

PERÍODO DE MÍNIMA ATIVIDADE SOLAR: MELHORA NO DESEMPENHO DO POSICIONAMENTO RELATIVO

Minimum Solar Activity Period: Performance Improvement of the Relative Positioning

WILLIAM RODRIGO DAL POZ¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR¹

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Depto de Cartografia
¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP
{dalpoz, rodrigues.aguiar}@gmail.com; paulo@fct.unesp.br

RESUMO

No posicionamento relativo, mesmo considerando que a dupla diferença das observáveis GPS elimina parte dos erros devido à ionosfera, intensos efeitos ionosféricos podem ocorrer no período de máxima atividade solar. No entanto, no período de mínima atividade, os efeitos ionosféricos se tornam mínimos, fazendo com que ocorra uma melhora significativa no desempenho do posicionamento relativo. Visando quantificar esta melhora para a comunidade científica e usuária do GPS, foram realizados experimentos com dados GPS de duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, formando uma linha de base de 430 km. O processamento foi realizado com intervalo de duas horas, abrangendo o período de 24 horas e somente dados da portadora L1 foram utilizados. A análise dos resultados foi realizada a partir das discrepâncias das coordenadas consideradas verdadeiras com as estimadas no processamento. No período de máxima atividade solar, as discrepâncias planimétricas e altimétricas chegaram a atingir 25 m. No entanto, no período de mínima atividade o valor máximo foi de 5,5 m. Vale salientar que, na maioria dos casos, os erros não ultrapassaram 0,50 m, sendo que algumas vezes foi de apenas 0,10 m. Isto evidencia o aumento da possibilidade de aplicações do posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência em períodos de mínima atividade solar.

Palavras chaves: Ionosfera; TEC; GPS; Posicionamento Relativo.

ABSTRACT

In the relative positioning, even considering that part of the errors due to ionosphere is canceled with the double-difference observations, strong ionospheric effects can occur in maximum solar activity period. However, in minimum solar activity period, the ionospheric effects decrease significantly and therefore an improvement of the relative positioning performance takes place. In this paper we aim at showing that improvement for the scientific and GPS community users. So, have been experiments by using GPS data of two stations of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS, forming a baseline of 430 km. The processing were use accomplished with interval of two hours, and only L1 carrier data have been used. The analysis of the obtained results has been carried out from the discrepancies between the “true” coordinates and corresponding ones obtained in the processing. In maximum solar activity period the discrepancy value reached 25 m. On the other hand, in minimum solar activity period, the discrepancy value reached 5,5 m. It is important to emphasize that the majority of the discrepancy values didn't exceed 0,50 m, and in some cases only reached 0,10 m. This shows the increase of application possibilities of the relative positioning using single-frequency GPS receivers in minimum solar activity period.

Key words: Ionosphere; TEC; GPS; Relative Positioning.

1. INTRODUÇÃO

Principalmente no período de máxima atividade solar (MAAS), uma das maiores fontes de erro no posicionamento com GPS é a ionosfera. Isto se torna mais problemático para usuários de receptores GPS de uma frequência, visto que com este tipo de receptor não se pode eliminar efeitos de primeira ordem da ionosfera por meio de combinações lineares das observáveis GPS obtidas nas duas portadoras (L_1 e L_2). O efeito da ionosfera nos sinais GPS é proporcional à densidade de elétrons da ionosfera. No entanto, como na prática é difícil de obter a densidade de elétrons, se obtém o Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), que é o principal parâmetro utilizado para descrever a atividade ionosférica. O TEC é a integral da densidade de elétrons ao longo do caminho do sinal entre o satélite e a antena receptora, e representa o número de elétrons livres numa coluna de base unitária (1 m^2) (LEICK, 1995).

Os efeitos da ionosfera são mais intensos no posicionamento por ponto. No entanto, mesmo considerando que no posicionamento relativo a dupla diferença das observáveis GPS elimina parte dos erros devido à ionosfera, fortes efeitos ionosféricos podem ser observados nos resultados obtidos, comprometendo de forma significativa a acurácia dos resultados (DAL POZ, 2005). Até mesmo com a utilização de receptores de dupla frequência pode-se observar efeitos significativos no posicionamento relativo, em períodos de MAAS, devido à altos gradientes do TEC (WANNINGER, SEEBER e CAMPOS, 1991). Em contrapartida, no período de mínima atividade solar

(MIAS), os efeitos da ionosfera se tornam mínimos, visto que neste período a densidade de elétrons é reduzida significativamente.

O principal objetivo desta pesquisa é mostrar para a comunidade científica e usuária do GPS a melhora do posicionamento relativo no período de MIAS, que compreendeu os anos 2006-2007. Atualmente o Sol está no ciclo 24, e há fortes indícios que este ciclo teve início no dia 31 de julho de 2006 (NASA, 2007a). O último mínimo solar ocorreu aproximadamente entre os anos de 1996 a 1997. Na época não havia estudos sistemáticos sobre os efeitos da ionosfera no posicionamento com GPS. Os vários estudos que ocorreram no Brasil dizem respeito ao período de ascensão da ionosfera e, principalmente, no período de MAAS do ciclo 23 (2000-2001). Desta forma, atualmente se trata de um momento oportuno para realizar estudos dos efeitos da ionosfera no posicionamento relativo, e mostrar a melhora significativa que ocorre no posicionamento relativo no período de MIAS.

2. IONOSFERA E SEU IMPACTO NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS

A ionosfera é definida como sendo a parte da atmosfera superior onde pode existir ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). É caracterizada pela formação de elétrons e íons e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura. Os íons e elétrons livres presentes na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização, que retira os elétrons de elementos neutros da alta atmosfera, fazendo com que eles fiquem livres. Conseqüentemente são também criados os íons, que consistem de cargas positivas, visto que elétrons (carga negativa) foram retirados do elemento inicialmente neutro. A energia responsável por todo esse processo se concentra na faixa do extremo ultravioleta (MCNAMARA, 1991).

Vários são os efeitos que a ionosfera pode causar nos sinais GPS, sendo que os principais deles são: avanço da fase, atraso do código e cintilação da amplitude e da fase (KLOBUCHAR, 1996). Os erros relacionados com o avanço da fase e atraso do código, ao longo da direção satélite (s) e antena receptora (r) são dados em função do TEC e da frequência do sinal (f), da seguinte forma (LEICK, 1995):

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

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

De acordo com as expressões (1) e (2) pode-se verificar que os erros devido à ionosfera para a fase e código são de mesma magnitude, porém, de sinais opostos. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m^2), sendo que 1 TEC equivale a $10^{16} \text{el}/\text{m}^2$.

A aproximação na obtenção do índice de refração, a partir do qual se obtém as expressões (1) e (2), faz com que estes representem os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Efeitos de segunda e terceira ordem também podem ser modelados. Os efeitos de segunda ordem além de depender do TEC e da frequência do sinal, dependem da indução geomagnética e da direção da propagação do sinal em relação ao vetor indução geomagnética. Já os efeitos de terceira ordem da ionosfera independem da indução geomagnética. Seus efeitos dependem do TEC, da frequência do sinal e de uma função dada pela densidade máxima de elétrons (ODIJK, 2002). Cintilações também podem causar fortes efeitos nos sinais GPS, e seus efeitos podem ser aumentados devido à ocorrência de bolhas de plasma. A anomalia equatorial também pode se tornar uma fonte de intensos efeitos de cintilação.

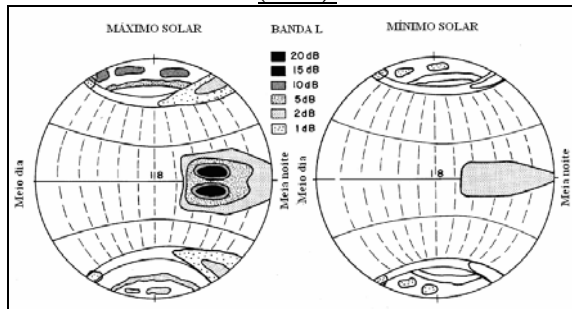
2.1. Cintilação Ionosférica, Bolhas de Plasma e Anomalia Equatorial

Cintilações ionosféricas são rápidas flutuações da fase e amplitude de sinais de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e pode causar um enfraquecimento do sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal (WEBSTER, 1993).

Enfraquecimento na amplitude do sinal, ou cintilação de amplitude do sinal recebido, ocorre devido à irregularidades na densidade de elétrons na ordem de centenas de metros à quilômetros, enquanto que, rápidas mudanças em fase do sinal, que caracteriza a cintilação de fase, ocorrem basicamente devido à rápidas e muito pequenas variações na densidade de elétrons (KLOBUCHAR, 1996). A figura 01 mostra a morfologia global da ocorrência das cintilações em sinais da banda L durante anos de MAAS e MIAS.

De acordo com a figura 01 podem-se verificar vários aspectos com relação à cintilação. É notado claramente que no período de MIAS seus efeitos são minimizados de forma significativa. Percebe-se também que na região equatorial e de altas latitudes ocorrem os maiores efeitos de cintilação, no entanto, na região equatorial, no qual se localiza o Brasil, os efeitos são maiores ainda. Por exemplo, nesta região pode ocorrer um enfraquecimento da ordem de 20 dB, em períodos de MAAS.

Figura 01 – Morfologia global da ocorrência de cintilação em sinais da banda L durante anos de MAAS e MIAS. Fonte: BASU et al. 1988 apud DAVIES. (1990).



A causa da ocorrência de cintilação nas regiões equatorial e de altas latitudes é distinta. Na região de altas latitudes ocorre cintilação basicamente devido à ocorrência de sub-tempestades geomagnéticas, enquanto que a ocorrência de cintilação na região equatorial está mais relacionada com a anomalia equatorial e com ocorrência de bolhas ionosféricas (SKONE, 1998). Na região de médias latitudes a ocorrência de cintilação é extremamente rara (ODIJK, 2002).

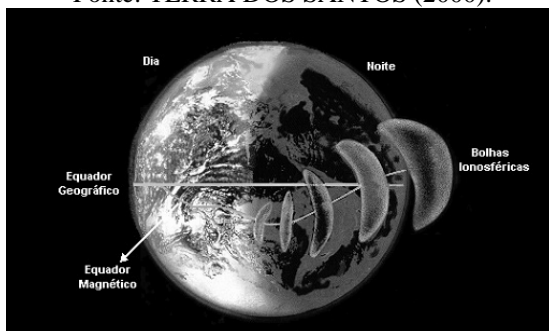
Uma característica da ionosfera equatorial é a anomalia equatorial ou anomalia de Appleton. Esta anomalia consiste de dois picos de ionização, localizados aproximadamente a 15 graus dos dois lados do equador geomagnético (APPLETON, 1946). A anomalia equatorial começa a se desenvolver próximo das 09:00 – 10:00 HL, e atinge seu máximo desenvolvimento às 14:00 – 15:00 HL. Em períodos de MAAS, entretanto, a anomalia pode atingir um segundo pico próximo das 21:00 HL, com isso, pode aumentar a ocorrência de bolhas ionosféricas, resultando em aumento da ocorrência da cintilação ionosférica (BATISTA, 2003).

Irregularidades do *Spread F* equatorial são caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Como já mencionado, essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais de navegação, tais como GPS (SAHAI, FAGUNDES e BITTENCOURT, 2000).

De acordo com Santana et al. 1999 apud Soares, 2001, as bolhas ionosféricas são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida. Estendem-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético, alcançando extensões de 10000 km e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular se estabelecendo na alta ionosfera. Ocorrem sempre após o por do Sol e principalmente no período noturno até a

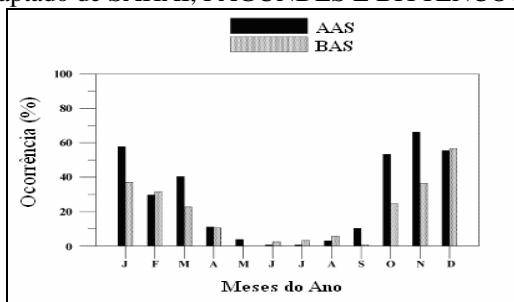
meia noite. A figura 02 mostra um esquema didático da evolução temporal e espacial das bolhas.

Figura 02 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.
Fonte: TERRA DOS SANTOS (2000).



De acordo com a figura 02 pode-se verificar que as bolhas passam sobre o Brasil. A figura 03 mostra a variação sazonal da ocorrência das bolhas de plasma, observadas durante alta atividade solar (AAS) e baixa atividade solar (BAS), em Cachoeira Paulista, Brasil.

Figura 03 – Variação sazonal da ocorrência das bolhas de plasma.
Fonte: Adaptado de SAHAI, FAGUNDES E BITTENCOURT (2000).



De acordo com a figura 03, pode-se observar que as bolhas ionosféricas geralmente ocorrem com maior frequência entre os meses de outubro a março e variam de características com o ciclo de atividade solar cujo período é de aproximadamente 11 anos, no qual é caracterizado pelo número de manchas solares (*sunspot number*). Vale salientar que as manchas solares, que caracterizam os ciclos solares de 11 anos, são um dos principais fatores que influenciam na atividade ionosférica. Por exemplo, no período de MAAS, na qual o número de manchas solares atinge seu máximo, aumenta a ocorrência

de irregularidades e anomalias, tais como a cintilação ionosférica, bolhas ionosféricas e a intensidade da anomalia equatorial.

2.2. Manchas Solares

Com certeza, um dos maiores fatores que influencia na variação na densidade de elétrons é o número de manchas solares, que caracteriza o ciclo solar. O ciclo solar exerce forte influência na variação da densidade de elétrons, visto que, no período de pico da atividade solar de cada ciclo, vários fenômenos são acentuados, tais como: anomalia equatorial, efeitos de cintilação, a magnitude do TEC ao longo do dia e do ano, dentre outros fatores.

As manchas solares foram primeiramente observadas por Theophrastus por volta de 325 AC. Trata-se de um dos fenômenos mais notável que ocorre na superfície solar (DAVIES, 1990). Elas são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. São rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta, e assim, são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperatura em torno de 3800 graus Kelvin, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. As manchas solares tendem a se formar em grupos, e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000).

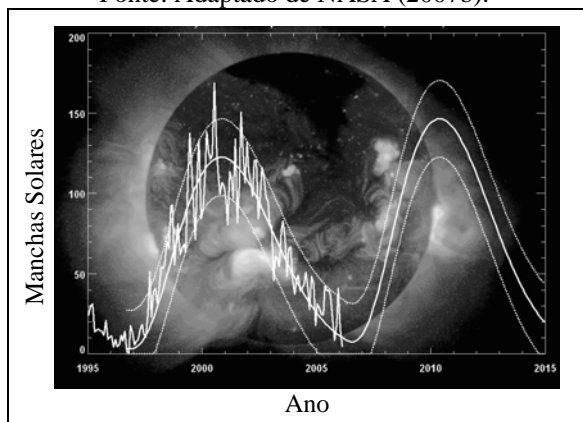
Uma característica muito importante das manchas solares é a sua variação ao longo de um período de aproximadamente 11 anos. Em suma, no início de um ciclo o número de manchas é mínimo (período de MIAS), e, a partir de então, no decorrer dos anos, o número de manchas aumenta (período de ascensão) até atingir um pico, que é conhecido como período de MAAS. A partir de então, o número de manchas começa a diminuir, caracterizando o período de declínio do número de manchas solares.

Vale salientar que o estudo científico das manchas começou com o uso do telescópio, sendo observadas por Galileo e Thomas Harriot em 1610, e por Johannes e David Fabricius e por Christoph Sheiner em 1611 (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000). A partir de 1750 a contagem do número de manchas passou a ser dada pela média mensal. A partir de então, teve início a numeração dos ciclos, sendo que atualmente estamos no início do ciclo 24. A figura 04 mostra o ciclo 23 e uma predição do ciclo 24.

Pode-se verificar, de acordo com a figura 04, que o período de MAAS do ciclo solar 23 ocorreu aproximadamente entre os anos de 2000 e 2002, e o período de MIAS, de acordo com a predição, compreenderá os anos de 2006 até aproximadamente 2007. O valor do TEC é proporcional ao aumento da atividade solar, que é dado pelo aumento do número de manchas solares.

Figura 04 – Ciclo 23 e previsão do ciclo 24.

Fonte: Adaptado de NASA (2007b).



Assim, com o aumento do número de manchas, aumenta o erro devido à ionosfera, que é proporcional ao TEC. Em suma, no período de MIAS, valores do TEC são diminuídos consideravelmente, bem como a ocorrência de cintilação e bolhas ionosféricas e a intensidade da anomalia equatorial, fazendo com que os efeitos ionosféricos sejam consideravelmente reduzidos.

3. EXPERIMENTOS

3.1. Estratégia de Processamento

Neste trabalho foram utilizados dados GPS de duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sendo uma de Curitiba (PARA) e outra de Presidente Prudente (UEPP), atualmente designada de PPTE. Assim, no decorrer do texto será utilizada a sigla PPTE. A linha de base formada tem aproximadamente 430 km. No processamento as coordenadas da estação PPTE foram injucionadas como fixas, referenciadas ao SIRGAS 2000. Com o objetivo de analisar a melhora no posicionamento relativo no período de MIAS, primeiramente foram processados dados GPS no período de MAAS, referente ao ano de 2001, e comparadas com os resultados referentes ao período de MIAS, no qual foram utilizados dados GPS coletados no ano de 2006.

O processamento dos dados foi realizado a partir da dupla diferença do código (DDC) e da dupla diferença da fase (DDF), somente com as observáveis da portadora L1. Com isso foi possível realizar uma análise do desempenho das duas observáveis básicas do GPS nos períodos de MAAS e MIAS. As coordenadas estimadas referentes à estação PARA foram

comparadas com os valores das coordenadas consideradas “verdadeiras”, em SIRGAS 2000. A análise dos resultados foi realizada a partir da discrepância, ou seja, a diferença entre as coordenadas estimadas e as consideradas verdadeiras. Os dados GPS da RBMC foram processados com intervalo de duas horas, compreendendo o período de 24 h. Com isso, foi possível realizar uma análise diária dos efeitos da ionosfera. Além disso, os dados utilizados no processamento contemplam as quatro estações do ano (julho/inverno, janeiro/verão, abril/outono e outubro/primavera), nos períodos de MAAS e MIAS, o que possibilitou também realizar uma análise sazonal referente aos dois períodos. A tabela 01 mostra os dias escolhidos para processamento dos dados GPS nos períodos de MAAS e MIAS, bem como o número de manchas solares nos respectivos períodos.

Tabela 01- Dias escolhidos para processamento dos dados GPS e número de manchas solares referentes aos períodos de MAAS e MIAS.

Estação do ano	Período de MAAS		Período de MIAS	
	Dia do ano	Manchas solares	Dia do ano	Manchas solares
Verão	01/01/2001	153	08/01/2006	11
Outono	03/04/2001	223	01/04/2006	39
Julho	02/07/2001	108	01/07/2006	38
Primavera	05/10/2001	231	06/10/2006	27

De acordo com a tabela 01 verifica-se que a queda do número de manchas solares é extremamente significativa. As informações do número de manchas solares podem ser obtidas no seguinte endereço eletrônico: <http://www.spaceweather.com/index.cgi>. O software utilizado no processamento das linhas de base foi o GPSurvey versão 2.35a. No processamento foram utilizadas as efemérides transmitidas nas mensagens de navegação, devido ao fato de que na maioria das vezes o usuário utiliza este tipo de efemérides.

3.2 Resultados e Análises

As figuras 05 e 06 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias planimétricas e altimétricas, para o período de MAAS do ciclo 23, em 2001, obtidas nos processamentos realizados a partir da DDC e DDF.

Figura 05 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica.

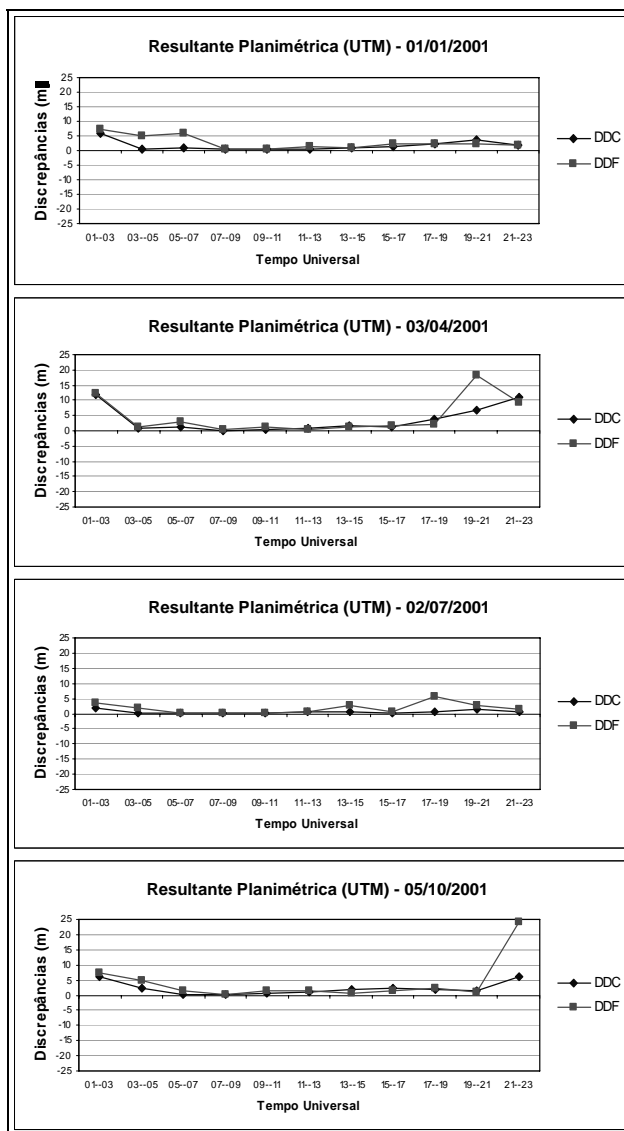
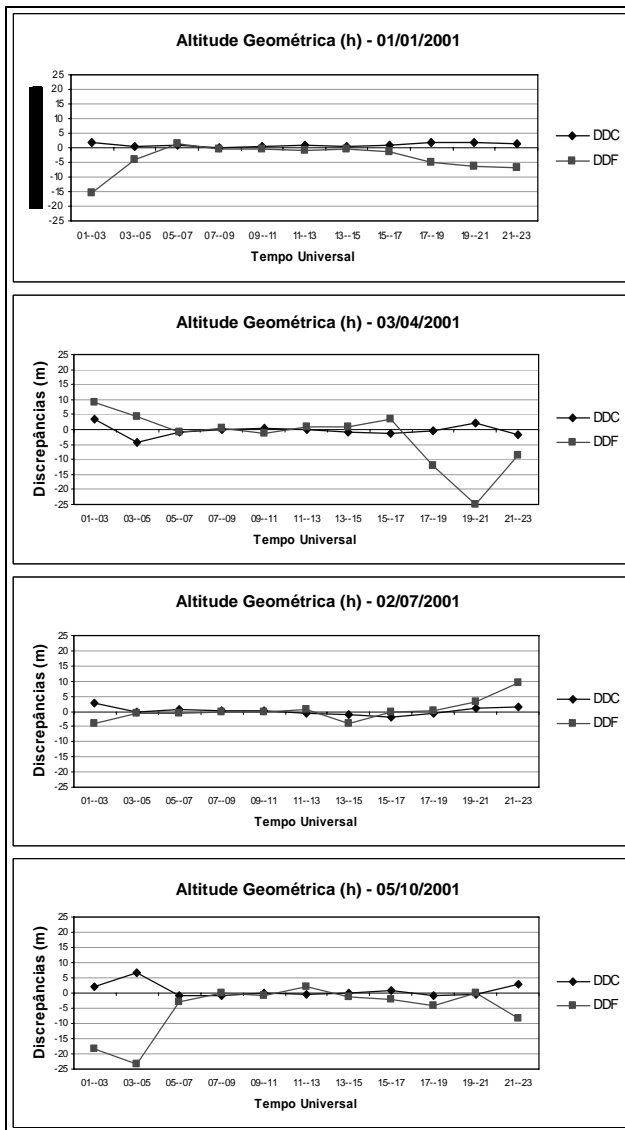


Figura 06 – Discrepâncias na Componente Altimétrica.



De acordo com os resultados obtidos pode-se verificar, de uma forma geral, que os efeitos da ionosfera são mais intensos na componente altimétrica, principalmente em períodos de irregularidades e anomalias (01 até 05 TU e 17 até 23 TU), que coincidem com ocorrência de bolhas ionosféricas e do segundo pico da anomalia equatorial, fazendo com que aumente a ocorrência de cintilação.

Nota-se também que o processamento realizado a partir da DDF se mostrou mais sensível aos efeitos da ionosfera do que com a DDC. Provavelmente, isto se deve ao fato da acurácia da observável fase da onda portadora ser dependente da ambigüidade, mesmo considerando que a precisão da medida de fase da onda portadora seja da ordem de 2 milímetros (portadora L1). Provavelmente a ambigüidade absorveu parte do resíduo ionosférico da dupla diferença, visto que a variação espacial do TEC é muito alta em períodos de MAAS. Mesmo considerando a alta precisão na medida da fase da onda portadora, sua acurácia é comprometida pela solução da ambigüidade.

Também se pode verificar a variação sazonal da ionosfera, principalmente em períodos de anomalias e irregularidades, sendo que a variação sazonal é mais acentuada em altimetria. Em períodos próximos do equinócio (abril e outubro), verificam-se os maiores efeitos da ionosfera, que caracteriza a variação sazonal da ionosfera.

Em suma, de acordo com os resultados obtidos, podem-se verificar claramente os intensos efeitos da ionosfera no posicionamento relativo, no qual em alguns casos, valores das discrepâncias atingiram aproximadamente 25 m, tanto na componente altimétrica como na resultante planimétrica. Vale salientar que mesmo considerando que parte dos efeitos da ionosfera é eliminada na dupla diferenciação das observáveis GPS, altos valores de discrepâncias foram observados.

As figuras 07 e 08 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias planimétricas e altimétricas, para o período de MIAS, em 2006, obtidas nos processamentos realizados a partir da DDC e DDF.

Figura 07 – Discrepâncias na Resultante Planimétrica.

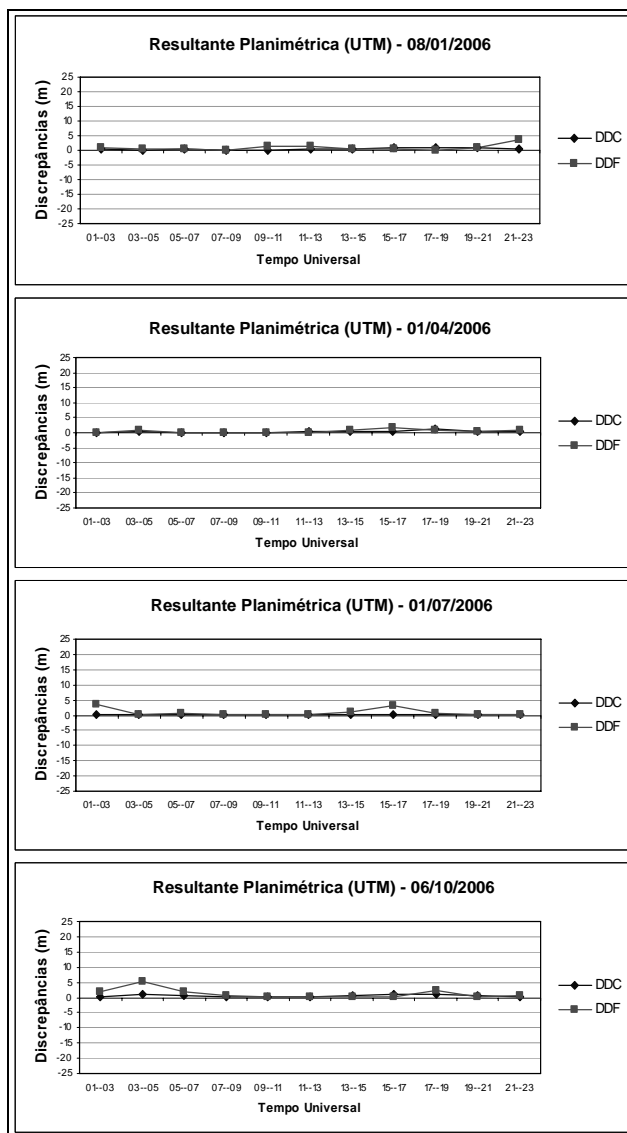
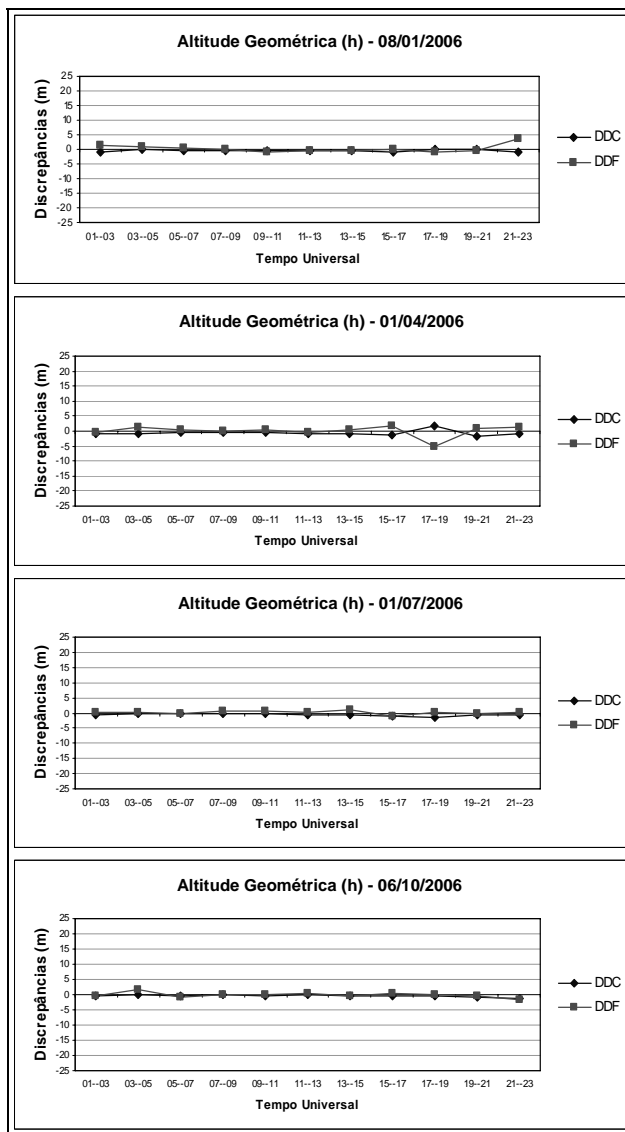


Figura 08 – Discrepâncias na Componente Altimétrica.



Diante dos resultados obtidos, pode-se verificar que a melhora que ocorre no posicionamento relativo no período de MIAS é extremamente

significativa. Outro fato que deve ser destacado diz respeito à variação sazonal da ionosfera. Como o período é de MIAS, a produção de elétrons se torna mínima, com isso, não se percebe a variação sazonal dos efeitos ionosféricos nos resultados de forma significativa. Como os efeitos de irregularidades da ionosfera são minimizados consideravelmente no período de MIAS, os valores das discrepâncias são também minimizados consideravelmente. No período de MAAS, valores máximos de discrepância atingiram aproximadamente 25 m, a partir do processamento com a DDF (em planimetria e altimetria). No entanto, no período de MIAS, o valor máximo de discrepância foi de aproximadamente 5,50 m, também referente ao processamento com a DDF (em planimetria e altimetria). A maioria das discrepâncias foi menor do que 0,50 m, sendo que em alguns casos atingiram valores menores do que 0,10 m. No caso do mês de julho, a partir do processamento com a DDC, nenhum valor de discrepância planimétrica ultrapassou 0,25 m. Vale enfatizar que a linha de base formada é de aproximadamente 430 km, e a região brasileira é uma das mais complexas no que diz respeito aos efeitos da ionosfera. Mesmo assim, no período de MIAS valores de ordem centimétrica foram obtidos.

A tabela 02 mostra o Erro Médio Quadrático (EMQ) calculado para os dados processados, referentes aos períodos de MAAS e MIAS.

Tabela 02- Erro Médio Quadrático (EMQ).

RESULTANTE PLANIMÉTRICA (UTM)						
Estação do ano	Período de MAAS			Período de MIAS		
	Dia do ano	EMQ (m)		Dia do ano	EMQ (m)	
		DDC	DDF		DDC	DDF
Verão	01/01/2001	2,32	3,53	08/01/2006	0,46	1,38
Outono	03/04/2001	5,48	7,29	01/04/2006	0,44	0,74
Julho	02/07/2001	0,82	2,39	01/07/2006	0,16	1,46
Primavera	05/10/2001	3,01	7,86	06/10/2006	0,58	1,98

ALTIMETRIA (h)						
Estação do ano	Período de MAAS			Período de MIAS		
	Dia do ano	EMQ (m)		Dia do ano	EMQ (m)	
		DDC	DDF		DDC	DDF
Verão	01/01/2001	1,14	5,83	08/01/2006	0,57	1,29
Outono	03/04/2001	1,99	9,35	01/04/2006	0,99	1,79
Julho	02/07/2001	1,27	3,49	01/07/2006	0,70	0,62
Primavera	05/10/2001	2,30	9,47	06/10/2006	0,60	0,75

Considerando o processamento realizado com a DDF no período de MAAS, com relação à resultante planimétrica, o valor máximo do EMQ foi 7,86 m, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 1,98 m. Com relação à altimetria, o valor máximo foi 9,47 m no período de MAAS, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 1,79 m.

No caso do processamento realizado com a DDC no período de MAAS, com relação à resultante planimétrica, o valor máximo do EMQ foi 5,48 m, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 0,58 m. Com relação à altimetria, o valor máximo foi 2,30 m no período de MAAS, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 0,99 m. É importante destacar que todos esses valores máximos do EMQ se referem a estações do ano outono ou primavera, ou seja, próximo aos equinócios, cujo efeito da ionosfera é mais intenso do que períodos próximos aos solstícios (verão e inverno).

Para mostrar o comportamento da ionosfera nos períodos de MAAS e MIAS, foram produzidos mapas do TEC. As figuras 09 e 10 mostram esses mapas para os respectivos períodos (MAAS e MIAS). Vale salientar que os mapas foram produzidos com o software da Leica GNSS QC v1.2, versão livre. Para a produção dos mapas do TEC foram utilizados arquivos IONEX (*IONosphere map EXchange*). Estes arquivos foram desenvolvidos com o objetivo de padronizar mapas do TEC produzidos pelo IGS (*International GNSS Service*). Em 2001 os arquivos IONEX eram produzidos com início à 00:00 TU. Atualmente, os arquivos são produzidos com início à 01:00 TU. Assim, os horários dos mapas apresentados não coincidem (se diferem de uma hora). Os mapas referentes ao período de MAAS são apresentados para 15:00 TU, e os mapas referentes ao período de MIAS para 16:00 TU. Os mesmos são apresentados para as quatro estações do ano, referentes aos dias de coleta dos dados processados.

De acordo com as figuras 09 e 10 pode-se verificar uma diferença significativa do TEC com relação aos períodos de MAAS e MIAS. Enquanto que no primeiro período, próximo dos equinócios (abril e outono) valores do TEC vertical atingiram cerca de 150 unidades, no período de MIAS foi de apenas 50 unidades. Isto mostra uma diferença extremamente significativa na produção de elétrons da ionosfera entre os dois períodos. Com isso, devido à queda significativa na produção de elétrons da ionosfera, e, conseqüentemente da variação espacial do TEC, ocorre uma melhora significativa no desempenho do posicionamento relativo, visto que o resíduo ionosférico da dupla diferença diminui consideravelmente. Assim, no processo de ajustamento, as linhas de base e ambigüidades que foram estimadas absorveram uma quantidade menor do resíduo.

Figura 09 – Mapas do TEC para o período de MAAS.

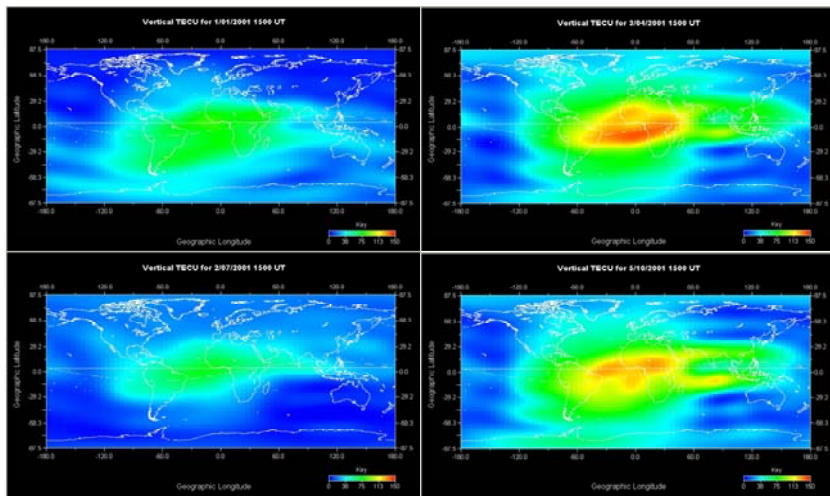
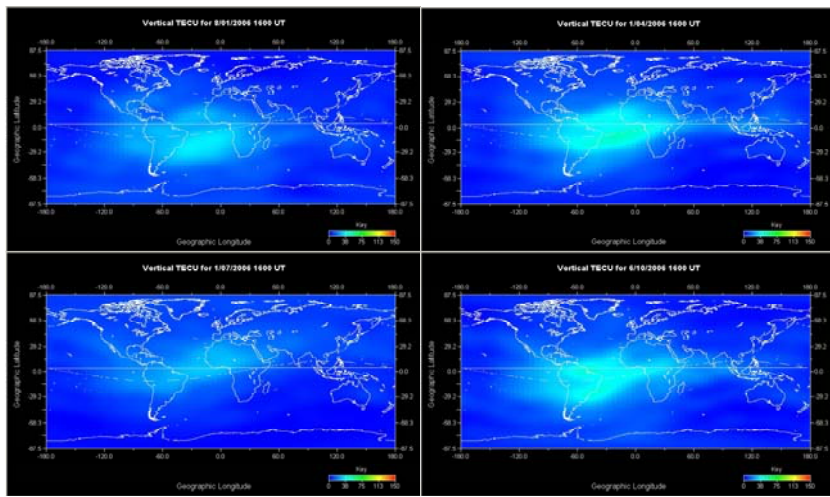


Figura 10 – Mapas do TEC para o período de MIAS.



Como já mencionado, no período de MAAS foi possível verificar de forma significativa a variação sazonal dos efeitos da ionosfera. Isto pode ser verificado claramente na figura 09, na qual se observa maiores valores do TEC próximo dos equinócios e menores próximo dos solstícios. No entanto, no período de MIAS a produção de elétrons cai de forma tão significativa que quase se torna imperceptível a variação sazonal dos efeitos da ionosfera, como mostra os mapas apresentados na figura 10. Isto explica porque não se nota de maneira significativa a variação sazonal dos efeitos da ionosfera no período de MIAS, como pode ser verificado nas figuras 07 e 08.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os experimentos realizados foi possível mostrar para a comunidade usuária e científica do GPS a melhora significativa que ocorre no posicionamento relativo em períodos de MIAS. Vale salientar que atualmente se trata de um momento oportuno para realizar experimentos desta natureza no Brasil, visto que no último mínimo solar, que ocorreu em 1996-1997, ainda não havia estudos sistemáticos referentes aos efeitos da ionosfera no posicionamento com GPS. Assim, foi possível verificar as conseqüências positivas que ocorrem em período de MIAS no posicionamento relativo. Como um dos objetivos do trabalho consistia em mostrar estas conseqüências para a comunidade usuária, optou-se em utilizar as efemérides transmitidas no processamento dos dados GPS.

Diante do exposto, mesmo com a utilização das efemérides transmitidas, pôde-se verificar a melhora significativa que ocorre no posicionamento relativo. No período de MAAS, o valor máximo da discrepância foi de aproximadamente 25 m, enquanto que, no período de MIAS, o valor máximo não ultrapassou 5,50 m. É importante destacar que valores próximos de 5 m ocorreram somente 5 vezes. A maioria das discrepâncias não ultrapassou 0,50 m, tanto em planimetria como em altimetria, principalmente no caso em que se processaram os dados com a DDC, sendo que em alguns casos, valores de discrepâncias foram menores do que 0,10 m.

No período de MAAS, com relação à altimetria, o valor máximo do EMQ foi de aproximadamente 9,5 m, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 1,80 m. Ambos os valores correspondem ao processamento realizado com a DDF. Com relação à resultante planimétrica, o valor máximo foi de aproximadamente 7,9 m, enquanto que no período de MIAS o valor máximo não ultrapassou 2,0 m.

Notou-se também que o processamento realizado a partir da DDF se mostrou mais sensível aos efeitos da ionosfera do que com a DDC, principalmente no período de MAAS. Assim, nesse caso, provavelmente a ambigüidade absorveu parte do resíduo ionosférico da dupla diferença, visto

que a variação espacial do TEC é muito alta em períodos de MAAS. Com isso, os resultados obtidos a partir da DDF foram comprometidos. Outro fato importante que deve ser salientado diz respeito à variação sazonal dos efeitos da ionosfera em período de MIAS, que se torna quase que imperceptível. Isto pôde ser verificado nos mapas do TEC apresentados na figura 10 e nos resultados obtidos nas figuras 07 e 08.

Recomenda-se aos usuários do GPS que fiquem atentos no momento da escolha do receptor GPS, visto que no período de MIAS os efeitos devido à ionosfera se tornam mínimos, fazendo com que em muitas vezes possa ser possível utilizar receptores GPS de simples frequência ao invés dos de dupla. Com isso, o custo de levantamento de campo é minimizado. Em suma, no período de MIAS as possibilidades de aplicações do posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência se torna maior.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) e a fundação de amparo à pesquisa do estado de são paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro em forma de bolsa de estudo e ao instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE), pela disponibilidade dos dados GPS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLETON, E.V. *Two anomalies in the ionosphere*. Nature, 157, 691.1946.
- 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.
- DAL POZ, W.R. *Posicionamento Relativo na Região Equatorial em Diversas Condições Ionosféricas*. 2005. 161p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London, Peter Peregrinus Ltd, 1990. 580p.
- KLOBUCHAR, J. A. *Ionospheric Effects on GPS* (Chapter 12). In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr., J. J. ed. *Global Positioning System: theory and applications*. Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).
- LEICK, A. *GPS satellite surveying*. New York, John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- MCNAMARA, L.F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida, Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

- NASA (National Aeronautics and Space Administration). *SCIENCE@NASA*. Disponível em: http://science.nasa.gov/headlines/y2006/15aug_backwards.htm. Acesso em: 20 abr.2007a.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). *Predição do Ciclo 24*. Disponível em: http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/solar_cycle_graphics.html. Acesso em: 20 abr.2007b.
- ODIJK, D. *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*. The Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2002. 242p.
- 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. 708 p.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. *Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 62, n. 15, 1337-1383, Oct. 2000.
- SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- SOARES, A.P. *Monitoração de anomalias em comunicações via satélite*. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.
- TERRA DOS SANTOS, P.M. *Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira*. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2000. p.117.
- WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A. *Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions*. In: IAG Symposium 111, Heidelberg, Aug. 13, 1991.
- WEBSTER, I. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. New Brunswick. 1993. Thesis, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.

(Recebido em julho/07. Aceito em novembro/07)