

## ESTIMATIVA DO VAPOR D'ÁGUA INTEGRADO UTILIZANDO DADOS DE ESTAÇÕES GNSS TERRESTRES E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS: APLICAÇÕES NOWCASTING

VINICIUS FRANCISCO ROFATTO<sup>1</sup>  
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO<sup>2</sup>  
LUIZ FERNANDO SAPUCCI<sup>3</sup>

Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT,  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP<sup>1,2</sup>  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas<sup>1</sup>  
Departamento de Cartografia<sup>2</sup>  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE<sup>3</sup>  
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC<sup>3</sup>, Cachoeira Paulista – SP  
<sup>1</sup>rofattaum@gmail.com; <sup>2</sup>galera@fct.unesp.br; <sup>3</sup>luiz.sapucci@cptec.inpe.br

---

**RESUMO** - Informações de umidade são importantes para previsões de chuvas severas. O atual sistema operacional de previsão numérica do tempo (PNT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE ainda depende de observações de radiossondas para produzir a condição inicial para a previsão. No entanto, o alto custo operacional no lançamento de radiossondas limita a extensão da rede, e conseqüentemente, a resolução temporal e espacial. A estimativa do atraso zenital troposférico (ZTD) por meio de uma rede densa de estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) terrestres pode contribuir para amenizar a insuficiência de observações de umidade de qualidade. No Laboratório de Geodésia Espacial da Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente – UNESP (LGE-FCT/UNESP) vem sendo estimado o ZTD para as estações pertencentes a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sendo 14 vinculadas à Rede GNSS-SP e integradas com estação meteorológica. Com essa estrutura é possível quantificar o Vapor d'Água Integrado (*Integrated Water Vapor - IWV*) em tempo quase real, auxiliando nas atividades de previsões de tempo de curto para longo prazo (“*forecast*”), e boas perspectivas para aplicações de previsão de curto prazo (“*nowcasting*”).

**Palavras chave:** Vapor d'Água Integrado, Atraso Zenital Troposférico, Previsão Numérica do Tempo, GNSS, Meteorologia.

**ABSTRACT** - Information about moisture are important for severe rainfall forecast. The current operational system of Numerical Weather Prediction (NWP) from Center for Weather Forecasting and Climate Study at the National Institute for Space Research - CPTEC / INPE still depends on radiosondes observations to produce the initial condition for the forecast. However, the operational expensive cost of the launch radiosondes limits the network, and therefore the temporal and spatial resolution. The estimation of Zenithal Tropospheric Delay (ZTD) through a dense network of ground stations GNSS (Global Navigation Satellite System) can contribute to minimize the lack of observations of humidity of the good quality. In the Laboratory of Space Geodesy, Faculty of Science and Technology of Presidente Prudente - UNESP (LGE-FCT/UNESP) has been estimated ZTD for the stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC), being 14 related to GNSS-SP Network and integrated with the meteorological station instrument. With this structure it is possible to quantify the Integrated Water Vapor – IWV in near real time, aiding in the activities of weather forecasts and good prospects for nowcasting application.

**Key words:** Integrated Water Vapour, Zenithal Tropospheric Delay, Numerical Weather Prediction, GNSS, Meteorology.

## 1 INTRODUÇÃO

O atraso zenital troposférico (ZTD - *Zenithal Tropospheric Delay*) é considerado um dos fatores incômodos nas atividades de posicionamento utilizando técnicas geodésicas, como VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) e GNSS. No entanto, esse parâmetro fornece informações do vapor atmosférico e representa uma fonte potencial para modelos de PNT, como apontado primeiramente por Bevis et al., 1992.

O IWV e o ZTD derivados do GNSS vem sendo utilizados na Meteorologia, especialmente para melhorar a distribuição do vapor d'Água atmosférico na condição inicial usada para modelos de previsão do tempo. Muitos centros de previsão do tempo, como NOAA (EUA), ECMWF (União Européia) e JMA (Japão), tem assimilado tais produtos atmosféricos GNSS em seus sistemas operacionais de assimilação de dados, e tem provado impactos positivos do ZTD GPS e PWV na previsão de campos de umidade e de precipitações extremas (IWABUCHI et al., 2011). No Brasil encontra-se em fase de testes o uso de ZTD e IWV GNSS para aplicações meteorológicas.

Atualmente, o ZTD vem sendo estimado quase que em tempo real a partir de dois softwares de processamento de dados GNSS com diferentes estratégias, são eles: GIPSY-OASIS II (GREGORIUS, 1996) (GOA-II) e GAMIT (HERRING, 2012). Neste trabalho serão mostrados os fundamentos envolvidos no contexto GNSS Meteorologia, alguns resultados e aplicações considerando as estações da Rede GNSS-SP e RBMC.

## 2 GNSS METEOROLOGIA

Um dos produtos advindos do processamento de dados GNSS é o ZTD. O ZTD é independente da frequência do sinal dos satélites, em consequência da Troposfera (ou Neutrosfera) ser eletricamente neutra. Assim, o atraso depende apenas das características termodinâmicas da atmosfera. O ZTD pode ser dividido em duas componentes: uma influenciada por gases atmosféricos, como oxigênio, nitrogênio chamada componente hidrostática (ZHD - *Zenithal Hydrostatic Delay*), e outra influenciada pelo vapor d'água, denominada componente úmida (ZWD - *Zenithal Wet Delay*). Cerca de 90% do atraso total ocorre na ZHD e sua variação temporal é da ordem de 1% durante várias horas. Já a ZWD o atraso é menor, variando de 1 a 35 cm, o que corresponde aproximadamente a 10% do atraso total, porém, sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas, o que torna impossível sua predição com boa precisão, até mesmo quando há medidas disponíveis de umidade na superfície (SPILKER, 1994). Desta forma, o termo GNSS Meteorologia refere-se à técnica utilizada para estimar o vapor de água presente na atmosfera a partir do ZWD estimado por meio do processamento de dados GNSS e de medidas de pressão e temperatura da superfície, tornando uma ferramenta valiosa para a PNT. Essa possibilidade

representa o estado da arte no contexto GNSS Meteorologia.

### 2.1 Atraso Zenital Troposférico

O TD na direção satélite-receptor ("*Slant Delay*") pode ser modelado pela seguinte equação (MACMILLAN, 1995):

$$TD_r^s = mh(\epsilon)ZHD + mw(\epsilon)ZWD + \zeta \quad (1)$$

$$\zeta = m_\Delta \cotg(\epsilon) [G_N \cos\Phi + G_E \sin\Phi] \quad (2)$$

Na equação (1) e (2), tem-se:

- $TD_r^s$  é o atraso total na linha de visada entre o satélite (s) e receptor (r);
- ZHD representa o atraso zenital da componente hidrostática;
- ZWD representa o atraso zenital da componente úmida;
- $\epsilon$  é o ângulo de elevação do satélite;
- $\Phi$  é o ângulo de azimute do satélite medido na direção leste para norte;

•  $mh(\epsilon)$ ,  $mw(\epsilon)$  e  $m_\Delta(\epsilon)$  são as funções de mapeamento da componente hidrostática, úmida e dos gradientes, respectivamente.

•  $G=[G_N, G_E]$  é o vetor dos gradientes horizontais com  $G_N$  e  $G_E$  suas componentes na direção norte e leste, respectivamente;

O fator  $\cot(\epsilon)$  representa o aumento da refratividade na mudança horizontal com a diminuição da elevação ao longo do caminho do sinal.

Atualmente existem diversas metodologias para minimizar os efeitos causados pela influência da troposfera nos sinais de radiofrequência. A seleção da estratégia a ser utilizada em uma dada aplicação GNSS depende da precisão fornecida pelo método de posicionamento empregado. A estratégia mais sofisticada para a determinação dos valores do ZTD é obtida a partir do ajustamento das observações GNSS, utilizando filtros baseados nas condições estado-espaco-tempo dos parâmetros referentes ao atraso troposférico. Essa técnica pode fornecer resultados com boa precisão ao explorar as propriedades estocásticas do ZWD, como a baixa variação em intervalos curtos de tempo. (SAPUCCI, 2001)

Os modelos do atraso encontrados na vida prática para usuários de receptores GNSS são basicamente dois: o de Hopfield (SEEBER, 1993) e o de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973).

### 2.2 Vapor D'Água Integrado na atmosfera a partir de dados GNSS e estações meteorológicas

Devido ao tipo de comportamento dos gases na atmosfera, o ZTD pode ser dividido em duas componentes: a úmida causada principalmente pela umidade do ar atmosférico, e a hidrostática que depende somente da densidade total do ar da atmosfera.

A soma das duas componentes resulta no ZTD (SEEBER, 2003):

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (3)$$

A componente hidrostática, ZHD, pode ser modelado a partir de medidas de pressão observados na superfície ( $P_o$ ), da latitude em graus ( $\phi$ ) e altitude geométrica  $h_o$  (em Km) da estação de interesse. Para isso, aplica-se a seguinte equação de Davis et al., 1985:

$$ZHD = 0,002277 \cdot \frac{P_o}{f(\phi, h_o)} \quad (4)$$

$$f(\phi, h_o) = 1 - 0,0026 \cdot \cos(2\phi) - 0,00028 \cdot h_o \quad (5)$$

O fator determinante para a precisão dos valores de ZHD fornecidos pela equação (4) é a qualidade das medidas de pressão atmosférica. Para barômetros com precisão de 0,3 hPa a precisão destes valores é melhor que 1 mm (Bevis et al., 1992).

As estimativas do ZTD pelo GNSS podem ser subtraídas dos valores encontrados na equação (4), a fim de obter a componente úmida de forma mais acurada.

A componente úmida, ZWD, é a base para computar o conteúdo de vapor d'Água na atmosfera. A relação entre ZWD e o IWV, pode ser expressa pela seguinte equação (Bevis et al., 1992, Bevis et al., 1994, Kleijer, 2004):

$$IWV = ZWD \cdot \psi, \text{ onde} \quad (6)$$

o IWV é dado em  $\text{kg/m}^2$  e o ZWD em metros. A constante de proporcionalidade  $\psi$  é dada por:

$$\psi = \frac{10^6}{R_w \left[ k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right]}, \text{ onde} \quad (7)$$

$R_w = (461,5181) \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  é a constante específica para o vapor d'água,  $k_2' = (22,1 \pm 2,2) \text{ K hPa}^{-1}$  e  $k_3 = (373900 \pm 1200) \text{ Kg}^2 \text{ hPa}^{-1}$  são constantes da refratividade atmosférica cujo valores foram determinados experimentalmente (Bevis et al., 1994).

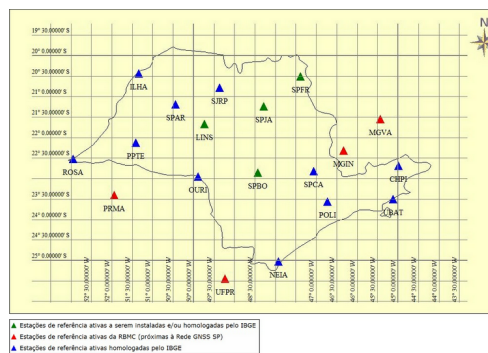
O termo  $T_m$  é a temperatura média do perfil troposférico em Kelvin. Os valores de  $T_m$  são obtidos, freqüentemente, pela aplicação de regressões que os relacionem com a temperatura na superfície terrestre gerados a partir de dados de radiossondagens (Bevis et al., 1992). Sapucci (2005) desenvolveu o modelo da  $T_m$  para o Brasil a partir da técnica de regressão múltipla, onde dados de radiossondas dos últimos 40 anos foram disponibilizados pelo CTA (Centro Tecnológico da Aeronáutica). Desta forma, um modelo mais confiável e preciso foi desenvolvido para região brasileira:

$$T_m = 0,558T_s + 0,0105P_s + 110,578 \quad (8)$$

Na equação (8),  $T_s$  e  $P_s$  são os valores de temperatura e pressão medidos na superfície, respectivamente.

### 3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A capacidade do GNSS em detectar chuvas severas, a partir das estimativas de ZTD e IWV tem mostrado promissor ao longo dos anos. O monitoramento do IWV vem sendo bastante explorada em diversos países (Duan et al., 1996; Emardson, 1998; Pacione et al., 2010; Iwabuchi et al., 2006). Os experimentos são focados em períodos de tempo curtos, já que a principal contribuição são as variações do ZTD devido principalmente as mudanças rápidas do ZWD. O ZTD e o IWV foram analisados para as estações PPTE, ROSA, SPAR e SJRP, todas equipadas com estação meteorológica (Figura 1).



Figural – Estações da Rede GNSS-SP (Fonte: gege.fct.unesp.br).

A figura 2 mostra os valores de Pressão, Temperatura e Umidade (PTU) registrados pela estação meteorológica integrada nos receptores de PPTE e ROSA para o dia 12 de maio de 2012.

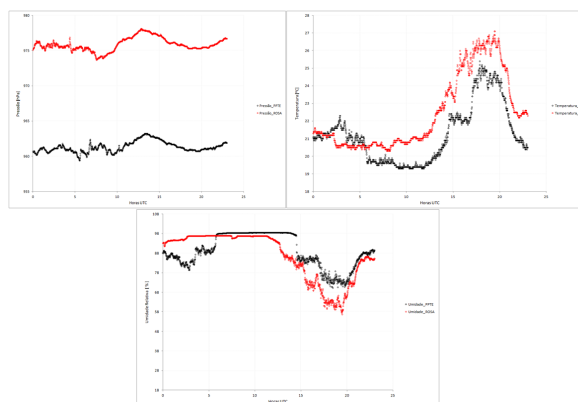


Figura 2 – Medidas de PTU para as estações PPTE e ROSA.

Além disso, um estudo de caso foi realizado para a estação CEFE, localizada em Vitória – ES, quando ocorreu uma intensa precipitação. Nesse experimento foi simulado o PPP em tempo quase real utilizando uma

janela deslizante de 8 horas de dados GPS. Os dados foram processados pelo software GOA-II (GREGORIOUS, 1996) visando a aplicação “nowcasting”. Todos os experimentos foram realizados considerando o método PPP do GOA-II na estimativa do ZTD.

### 3.1 Impacto de medidas de pressão a partir de estações meteorológicas na determinação do ZHD

O ZHD empregado no GOA-II é constante, e depende unicamente da altitude geométrica da estação ( $h_0$ ). O modelo é dado por:

$$ZHD = 1,013 \cdot 2,27 \cdot \exp(h_0 \cdot 0,116 \cdot 10^{-3}) \quad (10)$$

A figura 2 mostra a diferença entre o ZHD determinado pela equação (10) e pelo modelo (4) considerando as medidas de pressão *in-situ*. Observa-se que a diferença média fica em torno de 7,33 mm. Portanto, na quantificação do IWV, é de extrema importância subtrair os valores estimados de ZTD pelo ZHD calculado por meio de medidas de pressão a fim de obter resultados mais confiáveis.

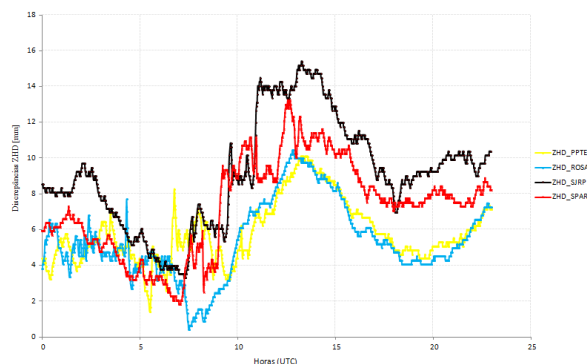


Figura 3 – Diferenças entre o modelo adotado no GOA-II e modelo baseado em medidas de pressão *in-situ*.

### 3.2 Séries Temporais de IWV

Os valores de ZTD obtidos a partir das observações GPS foram subtraídos dos valores de ZHD, obtidos a partir da pressão atmosférica medida na superfície e aplicada na equação 4, como resultado chegou-se no valor do atraso zenital da componente úmida (ZWD). Os valores do ZWD foram convertidos em IWV usando as equações 8, 7 e 6. As séries temporais foram geradas para o dia 12 de maio de 2012 (dia 133 do ano de 2012) como mostrado na figura 4.

Pode-se observar pela figura 4 a distribuição do IWV estimado com uma resolução temporal de 5 minutos. Neste dia, foi registrado pela estação meteorológica automática de Presidente Prudente uma chuva de 20 mm as 7 horas UTC (INMET, 2012).

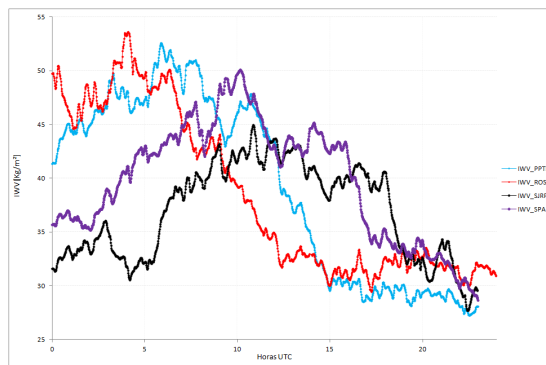


Figura 4 – Séries Temporais de IWV

### 3.3 Aplicações de ZTD para Nowcasting

A chuva torrencial que ocorreu em Vitória – ES no dia 14 de maio de 2012 mostrou um rápido aumento do ZTD antes de ocorrer a intensa precipitação que atingiu 94,6 mm em apenas duas horas. A latência de fortes precipitações relativa ao aumento de ZTD é na ordem de dezenas de minutos, permitindo assim fornecer informações úteis para aplicações nowcasting. A partir de imagens do satélite GOES<sup>1</sup> é possível observar a formação de vapor d’água com a chegada de uma frente fria (Figura 5).

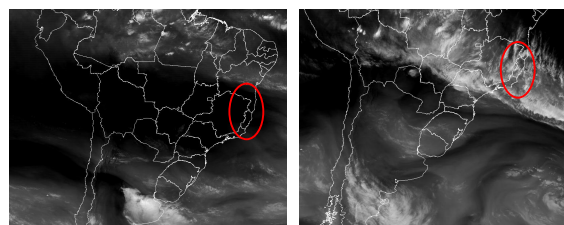


Figura 5 – Imagens do satélite GOES (Banda 3 – VA): Antes da chegada da massa fria (imagem a esquerda) e formação de Vapor d’água atmosférico (imagem a direita).

Foi observado uma chuva maior que 40 mm/hora na capital do Espírito Santo durante a madrugada do dia 135 do ano de 2012 (Figura 7).

Como pode observar a figura 6, o rápido aumento do ZTD (1mm/300segundos) acontece antes da forte chuva. A latência da precipitação relativa ao aumento de ZTD foi de aproximadamente 20 minutos.

<sup>1</sup> Vapor de Água (Banda 3 - VA). É a região onde os sensores do satélite registram a quantidade de água disponível na atmosfera (comprimento de onda - 6,5 a 7,0 micrômetros).

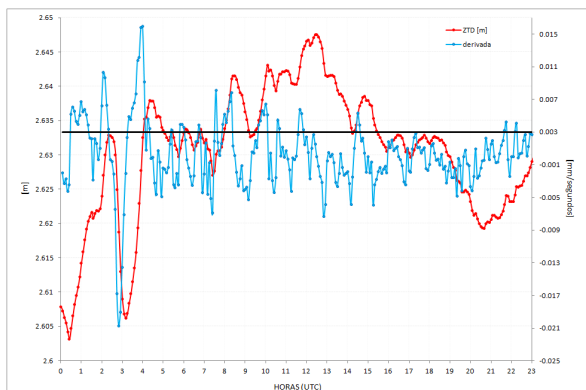


Figura 6 – Variação do ZTD (vermelho) e da derivada do ZTD (azul) e a linha em preto mostra a taxa de 1mm/300 segundos (taxa por época) para a estação CEFÉ dia 135.

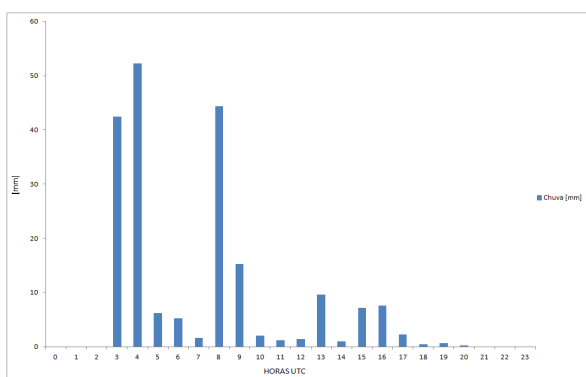


Figura 7 – Precipitação registrada pela estação meteorológica Vitória – A612 pertencente ao INMET para o dia 135.

Situações para as estações PPTE e ROSA também foram estudadas para o dia 133 (Figuras 8, 9 e 10).

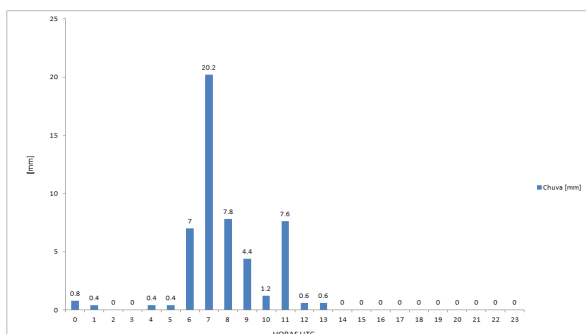


Figura 8 – Precipitação registrada pela estação meteorológica Presidente Prudente – A70 pertencente ao INMET para o dia 133.

A característica interessante nas variações da derivada é a diminuição repentina da derivada do ZTD logo após o máximo da derivada (azul na Fig. 9 e 10). A precipitação intensa é observada após a diminuição súbita da derivada.

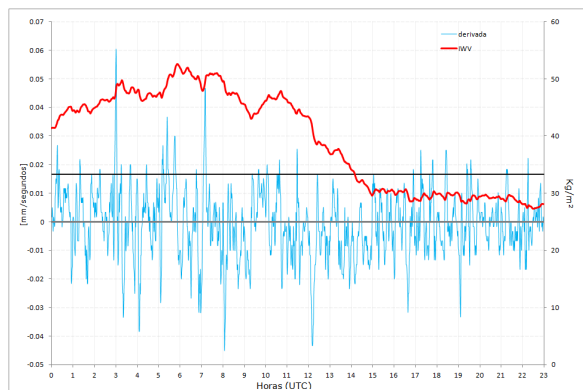


Figura 9 - Variações do IWV (vermelho) e da derivada (azul) para a estação PPTE. A linha em preto é a rápida variação de 1 mm/60 segundos da derivada do ZTD, que implica em uma possível precipitação intensa. A linha de cor cinza representa 0 mm/60 segundos.

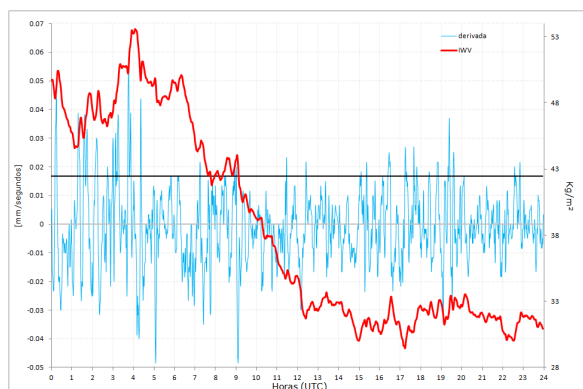


Figura 10 – Variações do IWV (vermelho) e da derivada (azul) para a estação ROSA. A linha em preto é a rápida variação de 1 mm/60 segundos da derivada do ZTD e a linha de cor cinza representa 0 mm/60 segundos.

Esses fatos sugerem que freqüentes estimativas do ZTD podem trazer benefícios para “nowcasting”, fornecendo informações adicionais para PNT. Outras pesquisas usando informações adicionais de gradiente de atraso troposférico e *STD* (*Slant Total Delay*) poderão trazer benefícios para esclarecer a relação entre as variações do ZTD e as chuvas severas.

#### 4 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A modelagem da temperatura média troposférica é um fator importante para assegurar a boa qualidade dos valores do IWV-GNSS. O Modelo desenvolvido por Sapucci (2005) vem sendo usado para o cálculo do IWV em tempo quase real. O modelo fornece valores da  $T_m$  bastante satisfatórios para as regiões do território brasileiro, com EMQ de 2,15 K. Outro fator importante, é que as medidas, tanto de pressão como temperatura da superfície, são essenciais para obter resultados mais acurados do ZWD e IWV. Uma forma de obter valores de pressão e temperatura caso não estejam disponíveis *in-situ* é fazer o uso de observações meteorológicas externas, por

exemplo, as estações automáticas do INMET a partir de interpolações temporais e espaciais.

Com base nos resultados, pode-se fazer algumas suposições à respeito das séries temporais do ZTD e IWV. A grande variação da derivada do ZTD durante a severa chuva implica em múltiplas passagens de sistemas convectivos sobre a estação CEFE. Uma possível explicação para a diferença de tempo de precipitação intensa e a derivada máxima é o tempo que leva as gotas de chuva para chegar ao solo a partir de sistemas convectivos fortes.

Nos experimentos foram simulados a aplicação nowcasting em tempo real. As estimativas do ZTD a partir do PPP em intervalos de 300 e 60 segundos são viáveis devido à latência aparente de chuvas severas relativa ao máximo de ZTD e da variação de ZTD. Desta forma, este trabalho mostrou a sinergia existente entre a Geodésia e a Meteorologia.

Trabalhos futuros incidirão sobre o uso de gradientes de atraso troposférico e o STD para aplicações de previsão imediata de tempo e de assimilação de dados para as estações brasileiras.

## REFERÊNCIAS

BEVIS, M. G.; SUSINGER, S.; HERRING, T.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, V. 9, p. 15.787-15.801, 1992.

BEVIS, M. G.; CHISWELL, T. A.; HERRING, T.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays into precipitable water. **Journal of Applied Meteorology**, p. 379-386, 1994.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A., SHAPIRO I, ROGERS, A. E., ELGENED, G. Geodesy by Interferometry: **Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length Radio**. Sci., vol. 20, p. 1593-1607, 1985.

EMARDSON, T. RAGNE, **Studies of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System**. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Technical Report No. 339,1998.

GREGORIUS T. **How it Works...GIPSY-OASIS II**. Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, Canadá ,1996.

HERRING, T. A.; R. W. KING, S. C. MCCLUSKY. **Introduction to GAMIT/GLOBK**. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <[http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/Intro\\_GG\\_10.3.pdf](http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/Intro_GG_10.3.pdf)>. Acesso: 20 de abril de 2012.

INMET. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso: 20 de abril de 2012.

IWABUCHI, T.; ROCKEN C.; LUKES Z., MERVART L., JOHNSON J.; KANZAKI M. PPP and Network True Real-time 30 sec Estimation of ZTD in Dense and Giant Regional GPS Network and the Application of ZTD for Nowcasting of Heavy Rainfall. **ION GNSS 19<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division**, 2006. Disponível em <[http://www.ion.org/search/view\\_abstract.cfm?jp=p&idn\\_o=7054](http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idn_o=7054)>. Acesso: 20 de abril de 2012.

KLEIJER, F. **Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling**. 2004. 260p. Ph. D. Thesis, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology DELFT, Netherlands.

MACMILLAN, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. **J. Geophys. Res.**, p. 1041-1044, 1995.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Unesp. 2008. 287p.

PACIONE, R.; PACE R., VEDEL H., HAAN S., LANOTTE R., VESPE F. **Combination methods of tropospheric time series**. 2010. Advances in Space Research. Publicado por Elsevier Ltd, p. 0273-1177.

SAASTAMOINEN, J., **Contributions to the theory of atmospheric re-refraction**. Bulletin Géodésique, p. 105, 279 298,106, 383-397, 107, 13-34, 1973.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167p. Dissertação de Mestrado, UNESP, Presidente Prudente-SP, Brasil.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

SEEBER, G.. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods & Applications**. Walter de Gruyter, Berlin New York, 531pp, 1993.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 586p.

SPIPKER, J. J. **Tropospheric Effects on GPS**. American Institute of Aeronautics and Astronautics. pg. 517 – 546, 1994.

SOLHEIM, F. S.; VIVEKANANDAN J.; WARE, R. H.; ROCKEN, C. Propagation Delays Induced in GPS Signals by Dry Air, Water Vapor, Hydrometeors and Other Particulates, **J. Geophys. Res.**, p. 9663-9670, 1999.