

EFEITO DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO GEODÉSICO COM GPS

N. C. C. da Silva¹, M. C. dos Santos² & L. C. de Oliveira³

Para se corrigir a refração troposférica, que consiste em uma das principais fontes de erro que afetam as observações do Sistema de Posicionamento Global (GPS), usam-se modelos troposféricos e funções de mapeamento que estimam o valor do atraso nos sinais GPS provocado por esta refração. Tais modelos foram desenvolvidos usando dados meteorológicos coletados predominantemente no hemisfério norte. Este artigo apresenta um estudo comparativo sobre o efeito, no posicionamento geodésico com o GPS, provocado por modelos troposféricos, mais precisamente os de Saastamoinen, Hopfield e Ifadis, combinados às funções de mapeamento de Ifadis, Hopfield, Saastamoinen, Herring e Lanyi. Dados GPS coletados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de Sistema GPS (RBMC) foram utilizados. As estações da RBMC estão distribuídas de modo que cada uma das regiões geográficas do Brasil tenha pelo menos uma delas. Visto que também a RBMC cobre as cinco regiões climáticas do país, foram estabelecidas três linhas de base configuradas de acordo com a região climática em que se localizam, tendo cada uma dessas bases características específicas quanto ao seu comprimento, variação altimétrica, dentre outras. Os dados GPS utilizados correspondem a quatro diferentes épocas do ano de 1997, e foram tratados com o programa DIPOP, de posicionamento diferencial. A análise do resultado do processamento indica uma maior homogeneidade com a utilização das funções de mapeamento de Ifadis, Herring e Lanyi independentemente dos modelos.

Palavras-chave: Sistema de Posicionamento Global; Refração Troposférica; Posicionamento por Satélites.

EFFECT OF TROPOSPHERIC REFRACTION ON GPS GEODETIC POSITIONING-*The tropospheric refraction is one of the major biases affecting GPS observations. It is dealt with by means of tropospheric models and mapping functions, which allow the computation of corrections to be added to the original measurements. Tropospheric models and mapping functions have been developed based upon data collected by stations mostly located in the Northern Hemisphere. This paper presents a comparative study on the effect of using combinations among models and mapping functions on geodetic positioning with GPS. GPS data collected by the Brazilian RBMC network have been used in this study. This network is composed of 9 permanent GPS tracking stations, which are distributed in such a way that every geographic region has at least one of them. This distribution also allowed a station to be located in every one of the Brazilian climate regions. This fact allowed the development of a comparative study on the behaviour of some tropospheric models, such as Saastamoinen, Hopfield and Ifadis, and the mapping functions Ifadis, Hopfield, Saastamoinen, Herring and Lanyi, using RBMC data. The study was based on 3 baselines in which the solutions, for each component, were analysed by means of comparison with SIRGAS values (South American Geocentric Reference System). Results indicate that the best performance was achieved using Ifadis, Herring and Lanyi mapping functions.*

Key words: Global Positioning System; Tropospheric Refraction; Satellite Positioning.

¹Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Diretoria de Geociências, Departamento de Geodésia
Av. Brasil, 15671 - Parada de Lucas - CEP: 21241-051 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: (021) 391-8217 Fax: (021) 481-2747 - e-mail: nilo@ibge.gov.br

²Universidade Federal do Paraná - Departamento de Geomática - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001 CEP: 81531-990 - Curitiba - PR
Tel.: (041) 366-3486 Fax: (041) 266-2393 - e-mail: mcsantos@geoc.ufpr.br

³Instituto Militar de Engenharia - Departamento de Engenharia Cartográfica
Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha - CEP: 22290-270 - Rio de Janeiro - RJ
Telefax: (021) 542-3598 - e-mail: leonardo@aquarius.ime.eb.br

INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) vem sendo largamente usado para o posicionamento em qualquer região da superfície terrestre. A sua adoção ocasionou uma grande mudança nos procedimentos dos levantamentos geodésicos. A versatilidade e a rapidez que o sistema proporciona permite que os métodos de posicionamento considerados clássicos em Geodésia, como poligonação, triangulação, trilateração e os astronômicos, sejam substituídos com ampla redução de custos e envolvimento de recursos humanos. Por outro lado o posicionamento por GPS, como qualquer outro levantamento de caráter geodésico, está também sujeito a efeitos que implicam na introdução de erros com conseqüente deterioração da precisão final do posicionamento. Esses erros devem ser reduzidos através de modelagem matemática, técnicas de observação ou no processamento dos dados.

Dentre os diversos efeitos que afetam as observações GPS, pode-se destacar aquele relativo ao atraso provocado pela propagação dos sinais GPS pela Troposfera como sendo um dos mais difíceis de se lidar. Uma das formas utilizadas na correção do atraso provocado pela refração troposférica reside na utilização de modelos matemáticos que se baseiam na dinâmica da atmosfera neutra, no tocante a pressão do ar seco, a temperatura do ar e, principalmente, a pressão do vapor d'água, já que esta apresenta a maior variabilidade.

Vários estudos têm sido efetuados com intuito de se verificar a eficácia e a aplicabilidade dos diversos modelos e funções de mapeamento que foram desenvolvidos. Dentre eles, mencionam-se os estudos de Janes et al. (1990), Mendes & Langley (1994; 1995), Santerre et al. (1995). Algumas particularidades destes estudos podem ser destacadas. Uma diz respeito a confiabilidade das funções de mapeamento dos sinais para os quais o ângulo de elevação do satélite seja igual ou superior a 15 graus. Em casos onde isso não ocorre, nem todas as funções analisadas oferecem essa confiabilidade. Uma outra particularidade é sobre a afirmação de ser a refração na atmosfera neutra a maior fonte de erro no posicionamento geodésico por GPS. Menciona-se ainda uma terceira, de que a grande maioria dos dados usados nas análises referem-se a sítios localizados no hemisfério norte. Esta última reveste-se como fundamento básico ao objeto deste artigo, já que a dinâmica, na baixa atmosfera (Troposfera), não é a mesma nos dois hemisférios do planeta. A questão levantada passa a ser: qual a resposta dada por modelos e funções de mapeamento, em se tratando de medidas

GPS para o posicionamento geodésico, sob as condições climáticas do Brasil? Cabe aqui destacar que os modelos e funções, considerados globais, utilizam parâmetros meteorológicos médios para todo o planeta.

Dados GPS têm sido coletados de maneira contínua no Brasil desde 1994 em iniciativa isolada da Universidade Federal do Paraná (Santos et al., 1998). Contudo, em dezembro de 1996, começou a operação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). A RBMC constava, até o ano de 1997, com 09 (nove) estações que rastreiam diuturnamente os satélites da constelação GPS. Essas estações estão distribuídas no país de tal forma que todas as regiões geográficas são cobertas por pelo menos uma delas. Posto que a RBMC disponibiliza um grande conjunto de dados GPS diariamente, propõe-se como objetivo deste artigo o estabelecimento de comparações entre modelos de refração troposférica e funções de mapeamento, no tocante a uma determinação de caráter geodésico, utilizando estes dados.

REFRAÇÃO E MODELAGEM DA TROPOSFERA

A atmosfera terrestre é composta por uma mistura de vários gases. Ela, porém, apresenta uma concentração de nitrogênio, oxigênio, argônio e dióxido de carbono de cerca de 99,98%. Outro componente importante é o vapor d'água, encontrado, principalmente, nas camadas inferiores da atmosfera. O conteúdo de vapor d'água encontrado na atmosfera é extremamente variável temporal e espacialmente, o que torna complexa sua quantificação na composição da atmosfera, devido ao chamado ciclo hidrológico que ocorre no planeta (evaporação, condensação e precipitação).

A estrutura da atmosfera terrestre pode apresentar vários tipos de divisão em função do estudo que se pretende. A mais comumente encontrada é referida a temperatura que caracteriza diversas camadas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera (Barry & Chorley, 1995). Quando se trata do estudo da refração de ondas eletromagnéticas, como é o caso deste trabalho, a divisão se dá em duas grandes camadas: uma referida a atmosfera eletricamente neutra, ou sem a presença de partículas ionizadas (Troposfera + Estratosfera); e outra contando com a presença de partículas ionizadas (Ionosfera).

Define-se refração, genericamente, como a mudança de direção e alteração da velocidade que sofre uma onda eletromagnética propagada em um determinado meio, quando penetra em um outro de densidade

diferente. As leis que regem o estudo da refração são baseadas no Princípio de Pierre de Fermat, formulado em 1657, que diz: "a trajetória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo possível" (Hecht, 1991) De acordo com esse enunciado deduz-se que em um meio estratificado em m camadas, o caminho percorrido por uma onda é:

$$ct = S = \sum_{i=1}^m n_i s_i, \quad (1)$$

em que $ct = S$ representa o percurso efetivamente percorrido pela onda nas m camadas do meio, e n_i e s_i representam o índice de refração e o comprimento do percurso da i -ésima camada, respectivamente. Note-se que a Eq. (1) somente é válida desde que em cada camada percorrida o valor do índice de refração seja único em qualquer ponto nela contido.

Para a atmosfera terrestre, um meio estratificado, porém não homogêneo, já que suas características físicas são variáveis, ocorre que o valor do índice de refração apresenta uma variação pontual. Desse modo a Eq. (1) pode ser reescrita como:

$$S = \int_A^B n ds. \quad (2)$$

A integral na Eq. (2) representa o caminho percorrido pela onda, eivada dos efeitos devidos a refração. Portanto, S representa a distância efetivamente percorrida por uma onda eletromagnética, quando propagada pela atmosfera terrestre, entre dois pontos quaisquer.

A observação de sinais de satélites com fins de posicionamento implica, intrinsecamente, na medição da distância satélite-receptor. No caso do GPS isso é alcançado através das observáveis pseudo-distância ou da fase da onda portadora. Em cada uma das equações dessas observáveis estão embutidos erros, e entre eles também são encontrados os devidos à refração atmosférica, quer seja o relacionado a atmosfera ionizada (refração ionosférica), ou o relacionado a atmosfera eletricamente neutra (refração troposférica).

A variação (ΔS) entre a distância efetivamente percorrida (S) e a distância geométrica (S') é dada pela expressão:

$$\Delta S = S - S' = \int (n - 1) ds. \quad (3)$$

Para a atmosfera eletricamente neutra o valor de ΔS é comumente chamado de atraso troposférico. Por contar a Troposfera com grande parte da massa da atmosfera terrestre, e uma quase totalidade do vapor d'água, o termo é geralmente usado para designar o

efeito causado pela parte da atmosfera que não é ionizada (Mendes & Langley, 1995). Dessa forma, o atraso troposférico DST pode ser escrito na forma:

$$\Delta S_T = \int_0^{h_T} (n - 1) ds, \quad (4)$$

onde h_T , no limite superior na integral, representa a altura da atmosfera neutra. Como o valor de n é próximo a unidade, é conveniente expressá-lo sob outra forma. Para tal, define-se a refratividade do ar N , como:

$$N = (n - 1)10^6. \quad (5)$$

Substituindo na Eq. (5), tem-se:

$$\Delta S_T = 10^{-6} \int_0^{h_T} N ds. \quad (6)$$

Algumas equações foram desenvolvidas para expressar a refratividade do ar para as ondas de rádio, subdivisão do espectro das ondas eletromagnéticas onde estão os sinais GPS. As mais utilizadas são as de Smith e Weintraub (Black & Eismar, 1984; Brunner, 1988; Ifadis, 1986; Joshi, 1973), Thayer (Ifadis, 1986; Jong, 1991; Spilker, 1996) e Davis (Davis et al., 1985). A refratividade do ar N pode ser expressa em função de parâmetros meteorológicos como a pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade relativa. Essa associação permite a sua divisão em duas componentes: uma seca (ou hidrostática), e outra úmida. A componente seca é relacionada à composição do ar seco, da atmosfera não ionizada, e representa cerca de 90% do total do atraso troposférico. A componente úmida é dependente da pressão parcial do vapor d'água, que é extremamente variável, sendo por isso complexa sua quantificação. Tomando-se suas componentes, tem-se para a refratividade:

$$N = N_1 + N_2, \quad (7)$$

e, conseqüentemente para o atraso troposférico:

$$\Delta S_T = \Delta S_{T_1} + \Delta S_{T_2} = 10^{-6} \int_0^{h_1} N_1 ds + 10^{-6} \int_0^{h_2} N_2 ds \quad (8)$$

onde os índices 1 e 2 representam as componentes seca e úmida da refratividade, respectivamente.

Na Eq. (8), ΔS_T é o atraso troposférico sofrido por um sinal na direção do zênite. Todavia, o sinal GPS é dependente de qualquer ângulo de elevação do satélite. A relação entre essas duas grandezas (atraso troposférico e ângulo de elevação) é feita através de uma função denominada função de mapeamento. Genericamente, tem-se a seguinte relação:

$$\Delta S_T(E) = F(E) \cdot \Delta S_T, \quad (9)$$

onde E é o ângulo de elevação, e a função de mapeamento.

Cabe ressaltar que as funções de mapeamento são associadas às componentes seca e úmida da refratividade. Dessa forma tem-se, também genericamente:

$$\Delta S_T(E) = F_1(E) \cdot \Delta S_{T_1} + F_2(E) \cdot \Delta S_{T_2} \quad (10)$$

Para a determinação do atraso troposférico faz-se uso de modelos específicos. Uma conceituação para modelo, em que se enquadram os que estimam o atraso troposférico, é enunciada em Nimer (1979) como "uma estruturação simplificada da realidade que apresenta, supostamente, características ou relações sob forma generalizada". A realidade aqui é a própria atmosfera neutra da Terra, ao passo que os modelos troposféricos representam sua simplificação, pois baseiam-se no comportamento da refratividade do ar assumindo que seus constituintes obedecem a leis que já se configuram como modelos.

De fato, os modelos troposféricos estão calcados tanto em teorias, como as leis que regem a refração de ondas eletromagnéticas, e a variação radial do índice de refração na atmosfera; quanto em simplificações, como considerar a Terra como uma esfera e as hipóteses que são fundamentadas nas leis que descrevem o comportamento dos gases sob condições de temperatura e pressão.

Existem vários modelos que procuram estimar o atraso troposférico que podem ou não ser associados a funções de mapeamento. As formulações dos utilizados nesse trabalho, encontram-se no anexo A, e são:

a) Hopfield

Hopfield (1969) desenvolveu um modelo para ex-

pressar a refratividade baseado, teoricamente, em uma atmosfera com uma taxa constante de declínio da temperatura em relação ao aumento da altitude. As componentes seca (N1) e úmida (N2) da refratividade são descritas como uma função de quarto grau em relação a altitude referenciada ao Geóide. A partir do valor da superfície, cada componente tem seu perfil vertical em decréscimo até atingir a altitude em que seu valor é zero.

b) Saastamoinen

Saastamoinen (1973), a partir de teorias sobre a refração atmosférica, desenvolveu um modelo baseado na suposição do decréscimo linear da temperatura até a Tropopausa. Acima da Tropopausa a temperatura assumiria um valor constante, caracterizando, portanto, a Estratosfera como um modelo isotérmico. Segundo Jong (1991), Saastamoinen também assume uma atmosfera esférica em equilíbrio hidrostático, e que todo o vapor d'água encontra-se concentrado na Troposfera e se comporta como um gás ideal.

c) Lanyi

Lanyi (1984) apresenta uma função de mapeamento baseada no equilíbrio hidrostático do ar seco e no modelo de Saastamoinen para as componentes seca e úmida da refratividade. O atraso troposférico é dado como uma função dos atrasos relativos a essas componentes, que por sua vez estão relacionadas a diversos parâmetros, podendo estes serem ajustados às condições meteorológicas locais.

d) Herring

Herring (1992), baseado em Saastamoinen (1973) e Marini (1972), desenvolveu uma função de mapeamento em forma de fração contínua, utilizando dados de radiossondagem para as medidas dos perfis verticais da temperatura e do vapor d'água, e determinando a pressão assumindo uma atmosfera em equilíbrio hidrostático.

e) Ifadis

Ifadis (1986) deduziu formulações para o atraso troposférico utilizando dados de radiossonda, coletados em vários locais do globo, cobrindo, dessa forma, diferentes tipos de clima. Ifadis supõe que a temperatura e



Figura 1 - Localização das nove estações da RBMC dentro das regiões climáticas.

Figure 1 - Site of the RBMC stations within climate regions.

Base (identificação)	Estações Componentes	Região Climática
1	Manaus (AM) → Imperatriz (MA)	Equatorial
2	Fortaleza (CE) → Bom Jesus da Lapa (BA)	Semi-árida
3	Brasília (DF) → Cuiabá (MT)	Tropical
4	Presidente Prudente (SP) → Viçosa (MG)	Tropical de Altitude
5	Curitiba (PR) → Presidente Prudente (SP)	(*)

(*) - envolve duas regiões climáticas

Tabela 1 - Linhas de base por região climática.

Table 1 - Baselines and climate regions.

a umidade relativa são relacionadas linearmente com a altitude. Para a pressão, supondo a atmosfera em equilíbrio hidrostático, a dependência em relação a altitude é exponencial. As fórmulas propostas por Ifadis, para as duas componentes da função de mapeamento, abrangem uma solução global e uma outra afeta aos tipos de clima ártico, temperado, tropical, de estepes, desértico e montanhoso. Para o modelo de refratividade úmido, Ifadis desenvolveu adicionalmente formulações também relacionadas às estações do ano.

PROCESSAMENTO

A RBMC está configurada com nove estações que rastreiam continuamente sinais dos satélites GPS. Novas estações serão estabelecidas, de modo que nenhum ponto do nosso território brasileiro fique a uma distância maior do que cerca de 500 km de qualquer uma das estações que venham compor a rede (Fortes, 1997).

À época da realização desse trabalho, a RBMC constava das estações localizadas em: Bom Jesus da Lapa (BA); Cuiabá (MT); Curitiba (PR); Imperatriz (MA); Manaus (AM); Presidente Prudente (SP); Viçosa (MG); Brasília (DF); e Fortaleza (CE), sendo que as duas últimas pertencem também à rede do International GPS Service for Geodynamics (IGS) (Fortes, 1997). A Fig. 1 apresenta as estações da RBMC situadas geograficamente dentro das regiões climáticas do Brasil, a saber, Equatorial, Semi-árido, Tropical, Tropical de Altitude e Subtropical (Assis & Pontes, 1971), indicadas por algarismos romanos. Na Fig. 1, os limites entre as regiões climáticas estão representados por linhas finas. Os limites entre as regiões geográficas são também indicados.

A localização das estações da RBMC permitiu, inicialmente e para efeito desse trabalho, o estabelecimento de 5 (cinco) linhas de base conforme a Tab. 1, procurando-se associar cada uma delas a uma região climática específica, excetuando-se a base 5 que foi formada devido a maior quantidade de dados disponíveis (foram as primeiras estações em operação), e ao seu menor comprimento.

Em função de problemas operacionais, as bases 1 e 3 foram descartadas desse estudo. As remanescentes apresentam características, apresentadas a seguir, que subsidiam questões aqui apresentadas:

a) base 2, entre Fortaleza (CE) e Bom Jesus da Lapa (BA): caracteriza-se por apresentar a maior diferença em latitude entre as estações (aproximadamente 9,5 graus), a maior distância entre as estações (1172 km), além de ter uma de suas estações (Fortaleza) como

a única dentre todas as estações envolvidas localizada próxima ao mar;

b) base 4, entre Presidente Prudente (SP) e Viçosa (MG): caracteriza-se por apresentar as menores diferenças em latitude (cerca de 1,5 graus) e em altitude (cerca de 235 m). Apresenta a maior diferença em longitude, cerca de 8,5 graus;

c) base 5, entre Curitiba (PR) e Presidente Prudente (SP): caracteriza-se por apresentar a menor diferença em longitude (cerca de 2 graus), a maior diferença em altitude (aproximadamente 484 m), e a menor distância entre as estações (cerca de 430 km).

Para o processamento das linhas de base foram escolhidos 4 (quatro) períodos distintos durante o ano de 1997:

- Período 1 - 11/03 a 19/03/97;
- Período 2 - 1/04 a 8/04/97;
- Período 3 - 1/06 a 8/06/97;
- Período 4 - 1/07 a 8/07/97.

Devido ao início da operação das estações em datas diferenciadas, a base 4 não apresenta dados nos períodos 1 e 2. Para as bases 2 e 5 não foi considerado o período 4.

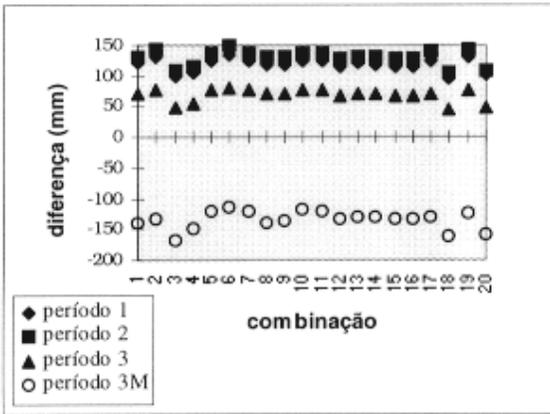
Os dados coletados para cada um dos dias em cada um dos períodos foram processados obedecendo-se os seguintes critérios:

- ângulos de elevação: 10 e 15 graus;
- duração da seção: diária;
- intervalo de aquisição: 30 segundos (padrão da RBMC à época dos dados utilizados);
- satélites utilizados: todos os disponíveis;
- combinação linear: ionosphere-free.

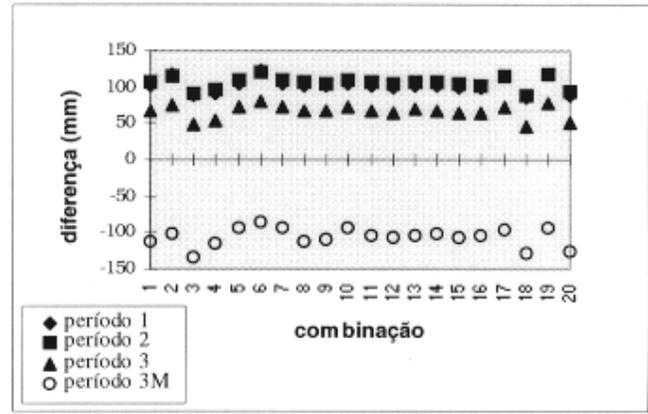
combinação	modelos		funções de mapeamento	
	seco	úmido	seco	úmido
1	Saastamoinen	Saastamoinen	Ifadis	Ifadis
2	Saastamoinen	Saastamoinen	Saastamoinen	Saastamoinen
3	Saastamoinen	Saastamoinen	Hopfield	Hopfield
4	Hopfield	Hopfield	Hopfield	Hopfield
5	Hopfield	Hopfield	Ifadis	Ifadis
6	Hopfield	Hopfield	Saastamoinen	Saastamoinen
7	Hopfield	Hopfield	Herring	Herring
8	Saastamoinen	Saastamoinen	Herring	Herring
9	Saastamoinen	Saastamoinen	Lanyi	Lanyi
10	Hopfield	Hopfield	Lanyi	Lanyi
11	Hopfield	Ifadis	Ifadis	Ifadis
12	Saastamoinen	Ifadis	Ifadis	Ifadis
13	Hopfield	Ifadis	Herring	Herring
14	Hopfield	Ifadis	Lanyi	Lanyi
15	Saastamoinen	Ifadis	Herring	Herring
16	Saastamoinen	Ifadis	Lanyi	Lanyi
17	Saastamoinen	Ifadis	Saastamoinen	Saastamoinen
18	Saastamoinen	Ifadis	Hopfield	Hopfield
19	Hopfield	Ifadis	Saastamoinen	Saastamoinen
20	Hopfield	Ifadis	Hopfield	Hopfield

Tabela 2 - Combinações modelos e funções de mapeamento

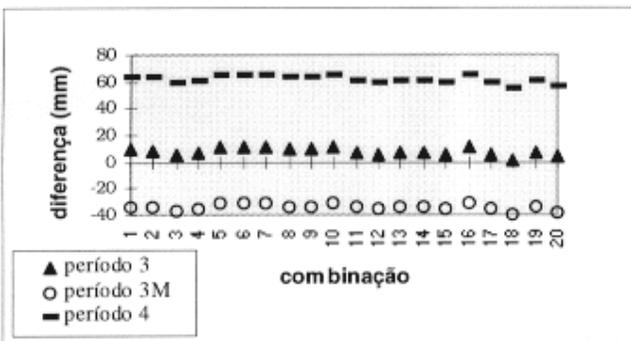
Table 2 - Combinations among tropospheric models and mapping functions.



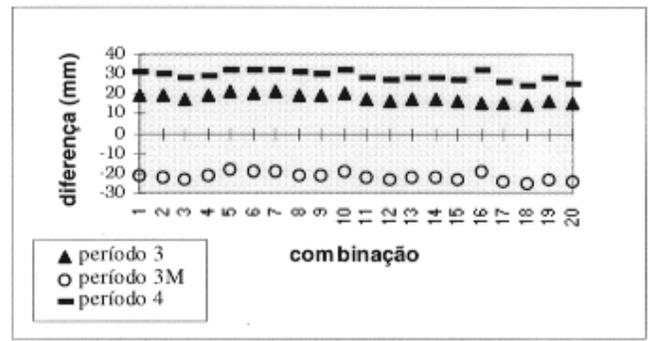
(a)



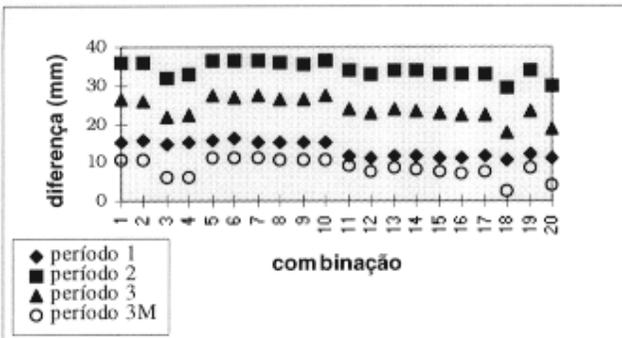
(b)



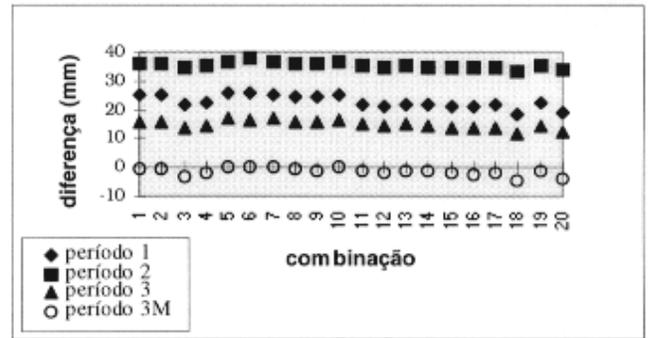
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2a - Base 2: Diferença média por período com ângulo de elevação de 10°.

Figura 2b - Base 2: Diferença média por período com ângulo de elevação de 15°.

Figura 2c - Base 4: Diferença média por período com ângulo de elevação de 10°.

Figura 2d - Base 4: Diferença média por período com ângulo de elevação de 15°.

Figura 2e - Base 5: Diferença média por período com ângulo de elevação de 10°.

Figura 2f - Base 5: Diferença média por período com ângulo de elevação de 15°.

Figure 2a – Baseline 2: Average difference for each period with 10° elevation angle.

Figure 2b – Baseline 2: Average difference for each period with 15° elevation angle.

Figure 2c – Baseline 4: Average difference for each period with 10° elevation angle.

Figure 2d – Baseline 4: Average difference for each period with 15° elevation angle.

Figure 2e – Baseline 5: Average difference for each period with 10° elevation angle.

Figure 2f – Baseline 5: Average difference for each period with 15° elevation angle.

No processamento dos dados coletados na RBMC e disponibilizados para esta pesquisa, foi utilizado o software DIPOP (Differential POSitioning Package). Esse sistema, desenvolvido em linguagem FORTRAN 77, pela Universidade de New Brunswick, Canadá, estima coordenadas a partir de observações de fase da onda portadora, e é composto por três programas:

- ♦ PREGO - PREprocessing of GPS Observations;
- ♦ PREDD - PREprocessing of Double Differences; e
- ♦ MPROC - Main PROCessor.

O programa PREGO tem como função básica transformar os arquivos de observação e navegação, oriundos de um receptor, para o formato DIPOP ou UNB. O programa PREDD utiliza como dados de entrada os arquivos de saída do programa PREGO. Nessa fase são identificadas as discontinuidades de dados de cada satélite, detectados e corrigidos os saltos de ciclos remanescentes, e formadas as duplas diferenças de fase das portadoras. O programa permite também a utilização de órbitas refinadas, que nessa artigo foram as disponibilizadas pelo IGS, formatadas por um programa auxiliar denominado ORBINT, além de calcular as coordenadas preliminares da estação remota. O programa MPROC, utilizando o arquivo de saída do PREDD, além do arquivo de dados meteorológicos e informações sobre a altura e o tipo de antena do receptor (incluindo diferença do centro das fases L1 e L2), procede um ajustamento por mínimos quadrados, modelo paramétrico, opcionalmente em rede ou por bases isoladas (Santerre et al., 1987; Santos, 1995).

Dentro do contexto do tema tratado neste artigo, deve-se ressaltar que o programa MPROC também calcula o atraso troposférico. Para tal, é preciso informar o modelo e a função de mapeamento que serão utilizados, bem como se as informações meteorológicas serão as contidas no default do programa, relativos ao nível do mar, ou se serão dados meteorológicos colhidos nos locais das observações. A Tab. 2 relaciona as combinações utilizadas no processamento dos dados, tanto de modelos e funções de mapeamento, quanto por componente da refratividade do ar, a partir dos modelos e funções de mapeamento implementados no DIPOP.

Procurou-se para as componentes seca e úmida, tanto dos modelos quanto das funções de mapeamento, a manutenção das formulações de um mesmo autor, exceto para as combinações de 11 a 20, já que Ifadis apresenta formulação apenas para a componente úmida.

Outro importante componente constante da estratégia de processamento diz respeito a utilização de

dados meteorológicos relativos aos locais das estações da RBMC. No período 3 foram utilizados dados meteorológicos locais coletados pelo o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, adquiridos pelas estações meteorológicas deste Instituto situadas nos municípios onde se encontram as estações da RBMC, em três horários distintos: 12, 18 e 24 horas.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram tabulados por dia, por período e por combinação, de modo a se obter um valor médio em cada um dos períodos para cada uma das combinações. Especificamente nesse trabalho são apresentados resultados comparativos entre as distâncias encontradas em cada linha de base processada e os valores de referência obtidos a partir das coordenadas divulgadas pelo projeto SIRGAS - Sistema Geocêntrico para América do Sul (IBGE, 1997). Em Silva (1998) são encontrados os resultados no tocante a cada uma das coordenadas das estações e respectivos desvios padrão. Bom Jesus da Lapa (BA), Viçosa (MG) e Presidente Prudente (SP) foram consideradas estações remotas para as bases 2, 4 e 5, respectivamente.

Convém mencionar que as coordenadas do referencial SIRGAS foram obtidas pela combinação de dois processamentos distintos, feitos pelo Instituto Alemão de Investigações Geodésicas (DGFI) e pela Agência Nacional de Mapas e Imagens (NIMA) dos EUA, usando, respectivamente, os programas BERNESE versão 3.4 e GIPSY-OASIS II. Nos dois processamentos foram usados modelos troposféricos e funções de mapeamento distintos (o BERNESE usou uma combinação do modelo de Saastamoinen com a função de mapeamento de Davis, ao passo que o GIPSY usou o modelo de Hopfield associado com a função de mapeamento de Lanyi) como valores de atraso troposférico inicial. Estes valores foram posteriormente ajustados (IBGE, 1997). Devido a estes fatos, pode-se dizer que a solução final obtida para as coordenadas SIRGAS não é uma função direta de qualquer um dos modelos usados.

As Figs. 2a, 2b, 2c, 2d, 2e e 2f apresentam as diferenças, por combinação e por período, entre as distâncias calculadas e as obtidas a partir dos valores de referência dados pelo projeto SIRGAS. A nomenclatura 3M, encontrada nas figuras, refere-se ao período 3 com dados meteorológicos locais. Nestas figuras, a graduação do eixo das abcissas refere-se às combinações encontradas na Tab. 2. As Figs. 2a e 2b referem-se a base 2, entre Fortaleza e Bom Jesus da Lapa, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respec-

tivamente; as Figs. 2c e 2d referem-se a base 4, entre Presidente Prudente e Viçosa, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respectivamente; e as Figs. 2e e 2f referem-se a base 5, entre Curitiba e Presidente Prudente, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respectivamente.

Pode-se verificar pelas figuras mencionadas que existe uma menor variabilidade em torno de média da série temporal quando se usam as funções de mapeamento de Herring, Ifadis e Lanyi, independentemente do modelo troposférico com a qual elas se combinam. Pode-se ver, também, o comportamento fortemente correlacionado das soluções para cada uma das combinações. Além disto, constata-se, a partir das Figs. 2e e 2f, uma melhor concordância das soluções usando-se dados meteorológicos locais com os respectivos valores SIRGAS, o que pode sugerir que melhores resultados possam ser encontrados quando estes tipos de dados são usados no processamento de dados GPS. Provavelmente este foi o caso por se tratar de estações em regiões climáticas distintas, com perfis de temperatura, pressão e umidade diferentes neste período. A constatação de que as soluções usando-se dados meteorológicos, ilustrados nas Figs. 2a, 2b, 2c e 2d, não tenham tido a melhor concordância com os valores SIRGAS ainda é motivo de investigação. A maior variabilidade entre as combinações apresentadas nas Figs. 2a e 2b podem ser devidas:

- 1) Desta ser a maior base;
- 2) A estação de Fortaleza estar ao nível do mar e próxima dele, em uma sub-região climática podendo por isso não ser caracterizada como semi-árido;
- 3) A estação de Bom Jesus estar situada em uma região típica do semi-árido;
- 4) O desnível de aproximadamente de 400m.

CONCLUSÕES

Do trabalho realizado, pode-se ter como principal conclusão o fato de que as combinações com funções de mapeamento de Ifadis, Herring e Lanyi apresentaram resultados mais homogêneos, em todas as situações propostas, incluindo-se o caso da base 5, onde o modelo úmido fez diferença. Pode-se também evidenciar que, dependendo das características da linha de base, o ângulo de elevação do sinal pode vir a ser de relevância. Verifica-se que na base 2 o conjunto de combinações utilizado teve comportamento mais instável em relação a comparação aos próprios resultados. Considerando que Fortaleza não pode ser caracterizada como região tipicamente do semi-árido (Assis & Pontes, 1971), e a base 5 não estar contida numa

mesma região climática, os resultados encontrados, de uma forma geral, são perfeitamente plausíveis do ponto de vista do comportamento da refração. No que tange a utilização de dados meteorológicos locais, verifica-se que, independentemente do ângulo de elevação, a sua utilização ocasiona um melhor resultado, notadamente na base 5 quando comparados aos valores SIRGAS. Finalmente, a escolha adequada do modelo úmido pode representar uma melhoria na qualidade dos resultados.

APÊNDICE

Formulações dos modelos utilizados no processamento dos dados

Hopfield

$$\Delta S_T(E) = \frac{10^{-6}}{5} \left[\frac{N_{1_0} h_1}{\sqrt{\text{sen}(E^2 + 6,25)}} + \frac{N_{2_0} h_2}{\sqrt{\text{sen}(E^2 + 2,25)}} \right]$$

onde:

$$N_1 = N_{1_0} \left[\frac{h_1 - h}{h_1} \right]^4 \quad \text{e} \quad N_2 = N_{2_0} \left[\frac{h_2 - h}{h_2} \right]^4$$

N_1 e N_2 representam as refratividades seca e úmida, respectivamente e índice 0 representa valor de referência;
 h_1 - altitude onde N_1 é igual a zero;
 $h_1 = 40082 + 0,1498t_s$ (km);
 h - altitude da estação (km)
 h_2 - altitude onde N_2 é igual a zero;
 $h_2 = 13268 - 0,09796t_s$ (km);
 h - altitude da estação (km);
 t_s - em °C é a temperatura na superfície.
 ΔS_T é o atraso troposférico na direção do zênite.
 E é o ângulo de elevação do sinal do satélite.

Saastamoinen

$$\Delta S_T = 0,002277 \sec z \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta_R,$$

onde: z - distância zenital aparente do satélite;
 P - pressão atmosférica (mbar);
 T - temperatura (K);
 e - pressão parcial do vapor d'água;
 B e δ_R - correções dependentes da altitude da estação e da distância zenital aparente, respectivamente.

O valor de z é dado pela expressão:

$$z = Z - \Delta Z''$$

onde Z é a distância zenital verdadeira e:

$$\Delta Z'' = \frac{16'' \cdot 0 \tan Z}{T} \left(P + \frac{4800 e}{T} \right) - 0,07 \left(\tan^3 Z + \tan Z \right) \left(\frac{P}{1000} \right)$$

Valores para a correção de B

Altitude da estação (km)	B (mbar)
0	1,156
0,5	1,079
1	1,006
1,5	0,938
2	0,874
2,5	0,813
3	0,757
4	0,654
5	0,563

Valores para correção de δ_R .

Distância Zenital Aparente	Altitude da Estação (km)							
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5
60° 00'	+0,003	+0,003	+0,002	+0,002	+0,002	+0,002	+0,001	+0,001
66° 00'	+0,006	+0,006	+0,005	+0,005	+0,004	+0,003	+0,003	+0,002
70° 00'	+0,012	+0,011	+0,010	+0,009	+0,008	+0,006	+0,005	+0,004
73° 00'	+0,020	+0,018	+0,017	+0,015	+0,013	+0,011	+0,009	+0,007
75° 00'	+0,031	+0,028	+0,025	+0,023	+0,021	+0,017	+0,014	+0,011
76° 00'	+0,039	+0,035	+0,032	+0,029	+0,026	+0,021	+0,017	+0,014
77° 00'	+0,050	+0,045	+0,041	+0,037	+0,033	+0,027	+0,022	+0,018
78° 00'	+0,065	+0,059	+0,054	+0,049	+0,044	+0,036	+0,030	+0,024
78° 30'	+0,075	+0,068	+0,062	+0,056	+0,051	+0,042	+0,034	+0,028
79° 00'	+0,087	+0,079	+0,072	+0,065	+0,059	+0,049	+0,040	+0,033
79° 30'	+0,102	+0,093	+0,085	+0,077	+0,070	+0,058	+0,047	+0,039
79° 45'	+0,111	+0,101	+0,092	+0,083	+0,076	+0,063	+0,052	+0,043
80° 00'	+0,121	+0,110	+0,100	+0,091	+0,083	+0,068	+0,056	+0,047

Lanyi

Os parâmetros Δ , σ , α , q_1 e q_2 , podem ser ajustados às condições meteorológicas locais.

$$\Delta S_T = \frac{F(E)}{\text{sen } E},$$

onde E é o ângulo de elevação. Expandindo $F(E)$, vem:

$$F(E) = Z_1 F_1(E) + Z_2 F_2(E) + (Z_1^2 / \Delta) F_{\text{bend}1}(E) + 2(Z_1 Z_2 / \Delta) F_{\text{bend}2}(E) + (Z_2^2 / \Delta) F_{\text{bend}3}(E) + (Z_1^3 / \Delta^2) F_{\text{bend}4}(E)$$

onde:

Z_1 e Z_2 são os atrasos devidos as componentes seca e úmida da refratividade na direção do zênite e $\Delta = 8.567$ km.

$$F_1(E) = G(\lambda \langle q \rangle_1, u) A_1(E) + (3/4) G^3(\langle q \rangle_1, u) \langle q^2 \rangle_1 u \sigma;$$

$$F_2(E) = G(\lambda \langle q \rangle_2 / \langle q^0 \rangle_2, u) A_2(E) / \langle q^0 \rangle_2;$$

e:

$$F_{\text{bend}1}(E) = -\frac{1}{2 \tan^2 E} \left[G^3 \left(\frac{\langle q \rangle_1}{\langle q^0 \rangle_1}, u \right) \langle q^0 \rangle_1 - G^3(\langle q \rangle_1, u) \frac{\sigma}{\text{sen}^2 E} \right];$$

$$F_{\text{bend}2}(E) = -\frac{1}{2 \tan^2 E} G^3 \left(\frac{\langle q \rangle_{12}}{\langle q^0 \rangle_{12}}, u \right) \langle q^0 \rangle_{12};$$

$$F_{\text{bend}3}(E) = -\frac{1}{2 \tan^2 E} G^3 \left(\frac{\langle q \rangle_2}{\langle q^0 \rangle_2}, u \right) \langle q^0 \rangle_2;$$

$$F_{\text{bend}4}(E) = -\frac{1}{2 \tan^4 E} G^3 \left(\frac{\langle \langle q \rangle \rangle}{\langle \langle q^0 \rangle \rangle}, u \right) \langle \langle q^0 \rangle \rangle;$$

$\alpha = 5$; $\sigma = 1,345 \times 10^{-3}$; $q_1 = 0$; $q_2 = 1,424$; $\beta = 3,5$; são parâmetros ajustados as condições meteorológicas locais. Os índices 1, 2 representam as componentes seca e úmida, respectivamente.

A quantidade $G(q, u)$, é um fator relacionado a curvatura da superfície da Terra e é dada como:

$$G(q, u) = (1 + qu)^{-1/2};$$

onde:

$$u = 2\sigma / \tan^2 E;$$

a quantidade $A(E)$ representa o momento das componentes seca e úmida e é dada por :

$$A(E) = \langle q^0 \rangle + \sum_{n=1}^{10} ((2n - 1)!! / n!) (-1/2)^n [u / 1 + \lambda \langle q \rangle u]^n \langle (q - \lambda \langle q \rangle)^n \rangle$$

Os momentos $\langle (q - \lambda \langle q \rangle)^n \rangle$ podem ser avaliados em

função dos momentos $\langle q^n \rangle$ através de um teorema binomial. As

quantidades $\langle q^n \rangle$, $\{q^n\}$ e $\{\langle q^n \rangle\}$ representam os momentos de enésima ordem da superfície normalizada da refratividade seca e úmida, $f(q)$, $f^2(q)$ e $f^3(q)$, na forma de:

$$\langle q^n \rangle = \int_0^\infty dq q^n f(q);$$

$$\{q^n\} = \int_0^\infty dq q^n f^2(q);$$

$$\{q^n\}_{12} = \int_0^\infty dq q^n f_1(q) f_2(q);$$

$$\{\langle q^n \rangle\} = \int_0^\infty dq q^n f^3(q);$$

Os momentos F_1 , F_2 , $F_{\text{bend}1}$, $F_{\text{bend}2}$, $F_{\text{bend}3}$ e $F_{\text{bend}4}$, são relacionados a $\{q^n\}$, como:

$$[q^n] = n! \left[\frac{(1/a)^{n+1} (1 - \exp(-aq_1)) + \exp(-aq_1)}{\prod_{i=0}^n (\alpha / (b+i+1))} \left((1 - \hat{T}_2^{b+n+1}(q_2)) + (1/a)^{n+1} \exp(-aq_1) \hat{T}_2^{b+n+1}(q_2) \right) \right]$$

onde a e b são relacionados aos fatores β e α , e:

$$\hat{T}(q_2) = 1 - (q_2 - q_1) / \alpha.$$

Herring

Componente seca:

$$F_1(E) = \frac{1 + a_1 / (1 + b_1 / (1 + c_1))}{\text{sen } E + \frac{a_1}{\text{sen } E + \frac{b_1}{\text{sen } E + c_1}}}$$

onde:

$$a_1 = [1,2320 + 0,0139 \cos \varphi - 0,0209 H + 0,00215 (T - 10)]10^{-3} ;$$

$$b_1 = [3,1612 - 0,1600 \cos \varphi - 0,0331 H + 0,00206 (T - 10)]10^{-3} ;$$

$$c_1 = [71,244 - 4,293 \cos \varphi - 0,149 H - 0,0021 (T - 10)]10^{-3} ;$$

φ - latitude;
 H - altitude (km);

T - temperatura (°C).

Componente úmida:

$$F_2(E) = \frac{1 + a_2 / (1 + b_2 / (1 + c_2))}{\sin E + \frac{a_2}{\sin E + \frac{b_2}{\sin E + c_2}}}$$

onde:

$$a_2 = [0,583 - 0,011 \cos \varphi - 0,052 H + 0,014 (T - 10)]10^{-3} ;$$

$$b_2 = [1,402 - 0,102 \cos \varphi - 0,101 H + 0,0020 (T - 10)]10^{-3} ;$$

$$c_2 = [45,85 - 1,91 \cos \varphi - 1,29 H + 0,015 (T - 10)]10^{-3} ;$$

Ifadis

Função de mapeamento:

$$m(E) = \frac{1}{\sin E + \frac{a(1)}{\sin E + \frac{a(2)}{\sin E + a(3)}}}$$

Componente Hidrostática

$$a(1) = 0,1237 \cdot 10^{-2} + 0,1316 \cdot 10^{-6} (P_0 - 1000) + 0,1378 \cdot 10^{-5} (T_0 - 15) + 0,8057 \cdot 10^{-5} \sqrt{e_0} ;$$

$$a(2) = 0,3333 \cdot 10^{-2} + 0,1946 \cdot 10^{-6} (P_0 - 1000) + 0,1040 \cdot 10^{-6} (T_0 - 15) + 0,1747 \cdot 10^{-4} \sqrt{e_0} ;$$

$$a(3) = 0,078 .$$

Componente Úmida

$$a(1) = 0,5236 \cdot 10^{-3} + 0,2471 \cdot 10^{-6} (P_0 - 1000) - 0,1724 \cdot 10^{-6} (T_0 - 15) + 0,1328 \cdot 10^{-4} \sqrt{e_0} ;$$

$$a(2) = 0,1705 \cdot 10^{-2} + 0,7384 \cdot 10^{-6} (P_0 - 1000) + 0,3767 \cdot 10^{-6} (T_0 - 15) + 0,2147 \cdot 10^{-4} \sqrt{e_0} ;$$

$$a(3) = 0,5917 \cdot 10^{-1}$$

onde P_0 , T_0 e e_0 são os valores referências para a pressão (mbar), temperatura (°C) e pressão do vapor d'água (mbar), respectivamente.
 Modelo úmido da refratividade:

$$\Delta S_{T_2} = 0,554 \cdot 10^{-2} - 0,880 \cdot 10^{-4} (P_0 - 1000) + 0,272 \cdot 10^{-4} e_0 + 0,2771 \cdot \left(\frac{e_0}{T_0} \right)$$

AGRADECIMENTOS

O trabalho descrito neste artigo contou com o apoio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela cessão dos dados GPS da RBMC, do CNPq, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná, e do Departamento de Engenharia Cartográfica do Instituto Militar de Engenharia.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, M. S. & PONTES, M. S. - 1971** - Comportamento do Índice de Refração da Troposfera em Regiões Tropicais e Equatoriais. Revista Brasileira de Tecnologia, **2**: 175-180.
- BARRY, R. G. & CHORLEY, R. J. - 1995** - Atmosphere, Weather and Climate. Routledge, London and New York, Sixth Edition.
- BLACK, H. D. & EISNER, A. - 1984** - Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects. Journal of Geophysical Research, **89**, (D2): 2616-2626.
- BRUNNER, F. K. - 1988** - Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements: A progress Report. In Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements, Brunner, F. K. (ed.). School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia.
- DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO, I. I., ROGERS, A. E. E. & ELGERED, G. - 1985** - Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. Radio Science, **20**, (6): 1593-1607.
- FORTES, L. P. S. - 1997** - Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). 1997. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 152 pp.
- HECHT, E. - 1991** - Óptica. (José Manuel N. V. Rebordão., trad.). Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- HERRING, T. A. - 1992** - Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Proceedings of the Symposium J. C. Munck and T. A. TH. Spoelstra (eds.), Netherlands Geodetic Commission, Publications in Geodesy, n° 36, The Netherlands.
- HOPFIELD, H. S. - 1969** - Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data. Journal of Geophysical Research, **74**, (18): 4487-4499.
- IFADIS, I. - 1986** - The Atmospheric Delay of Radio Waves:

Modeling The Elevation Dependence on a Global Scale. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Technical Report n° 38L.

- IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. - 1997** - Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul, Relatório Final. Grupos de Trabalho I e II. Rio de Janeiro.
- JANES, H. W., LANGLEY, R. B. & NEWBY, S. P. - 1990** - Analysis of Tropospheric delay prediction models: Comparisons with Ray-Tracing and implications for GPS relative positioning (A Summary) Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, GPS'90. Ottawa, Canada.
- JONG, C. D. - 1991** - Satellite Orbits and Atmospheric Effects. Reports of the Faculty of Geodetic Engineering Mathematical and Physical Geodesy n° 91.1, Delft University of Technology, Netherlands.
- JOSHI, C. S. - 1973** - Refraction Effects of Atmosphere on Geodetic Measurements to Celestial Bodies. Reports of Department of Geodetic Science, n° 192, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- KLEUSBERG, A., GEORGIADOU, Y., VANDENHEUVEL, F. & HEROUX, P. - 1989** - Single and Dual Frequency GPS data Preprocessing with DIPOP 2.1. Technical Memorandum - 21, Geodetic Research Laboratory, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- LANYI, G. - 1984** - Tropospheric Delay Affecting Radio Interferometry TDA. Progress Report, pp. 152-159.
- MARINI, J. W. - 1972** - Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science*, 7, (2): 223-231.
- MENDES, V. B. & LANGLEY, R. B. - 1994** - A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. Paper presented at KIS94, International Symposium on Kinematics Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada.
- MENDES, V. B. & LANGLEY, R. B. - 1995** - Zenith Wet Tropospheric Delay Determination Using Prediction Models: Accuracy Analysis. *Cartografia e Cadastro*, n° 2, pp. 41-47.
- NIMER, E. - 1979** - Modelo Metodológico de Classificação de Climas. *Revista Brasileira de Geografia* 41 (4): 59 - 89
- SAASTAMOINEN, J. - 1973** - Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. *Bulletin Géodésique*, 167: 13-34.
- SANTERRE, R., RAYMER, M. R., KLEUSBERG, A., LANGLEY, R. B., PARROT, D., QUEK, S. H., VANICEK, P., WELLS, D. E. & WILKINS, F. - 1987** - Precise Relative GPS Positioning with DIPOP 2.0. Presented to: IAG section II scientific Meetings: "Advanced Space Technology", IUGG XIX General Assembly, Vancouver, Canada.
- SANTERRE, R., FORGUES, I., MENDES, V. B. & LANGLEY, R. B. - 1995** - Comparison of Tropospheric Mapping Functions: Their Effects on Station Coordinates. IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado.
- SANTOS, M. C. - 1995** - Real-time GPS orbit improvement for GPS satellites. Department of Geodesy and Geomatic Engineering Technical Report No. 178, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.
- SANTOS, M. C., C. P. KRUEGER, C. B. SOUZA & A. PRADO - 1998**. Atividades do Laboratório de Geodésia Espacial do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. GIS Brasil 98 em CD-ROM, Módulo GPS, Sagres Editora, Curitiba, PR, 25 a 29 de maio.
- SILVA, N. C. C. - 1998** - Análise do Efeito dos Modelos de Refração Troposférica no Posicionamento Geodésico usando dados da RBMC. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 137 pp.
- SPIPKER JR., J. J. - 1996** - Tropospheric Effects on GPS. In Parkinson, B. W. & Spilker Jr. J. J. (Eds). *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume 1, Chapter 13, pp. 517 - 546, Cambridge, Massachusetts.

*Manuscript submitted November 6, 1998
Revised version accepted January 20, 2000*

EFFECT OF TROPOSPHERIC REFRACTION ON GPS GEODETIC POSITIONING

This paper describes an assessment of the effect of tropospheric delay on geodetic positioning. GPS data spanning various periods have been treated using a combination among the tropospheric models of Saastamoinen, Hopfield and Ifadis with the mapping functions of Saastamoinen, Hopfield, Ifadis, Lanyi and Herring. The GPS data used in this paper were collected by the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC). This network, as shown in Fig. 1, is composed of 9 stations occupied by dual-frequency GPS receivers, covering both the geographic and the climatic regions of Brazil. Two of these stations are from the International GPS Service for Geodynamics (IGS). For the present study three baselines were formed, namely, between Fortaleza (FORT) and Bom Jesus da Lapa (BOMJ), between Presi-

dente Prudente (UEPP) and Viçosa (VICO), and between Presidente Prudente (UEPP) and Curitiba (PARA). They are referred to as baseline 2, 4 and 5, respectively. Data covering 4 different time periods of 1997 have been chosen: period 1, from March 11th to 19th; period 2, from April 1st to 8th; period 3, from August 1st to 8th; and, period 4, from July 1st to 8th. Due to operational reasons, period 4 was not taken into consideration for baselines 2 and 5, as well as periods 1 and 2 for baseline 4. The GPS data were processed using the software suite DIPOP (Differential Positioning Package), developed by the University of New Brunswick, Canada. This suite is composed of 3 major parts: programs PREGO, PREDD and MPROC. Program PREGO carries out the pre-processing of the undifferenced phase, searching for cycle slips, as well as reformatting

the original GPS input data, in the Receiver Independent Format (RINEX). Program PREDD forms double differences, searches and corrects for double-difference cycle slips in the data series, and computes preliminary coordinates. In this processing step, IGS orbits are introduced. The program MPROC carries out the least-squares parametric adjustment, either in baseline or in network mode. This program also computes the tropospheric delay in either one of the combinations listed in Tab. 2. In this case, it uses as input either default meteorological data or meteorological data actually collected at the sites during the data gathering. The latter is the case for period 3. For the processing of the GPS data, two elevation angles were used, 10° and 15°. Also, the ionosphere-free combination between L1 and L2 carrier phases were formed, allowing for an elimination of the first order ionospheric delay. It should be mentioned that the GPS data were collected in a 30 seconds interval, daily. Figs. 2a to 2f show the differences between the adjusted lengths of baselines 2, 3 and 4, and the ones derived using their corresponding South-American Geocentric Reference System (SIRGAS) values, considered here as “bench marks”.

The symbol “3M” means “period 3 with meteorological data”. In all these figures, the graduation of the horizontal axis corresponds to the combinations shown in Tab. 2. It can be seen that less variability around an average value is found with the mapping functions of Herring, Ifadis and Lanyi, independent of the tropospheric model they combine with. Besides, Figs. 2e and 2f show that a better agreement with SIRGAS values is obtained when meteorological data collected at the sites are used, what may indicate that better results are obtained whenever this happens. The highest variability among the combinations shown in Figs 2a and 2b may be explained due to the fact that this is the longest baseline, in which one station (BOMJ) is in the semi-arid region whereas the other (FORT) is on the seashore, with a height difference of approximately 400 meters. It can be concluded that more homogeneous results are obtained from the combinations of tropospheric models with the mapping functions of Ifadis, Herring and Lanyi. Also, the use of in situ meteorological data may provide better results, independent on the elevation angle.

NOTA SOBRE OS AUTORES **NOTE ABOUT THE AUTHORS**

Marcelo Carvalho dos Santos

Received the B. Sc. degree in “Engenharia Cartográfica”, which is equivalent to Surveying Engineering, from the Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, in January 1983. He worked in the private sector and later on as lecturer in the Hydrography Advanced Course for Officers of the Brazilian Navy. He received his M. Sc. degree in Geophysics from the Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil, in May 1990. The title of his Master thesis is “NAVSTAR/GPS: Aspectos Teóricos e Aplicações Geofísicas”. He received his Ph.D. degree in Geodesy and Geomatics Engineering from the University of New Brunswick, Canada, in June 1995. The title of his Ph.D. dissertation is “On Real-time Orbit Improvement for GPS Satellites”. Currently, he works at the Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. His research interests are related to high-accuracy positioning with the Global Positioning System and its applications to Geodesy, Geophysics, Navigation and Cartography.

Nilo Cesar Coelho da Silva

Was undergraduated in “Engenharia Cartográfica” by Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, in January 1983. Since this year he has been working at Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, when he accumulated large experience in geodetic surveying. He received his M. Sc. degree in “Engenharia Cartográfica” from Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, in March 1998. The title of his Master Thesis is “Análise do efeito dos modelos de refração troposférica no posicionamento geodésico usando dados da RBMC”. His research interests are related to high-accuracy positioning with the Global Positioning System and its applications to Geodesy.

Leonardo Castro de Oliveira

Was undergraduated in “Engenharia Cartográfica” (which is equivalent to surveying Engineering.) by Universidade do Estado do Rio de Janeiro in December 1983. He obtained his M. Sc. degree in Geodetic Science from Universidade Federal do Paraná in February 1990. The title of his dissertation is “Refração Atmosférica nas Medidas Doppler”. He received his Ph. D. degree of in Engineering by Universidade de São Paulo, Departamento de Transportes, in December 1998. The title of his Ph. D. dissertation is “Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD69 – Uma proposta metodológica de transformação.” He is lecturer in the Departamento de Engenharia Cartográfica of Instituto Militar de Engenharia since 1986. He works in the undergrad and the graduate programs in Engenharia Cartográfica. His research interests are related with Geodesy, GPS and Adjusting of Observations.