

O efeito da ionosfera nas observáveis GPS pelo parâmetro VTEC em diferentes regiões geográficas ionosféricas no Brasil

Julierme Wagner da Penha¹
Marcelo Tomio Matsuoka²
Carolina Collischonn²

¹Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia:
campus Inconfidentes - IFSULDEMINAS
CEP 37576-000 - Inconfidentes - MG, Brasil
julierme.penha@ifs.ifsuldeminas.edu.br; juliermewagner@yahoo.com.br

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

Abstract. The largest source of error in GPS (Global Positioning System) positioning using a L1 receiver is the effect caused by the ionosphere on the signal transmitted by satellites. This error is directly proportional to the total electron content (TEC) present in the ionosphere and inversely proportional to the square of the signal frequency. The TEC varies in time and space relative to time (daily variation), the time of year (seasonal variation), geographical location, the sunspot cycle (long period variation). In this paper, the variation of TEC, for a few months of the years 2004 and 2008 in different regions of Brazil, was analyzed. In the experiments, the maps of VTEC (TEC vertical direction) from IGS (International GNSS Service) were used, with the goal of observe the declining phase of sunspot cycle 23 and beginning of cycle 24. This experiment shows a reduction in the value of VTEC in the 2008 in comparison with 2004 due to lower solar activity in 2008 compared to 2004, therefore a smaller amount of electrons in the ionosphere, improving the performance of positioning GPS.

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

1. Introdução

A maior fonte de erros no posicionamento com GPS (*Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global) era devido à técnica SA (*Selective Availability* - 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 (Matsuoka, 2007).

A ionosfera é um meio dispersivo, onde a propagação de sinais depende da frequência, ao contrário da camada troposférica. A camada ionosférica caracteriza-se como parte da atmosfera superior onde está presente um número suficiente de elétrons livres, que afetam a propagação das ondas de rádio, e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente a 1000 km de altura. 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 e o satélite. 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:

$$VTEC = TEC \cdot \cos(z^{\wedge}) \quad (2)$$

onde, z^{\wedge} 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:

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

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 (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):

$$I_f = -\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (4); \quad I_c = +\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (5)$$

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, dispendo-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, além de alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do globo terrestre. Devido a isso, a motivação de estudar o efeito ionosférico, a partir do parâmetro TEC, uma vez que inúmeras atividades nas áreas de geodésia e geodinâmica se utilizam do posicionamento por satélites, beneficiando os usuários e trazendo melhorias para o posicionamento preciso com GPS.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do erro devido à ionosfera a partir do parâmetro VTEC dos arquivos IONEX (IGS), referente aos meses dos solstícios e equinócios dos anos de 2004 e 2008, em pontos situados em diferentes locais na região brasileira.

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 (Suíça); ESA (Alemanha); JPL (EUA);UPC (Espanha).

Cada um desses centros de análise produz 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 1900 até 2008. Vale notar que 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”.

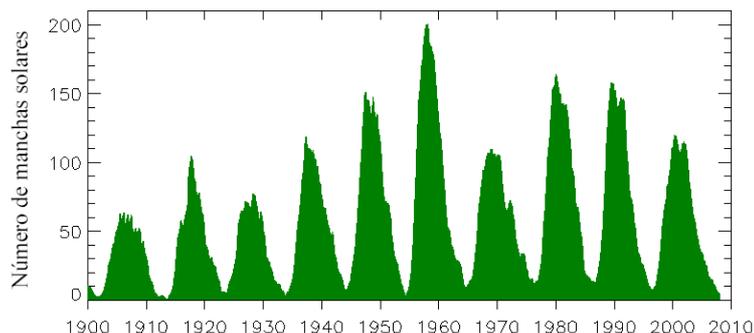


Figura 1. Número de manchas solares e ciclos solares.

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.

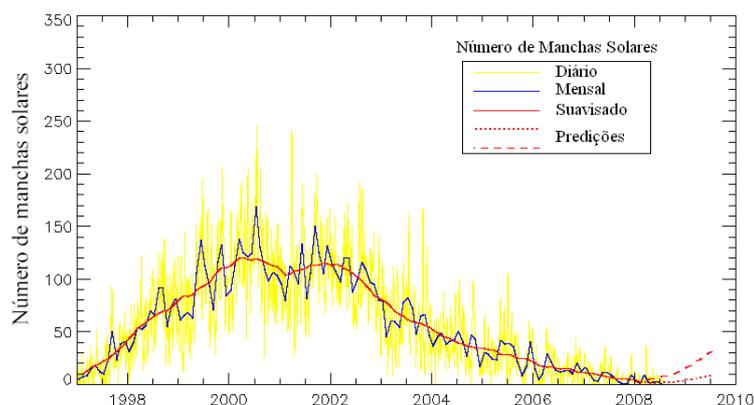


Figura 2. Ciclos solares 23 e 24.

Fonte: <<http://sidc.oma.be/html/wolfjms.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 geomagnéticos 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. 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: Matsuoka (2007).

5. Regiões geográficas da ionosfera

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. As três maiores regiões geográficas ionosféricas são conhecidas como regiões de altas e médias latitudes e região equatorial. A Figura 3 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre. Ainda que a amplitude dessas regiões da ionosfera não possa ser estabelecida exatamente, quando projetadas na superfície terrestre, é conveniente indicar aproximadamente a localização destas regiões. A região equatorial ainda é subdividida em equatorial (propriamente dita) e de baixas latitudes.

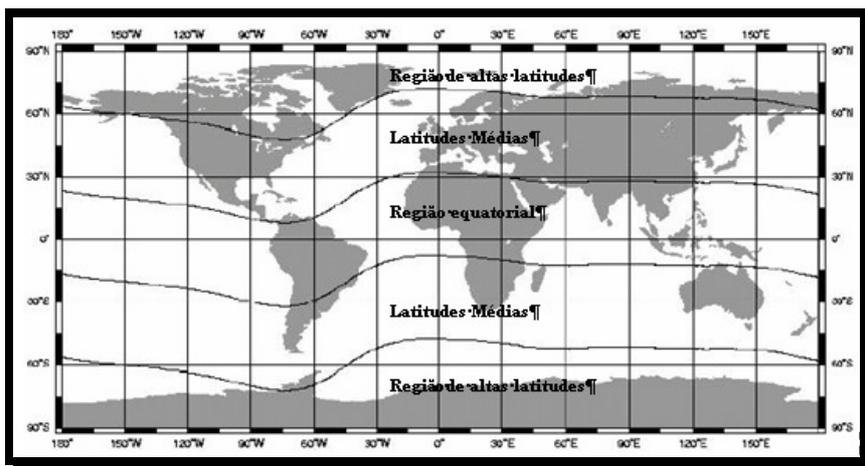


Figura 3. Regiões geográficas da ionosfera.

Fonte: Adaptada de Fonseca Júnior (2002).

6. Metodologia de Trabalho

Neste experimento foram elaborados gráficos com valores médios mensais do VTEC da ionosfera para os três pontos situados em regiões distintas do território brasileiro, referente aos meses de janeiro, abril, julho e outubro para os anos de 2004 e 2008. Esses gráficos foram produzidos de modo a 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 valores médios do VTEC foram escolhidos os seis dias de cada mês com base na atividade geomagnética (verificando-se o índice geomagnético A_p diário), que correspondem os seis dias com menor atividade geomagnética de cada mês, ou seja, buscou-se estudar o comportamento do VTEC em períodos com atividade geomagnética calma, a fim de evitar dias com influência de tempestades geomagnéticas. Os valores médios do VTEC foram interpolados 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 format*). Para a obtenção destes dados foi utilizado o método de interpolação por Krigagem para uma malha de $0^{\circ} 5'$ de latitude x $0^{\circ} 5'$ de longitude.

Esta análise foi feita para os meses de janeiro, abril, julho e outubro, respectivamente para solstício de verão, equinócio de outono, solstício de inverno e equinócio de primavera, para as posições de ($20^{\circ} 45'S$; $42^{\circ} 50'W$), ($30^{\circ} 05'S$; $51^{\circ} 05'W$) e ($00^{\circ} 05'N$; $51^{\circ} 00'W$), ou seja, onde estão localizadas aproximadamente as cidades de Viçosa – MG, Porto Alegre – RS e Macapá – AP, de acordo com a Figura 4. A intenção é ilustrar e comparar a variação do VTEC nas regiões próximas ao equador (região equatorial), na de baixas latitudes e início das latitudes médias.

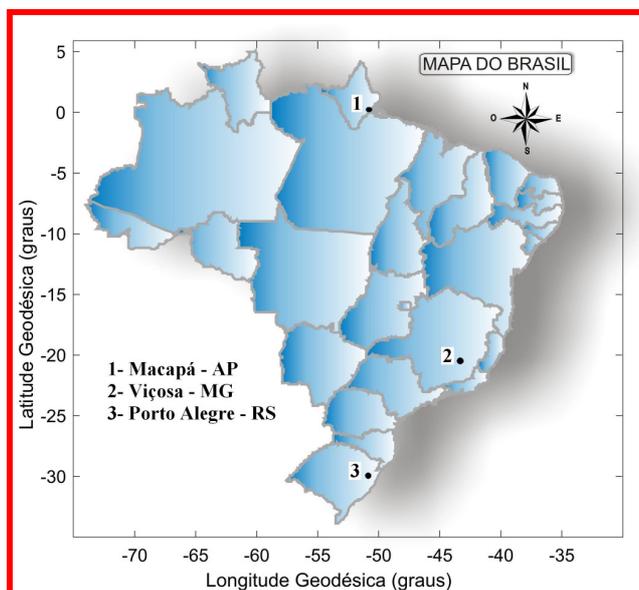


Figura 4. Localização da área de estudo.

7. Resultados e Discussão

A Figura 5 mostra os gráficos de valores médios mensais do VTEC (TEC vertical) nas localidades das cidades de Viçosa – MG, Porto Alegre – RS e Macapá – AP para os meses de janeiro e abril dos anos de 2004 e 2008, com intervalo de duas horas durante 24 horas.

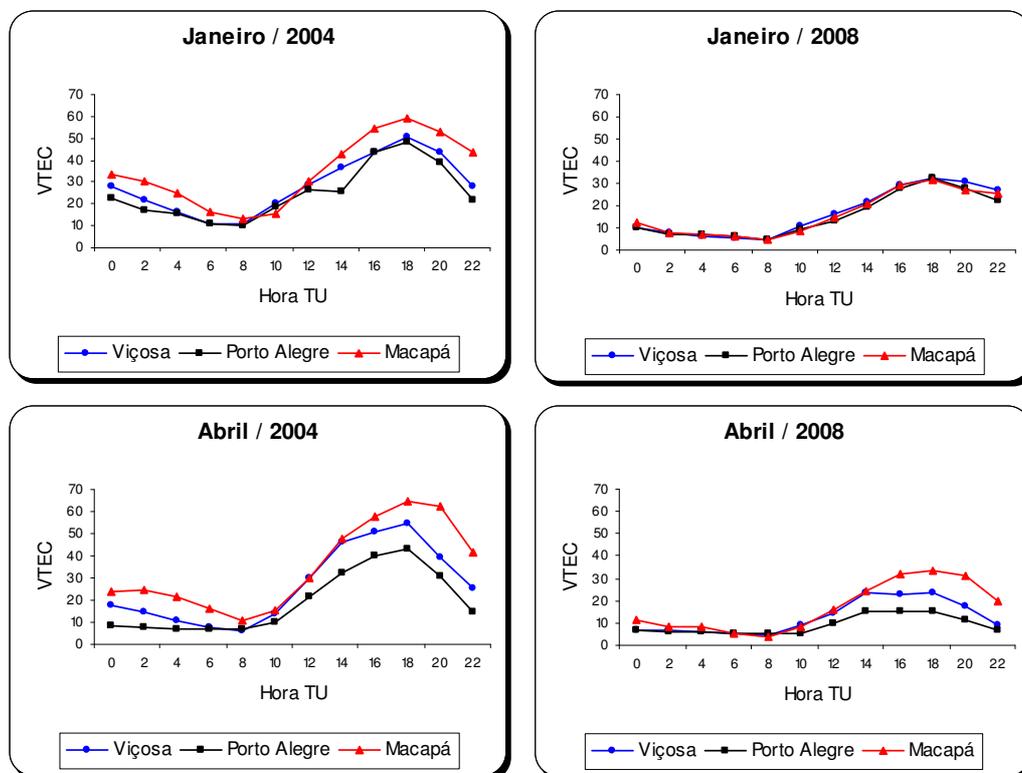


Figura 5. Valores médios mensais do VTEC para Viçosa, Porto Alegre e Macapá (janeiro/2004, abril/2004, janeiro/2008 e abril/2008).

Observando a Figura 5, nota-se, no período da tarde, maiores valores de VTEC nas três regiões, sendo o maior em Macapá, ou seja, na região mais próxima do equador geomagnético, com valor próximo a 65 TECU à 18 horas TU em abril de 2004 e aproximadamente de 35 TECU em abril de 2008 também à 18 horas TU.

A Figura 6 mostra os gráficos de valores médios mensais do VTEC (TEC vertical) nas três localidades para os meses de julho e outubro dos anos de 2004 e 2008 durante às 24 horas.

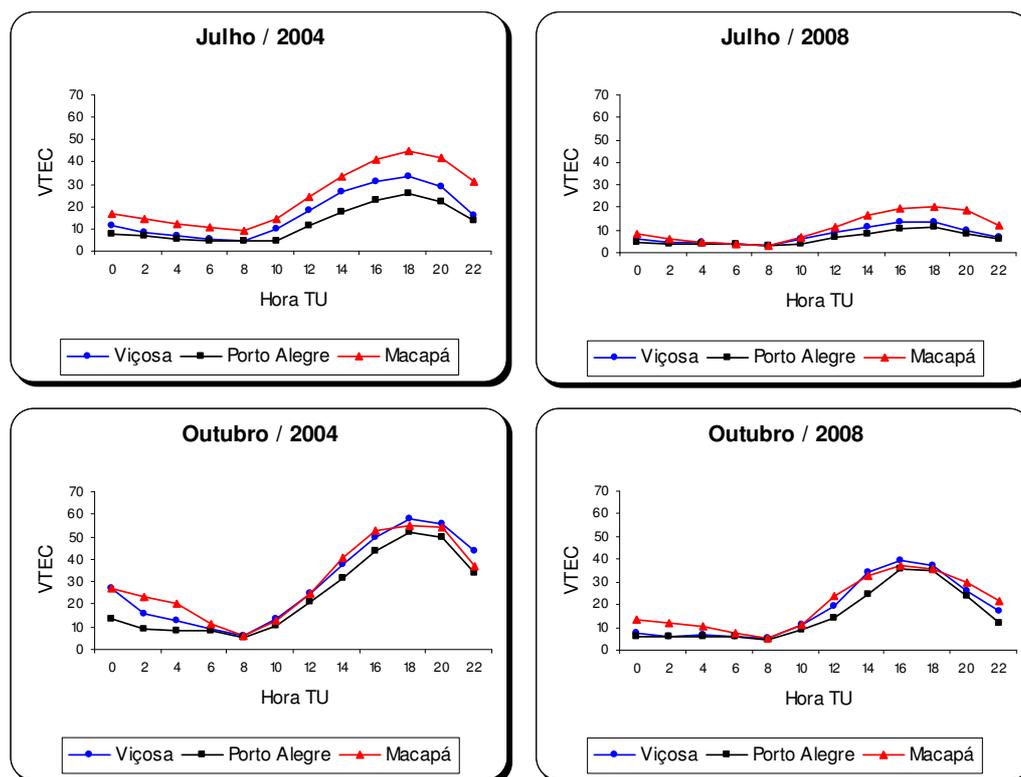


Figura 6. Valores médios mensais do VTEC para Viçosa, Porto Alegre e Macapá (julho/2004, outubro/2004, julho /2008 e outubro/2008).

Observa-se que o comportamento da curva do VTEC é similar ao modelo ionosférico de Klobuchar (Camargo, 1999; Leick, 1995; Klobuchar, 1987), que é muito adequado para as regiões geográficas próximas ao equador. Nestes gráficos nota-se que a diferença do comportamento do VTEC entre as regiões geográficas da ionosfera é bem distinguida.

Comparando as Figuras 5 e 6, é possível verificar a diminuição dos valores do VTEC no ano de 2008, principalmente nos valores próximos às 18 horas TU. No ano de 2004, obtiveram-se valores máximos próximo de 65 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 às 8 horas TU não aconteceram muitas modificações, pois seus valores ficaram em torno de 5 TECU.

Para apresentar como é significativa a mudança do impacto proporcionado pela ionosfera nos anos de 2004 e 2008, a Figura 7 mostra um mapa de diferenças de valores de VTEC para o território brasileiro entre os meses de abril de 2004 e 2008 para as 18 horas TU. Mais detalhes sobre esses mapas do VTEC, em Penha (2009).

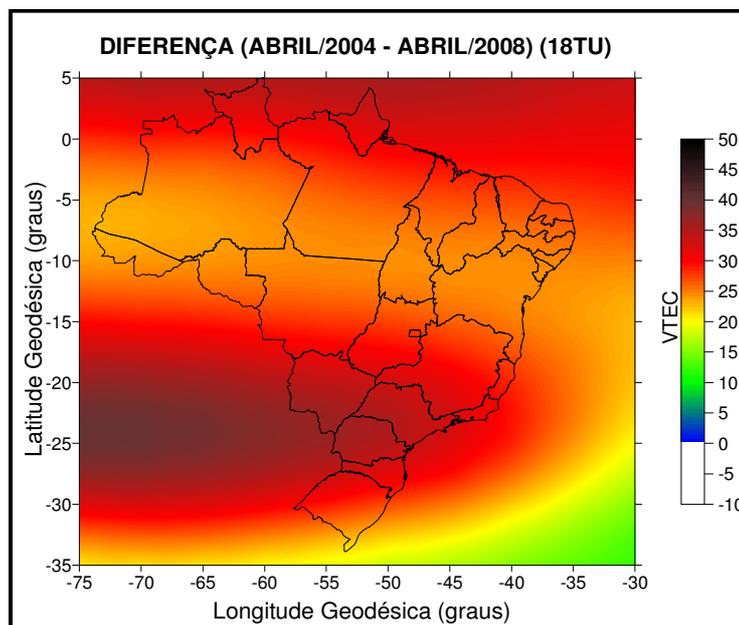


Figura 7. Mapas de diferenças de VTEC entre os meses de abril/2004 e abril/2008.
Fonte: Penha (2009).

8. 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 na diminuição do segundo.

Vale salientar que no ano de 2008 verificou-se uma menor atividade solar em relação ao ano de 2004, ou seja, observaram-se valores de VTEC menores nas três regiões ionosféricas.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao IGS, pelo fornecimento dos dados do VTEC por meio dos arquivos IONEX.

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.

Penha, J. W. **Avaliação da variação do TEC no território brasileiro utilizando dados do IGS no período de 2004 a 2008**. 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Informações Espaciais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2009.

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.