

## Estudo Comparativo sobre o Efeito da Refração Troposférica no Posicionamento Geodésico

Nilo Cesar Coelho da Silva <sup>1</sup>  
 Marcelo Carvalho dos Santos <sup>2</sup>  
 Leonardo Castro de Oliveira <sup>3</sup>

<sup>1</sup> IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
 Departamento de Geodésia - Diretoria de Geociências  
 Av. Brasil, 15671 - Parada de Lucas  
 21241-051 - Rio de Janeiro - RJ  
 Tel.: (021) 391-8217 Fax: (021) 481-2747  
 ✉ [nilo@ibge.gov.br](mailto:nilo@ibge.gov.br)

<sup>2</sup> UFPR - Universidade Federal do Paraná  
 Departamento de Engenharia Cartográfica  
 Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
 Caixa Postal 19011  
 81531-990 - Curitiba - PR  
 Tel.: (041) 366-3150 Fax: (041) 266-2393  
 ✉ [mcsantos@geoc.ufpr.br](mailto:mcsantos@geoc.ufpr.br)

<sup>3</sup> IME - Instituto Militar de Engenharia  
 Departamento de Engenharia Cartográfica  
 Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha  
 22290-270 - Rio de Janeiro - RJ  
 Telefax: (021) 542-3598  
 ✉ [leonardo@aquarius.ime.eb.br](mailto:leonardo@aquarius.ime.eb.br)

<b>Conteúdo</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Introdução</li> <li>2. Refração e Modelagem da Troposfera</li> <li>3. Processamento</li> <li>4. Análise dos Resultados</li> <li>5. Conclusões</li> <li>6. Referências Bibliográficas</li> </ol>
-----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Resumo:** A correção da refração troposférica, que consiste em uma das principais fontes de erro que afetam as observações GPS, dá-se pela utilização de modelos troposféricos que estimam o valor do atraso provocado nos sinais. Este artigo apresenta um estudo comparativo sobre esse efeito na determinação geodésica da altitude de um ponto, no uso de modelos troposféricos e funções de mapeamento. Dados GPS coletados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de Sistema GPS (RBMC) foram utilizados. 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 foram tratados com o programa DIPOP. A análise do processamento indica que para cada uma das bases as combinações modelos e funções de mapeamento apresentaram comportamento diferenciado.

**Abstract:** 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 delay. 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 RBMC network have been used. This distribution also allowed that a station is located in every one of the Brazilian climate regions. The study was based on 3 baselines, in which the solutions, for each component, was analyzed by means of repeatability and comparison with SIRGAS values. Results indicate that the better performance was achieved using Ifadis, Herring and Lanyi mapping functions.

### 1. Introdução

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: Janes, Langley e Newby (1990), Mendes e Langley (1994, 1995), Santerre, Forgues, Mendes e Langley (1995), são alguns exemplos que podem ser citados, existem algumas particularidades entre eles. 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. Pode-se ainda destacar uma terceira, em 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, de 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 dados observados nas estações da RBMC. Verificar-se, a partir da análise dos resultados obtidos, os mais adequados aos tipos climáticos do país, ou ao país como um todo, tomando-se como referência os caracteristicamente encontrados no Brasil: equatorial, semi-árido, tropical, tropical de altitude e subtropical (Assis & Pontes, 1971), que encontram-se representados nos locais das estações da rede.

## 2. 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 vapor d'água é extremamente variável temporal e espacialmente, o que torna complexa sua quantificação na composição da atmosfera devido ao 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 e Chorley, 1995). Quando se trata do estudo da refração de ondas 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).

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 a refração atmosférica, tanto a relacionada a atmosfera ionizada (refração ionosférica), quanto a atmosfera eletricamente neutra (refração troposférica), esta última de interesse neste trabalho.

A refração é definida, 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. 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  $n$  apresenta uma variação pontual. Desse modo, a distância  $S$  efetivamente percorrida por uma onda eletromagnética, quando propagada pela atmosfera terrestre, entre dois pontos A e B quaisquer, é dada por:

$$S = \int_A^B n ds . \quad (1)$$

Define-se como atraso troposférico a variação  $S_T$  entre a distância efetivamente percorrida pela onda eletromagnética e a distância geométrica entre as antenas emissora e receptora. 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 atmosfera eletricamente neutra, isto é pela parte da atmosfera que não é ionizada (Mendes & Langley, 1995). A Troposfera pode ser dividida em duas componentes: uma seca (ou hidrostática) e outra úmida. A componente seca é relacionada a composição do ar seco 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.

O atraso troposférico  $S_T$  pode ser escrito na forma (Silva, 1997):

$$\Delta S_T = \Delta S_{T_1} + \Delta S_{T_2} = 10^{-6} \int_0^{h_1} N_1 ds + 10^{-6} \int_0^{h_2} N_2 ds , \quad (2)$$

onde  $N$  representa o índice de refração, e os índices 1 e 2 as componentes seca e úmida, respectivamente.

Na equação (2),  $\Delta S_T$  é o atraso troposférico sofrido por um sinal na direção do zênite. Todavia, o sinal GPS é dependente do 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:

$$\Delta S_T(E) = F(E) \cdot \Delta S_T , \quad (3)$$

onde  $E$  é o ângulo de elevação, e  $F(E)$  a função de mapeamento. Como as funções de mapeamento são associadas às componentes seca e úmida da refratividade tem-se, também genericamente, que:

$$\Delta S_T(E) = F_1(E) \cdot \Delta S_{T_1} + F_2(E) \cdot \Delta S_{T_2} . \quad (4)$$

Para a determinação do atraso troposférico faz-se uso de modelos específicos. calculados tanto em teorias, como nas leis que regem a

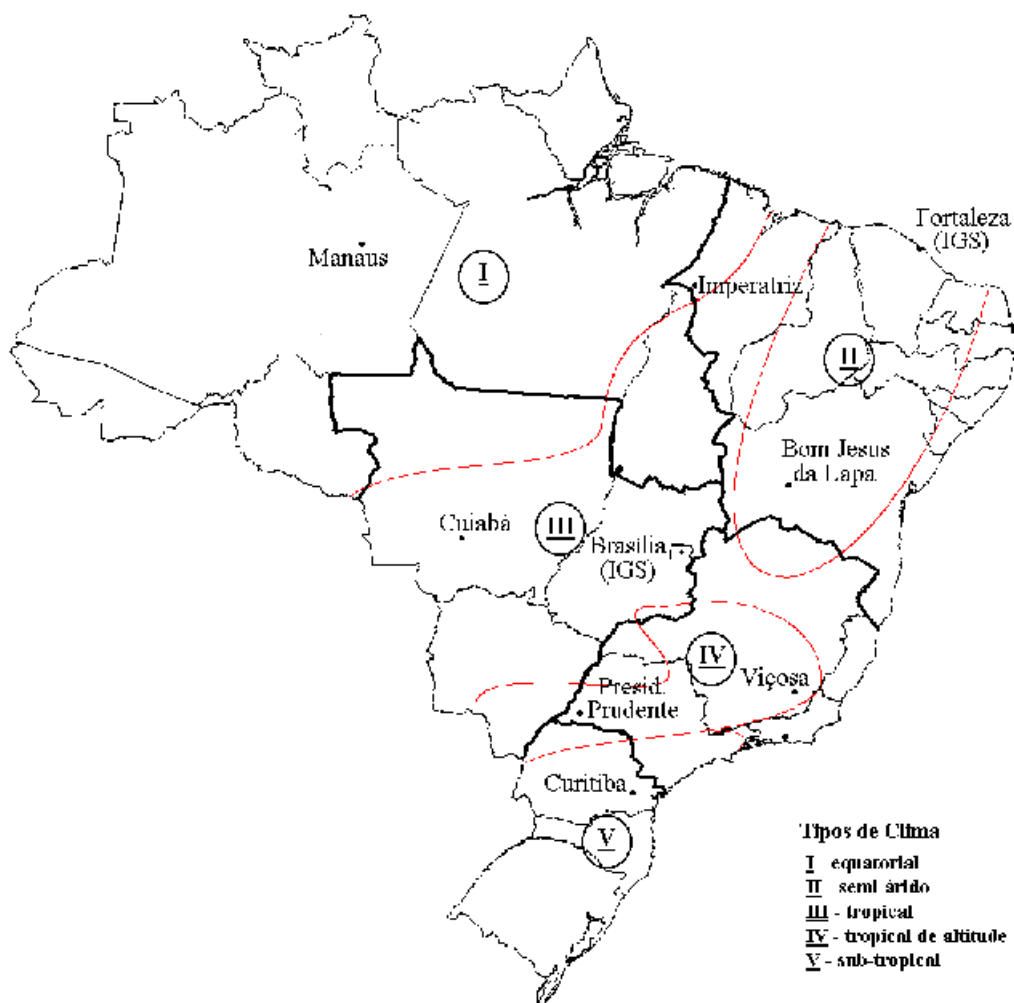
refração de ondas eletromagnéticas, e a variação radial do índice de refração na atmosfera, bem como em simplificações, como considerar a Terra como uma esfera e as hipóteses que são fundamentadas nas leis que descrevem o comportamento dos gases sob condições de temperatura e pressão.

Existem vários modelos que procuram estimar o atraso troposférico que podem ou não ser associados a funções de mapeamento. Neste trabalho, foram utilizados os de Hopfield (1969), Saastaminen (1973), Lanyi (1984), Herring (1992) e Ifadis (1986). Miore detalhes sobre eles podem ser encontrados em Silva (1997).

### 3. Processamento

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GPS (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 Figura 073f1 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).



**Fig. 1:** RBMC e as Regiões Climáticas

A localização das estações da RBMC permitiu, inicialmente e para efeito desse trabalho, o estabelecimento de 5 (cinco) linhas de base conforme a Tabela 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.

**Tabela 1 -** Linhas de base por região climática

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

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

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 1172 km; além de ter a estação Fortaleza como a única das 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, 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.

Δεπιδο αο ινίχιο δα οπερα| @ο δασ εστα| J εσ εμ δατασ διφερενχιαδασ, α βασε 4 ν@ο απρεσεντα δαδοσ νοσ περιόδοσ 1 ε 2. Παρα ασ βασεσ 2 ε 5 ν@ο φοι χονσιδεραδο ο περιόδο 4, δαδα α εξιγ|ιδαδε δε τεμπο παρα εφετυαρ ο προχεσσαμεντο.

Οσ δαδοσ χολεταδοσ παρα χαδα υμ δοσ διασ εμ χαδα υμ δοσ περιόδοσ φοραμ προχεσσαδοσ οβεδεχενδο-σε οσ σεγυιντεσ χριτρίοσ:

- @νγυλοσ δε ελεπα| @ο: 10 ε 15 γραυσ;

- δυρα| @ο δα σε| @ο: δι(ρια);

- ιντερπαλο δε αθυισι| @ο: 30 σεγυνδοσ (παδρ@ο δα PBMX δ|ποχα δοσ δαδοσ υτιλιζαδοσ);

- σατ|λιτεσ υτιλιζαδοσ: τοδοσ οσ διασπονίπεισ;

- χομβινα| @ο λινεαρ: ιονοσπηρε-φρεε.

Νο προχεσσαμεντο δοσ δαδοσ χολεταδοσ να PBMX ε διασποινιζαδοσ παρα εστα πεσθυισα, φοι υτιλιζαδο ο σοφτωαρε ΔΙΠΟΠ. Εσσε σιστεμα, δεσενπολπιδο εμ λινγυαγεμ ΦΟΡΤΡΑΝ 77, πελα Υνιπερσιδαδε δε Νεω Βρυνσσαικ, Χαναδ(, εστιμα χοορδεναδασ α παρτρ δε οβσερβα| J δε δε φασε δα ονδα πορταδορα, ε|χομποστο πορ τρι σ προγραμασ:

ΠΡΕΓΟ - ΠΡΕπροχεσσινγ οφ ΓΠΣ Οβσερπατιονσ,

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 identificados as descontinuidades 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, Craymer, Kleusberg, Langley, Parrot, Quek, Vanicek, Wells & Wilkins, 1987; Santos, 1995).

Dentro do contexto do tema tratado neste artigo, deve-se ressaltar que o programa MPROC também computa o atraso troposférico. Para tal, é preciso informar o modelo e a função de mapeamento que será utilizada, 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 Tabela 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.

Tabela 2 - Combinações modelos e funções de mapeamento

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

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. Foram utilizados no período 3 dados meteorológicos coletados pelo o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, através de estações meteorológicas deste Instituto situadas nos municípios onde se encontram as estações da RBMC, em três horários distintos: 12, 18 e 24 horas.

#### 4. 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 altitudes 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. Foi considerada como a estação remota para a:

- base 2: Bom Jesus da Lapa (BA);
- base 4: Viçosa (MG);
- base 5: Presidente Prudente (SP).

As Figuras. 073f2, 073f3, 073f4, 073f5, 073f6 e 073f7 apresentam as diferenças, por combinação e por período. 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 Tabela 2. As Figuras. 073f2 e 073f3 referem-se a base 2, entre Fortaleza e Bom Jesus da Lapa, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respectivamente; as Figuras. 073f4 e 073f5 referem-se a base 4, entre Presidente Prudente e Viçosa, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respectivamente; e as Figuras. 073f6 e 073f7 referem-se a base 5, entre Curitiba e Presidente Prudente, para os ângulos de elevação de 10 e 15 graus, respectivamente.

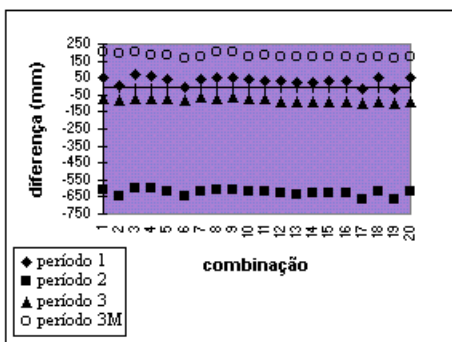


Fig. 2: Base 2: Diferença para o SIRGAS com 10 graus de elevação

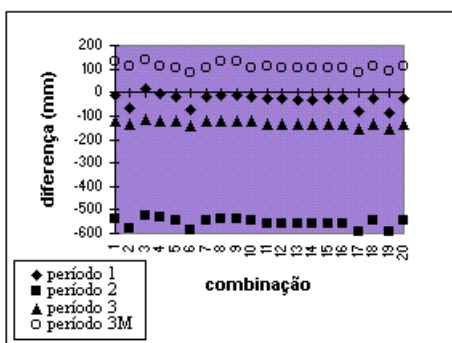


Fig. 3: Base 2: Diferença para o SIRGAS com 15 graus de elevação;

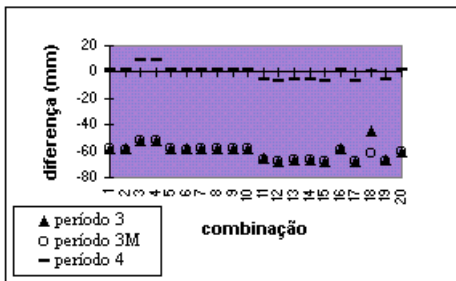


Fig. 4: Base 4: Diferença para o SIRGAS com 10 graus de elevação;

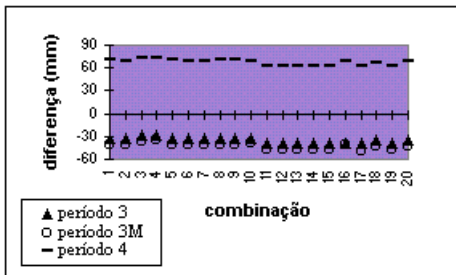


Fig. 5: Base 4: Diferença para o SIRGAS com 15 graus de elevação;

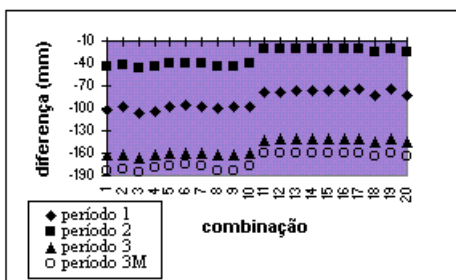


Fig. 6: Base 5: Diferença para o SIRGAS com 10 graus de elevação;

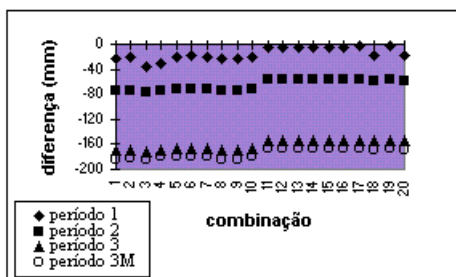


Fig. 7: Base 5: Diferença para o SIRGAS com 15 graus de elevação;

Pode-se verificar pelas figuras que na base 2 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 e do ângulo de elevação. Na base 4 observa-se que, para o ângulo de elevação de 10 graus, uma maior variabilidade dos resultados em contrapartida, para o ângulo de elevação de 15 graus a tendência apresentada é de uma melhor concordância das soluções. A base 4 apresenta também, a melhor concordância entre as soluções com e sem a introdução de dados meteorológicos locais. Na base 5 fica bem caracterizada a influência dos modelos úmidos, ou seja, as combinações de 1 a 10 os modelos úmidos são Hopfield ou Saastamoinen, as de 11 a 20 o modelo úmido é Ifadis, esses dois grupos apresentam concordância acentuada nos resultados das combinações integrantes, esse fato pode ser devido a diferença altimétrica entre as estações entretanto, isso ainda é motivo de investigação.

## 5. Conclusões

Do trabalho realizado, pode-se ter como principal conclusão o fato de que as determinações geodésicas de altitude com GPS, podem depender das condições das linhas de base observadas, isto é, ângulo de elevação do sinal, variação altimétrica entre as estações ou mesmo as características meteorológicas dos locais das observações. 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, a concordância encontrada, na base 4, entre as soluções utilizando-se ou não dados meteorológicos locais pode ser devida a esta base ser a única inserida em uma mesma região climática o que, de uma forma geral, é perfeitamente plausível do ponto de vista do comportamento da

refração.

## 6. Referências Bibliográficas

- Assis, M. S. & Pontes, M. S.** - *Comportamento do Índice de Refração da Troposfera em Regiões Tropicais e Equatoriais*. 1971. Revista Brasileira de Tecnologia, vol. 2, pp. 175-180.
- Barry, R. G. & Chorley, R. J.** - *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, London and New York, Sixth Edition, Reprinted, 1995.
- Black, H. D. & Eisner, A.** - *Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects*. 1984. Journal of Geophysical Research, volume 89, nº D2, pp. 2616 - 2626.
- Brunner, F. K.** - *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements: A progress Report*. 1988. In Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements, Brunner, F. K. (ed.). School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia.
- Chao, C.C.** - *A Model for Tropospheric Calibration from Daily Surface and Radiosonde Balloon Measurement*. 1972. Jet Propulsion Laboratory, Technical Memorandum, pp. 391-350.
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E. & Elgered, G.** - *Geodesy by radio interferometry : Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length*. 1985. Radio Science, volume 20, nº 6, pp. 1593 - 1607.
- Hecht, E.** - *Óptica*. (José Manuel N. V. Rebordão., trad.). Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991.
- Jong, C. D.** - *Satellite Orbits and Atmospheric Effects*. 1991. Reports of the Faculty of Geodetic Engineering Mathematical and Physical Geodesy nº 91.1, Delft University of Technology, Netherlands.
- Fortes, L. P. S.** - *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. 1997. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 152 pp.
- Herring, T. A.** - *Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data*. 1992. 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, nº 36, The Netherlands.
- Hopfield, H. S.** - *Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data*. 1969. Journal of Geophysical Research, vol. 74, nº 18, pp. 4487-4499.
- Ifadis, I.** - *The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling The Elevation Dependence on a Global Scale*. 1986. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, Technical Report nº 38L.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE.** - *Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul*, Relatório Final. Grupos de Trabalho I e II. 1997. Rio de Janeiro.
- Janes, H. W., Langley, R. B. & Newby, S. P.** - *Analysis of Tropospheric delay prediction models: Comparisons with Ray-Tracing and implications for GPS relative positioning (A Summary)*. 1990. Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, GPS' 90. Ottawa, Canada.
- Joshi, C. S.** - *Refraction Effects of Atmosphere on Geodetic Measurements to Celestial Bodies*. 1973. Reports of Department of Geodetic Science, nº 192, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Kleusberg, A., Georgiadou, Y., van den Heuvel, F. & Heroux, P.**, *Single and Dual Frequency GPS data Preprocessing with DIPOP 2.1*. 1989. Technical Memorandum - 21, Geodetic Research Laboratory, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- Lanyi, G.** - *Tropospheric Delay Affecting Radio Interferometry TDA*. 1984. Progress Report, pp. 152-159.
- Mendes, V. B. & Langley, R. B.** - *Zenith Wet Tropospheric Delay Determination Using Prediction Models: Accuracy Analysis*. 1995. Cartografia e Cadastro, nº 2, pp. 41-47.
- Mendes, V. B. & Langley, R. B.** - *A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data*. 1994. Paper presented at KIS94, International Symposium on Kinematics Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada.
- Nimer, E.** - *Modelo Metodológico de Classificação de Climas*. 1979. Revista Brasileira de Geografia 41 (4), pp. 59 - 89, Rio de Janeiro.
- Saastamoinen, J.** - *Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction*. 1973. Bulletin G'eodesique, nº 167, pp. 13-34.
- Santerre, R., Raymer, M. R., Kleusberg, A., Langley, R. B., Parrot, D., Quek, S. H., Vanicek, P., Wells, D. E. & Wilkins, F.** - *Precise Relative GPS Positioning with DIPOP 2.0*. 1987. Presented to: IAG section II scientific Meetings: "Advanced Space Technology", IUGG XIX General Assembly, Vancouver, Canada.
- Santerre, R., Fergues, I., Mendes, V. B. & Langley, R. B.** - *Comparison of Tropospheric Mapping Functions: Their Effects on Station Coordinates*. 1995. IUGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado.
- Santos, M.C., Krueger, C.P., Ferreira, L.D.D., Prado, A. e Souza, C.B.** - *Atividades do Laboratório de Geodesia Espacial do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR*. 1998. GIS Brasil 98 em CD-Rom, Sagres Editora, Curitiba, PR.
- Silva, N. C. C.** - *Análise do Efeito dos Modelos de Refração Troposférica no Posicionamento Geodésico usando dados da RBMC*. 1998. Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 137 pp.
- Spilker JR., J. J.** - *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, 1996.

**Van der Wal, A. D.** - *Evaluation of Strategies For Estimate Residual Neutral - Atmosphere Propagation Delay In High Precision Global Positioning System Data Analysis.* M. Sc. E.. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering. 1995 New Brunswick, Canada, 106 pp.

---

