

Avaliação da variação do TEC no território brasileiro: estudo de caso da comparação entre os anos 2004 e 2008

Julierme Wagner da Penha¹
Antônio Simões Silva¹
Marcelo Tomio Matsuoka²

¹ Universidade Federal de Viçosa - UFV
CEP 36570-000 - Viçosa - MG, Brasil
juliermewagner@yahoo.com.br
asimoes@ufv.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS
Caixa Postal 15001 - 91501-970 - Porto Alegre - RS, Brasil
tomio.matsuoka@ufrgs.br

Abstract. The main source of error of the position of the user's GPS (Global Positioning System) receivers, using a frequency is the effect caused by the ionosphere in the signal transmitted by satellites. This error is directly proportional to the total electron content (TEC) in the ionosphere and inversely proportional to the square of the frequency of the transmitted signal. The TEC varies in time and space against time (daily variation), the time of the year (seasonal variation), geographical location, the cycle of sunspots (variation of long period). This work was judged the change of TEC, therefore, the error due to the ionosphere in the observable GPS for the months of April 2004 and April 2008 covering the Brazilian territory, using maps of VTEC (TEC in the vertical direction) using data from the model global ionosphere (IONEX files) of the IGS (International GNSS Service) assessing the decline phase of the cycle for spots 23 and start the cycle 24. This experiment shows a reduction in the value of VTEC of the year of 2008 referring to the year 2004, due to a lower solar activity in the year 2008 compared to 2004, hence a lower amount of electrons in the ionosphere, improving the performance of positioning with GPS.

Palavras-chave: TEC, ionosphere, GPS positioning, sunspots, TEC, ionosfera, posicionamento GPS, manchas solares.

1. Introdução

A maior fonte de erros no posicionamento com GPS (Sistema de Posicionamento Global) era a técnica SA (Disponibilidade Seletiva), desativada às 04 horas TU (Tempo Universal) de 02 de maio de 2000. Com a desativação da técnica SA, a ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GPS.

A ionosfera caracteriza-se como parte da atmosfera superior onde está presente um número suficiente de elétrons e íons, que afetam a propagação das ondas de rádio. O seu estado pode ser descrito através da densidade de elétrons (n_e) em unidades de elétrons por m^3 . O conteúdo total de elétrons - TEC, que irá caracterizar o impacto da ionosfera na propagação das ondas de rádio, é de acordo com a Equação 1:

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

A integral apresentada na Equação 1 contém o número total de elétrons livres (n_e) que estão incluídos em um cilindro com a área da seção transversal de $1 m^2$, alinhado ao longo do caminho que o sinal percorre entre o receptor r o satélite s. Em aplicações geodésicas o TEC é medido em unidades de TEC (TECU). Uma unidade de TEC (1 TECU) corresponde a 10^{16} elétrons por metro quadrado ($10^{16}/m^2$), e 0,16 m de erro nas distâncias advindas da portadora L1. Para efeito de comparação, usa-se o TEC vertical que é dado pela Equação 2:

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

onde, z' é a distância zenital do sinal transmitido com relação à vertical e é calculado no ponto em que o sinal transmitido intercepta a camada média ionosférica, segundo Camargo (1999) de acordo com a Equação 3:

$$\text{sen}(z') = \frac{R}{R + H} \cdot \text{sen}(z) \quad (3)$$

onde:

z : distância zenital do sinal transmitido, em relação ao receptor;

R : raio médio da Terra;

H : altura da camada ionosférica em referência à superfície da Terra.

O erro associado à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes ao longo do caminho da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, segundo Camargo (1999). Alguns modelos têm sido desenvolvidos para a correção das observáveis GPS do erro sistemático devido à ionosfera. Segundo Hofmann-Wellenhof et al.(2008) e Monico (2000), o exemplo mais conhecido e utilizado é o modelo de Klobuchar que corrige algo em torno de 50 a 60% do erro ionosférico.

A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço de acordo com Leick (1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

Segundo Leick (1995) o erro devido à ionosfera na distância medida pela fase da portadora e pelo código, em função do TEC e da frequência é dado pelas Equações (4) e (5):

$$I_f = -\frac{40,3}{f^2} \cdot \text{TEC} \quad (4)$$

$$I_c = +\frac{40,3}{f^2} \cdot \text{TEC} \quad (5)$$

O TEC é o principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS. O entendimento do comportamento do TEC na região de interesse é importante para compreender os efeitos e as limitações impostas pela ionosfera no que concerne à qualidade do posicionamento com GPS.

Como a magnitude do erro sistemático devido ao efeito da ionosfera sobre o sinal GPS é inversamente proporcional ao quadrado da frequência, dispondo-se de receptores GPS de dupla frequência pode-se eliminar o efeito de primeira ordem por meio de uma combinação linear entre as observáveis em L1 e L2, denominada *ionospheric free observable*, mais conhecida por *ion free*, de acordo com Seeber (1993).

O Brasil é uma das regiões que apresentam os maiores valores do TEC, uma alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do globo terrestre. Daí a motivação de estudar o efeito ionosférico, a partir do parâmetro TEC, uma vez que inúmeras atividades como geodésia e geodinâmica utilizam o posicionamento por satélites, beneficiando os usuários e trazendo melhorias para o posicionamento preciso com GPS.

2. Arquivos do TEC do IGS

Os arquivos são disponibilizados pelo IGS no formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*) que fornecem valores de VTEC em uma malha com resolução espacial de $2,5^\circ \times 5^\circ$ em latitude e longitude, respectivamente e resolução temporal de 2 horas. Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análise:

- CODE (*Center for Orbit Determination in Europe* - Suíça);
- ESA (*European Space Agency* - Alemanha);
- JPL (*Jet Propulsion Laboratory* - EUA);
- UPC (*Polytechnical University of Catalonia* - Espanha).

O NRCan (*Natural Resources Canada*), também já fez parte desse grupo de trabalho.

Cada um desses centros de análise produzem mapas do VTEC disponibilizados pelo IGS, cada qual com suas estratégias, e todas utilizando dados GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) das estações ativas do IGS. Desde meados de dezembro de 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos centros de análise são combinados para resultar em um único arquivo IONEX, ou seja, um único arquivo global do VTEC. Estes arquivos de cada centro de análise e o arquivo combinado são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço eletrônico: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Uma das aplicações destes arquivos IONEX do IGS é possibilitar ao usuário de receptor de uma frequência uma forma de obter o valor do erro devido à ionosfera para realizar a correção de suas observáveis, e desta forma, melhorar a qualidade do seu posicionamento, segundo Matsuoka (2007).

3. Ciclos solares

As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta, e são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. Essas manchas solares tendem a se formar em grupos, e estão associados a intensos campos magnéticos no Sol, segundo Oliveira Filho e Saraiva (2000).

A Figura 1 apresenta o número de manchas solares desde 1700 até 2008. Vale notar que de 1700 até 1755, as médias eram anuais, visto que de 1755 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pela média mensal. Nota-se que os ciclos solares variam de 11 anos aproximadamente. Atualmente a ionosfera está no ciclo 24.

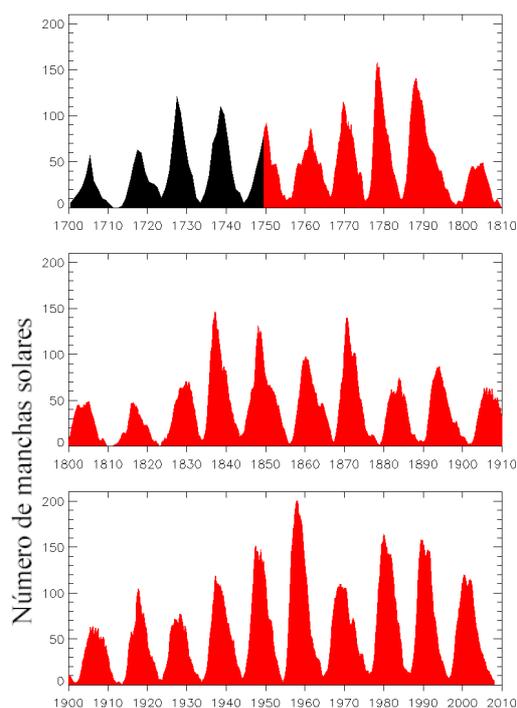


Figura 1. Número de manchas solares e ciclos solares.

Fonte: <<http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html>> - acesso em 05 ago. 2008.

A Figura 2 apresenta o número de manchas solares em relação aos anos de 1997 a 2008, abrangendo todo o ciclo 23 e o início do ciclo 24. No ciclo 23 o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2002. A linha amarela representa os valores diários, a linha azul representa valores médios mensais e a linha vermelha apresenta uma suavização desses valores. A curva tracejada mostra uma predição do número de manchas até meados de 2009.

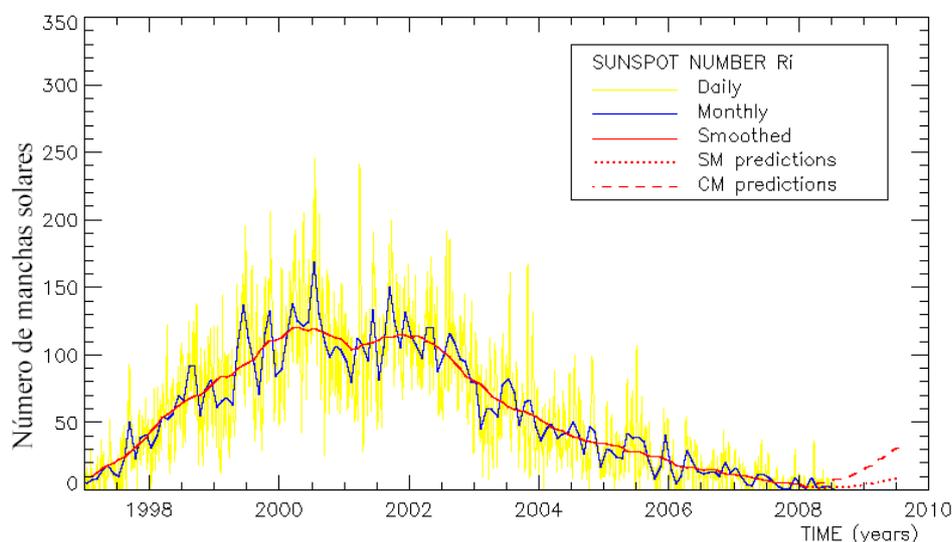


Figura 2. Número de manchas solares - Ciclos 23 e 24.

Fonte: <<http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html>> - acesso em 05 ago. 2008.

Com o declínio no número de manchas solares, ocorre uma diminuição na ionização, pois esta é proporcional ao número de manchas. Assim, a densidade de elétrons da ionosfera é reduzida. Conseqüentemente, ocorre a diminuição do erro devido à ionosfera, pois o mesmo é diretamente proporcional ao TEC e isto implica melhorias na performance do posicionamento com GPS.

4. Índices geomagnéticos

Os distúrbios do campo magnético da Terra podem ser monitorados por observatórios magnéticos terrestres analisando as três componentes do campo magnético e assim monitorando as suas variações. Os índices magnéticos quantificam tais variações e fornecem informações sobre as atividades geomagnéticas.

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes. Os índices geomagnéticos mais freqüentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades são os índices: Dst (*Disturbance Storm-Time*), Kp (*Planetarische Kennziffer*), Ap (correspondente linear do Kp); e AE (*Auroral Electrojet*), segundo Fedrizzi (2003).

O índice planetário Kp reflete globalmente o grau de perturbação da componente horizontal do campo geomagnético. Seus valores variam de 0 a 9 em uma escala não linear. Porém, este índice representa melhor as perturbações do campo magnético do hemisfério norte devido à maior quantidade de observatórios magnetométricos. O índice Ap é o correspondente linear do índice Kp, cujos valores são derivados das medições feitas da variação do campo geomagnético. Para um dado dia (UT) é a medida do nível geral da atividade geomagnética. A atividade geomagnética é classificada de acordo com os índices Kp e Ap, como mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap.

Atividade Geomagnética	Índice Kp	Índice Ap
Calma	0 - 2	< 8
Transição	3	8 - 15
Ativo	4	16 - 29
Tempestade Fraca	5	30 - 49
Tempestade Intensa	6	50 - 99
Tempestade muito intensa	7 - 9	100 - 400

Fonte: Batista (2003) apud Matsuoka (2007).

O índice Dst (dado em nanoTesla - nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre segundo Yamashita (1999). É a partir desse parâmetro que se melhor define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão.

De acordo com a Tabela 2, a classificação de uma tempestade geomagnética é dada em função do índice Dst.

Tabela 2. Classificação de uma tempestade geomagnética.

Condição da Tempestade Geomagnética	Valor do índice Dst (nT)
Fraca	-30 a -50
Moderada	-50 a -100
Intensa	-100 a -250
Muito Intensa	< -250

Fonte: Fedrizzi (2003).

Segundo Yamashita (1999), o índice AE é obtido a partir de medidas das variações da componente horizontal do campo geomagnético, coletadas em observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte. Valores publicados do índice AE podem ser encontrados no seguinte endereço eletrônico: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>.

5. Metodologia de Trabalho

Neste experimento foram elaborados mapas médios do VTEC da ionosfera para o território brasileiro referente aos meses de abril de 2004 e abril de 2008. Segundo Matsuoka (2004), de acordo com a variação sazonal, o mês de abril é um dos que apresentam maiores valores anuais do TEC, sendo este o motivo de sua escolha entre os vários meses do ano.

Esses mapas foram produzidos de modo a estudar e avaliar as variações espaciais e temporais do VTEC durante um período diário e um período com atividade solar distinta. Sabe-se que, estudando o comportamento do TEC se estará estudando também o comportamento do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, devido à proporcionalidade entre ambos.

Para a elaboração desses mapas médios foram escolhidos os seis dias de cada mês com base na atividade geomagnética (verificando-se o índice Ap diário), que correspondem os seis dias com menor atividade geomagnética de cada mês, ou seja, buscou-se estudar o comportamento do TEC em períodos com atividade geomagnética calma, a fim de evitar dias com influência de tempestades geomagnéticas. Os mapas médios do VTEC foram gerados no *software Surfer 8.0*, através dos valores de VTEC dos pontos da malha do IGS e foram utilizados os arquivos combinados do IONEX (*IONosphere map EXchange map*). Para a conclusão destes mapas foi utilizado o método de interpolação por Krigagem para uma malha de 1° de latitude x 1° de longitude.

6. Resultados e Discussão

As Figuras 3 e 4 mostram a variação do TEC vertical no território brasileiro durante os meses de abril de 2004 e abril de 2008, respectivamente.

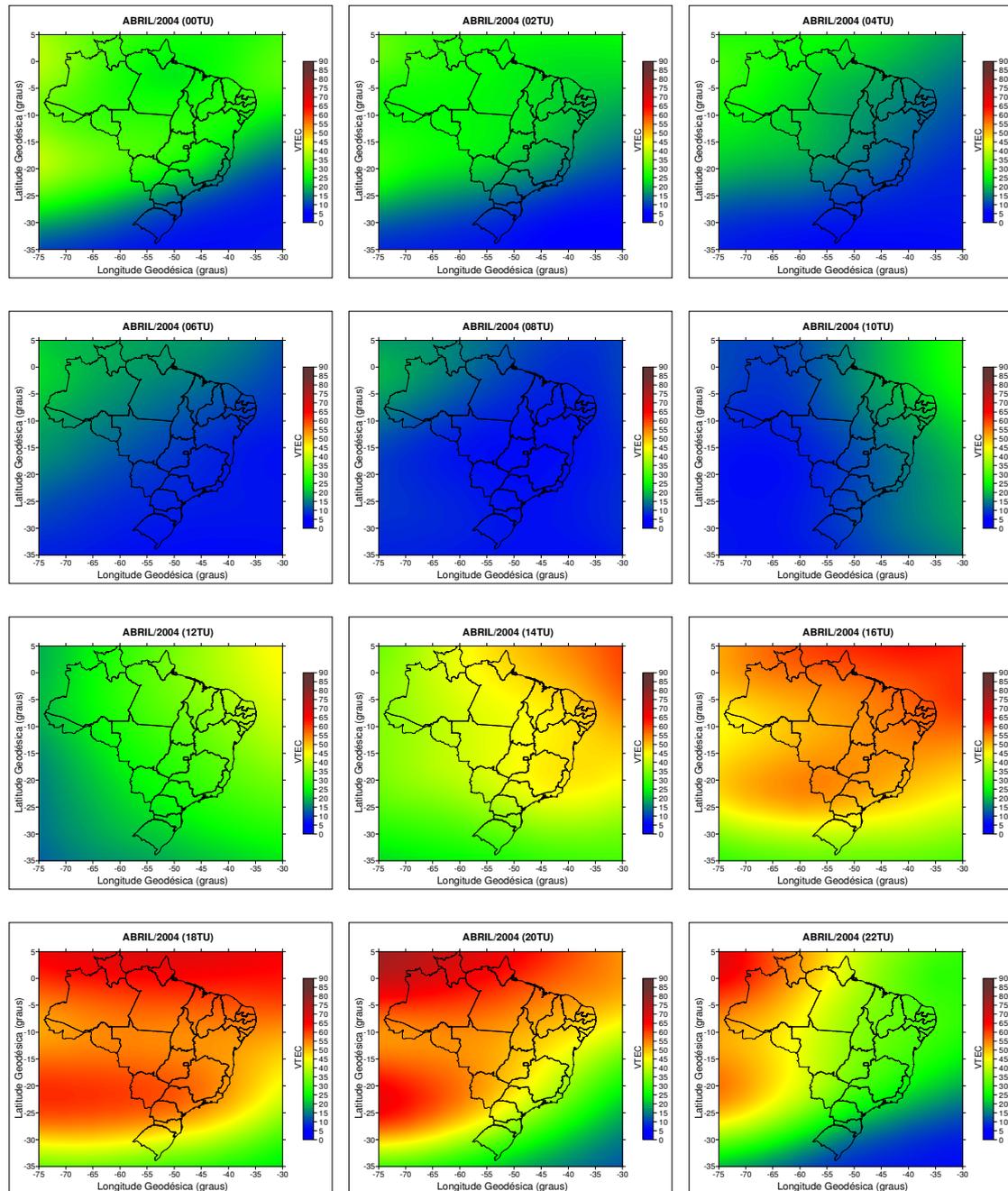


Figura 3. Mapas médios mensal do VTEC para o Brasil (abril/2004).

Com base nos mapas da Figura 3, o horário mais crítico, ou seja, maiores valores de VTEC, acontece nas 18 horas TU (15 horas local) com valores próximos a 80 TECU e os menores valores do VTEC acontece por volta das 8 horas TU (5 horas local) com valores próximos a 5 TECU.

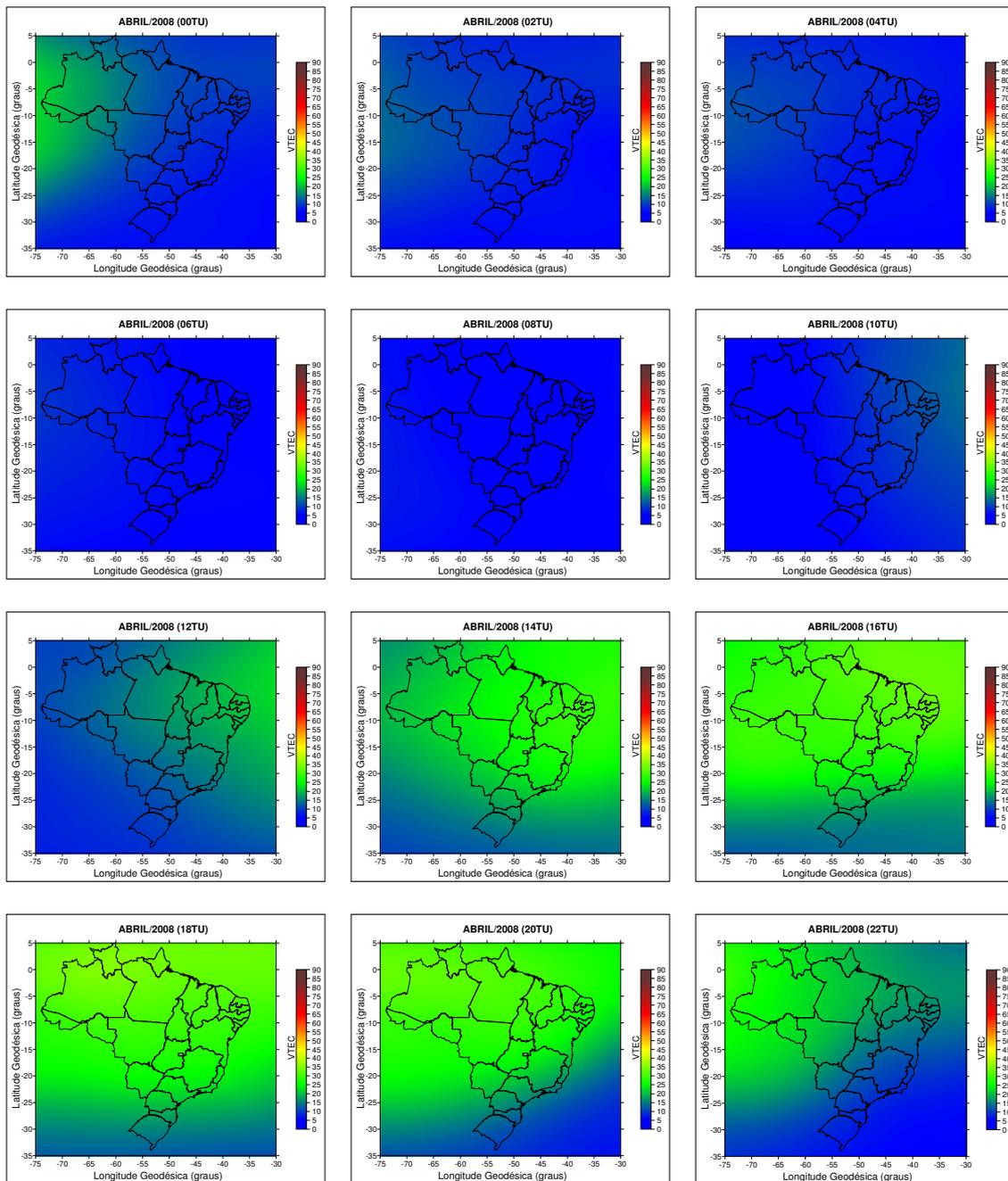


Figura 4. Mapas médios mensal do VTEC para o Brasil (abril/2008).

Com base nos mapas da Figura 4, o horário mais crítico, com valores próximos a 35 TECU, e os menores valores do VTEC com valores abaixo de 5 TECU, acontecem nos mesmos horários do ano de 2004, 18 horas TU e 8 horas TU, respectivamente.

Comparando as Figuras 3 e 4 pode-se verificar a diminuição dos valores do VTEC no ano de 2008, principalmente nos valores mais altos. No ano de 2004 obteve-se valores máximos próximo de 80 TECU, enquanto que no ano de 2008 os valores máximos não ultrapassaram de 35 TECU. Isto deve-se a redução no número de manchas solares. Para os valores mínimos, referente as 8 horas TU não aconteceram muitas modificações, pois seus valores ficaram em torno de 5 TECU.

7. Conclusões

Devido o TEC ser proporcional ao erro devido à ionosfera na distância entre o satélite e a antena receptora, a diminuição no primeiro implicará diretamente o mesmo no segundo.

Vale salientar que no ano de 2008 apresenta uma menor atividade solar em relação ao ano de 2004, ou seja, apresentando valores de VTEC menores. Desta forma, no ano de 2008 apresenta uma melhor performance do posicionamento com GPS devido a redução do número de manchas solares.

Referências Bibliográficas

Camargo, O. P. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1999.

Fedrizzi, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. 1999. 142p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

Hoffmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. **GNSS - Global Navigation Satellite System: GPS, Glonass, Galileo and more**. Springer-Verlag Wien, New York, 2008. 516 p.

Leick, A. **GPS Satellite surveying**, John Wiley & Sons, 2nd ed., Orono, Maine, 1995. 560p.

Matsuoka, M. T.; Camargo, P.O.; Dal Poz, W.R. Declínio do número de manchas solares do ciclo solar 23: redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, sec. Artigos, v.10, nº 2, 2004, p.141-157.

Matsuoka, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

Monico, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Ed. Unesp, 2000. 287p.

Oliveira Filho, K. S. O.; Saraiva, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física. 2000. 708p.

Seeber, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

Yamashita, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.