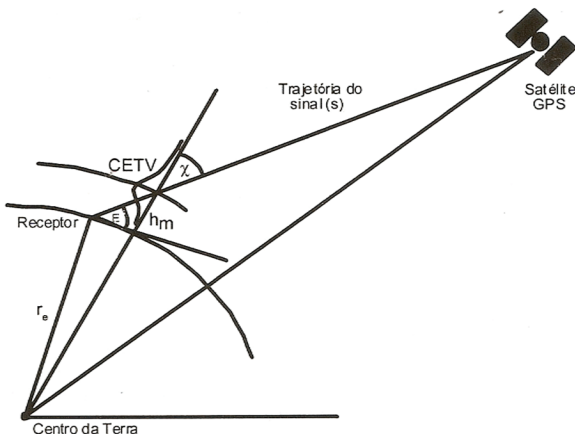
$X$  é o ângulo zenital no ponto sub-ionosférico.

$r_e$  é o raio da Terra.

$E$  é o ângulo de elevação do satélite;

$h_m$  é a altura média do pico da ionosfera ( 350 ~ 400km).

A Figura 2 ilustra os parâmetros listados anteriormente (Eq.3).



**Figura 2:** Geometria da trajetória do rádio-sinal, para sinais transionosféricos.

Utilizou-se índices  $S_4$  para apresentar dados de cintilação ionosférica. Este índice é muito utilizado para quantificar a magnitude das cintilações em amplitude de sinal transionosféricos e é dado em termos da intensidade ( $I$ ) de sinal recebido, que pode ser observado na equação (4), (Yeh e Liu, 1982):

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \tag{4}$$

Para realizar este estudo foram obtidos dados de TEC dos dias 23 de Fevereiro de 2010 a partir da estação de Ji-Paraná e São Martinho da Serra e dos dias 17 e 18 de Março de 2010 para as estações de Palmas e São Martinho da Serra, período de mínimo solar. Estes dias estão listados como sendo dias geomagneticamente calmos, segundo o Serviço Internacional de Índices Geomagnéticos (*International Service of Geomagnetic Indices*), registrados para os respectivos meses. São considerados dias geomagneticamente calmos aqueles dias nos quais o índice  $K_p < 4$ . (Wrenn, et al.,1987). Dias calmos possibilitam que estudos sejam realizados sem interferências causadas por tempestades magnéticas, assim é possível acompanhar o processo natural do desenvolvimento do TEC ao longo de um período.

### Resultados

A Figura 3 apresenta dados TEC obtidos a partir das estações de Ji-Paraná e São Martinho da Serra, no dia 23 de Fevereiro de 2010. Note a escala TEC para todos os painéis.

É possível observar (Fig. 3) que após as 1700 LT, nas duas estações, os valores de TEC sofrem decremento devido ao efeito de recombinação da ionosfera. Os valores de TEC obtidos em Ji-Paraná sofrem um grande aumento entre 2100 LT e 0200 LT e, geralmente alcançando o pico de 20 TECU próximo ao horário da 2300 LT, este aumento no TEC é causado pela Anomalia Equatorial produzida pelo efeito fonte reverso da deriva do plasma ao longo das linhas de campo magnético. Em São Martinho da Serra neste horário o TEC não alcança grandes valores, mantendo-se próximo 10 TECU, isso porque o efeito fonte reverso é somente observado em estações próximas ao equador magnético.

É possível observar que o TEC para ambas as estações apresentam um rápido aumento após o amanhecer atingindo o pico, entre 30 e 40 UTEC, próximo ao horário das 16 horas.

Durante a obtenção de dados TEC, a partir de dias calmos, para os 3 primeiros meses do ano de 2010 observamos que há uma ocorrência 4 vezes maior do efeito de Anomalia Equatorial durante o mês de Março, do que durante os meses de Janeiro e Fevereiro (visível entre 2000 LT e 0200 LT onde o TEC encontra-se próximo a 20 TECU) (não mostrado), isso indica que durante o equinócio (Primavera e Outono) fenômenos de

cintilação ocorrem com mais frequência (Muella et al.,2010).

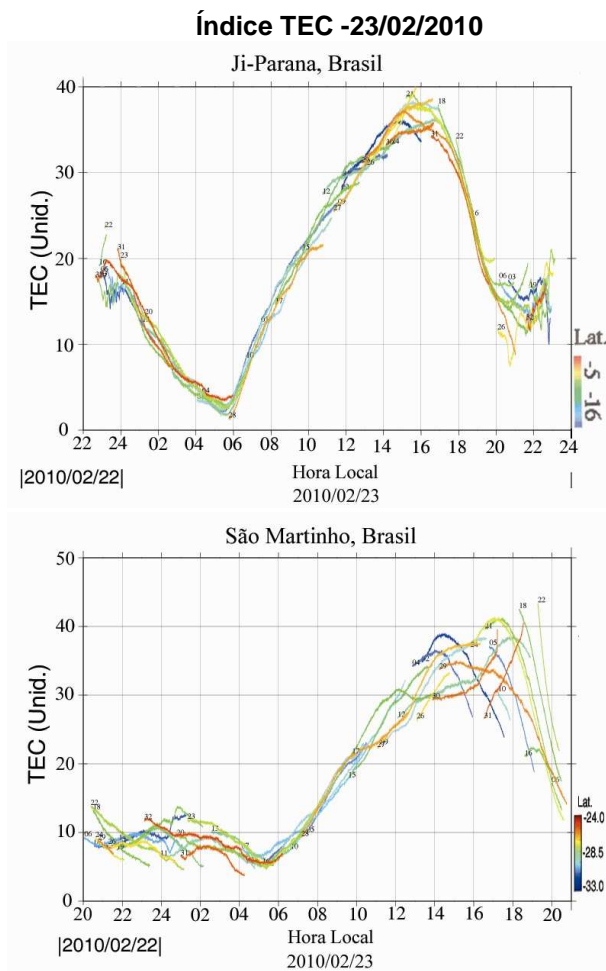


Figura 3 – Valores de TEC obtidos em 23 de Fevereiro de 2010 nas estações de Ji-Paraná e S. Martinho da Serra.

Figura 4 e 5 mostram a variação de UTEC e dados S<sub>4</sub> das 0000 UT às 0800 UT (LT = UT-3), obtidos pelas estações de Palmas e São Martinho da Serra em 17 e 18 de Março de 2010, para cada satélite GPS. A legenda “prn=xx”, acima do gráfico indica o numero do satélite do qual os dados foram extraídos. A área em amarelo indica o tempo no qual o sinal S<sub>4</sub> esteve acima do nível de ruído e o respectivo satélite esteve com elevação acima de 20°, assim áreas em amarelo indicam uma maior confiabilidade de sinal.

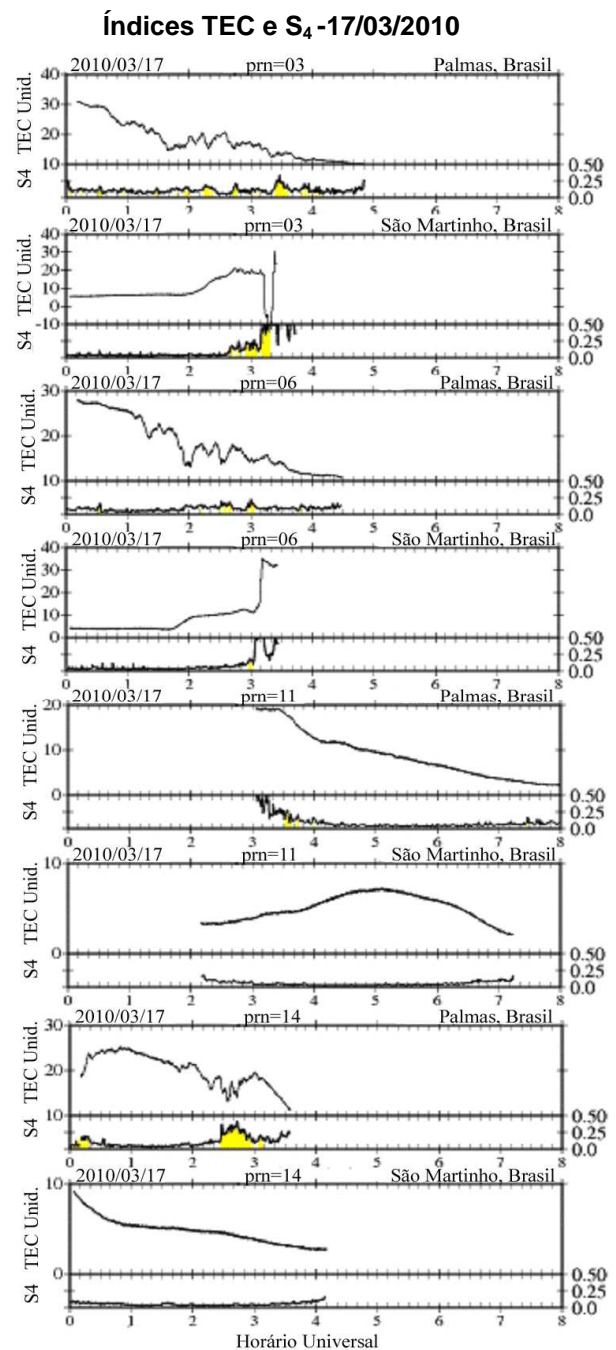
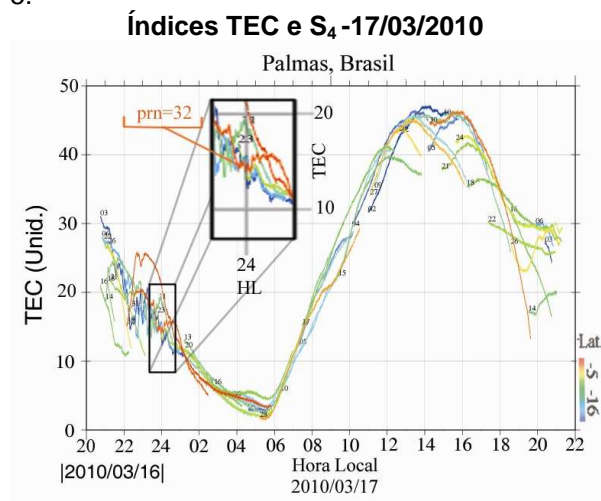
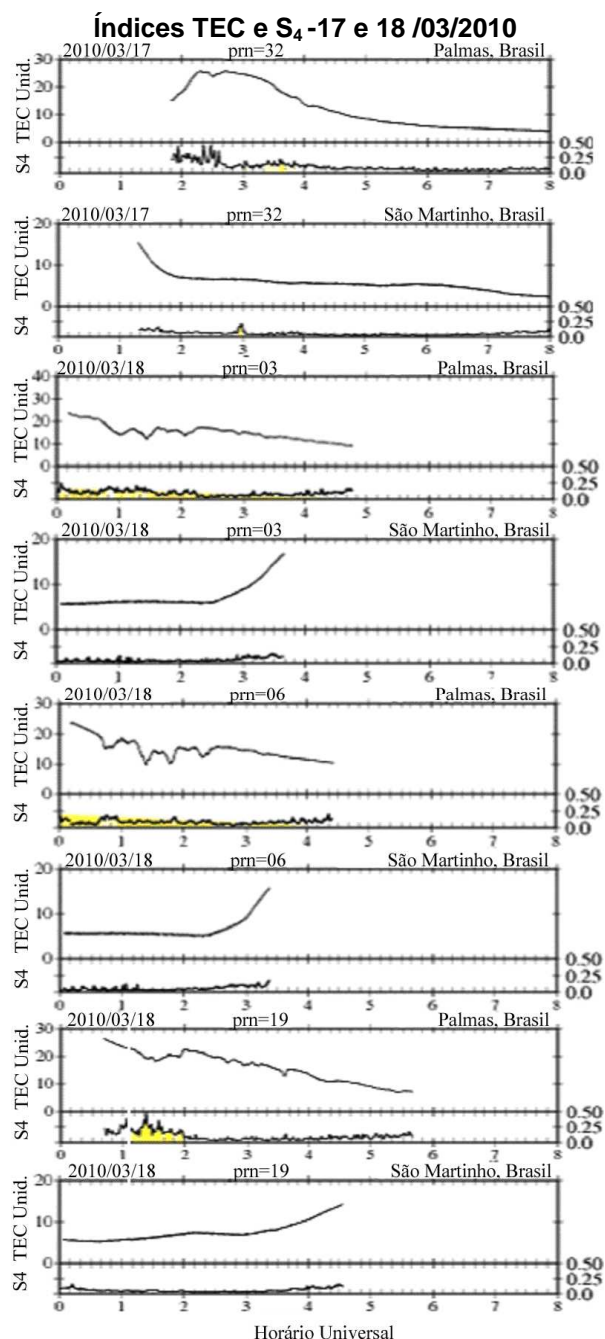


Figura 4 – Dados S<sub>4</sub> de cintilação e TEC para Palmas e São Martinho da Serra obtido em 17 de Março de 2010, obtidos a partir dos satélites GPS.

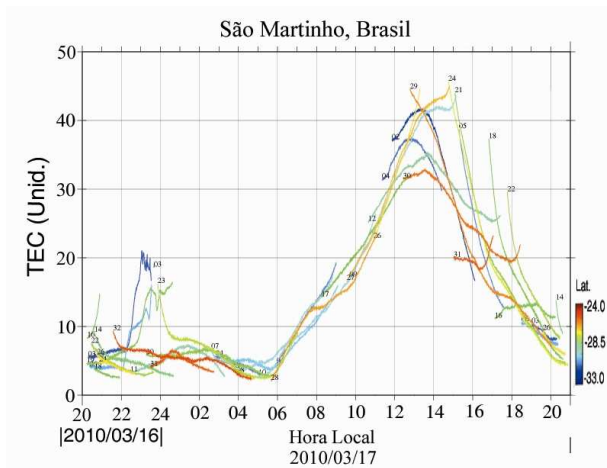
Na Figura 5 vemos que as depressões no UTEC ainda estão sendo acompanhados de dados de cintilação mais elevados do que em outras horas. Em São Martinho da Serra os dados tanto de TEC quanto de cintilação não sofrem muitas variações, mas ainda vemos que em dados de 3 dos 4 satélites o TEC e a cintilação sofrem aumento após as 0300 UT (0000 LT), para o satélite prn =32 observamos um pico de cintilação exatamente as 0300 UT. Palmas (Fig. 5) continua a sofrer depressões no TEC e apresentando altos valores de cintilação com índices que chegaram a  $S_4 > 0,25$  isso sugere que Palmas sofre grandes variações nos dados TEC e  $S_4$  devido a bolhas de plasma neste horários.

### Discussão

Para um melhor entendimento podemos comparar a Figura 4 e Figura 5 com a Figura 6 onde os dados TEC são mostrados para o mesmo dia. Na Figura 6 entre 2200 e 0100 LT existe uma grande variações nos dados causado pela anomalia equatorial, mesmo horário em que em Palmas (0000 e 0400 UT -17/03 -Fig.4) são registradas os maiores picos nos dados  $S_4$ . Não há grande variação no TEC de São Martinho da Serra. Porém observando o satellite prn = 32 (Fig.6 em destaque) exatamente as 2400 LT(0300 UT) vemos uma leve depressão que pode explicar o pico no índice  $S_4$  para o satellite prn =32 na Figura 5.



**Figura 5** - Dados  $S_4$  de cintilação e TEC para Palmas e São Martinho da Serra obtido em 17 e 18 de Março de 2010, obtidos a partir dos satélites GPS.



**Figura 6** – Valores de TEC obtidos em 17 de Março de 2010 nas estações de Palmas e São Martinho da Serra.

Quando o sinal GPS atravessa bolhas de plasma, geradas pela deriva  $E \times B$ , o sinal de TEC sofre uma depressão, que podem ser observadas na Figura 4 e 5. Esses resultados mostram que os efeitos causados pela deriva do plasma depois do pôr-do-Sol são mais visíveis em estações próximas ao equador magnético e regiões de anomalia equatorial. DasGupta et al (1983) descreve que geralmente depressões no TEC são acompanhadas com picos no dados de cintilação ionosférica, o que pode ser verificado observando os satélites prn=03, 06 e 14 para a estação de Palmas (Fig.4). Entre os horários de 0100 UT e 0400 UT ocorrem várias depressões que são acompanhadas por elevações no pico de cintilações que ultrapassam  $S_4 > 0.25$  chegando a  $S_4 > 0.50$  em alguns casos. São Martinho da Serra apresenta menos variações que Palmas, porém vemos que os dois picos de cintilação foram observados por volta das 0300 UT pelos satélites prn = 03, 06 e 11, ao mesmo tempo que em Palmas ocorrem pequenos picos no  $S_4$  e no declínio no TEC. Esse comportamento pode sugerir que São Martinho da Serra possa estar sofrendo pequenas variações derivadas do processo da anomalia em latitudes mais baixas.

### Conclusão

Através deste estudo se observou que estações que se localizam sob a anomalia equatorial e próxima ao equador magnético como é o caso de Palmas sofrem maior variação nos índices de  $S_4$ , por volta da 0300 UT, do que estações que se encontram mais distantes destes pontos. Grandes variações de  $S_4$  ocorrem durante o pico do processo do efeito fonte. Ji-paraná e Palmas sofrem grande influência do efeito fonte

reverso próximo ao horário de 0000 LT. Planeja-se futuramente realizar estudos durante um período maior de tempo para o dados de cintilação no setor brasileiro para assim gerar um perfil de setor.

### Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro.

### Referências

- Aarons, J.. Globa morphology of ionospheric scintillations. Proceedings of the IEEE, v. 70n. 4, p. 360-378, Abr.1982.
- Abreu, A. J., Efeitos de super tempestades Geomagnéticas na camada F ionosférica sobre o setor brasileiro estudados por GPS, Dissertação de mestrado do programa de pos graduação da Universidade do Vale do Paraíba, 2007.
- Basu, S.; Mackinze, E.; Basu,S.. Ionospheric constraints on VHF/UHF communication links during solar maximum and minimum periods. Radio Science, v.23,n. 3, p.363-378, May. – June 1988.
- Fredrizzi, M., Observação do conteúdo eletrônico total com dados GPS. São José do Campos. 123p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,1999.
- Hoffmam-Wellenhof, B.; Lichtnegger,H.; Collins, J. GPS: theory and Praticce, Wien: Springer- Velag, 1994. 335 p.
- Kelley, M. C.. The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics, San Diego: Academic Press, 1989.484 p.
- Kirchhoff, V.W.J.H.. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP,1991.149p
- Komjathy, A.,; Sparks, L.; Mannucci, A.j; Xiaoqing, P.. An assessment of the current WASS ionospheric correction algorithm in the south American region. Journal of Institute of Navigation, V.50, n3, p.193-218, Fall/2003.
- Muella. M.T. A. H., Paula E. R., Fagundes., P.R., Fagundes., Bittencourt., J. A., Sahai., Y., Thermospheric Meridional Wind Control on Equatorial scintillations and the Role of Evening F-Region Height Rise,  $E \times B$  Drift Velocities and F2-Peak Density gradients. Sur Geophys, DOI 10.1007/s10712-010-9101-3.

Skone, S. Wide área ionosphere grid modelling in the auroral region. 1998. 198p. Ph.D thesis – Departamento de Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20123, The University of Calgary, Canada.

Valladares, Cesar E., Doherty, Patricia H., "The Low-Latitude Ionosphere Sensor Network (LISN)," *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Anaheim, CA, January 2009, pp. 16-24.

Wrenn, G.L.; Roger, A.S. and Rishbeth, H. Geomagnetic storms in the Antarctic F- Region. I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.49, n. 9, p. 901-913,1987.

Yeh, K.C.; Liu, C.H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the IEEE*, v. 70, n. 4, p.324-360, Abr.1982.