

VARIABILIDADE SAZONAL DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO SOBRE A AMÉRICA DO SUL

LUIZ FERNANDO SAPUCCI¹
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO²
LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.
{sapucci; machado}@cptec.inpe.br

²Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP
galera@fct.unesp.br

RESUMO - O emprego das previsões dos valores do atraso zenital troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*) obtidas a partir da Previsão Numérica de Tempo (PNT), denominada modelagem dinâmica, apresenta-se como uma alternativa para modelar e, portanto, prever os efeitos dos gases atmosféricos nos sinais de radiofrequência em tempo real. Desde março de 2004 essa modelagem encontra-se operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) gerando previsões do Z_{TD} para toda a América do Sul. O objetivo desse trabalho é investigar a variabilidade sazonal do Z_{TD} utilizando os valores das componentes hidrostática e úmida fornecidos pela modelagem dinâmica. Na análise realizada é possível verificar quais os fatores responsáveis pela variabilidade sazonal do Z_{TD} , o impacto de cada um deles e o período em que a ocorrência dos mesmos é mais freqüente. Os resultados obtidos tornam evidente a necessidade de uma modelagem adequada da componente úmida para se obter os melhores resultados no posicionamento geodésico. Como a modelagem Dinâmica é sensível as flutuações da componentes úmida, ela é, portanto, uma boa alternativa para a modelagem do Z_{TD} .

ABSTRACT - The predictions of Zenithal Tropospheric Delay (Z_{TD}) values from Numeric Weather Prediction (NWP), denominated dynamic modeling, is an alternative to model the atmospheric gases effects in the radio-frequency signals in real time. The Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) has generated operationally prediction of Z_{TD} values to South American Continent since March, 2004. The aim of this paper is to investigate the Z_{TD} seasonal variability using values of hydrostatic and wet components from dynamic modeling. In this analysis is possible to access the impact of the responsible factors by Z_{TD} seasonal variability. This analysis make evident two points. The first is the usage of one appropriated wet component modeling to obtain the best results in the geodesic positioning. The second point is that dynamic modeling is able to access the wet component oscillations. These points reveal that dynamic modeling is a good alternative to model Z_{TD} .

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera eletricamente neutra é a camada localizada entre a ionosfera e a superfície da Terra, com altura de até 50 km. Nela está incluída a troposfera, tropopausa, estratosfera e parte da estratopausa. O gradiente vertical da concentração dos gases presente nessa camada gera nos sinais de radiofrequência que a atravessam um atraso no tempo de propagação e, por consequência, erros nas coordenadas finais caso o mesmo não seja considerado e minimizado (MONICO,

2000). Como a maior concentração dos gases está na troposfera, tais efeitos são comumente denominados pelos geodestas de troposféricos (SPILKER, 1994).

Ao contrário do que ocorre na ionosfera, para frequências menores que 30 GHz, o atraso troposférico independe da frequência do sinal, e para minimizar seus efeitos sobre os sinais de radiofrequência utiliza-se uma modelagem empírica (SPILKER, 1994). A primeira etapa dessa modelagem é o emprego das funções de mapeamento (DAVIS *et al.*, 1985; NIELL, 1996 e 2001; BOEHM e SCHUH, 2004) as quais são responsáveis

por converter o atraso na direção satélite-receptor para a direção zenital, obtendo com isso o atraso zenital troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*). A segunda etapa consiste em aplicar modelos teóricos que relacionam o Z_{TD} com valores de temperatura pressão e umidade na superfície terrestre, medidos durante a coleta GPS ou obtido a partir de uma atmosfera padrão. Para as aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites que utilizam curtos intervalos de tempo de coleta de dados e não requerem alta precisão (m), tais modelos são suficientes. Normalmente são aplicações GPS que utilizam apenas a pseudodistância. No entanto, eles são inapropriados para aplicações em tempo real, tal como a navegação aérea, que requerem melhor nível de precisão (dm), pois tais modelos são ineficientes na modelagem das oscilações do Z_{TD} .

A utilização das previsões dos valores do Z_{TD} , geradas por modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (KINTER *et al.*, 1997), denominada modelagem dinâmica (SAPUCCI *et al.*, 2007), apresenta-se como uma alternativa para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais de radiofrequência para aplicações em tempo real. Essa modelagem encontra-se operacional para regiões da América do Sul no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/html/docs/ztd/zenital.htm>).

Ela destina-se às aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites, como o GPS, GLONASS, entre outros, que necessitam boa precisão em tempo real, bem como outras atividades espaciais que empregam sinais de radiofrequência, como, por exemplo, na determinação de órbitas de satélites em geral. Esse tipo de modelagem troposférica já tem sido explorado atualmente em outras regiões do globo e tem proporcionado bons resultados (JENSEN, 2003; JUPP *et al.*, 2003; SCHULER *et al.*, 2000).

Os objetivos desse trabalho envolvem o estudo da variabilidade temporal do Z_{TD} empregando valores do Z_{TD} gerados pela modelagem dinâmica realizada operacionalmente no CPTEC nas diferentes estações sazonais do ano.

2 VALORES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO A PARTIR DE MODELOS DE PNT

A influência dos gases presentes na troposfera causa mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas que por ela se propagam. Esse efeito faz com que o caminho efetivamente percorrido seja diferente da distância geométrica entre o satélite e o receptor. Para facilitar a modelagem das variações do atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (DAVIS, *et al.*, 1985; NIEL, 1996). Por intermédio delas, as variações desse atraso em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Nos últimos anos tem sido verificado um bom avanço na qualidade dos

valores obtidos pelas funções de mapeamento, em especial com o desenvolvimento de novas versões ao empregar a PNT. Um exemplo é a função de mapeamento de Vienna (BOEHM e SCHUH, 2004) e um outro é a função de mapeamento isobárica (NIELL, 2001).

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, Z_{TD} é dividido em duas componentes: úmida (Z_{WD} - *Zenithal Wet Delay*), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (Z_{HD} - *Zenithal Hydrostatic Delay*), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. O atraso zenital troposférico da componente hidrostática depende apenas da densidade do ar atmosférico. A partir da suposição do equilíbrio hidrostático, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão à superfície (P_0), da latitude do local (ϕ), e da altitude (h_0) em quilômetros. A expressão para a determinação do Z_{HD} é dada pela equação (DAVIS *et al.*, 1985):

$$Z_{HD} = \frac{(2,27683157 \times 10^{-3}) P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\phi - 0,00028h_0)} \quad (1)$$

Quanto aos valores do Z_{WD} podem ser obtidos a partir da seguinte equação (SPILKER, 1994):

$$Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh, \quad (2)$$

onde e é a pressão parcial do vapor d'água e T é a temperatura, ambos variando em função da altitude (h), Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água, $k_2' = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $k_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica. Os valores de e estão totalmente relacionados com a razão de mistura entre o vapor d'água e os gases hidrostáticos em toda a coluna atmosférica, o que torna difícil sua determinação a partir de medidas à superfície. Apesar de ter influência menor do que a componente hidrostática, representando cerca de 10% do atraso zenital troposférico, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas (SPILKER, 1994).

As previsões dos valores do Z_{WD} podem ser obtidas ao aplicar os perfis de temperatura e razão de mistura previstos pelo modelo de PNT (para um ponto "A" qualquer da grade desse modelo), em uma integração numérica na equação 2. De forma similar, as previsões do Z_{HD} são obtidas ao aplicar os valores da pressão atmosférica na superfície também previstos pelo modelo e as coordenadas desse mesmo ponto na equação 1. Somando os valores de ambas as componentes obtêm-se as previsões do atraso zenital troposférico (Z_{TD}) para esse ponto "A". Fazendo isso para todos os pontos da grade do modelo obtêm-se uma malha de informações sobre a distribuição espacial dessa variável. A partir de interpolação é possível obter

previsões do Z_{TD} para qualquer outro ponto interno à grade, as quais tornam possível analisar a variabilidade sazonal dessa quantidade na América do Sul.

3 VARIABILIDADE DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL

Com os campos do Z_{WD} e do Z_{HD} gerados diariamente pela modelagem dinâmica é possível verificar as características mais importantes da variabilidade do Z_{TD} sobre a América do Sul. Para isso, os campos das condições iniciais geradas no período de um ano (junho de 2004 a maio de 2005) foram divididos de acordo com as estações sazonais e um campo de valores médios das componentes do Z_{TD} foi calculado para cada uma delas. Como nas ciências atmosféricas essa condição inicial é denominada por *análise*, essa mesma denominação será utilizada aqui. As *análises* geradas para os meses de julho, agosto e setembro de 2004 foram utilizadas para compor um campo dos valores médios para o inverno. O mesmo foi feito para a primavera ao utilizar as *análises* geradas para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2004. Para o verão foram utilizadas as *análises* geradas para os meses

de janeiro, fevereiro e março de 2005, enquanto que para o outono foram utilizadas as *análises* dos meses de junho de 2004, abril e maio de 2005. Como no processo de obtenção dos campos das *análises* as observações participam fortemente ponderadas, tais campos se aproximam da realidade física e representam bem a variabilidade das componentes do Z_{TD} .

Na fig. 1 são apresentados campos médios do Z_{WD} por meio de esquemas de cores, considerando as diferentes estações do ano. Numa primeira análise da fig. 1 observa-se a grande variabilidade sazonal dos valores do Z_{WD} sobre a América do Sul. A diferença mais acentuada é entre o inverno e o verão. Essa variabilidade está relacionada com os perfis de temperatura e umidade. Há diversos fatores que influenciam tais quantidades entre os quais está o relevo da superfície da Terra, pois nas regiões de altitudes elevadas há baixa concentração de vapor d'água atmosférico, e, por conseqüência, valores reduzidos do Z_{WD} . Essa baixa concentração está associada com as baixas temperaturas predominante nessas regiões. Isso é o que ocorre sobre a região dos Andes onde, constantemente, os valores do Z_{WD} são bastante reduzidos.

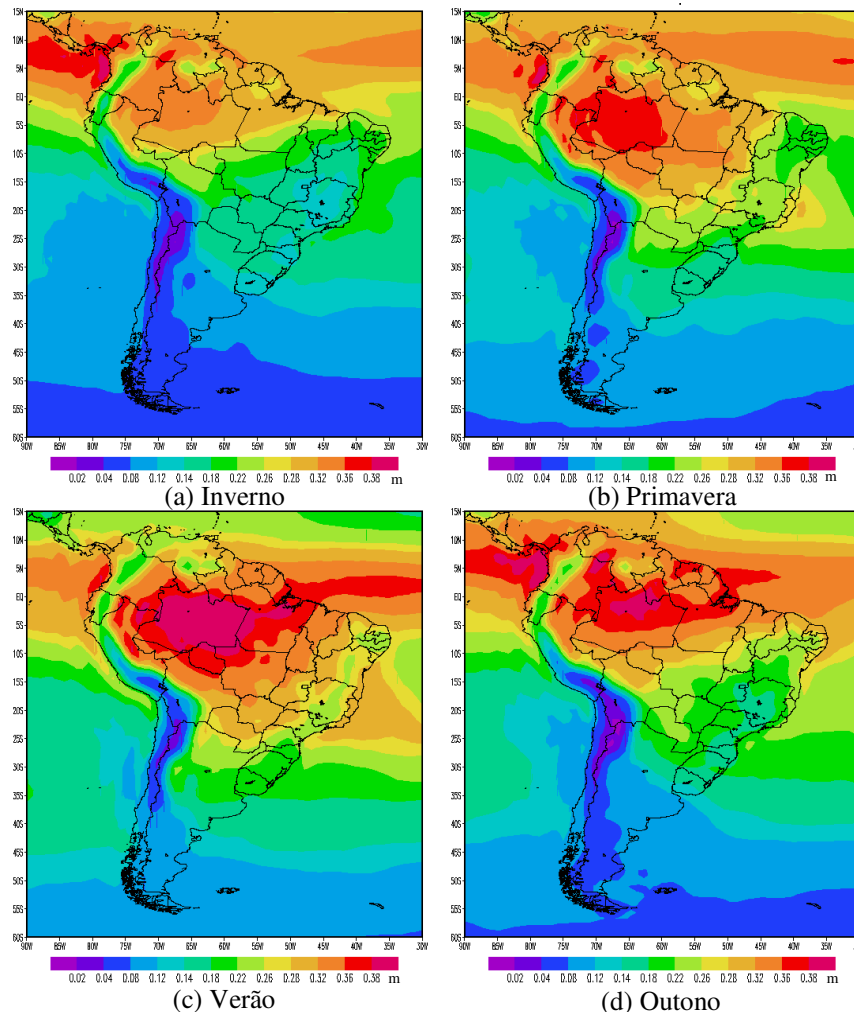


Fig. 1 - Campos sazonais dos valores médios do Z_{WD} sobre a América do Sul.

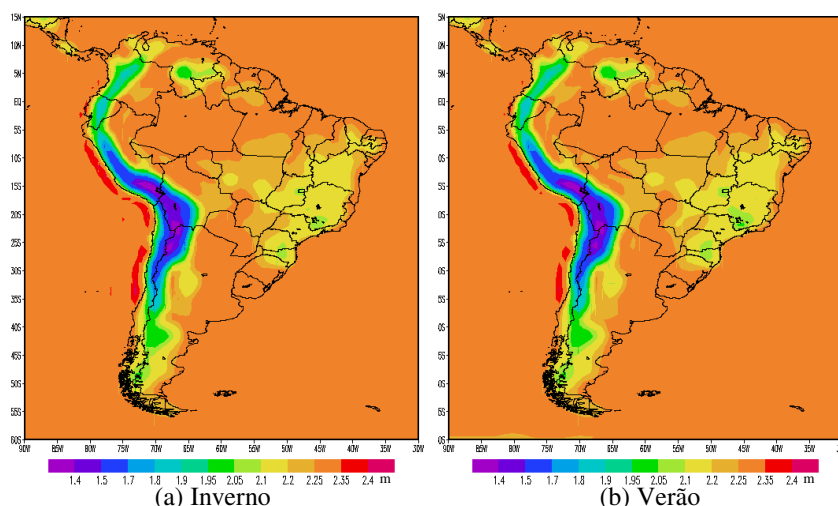


Fig. 2 - Campos dos valores médios do Z_{HD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b).

Um outro fator é o aumento da capacidade do ar em armazenar vapor d'água nas áreas de alta temperatura da região tropical, principalmente na Amazônica, gerando uma grande concentração de umidade na atmosfera e, por conseqüência, valores do Z_{WD} bastante elevados, principalmente durante o verão e outono (figuras 1c e 1d). Uma outra região com forte variabilidade do Z_{WD} é a região do semi-árido nordestino (área central da região Nordeste do Brasil). Nessa região, a concentração de vapor é pequena, sendo maior durante o período de chuvas, que se concentra principalmente durante o verão (fig. 1c).

Um fator importante associado à variabilidade dos valores do Z_{WD} é a passagem de sistemas de ar frio, conhecidos como frentes frias, provenientes da Antártida. Esses sistemas geram quedas da temperatura e aumento da pressão, ocasionando diminuição da concentração de vapor d'água atmosférico devido à baixa temperatura e a condição de subsidência (ar de altos níveis mais seco que descende na atmosfera em regiões de alta pressão), gerando uma secagem da atmosfera. O deslocamento desses sistemas é um fenômeno periódico e ocorre durante todo o ano. No entanto, durante o verão, de uma forma geral, tais sistemas não têm força suficiente para empurrar as massas de ar quente formadas pela alta incidência de radiação solar e são por elas desviadas para o oceano Atlântico. Isso já não ocorre durante o inverno, pois ao contrário do que ocorre no verão, o sistema não encontra tanta resistência sobre a América do Sul, podendo chegar até a influenciar o clima na região Nordeste do Brasil.

Um outro fator associado com a variabilidade do Z_{WD} é a ocorrência durante o verão de um fenômeno que os meteorologistas chamam de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA DIAS, 1995). Esse fenômeno está associado com uma zona de convergência de umidade provenientes da região Amazônica e do Atlântico Sul e é caracterizado por uma

extensa banda de precipitação e forte nebulosidade quase estacionária. A ZCAS é o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas no Brasil durante o verão, o qual apresenta grande persistência e pode, por influência dos sistemas de ar frio provenientes da região antártica, permanecer atuando por diversos dias, provocando precipitação generalizada. Na área em que a ZCAS atua, que vai desde a região Amazônica até o oceano Atlântico Sul, os processos físicos associados à sua ocorrência são de forte impacto nos valores do Z_{WD} , principalmente pelo fluxo de umidade gerado nessa região.

Quanto à circulação geral atmosférica, existem regiões subtropicais de alta pressão atmosférica localizadas no oeste do oceano Pacífico Sul e no oceano Atlântico Sul e outras de baixa pressão que exercem influência sobre os valores de pressão na América do Sul em todas as estações do ano (SATYAMURTY *et al.*, 1998). A alta pressão do Pacífico é mais forte no verão e a alta do Atlântico é mais forte no inverno, e são de mesma intensidade nas estações de transição. Como efeito, sobre a América do Sul observa-se a instalação de uma alta pressão durante o inverno e baixa pressão no verão. Como os valores de temperatura e umidade estão altamente correlacionados com os valores de pressão, essa variação anual da pressão tem um forte impacto nos valores das componentes do Z_{TD} , principalmente na componente hidrostática.

Esses fenômenos apontados acima têm um efeito bastante significativo nos valores Z_{TD} , sendo os maiores responsáveis pela variabilidade sazonal dessa variável. Tal efeito pode ser claramente verificado ao comparar a fig. 1a (inverno) com a fig. 1c (verão) onde os efeitos de tais fenômenos influenciaram consideravelmente os valores médios do Z_{WD} em praticamente todo o território brasileiro.

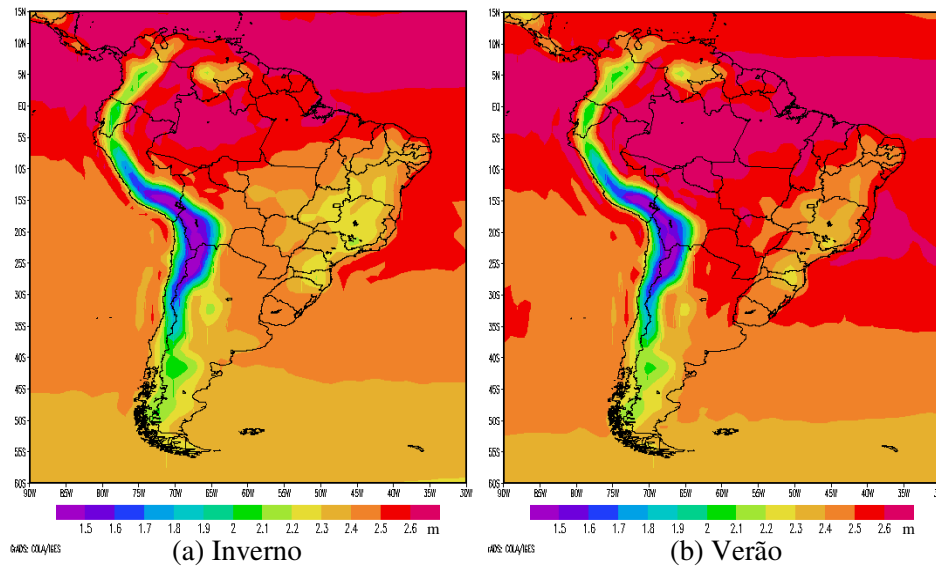


Fig. 3 – Campos dos valores médios do Z_{TD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b).

Espacialmente, a variabilidade dos valores do Z_{HD} está muito correlacionada com a altura da superfície terrestre, enquanto que a variabilidade temporal dessa componente está associada com as variações da pressão atmosférica. As oscilações dos valores do Z_{HD} são maiores com relação à posição geográfica do que sazonalmente. Espacialmente verifica-se que a variabilidade dos valores do Z_{HD} está bastante correlacionada com a altitude da superfície da Terra, pois os menores valores encontram-se sobre a cordilheira dos Andes e outras regiões serranas. Sazonalmente, o fator mais relevante para as oscilações dos valores da componente hidrostática são as variações dos valores de pressão sobre a América do Sul. Na fig. 2 são apresentados os valores médios do Z_{HD} para o inverno e o verão. Como a escala utilizada nessa figura foi calculada considerando as oscilações em função da posição geográfica, não privilegia as oscilações geradas pela variação sazonal dos valores de pressão. Observa-se nessa figura que, espacialmente, apesar dessas estações serem as mais extremas do ponto de vista climatológico, os valores médios do Z_{HD} são bastante semelhantes, pois em escala continental a variação temporal da pressão é menos significativa que a influência do relevo para os valores dessa variável.

Na fig. 3 são apresentados os campos dos valores médios do Z_{TD} para o inverno e para o verão, com o objetivo de verificar a variabilidade resultante da soma das componentes hidrostática e úmida. Ao comparar esses campos com os apresentados nas figuras 1 e 2, nota-se que os valores da componente úmida são os principais responsáveis pela variabilidade do Z_{TD} . Esse resultado torna evidente dois pontos principais nesse estudo. O primeiro é a necessidade de uma modelagem adequada da componente úmida para se obter melhores resultados no posicionamento geodésico. O segundo é que a modelagem Dinâmica, aqui proposta, é sensível a

essas flutuações e, portanto, uma boa alternativa para a modelagem do Z_{TD} .

4 CONCLUSÕES

Na Modelagem Dinâmica obtêm-se previsões das componentes do Z_{TD} empregando os campos de temperatura, pressão e umidade gerados por um modelo de PNT a partir de uma condição inicial onde as observações são consideradas. Previsões do Z_{TD} são geradas operacionalmente pelo CPTEC-INPE com o objetivo de oferecer a comunidade usuária das técnicas de posicionamento por satélites uma alternativa para minimizar os efeitos dos gases atmosféricos nos sinais de radiofrequência.

Uma análise da variabilidade das componentes hidrostática e úmida do Z_{TD} foi apresentada, bem como uma discussão dos principais fatores que exercem influência nessa variação sobre a América do Sul. Nessa análise observou-se que há diversos fatores que exercem influência significativa na oscilação temporal e espacial dessas variáveis. A componente úmida é influenciada significativamente pelas oscilações dos valores de temperatura e umidade, os quais são influenciados pelo relevo, pelos sistemas de ar frio provenientes da Antártida e a ocorrência das ZCAS. A componente hidrostática é influenciada pela variação dos valores de pressão atmosférica, a qual está relacionada com o relevo e a ocorrência de zonas de alta pressão sobre a América do Sul. Os resultados apresentados tornaram evidentes a necessidade de uma modelagem adequada da componente úmida para se obter melhores resultados no posicionamento geodésico e que a modelagem Dinâmica é sensível as flutuações da componentes úmida e, portanto, uma boa alternativa para a modelagem do Z_{TD} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOEHM, J.; SCHUH, H. **Vienna mapping functions in VLBI analyses.** *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984, 2004.
- DAVIS, JL.; HERRING, TA.; SHAPIRO, I.; ROGERS, AE.; ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length.** *Radio Sci.*, vol. 20, 1593-1607, 1985.
- JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. **Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning.** In: ION GPS 2003 -16th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Portland, Oregon, 2003.
- JUPP, SM.; POWE, J.; OWEN, J.; BUTCHER. **Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global Positioning Applications.** Defense Science and Technology Laboratory, UK, 2003.
- KINTER, J.L. *et al* **The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model.** Volume1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51. Calverton, USA, 1997.
- MONICO, JFG. **Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações.** Editora UNESP, 291 p., 2000.
- NIELL, AE. **Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths.** *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.
- _____. **Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models.** *Phys. Chem. Earth*, v. 26, p.475-480, 2001.
- SAPUCCI L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. **Previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul: variabilidade sazonal e avaliação da qualidade.** Submetido à Revista Brasileira de Cartografia, 2007.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A., SILVA DIAS, P. L. **Meteorology of the Tropics: South America.** In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Edited by David J. Koroly and Dayton G. Vicent. American Meteorological Society, Vol. 27. No. 49, 1998.
- SILVA DIAS, P. L., **A Zona de Convergência do Atlântico Sul.** Universidade de São Paulo. 1995.
- SPLIKER, J.; J. JR. **Tropospheric Effects on GPS.** American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol. 1 Capitol 13, pg. 517 – 546, 1994.
- SCHÜLER, T.; CHÜLER HEIN, T.G.W.; EISSFELLER, B. **Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS Troposphere.** In: ION GPS 2000 -13th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Salt Lake City. 2000.