



**Investigação de metodologias de processamento GPS para quantificação
do vapor d'água atmosférico em tempo real visando aplicações
nowcasting.**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)**

Pedro Sales Garcia Salomão (Fatec, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: pedro.sales@cptec.inpe.br

Luiz Fernando Sapucci (CPTEC/INPE/DMD, Orientador)
E-mail: luiz.sapucci@cptec.inpe.br

Julho de 2017



SUMÁRIO

1.Introdução	5
2.Objetivos do trabalho	7
3.Fundamentação teórica	7
3.1.Sistema GPS	7
3.1.1.Erros envolvidos no GPS	8
3.3.Efemerides precisas	10
3.4.ZTD	11
4.Materiais e metodos utilizados	13
4.1.runpkr00 e Teqc	13
4.2.RINEX	13
4.3.GOA-II	13
5.Análise e resultados	13
6.Conclusões	17
Referências bibliográficas	18



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Erros envolvidos no GPS (GNSS)	9
Figura 2- Dados IWW Vale/IEAV -período 07 a 24 de dezembro 2011	14
Figura 3- Valores IWW 07 de dezembro 2011 IEAV	15
Figura 4- Valores IWW 09 de dezembro 2011 IEAV	15
Figura 5- Valores IWW 17 de dezembro 2011 IEAV	15
Figura 6- Valores IWW 24 de dezembro 2011 IEAV	15
Figura 7- Valores IWW campanha Vale/UNIVAP 20/02/2012	16



Lista de Símbolos e Abreviaturas

- 1.CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- 2.DMD - Divisão de Modelagem e Desenvolvimento
- 3.FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia
- 4.FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
- 5.GNSS - Global Navigation Satellite System
- 6.GOA-II - GIPSY: GPS Inferred Positioning SYstem; OASIS: Orbit Analysis and Simulation Software II
- 7.GPS - Global Positioning System - Sistema de Posicionamento Global
- 8.INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- 9.JPL - JetPropulsion Laboratory
- 10.LGE - Laboratório de Geodésia Espacial
- 11.NASA - National Aeronautics and Space Administration
- 12.PWV - Precipitable Water Vapor
- 13.PPS - Precise Positioning Service – Serviço de Posicionamento Preciso
14. PNT - Previsão Numérica de Tempo
- 15.RINEX - Receiver Independent Exchange Format
- 16.SPS - Standard Positioning Service – Serviço de Posicionamento Padrão
- 17.ZTD - Zenithal Troposféric Delay

RESUMO

Como proposta inicial será realizada a verificação da instalação do software GOA-II nas máquinas do grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados na DMD-CPTEC-INPE se está funcionando normalmente e será avaliado se o processamento se ocorre da forma correta.

Em uma segunda etapa serão organizados os dados GNSS a serem utilizados no desenvolvimento do projeto. Diversos testes de configuração serão realizados para avaliar qual é mais eficiente para ser utilizada na estimativa dos valores do ZTD (Zenital Tropospheric Delay) em tempo real.

Scripts em Shell-LINUX desenvolvidos em outros trabalhos de iniciação tecnológica (AVANÇO, 2012) serão melhorados para facilitar o processamento dos dados envolvendo grandes quantidades de dados em várias estações GNSS (Global Navigation Satellite System). Também deverão ser desenvolvidos outros scripts e programas adicionais na avaliação dos resultados dentro dos parâmetros dos modelos dos dados IWV (Integrated Water Vapor), no qual os dados do PWV podem ser úteis. A comparação com os valores gerados pelo EMBRACE serão realizadas para avaliar a consistência dos valores obtidos em tempo real com uso do GOA-II (Gipsy: GPS Inferred Positioning System; OASIS: Orbit Analysis and Simulation Software II) desenvolvido pelo JPL (Jet Propulsion Laboratory) no CPTEC. Gráficos e tabelas serão gerados e os resultados deverão estar disponíveis para pesquisas no CPTEC, tanto para a assimilação de dados como para outras aplicações que requerem informações sobre a distribuição espacial do vapor d'água atmosférico, como atividades de nowcasting.

1.Introdução

Existem variados tipos de GPS (Global Positioning System), em nosso caso iremos utilizar o GNSS, utilizado principalmente em aplicações militares sua tecnologia e composta de 4 satélites referenciando um ponto na superfícies terrestre, assim o GNSS se destaca por sua precisão das informações obtidas se destacando para a finalidade de cálculo de IWV.

Variam muito os métodos para obtenção do IWV, podendo ser: Radiossondas, radiômetros, dentre outras formas. O sinal emitido por esses equipamentos pode ser usado para



quantificar o vapor d'água na atmosfera. Entretanto, um dos que está se destacando, atualmente, é o uso do GNSS. Esse sistema atualmente vem surgindo infindáveis de novas aplicações uma delas é na quantificação do IWV. A estimativa de vapor d'água na atmosfera usando sinais GNSS é possível, pelo fato destes sinais emitidos pelos satélites sofrem influência desse componente atmosféricos que funcionam como uma barreira assim gerando atraso no sinal do GNSS, esse atraso é definido como ZTD, onde o mesmo é proporcional à concentração desse gás na atmosfera.

É possível obter valores do IWV com boa qualidade e boa resolução temporal. No entanto, o processamento desses dados tem sido feito pelo LGE/FCT/UNESP, o qual por esforços adicionais tem tido sucesso, pelo fato de contar com o apoio da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) em um projeto Temático (MONICO, 2006).

No o processamento do IWV são utilizadas efemérides disponibilizadas pelo JPL, no processamento atual é usado efemerides pós-processadas o que não permite realiza o processamento em tempo real pelo período necessário para serem geradas. Com a utilização das efemerides ultra-processadas permite-se que se efetue o processamento em tempo real com alto grau de precisão pois estas efemerides são disponibilizadas a cada 5 minutos.

Na assimilação operacional de dados do CPTEC, fontes de informações em tempo real e de qualidade, em especial da distribuição espacial da umidade na atmosfera é de grande importância para o bom desempenho da Previsão Numérica de Tempo (PNT) (KALNAY, 2005). Também disponibilizado pelo JPL o software usado no processamento GOA-II, o CPTEC possui licença para a utilização do software GOA-II.

O nowcasting é a descrição detalhada do tempo atual junto com as previsões obtidas por extrapolação por um período de 0 a 6 horas à frente. Nesta faixa de tempo é possível prever características pequenas, como tempestades individuais com precisão razoável. É, portanto, uma ferramenta poderosa para alertar a população sobre o clima, incluindo ciclones tropicais, tempestades e tornados que causam inundações repentinas, raios e ventos destrutivos. Em termos gerais, o nowcasting contribui para:



- Redução das mortes e lesões devido a riscos climáticos;
- Redução de danos patrimoniais privados, públicos e industriais;
- Maior eficiência e economia para a indústria, transporte e agricultura.

A combinação do nowcasting com IWV em tempo real

2.Objetivos do Trabalho

Investigar metodologias que forneçam resultados de melhor precisão e menor latência no processamento em tempo real de observações dos sistemas de posicionamento GNSS para a quantificação de estimativas do atraso zenital troposférico (ZTD), as quais podem ser convertidas em valores do vapor d'água integrado na atmosfera denominado IWV.

Avaliar a qualidade das estimativas dos valores obtidos nas técnicas em tempo real com os valores das estimativas pós-processadas com o objetivo de identificar melhorias, bem como validar e aprimorar as metodologias testadas do ponto de vista da qualidade e da latência;

Investigar uma metodologia de monitoramento em tempo real das variações do PWV para aplicações de nowcasting baseada em uma interface gráfica usando linguagem de programação Python para facilitar o manuseio dos dados.

3.Fundamentação Teórica

Neste capítulo iremos abordar o pontos relevantes que tem papel crucial neste projeto, pontos como: O Sistema de poisicionamento global e seu funcionamento e sua vertente, sendo ela modelo GNSS. Cálculo de ZTD, efemérites e os softwares base para o processamento dos arquivos RINEX em conjunto com software GOA-II .

3.1-Sistema GPS

O GPS é um sistema de navegação de abrangência global, sua função é identificar qualquer ponto na superfície terrestre através de vários tipos de aplicação sendo elas: navegação global e regional, determinação altimétrica, géodinâmicas e geodésicas. Composto por uma



grade de satélite que ocupam todo o globo terrestres, esses satélites enviam informações para os usuários o tempo todo, podendo identificar a superfície por meio de cálculos chamados pseudodistância.

O sistemas GPS possui vários tipos, o que será utilizado neste projeto é o GNSS, caracterizado pelo seu uso na área militar onde é destacado pela sua qualidade de imagem, a alta qualidade de imagem do GNSS se da pelo fato de fazer uso de 4 satélites para determinar o ponto na superfície terrestre aumentando sua precisão.

GPS entrega dois tipos de serviço:

- SPS (Standard Positioning Service – Serviço de Posicionamento Padrão)
- PPS (Precise Positioning Service – Serviço de Posicionamento Preciso)

que são dois tipos de serviços de posicionamento e tempo padrão.

Atrazo zenital troposférico (ZTD) requer técnicas de posiciomento no sistema GPS muito específicas, essas técnicas se dividem em duas frentes:

- Posicionamento relativo ao ponto de alta precisão
- No uso do posicionamento relativo, a posição do ponto é determinada com base na posição de outros, onde as coordenadas já são conhecidas.

Com o posicionamento por ponto de alta precisão, ao se utilizam efemérides transmitidas, a posição do ponto é determinada no referencial vinculado ao sistema que está sendo usado atualmente (MONICO, 2008).

3.1.1-Erros envolvidos no GPS

As observáveis nada mais são que os sinais envolvidos no processo de medida e podem sofrer vários erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios. As definições desses tipos de erros estão definidos pos tipos de erros e podem ser caliificados como mostra a Figura 1.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite e receptor.
Propagação do sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminho ou Sinais refletidos Rotação da terra Fase <i>Wind-up</i>
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena
Estação/Efeitos Geofísicos	Erro nas coordenadas Multicaminho Marés terrestres Movimento do Pólo Carga dos oceanos Pressão da atmosfera

Fonte: Monico (2008, p.190).

Figura 1- Erros envolvidos no GPS (GNSS).

Satélite:

- Erros de órbita: As informações orbitais dos satélites estão sujeitas a vários efeitos que as distorcem, assim o erro nas coordenadas dos satélites se propagará ocasionando um efeito cascata chegando até as posições dos usuários.
- Erro do relógio: Os satélites possuem a bordo relógios atômicos que não acompanham o sistema de tempo GPS, cujo é monitorado pelo segmento de controle. No caso dos relógios dos receptores que são constituídos de osciladores de quartzo, não são precisos, os que nos leva a considerá-los uma fonte importante de erro.
- Relatividade: Os efeitos da relatividade atingem também , além dos satélites (órbita e relógio), à propagação do sinal e aos relógios dos receptores gerando distorções na recepção.
- Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite: Esse efeito é causado pela alteração entre os caminhos percorridos L1 e L2 através do hardware do satélite modificando assim sua trajetória.



- Troposfera e Ionosfera: A propagação dos sinais emitidos pelo GNSS é afetada na atmosfera dinâmica, na troposfera a refração depende das propriedades termodinâmicas. A ionosfera é altamente dependente da frequência, dessa forma a pseudodistância e a fase do sinal é afetada de formas diferentes (MONICO, 2008, p. 196). Os dois efeitos são minimizados quando se realiza a dupla diferenciação utilizando linhas de base curta.
- Perdas de ciclo: Caracterizadas por um pulso na contagem de ciclos inteiros da medida da fase da onda portadora entre duas épocas distintas.
- Multicaminho: São os sinais recebidos pela antena do receptor GPS, são divididos em duas vertentes: Sinais recebidos diretamente dos satélites e os sinais enviados pelos satélites após sofrerem desvios, atingiram a antena do receptor. Esses sinais que sofrem reflexões são caracterizados efeitos do multicaminho.
- Erro nas coordenadas: Quando se realiza o posicionamento relativo, as coordenadas da estação base influenciam nas coordenadas da estação móvel. Causando degradação atingindo o posicionamento.
- Rotação da Terra: Cálculo realizado das coordenadas do satélite GPS para o momento da transmissão do sinal num sistema de coordenadas do tipo fixo à Terra. Porém, é necessário a realização de uma correção de rotação da Terra, já que no momento da propagação do sinal o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação ao satélite, alterando assim as suas coordenadas.
- Fase wind-up: O trajeto padrão do sinal transmitido pelo GPS é polarizado de forma circular no sentido a direita. Se houver, uma rotação de uma das antenas em torno do próprio eixo irá causar uma mudança na fase da onda portadora em mais de um ciclo.



- Erro entre canais: Ocorre quando um receptor possui mais de um canal, podendo assim ocorrer erro sistemático entre os canais, pelo fato do sinal de cada satélite percorrer um caminho eletrônico diferente.
- Centro de fase da antena: Denominado ponto virtual onde as medidas dos sinais são referenciadas, geralmente não coincide com o centro mecânico da antena. É necessário conhecer a relação entre o centro de fase e um ponto de referência adotado na antena, para que seja acessível às medidas.

3.3-Efemérite precisas

As efemérites são as posições onde se encontram os satélites no momento da captura dos dados, podendo variar sua precisão em decorrência do tempo de sua geração. Três tipos são disponibilizados pelo JPL são eles:

- Efemérides pós -processadas
- Efemérides ultra -processadas
- Efemérides rapid

3.4- ZTD

Para a estimativa dos valores ZTD são usados os dados RINEX de observação como entrada para o processamento no GOA-II, As correções e as órbitas correspondentes aos relógios dos satélites são determinadas pelo JPL, acesso via ftp (<ftp://sideshow.jpl.nasa.gov>), possibilitando assim baixar os dados e usá-los no processamento.

O valor do ZTD é definido por:

$$D_{zh} \approx 1,013 * 2,27 * \exp(-h_0 * 0,116 * 10^{-3}) = 2,1367 m$$

Onde h é a altitude geométrica da estação. Dessa forma o GOA-II gera as estimativas do ZTD, para cada dia de uma campanha, com intervalos de 5 minutos, podendo ser configurado personalizada e um arquivo com as estimativas do ZTD é gerado.



Com os valores de ZTD pré estabelecidos podemos partir para a parte de geração dos dados IWV, onde o valor do IWV é definido por:

$$IWV = \frac{D_{zw} 10^6}{R_w \left[K_2 + \frac{K_3}{T_m} \right]}$$

Onde D_{zw} é o atraso zenital troposférico da componente úmida, R_w é a constante universal dos gases, de forma mais específica o vapor d'água, k_2 e k_3 são as constantes da refratividade atmosférica e T_m é a temperatura média do perfil troposférico. Esses dados são obtidos através da seguinte fórmula:

$$T_m \approx 273,2972 + 0,01063 T_s$$

Onde T_s é a temperatura na superfície em formato Kelvin, sendo esses valores coletados dos sensores meteorológicos da estação na qual se deseja obter os valores IWV. Após a obtenção desses valores, é necessária a coleta de valores de pressão. Assim, as estimativas de ZTD podem ser convertidas em dados de IWV.

Com o uso das efemérides para correção do relógio nos permite obter a maior precisão possível, no modelo atual o processamento é feito o uso de efemérides do modelo pós processado que possuem intervalo de geração de 24 horas. Na fase atual do projeto esta sendo utilizado efemérides pré processadas, do tipos ultra (segundo JPL), que tem tempo de geração de 5 minutos e disponível a cada 3 horas com precisão aceitável para a finalidade de cálculo do IWV. Outra possibilidade são as efemérides denominadas rapid que tem precisão elevada mas são mais lentas em sua geração em comparação com as ultra processadas.

4. Materiais e Métodos Utilizados

Os processamento é composto de várias etapas que serão explicadas neste capítulo.

4.1-runpkr00 e Teqc

Os softwares utilizados na primeira etapa para converter os dados binários em RINEX são:

- runpkr00 e teqC

Os desenvolvimentos realizados neste trabalho estão voltados para o estudo das efemérides e seus parâmetros de uso, também foram realizados testes realizando alterações nos parâmetros, buscando encontrar acalibração ideal para uso no software GOA-II pelo fato de cada efeméride requerer tipos diferentes de parâmetros nos processamentos utilizados.

Para que se possa fazer o processo para obtenção do IWV como requisito inicial é necessário a conversão dos dados vindos das antenas receptoras terrestres, os dados coletados pelas antenas inicialmente estão no formato binário requerendo assim sua conversão, o primeiro estágio é o uso do software runpkr00 para que o Teqc possa reconhecer os arquivos eles devem estar no formato .TGD na qual o unpkr00 se encarrega de convertê-los no formato adequado. Já o Teqc é encarregado de converter os arquivos .TGD nos arquivos RINEX.

4.2-RINEX

Quando se fala em arquivos RINEX se refere aos três componentes do modelo RINEX, porém no caso de entrada para o GOA-II é utilizado apenas os arquivos de observação, para que o processamento ocorra sem erros é necessário que os arquivos de observação estejam no formato correto, os arquivos sta_info estejam com as datas correspondentes pelo fato destes arquivos conterem as informações das estações a serem processadas.

4.3-GOA-II

O GOA-II é um software científico que possui múltiplas funcionalidades relacionadas ao processamento de dados, o que permite cálculos precisos para geração dos valores ZTD por meio dos sinais GPS. Somente após isolar as influências troposféricas na propagação dos sinais GNSS (SAPUCCI, 2001), permitindo a diminuição de outros erros sistemáticos envolvidos no modelo de observação, o ajuste é feito para esse fim e introduzindo-se outros parâmetros conhecidos.

Após obter os dados RINEX começamos o processamento no software científico GOA-II, calibrando o software para cada tipo de efeméride usada assim permitindo realizar múltiplos tipos de processamento. Através das efemérides precisas e dos dados observados o GOA-II consegue realizar o cálculo do atraso no sinal GPS sendo assim obtido o ZTD.

Análises e Resultados

O presente capítulo irá abordar os processamentos realizados referente as campanhas envolvidas no projeto e seus resultados, as campanhas na quais os dados foram processados foram: Vale/IEAV e Vale/UNIVAP.

Os dados foram processados em três formatos diferentes sendo: pós processados, ultra processados e rápido, os valores de IWV obtidos no processamento foram comparados através de figuras para melhor visualização e análise de divergência entre os valores dos dados. Os dados foram plotados em períodos de vários dias quanto em período de 24 horas.

Na campanha Vale/IEAV também foram realizados os processamentos com os três modelos efemérides e comparados seus resultados onde as variações ficaram dentro da margem estabelecida para a finalidade do processamento, a figura 1 ilustra os resultados do processamento.

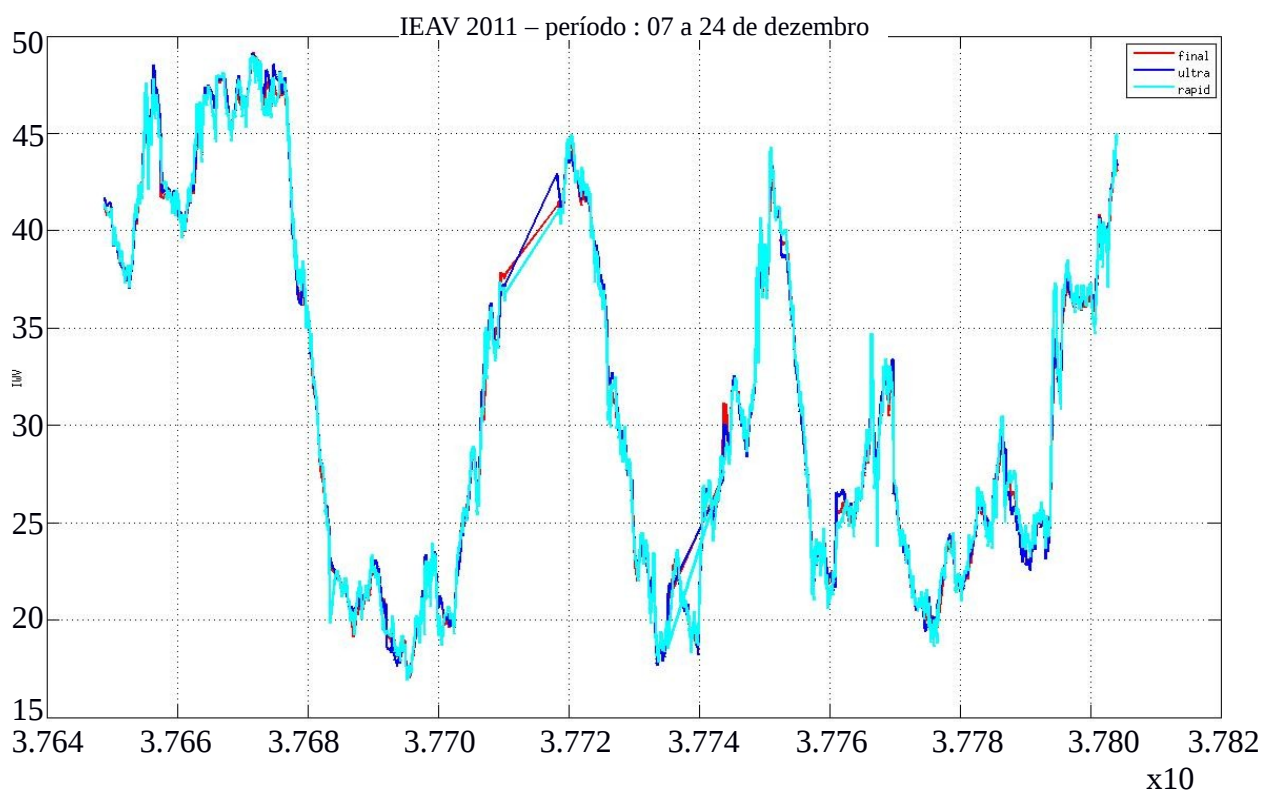


Figura 2 – A figura acima mostra os três tipos de valores IWV em um período de 18 dias em dezembro de 2011, os dias estão representados em segundos julianos.

Para melhor análise dos valores deste período foi segmentada a figura 2 gerando assim figuras de 24 horas possibilitando a avaliação mais detalhada dos dados. As figuras abaixo ilustram este período.

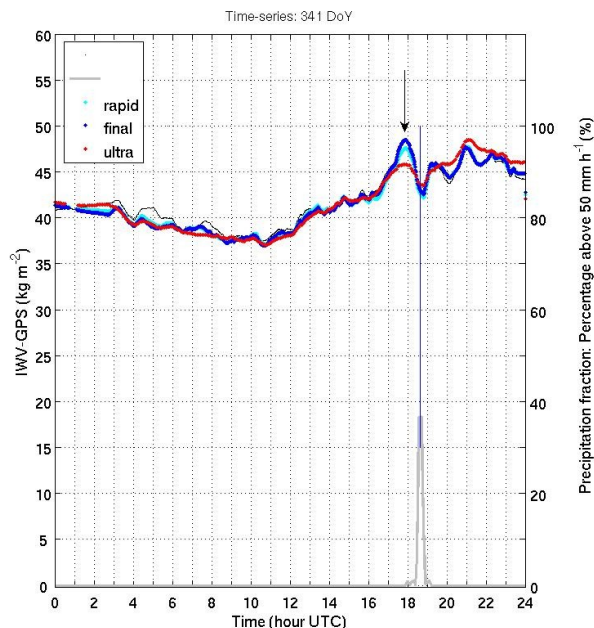


Figura 3- A figura acima mostra valores de IWV para o dia 07 de dezembro de 2011 na campanha Vale/IEAV

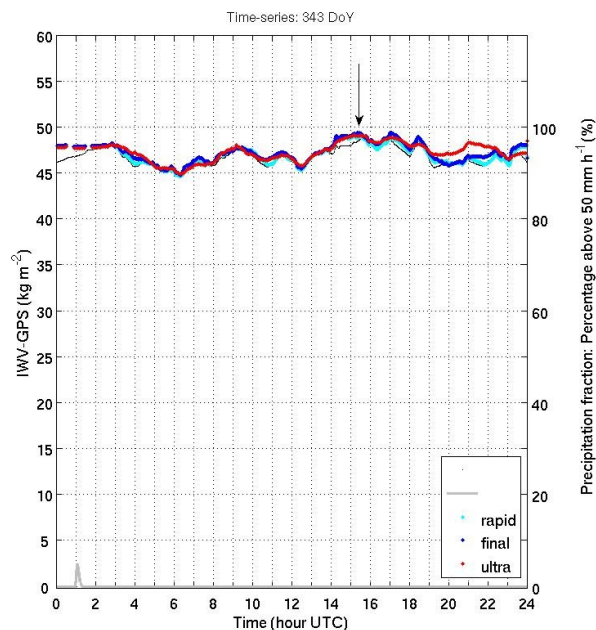


Figura 4- A figura acima mostra valores de IWV para o dia 09 de dezembro de 2011 na campanha Vale/IEAV

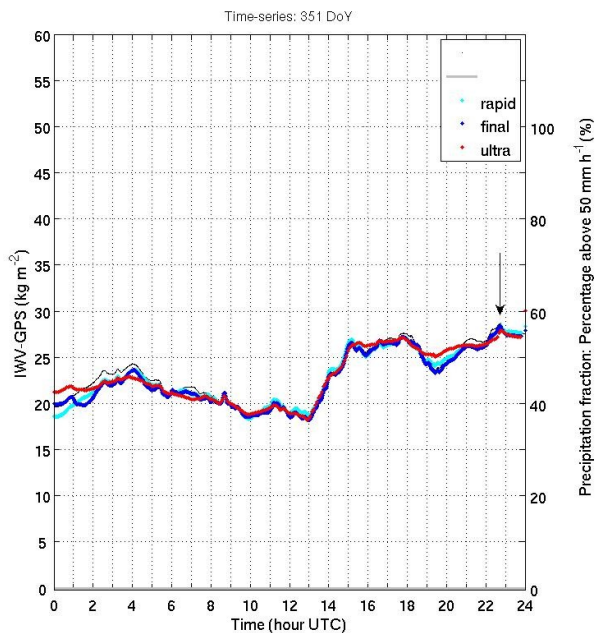


Figura 5- A figura acima mostra valores de IWV para o dia 17 de dezembro de 2011 na campanha Vale/IEAV

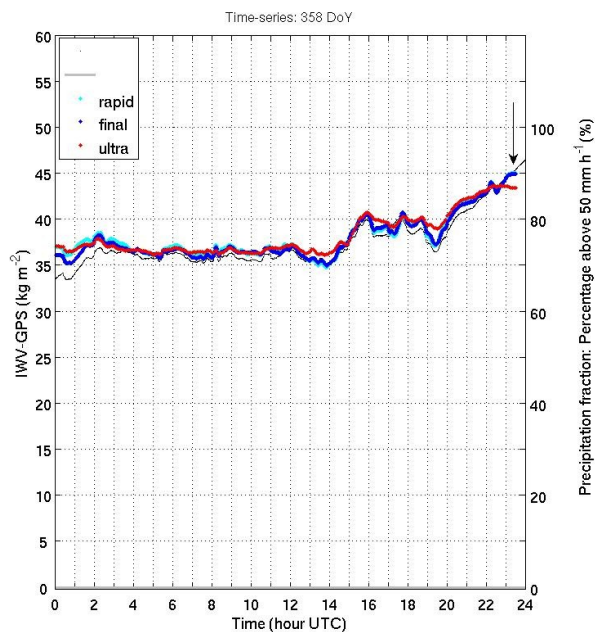


Figura 6- A figura acima mostra valores de IWV para o dia 24 de dezembro de 2011 na campanha Vale/IEAV

A figura abaixo refere-se ao processamento dos dados da campanha Vale/UNIVAP em 20 de janeiro de 2012 com os tres tipos de IWV, contendo também na figuras informações de desvio padrão entre os valores e média dos valores de IWV.

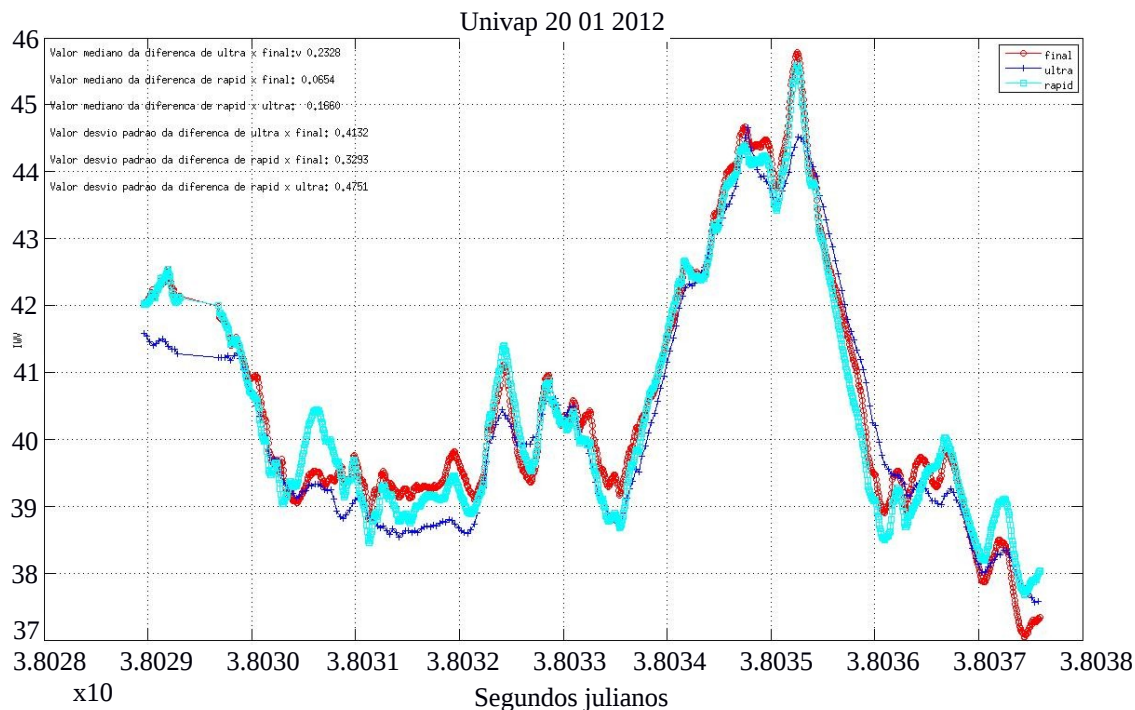


Figura 7– A figura acima ilustra os resultados obtidos no processamento do dia 20/01/2012 para a campanha Vale/UNIVAP, mostrando como os valores do tres tipos de efemeride são bem próximos.

Conclusão

Conclui-se que o presente trabalho que esta sendo desenvolvido no CPTEC é de grande importância para identificação de fenômenos naturais com maior antecipação assim auxiliando o método nowcasting de previsão destes fenômenos naturais. Os resultados obtidos são bem satisfatórios em relação aos valores precisos mostrando que o processamento em tempo real usando GOA-II é bem promissor .



Referências Bibliográficas

AVANÇO, L. A.; SAPUCCI, L. F. **Processamento de dados GNSS para a quantificação do IWV utilizando o software GOA-II visando a assimilação operacional de dados.** In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE)., 2012, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2012. p. 124. CD-ROM; On-line; Papel. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CMKARL>>. Acesso em: 12 de julho. 2017.

FORTES, L.P.S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC).** Tese de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 152 pp, 1997.

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

KALNAY, E., HUNT, B., OTT, E., AND SZUNYOGH, I. 2005. **Ensemble forecasting and data assimilation: two problems with the same solution?** In Palmer, T.N. and Hagedorn, R., editors, *Predictability of Weather and Climate*. Cambridge University Press.

MONICO, JOAO FRANCISCO GALERA. **POSICIONAMENTO PELO GNSS- DESCRIÇÃO, FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES.** - 2.ED. - São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MONICO. J. F. G. **GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão.** Projeto FAPESP na modalidade temático. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, SP. 2006.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS.** 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em



Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Disponível em: <http://webaula.cptec.inpe.br/zenital/documentos/DISSER_SAPUCCI.pdf>.

Acesso em: 27 de janeiro. 2017

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, p. 591-605, 2008.