

**IMPACTO DE EXPLOSÕES SOLARES NO  
COMPORTAMENTO DA IONOSFERA E NO  
POSICIONAMENTO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA:  
Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003**

*Solar flare impact in the ionosphere and GPS positioning in the Brazilian region: a study case for the October, 28 2003 event*

MARCELO TOMIO MATSUOKA<sup>1,2</sup>  
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO<sup>2</sup>  
INEZ STACIARINI BATISTA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodésia/Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Cx. Postal 15001, Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Cartografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual – Programa de Graduação em Ciências Cartográficas - Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Av. dos Astronautas, 1758, CEP 12201-970 – São José dos Campos, SP, Brasil  
tomiomatsuoka@gmail.com; paulo@fct.unesp.br; inez@dae.inpe.br

**RESUMO**

O erro devido à ionosfera nas distâncias medidas pelo GPS (*Global Positioning System*) é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente na ionosfera. O TEC varia regularmente no tempo e no espaço com relação: ao ciclo de manchas solares (variação de longo período), à época do ano (variação sazonal), à hora do dia (variação diurna), à localização geográfica, entre outros parâmetros. No entanto, o TEC pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido, por exemplo, à ocorrência de intensas explosões solares (*solar flares*). Na ocorrência deste evento solar ocorre um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta, que, se direcionado para a Terra, pode provocar uma série de fenômenos na ionosfera, genericamente chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS). Neste artigo foram utilizados dados das estações GPS da RBMC e da rede IGS para analisar a influência da intensa explosão solar,

ocorrida em 28 de outubro de 2003, no comportamento do TEC e na performance do posicionamento por ponto na região brasileira.

**Palavras-chaves:** Posicionamento com GPS, Ionosfera, Explosão Solar, TEC

### ABSTRACT

The error due to the ionosphere in the GPS observables is directly proportional to the Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. The TEC varies regularly in time and space in relation to the sunspot number, the season, the local time, the geographic position, and others. However, the TEC can suffer abrupt modifications in its behavior due to the occurrence of intense solar flares. During a solar flare event a fast increase of the solar electromagnetic radiation occurs, especially in the rays X and extreme ultraviolet wavelengths that can provoke a series of phenomena in the ionosphere that are generically called Sudden Ionospheric Disturbances (SID). In this paper, GPS data from RBMC and IGS network were used, to analyze the influence of the intense solar flare, occurred on October 28, 2003 on the behavior of TEC and in the performance of the point positioning in the Brazilian region.

**Keywords:** GPS Positioning, Ionosphere, Solar Flare, TEC

## 1 INTRODUÇÃO

O erro devido à ionosfera nas observáveis do GPS (*Global Positioning System*) é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons livres (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. O TEC, e consequentemente o erro devido à ionosfera, varia regularmente no tempo e no espaço com relação ao ciclo de manchas solares (variação de longo período), à época do ano (variação sazonal), à hora do dia (variação diurna), à localização geográfica, entre outros. Quanto à variação geográfica, deve-se enfatizar que o Brasil é uma das regiões do globo terrestre que possuem os maiores valores e variações do TEC (KOMJATHY et al., 2003), e desta forma, a ionosfera é especialmente uma importante fonte de erro no posicionamento com GPS nesta região.

O principal processo de formação de elétrons livres na ionosfera é a fotoionização, que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991). Desta forma, o comportamento da ionosfera é extremamente influenciado pelo comportamento da atividade solar.

Além das variações regulares citadas anteriormente, o TEC pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido, por exemplo, à ocorrência de intensas explosões solares (*solar flares*). Na ocorrência destes eventos, entre outros fenômenos, ocorre um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta, que, se direcionado para a Terra, pode provocar uma série de fenômenos na ionosfera que genericamente são

chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS) (DAVIES, 1990). Entre os DIS que podem ocorrer, está o rápido aumento da densidade de elétrons na ionosfera, ou seja, do TEC.

Neste artigo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos de experimentos realizados com o objetivo de verificar a influência da intensa explosão solar ocorrida no dia 28 de outubro de 2003 no comportamento do TEC e, conseqüentemente, no erro devido à ionosfera nas observáveis GPS na região brasileira. Além disso, também é apresentada uma análise do impacto desta intensa explosão solar no posicionamento por ponto em diversos locais do Brasil.

Este artigo também tem como meta secundária mostrar mais um exemplo de como a Geodésia brasileira atual, seguindo a tendência mundial, tem ampliado a área de atuação através da interação com outras áreas que convencionalmente não faziam parte do conjunto dos seus conhecimentos. Citando o caso específico do posicionamento com GPS, este sinergismo da Geodésia brasileira com novas áreas foi impulsionado principalmente pela implantação das estações GPS ativas no Brasil, com destaque para a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Alguns exemplos de trabalhos atuais que mostram o sinergismo da Geodésia brasileira com outras áreas são: Sapucci (2005) e Sapucci et al. (2005) (Meteorologia); Perez et al. (2003) (Geofísica - Movimento de Placas Litosféricas); Camargo (1999), Matsuoka e Camargo (2004), Fonseca Junior (2002) e Batista et al. (2006) (Ionosfera – Aeronomia).

## **2 IONOSFERA E O SEU ERRO NAS OBSERVÁVEIS GPS**

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (ou simplesmente propagação) (SEEBER, 2003). Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera. Na literatura relacionada ao GPS, a troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre até aproximadamente 50 km de altura (convém salientar que esta divisão difere daquela baseada na variação de temperatura, na qual a troposfera é a região que se estende desde o solo até aproximadamente 12 km de altura, onde se encontra a tropopausa; a partir daí situa-se a estratosfera que se estende desde a tropopausa até aproximadamente 50 km de altura, onde se encontra a estratopausa). Ela é formada por partículas neutras, e a maior concentração de gases encontra-se até uma altura de 12 km, composta por nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio, vapor d'água, entre outros. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura, e a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995).

A ionosfera, ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, principalmente,

pela formação de íons e elétrons livres, e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura.

Na região compreendida pela ionosfera, a densidade de íons e elétrons é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas. Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização (KIRCHHOFF, 1991). Mais detalhes sobre a ionosfera podem ser obtidos, por exemplo, em Davies (1990), McNamara (1991) e Kirchoff (1991).

## 2.1 Erro devido à Ionosfera nas Observáveis do GPS

Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se na atmosfera dinâmica, atravessando diferentes camadas, que possuem características bem distintas. Conforme já citado, a troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

O efeito da ionosfera, que depende da frequência do sinal que a atravessa, e, conseqüentemente, do índice de refração, é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora.

Os erros devido à ionosfera para a observável de fase ( $I_{fr}^s$ ) e pseudodistância ( $I_{gr}^s$ ) ao longo da direção satélite (s) e antena receptora (r) são dados em função do TEC e da frequência do sinal (f) (LEICK, 1995):

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (1)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (2)$$

De acordo com as equações (1) e (2) pode-se verificar que os erros devido à ionosfera para a fase e pseudodistância são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência da portadora. A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado ( $\text{el}/\text{m}^2$ ) e a constante 40,3 é dada em  $[\text{m Hz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}]$ .

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, o erro devido à ionosfera, representado pelas expressões (1) e (2) constitui somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com

receptores GPS de dupla frequência. Os erros remanescentes representam poucos centímetros (SEEBER, 2003).

A ionosfera também pode causar um efeito denominado de cintilação ionosférica. Cintilações são flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, e, conseqüentemente, do índice de refração. A cintilação causa um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal (WEBSTER, 1993).

### **3 VARIAÇÕES REGULARES DO TEC**

As variações temporais regulares do TEC compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. A variação diurna ocorre principalmente devido à iluminação do Sol, ou seja, a radiação solar. Ao longo do dia, a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12:00 e 16:00 horas local (WEBSTER, 1993). Na região equatorial de baixas latitudes um segundo pico ocorre nas horas que precedem a meia noite, principalmente, em períodos próximos aos equinócios e verão e em períodos de alta atividade solar.

As estações do ano também influenciam na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais. Nos equinócios, os efeitos da ionosfera são maiores, enquanto que, nos solstícios, os efeitos são menores. Isto pode ser verificado em experimentos realizados por Matsuoka e Camargo (2004). Neste trabalho foi calculado o valor do TEC com dados GPS na região brasileira para as quatro estações climáticas do ano, bem como a produção de mapas da ionosfera, e concluiu-se que nos equinócios foram registrados os maiores valores do TEC, e nos solstícios os menores. Estas conclusões também podem ser verificadas em Fonseca Junior (2002).

As variações de ciclos de longos períodos, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização, ou seja, o aumento do TEC é proporcional ao número de manchas. Atualmente, estamos no denominado ciclo 23, sendo que o período de máximo número de manchas solares ocorreu em 2000-2001. No ano de 2006 o ciclo 23 encontra-se em um período de mínima ocorrência de manchas solares. Como exemplo, em Matsuoka et al. (2004) pode-se verificar resultados que mostram a melhora da acurácia do posicionamento com GPS na fase de declínio do número de manchas solares do ciclo 23.

A localização geográfica também influencia na variação da densidade de elétrons na ionosfera, pois a estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação, que altera, por sua vez, a densidade de elétrons na ionosfera. As regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade

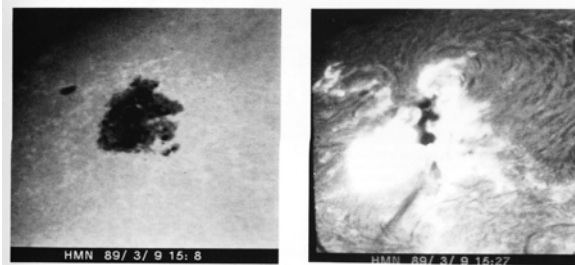
de elétrons, bem como, apresentam uma alta variação espacial. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, apresentando um comportamento mais regular, próximo ao descrito por modelos teóricos. A ionosfera sobre os pólos sul e norte, alternativamente, denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente instável (McNAMARA, 1991).

Mais detalhes sobre as variações regulares do TEC pode ser obtido, por exemplo, em McNamara (1991), Davies (1990), Camargo (1999) e Matsuoka (2003).

### 3.1 Explosão Solar - Distúrbios no Comportamento do TEC

As explosões solares ocorrem em regiões do Sol denominadas ativas onde se encontram manchas solares (McNAMARA, 1991). Vale salientar, que a predição de qual região ativa gerará intensas explosões solares que afetarão a ionosfera ainda não é uma ciência exata (McNAMARA, 1991). Inclusive, NASA (2006) salienta que uma predição confiável sobre quando ocorrerá uma explosão solar faz parte dos mistérios a respeito do Sol. A figura 1 mostra duas imagens do dia 9 de março de 1989 de uma região solar ativa, um pouco antes e logo após a ocorrência de uma explosão solar. A duração de uma explosão solar pode durar de 3 minutos até várias horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos (DAVIES, 1990).

Figura 1 - Imagens de uma região ativa um pouco antes e logo após a ocorrência de uma explosão solar – 9 de março de 1989. Fonte: McNamara (1991)



Durante as explosões solares um primeiro fenômeno que ocorre é o aumento da radiação solar eletromagnética na faixa do comprimento de onda dos raios X (McNAMARA, 1991). Isto provoca, em poucos minutos após a ocorrência do fenômeno, um aumento muito rápido na ionização (pelo processo de fotoionização) em alturas da ionosfera em torno de 80 km, no lado iluminado da Terra (BATISTA, 2003). Uma intensa explosão solar pode aumentar a densidade de elétrons da camada D em 10 vezes (McNAMARA, 1991). Este aumento de ionização dá origem a uma série de fenômenos denominados genericamente de “Distúrbios Ionosféricos Súbitos”, os quais afetam a propagação de ondas eletromagnéticas, em geral causando muita atenuação (BATISTA, 2003). McNAMARA (1991)

denomina um dos efeitos causados por esse rápido aumento de ionização na camada D de “enfraquecimento de ondas curtas” (*short-wave fadeout*). O aumento da densidade de elétrons na região D ocorre apenas alguns minutos após a ocorrência da explosão solar, e dura da ordem de 1,5 horas (BATISTA, 2003). Segundo Leonovich et al. (2001), um aumento súbito da densidade de elétrons na camada F também pode ser esperado.

Se a explosão solar for muito intensa, tem-se um segundo fenômeno: a ejeção de uma “nuvem” de plasma, também conhecido como ejeção de massa coronal (CME – Coronal Mass Ejection) (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991; KOMJATHY, 1997). Os parâmetros do vento solar são drasticamente intensificados durante tal fenômeno. Sua densidade pode passar de  $10^6$  para  $10^7$  partículas/m<sup>3</sup>, e sua velocidade de 400-300 km/s pode chegar a 1000 km/s ou até mais (BATISTA, 2003). Se esta nuvem de plasma proveniente da explosão solar atingir a Terra, poderá causar uma tempestade geomagnética que afetará drasticamente o comportamento do TEC (McNAMARA, 1991). A tempestade geomagnética iniciará várias horas após a ocorrência da CME, dependendo de quanto foi a intensificação da velocidade do vento solar. Os deslocamentos mais rápidos de CME que se têm registrado ocorreram em 4 de agosto de 1972 (14,6 horas), 2 de setembro de 1859 (17,5 horas) e 28 de outubro de 2003 (19 horas) (SKOUG et al., 2004). Felizmente, poucas intensas explosões solares afetam a Terra. Para se ter uma idéia, de 2000 a 2005 apenas 19 dias estiveram sobre a influência de intensas tempestades geomagnéticas (dias classificados com índice geomagnético Ap maior do que 100).

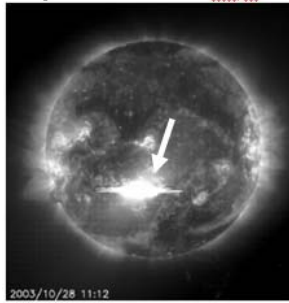
Informações a respeito das condições atuais da atividade solar e de predições de explosões solares e tempestades geomagnéticas podem ser obtidas no seguinte endereço eletrônico: <http://www.spaceweather.com/>.

Como descrito, basicamente dois fenômenos ocorrem devido à explosão solar: o aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética (principalmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta) e a intensificação do vento solar (que gera tempestades geomagnéticas). Neste presente artigo serão tratados os efeitos no comportamento do TEC e no posicionamento com GPS na região brasileira decorrente do primeiro fenômeno.

#### 4. EXPERIMENTOS

No dia 28 de outubro de 2003, entre 11:00 e 11:30 UT (*Universal Time*) (08:00 – 08:30 HL – Hora Local no meridiano de 45° W), aproximadamente, uma intensa explosão solar (*solar flare*) ocorreu diretamente na direção da Terra, aumentando instantaneamente o fluxo solar de radiação eletromagnética. A figura 2 apresenta uma imagem do Sol (na faixa do extremo ultravioleta) onde se pode ver a explosão solar.

Figura 2 – Imagem do Sol (extremo ultravioleta) no dia 28 de outubro de 2003 as 11:12 UT – Explosão Solar. Fonte: Liu et al. (2006)

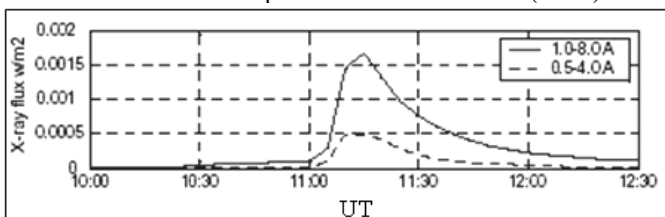


Medidas do fluxo da radiação eletromagnética na faixa dos raios-X associado à explosão indicaram que havia ocorrido uma das 3 maiores explosões solares das últimas 3 décadas (SKOUG et al., 2004). Subseqüentemente, além do aumento da radiação eletromagnética, observou-se a ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME) lançando um fluxo de vento solar intensificado em direção à Terra, onde medidas realizadas pela espaçonave ACE (*Advanced Composition Explorer*) indicaram uma velocidade do vento solar de aproximadamente 1850 km/s, bem acima da velocidade padrão (400-300 km/s). Como consequência, com a chegada da CME, às 06:11 UT (03:11 HL) do dia seguinte (29/10/2003), iniciou-se uma intensa tempestade geomagnética, aproximadamente 19 horas após a ocorrência da CME (SKOUG et al., 2004). Estudos dos efeitos dessa intensa tempestade geomagnética no comportamento do TEC e na acurácia do posicionamento por ponto na região brasileira estão sendo realizados pelo autor deste presente artigo em sua tese de doutoramento no PPGCC (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas) e serão divulgados oportunamente. Experimentos relacionados ao comportamento do TEC na região brasileira no período da manhã do dia de ocorrência dessa tempestade podem ser verificados em Batista et al. (2006).

Focando no aumento da radiação eletromagnética associado à explosão, a figura 3 mostra o fluxo de raios X ( $1-8 \text{ \AA}$  e  $0,5-4 \text{ \AA}$ ) registrado pelo satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) durante o período das 10 às 12:30 UT (7 – 9:30 HL) do dia 28 de outubro de 2003 (TSURUTANI et al., 2006).



Figura 3 - Fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES no dia 28 de outubro de 2003. Fonte: Adaptada de Tsurutani et al. (2006)



Analisando a figura 3 pode-se observar que, devido à explosão solar, um abrupto aumento do fluxo de raios X ocorreu após as 11 UT (8 HL), com pico às 11:15 UT aproximadamente.

Para verificar o aumento do TEC na região brasileira foram utilizados os dados das estações GPS da RBMC e algumas estações da rede IGS (*International GNSS Service*) da América do Sul. A metodologia empregada para obtenção do TEC a partir de dados GPS foi apresentada em Matsuoka e Camargo (2004). A figura 4 mostra a localização das estações GPS da RBMC, segundo a situação em outubro de 2003, e as estações da rede IGS da América do Sul.

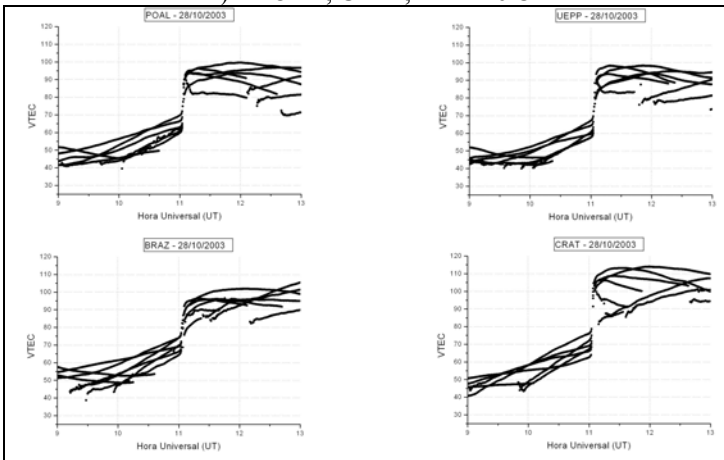
Figura 4 – Estações da RBMC e IGS



Iniciando a apresentação dos resultados, a figura 5 mostra o comportamento do VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical – ver Matsuoka e Camargo, 2004) durante o período das 9 as 13 UT (6 as 10 HL) do dia 28 de outubro de 2003, calculados a partir dos dados GPS das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT. A

unidade do VTEC é TECU (*TEC Unit*), sendo  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elétrons/m}^2$ . Vale salientar que o TEC é facilmente convertido em erro na distância medida pela fase ou código, usando as equações (1) e (2), respectivamente. Os dados foram processados em um programa computacional desenvolvido pelo autor na linguagem de programação Fortran Lahey 95 para calcular o VTEC a partir das observáveis de receptores GPS de dupla frequência. Resultados anteriores advindos deste programa já foram apresentados em experimentos realizados por Matsuoka e Camargo (2004), Matsuoka et al. (2004) e Batista et al. (2006).

Figura 5 - Valores de VTEC para o dia 28 de outubro de 2003 entre 9 e 13 UT (6 e 12 HL) – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT



Analisando a figura 5 pode-se verificar que ocorreu um fenômeno de DIS, estando em concordância com o aumento do fluxo da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar como visto na figura 3. Os valores de VTEC aumentaram repentinamente ( $\cong 20\text{-}25 \text{ TECU}$ ) logo após as 11:04 UT (08:04 HL), aproximadamente, em todas as estações GPS do experimento, mostrando a característica abrangente do fenômeno observado, uma vez que essas estações estão distribuídas em várias regiões do Brasil.

Analisando os arquivos de dados GPS das estações, outro fato observado foi o não registro (perda de sinal) das observáveis de fase e pseudodistância em L2 de alguns satélites nos arquivos RINEX das 4 estações GPS, todas ocorridas em 11:03 UT (08:03 HL), aproximadamente. Na estação CRAT isto ocorreu com o satélite PRN 9, 18 e 26, na UEPP com o PRN 25, na POAL com PRN 25 e 24 e na BRAZ com PRN 25. Para as observáveis de fase e pseudodistância em L1 não houve

perdas. Porém, é evidente que elas estão com a influência do aumento do TEC e, portanto, com um aumento do erro devido à ionosfera.

A figura 6 mostra mapas do VTEC (em TECU) para o Brasil produzidos para o dia 28 de outubro de 2003 entre 9 e 13 UT (6 e 10 HL). Para fins de comparação, na figura 7 são também apresentados mapas produzidos para o dia 11 de outubro, que corresponde a um dia sem perturbações ionosféricas, classificado como geomagneticamente calmo. Os mapas foram produzidos das amostras de VTEC obtidos a partir dos dados GPS das estações da RBMC e IGS.

Figura 6 – Mapas de VTEC para o Brasil – 28 de outubro de 2003 entre 09 e 13 UT (06 e 10 HL)

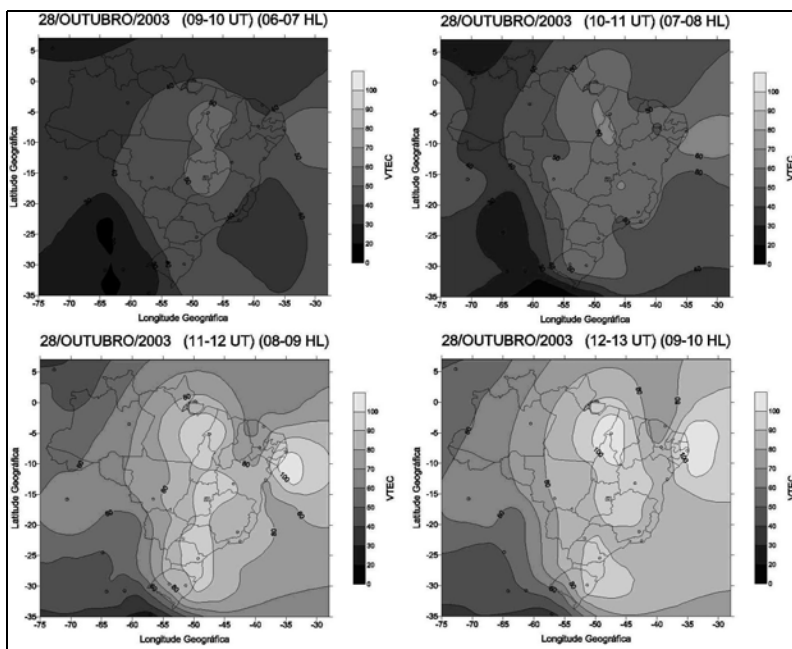
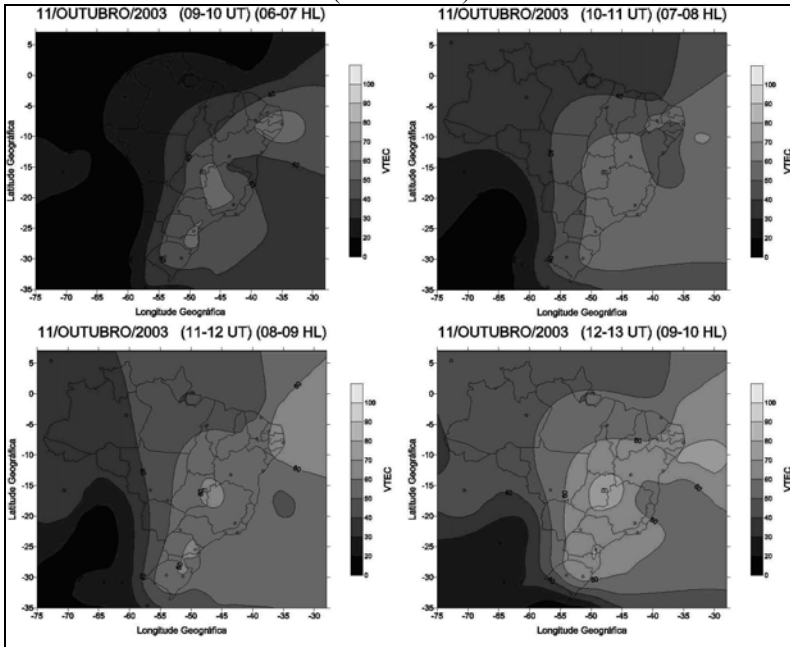


Figura 7 - Mapas de VTEC para o Brasil – 11 de outubro de 2003 entre 09 e 13 UT (06 e 10 HL)



Analisando e comparando as figuras 6 e 7 pode-se verificar o aumento ocorrido no VTEC em toda a região brasileira devido ao aumento do fluxo de radiação eletromagnética decorrente da explosão. No dia 11 de outubro (figura 7) observa-se um aumento gradual do VTEC, como esperado, pois, neste período inicia-se gradativamente a atividade solar diária e, portanto, a produção também gradativa de elétrons livres por fotoionização. No dia 28 de outubro (figura 6) observa-se um aumento gradual nos dois primeiros mapas e, um aumento abrupto é verificado no mapa das 11-12 UT (8-9 UT), estando em concordância com o aumento repentino da radiação advindo da intensa explosão solar. A partir de então um aumento gradual é verificado, porém, com valores maiores do que para o dia calmo usado como referência (11 de outubro).

Consultando a literatura pode-se observar que este fenômeno de aumento do VTEC devido à explosão solar de 28 de outubro de 2003 foi observado em outras regiões do globo terrestre. Como exemplo, pode-se consultar Tsurutani et al. (2006) que mostram um aumento similar para uma estação GPS (NKLG) do IGS localizada no continente Africano.

Foi realizado o posicionamento por ponto para as estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT utilizando o software GPSPACE (NRCAN, 1997) para o período entre 10 e 13 UT (7 e 10 HL) do dia 28 de outubro de 2003, visando verificar o impacto causado devido ao repentino aumento do TEC decorrente da explosão solar. No processamento foram utilizadas, como observáveis, as pseudodistâncias advindas do código C/A coletadas de satélites com ângulo de elevação superior a 10 graus. As efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, geradas pelo NRCAN (*Natural Research Canada*), foram incluídas no processamento. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP), valor menor ou igual a 7. As posições foram estimadas a cada 30 segundos. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas conhecidas das estações. As figuras 8 e 9 apresentam o comportamento do erro em planimetria e altitude geométrica, entre 7 e 10 HL (10 e 13 UT), para as quatro estações GPS consideradas no experimento.

Figura 8 - Erro em planimetria – 28/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

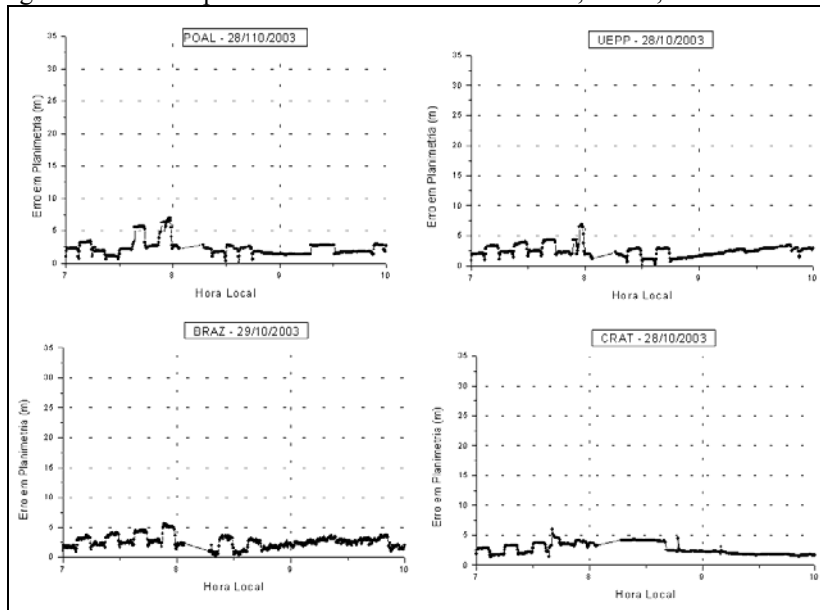
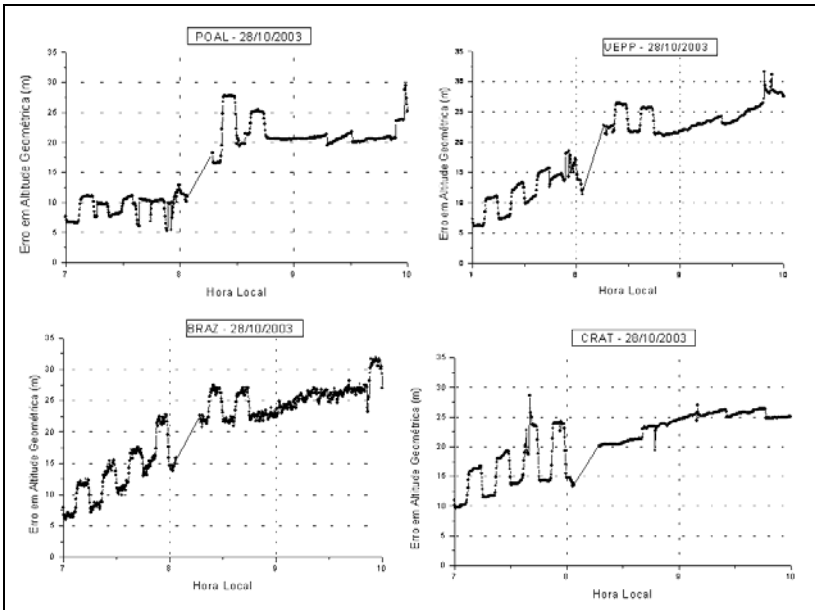


Figura 9 – Erro em altitude geométrica – 28/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT



Analisando os gráficos das figuras 8 e 9, várias características semelhantes podem ser observadas em todos eles. Primeiramente, pode-se verificar que uma maior variação temporal de ambos os erros ocorreu para as estações POAL, UEPP e BRAZ no período entre 7 e 8:45 HL (10 e 11:45 UT), aproximadamente. Para a estação CRAT uma maior variação temporal é observada entre 7 e 8 HL (10 e 11 UT), aproximadamente.

Um fato ocorrido para todas as estações GPS foi que o software GPSPACE não realizou o posicionamento por ponto no período entre 08:04 e 08:15 HL (11:04 e 11:15 UT). O início deste período de ausência coincide com o aumento repentino do VTEC e com o aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão. Os arquivos de saída gerados pelo software GPSPACE informam que, durante este intervalo, as pseudodistâncias (C/A) advindas de 2-3 satélites não passaram pelo controle de qualidade específico do software, sendo classificadas como sendo “outliers”, um termo bastante empregado em Ajustamento de Observações para indicar que uma observação (medida) não está dentro da propriedade estocástica pré-estipulada (TEUNISSEN, 2000). Isto mostra a possível influência do aumento repentino do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. Além disso, coincidentemente durante o período citado, as observações dos demais satélites não foram nem analisadas pelo software, pois, não houve registro do erro do relógio

desses satélites no arquivo de correções precisas dos relógios dos satélites produzidos e disponibilizados pelo NRCAN e que foi utilizado no processamento. Nesses casos, o GPSPACE também rejeita automaticamente o processamento das observações desses satélites. Desta forma, somando todas as exclusões o processamento não foi realizado nesse período.

É importante salientar que, a classificação de pseudodistâncias com qualidade abaixo da requerida pelo GPSPACE, durante o período citado anteriormente, é observada nas quatro estações GPS utilizadas no experimento, o que evidencia uma resposta em larga escala da explosão solar no posicionamento com GPS na região brasileira. Também, da mesma forma, a alta variação temporal do erro, principalmente em altitude geométrica, observada para as quatro estações GPS, também mostra outra influência em larga escala no território brasileiro.

Continuando a análise dos gráficos, outro fato ocorrido de abrangência geral é que, para todas as estações GPS, houve um aumento do erro em altitude geométrica após as 08:15 HL (11:15 UT), ou seja, logo após o período de ausência de determinações citado anteriormente. Quanto ao erro em planimetria, observa-se que, para todas as estações GPS, este erro foi menor do que o erro em altitude geométrica, não ultrapassando 7 metros aproximadamente. Ainda, em relação ao erro em planimetria, diferentemente do que se observou para o erro altimétrico, não se pode verificar um aumento do erro após as 08:15 HL (11:15 UT). Como já esperado, pode-se verificar que a maior influência da ionosfera é na determinação da altitude geométrica. A pouca influência da ionosfera no posicionamento planimétrico fica ainda mais destacado pelo fato de que o período analisado corresponde às primeiras horas da manhã, quando, como se sabe, inicia-se a produção diária de elétrons livres na ionosfera.

Para fins de comparação, foi realizado o posicionamento por ponto para o dia 11 de outubro de 2003 (dia calmo). As figuras 10 e 11 apresentam os gráficos para o erro planimétrico e altimétrico para as quatro estações GPS utilizadas no experimento.

Figura 10 - Erro em planimetria – 11/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

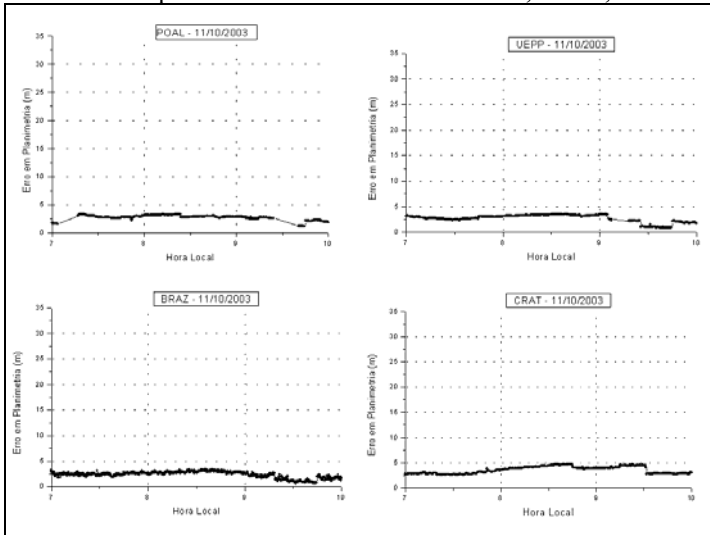
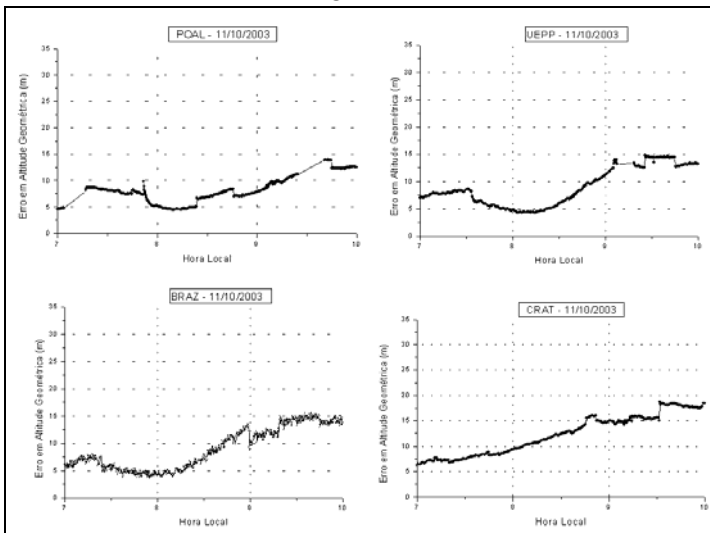


Figura 11 - Erro em altitude geométrica – 11/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT



Analisando os gráficos das figuras 10 e 11, pode-se concluir que não se observam no dia 11 de outubro os fatos ocorridos no dia 28, evidenciando ainda



mais que as modificações ocorridas na acurácia do posicionamento por ponto têm correlação com o aumento da radiação eletromagnética decorrente da intensa explosão solar. Observando os gráficos das figuras 10 e 11, pode-se verificar, de uma maneira geral, um comportamento bastante esperado para o período analisado. Primeiramente, o erro em planimetria apresenta pouca influência da ionosfera, principalmente, no período da manhã. O comportamento do erro em altitude geométrica apresenta de maneira geral um aumento gradativo, sem grandes variações temporais, estando de acordo com o aumento gradual da atividade ionosférica que ocorre durante o período da manhã.

Para finalizar, voltando para o dia 28, um dos fatos que chamou a atenção é o comportamento temporal irregular da variação dos erros posicionais no período anterior ao efetivo aumento da radiação eletromagnética, ou seja, no período que antecede a intensa explosão solar. Este tipo de observação merece futuras investigações, no sentido de verificar se este mesmo comportamento ocorreu para outros períodos de intensas explosões solares.

## 5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Neste artigo foram realizados experimentos utilizando dados GPS da RBMC e da rede IGS visando apresentar e estudar o impacto da intensa explosão solar ocorrida no dia 28 de outubro de 2003 no comportamento do TEC e no posicionamento com GPS na região brasileira.

A intensa explosão solar iniciou-se por volta das 11:00 UT (08:00 HL). Neste horário a ionosfera na região brasileira encontra-se em um período de início da sua atividade. Com a explosão solar, um repentino aumento da radiação solar eletromagnética foi observado, o que ocasionou um aumento na atividade ionosférica.

Os resultados dos primeiros experimentos mostraram um abrupto aumento do VTEC em larga escala no território brasileiro em concordância com o aumento da radiação eletromagnética proveniente da explosão solar. Este fenômeno é classificado como um dos DIS (Distúrbios Ionosféricos Súbitos) que podem ocorrer em períodos de explosões solares.

Em outro experimento foi analisado o comportamento da acurácia do posicionamento por ponto em quatro estações da RBMC localizadas em diferentes regiões do Brasil (POAL, UEPP, BRAZ e CRAT). Os resultados mostraram um comportamento dos erros bastante similares nas quatro estações GPS, mostrando a característica abrangente do impacto da explosão solar. Foram observadas perdas do sinal  $L_2$  em todas as 4 estações GPS, sendo que, ainda, algumas observações de pseudodistância em  $L_1$  foram rejeitadas pelo software GPSPACE que as classificou como sendo *outliers*. Estes eventos mostram a influência da explosão solar na qualidade de rastreamento dos sinais pelos receptores. Para todas as estações GPS o software GPSPACE não realizou o posicionamento por ponto no período entre

08:04 e 08:15 HL (11:04 e 11:15 UT), que coincide com o aumento repentino do VTEC e com o aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar.

Uma alta variação temporal dos erros planimétricos e altimétricos foi observada nas quatro estações quando comparada com os resultados do dia sem explosão solar. Um fato interessante observado com relação a isso é a alta variação temporal dos erros antes do efetivo aumento da radiação solar eletromagnética. Isto merece uma investigação futura no sentido de verificar a ocorrência em outros períodos de intensas explosões solares.

Em atividades futuras pretende-se analisar a influência de outras explosões solares no posicionamento com GPS no Brasil, visando verificar as modificações existentes com relação à hora, à época do ano e ao ciclo solar de sua ocorrência. Além disso, além do posicionamento por ponto, pretende-se analisar a influência no posicionamento relativo.

Para finalizar, em decorrência do evento de CME da explosão solar de 28 de outubro de 2003, às 06:11 UT do dia seguinte iniciou-se uma intensa tempestade geomagnética que afetou significativamente o comportamento da ionosfera. A influência dessa intensa tempestade geomagnética no posicionamento com GPS na região brasileira está sendo investigada e será apresentada futuramente. Primeiros resultados com relação ao comportamento do VTEC no período da manhã do dia da tempestade foram apresentados em Batista et al. (2006).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATISTA, I. S.; ABDU, M.A.; SOUZA, J.R.; BERTONI, F.; MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BAILEY, G.J.. Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, v.111, A05307, doi:10.1029/2005JA011428, 2006.
- BATISTA, I.S.. Notas de aula do curso “*Introdução à ionosfera e a propagação de ondas*” ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.
- CAMARGO, P.O.. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência*. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- DAVIES, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- FONSECA JUNIOR, E.S.. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- KIRCHHOFF, V.W.J.H.. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- KOMJATHY, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. 1997. 248p. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A.J.; XIAOQING, P.. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south American region. *Journal of the Institute of Navigation*, v.50, n.3, p.193-218, Fall/2003.
- LEICK, A.. *GPS satellite surveying*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- LEONOVICH, L.A.; ALTYNSEV, A.T.; GRECHNEV, V.V.; AFRAIMOVICH, E.L.. *Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data*. In: [http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0110/0110063.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0110/0110063.pdf) , acesso em julho/2006, 2001.
- LIU, J. Y., C. H. Lin, Y. I. Chen, Y. C. Lin, T. W. Fang, C. H. Chen, Y. C. Chen, and J. J. Hwang.. Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content. *Journal of Geophysical Research*, v.111, A05308, doi:10.1029/2005JA011306, 2006.
- MATSUOKA, M.T.. *Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS*. 2003. 164p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.56/01, p.14-27, julho/2004.
- 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*, v.10, n.2, p.141-157, 2004.
- NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – online – endereço eletrônico: <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/quests.htm>, acesso em agosto de 2006.
- McNAMARA, L.F.. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- NRCAN: User's Guide – GPSPACE: Manual de Operação – GSD/NRCAN, Canadá, 1997 – [http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php)

- PEREZ, J.A.S.; MONICO, J.F.G.; CHAVES, J.C.. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. *Journal Of Global Positioning System*, Calgary, v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003.
- SAPUCCI, L.F.. *Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia*. 2005. 200p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- SAPUCCI, L.F.; MONICO, J.F.G.; MACHADO, L.A.T.; PLANA-FATTORI, A.; ARAÚJO, W.F.. O desempenho do GPS na quantificação do vapor d'água atmosférico na região amazônica. In: *Krueger, C.P.; Ribeiro, S.A. ed. Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Imprensa Universitária, v.5, p.172-183, 2005.
- SEEBER, Gunter. *Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SKOUG, R. M., Gosling, J. T., Steinberg, J. T., McComas, D. M., Smith, C. W., Ness, N. F., Hu, Q., Burlaga, L. F. Extremely high solar wind: 29-30 October 2003, *Journal of Geophysical Research*, 109, A09102, doi: 10.1029/2004JA010494, 2004.
- TEUNISSEN, P.J.G.. *Testing Theory: an introduction*. 2000. Editora: Delft University Press. Delft, Holanda.
- TSURUTANI, B.T.; MANNUCCI, A.J.; IJIMA, B.; GUARNIERI, F.L.; GONZALEZ, W.D.; JUDGE, D.L.; GANGOPADHYAY, P.; PAP, J.. The extreme Halloween 2003 solar flares (and Bastille Day, 2000 Flare), ICMEs, and resultant extreme ionospheric effects: A review. *Advances in Space Research*, v.37, Issue 8, p.1583-1588, 2006.
- WEBSTER, I.. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. 1993. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

(Recebido em setembro 2006. Aceito em novembro 2006)