

Revista Brasileira de Cartografia (2011) Nº 63/5: 575-587
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO PARA 29 DE OUTUBRO DE 2003

*Magnetic Storms Effects in GPS Positioning in the Brazilian Region:
Study for October 29, 2003*

**Christiane Silva Salomoni, Marcelo Tomio Matsuoka &
Sérgio Florêncio de Souza**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Instituto de Geociências – Departamento de Geodésia

Av. Bento Gonçalves, 9500 – Cx Postal 15001

CEP 91501-970 – Porto Alegre/RS

christiane.silva.salomoni@gmail.com

tomiomatsuoka@gmail.com

sergioflorenciodesouza@gmail.com

*Recebido em 1 Setembro, 2010/ Aceito em 16 Outubro, 2011
Received on September 1, 2010/ accepted on October 16, 2011*

RESUMO

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático das observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Esse erro é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, à densidade de elétrons presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. O TEC varia regularmente ao longo do dia, ao longo das estações do ano e também ao longo de ciclos de aproximadamente onze anos. No entanto, além das variações regulares, eventos solares extremos (explosões solares, ejeções coronais de massa, entre outros) podem causar abruptas e significativas mudanças no comportamento do TEC, exercendo grande influência no posicionamento com GNSS, principalmente com receptores de uma frequência. Neste trabalho realizou-se um estudo da severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003 (em decorrência de uma ejeção coronal de massa), com ênfase nas suas conseqüências sobre a ionosfera terrestre e o posicionamento relativo com GPS (*Global Positioning System*) em linhas de base longas na região brasileira.

Palavras chaves: Posicionamento Relativo, GPS, Ionosfera, TEC, CME, Tempestade Geomagnética.

ABSTRACT

The ionosphere is a major source of systematic error in the GNSS (*Global Navigation Satellite System*) observable. This error is directly proportional to the TEC (*Total Electron Content*), or the density of electrons in the ionosphere along the path between the satellite and the receiving antenna. The TEC varies regularly throughout the day, the seasons and also over cycles of about eleven years. However, besides the regular variations, extreme solar events (solar flares, coronal mass ejections, etc.) can cause abrupt and significant changes in the behavior of TEC, wielding great influence in GNSS positioning, especially with single frequency receivers. A study of severe geomagnetic storm started on 29 October 2003

(due to a coronal mass ejection), with emphasis on their consequences on the terrestrial ionosphere and the relative positioning in the region of Brazil was carried out in this paper.

Keywords: Relative Positioning, GPS, Ionosphere, TEC, CME, Geomagnetic Storm.

1 INTRODUÇÃO

A ionosfera, região da atmosfera terrestre caracterizada pela formação de íons e elétrons livres e localizada aproximadamente entre 50 e 1 000 km de altura (KIRCHHOFF, 1991), é a principal fonte de erro sistemático das observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Por ser um meio dispersivo, ela afeta a propagação de ondas eletromagnéticas, fazendo com que a modulação e a fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites GNSS na banda L do espectro eletromagnético sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 2004), o que provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. Esse erro é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, à densidade ou número de elétrons presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora (LEICK, 2004).

A densidade de elétrons sofre alterações em função da radiação solar, da localização geográfica, do campo geomagnético da Terra, entre outros fatores. O comportamento dessas variações pode ser verificado regularmente ao longo do dia (variações diurnas), ao longo das estações do ano (variações sazonais) e também ao longo de ciclos de aproximadamente onze anos, associados à ocorrência de manchas solares e ao aumento e diminuição da emissão de radiação solar. A Anomalia Equatorial de Ionização (AEI) – fenômeno ionosférico caracterizado pela variação latitudinal de densidade de elétrons na região equatorial da ionosfera –, que afeta diretamente a região brasileira, exerce influência direta no comportamento dessas variações.

Se essas variações regulares do TEC já influenciam os resultados do posicionamento com GNSS, eventos solares como explosões (*solar flares*) e ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejection*) podem desencadear severas tempestades geomagnéticas na Terra, e essas, por sua vez, podem desencadear abruptas e significativas mudanças no estado da ionosfera,

alterando drasticamente os valores de TEC e exercendo grande influência nos resultados do posicionamento com GNSS, principalmente com receptores de uma frequência.

Em função dessas considerações foi realizado um estudo de caso envolvendo a severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003, em decorrência da chegada à Terra da CME ocorrida no dia anterior, com ênfase nas suas conseqüências sobre a ionosfera terrestre e o posicionamento relativo com GPS em linhas de base longas na região brasileira.

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos fenômenos solares, geomagnéticos e ionosféricos diretamente relacionados com o caso em estudo. Maiores informações sobre eventos solares e sua influência sobre as variações do TEC, bem como estudos e análises dessas variações, podem ser encontradas, por exemplo, em Matsuoka (2007) e Salomoni (2008).

1.1 Ejeção coronal de massa (CME)

Ejeção coronal de massa é a denominação dada a grandes quantidades de plasma que são subitamente ejetadas a partir do Sol. A frequência de ocorrência de CMEs está relacionada ao ciclo de manchas solares: em épocas de baixa atividade solar, a frequência é de uma CME por semana; em períodos de alta atividade solar, observa-se, em média, 2 ou 3 CMEs por dia. No entanto, é preciso considerar que nem todas as CMEs ocorrem na direção da Terra; as que ocorrem são denominadas CMEs Halo (HATHAWAY, 2007). É importante salientar também que CMEs podem ser geoefetivas, ou seja, têm o potencial de causar perturbações geomagnéticas na Terra (WEBB, 1995).

Com a ocorrência de CMEs, os parâmetros do vento solar são drasticamente modificados: sua densidade pode passar de 10^6 para 10^7 partículas/ m^3 e sua velocidade de 300-400 km/s para valores maiores que 1000 km/s. Se essa nuvem de plasma é ejetada na direção da Terra e a atinge, pode causar uma tempestade geomagnética e, em conseqüência, uma tempestade ionosférica, afetando o comportamento do TEC (McNAMARA, 1991).

1.2 Tempestades geomagnéticas

Tempestades geomagnéticas podem ser definidas como a resposta da magnetosfera terrestre a alterações nos parâmetros do vento solar, causadas por eventos tais como CMEs (GOODMAN, 2005).

De acordo com Tsurutani e Gonzalez (1996), essas perturbações, denominadas tempestades geomagnéticas, acontecem devido à entrada de energia do vento solar intensificado na magnetosfera pelo processo de reconexão, ou seja, as linhas do campo magnético interplanetário (direção sul) se interconectam com as linhas do campo geomagnético da Terra (direção norte) no lado diurno, transportando a energia sobre a calota polar na direção da cauda da magnetosfera, onde ocorre uma nova reconexão, e a energia é injetada para dentro da magnetosfera. A figura 1 apresenta a dinâmica do vento solar na magnetosfera (os números de 0 a 7 indicam as sucessivas posições do campo magnético interplanetário).

Tempestades geomagnéticas são descritas por alguns índices, que informam a intensidade e a duração das mesmas. Um deles é o índice geomagnético *Disturbance Storm-Time* (Dst), que descreve as tempestades geomagnéticas de forma mais global.

O índice Dst é obtido em unidades de nanoTeslas (nT) e em resolução temporal de uma hora (são apresentados valores médios para intervalos de uma hora, começando entre 00 e 01 UT – *Universal Time* – de cada dia). Perturbações graves no índice Dst são negativas, ou seja, são decréscimos no campo geomagnético normalmente produzidos pelo sistema de corrente equatorial na magnetosfera (conhecida como corrente do anel). As variações positivas que ocorrem no índice Dst são geralmente uma consequência da compressão da magnetosfera causada pelo aumento da pressão devido ao vento solar intensificado (SUGIURA e KAMEI, 2000). É a partir desse índice que melhor se define a tempestade geomagnética e suas fases, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão (MATSUOKA, 2007). Valores oficiais do índice Dst podem ser encontrados no endereço <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>.

As tempestades mais intensas são frequentemente relacionadas às CMEs (OULU, 2003 *apud* FEDRIZZI, 2003). Nesses casos,

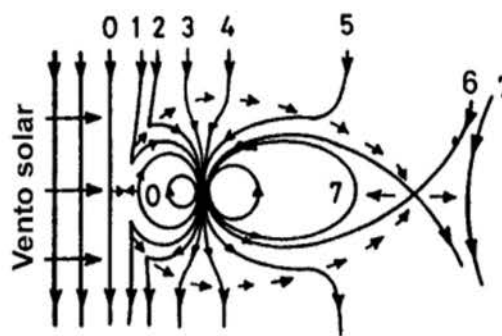


Fig. 1 – Dinâmica do vento solar na magnetosfera. Fonte: Fedrizzi (2003).

Fedrizzi (2003) afirma que o aumento da velocidade do vento solar, acompanhado pela passagem do campo magnético interplanetário na direção sul, pode resultar em um início súbito de tempestade (SSC – *Sudden Storm Commencement*). O SSC é uma consequência do aumento da pressão dinâmica do vento solar sobre a magnetopausa no lado diurno e caracteriza a ‘Fase Inicial’ de uma tempestade magnética, com um pico de intensidade no Dst. O SSC, porém, não é uma componente obrigatória da tempestade, podendo a fase inicial apresentar, ao invés do início súbito, um início gradual, dependendo do evento que lhe deu origem. Após esse pico, desenvolve-se a ‘Fase Principal’ da tempestade, que é caracterizada por uma queda brusca do valor do índice devido ao aumento de correntes elétricas que fluem na magnetosfera. Ao alcançar o mínimo, o índice volta a subir, na etapa conhecida como ‘Fase de Recuperação’, até atingir aproximadamente o valor calmo, quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999).

1.3 Anomalia Equatorial de Ionização (AEI)

A Anomalia Equatorial de Ionização é um fenômeno ionosférico que se caracteriza por uma variação latitudinal da densidade de elétrons na região equatorial da ionosfera, como resultado de um processo conhecido como Efeito Fonte.

O Efeito Fonte consiste no movimento de elevação do plasma na região do equador geomagnético e posterior descida ao longo das linhas do campo geomagnético até as baixas latitudes (RODRIGUES, 2003). Como consequência direta do Efeito Fonte tem-se um aumento da densidade de elétrons nas regiões de descida do plasma (entre $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ de latitude geomagnética) e uma diminuição da densidade de

elétrons na região do Equador Geomagnético (MATSUOKA, 2007), resultando em gradientes de densidade de elétrons na direção Norte-Sul e caracterizando assim a AEI. Segundo Fedrizzi (2003), os valores máximos de densidade de elétrons ocorrem nas latitudes de $\pm 15^\circ$ a partir do equador geomagnético, correspondendo às regiões de crista da AEI.

A AEI varia durante o dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta de 14 HL (Hora Local) e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia-noite, normalmente próximo de 21 HL (AEI noturna). De acordo com Matsuoka (2007), a variação latitudinal da densidade de elétrons no período da tarde é menor pois, embora o efeito fonte desloque elétrons das regiões próximas ao equador para as regiões das cristas da AEI, elétrons livres continuam sendo produzidos na região equatorial pelo processo de fotoionização, devido à presença da radiação solar. Já no segundo pico da AEI, nas horas próximas ao pôr-do-sol, a variação latitudinal da densidade de elétrons é bem mais destacada, pois o efeito fonte desloca os elétrons da região do equador para as cristas da AEI, mas, com o pôr-do-sol, não há mais o processo de fotoionização, ou seja, baixos valores de densidade de elétrons são encontrados na região do equador geomagnético e altos valores na região das cristas da AEI.

Estudos realizados por Batista *et al.* (2006), Fedrizzi (2003) e Skone *et al.* (2004) verificaram um comportamento alterado da AEI durante tempestades geomagnéticas severas. Com efeito, Abdu (1991) afirma que o desenvolvimento da AEI pode sofrer drásticas modificações em períodos geomagneticamente perturbados, como, por exemplo, a sua formação em horários em que não é usual a sua presença. Durante esses eventos, tem sido observado um deslocamento da crista sul e da crista norte da AEI para regiões mais afastadas do equador, deslocamento esse atribuído à intensificação do efeito fonte em associação com os campos elétricos na direção leste intensificados (BATISTA *et al.*, 2006).

2 ESTUDO DE CASO

Durante o mês de Outubro e início do mês de Novembro de 2003, já no período de declínio do Ciclo Solar 23, três agrupamentos de manchas

solares – 10484, 10486 e 10488 – mostraram-se extremamente ativos, gerando uma série de explosões solares enquadradas na Classe X (maiores intensidades do pico da explosão), conforme medidas dos satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Entre as onze explosões solares Classe X que ocorreram entre Outubro e Novembro de 2003, três se destacaram por sua magnitude e geofetividade: as explosões de 28 de Outubro, 29 de Outubro e 4 de Novembro. Em associação com essas três explosões, ocorreram CMEs extremamente rápidas e intensas que alteraram drasticamente os parâmetros do vento solar. Mais informações sobre esses eventos e suas classificações são encontradas em Salomoni (2008).

Os primeiros efeitos desses eventos solares – o aumento da radiação eletromagnética na faixa do raio-X – foram percebidos em poucos minutos, através de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS) no lado diurno da Terra. Horas mais tarde, com a chegada das CMEs à Terra, severas tempestades geomagnéticas e ionosféricas – referidas na comunidade científica como Tempestades de *Halloween* – foram desencadeadas, e suas características e efeitos têm sido estudados e apresentados em diversos artigos, tais como: Tsurutani *et al.*, 2005; Mannucci *et al.*, 2005; Gopalswamy *et al.*, 2005; Batista *et al.*, 2006; Liu e Hayashi, 2006 e Becker-Guedes *et al.*, 2007.

Nesta pesquisa, no entanto, o estudo restringe-se à severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003, em decorrência da chegada à Terra da CME observada em associação com a explosão solar do dia anterior, com ênfase nas consequências dessa tempestade sobre a ionosfera terrestre e o posicionamento relativo com GPS (*Global Positioning System*) em linhas de base longas na região brasileira.

Os efeitos do aumento da radiação eletromagnética associados à explosão solar de 28 de Outubro já foram estudados por Matsuoka, Camargo e Batista (2006), que realizaram uma análise do impacto no comportamento do TEC e no posicionamento por ponto com GPS na região brasileira, verificando um repentino aumento do TEC, perdas do sinal GPS e abrupto aumento do erro do posicionamento por ponto, minutos após a

referida explosão solar. Os efeitos da severa tempestade geomagnética de 29 de Outubro de 2003 no posicionamento por ponto também já foram estudados por Matsuoka, Camargo e Batista (2008).

2.1 Tempestade geomagnética de 29 de Outubro de 2003

Às 05:58 UT do dia 29 de Outubro de 2003, o instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*), a bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), registrou a passagem da frente de choque da CME ocorrida em associação com a explosão solar X17.2 (ACE, 2008), ambas observadas no dia anterior. Alguns minutos depois, às 06:11 UT (03:11 HL – 51° W) de 29 de Outubro, registrou-se o início de uma severa tempestade geomagnética (BATISTA *et al.*, 2006), a primeira de uma série de super eventos geomagnéticos ocorridos em Outubro e Novembro de 2003.

A figura 2 apresenta os valores do índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro, onde as fases da tempestade ficam bem caracterizadas.

Entre 06 e 07 UT de 29 de Outubro, observa-se um aumento do valor de Dst, atribuído à compressão da magnetosfera pelo vento solar, intensificado pela CME; a seguir, desenvolve-se a

fase principal da tempestade, com a queda brusca do índice atingindo um valor mínimo médio de -353 nT (entre 00 e 01 UT de 30 de Outubro), quando então se inicia a fase de recuperação. O novo decréscimo do índice Dst nas horas finais do dia 30 de Outubro é atribuído à chegada a Terra de uma segunda CME, ocorrida em associação com outra explosão solar, que ocorreu no dia 29 de Outubro, desencadeando uma segunda tempestade geomagnética.

Skoug *et al.* (2004) analisaram os parâmetros do vento solar de alta velocidade decorrentes dos eventos solares do dia 28 de Outubro e concluíram que esta foi uma das maiores velocidades de vento solar já detectadas no espaço, atingindo valores superiores a 1850 km/s, segundo observações do instrumento SWEPAM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*), a bordo do satélite ACE, fazendo com que a CME atingisse a Terra em aproximadamente 19 horas. Os mesmos autores ainda salientam a dificuldade de estabelecer um valor de velocidade máxima para esse evento, pois os instrumentos do satélite foram afetados pela alta densidade de partículas energéticas solares, ocasionando falhas nas medidas.

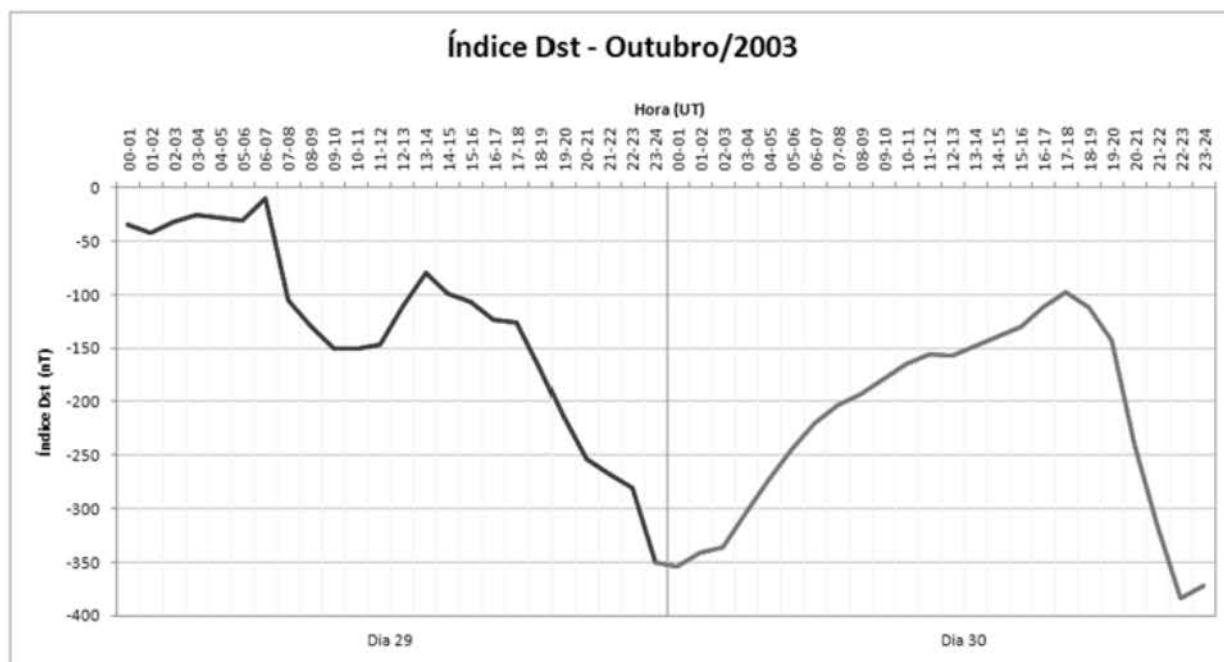


Fig. 2 – Índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro de 2003. Fonte: http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200310.html

Matsuoka, Camargo e Batista (2008) realizaram um estudo para verificar o erro no posicionamento por ponto com GPS entre 14 e 24 HL do dia 29 de Outubro de 2003. O estudo foi realizado utilizando dados GPS de estações da RBMC (POAL, UEPP, BRAZ e CRAT) e, no processamento, a observável pseudodistância (código C/A em L1) e efemérides precisas. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas conhecidas das estações, e uma primeira observação dos resultados revelou uma maior influência do erro devido à ionosfera na determinação da altitude geométrica, corroborando resultados de outros estudos. Comparando os resultados com um dia geomagneticamente calmo, também foi possível verificar, de maneira geral, uma variação bem mais irregular dos erros altimétrico e planimétrico, bem como uma maior intensidade desses erros no dia da tempestade.

2.2 Estudos, resultados e análises

Com o objetivo de avaliar a influência, no posicionamento relativo com GPS, da severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003, foram escolhidas três linhas de base dentro do território brasileiro, utilizando seis estações da RBMC: FORT-CRAT (~387,5 km), POAL-SMAR (~253,9 km) e UEPP-PARA (~430,2 km).

A escolha das estações e linhas de base para o estudo levou em consideração os diferentes afastamentos latitudinais das mesmas em relação ao equador geomagnético (figura 3), de forma a possibilitar a análise da influência da Anomalia Equatorial de Ionização, intensificada com a tempestade geomagnética, no posicionamento relativo.

É importante salientar, inicialmente, que o mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera no hemisfério sul, é um mês característico, onde resultados piores no posicionamento com GPS já são esperados, mesmo em dias geomagneticamente calmos. Segundo estudos realizados por Oliveira (2003), Matsuoka e Camargo (2004) e Dal Poz (2005), os efeitos da ionosfera no posicionamento com GPS (por ponto e relativo) são maiores próximos aos equinócios, ou seja, nos períodos compreendidos pelos meses de Março/Abril e Setembro/Outubro, quando maiores valores e



Fig. 3 – Estações da RBMC e linhas de base estudadas

variações espaciais de TEC são observados sobre o território brasileiro. Nesses períodos, também são observadas maiores variações espaciais e temporais do TEC devido à intensificação da AEI, principalmente durante o seu segundo pico, nas horas próximas ao pôr-do-sol (MATSUOKA, 2007). Conseqüentemente, maiores erros são esperados no posicionamento com GPS nessas épocas do ano e, por essa razão, foi escolhido, para comparação com o dia 29, afetado pela severa tempestade geomagnética, um dia dentro do mesmo mês, submetido às mesmas características de variação sazonal do TEC, mas sem influência de tempestade geomagnética: dia 11 de Outubro (atividade geomagnética calma).

Convém ressaltar também que, no posicionamento relativo, a observável normalmente utilizada é a dupla diferença de fase e/ou pseudodistância (MONICO, 2008), onde usualmente grande parte do erro sistemático devido à ionosfera pode ser eliminado, principalmente em linhas de base curtas, onde as observações GPS feitas pelas estações estão sob condições ionosféricas muito semelhantes, e o erro da ionosfera, que contamina as observáveis, é altamente correlacionado entre os receptores. No entanto, quando a linha de base é mais extensa, como as utilizadas neste estudo, a ionosfera pode exercer grande influência nos resultados do posicionamento relativo, principalmente considerando que o território brasileiro se caracteriza por altas variações espaciais

do TEC em determinados horários e períodos, fazendo com que a maior parte do erro da ionosfera não possa ser eliminado, afetando a acurácia do posicionamento relativo.

Estudos do TEC para o dia 11 e 29 de Outubro são apresentados em Batista *et al.* (2006) e Matsuoka, Camargo e Batista (2008), e permitem verificar a presença da AEI aumentando o gradiente espacial do VTEC (TEC na direção vertical) no dia 29, principalmente na direção norte-sul e no período da tarde. Embora a AEI tenha sido observada no dia 11, ela se destacou especialmente no dia 29, com altos valores e gradientes espaciais de VTEC, principalmente após as 19 HL. Comparando os dois dias, os autores verificaram um aumento do TEC no período da tarde (por volta de 15-16 HL) no dia afetado pela tempestade geomagnética. Também observaram o aumento significativo do TEC na região da crista sul da AEI noturna, bem como o deslocamento dessa região de crista para regiões mais ao sul do país, o que mostra a intensificação do efeito fonte no dia da tempestade. Esse comportamento do TEC observado no dia 29 indica que um aumento do erro no posicionamento relativo deve ser esperado no resultado do processamento de linhas de base nesse período.

Diante dessas considerações, procedeu-se ao tratamento dos dados para este estudo: as linhas de base foram processadas utilizando o software GPSurvey 2.35a, considerando como fixas as coordenadas conhecidas das estações FORT, POAL e UEPP (coordenadas referenciadas ao sistema geodésico SIRGAS 2000). As posições para CRAT, SMAR e PARA foram estimadas a cada 2 horas no período compreendido entre 01 HL de 29 de Outubro de 2003 e 01 HL de 30 de Outubro de 2003, utilizando apenas os dados da portadora L1 (fase e código), ou seja, simulando-se que os receptores fossem de uma frequência e, portanto, altamente influenciados pela ionosfera.

No processamento foram utilizadas efemérides transmitidas e máscara de elevação de 15°, não se aplicando nenhum modelo ionosférico, mas utilizando o modelo de Hopfield para correção do efeito da troposfera. As linhas de base também foram processadas, nas mesmas condições, para o período compreendido entre 01 HL de 11 de Outubro de 2003 e 01 HL de 12 de Outubro de 2003, período classificado como geomagneticamente calmo. As coordenadas

estimadas no posicionamento relativo das estações CRAT, PARA e SMAR foram comparadas com as consideradas verdadeiras (coordenadas oficiais do IBGE, referenciadas ao sistema geodésico SIRGAS 2000), obtendo-se assim, o erro posicional (discrepância) a cada 2 horas para todos os dias do estudo.

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam as discrepâncias obtidas em planimetria (**Plan**) e altitude geométrica (**Altim**), a cada 2 horas (HL – 51° W) para as estações utilizadas neste estudo. Também apresentam o aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro, em relação ao dia 11 de Outubro, em termos percentuais. Nesse sentido, valores positivos significam um aumento das discrepâncias e valores negativos uma redução das discrepâncias.

As figuras 4, 5 e 6 apresentam as discrepâncias plotadas em gráficos.

A análise geral das tabelas 1 a 3 e dos gráficos nas figuras 4 a 6 permite observar que o comportamento das discrepâncias é bastante semelhante durante a maior parte dos dias 11 e 29. Até por volta de 15 HL, as discrepâncias ficam abaixo de 3 m em ambos os dias (lembrando que

Tabela 1. Discrepâncias na estação CRAT.

HL	Discrepâncias 11/out/03		Discrepâncias 29/out/03		Aumento das Discrepâncias Dia 29	
	Plan (m)	Altim (m)	Plan (m)	Altim (m)	Plan (%)	Altim (%)
01-03	2,38	4,49	1,52	0,99	-36	-78
03-05	0,6	0,9	0,57	1,23	-5	37
05-07	0,83	0,81	1,56	0,19	89	-76
07-09	1,77	0,11	13,51	2,7	663	2345
09-11	1,17	0,51	4,87	2,37	318	369
11-13	2,22	2,11	1,23	1,62	-45	-23
13-15	1,43	2,07	1,35	0,73	-5	-65
15-17	0,8	1,21	2,96	4,87	272	301
17-19	6,56	6,5	3,18	3,22	-52	-51
19-21	4,61	11,34	10,96	4,55	138	-60
21-23	5,2	0,07	4,18	1,97	-20	2620
23-01	4,5	15,58	2,29	4,23	-49	-73

Tabela 2. Discrepâncias na estação SMAR.

HL	Discrepâncias 11/out/03		Discrepâncias 29/out/03		Aumento das Discrepâncias Dia 29	
	Plan (m)	Altim (m)	Plan (m)	Altim (m)	Plan (%)	Altim (%)
01-03	0,13	0,17	0,31	0,29	134	68
03-05	0,04	0,19	1,49	1,29	3933	572
05-07	0,98	0,62	1,07	0,9	10	44
07-09	0,16	0,67	0,04	0,29	-78	-56
09-11	0,67	0,32	0,98	0,25	45	-23
11-13	0,74	0,59	1,24	0,64	68	9
13-15	0,41	0,33	2,42	2,7	484	707
15-17	0,54	0,04	2,51	0,37	362	877
17-19	0,91	8,93	15,3	10,96	1573	23
19-21	2,64	1,85	4,02	1,46	52	-21
21-23	1,1	0,31	5,75	1,1	423	253
23-01	0,24	1,08	5	9,49	2016	775

Tabela 3. Discrepâncias na estação PARA.

HL	Discrepâncias 11/out/03		Discrepâncias 29/out/03		Aumento das Discrepâncias Dia 29	
	Plan (m)	Altim (m)	Plan (m)	Altim (m)	Plan (%)	Altim (%)
01-03	1,09	2,16	0,46	2,56	-58	18
03-05	0,86	0,12	1,16	1,02	34	744
05-07	0,47	0,85	1,95	1,32	315	56
07-09	0,6	0,11	0,35	0,59	-42	414
09-11	1,35	0,71	1,84	0,67	37	-6
11-13	1,38	1,34	0,45	0,98	-68	-27
13-15	1,97	0,39	1,11	0,67	-43	74
15-17	2,41	0,57	2,33	16,76	-3	2857
17-19	7,23	10,77	21,95	41,61	204	286
19-21	13,82	11,09	17,1	30,13	24	172
21-23	2,16	5,51	25,48	17,88	1078	225
23-01	4,67	16,74	13,12	1,77	181	-89

são linhas de base longas e que foram utilizadas apenas as observáveis da portadora L1) para todas as linhas de base. É somente a partir desse horário que aumentam os valores das discrepâncias, assim como as diferenças entre os dois dias (com exceção da estação CRAT, entre 07 e 09 HL do dia 29 de Outubro, que será abordada posteriormente). Considerando que o mês de Outubro já é bastante perturbado ionosfericamente, que as linhas de base são longas (entre 250 e 450 km), e que o processamento foi realizado utilizando apenas os dados da portadora L1 (fase e código), esse comportamento similar dos resultados entre boa parte dos dois dias, bem como o aumento das discrepâncias no final do dia, com amplitude maior no dia 29, reforça a relação entre os erros no posicionamento relativo e a variação espacial do TEC entre as estações das linhas de base. Retomando a análise do TEC em Matsuoka, Camargo e Batista (2008), verifica-se que o aumento das variações espaciais e dos valores do TEC começou a ocorrer em ambos os dias no período da tarde, por volta de 15-16 HL; percebe-se também que há uma intensificação da AEI no dia 29, principalmente no final do dia (AEI noturna). Ou seja, há um aumento das variações espaciais na região brasileira, o que concorda tanto com o aumento das discrepâncias a partir das 15 HL em ambos os dias, quanto com o aumento percentual médio em todas as linhas de base (123% em planimetria e 57% em altitude geométrica), que é encontrado no dia 29 (tempestade) em relação ao dia 11, geomagneticamente calmo.

Particularizando a análise para os resultados do processamento no dia 29, uma primeira e importante observação é apresentada: no horário da chegada da CME à Terra e início da tempestade geomagnética (aproximadamente 03:11 HL do dia

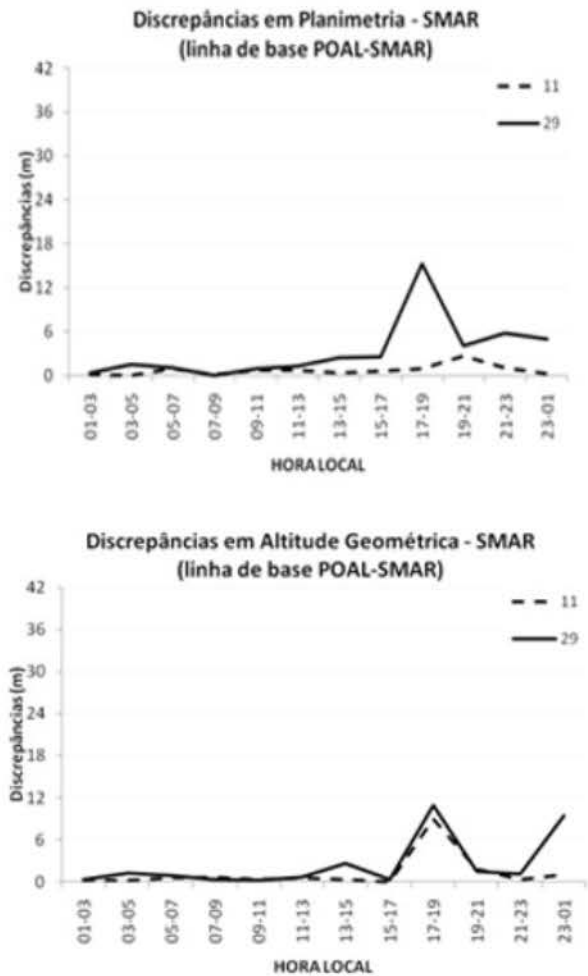


Fig. 4 – Discrepâncias em planimetria e altitude geométrica para a estação CRAT. 11 e 29 de Outubro de 2003

29) não há nenhum aumento significativo nas discrepâncias nas linhas de base processadas nessas primeiras horas. Embora esse dado pareça contraditório, ele pode ser explicado considerando que, nesse horário, é madrugada sobre o território brasileiro, ou seja, a densidade de elétrons na ionosfera é muito baixa. Assim, mesmo que as alterações no campo magnético da Terra, devido à chegada da CME, estejam iniciando uma severa tempestade ionosférica, seus efeitos só deverão começar a serem sentidos de forma significativa sobre o território brasileiro com o início da atividade solar diária e aumento do TEC na ionosfera, que acontece de forma suave até o período da tarde, com a primeira formação da AEI.

Esse aumento gradual do TEC até o período da tarde é acompanhado pelo aumento suave das discrepâncias em todas as linhas de base nos dias do estudo, com exceção da linha de base FORT-

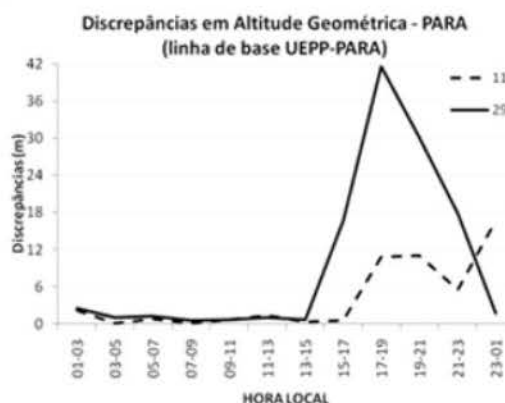
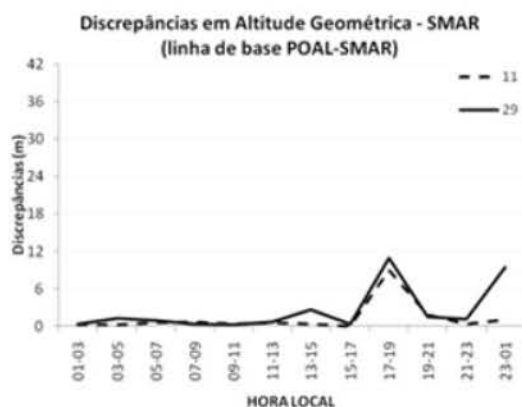
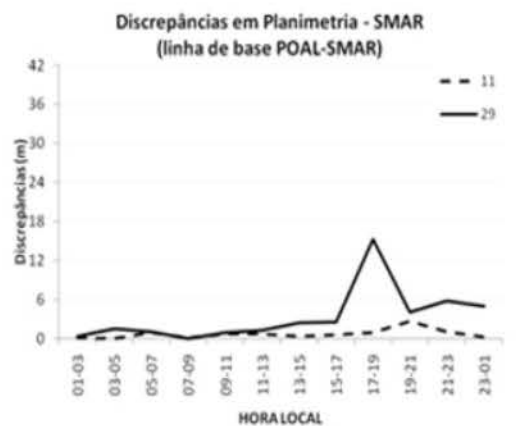


Fig. 5 – Discrepâncias em planimetria e altitude geométrica para a estação SMAR 11 e 29 de Outubro de 2003

Fig. 6 – Discrepâncias em planimetria e altitude geométrica para a estação PARA. 11 e 29 de Outubro de 2003

CRAT no dia 29 que, como pode ser verificado na figura 4, apresenta um pico anômalo nas discrepâncias da componente planimétrica entre 07 e 09 HL. Esse comportamento pode ter relação com um estudo realizado por Batista *et al.* (2006), que relata que a análise de dados de digissondas (equipamento utilizado para medir parâmetros ionosféricos) localizadas na região do equador geomagnético e nas cristas da AEI, revelaram um aumento do TEC na região brasileira durante as primeiras horas da manhã do dia 29, o que não é comum acontecer nesse horário. Nesse sentido, Abdu (1991) afirma que o desenvolvimento da AEI pode sofrer drásticas modificações em períodos geomagneticamente perturbados, sendo uma dessas modificações a sua formação em horários em que não é usual a sua presença. Esse aumento do TEC nas primeiras horas da manhã do dia 29 pode ter causado um aumento na variação espacial

do TEC entre as estações FORT e CRAT, fazendo com que boa parte do erro devido à ionosfera não tenha sido cancelado, mesmo com o processamento relativo. Isso representa uma possível explicação para esse aumento não usual das discrepâncias planimétricas no início da manhã na linha de base FORT-CRAT. Fato curioso é que o mesmo aumento não foi significativo na componente altimétrica.

Como comentado anteriormente, é a partir das 15 HL que começam a ocorrer as maiores diferenças entre os resultados dos dois dias. No entanto, as discrepâncias encontradas nos resultados das linhas de base no final da tarde do dia 29 apresentam algumas particularidades interessantes. Por exemplo, verifica-se que, no final da noite do dia 29, os valores de discrepância da linha de base FORT-CRAT são menores que os encontrados no dia 11 (tabela 1). Na linha de base UEPP-PARA (tabela 3), verifica-se um aumento percentual

acentuado das discrepâncias no início da noite, em relação ao dia 11, principalmente na componente altimétrica (figura 6); efetivamente, é nessa linha de base que os mais altos valores de discrepâncias são encontrados no dia 29. Contudo, no final da noite, as discrepâncias diminuem, chegando, no início da madrugada (entre 23 e 01 HL), a ficar menores (componente altimétrica) que as encontradas para o dia 11. Por sua vez, a linha de base POAL-SMAR (tabela 2), que tem os melhores resultados no dia calmo, apresenta um aumento significativo das discrepâncias no final da noite e início da madrugada do dia da tempestade.

Para explicar os possíveis motivos para os comportamentos descritos anteriormente, verificados no final do dia 29, é preciso retomar o comportamento da AEI no dia da tempestade. Matsuoka, Camargo e Batista (2008), analisando os mapas de TEC (produzidos com os dados GPS de estações RBMC e da rede IGS) e os dados de digissonda para o dia 29, relatam que, no período da tarde, ocorreu um aumento do TEC nas regiões próximas ao equador geomagnético, onde está localizada a linha de base FORT-CRAT. Mais tarde, por volta das 19:30 HL, foi observada uma intensificação da deriva vertical do plasma ionosférico na região equatorial e, em consequência do efeito fonte intensificado, ocorreu um deslocamento de elétrons para regiões ainda mais afastadas do equador, ou seja, as cristas da AEI noturna foram deslocadas para regiões mais ao sul do equador geomagnético. Ressaltam também que, por ter havido essa intensificação de elétrons no equador geomagnético à tarde, espera-se que a densidade de elétrons nas regiões de cristas da AEI após as 16 HL seja ainda maior.

Essa intensificação do efeito fonte no início da noite do dia 29 é uma possível explicação para a redução das discrepâncias (em relação ao dia 11) no final da noite na linha de base FORT-CRAT. Com a intensificação do efeito fonte, há uma redução da densidade de elétrons em uma região maior no entorno do equador geomagnético e, possivelmente, uma redução da variação espacial do TEC entre as estações FORT e CRAT, fazendo com que os resultados do posicionamento relativo sejam melhores nesse período no dia da tempestade. A intensificação do deslocamento de elétrons para as regiões de cristas da AEI, onde se encontra a linha de base UEPP-PARA, também explica o aumento

das discrepâncias nessa linha de base no início da noite, quando é possível observar a passagem da crista sul intensificada da AEI na região (MATSUOKA, CAMARGO e BATISTA, 2008) causando um aumento da variação espacial do TEC. Possivelmente nesse período, as estações UEPP e PARA coletaram observações tanto de sinais GPS que atravessaram regiões de alta densidade de elétrons, como também de sinais que atravessaram regiões de baixa densidade de elétrons, diminuindo assim a compensação dos erros no processamento das duplas diferenças. O deslocamento da crista da AEI noturna para regiões mais ao sul do equador geomagnético no final da noite e início da madrugada do dia da tempestade, além de ser o possível motivo para as discrepâncias diminuírem em UEPP-PARA no início da madrugada, também é o possível motivo para o aumento das discrepâncias no mesmo período na linha de base POAL-SMAR.

Confrontando os gráficos das figuras 4 a 6, uma última observação pode ser feita: ao contrário do que pode ser verificado com bastante clareza em resultados de estudos com posicionamento por ponto e, embora com menos intensidade, em resultados de estudos com posicionamento relativo (SALOMONI, 2008) em dias não perturbados por tempestades geomagnéticas, o resultado do posicionamento relativo em dia afetado por tempestades geomagnéticas severas, como é o caso deste estudo, mostra uma maior mudança do erro devido à ionosfera na planimetria, em relação à altitude geométrica. Ou seja, nos resultados do dia 29, exceto pela linha de base UEPP-PARA, as discrepâncias na componente planimétrica foram, em média, maiores do que as discrepâncias da componente altimétrica. Esses resultados indicam que, embora a planimetria tenha baixa correlação com o erro devido à ionosfera, em períodos de severas tempestades geomagnéticas ela também pode ser bastante afetada.

Na análise dos resultados é preciso considerar que o dia 29 de Outubro de 2003 pertence a um dos períodos mais perturbados do Ciclo Solar 23, que a grande explosão solar ocorrida no dia anterior já havia produzido alterações significativas na densidade de elétrons da ionosfera e no posicionamento por ponto com GPS (MATSUOKA, CAMARGO e BATISTA, 2006), e que a CME que desencadeou a tempestade do

dia 29 foi sucedida, pouco mais de 24 horas depois, por outra CME que desencadeou uma nova tempestade geomagnética na Terra ainda na fase de recuperação da tempestade do dia 29 (SALOMONI, 2008). Há que se considerar ainda que o comportamento da ionosfera estava muito fora dos padrões habituais, mesmo para um período de alta atividade solar, fato que teve grande influência nestes resultados não convencionais encontrados para o posicionamento com GPS, tanto no posicionamento por ponto (MATSUOKA, CAMARGO E BATISTA, 2008), quanto no posicionamento relativo.

3 CONCLUSÕES

De maneira geral, os resultados deste estudo permitiram verificar a relação direta do aumento das variações espaciais e dos valores de TEC com o aumento dos erros no posicionamento relativo com GPS. Até o início da tarde, enquanto a densidade de elétrons ainda era baixa, baixos valores de discrepâncias e resultados semelhantes foram encontrados nos dois dias estudados. Mesmo no horário de início da tempestade geomagnética, na madrugada do dia 29, não houve nenhum aumento significativo nas discrepâncias. No entanto, a partir do início da tarde, quando ocorre o aumento dos valores e da variação espacial do TEC em razão da primeira formação da AEI sobre o território brasileiro, as discrepâncias começaram a aumentar em todas as linhas de base. No dia da tempestade, em especial, constatou-se um aumento percentual médio de 123% em planimetria e de 57% em altitude geométrica nas discrepâncias das linhas de base, em relação ao dia calmo, reforçando a influência do aumento da variação espacial do TEC entre as estações das linhas de base.

Resultados do dia da tempestade, por sua vez, apontaram para uma estreita relação com a intensificação da AEI noturna, estudada por Matsuoka, Camargo e Batista (2008), que verificaram um aumento do TEC nas regiões próximas ao equador geomagnético no período da tarde do dia 29 e, mais tarde, por volta das 19:30 HL, um efeito fonte intensificado, com deslocamento de elétrons e da crista sul da AEI para regiões mais afastadas do equador. Essa intensificação do efeito fonte é uma possível explicação para os resultados deste estudo pois, comparando-se com os resultados do dia 11, observou-se uma melhora dos

resultados na linha de base FORT-CRAT no final do dia 29, assim como um aumento das discrepâncias em UEPP-PARA no início da noite. O deslocamento intensificado da crista sul da AEI para regiões ainda mais afastadas do equador, por volta das 19:30 HL por sua vez, é o possível motivo para a melhora nas discrepâncias em UEPP-PARA e a piora das discrepâncias em POAL-SMAR no final da noite e início da madrugada do dia 29, com a chegada da crista sul da AEI noturna no Rio Grande do Sul.

Finalizando, os resultados deste estudo demonstraram também que houve uma maior influência do erro devido à ionosfera na componente planimétrica, em relação à componente altimétrica, demonstrando que, embora, normalmente, a planimetria tenha baixa correlação com o erro devido à ionosfera, em períodos de severas tempestades geomagnéticas ela também pode ser bastante afetada. Considerando que o dia 29 de Outubro de 2003 pertence a um dos períodos mais perturbados do Ciclo Solar 23, e que a CME que iniciou a tempestade foi antecedida por uma grande explosão solar, há que se considerar que o estado da ionosfera estava muito fora dos padrões habituais, o que, sem dúvida, contribuiu para esses resultados não convencionais no posicionamento relativo.

É preciso destacar ainda a complexidade dos conhecimentos envolvidos no estudo da influência do clima espacial em sistemas de posicionamento por satélite (GNSS), o que evidencia a importância da continuidade de pesquisas nesse assunto, especialmente no Brasil, onde a ionosfera exerce maior influência.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece à FAPERGS (ARD/2009/Proc. n° 0901842) e ao CNPq (Edital Universal/Proc.481339/2010-8) pelo auxílio financeiro, bem como ao CNPq pela Bolsa Produtividade de Pesquisa (Proc. n° 307472/2009-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an overview. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 53, p. 757-771, 1991.

- ACE. **ACE lists of disturbances and transients**. 2008. Disponível em: <http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/acelists/obs_list.html#2003>. Acesso em: Maio, 2008.
- 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, 2006.
- ECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; ESPINOZA, E. S.; PILLAT, V. G.; LIMA, W. L. C.; BASU, SU.; BASU, SA.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MACKENZIE, E. M.; PI, X.; BITTENCOURT, J. A. The ionospheric response in the brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003. **Annales Geophysicae**, v. 25, p. 863-873, 2007.
- DAL POZ, W. R. **Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.
- FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS**. 2003. 256 f. Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- GOODMAN, J. M. **Space weather & telecommunications**. New York: Springer, 2005. 388 p. (The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, v. 782).
- GOPALSWAMY, N.; BARBIERI, L.; CLIVER, E. W.; LU, G.; PLUNKETT, S. P.; SKOUG, R. M. Introduction to violent Sun-Earth connection events of October-November 2003. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. 9-14. 2005.
- HATHAWAY, D. H. **Coronal Mass Ejections**. 2007. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml>>. Acesso em: Maio, 2008.
- KIRCHHOFF, W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. 1. ed. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149 p.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 435 p.
- LIU, Y.; HAYASHI, K. The 2003 October-November fast Halo Coronal Mass Ejections and the large-scale magnetic field structures. **The Astrophysical Journal**, n. 640, p. 1135-1141, 2006.
- MANNUCCI, A. J., TSURUTANI, B. T.; IJIMA, B.A.; KOMJATHY, A.; SAITO, A.; GONZALEZ, W. D.; GUARNIERI, F. L.; KOZYRA, J. U.; SKOUG, R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October-29-30, 2003 “Halloween Storms”. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.
- MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.
- 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**, v. 56, n. 56/01, 2004.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. 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. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, p. 315-334, 2006.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. **Revista Pesquisa em Geociências**, v. 35, p. 3-19, 2008.
- McNAMARA, L. F. **The Ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237 p.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: UNESP, 2008. 480 p.

- OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.
- RODRIGUES, F. S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS**. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- SALOMONI, C. S. **GPS e Ionosfera: Estudo do comportamento do TEC e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar**. 2008. 166 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SKONE, S.; YOUSUF, R.; COSTER, A. **Performance evaluation of the Wide Area augmentation system for ionospheric storm events**. *Journal of Global Positioning Systems*, v. 3, n. 1-2, p. 251-258, 2004.
- SKOUG, R.; GOSLING, J. T.; STEINBERG, J. T.; MCCOMAS, D. J.; SMITH, C. W.; NESS, N. F.; HU, Q.; BURLAGA, L. F. Extremely high speed solar wind: October 29-30, 2003. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, A09102, 2004.
- SUGIURA, M.; KAMEI, T. **Índice Dst**. 2000. Disponível em: <<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/dst2/onDstindex.html>>. Acesso em: Setembro, 2007.
- TSURUTANI, B. T.; JUDGE, D. L.; GUARNIERI, F. L.; GANGOPADHYAY, P.; JONES, A. R.; NUTTALL, J.; ZAMBON, G. A.; DIDKOVSKY, L.; MANNUCCI, A. J.; IJIMA, B.; MEIER, R. R.; IMMEL, T. J.; WOODS, T. N. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L03S09, 2005.
- TSURUTANI, B. T.; GONZALES, W. D. **The interplanetary causes of magnetic storms: a review**. 1996. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2014/25038>>. Acesso em: Maio, 2008.
- WEBB, D. P. **Coronal mass ejections: the key to major interplanetary and geomagnetic disturbances**. 1995. Disponível em: <<http://www.agu.org/revgeophys/webb01/webb01.html>>. Acesso em: Outubro, 2007.