

# MODELAGEM TROPOSFÉRICA: ESTUDO E ANÁLISE DE DIFERENTES MODELOS

Thainara Munhoz Alexandre de Lima<sup>1</sup>, Dra. Daniele Barroca Marra Alves<sup>2</sup>, Msc. Tayná Aparecida Ferreira Gouveia<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UNESP, endereço Presidente Prudente (SP), thaimunhoz98@gmail.com; <sup>2</sup> UNESP, endereço Presidente Prudente (SP), danielle.barroca@unesp.br; <sup>3</sup> UNESP, endereço Presidente Prudente (SP), tayna.ppgcc@gmail.com.

## RESUMO

Com o passar dos anos tem crescido a necessidade de realizar posicionamento com alta acurácia. Nesse cenário, o Global Navigation Satellite Systems (GNSS) tem revolucionado as atividades que envolvem o posicionamento geodésico. Mas para alcançar a acurácia almejada, é imprescindível realizar uma modelagem troposférica de forma adequada, pois embora existam modelos empíricos (Hopfield e Saastamoinen) eles não são totalmente apropriados para a realidade brasileira, devido as peculiaridades atmosféricas existentes no país. De modo a minimizar essa limitação, surgem os modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT), sendo que no Brasil o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) gera previsões dos valores do atraso troposférico para toda a América do Sul e oceanos adjacentes, disponível online. Neste artigo, o objetivo principal foi investigar e comparar os modelos troposféricos em diferentes regiões do país, sendo implementados os modelos empíricos de Hopfield e Saastamoinen, cujos resultados são comparados com o atraso obtido a partir de modelos de PNT, permitindo analisar as diferenças entre cada modelo em diferentes condições atmosféricas. Desse modo, a partir dos resultados obtidos, foi observado que na região Amazônica, caracterizada pela alta umidade relativa do ar, houve um aumento de 4,59% na diferença entre os modelos empíricos e o modelo de PNT, quando comparado com uma região de baixo acúmulo de umidade.

**Palavras-chave** — GNSS, atraso troposférico, modelos empíricos, PNT.

## ABSTRACT

*Over time has grown the need to perform positioning with high accuracy. In this scenario, the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has revolutionized the activities involving geodetic positioning. But, to achieve the desire accuracy, it is important to perform a tropospheric modeling adequately, because although there are empirical models (Hopfield and Saastamoinen) they are not totally appropriate for the Brazilian reality, due to the atmospheric peculiarities that exist in the country. In order to minimize this limitation, Numerical Weather Prediction (NWP) models emerge, and in Brazil the Center for Weather Forecasting and Climate Studies/National Institute for Space Research (CPTEC/INPE) generates forecasts of tropospheric delay values for all of*

*South America and adjacent oceans, available online. In this article, the main objective was to investigate and compare the tropospheric models in different regions of the country, using the empirical models of Hopfield and Saastamoinen, whose results are compared with the delay obtained from NWP models, allowing to analyze the differences between each model in different atmospheric conditions. Thus, from the results obtained, it was observed that in the Amazon region, characterized by the high relative humidity of the air, there was a 4.59% increase in the difference between the empirical models and the NWP model, when compared to a low region accumulation of moisture.*

**Key words** — GNSS, tropospheric delay, empirical models, PNT.

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de posicionamento baseada na utilização de satélites artificiais é uma das mais empregadas atualmente, devido a aspectos práticos e a alta acurácia obtida. [1].

Porém, independente do sistema utilizado, o posicionamento GNSS está sujeito a erros no sinal dos satélites, ocasionando assim a deterioração na acurácia da localização. Com relação aos efeitos que o sinal sofre ao atravessar a atmosfera, podem ser citados os causados pela ionosfera e troposfera, de modo que, para uma melhor qualidade na localização esses erros devem ser minimizados ou eliminados [1] [2].

Para compreensão desses erros e modelagem das correções, é importante o estudo sobre como o ambiente afeta o sinal. Com relação a propagação do sinal pela atmosfera, esta pode ser dividida em duas camadas que variam de acordo com suas composições eletrônicas: ionosfera e troposfera. A troposfera, camada eletricamente neutra, afeta o sinal GNSS devido as diferenças nas concentrações dos gases que compõem essa camada. Sendo esses efeitos: cintilação troposférica, atenuação troposférica e o atraso troposférico. Este último gera erros com dimensões significativas para posicionamento de alta precisão, e portanto deve ser estimado ou modelado através de equações matemáticas [3].

Os principais modelos empíricos que tratam do atraso troposférico são o de Hopfield e o de Saastamoinen [1]. Porém, como esses modelos são baseados em medidas globais, não se apresentam totalmente apropriados para responder adequadamente as variações temporais e espaciais que ocorrem na América do Sul [3]. Deve ser considerado que

nessa região encontra-se a floresta Amazônica, que possui uma vasta dimensão e exerce grande influência no clima global, tornando essa região única. Assim os modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) podem ser uma boa alternativa para amenizar as limitações dos modelos teóricos para a América do Sul [4].

Dessa forma, a partir do estudo e implementação dos modelos troposféricos existentes mais utilizados pela comunidade científica nacional/internacional, além do modelo de PNT disponível no Brasil, neste artigo pretende-se comprovar as facilidades e dificuldades apresentadas por cada modelo, verificando sua eficiência em diferentes regiões do Brasil.

### 3. METODOLOGIA DO TRABALHO

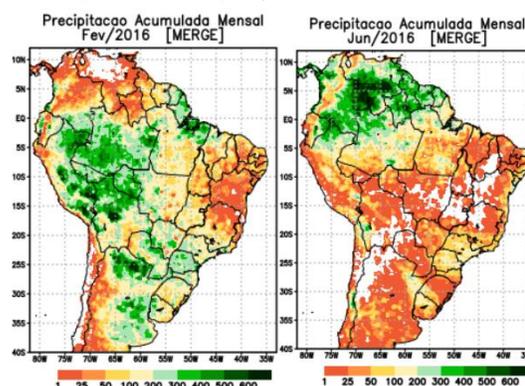
Com o objetivo de comparar os modelos de Hopfield, Saastamoinen e o modelo PNT, considerando as características climatológicas brasileiras, foram realizados experimentos, em períodos do ano e regiões distintas. Para o cálculo do atraso foram selecionadas estações de modo a buscar maiores variações nas condições climáticas, principalmente em relação à umidade, visto que o Brasil abrange áreas com diferenças significativas nas características climáticas. Dessa forma, foram escolhidas duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC): a estação NAUS localizada em Manaus (AM) e a estação PPTE localizada em Presidente Prudente (SP). As estações citadas foram escolhidas para estudo pois apresentaram uma diferença significativa na umidade, como pode ser visto na Tabela 1. Além disso, a estação NAUS permite avaliar os efeitos da umidade por conta da floresta Amazônica.

**Tabela 1 – Dados utilizados para o cálculo do atraso troposférico (ano 2016)**

Est	Data	T (C)	Um (%)	P (hPa)	Lat (°)	H (m)
NAUS	13/02	24,7	67,8	1004	-3,104	49
	22/06	28,5	73	1005,9		
PPTE	13/02	28	63	961	-22,120	435
	22/06	23,9	71	969,7		

Os dias selecionados para as estações citadas correspondem aos dias 13 de fevereiro de 2016 e 22 de junho de 2016. A escolha dos dias se baseou nas informações sobre a precipitação acumulada mensal que foram fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)[5] mostradas na Figura 1, além da disponibilidade dos dados binários fornecidos pelo CPTEC/INPE necessários na aplicação do modelo de PNT.

**Figura 1 – Precipitação de acumulo mensal.**



Na Figura 1 é possível notar que durante o mês de fevereiro, apesar da maioria das regiões do Brasil apresentar baixa concentração de umidade, em torno de 200 mm, houve uma elevada precipitação na região Amazônica, próximo de 400 mm. Enquanto no mês de junho, com exceção da região Amazônica, nota-se um baixo acúmulo de chuva na maior parte das regiões, isso permite uma melhor comparação e avaliação dos modelos utilizados em razão da componente úmida e sua influência sobre o sinal.

Como dados de entrada para os modelos empíricos, foram utilizados parâmetros meteorológicos tais como, valores de temperatura, pressão e umidade, que foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a partir das estações da Rede de Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática (EMA). Os dados que correspondem a valores diários são mostrados na Tabela 1.

A partir da formulação matemática dos modelos empíricos apresentadas por Seeber (2003), foram implementadas funções em linguagem Matlab, que permite o cálculo dos valores do ZWD, ZHD e do ZTD utilizando os modelos empíricos de Hopfield e Saastamoinen. Como o objetivo é analisar as diferenças e semelhanças entre os modelos, o atraso troposférico foi calculado considerando a direção zenital, não havendo portanto, a aplicação de nenhuma função de mapeamento.

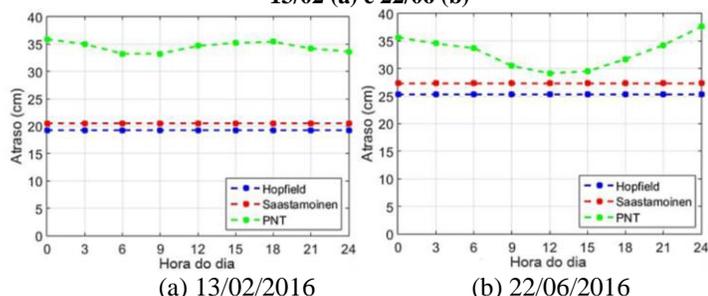
Utilizando o aplicativo disponível no site do CPTEC (<http://satellite.cptec.inpe.br/zenital/>) o atraso zenital troposférico foi obtido a partir dos valores fornecidos pelo modelo regional de PNT operacional do próprio CPTEC. Esses valores são atualizados duas vezes ao dia a partir dos dados das análises de 00h e 12h, sendo as previsões de 3 horas (00h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h, 24h). Para evitar extensão no corpo do texto, nas análises foram consideradas as horas 00h, 06h, 12h, 18h e 24h.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

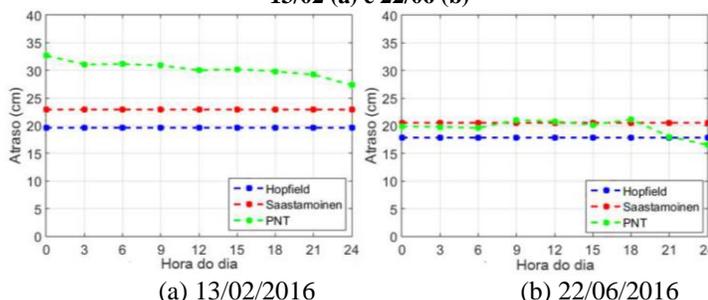
A partir da metodologia apresentada foi realizada uma comparação no valor do atraso troposférico relacionado a componente úmida (ZWD) para os dias 13/02/2016 e 22/06/2016 utilizando os modelos empíricos de Hopfield e

Saastamoinen e o modelo de PNT, os resultados são mostrados na Figura 2 e Figura 3, onde se observa que o atraso a partir dos modelos empíricos são constantes no decorrer do tempo, ao contrário do atraso a partir do modelo PNT. Para uma melhor visualização dos valores, a Tabela 2 e a Tabela 3 mostram a variação do ZWD em ambas as estações.

**Figura 2 – ZWD a partir dos modelos de Hopfield, Saastamoinen e do modelo PNT na estação NAUS para os dias 13/02 (a) e 22/06 (b)**



**Figura 3 – ZWD a partir dos modelos de Hopfield, Saastamoinen e do modelo PNT na estação PPTE para os dias 13/02 (a) e 22/06 (b)**



**Tabela 2 – Variação diária do ZWD em centímetros na estação NAUS**

13/02/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28
Saast	20,53	20,53	20,53	20,53	20,53
PNT	35,90	33,25	34,69	35,44	33,64

22/06/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	25,31	25,31	25,31	25,31	25,31
Saast	27,30	27,30	27,30	27,30	27,30
PNT	35,67	33,72	29,16	31,74	35,79

**Tabela 3 - Variação diária do ZWD em centímetros na estação PPTE**

13/02/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Saast	22,91	22,91	22,91	22,91	22,91
PNT	32,67	31,15	30,02	29,83	27,35

22/06/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
Saast	22,91	22,91	22,91	22,91	22,91
PNT	32,67	31,15	30,02	29,83	27,35

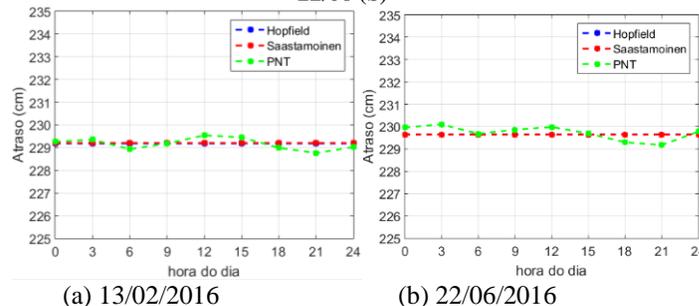
Hop	17,84	17,84	17,84	17,84	17,84
Saast	20,54	20,54	20,54	20,54	20,54
PNT	19,91	19,80	20,78	21,16	16,53

Comparando a Figura 2 e a Figura 3 nota-se valores mais altos para o atraso utilizando dados PNT, tanto para fevereiro quanto para junho, em ambas as estações, com exceção de junho na estação PPTE, no qual Saastamoinen mostra valores mais altos que o modelo de PNT, como pode ser visto também na Tabela 2 e na Tabela 3.

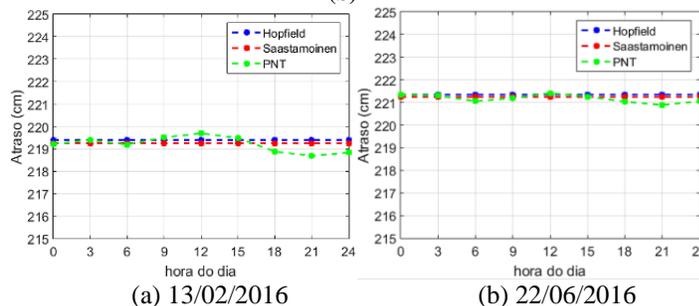
É possível ainda perceber uma maior aproximação no atraso entre os modelos empíricos (Hopfield e Saastamoinen) quando comparados ao modelo PNT. Os valores apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3 confirmam os resultados da Figura 2 e da Figura 3, onde, por exemplo, entre Hopfield e PNT houve uma diferença de 16,62 cm na estação NAUS para o mês de fevereiro considerando 00h, enquanto que nas mesmas condições a diferença entre o atraso a partir de Hopfield e Saastamoinen foi de 1,25 cm.

Considerando a componente hidrostática (ZHD), o atraso troposférico foi calculado, sendo o resultado apresentado na Figura 4 e Figura 5 e na Tabela 4 e Tabela 5.

**Figura 4 - ZHD a partir dos modelos de Hopfield, Saastamoinen e do modelo PNT na estação NAUS para os dias 13/02 (a) e 22/06 (b)**



**Figura 5 - ZHD a partir dos modelos de Hopfield, Saastamoinen e do modelo PNT na estação PPTE para os dias 13/02 (a) e 22/06 (b)**



**Tabela 4 - Variação diária do ZHD em centímetros na estação NAUS**

13/02/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	229,18	229,18	229,18	229,18	229,18
Saast	229,20	229,20	229,20	229,20	229,20

PNT	229,26	228,93	229,54	229,99	228,02
22/06/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	229,65	229,65	229,65	229,65	229,65
Saast	229,64	229,64	229,64	229,64	229,64
PNT	229,96	229,68	229,98	229,30	229,78

**Tabela 5 - Variação diária do ZHD em centímetros na estação PPTE**  
13/02/2016

Hora	00	06	12	18	24
Hop	219,39	219,39	219,39	219,39	219,39
Saast	219,25	219,25	219,25	219,25	219,25
PNT	219,21	219,19	219,69	218,88	218,83

22/06/2016					
Hora	00	06	12	18	24
Hop	221,34	221,34	221,34	221,34	221,34
Saast	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
PNT	221,34	221,05	221,41	221,03	221,05

Fazendo uma breve análise sobre o ZHD, na estação PPTE, o atraso da componente hidrostática a partir do modelo PNT para os dias 13/02 e 22/06 a 00h foi de 219,21 cm e 221,34 cm respectivamente, resultando em uma diferença de 2,1 cm, evidenciando uma baixa variação. Enquanto, na mesma situação, o ZWD foi de 32,67 cm no dia 13/02 e 19,91 cm para o dia 22/06, com uma diferença de 12,76 cm.

Comparando os modelos empíricos com o modelo PNT, pela Tabela 4, tem-se que na estação NAUS para o dia 13/02 a 00h, a diferença entre Hopfield e PNT foi de 0,08 cm e entre Saastamoinen e PNT de 0,06 cm. Enquanto que nas mesmas condições para o ZWD essa diferença foi de 16,62 cm para Hopfield e PNT e 15,37 entre Saastamoinen e PNT. Mostrando assim, que apesar de a componente úmida provocar um atraso menor, sua variação é maior quando comparado a componente hidrostática.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados discutidos, nota-se que o atraso da componente úmida apresenta comportamento semelhante entre os modelos de Hopfield e Saastamoinen, com uma aproximação maior entre os modelos para o dia 22/06 quando comparado aos resultados obtidos para o dia 13/02. Sendo Hopfield e Saastamoinen modelos empíricos, resultados similares entre os mesmos já eram esperados.

A partir da análise feita, foi possível observar, em ambas as estações, uma maior variação no ZWD ao utilizar PNT durante o mês de Fevereiro, com maior diferença entre os modelos na estação NAUS. Houve ainda uma maior aproximação entre os modelos empíricos e o modelo PNT na estação PPTE para o mês de Junho. Esse comportamento era esperado, devido à baixa umidade relativa na região, nessa época do ano. Com relação ao atraso relacionado com a componente hidrostática, causado pela quantidade de

nitrogênio e oxigênio na troposfera, apesar de representar mais de 90% do atraso troposférico total, possui uma diferença mínima entre os modelos empíricos e o modelo de PNT quando comparada com a variação sofrida pelo ZWD. Essa maior semelhança entre os modelos ocorre devido a pequena variação na temperatura e pressão atmosférica, principais fatores das variações no ZHD.

Com base nos resultados apresentados foi possível observar que o atraso troposférico a partir do modelo PNT, tanto para a componente úmida quanto para a hidrostática, apresentaram variações no decorrer do tempo, já os modelos empíricos (Hopfield e Saastamoinen) se mantiveram constantes. Pela Figura 2 e Figura 3 nota-se uma maior variação no ZWD na estação NAUS, enquanto para o ZHD essa variação é significativamente menor, caracterizando a influência da umidade relativa.

Em uma análise complementar, Alves et al. (2015) [6], a partir de experimentos com posicionamento por ponto preciso (PPP) aplicando o modelo de PNT, mostra o impacto que a modelagem troposférica possui sobre o posicionamento, onde foi observado uma melhoria no posicionamento ao utilizar modelos PNT, evidenciando a importância de utilizar modelos para modelagem troposférica com parâmetros locais ao invés da aplicação de modelos empíricos globais. Além disso, o artigo conclui que usando o modelo de PNT, os RMS 3D são menores que 10 cm para todas as 24 h de dados, enquanto os valores alcançam aproximadamente 60 cm quando o modelo Hopfield é empregado.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] SEEBER, Gunter. *Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications*. 2 ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.
- [2] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; WASLE, Elmar. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more*. New York: Springer-Verlag, 2008. 516 p.
- [3] SAPUCCI, Luiz Fernando. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente.
- [4] SAPUCCI, L. F., MONICO, J. F. G. *Avaliação dos modelos de Hopfield e Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território brasileiro utilizando GPS*. 15 f. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologias – UNESP, Presidente Prudente.
- [5] CPTEC – Centro de Previsão Numérica de Tempo. Disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/zenital/>. Acesso em: 21 de nov. 2017.
- [6] ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; SOUZA, E. M.; GOUVEIA, T. A. F.; MAGÁRIO, J. A. *Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil*. GPS Solution. 2015.