

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N° 66/3: 555-567
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO NUMÉRICA DO TEMPO ETA15KM NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO

Application and Evaluation of ETA15km Numerical Weather Prediction Model in Absolute Positioning

Pedro Augusto Giraldes de Abreu¹, Daniele Barroca Marra Alves² & Tayná Aparecida Ferreira Gouveia²

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica
Rua Roberto Simonsen, 305. Presidente Prudente/SP
pe.abreu@hotmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305. Presidente Prudente/SP
danibarroca@fct.unesp.br, tayna.ppgcc@gmail.com

Recebido em 19 de Novembro, 2013/ Aceito em 28 de Fevereiro, 2014
Received on November 19, 2013/ Accepted on February 28, 2014

RESUMO

As tecnologias espaciais têm sido amplamente empregadas para fins de posicionamento, a principal e mais moderna é o GNSS (Global Navigation Satellite System). Para alcançar alta acurácia (centímetros) no posicionamento GNSS, é imprescindível realizar a modelagem atmosférica (ionosfera e troposfera). No que concerne à troposfera, seus efeitos nos sinais GNSS são modelados considerando duas componentes: a primeira gerada pela influência hidrostática representa cerca de 90% do efeito; a segunda ocasionada pela atmosfera úmida é geralmente menor, porém, sua variação temporal e espacial é muito maior, o que dificulta a sua modelagem. O modelo de Hopfield pode ser utilizado para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais GNSS. Mas, dependendo da acurácia almejada, ele pode não ser adequado, principalmente em regiões mais ativas, como pode ser para a realidade brasileira. Para sanar essas limitações, vem sendo utilizado os modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT). Nesse artigo foi avaliada e quantificada a componente úmida do atraso troposférico (ZWD – Zenithal Wet Delay) em diferentes regiões do Brasil empregando dados da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Foi possível observar que os maiores valores do ZWD foram obtidos na estação SAGA e os menores na estação UFPR. Também foi realizada uma avaliação a respeito do uso do modelo de PNT eta15km no posicionamento por ponto. Os resultados mostraram que o uso do modelo de PNT ao invés de Hopfield traz melhorias significativas no posicionamento.

Palavras chaves: Troposfera, GNSS, Modelos de Previsão Numérica do Tempo.

ABSTRACT

The spatial technologies have been widely used in positioning methods, the main applied technology is the GNSS (Global Navigation Satellite System). In order to obtain high accuracy (centimeters) in GNSS positioning, it is indispensable

to accomplish the atmospheric modeling (ionosphere and troposphere). Related to troposphere, its effects on GNSS signals are modeled by two components: the hydrostatic component that represents about 90% of the effect; and wet component that has a minor effect but its temporal variation is larger, which difficult its modeling. The Hopfield model can be used to minimize the troposphere effects on GNSS signals. But, depending on intended accuracy, they cannot be adequate to Brazilian reality. In order to solve this limitation, the Numerical Weather Prediction Models (NWP) have been applied. In this paper was evaluated and quantified the wet component of tropospheric delay (ZWD – Zenithal Wet Delay) in different Brazilians regions employing RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) data. It was possible to note that the major and minor ZWD values were obtained to SAGA and UFPR stations respectively. It was also accomplished an evaluation concerning the use of NWP models in point positioning. The results showed that the NWP model presents significant improvements comparing with Hopfield one.

Keywords: Troposphere, GNSS, Numerical Weather Prediction Models.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as tecnologias espaciais têm sido amplamente empregadas, dentre elas uma das principais e mais modernas é o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), o qual é utilizado para fins de posicionamento, navegação e determinação de tempo. Ele apresenta como uma de suas características a dispensa de visibilidade entre as estações, obtenção das coordenadas em um curto período de tempo e disponibilidade de uso em qualquer condição climática. Dentre os vários sistemas de posicionamento que integram o GNSS o que ainda possui maior destaque é o GPS (MONICO, 2008; SEEBER, 2003), embora a constelação do GLONASS já esteja completa (<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>) e o Galileo (<http://www.esa.int/esaCP/index.html>) e Beidou (<http://www.beidou.gov.cn/>) já estejam lançando satélites com o objetivo de tornar o sistema operacional.

Os métodos de posicionamento GNSS podem ser classificados em absoluto ou por ponto; posicionamento relativo e posicionamento DGPS. Vale ressaltar que os receptores podem estar em repouso ou em movimento, denominando posicionamento estático ou cinemático e os dados podem ser processado em tempo real ou pós processados (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, 2008 e ALVES 2008). Tais métodos de posicionamento vem sendo aprimorados nos últimos anos, visando a obtenção de alta acurácia (poucos cm).

Nos métodos de posicionamento citados, ou pelos menos na maior parte deles, algo de extrema importância é a modelagem atmosférica (ionosfera e troposfera). Nesse artigo, o foco está na modelagem da troposfera.

A troposfera possui uma espessura média

de 50 km, e ela normalmente é dividida em duas componentes: uma composta de gases secos, conhecida como componente hidrostática e a outra composta de vapor d'água, denominada componente úmida (SAPUCCI, 2001).

Com relação à modelagem troposférica, diversos trabalhos utilizam o modelo de Hopfield ou de Saastamoinen (SEEBER, 2003). Porém, esses modelos foram desenvolvidos com observações meteorológicas, em sua maioria, do hemisfério norte. Para aplicações que exigem alta acurácia, eles podem não se adaptar. Assim, algo que vem sendo muito empregado pela comunidade científica internacional são os modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) (SAPUCCI et al., 2003, 2006). Tais modelos são disponibilizados por alguns centros de pesquisa no mundo. Produtos com dados globais podem ser obtidos por exemplo no ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). No Brasil, mais especificamente no CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) encontra-se disponível uma versão da modelagem de PNT, cuja resolução horizontal é de 15 km com 22 níveis verticais (denominado Eta15km).

Assim, nesse artigo o objetivo principal foi investigar o uso do modelo Eta15km no posicionamento absoluto em diferentes regiões no Brasil. Além disso, avaliar e quantificar os valores da componente úmida do atraso troposférico ao longo do zênite (ZWD - *Zenithal Wet Delay*) de 15 estações GNSS, sendo 3 estações de cada região do Brasil. Inicialmente foi realizada uma revisão teórica sobre Troposfera e seus modelos (capítulo 2) e posteriormente são apresentados os materiais e métodos empregados (capítulo 3)

e os resultados e análises (capítulo 4), além das considerações finais (capítulo 5).

2. TROPOSFERA

No posicionamento Geodésico, a Troposfera é considerada a camada mais superficial da atmosfera terrestre, na qual sua espessura média é de aproximadamente 50 km. Ela é um meio não dispersivo para frequências de até 15 GHz (KAPLAN e HEGARTY, 2006).

Desde o início do uso de medidas para determinar distâncias, pela propagação de ondas eletromagnéticas, já se estudavam as influências do meio em que elas se propagavam, e formas de reduzi-las. Em consequência, atualmente já se conhecem vários efeitos causados pela atmosfera terrestre sobre as ondas eletromagnéticas, e vários modelos matemáticos foram desenvolvidos ao longo do tempo. Entre os efeitos troposféricos podem-se citar (SPILKER, 1996): atenuação atmosférica, cintilação atmosférica e atraso troposférico.

A atenuação atmosférica está ligada a diminuição da potência da onda eletromagnética, exercida por um dos componentes que constituem a atmosfera, cada frequência é influenciada por um componente diferente. O oxigênio exerce atenuação em bandas de frequência de 1 a 2 GHz, que é o caso do GNSS. Já a cintilação é uma oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refração troposférica. No GNSS os efeitos de cintilação são alterações na fase de batimento da onda portadora no receptor (SAPUCCI, 2001). Segundo Monico (2008) na frequência utilizada pelo GNSS, esses efeitos são, em geral, relativamente pequenos, e podem ser negligenciados, exceto para pequenos ângulos de elevação (menores que 5°).

O atraso troposférico, considerado o efeito troposférico mais importante para o GNSS, pode ser dividido em dois. O primeiro, e principal, representa cerca de 90%, é gerado pela influência da atmosfera hidrostática, principalmente, pela influência do nitrogênio e do oxigênio. Este atraso é de aproximadamente 2,3 m no zênite e varia conforme a temperatura, a latitude e a pressão atmosférica. No entanto, é determinado com razoável precisão, pois sua variação é pequena (SPILKER, 1994). O segundo efeito é ocasionado pela atmosfera úmida, ou seja, pela

influência do vapor d'água atmosférico. Tal atraso é geralmente menor, representando cerca de 10% do atraso troposférico total. Porém, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas, o que torna impossível uma previsão adequada a partir de medidas da umidade na superfície (SPILKER, 1994). Pode-se observar na figura 1 que a altura média em que os efeitos troposféricos ocorrem é de aproximadamente 40 – 45 km para a componente seca e de 10 – 13 km para a componente úmida (HOFMANN-WELLENHOF, 2008).

Atualmente, modelos têm sido utilizados para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais GNSS. O modelo de Hopfield (SEEBER, 2003) é muito utilizado pela comunidade geodésica em geral. Porém, ele foi desenvolvido a partir de observações meteorológicas realizadas, em sua maioria, no hemisfério norte. Nesse sentido, para sanar essa limitação, já que esses podem não ser apropriados para a realidade brasileira, principalmente quando alta acurácia é requerida, surge a possibilidade do uso dos modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) (SAPUCCI et al., 2003, 2006). No Brasil, o CPTEC do INPE, localizado em Cachoeira Paulista – SP, possui o único modelo operacional da América Latina. Na próxima seção, a conceituação básica desse modelo será apresentada.

2.1 Modelos Troposféricos

O modelo do atraso troposférico de Hopfield supõe que a refração atmosférica (N) é dada em função dos valores de temperatura e pressão, medidos na superfície, e da altura da camada atmosférica que exerce influência na propagação dos sinais eletromagnéticos

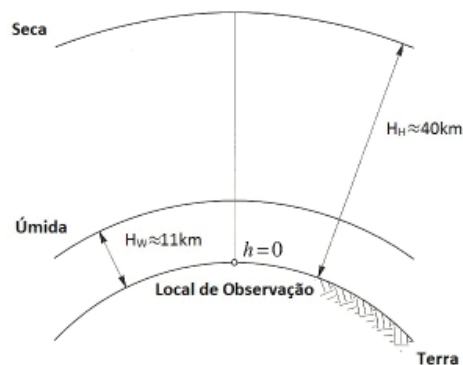


Figura 1 – Espessura e divisão da Troposfera
Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof (2008)

(SEEBER, 2003).

A primeira versão do modelo de PNT disponibilizado pelo CPTEC/INPE dividia a América do Sul em uma malha de 500 por 500 km, onde cada elemento da malha possuía um arquivo de dados do atraso cuja resolução era de 100 km na horizontal e 18 níveis na vertical (modelo denominado GLB100km), além de 66 horas de predição. Testes foram realizados em Alves et al. (2006a, 2006b, 2007a, 2007b) e o modelo de PNT apresentou melhores resultados que o modelo de Hopfield. A melhoria obtida atingiu cerca de 19%.

Posteriormente, foi disponibilizado o Eta20km, com resolução horizontal de 20 km e 19 níveis verticais. Oliveira et al. (2013) avaliou tal modelo e obteve melhorias do Eta20km em relação ao Hopfield. Atualmente (a partir do dia 06/02/2012), já se encontra disponível uma nova versão da modelagem de PNT, cuja resolução horizontal é de 15 km com 22 níveis verticais (denominado Eta15km). Assim, os resultados devem ser melhores se comparados à resolução anterior do modelo. Pode-se observar o modelo Eta15km na figura 2.

O Eta15km é um modelo atmosférico utilizado para fins de pesquisa, bem como de uso operacional. A diferença mais significativa entre ele e os demais modelos de PNT é a coordenada vertical empregada no mesmo. Ela é baseada na

normalização da pressão, com a vantagem de que nessa coordenada as superfícies constantes estão dispostas quase na horizontal, tanto nas áreas planas quanto nas montanhosas, reduzindo desta forma os erros nos cálculos de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais. As variáveis prognósticas utilizadas para gerar as previsões de tempo do modelo Eta são: temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, umidade específica, água líquida da nuvem, pressão à superfície e energia cinética turbulenta (SAPUCCI, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse artigo utilizou-se dados de estações GNSS que apresentavam diferentes características troposféricas, em se tratando da componente úmida e seca. Para tanto, tem-se disponível no laboratório de Geodésia Espacial (LGE) dados de IWV (*Integrated Water Vapor*), e conseqüentemente de ZWD, provenientes do processamento realizado no software Gipsy Oasis II (resultados da seção 4.1). Foram obtidos valores de ZWD para dados GNSS de 15 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC/RIBAC) (figura 3), distribuídas pelas 5 regiões do território brasileiro, compreendendo os anos de 2009, 2010, 2011 e 2012.

A tabela 1 apresenta em detalhes todas as estações que foram avaliadas.

Primeiramente, foram realizadas análises nos dados das estações da RBMC/RIBAC observando quais regiões do Brasil apresentaram índices de umidade maiores ou menores durante os 4 anos analisados. Essas análises foram feitas tanto por meses do ano quanto por estações do ano (primavera, verão, outono, inverno). Após as análises, foram selecionadas as estações no qual foi empregado o Posicionamento por Ponto.

Para realizar o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) foi utilizado o sistema desenvolvido por Marques (2012) (resultados da seção 4.2). Os resultados do posicionamento por ponto foram avaliados no modo estático, utilizando máscara de elevação de 10°, empregando diferentes observáveis GPS (L1, L2) e principalmente, empregando o modelo de PNT ou Hopfield. No modelo de PNT utilizou-se o Eta15km, ou seja, com uma resolução horizontal de 15 km com 22 níveis verticais. Como esse modelo foi disponibilizado pelo

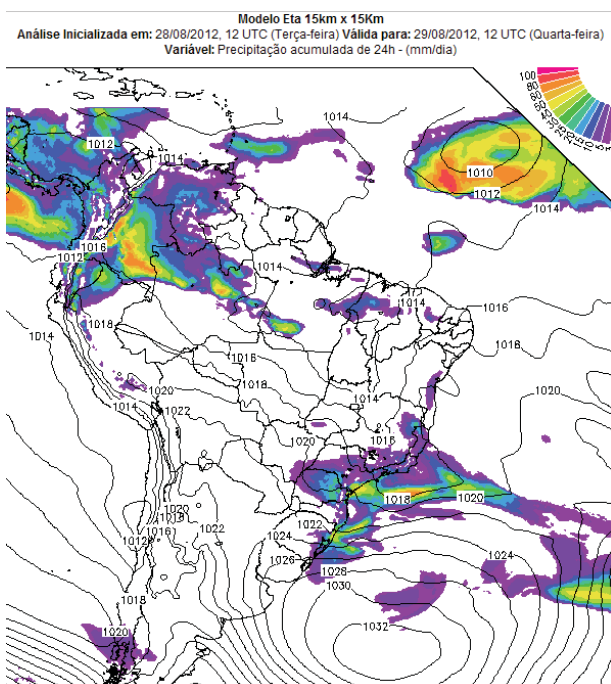


Figura 2 – Modelo Eta15km

Fonte: INPE

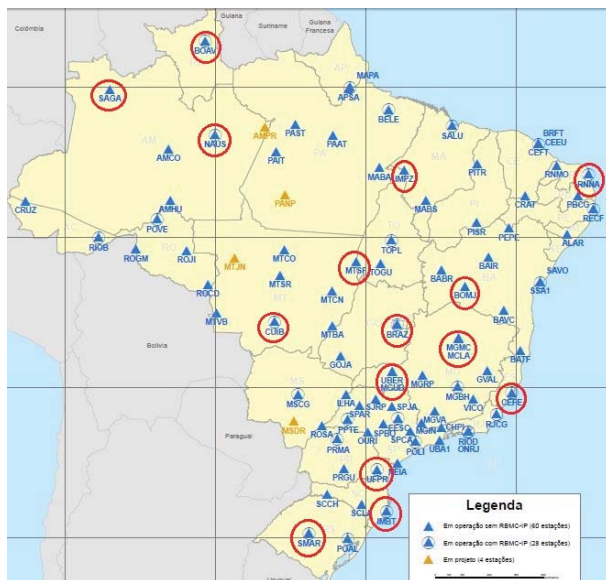


Figura 3 – Estações da RBMC/RIBAC utilizadas nos experimentos

Tabela 1: Estações RBMC/RIBAC analisadas

Cidade	Estação	Região
Santa Maria/RS	SMAR	Sul
Imbituba/SC	IMBT	Sul
Curitiba/PR	UFPR	Sul
Vitória/ES	CEFE	Sudeste
Montes Claros/MG	MCLA	Sudeste
Uberlândia/MG	UBER	Sudeste
Cuiabá/MT	CUIB	Centro Oeste
Brasília/DF	BRAZ	Centro Oeste
São Félix do Araguaia/ MT	MTSF	Centro Oeste
Bom Jesus da Lapa/ BA	BOMJ	Nordeste
Imperatriz/MA	IMPZ	Nordeste
Natal/RN	RNNA	Nordeste
Boa Vista/RR	BOAV	Norte
Manaus/AM	NAUS	Norte
São Gabriel da Cachoeira/AM	SAGA	Norte

CPTEC/INPE a partir de 6 de Fevereiro de 2012, não foram processados dados com datas anteriores.

Para a escolha de quais estações seriam empregadas no PPP, o critério adotado foi que seriam 2 estações de cada região do Brasil. Na

sequência, selecionou-se os 2 dias mais úmidos e 2 dias mais secos. Assim, foram analisadas 10 estações no total, compreendendo 40 arquivos de dados.

4. ANÁLISES E RESULTADOS

Na seção 4.1 estão contidas as análises anuais do ZWD (Janeiro à Dezembro) para 3 estações de cada região do Brasil (Sul, Sudeste, Centro Oeste, Norte e Nordeste) da rede RBMC/RIBAC nos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 (vide Figura 3 e Tabela 1). Os dados de ZWD foram obtidos do processamento realizado no software Gipsy Oasis II. Devido a problemas ocorridos na rede RBMC/RIBAC algumas estações estão com dados incompletos, assim, estão representadas nas tabelas por um traço.

Já na seção 4.2 são apresentados os resultados e análises das 10 estações selecionadas para processamento no PPP. Esse processamento realizado com o software desenvolvido por Marques (2012).

4.1 Análises anuais da Umidade

Ao realizar a avaliação anual da umidade atmosférica, para cada estação GPS é apresentado o valor médio da umidade referente aos 4 anos analisados (em forma de tabela) e no final uma figura ilustra o ZWD no ano de 2012 para as 3 estações. É dado maior ênfase para o ano de 2012, pois o PPP foi realizado apenas para este ano, devido a disponibilidade do modelo de PNT. Mas, os outros anos, em geral, seguem o mesmo padrão de umidade. Para mostrar esse padrão, um gráfico contendo os 4 anos da estação SMAR será apresentado na Figura 4.

4.1.1 Região Sul

Na Região Sul foram selecionadas as estações de Santa Maria/RS, Imbituba/SC e Curitiba/PR devido as suas localizações. Imbituba está situada no litoral de Santa Catarina, Santa Maria está no interior do Rio Grande do Sul e Curitiba está próxima do litoral no Paraná. Assim, pode-se explorar características diferentes.

Analisando os anos de 2009 até 2012 para a estação SMAR (Figura 4), identifica-se que o período mais úmido foi em Janeiro de 2011 (26,27 cm) e o mais seco em Julho de 2009 (12,15 cm). Outra análise que se pode fazer através dessa figura, é que todos os anos

estão seguindo um mesmo padrão, sendo apenas exceção em Novembro de 2009.

A tabela 2 apresenta a média anual de 2009 à 2012 para as 3 estações da região sul. Observa-se que a estação mais úmida da região Sul é a IMBT, referente ao ano de 2010, já a mais seca é a UFPR, referente ao ano de 2012.

A figura 5 apresenta a umidade atmosférica no ano de 2012; nela pode-se constatar que a estação de maior umidade para este ano foi IMBT, sendo a UFPR a mais seca.

4.1.2 Região Sudeste

Na Região Sudeste foram selecionadas as estações de Vitória/ES, Montes Claros/MG e Uberlândia/MG devido as suas localizações. Vitória está situada no litoral do Espírito Santo, tendo grande umidade. Apesar de Montes Claros e Uberlândia estarem localizadas em Minas Gerais, elas estão distantes uma da outra.

A tabela 3 apresenta a média anual de 2009, 2010, 2011 e 2012 e a figura 6 a umidade atmosférica no ano de 2012 para as 3 estações (CEFE, MCLA e UBER) da região sudeste. Fazendo uma análise geral da tabela 3, conclui-se que a estação CEFE foi a que apresentou maior umidade (2009). Um dos motivos pode ser a sua localização litorânea. A estação UBER foi a mais seca no ano de 2012, porém, seus dados foram muito similares com os da estação MCLA, mostrando um padrão no estado de Minas Gerais.

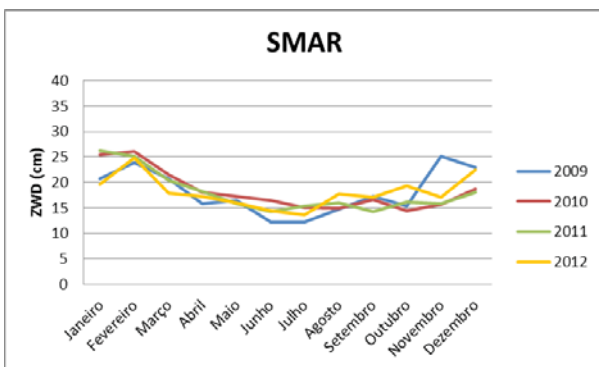


Figura 4 – Estação SMAR

Tabela 2: Umidade atmosférica anual da Região Sul (cm)

Ano	2009	2010	2011	2012
	ZWD	ZWD	ZWD	ZWD
SMAR	18,11	18,34	17,97	18,12
IMBT	-	21,26	-	20,39
UFPR	17,12	16,85	16,68	16,61

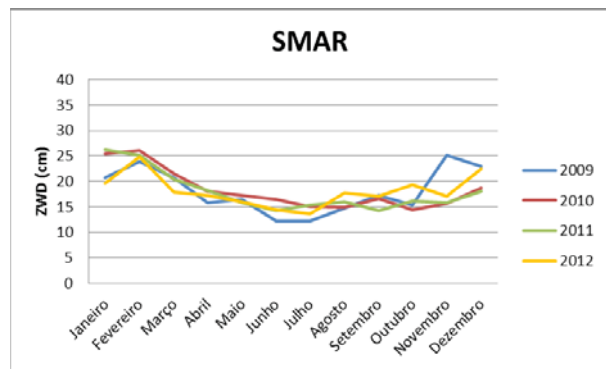


Figura 5 – Região Sul 2012

Tabela 3: Umidade atmosférica anual da Região Sudeste (cm)

Ano	2009	2010	2011	2012
	ZWD	ZWD	ZWD	ZWD
CEFE	25,50	24,33	24,20	24,35
MCLA	20,51	18,94	18,95	18,67
UBER	20,57	-	-	18,32

4.1.3 Região Centro Oeste

Nessa região, selecionaram-se as estações localizadas nas seguintes cidades: Cuiabá/MT, Brasília/DF e São Félix do Araguaia. Todas estão localizadas distantes umas das outras, formado um triângulo.

No Centro Oeste, dentre os dados existentes, a estação MTSF no ano de 2009 foi a mais úmida, com ZWD de 27,87 cm, já a estação BRAZ no ano de 2010 foi a mais seca, 17,55 cm. Esses resultados podem ser observados através da tabela 4 e figura 7.

4.1.4 Região Nordeste

As estações de Bom Jesus da Lapa/BA, Imperatriz/MA e Natal/RN foram as selecionadas da região Nordeste (Figura 19). Essas estações estão bem distantes umas das outras. A estação de Bom Jesus da Lapa está localizada no interior

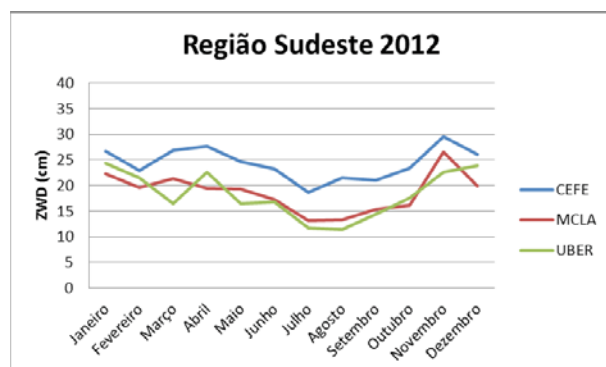


Figura 6 – Região Sudeste 2012

Tabela 4: Umidade atmosférica anual da Região Centro Oeste (cm)

Ano	2009	2010	2011	2012
	ZWD	ZWD	ZWD	ZWD
CUIB	27,70	25,25	25,90	26,42
BRAZ	19,77	17,55	17,92	18,21
MTSF	27,87	25,45	25,67	26,71

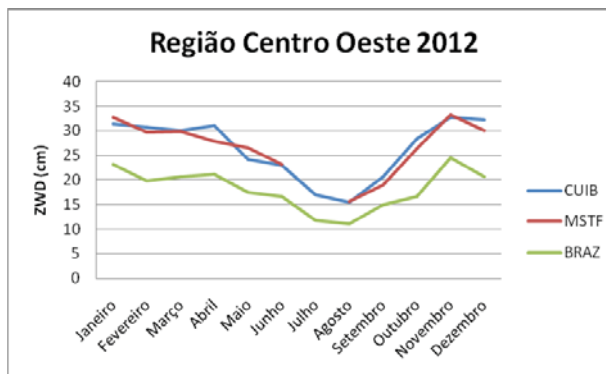


Figura 7 – Região Centro Oeste 2012

da Bahia, Imperatriz se encontra no interior do Maranhão e Natal é a capital do Rio Grande do Norte estando localizada no litoral.

A tabela 5 apresenta a média anual de 2009 à 2012, já a figura 8 mostra o ZWD do ano de 2012 para as 3 estações da região nordeste analisadas. Observando a tabela 5, a estação BOMJ no ano de 2012 obteve umidade atmosférica mais baixa e a IMPZ em 2009 maior umidade atmosférica.

4.1.5 Região Norte

Para a análise da região norte foram escolhidas as estações localizadas em Boa Vista/RR, Manaus/AM e São Gabriel da Cachoeira/AM. Essa região é de difícil análise, pois muitas informações estão faltando. O critério adotado para a escolha das estações foi a disponibilidade dos dados, que nem sempre estavam completos.

No Norte, através da observação dos dados existentes nota-se que como esperado, a região Norte é altamente úmida, não tendo valores

Tabela 5: Umidade atmosférica anual da Região Nordeste (cm)

Ano	2009	2010	2011	2012
	ZWD	ZWD	ZWD	ZWD
BOMJ	22,85	21,44	21,57	20,06
IMPZ	28,80	28,06	28,15	26,92
RNNA	26,62	25,80	26,64	24,32

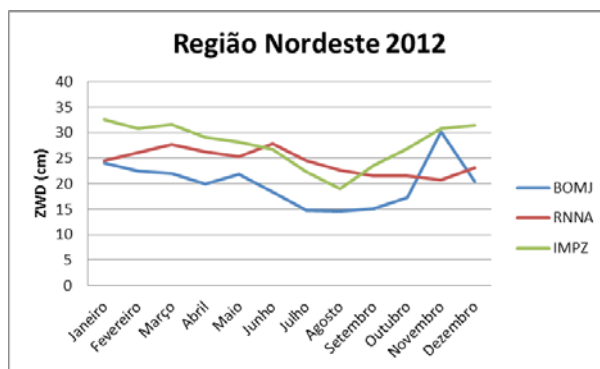


Figura 8 – Região Nordeste 2012

de ZWD inferiores a 30 cm. Um dos motivos dessa alta umidade é a presença da Floresta Amazônica. A estação SAGA no ano de 2010 foi mais úmida e a estação BOAV em 2009 a mais seca. Esses resultados podem ser observados na tabela 6. Na figura 9, nota-se grande ausência de dados.

4.1.6 Análise geral do Brasil

Analisando as 15 (quinze) estações, sendo 3 (três) de cada região do Brasil, pode-se concluir que a estação mais úmida para os 4 (quatro) anos é a SAGA, localizada na cidade São Gabriel da Cachoeira/AM. Já a mais seca foi a estação UFPR localizada em Curitiba/PR, também para os 4 anos de análises. A figura 10 mostra a grande diferença de umidade dessas duas estações. Por estar na região Norte, a estação SAGA sofre grande influência de umidade da Floresta Amazônica.

4.2 Análises no Posicionamento

Realizadas todas as análises de quais regiões no Brasil apresentam maiores ou menores valores de ZWD (seção 4.1), foi selecionada a estação mais úmida e seca de cada região. Em seguida, foi realizado o PPP empregando o modelo de PNT (Eta15km) e o modelo de Hopfield e avaliado o impacto dos índices de umidade no posicionamento. Após selecionadas as estações, foram escolhidos 2 dias considerados úmidos (alto ZWD) e 2 dias secos e seus dados foram utilizados para realizar o PPP no software desenvolvido por Marques (2012).

Realizado o PPP foram elaboradas figuras e tabelas para demonstrar a magnitude do erro que a umidade pode provocar na qualidade do posicionamento. Em todos os casos foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ) 3D. Para

Tabela 6: Umidade atmosférica anual da Região Norte (cm)

Ano	2009	2010	2011	2012
	ZWD	ZWD	ZWD	ZWD
BOAV	30,27	32,57	-	-
NAUS	31,59	32,16	-	-
SAGA	33,93	34,57	34,39	34,10

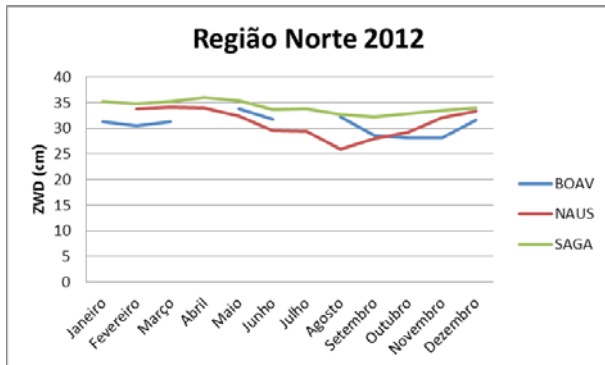


Figura 9 – Região Norte 2012

facilitar a compreensão, das 24 horas contidas em 1 (um) dia, os gráficos apresentados nas próximas seções apresentarão os resultados a partir das 2 horas, pois o PPP possui um tempo para convergência e como os valores iniciais são altos, isso atrapalharia a visualização da série. A Figura 11 exemplifica essa situação. Note nessa figura que se torna impossível avaliar as diferenças entre os resultados obtidos com os diferentes modelos devido aos altos valores apresentados nas primeiras duas horas do posicionamento.

4.2.1 Região Sul

Das 3 estações analisadas na região sul, foram selecionadas as estações localizadas na cidade de Imbituba/SC (IMBT) e Curitiba/PR (UFPR). A primeira foi considerada a mais

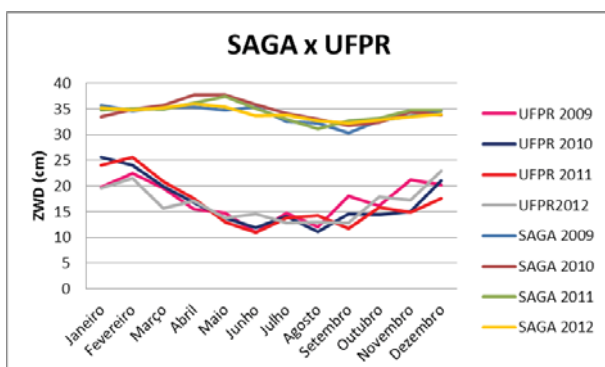


Figura 10 – Diferença entre a estação SAGA e UFPR

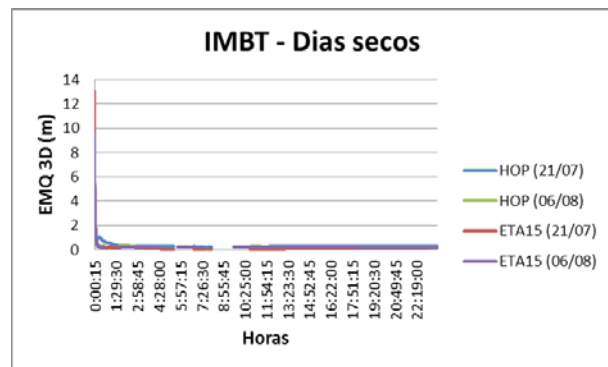


Figura 11 – Gráfico do PPP para a estação IMBT nos dias secos

úmida, e conseqüentemente, a segunda a mais seca. Após análises, verificou-se que para a estação de IMBT os dias mais úmidos foram 26/02 e 25/02 e os secos foram 21/07 e 06/08. Já para a estação UFPR os dias mais úmidos e secos foram 15/12, 31/12 e 28/03 e 20/09, respectivamente.

A figura 12 apresenta o EMQ 3D obtido com os modelos de Hopfield e PNT no PPP das estações selecionadas na região sul.

Analisando a Figura 12, nota-se que para as duas estações GPS o erro no posicionamento foi maior nos dias considerados úmidos (0,4 à 0,8 m). Já para os dias secos o erro foi menor (0 à 0,4 m). Isso pode demonstrar uma possível influência da alta umidade atmosférica. Além disso, pode-se concluir também que o modelo PNT (Eta15km) foi superior na maior parte dos casos (principalmente nos dias úmidos), exceto para a estação UFPR em parte de um dos dias secos.

4.2.2 Região Sudeste

Das 3 estações analisadas da região sudeste as escolhidas para análises no posicionamento foram as estações CEFÉ (Vitória/ES) e UBER (Uberlândia/MG), sendo consideradas as estações mais úmida e seca da região sudeste, respectivamente. Na primeira estação os dias considerados úmidos foram 25/11 e 10/12, já os dias secos foram 01/09 e 25/07. Na segunda estação os dias úmidos são 12/02, 24/10 e os dias secos 19/07, 20/07.

Os resultados do PPP podem ser observados na Figura 13.

Fazendo uma análise da Figura 13, conclui-se que o posicionamento é mais afetado nos dias mais úmidos, variando dependendo da estação

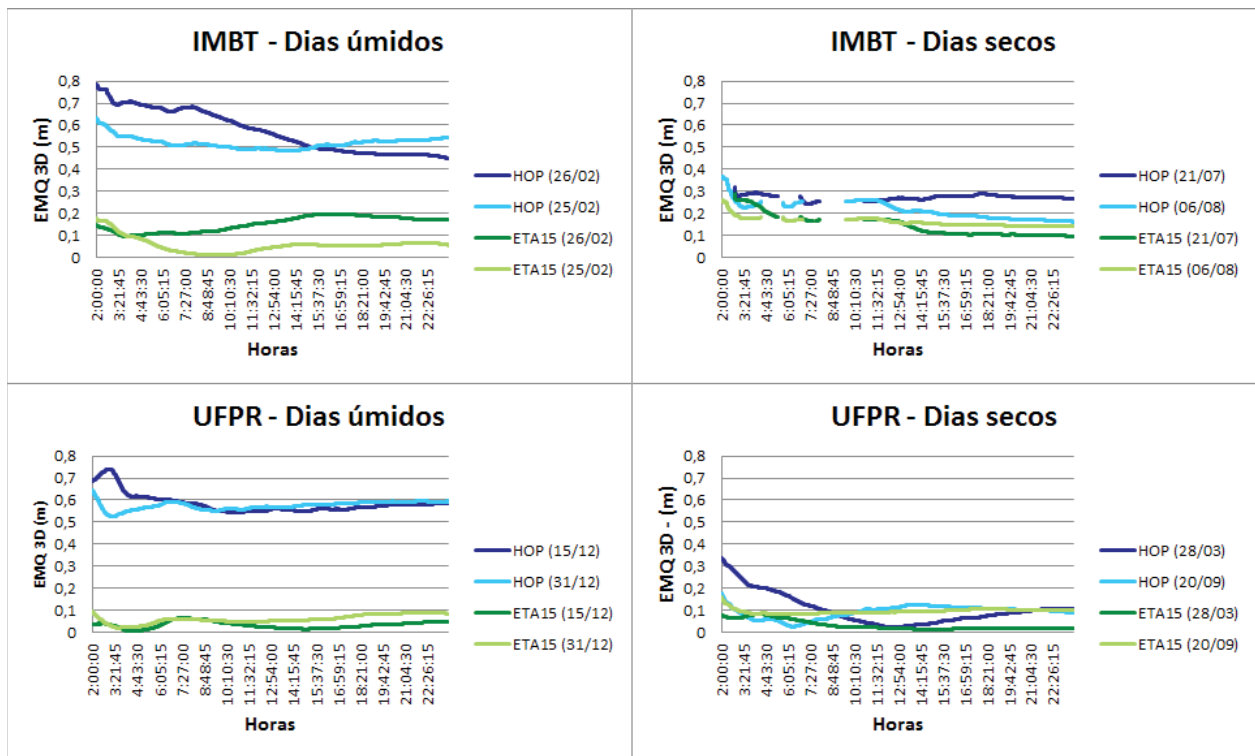


Figura 12 – Gráficos das estações IMBT e UFPR para os dias secos e úmidos

(0 à 2,5m), enquanto a variação do EMQ 3D nos dias mais secos são inferiores à 0,5m. Nota-se também que o modelo de PNT mostrou-se superior ao modelo de Hopfield.

4.2.3 Região Centro Oeste

Nessa região foram selecionadas a estação localizada na cidade de São Félix do Araguaia/MT (MTSF) e também BRAZ, estação localizada na cidade de Brasília/DF. Analisando, verificou-se que para a estação MTSF os dias mais úmidos e secos foram, 26/11, 27/11 e 04/09, 05/09, respectivamente. A estação localizada em Brasília/DF teve os dias 03/11 e 26/11 como os mais úmidos, e os mais secos foram 29/07 e 07/09.

A Figura 14 apresenta os resultados do posicionamento.

Observando tal figura, é possível concluir que os dias mais úmidos possuem um maior erro no posicionamento, variando entre 0 à 2m, enquanto o erro no posicionamento dos dias secos varia entre 0 à 0,5m. O modelo de PNT foi superior ao modelo de Hopfield.

4.2.4 Região Nordeste

Foram escolhidas duas estações da região Nordeste para a análise do PPP, a primeira foi Imperatriz/MA (IMPZ) nos dias 5/12, 8/12

(úmidos) e 31/07, 21/08 (secos). Já a segunda estação foi BOMJ, localizada na cidade de Bom Jesus da Lapa/BA nos dias 26/11, 27/11 (úmidos) e 29/04, 30/04 (secos).

A Figura 15 apresenta os resultados do PPP.

Fazendo uma análise da Figura 15 observa-se que para os dias úmidos na estação de IMPZ o erro foi pouco superior a 0,5m, já em BOMJ ele variou entre 0 à 3m. Em ambos os casos pode-se concluir que o modelo de PNT foi superior ao de Hopfield. Para os dias secos em ambas as estações o EMQ não superou 0,5m. Através dessa figura, outra conclusão é que como as regiões anteriores, o EMQ 3D é superior nos dias úmidos, principalmente quando se emprega o modelo de Hopfield.

4.2.5 Região Norte

Na região norte foram selecionadas as estações localizadas na cidade de São Gabriel da Cachoeira/AM (SAGA) e Boa Vista/RR (BOAV). A primeira foi considerada a mais úmida, e conseqüentemente, a segunda a mais seca. Após análises, verificou-se que a para a estação de SAGA os dias mais úmidos foram 24/12 e 06/04 e os secos foram 05/08 e 26/10. Já para a estação BOAV os dias mais úmidos e secos foram 13/04, 28/04 e 25/10 e 22/11, respectivamente. A Figura

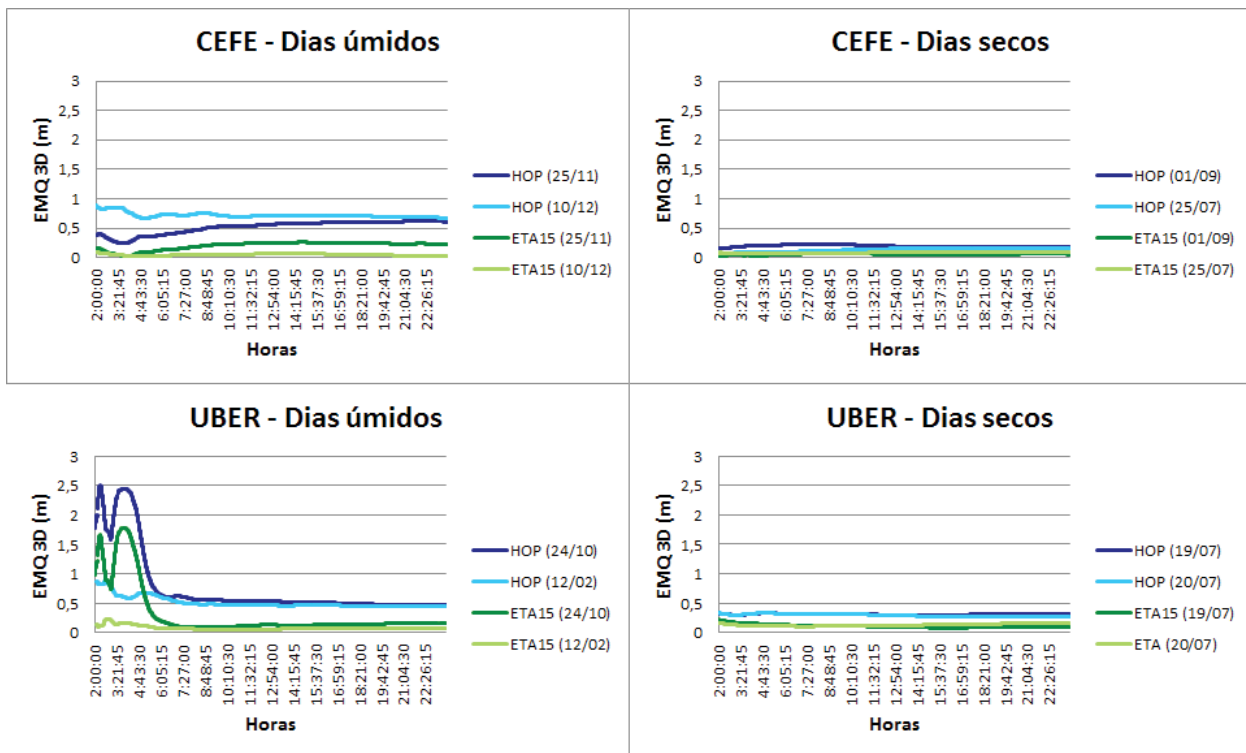


Figura 13 – Gráficos das estações CEFE e UBER para os dias secos e úmidos.

16 apresenta os resultados.

Analisando a Figura 48, nota-se que para as duas estações nos dias considerados úmidos, o erro no posicionamento foi maior para o modelo de Hopfield. Já para os dias secos e erro foi menor se comparado aos dias úmidos, confirmando uma possível influência da alta umidade atmosférica no posicionamento.

4.2.6 Análise Geral do Posicionamento por Ponto

Após realizadas algumas análises concluiu-se que a umidade atmosférica pode influenciar no posicionamento, pois nos dias considerados úmidos o EMQ 3D foi sempre superior do que nos dias considerados secos, principalmente quando se empregou o modelo de Hopfield.

Sobre os modelos utilizados, o modelo de PNT foi superior ao de Hopfield na grande maioria dos experimentos, pois o erro obtido no posicionamento utilizando esse modelo foi de menor escala.

Em algumas estações o resultado do posicionamento se comportou de maneira estranha, como o caso da estação BOAV nos dias secos. Esse comportamento será investigado para verificar se além da umidade atmosférica existe alguma outra influência envolvida no posicionamento.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foram realizadas revisões bibliográficas sobre os temas relacionados à troposfera, com mais ênfase nos estudos relacionados ao ZWD e seus efeitos no posicionamento GNSS. Foi empregado o software Gipsy Oasys II para gerar os dados do ZWD em 15 estações da rede RBMC/RIBAC nos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 (seção 4.1). Também foi utilizado o software desenvolvido por Marques (2012) para realizar o posicionamento absoluto e investigar a performance do modelo Eta15km versus o modelo de Hopfield (seção 4.2).

Em relação aos resultados do ZWD, em uma análise geral, nota-se que nos meses de Dezembro e Janeiro as estações apresentaram valores mais altos (próximo a 30 cm na maior parte dos dados), sendo que uma das causas é o fato desses meses fazerem parte do Verão, que é uma estação do ano chuvosa. Em contrapartida, nos meses de Junho, Julho e Agosto foi verificado valores baixos de ZWD. Esses meses fazem parte do Inverno, estação do ano mais seca. Mas, essa justificativa não se enquadra para a região norte, pois nela todos os meses do ano são altamente úmidos, quando comparados com os demais. Da análise geral, verificou-se que a estação com maiores valores de ZWD para os 4 anos fica localizada na cidade de São Gabriel da

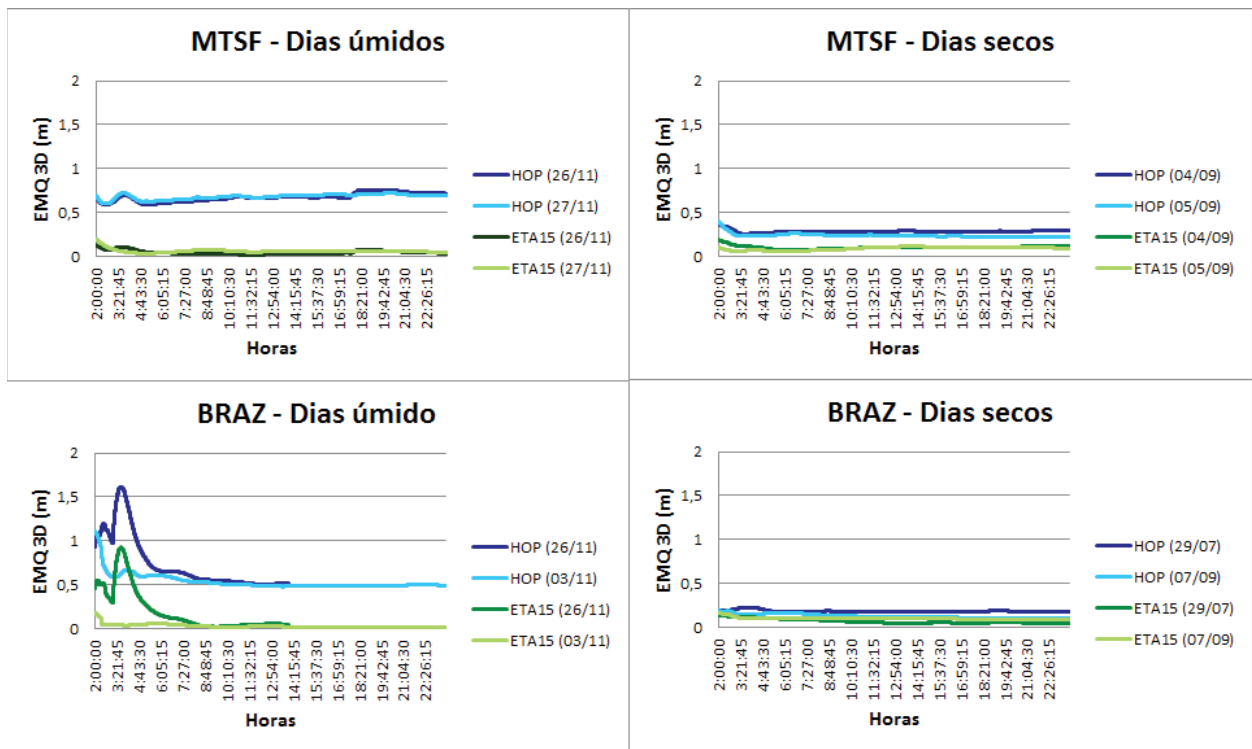


Figura 14 – Gráficos das estações MTSF e BRAZ para os dias secos e úmidos.

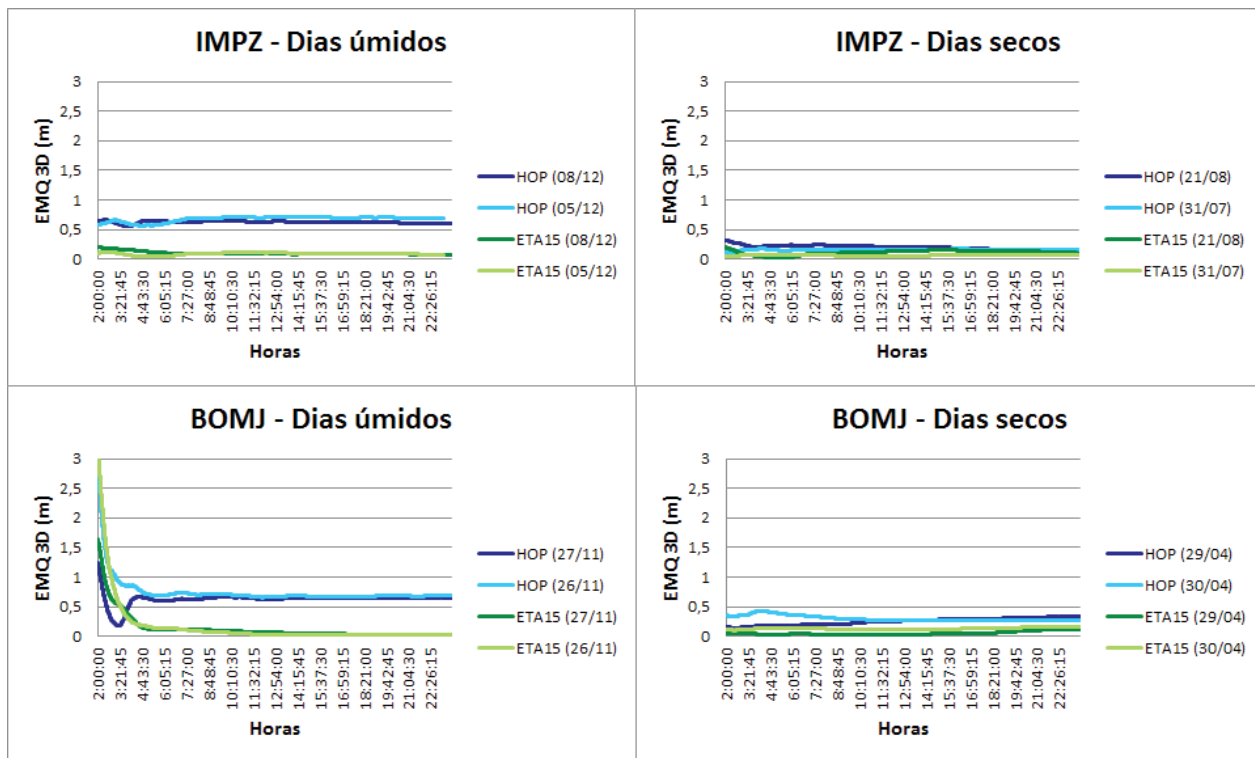


Figura 15 – Gráficos das estações IMPZ e BOMJ para os dias secos e úmidos.

Cachoeira/AM (SAGA) e a estação com menores valores na cidade de Curitiba/PR (UFPR).

Em relação ao PPP, notou-se nitidamente nos processamentos uma possível influência do ZWD nos resultados, em algumas estações o seu erro (EMQ 3D) chegou a 2,5m. Além disso, dos modelos utilizados no PPP, o modelo de PNT

mostrou-se superior ao modelo de Hopfield na grande maioria dos experimentos.

Em trabalhos futuros pretende-se realizar o posicionamento para um número maior de dados e com configurações diferentes, visando avaliar de forma ainda mais detalhada as melhorias obtidas com os modelos de PNT.

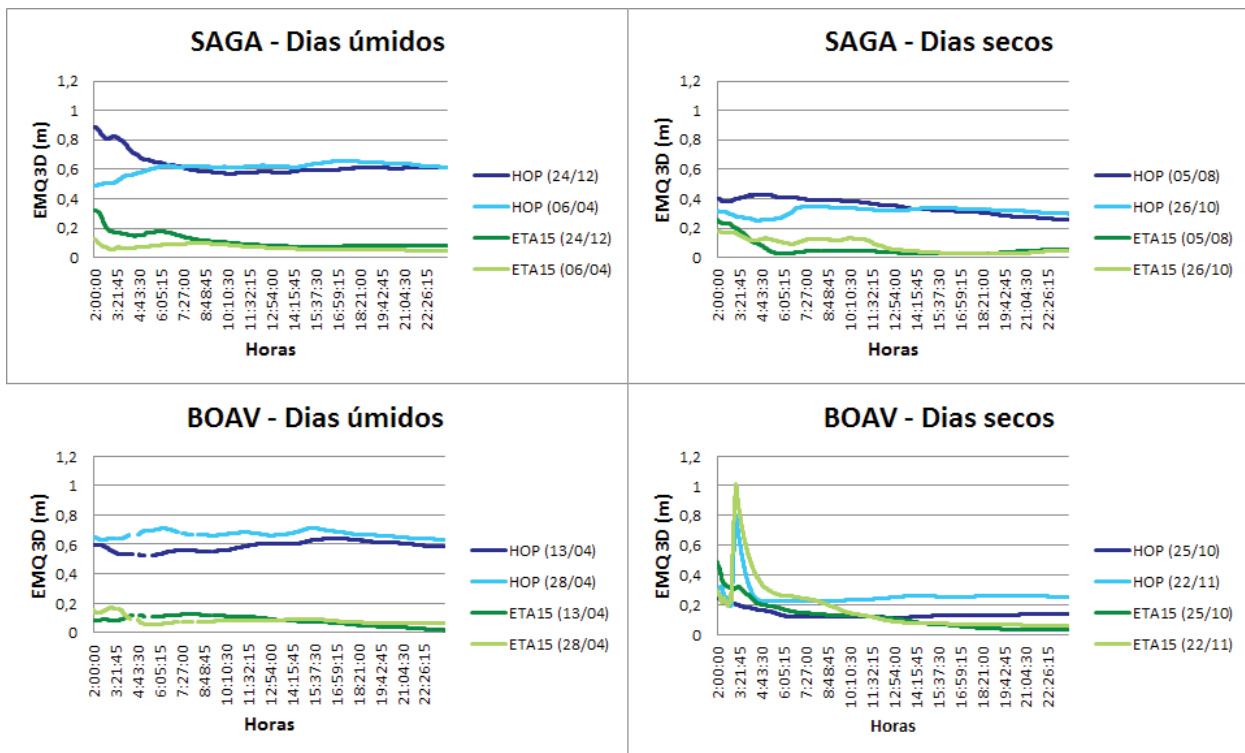


Figura 16 – Gráficos das estações SAGA e BOAV para os dias secos e úmidos.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento da bolsa de IC do primeiro autor (processo 2012/20916-7) e pelo projeto Regular da segunda autora (processo 2012/19906-7). Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa para a segunda autora. Ao Dr. Haroldo Antônio Marques pela disponibilização do software RT_PPP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Modelagem Dinâmica do ZTD Versus Modelo de Hopfield: Resultados Obtidos Utilizando o Conceito de Estação Virtual. In: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA, São José dos Campos. **Anais...**, p.316-336, 2006a.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SAPUCCI, L. F.; CAMARGO, P. O. VRS Concept Using NWP and Mod_Ion_FK: Preliminary Results in Brazil. In: International FIG Congress, Munique, Alemanha. **Proceedings...**, p.14, 2006b.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Aplicando Diferentes Técnicas para Gerar Dados de Pseudodistância de uma Estação Virtual. In: XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, 2007a.

162-168pp.

ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Evaluating the Performance of the CPTEC-INPE/FCT-UNESP Troposphere Dynamic Model Using the VRS Concept. In: 2007 Joint Assembly, Acapulco, México. **Proceedings...**, 2007b.

ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado em Redes de Estações de Referência GPS utilizando o Conceito de Estação Virtual**. 2008. 166f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALVES, D. B. M. **Desenvolvimento e implantação do RTK em rede para posicionamento geodésico no Estado de São Paulo**. 2011. Pós-Doutorado em Ciências Cartográficas – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 141f.

H O F M A N N - W E L L E N H O F, B. ; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

KAPLAN, E.D.; HEGARTY, C.J. **Understanding GPS Principles and Applications**. 2ª ed. Norwood: Editora ARTECH HOUSE, 2005.

- MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de redes GNSS**. 2012. 245f. Dissertação (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora UNESP, p. 476, 2008.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, p. 589, 2003.
- SPIPKER, J., J. JR., **Tropospheric Effects on GPS**. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol 1 Capítulo 13, p.517 – 546, 1994.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor D'água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para Posicionamento GNSS em Tempo Real. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Paraná, Curitiba, 2003. **Anais...**, 2003.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; ROSA, G. P. S. Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul obtidas usando Modelo de Previsão Numérica de Tempo com Alta Resolução Espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**. V.14, n.4, p.591-605, 2008.