AVALIAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GPS DO SATÉLITE CHAMP SOBRE A AMÉRICA DO SUL

MARCELO LEANDRO HOLZSCHUH¹, LUIZ FERNANDO SAPUCCI², JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO³

¹Universidade Estadual do Mato Grosso, Departamento de Licenciatura em Computação, Colíder, MT

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, SP

³Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Cartografia da FCT, Presidente Prudente, SP

mlholz@gmail.com, luiz.sapucci@cptec.inpe.br, galera@fct.unesp.br

Recebido Outubro 2007 - Aceito Dezembro 2009

RESUMO

Com o advento dos satélites artificiais *Global Positioning System* (GPS) em conjunto com os satélites *Low Earth Orbiting* (LEO), surge a Rádio Ocultação GPS (RO GPS), técnica que permite obter remotamente perfis atmosféricos com boas perspectivas para aplicações em modelagem numérica de tempo. O satélite LEO denominado *Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application* (CHAMP), embora tenha sido lançado com o objetivo principal voltado para estudos geofísicos, tem permitido também acessar o potencial da RO GPS. Nesse trabalho objetiva-se avaliar a qualidade dos perfis atmosféricos obtidos com o satélite CHAMP sobre a América do Sul, comparando-os com os perfis provenientes de radiossondagens e da reanálise regional de 5 anos do CPTEC/INPE. Os resultados da comparação entre os perfis obtidos por RO GPS e por radiossondas, apontam uma diferença média na temperatura abaixo de 1K e um desvio padrão de até 3K, distribuídos na camada entre 9 e 18 km. Os resultados da comparação entre os perfis de temperatura advindos de RO GPS e da reanálise do CPTEC entre 9 e 13 km, mostram que o viés é praticamente nulo e o desvio padrão próximo a 1K.

Palavras-chaves: RO GPS; GPS meteorologia, Reanálise CPTEC, RACCI.

ABSTRACT – EVALUATION OF ATMOSPHERIC PROFILES FROM GPS RADIO OCCULTATION USING THE CHAMP SATELLITE OVER SOUTH AMERICA.

With the advent of *Global Positioning System* (GPS), together with *Low Earth Orbit* (LEO) satellites, the Radio Occultation GPS (RO GPS) technique appears as a possibility of obtaining atmospheric profiles remotely, with positive perspectives of applications in atmospheric numerical modeling. The LEO satellite mission denominated *Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application* (CHAMP), although with the main objective being in the area of geophysical studies, it has also allowed studies about the potential of RO-GPS. This study is related to the evaluation of the atmospheric profiles quality obtained by the LEO CHAMP satellites over South America, comparing them to radiosondes profiles and of regional reanalysis of five years from CPTEC/INPE. The results of the comparisons between RO GPS and RSO profiles pointed out a mean temperature difference below 1 K and a standard deviation of up to 3 K, distributed in altitudes from 9 to 18 km. The comparisons of temperature profiles from RO GPS and CPTEC's reanalysis between 9 and 13 km showed that the bias is almost null and the standard deviation is around 1 K.

Keywords: RO GPS, GPS meteorology, CPTEC Reanalysis, RACCI.

1. INTRODUÇÃO

Em astronomia a ocultação é um fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da sobreposição de outro corpo. Tal fenômeno começou a ser estudado há vários anos com o intuito de obter informações da atmosfera de outros planetas. Esses estudos se iniciaram com as ocultações estelares. As estrelas eram observadas da Terra quando passavam por detrás de um planeta (Fjeldbo et al., 1971). A partir da posição da estrela, em um determinado instante, é possível calcular a refração da luz proveniente da estrela gerada pela influência da atmosfera do planeta em um ponto específico. A variação de posição dos corpos celestes permite a obtenção de um perfil dessa refração e, conseqüentemente, informações sobre a atmosfera desse planeta. Com os lançamentos dos satélites artificiais, foi possível a realização de diversos testes empregando essa técnica com os sinais de radiofrequência, com o objetivo de se obter perfis da atmosfera terrestre. No entanto, com a operacionalização do sistema de posicionamento global por satélites, a rádio ocultação passou a ser viabilizada operacionalmente ao envolver receptores a bordo de satélites de órbita baixa.

O GPS é atualmente o mais importante sistema de posicionamento, formado por uma constelação de pelo menos 24 satélites, dispostos de modo que o receptor obtenha sinais de no mínimo quatro satélites simultaneamente, o que permite determinar de maneira relativamente precisa a posição desse receptor em tempo real (Monico, 2008). Apesar do GPS ter sido projetado e desenvolvido pela força aérea e marinha dos Estados Unidos para fins militares, a comunidade civil desenvolveu metodologias que permitiram o uso desse sistema para muitas atividades comerciais, tais como: navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, entre outras (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Uma aplicação GPS importante é a determinação precisa da órbita de satélites *Low Earth Orbit* (LEO). Tais satélites estão localizados em uma órbita de aproximadamente 800 km de altitude e utilizam um receptor GPS a bordo para determinação precisa de sua posição.

No entanto, a partir dos dados coletados por esse receptor, é possível através da técnica de Rádio Ocultação GPS (RO GPS), recuperar perfis atmosféricos de temperatura, pressão e vapor d'água da atmosfera terrestre (Kursinski, 1996).

A primeira missão que permitiu empregar a técnica de RO GPS foi a que lançou o satélite GPS/MET, que gerou dados de sondagem da atmosfera neutra e da ionosfera. Em sequência também foram lançados outros satélites LEO, dentre os quais está o *Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application* (CHAMP), que fora lançado com o objetivo de determinar o campo de gravidade e o campo magnético da Terra, mas que tem permitido estudos sobre RO GPS (Wikert et al., 2001). A nova geração dos satélites LEO para estudos atmosféricos se insere no projeto *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate* (COSMIC) (Rocken et al., 2000), que tem como objetivo principal proporcionar melhorias no desempenho de modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT), especialmente em regiões polares e oceânicas, bem como em locais com florestas muito densas, como é o caso da floresta amazônica.

No presente estudo, uma validação dos perfis atmosféricos, obtidos com RO GPS do satélite CHAMP, é apresentada ao compará-los com perfis provenientes de radiossondas e da reanálise do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), daqui para frente denominada REANA. Na próxima seção é apresentada uma revisão sobre a obtenção dos perfis atmosféricos a partir da RO GPS. Na seção 3 são apresentados detalhes dos dados utilizados e da metodologia de avaliação. Na seção 4 são mostrados os resultados obtidos e uma análise deles, enquanto na seção 5 são apresentados os comentários finais e conclusões.

2. PERFIS ATMOSFÉRICOS A PARTIR DA RADIO OCULTAÇÃO GPS

Na RO GPS, os sinais enviados pelos satélites GPS e recebidos no satélite LEO sofrem os efeitos da ionosfera

Figura 1 – Esquema do comportamento do sinal GPS em uma RO-GPS.
Fonte: Adaptado de LEE et al. (2000).

e da camada eletricamente neutra. A ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, a refração depende da frequência e abrange a camada entre 50 e 1.000 km acima da superfície terrestre. A camada eletricamente neutra (denominada nas Ciências Geodésicas de troposfera) se estende da superfície terrestre até aproximadamente 50 km, e comporta-se como um meio não-dispersivo, isto é, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar.

Devido à influência da ionosfera e da camada eletricamente neutra, a propagação do sinal se dá na forma de uma linha curva, entre o transmissor e o receptor, fazendo com que os satélites, mesmo que não estejam visíveis entre si, consigam enviar e receber sinais (Figura 1). Isso permite, que através de uma sequência de sinais emitidos pelo transmissor (satélites da constelação GPS) e recebidos pelo receptor GPS a bordo de um satélite LEO, obtenha-se um perfil de refratividade.

Os efeitos da atmosfera na propagação dos sinais GPS durante uma ocultação podem ser caracterizados pelo ângulo de curvatura (α), pelo parâmetro de impacto (a) e pelo raio de ocultação (r). Tais grandezas são indicadas na Figura 2, a qual apresenta uma ilustração da geometria da ocultação instantânea entre os satélites GPS e LEO. Durante a ocultação, estando o sinal tanto no modo ascendente como no descendente na atmosfera, a variação de α com r ou a é função do perfil do índice de refratividade (n). Este perfil pode ser obtido a partir de medidas de α em função de a durante a ocultação segundo a equação (Kursinski, 1997):

$$\alpha = \alpha(a) = 2a \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (1)$$

A dependência do ângulo de curvatura e do parâmetro de impacto em relação ao tempo, durante uma ocultação, pode ser derivada a partir de medidas acuradas da frequência referentes à refração do sinal, tanto do transmissor como do receptor. A variação no sinal é determinada pela projeção da velocidade dos satélites em relação ao caminho percorrido pelo sinal entre transmissor e receptor. Assim, o ângulo da refração atmosférica contribui para a medida da variação do sinal. Os dados obtidos dos outros satélites GPS, não ocultados, são utilizados para determinar, com precisão, a posição e a velocidade dos satélites GPS e LEO envolvidos, e para o cálculo da variação esperada ao desconsiderar a curvatura no sinal. A contribuição atmosférica na variação do sinal, obtida pela diferença entre a variação esperada e a real, é combinada com a posição e as velocidades dos satélites envolvidos para estimar o ângulo de curvatura e o parâmetro de impacto. Esse processo envolve a inversa de Abel, e o resultado que se obtém é n em função de a que, segundo Gorbunov e Lauritsen (2002), pode ser expresso por:

$$n(a) = \exp \left\{ \frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{(a^2 - a_1^2)}} da \right\} \quad (2)$$

Sabe-se que o índice de refração (n) é a razão entre a velocidade da onda eletromagnética no vácuo e a velocidade em um meio qualquer. Como n tem valores muito próximos da unidade, é conveniente expressá-lo através de outra grandeza, denominada refratividade (N),

dada por $N = (n - 1)10^6$. Na atmosfera eletricamente neutra, a refratividade é função da temperatura (T), da pressão do ar seco (P), da pressão do vapor d'água (P_w)

Figura 2 – Geometria básica da ocultação para um satélite GPS e um satélite LEO.
Fonte: Adaptado de Melbourne et al. (1994).

e da contribuição ionosférica, podendo ser expressa pela equação (Kursinski et al., 2000),

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 40.3 \cdot 10^6 \frac{n_e}{f^2} \quad (3)$$

na qual os valores de pressão são aplicados em hPa, de temperatura em kelvins, n_e que é a densidade de elétrons em m^{-3} e f que é a frequência do sinal GPS em Hz. Como ocorre com outras técnicas de observação, existem algumas vantagens e desvantagens no uso da RO GPS. Entre as vantagens da RO GPS destacam-se: as sondagens atmosféricas podem ser obtidas sob qualquer condição de tempo; a distribuição global dos perfis atmosféricos é relativamente homogênea; boa resolução vertical (aproximadamente 1 km na estratosfera e de até 100 m nos níveis mais próximos da superfície onde os índices de refatividade são maiores); o comprimento das ondas envolvidas na RO GPS (aproximadamente 20m) não apresenta problemas de dispersão e absorção por outros meios; possibilidade de calibração a partir de medidas precisas de fase e monitoramento a longo prazo, sem considerar a variação de sensibilidade dos equipamentos envolvidos. Em relação às desvantagens, destacam-se: a necessidade de valores iniciais de temperatura advindos de fonte externa na baixa troposfera; os perfis de RO GPS iniciam a aproximadamente 3 km de altitude, pois em níveis inferiores apresentam ineficiência e são influenciados por vários fatores que causam ruídos nas medidas.

3. DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A avaliação dos perfis atmosféricos foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na aquisição e organização dos perfis atmosféricos provenientes de radiossondas (RSO), RO GPS e da reanálise do CPTEC (REANA), e a segunda, no desenvolvimento e implementação da metodologia utilizada na avaliação.

3.1. Dados Utilizados

3.1.1. Perfis Atmosféricos de Radiossondas

Como parte do projeto LBA (LBA, 2009), em meados do segundo semestre de 2002 foi realizada a campanha RACCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazonia during the DRY-TO-WET Transition Season*) (IAG-USP, 2009). O objetivo foi entender os processos físicos que controlam a estação de transição seca para úmida na região sudoeste da Amazônia, apoiando-se no emprego de diversos equipamentos e diferentes técnicas, entre as quais o lançamento

de radiossondas. Diversos lançamentos realizados em estações operacionais brasileiras durante o período desse experimento foram organizados e disponibilizados para a campanha RACCI. Essas radiossondagens foram utilizadas neste trabalho para avaliar os perfis atmosféricos obtidos com a RO GPS.

A campanha RACCI foi realizada entre os meses de setembro e outubro de 2002. Foram utilizados os dados de 14 estações de lançamento de radiossondas, as quais são mostradas na Figura 3. As radiossondas lançadas nesse experimento foram da marca Vaisala, modelo RS-80 15G. Tais dados estão disponíveis no site principal do RACCI (<http://lba.inpa.gov.br/lba/>). A resolução vertical dos perfis atmosféricos das radiossondas é bastante alta, nos quais são fornecidos valores a cada 2 minutos de ascensão. Em alguns casos, as radiossondas participaram de redes operacionais, e portanto, os valores armazenados se referem aos níveis padrões (1000, 925, 850, 775, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 e 3 hPa).

Figura 3 – Localização das estações de radiossondagens envolvidas na campanha RACCI.

3.1.2. Perfis Atmosféricos de Rádio Ocultação (RO GPS)

Os dados de RO GPS do satélite CHAMP foram obtidos no site do GENESIS (*Global Environmental & Earth Science Information System*). Neste site a disponibilização é feita através de um programa denominado AGAPE (*Atmospheric Grid Analysis and Profile Extraction*), e permite a escolha dos perfis através das latitudes e longitudes. A Figura 4 mostra a localização dos 254 perfis de RO GPS sobre a América do Sul, gerados durante a campanha RACCI.

Figura 4 – Localização de 254 perfis de RO GPS (pontos em vermelho) obtidos durante a campanha RACCI.

Fonte: <http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Atmosphere/AGAPE>

Os dados referem-se ao período de 01/09/2002 a 31/10/2002. Cada perfil apresenta sete variáveis: altura geopotencial, latitude, longitude, temperatura, pressão atmosférica e pressão do vapor d'água. Os perfis obtidos através do satélite CHAMP apresentam uma resolução vertical aproximada de 0,5 km na troposfera e 1,5 km na estratosfera (Wickert et al. 2004).

3.1.3. Perfis Atmosféricos Provenientes da Reanálise do CPTEC (REANA)

Os perfis atmosféricos da reanálise do CPTEC/INPE são provenientes da versão realizada a partir do sistema de assimilação de dados PSAS (*Physical-space Statistical Analysis System*) (Da Silva e Guo, 1996) em conjunto com o modelo Eta (Aravequia et al., 2008). Os dados possuem resolução espacial de 40 x 40 km, e o período utilizado nessa avaliação é de 01/09/2002 até 30/10/2002. Estes dados são disponibilizados com intervalos de 6 horas, e se referem aos horários sinóticos (0, 6, 12 e 18 horas UTC). O recorte utilizado apresenta nove variáveis: pressão atmosférica, temperatura, umidade específica, água precipitável, altura geopotencial, vento zonal, vento meridional, temperatura e umidade relativa. As quatro primeiras variáveis referem-se aos dados de superfície e as outras cinco se referem a valores em altitude apresentadas em 19 níveis de pressão atmosférica (100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925, 1000 hPa).

3.2. Metodologia Utilizada na Validação dos Perfis de ro-gps

Após a aquisição dos dados, iniciou-se o desenvolvimento dos procedimentos computacionais para a comparação dos perfis. O primeiro passo foi realizar um algoritmo que gerasse

um arquivo de índices, com ano, mês, dia, hora, nome da estação e a localização de cada perfil armazenado. De posse destes arquivos de índice, foi possível definir as janelas de comparações a serem utilizadas. A dificuldade em encontrar uma janela adequada foi uma tarefa que exigiu atenção, face à escassez de perfis, principalmente de RSO. Isso implica em pares de perfis distantes uns dos outros e com significativas diferenças no tempo de coleta. Desse modo, a implementação das janelas a serem utilizadas foi realizada de maneira a tornar possível a variação da latitude e longitude entre as janelas de comparação. As janelas com $1^\circ \times 1^\circ$ e $2^\circ \times 2^\circ$ (latitude x longitude) foram utilizadas, bem como cada janela destas com um intervalo de: 1h (hora), 2h, 3h, 4h, 5h e 6h de diferença entre o tempo de coleta de cada perfil. As quantidades de pares de perfis obtidos nessas comparações são apresentadas na Tabela 1.

Na comparação entre RO GPS e RSO, constatou-se a necessidade de se utilizar janelas com localização dos perfis a aproximadamente 200 km de distância ($2^\circ \times 2^\circ$), devido à baixa

Tabela 1 – Número de pares de dados de RO, RSO e REANA encontrados durante o período de 01/09/2002 e 30/10/2002 sobre a América do Sul, com janelas de procura que variam tanto na latitude e longitude como no tempo.

Janela de procura (LAT x LON x Tempo)	Números de pares encontrados	
	RO GPS x RSO	RO GPS x REANA
$1^\circ \times 1^\circ \times 1h$	0	126
$1^\circ \times 1^\circ \times 2h$	0	180
$2^\circ \times 2^\circ \times 1h$	0	126
$2^\circ \times 2^\circ \times 2h$	2	180
$2^\circ \times 2^\circ \times 4h$	5	239
$2^\circ \times 2^\circ \times 6h$	27	254

Figura 5 – Valores do erro médio (linha sólida) e desvio padrão (linha tracejado) em função da altura, gerados pela comparação dos perfis de RO GPS e RSO para (a) temperatura, (b) pressão do vapor d'água e (c) altura geopotencial.

ocorrência de perfis concomitantes. Com relação à comparação entre RO GPS e REANA, ressalta-se que as diferenças não ocorrem com relação a localização, e sim devido as diferenças com relação ao tempo, pois os pontos da grade da REANA estão espaçados na distância de 40 km, o que faz com que, para cada perfil de RO GPS exista pelo menos um perfil de REANA disponível.

De posse dos índices de cada perfil a ser utilizado, bem como da definição da metodologia de comparação a ser empregada, foram encontrados os perfis concomitantes para cada comparação. Um algoritmo para o cálculo dos índices estatísticos (número de perfis comparados, somatório dos erros, erro médio (viés) e desvio padrão (PD)) foi desenvolvido.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Comparação de Perfis Atmosféricos de RO GPS com RSO

Como mostrado na Tabela 1, apenas a configuração que utiliza uma janela de busca de 2° de latitude por 2° de longitude e uma diferença temporal entre as coletas dos perfis de até 6 horas, permite uma comparação entre essas técnicas, pois nas demais o número de pares de perfis resultantes é reduzido. A Figura 5 apresenta os valores das medidas estatísticas para (a) temperatura, (b) pressão do vapor d'água e (c) altura geopotencial em função da altitude.

Com relação aos valores dos perfis de temperatura (Fig. 5a), observa-se que a RO GPS apresenta uma tendência de subestimar em até 2 K na camada de 7,5 km até 9 km, uma tendência nula entre 9 km até 12 km e volta a apresentar uma tendência de subestimar para alturas acima de 12 m. Com relação aos valores do desvio padrão, observa-se que a incerteza é menor (DP de 1 K) para altitudes menores que 11 km, do que para níveis mais elevados da atmosfera (DP próximo de 3 K). De forma geral, observa-se que a técnica de RO GPS apresenta

temperaturas menores em relação a RSO, o que corrobora os resultados advindos do GPS/MET para a atmosfera neutra (Rocken et al., 1997).

Em uma análise geral dos resultados referentes à pressão do vapor d'água apresentados na Figura 5b, observa-se que os valores do viés tendem a ser menores com o aumento da altitude, e o mesmo ocorre com o desvio padrão. O viés é de -2 hPa em 1,5 km de altitude e chega a zero na alta troposfera depois de oscilar entre valores positivos e negativos. O aumento da incerteza das medidas de umidade nas camadas inferiores da troposfera está associado com o aumento do ruído nos sinais GPS que chegam ao satélite LEO. Esse ruído é devido a diversos fatores como o multicaminho do sinal, a influência da camada ionosférica, que nessas circunstâncias tem seu pico de máxima, e a própria variabilidade espacial da umidade associada com sua alta concentração na baixa troposfera. Esses resultados vêm a corroborar com outros trabalhos publicados a respeito (Anthes et al., 2000; Wickert et al., 2001). A comparação dos perfis de alturas geopotenciais (Figura 5c) revela que o viés da RO GPS na troposfera é menor que 20 m, sendo negativo inicialmente e tornando-se positivo na altitude de 5 km, onde cruza a linha de viés nulo. Desta altitude em diante, com relação às radiossondas, a RO GPS passa a superestimar os valores da altura geopotencial. Os valores do DP são em torno de 20 m próximos a superfície e tendem a ser maiores com o aumento da altitude.

4.2. Comparação de Perfis Atmosféricos de RO GPS com Perfis da REANA

Na comparação entre RO GPS e a Reanálise do CPTEC, utilizou-se 126 pares de perfis atmosféricos para uma janela de busca compreendida entre 1° de latitude, 1° de longitude e uma diferença temporal entre as ocorrências dos perfis e as análises da REANA de até 1 hora. As estatísticas desses resultados são apresentadas na Figura 6 (gráficos a, b e c para a temperatura,

pressão do vapor d'água e altura geopotencial, respectivamente). A mesma análise é feita para a diferença temporal de 2 horas (gráficos *d*, *e* e *f*) e também para 3 horas (gráficos *g*, *h* e *i*).

Os perfis de temperatura apresentam maior tendência e dispersão nas camadas mais próximas da superfície (viés de 2,1K e DP de 2,6K). Porém, estes valores diminuem com o aumento da altitude. O viés tona-se nulo em 9 km de altitude e permanece próximo desse valor até 13 km. Acima desse nível a técnica de RO GPS superestima a temperatura em relação à REANA, e conforme a altitude é incrementada, o viés tende a ser maior. Quando se comparam dados referentes a uma janela de busca de $\pm 2h$ e a de $\pm 3h$ (Figuras 6d e 6g), percebe-se que os mesmos padrões são observados.

Os perfis de pressão do vapor d'água apresentaram valores do viés maiores nos primeiros 2 km, com uma viés médio de 0,84 hPa e desvio padrão de 2,98 hPa. Tais valores decrescem conforme a altitude vai sendo incrementada e a concentração da umidade na atmosfera vai diminuindo. Na camada entre 5 – 8 km, o viés é menor que 0,1 hPa e o desvio padrão próximo de 0,5 hPa. Este comportamento também é observado para as outras duas janelas de comparação sem grandes alterações (Figuras 6e e 6h).

Os perfis de altura geopotencial apresentaram um viés de até 8 m entre 1 – 10 km de altitude. Acima de 10 km os valores do viés aumentam conforme aumenta a altitude, atingindo uma magnitude de 70 m a 16 km. Já os valores do desvio padrão são de 25-30 m e mantêm-se praticamente constantes ao longo de todo perfil vertical. Quando comparadas janelas com diferenças de $\pm 2h$ e $\pm 3h$, é possível notar que nessas circunstâncias a RO GPS tende a superestimar a altura geopotencial em relação à REANA, conforme aumenta a diferença temporal entre os perfis.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta os resultados da comparação dos perfis atmosféricos de RO GPS provenientes do satélite CHAMP, com perfis obtidos a partir de radiossondas e dos campos da reanálise do CPTEC. A comparação entre os dados de RO GPS e REANA demonstrou bons resultados, principalmente entre 9 e 13 km, para os perfis de temperatura, acima de 4 km para a pressão do vapor d'água e até 9 km para o caso da altura geopotencial. Em intervalos diferentes desses há divergências nos valores, demonstrando a necessidade de

Figura 6 – Valores do erro médio (linha sólida) e desvio padrão (linha tracejado) das comparações de perfis obtidos com RO GPS e REANA para (plots a, d, g) temperatura; (plots b, e, h) Pressão do Vapor d'água (plots c, f, i) Altura Geopotencial ao considerar áreas de comparação com intervalo de tempo entre os perfis de $\pm 1h$ (plots a, b, c), $\pm 2h$ (d, e, f) e $\pm 3h$ (g, h, i).

mais pesquisas para a caracterização dessas diferenças. De forma geral, os resultados encontrados sobre a América do Sul são compatíveis com os obtidos em outros trabalhos, como por exemplo: Wickert et al. (2001) e Rocken et al. (1997), nos quais foram avaliados perfis provenientes do satélite GPS/MET e do CHAMP em outras regiões.

O satélite CHAMP coleta até 300 ocultações por dia distribuídas globalmente, mas ainda são poucos os perfis coincidentes com os de RSO, resultando em uma quantidade muito limitada de dados que possam ser comparados com uma distância espacial e temporal adequada. Com o lançamento recente dos satélites LEO da constelação COSMIC, o que tem proporcionado a obtenção diária de aproximadamente 2500 a 3000 perfis de RO GPS, espera-se que estes problemas sejam minimizados, pois é possível o uso de janelas mais apropriadas para a comparação de perfis de RO GPS e RSO, tanto do ponto de vista temporal como espacial. Estes novos dados também têm permitido testes para avaliar a contribuição da RO GPS, em sistema de previsão numérica de tempo de centros operacionais e resultados relevantes têm sido reportados. Como exemplo, pode-se citar o Centro Nacional de Previsões Ambientais (NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*) (Derber, 2008) e o Laboratório de Pesquisas Navais (*Naval Research Laboratory*) (Baker, 2008), o Departamento de Meteorologia do Reino Unido (*Met office*) (Candy, 2008), Departamento de Meteorologia da França (*MeteoFrance*) (Montmerle, 2008), e o Centro Europeu de Previsão de Tempo (ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). No CPTEC-INPE, encontra-se em fase de pesquisa e desenvolvimento do operador que permitirá a inclusão dos perfis de RO GPS no *Local Ensemble Transform Kalman Filter*, que será o novo sistema de assimilação de dados desse centro. Dada à boa cobertura global dos dados provenientes da constelação COSMIC, os resultados obtidos nesse processo são bastante promissores, os quais serão apresentados futuramente em outros trabalhos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a essa pesquisa (Processos números 2003/09831-0 e 2006/04008-2).

7. REFERÊNCIAS

- ANTHES, Richard, ROCKEN, Christian, KUO, Ying-Hwa. Application of COSMIC to Meteorology and Climate. In: LEE, Lou-Chuang; ROCKEN, Christian; KURSINSKI, Robert. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag. Capítulo 4. 2000. p. 115-156.
- ARAVÉQUIA, José Antonio; HERDIES, Dirceu Luis; SAPUCCI, Luiz Fernando; Andreoli, R. V.; FERREIRA, S. H. S.; Goncalves, L. G. G. **Reanálise Regional 2000-2004 sobre a América do Sul com o modelo RPSAS/ETA: descrição do experimento e dos produtos derivados**. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 32, p. 71-74, 2008.
- BAKER, N. 2008. **NRL status report**. In.: International TOVS Studies Conference – TOVS. Angra dos Reis, RJ, Brazil. May, 2008.
- CANDY, B. 2008, **Met Office: An Update on the Operational Use of Satellite Sounding Data at the Met Office**. In.: International TOVS Studies Conference – TOVS. Angra dos Reis, RJ, Brazil. May, 2008.
- DA SILVA, A.; GUO, D J. 1996: **Documentation of the Physical-space Statistical Analysis System (PSAS) Part I: The Conjugate Gradient Solver Version PSAS-1.00**. DAO Office Note 96-02, 66 pp. [Disponível no Data Assimilation Office, GSFC, Greenbelt, MD 20771 e no endereço eletrônico <http://dao.gsfc.nasa.gov/subpages/office-notes.html>].
- DERBER, J., 2008. **NCEP: Progress and Plans for the use of radiance data in the NCEP global and regional data**. In.: International TOVS Studies Conference – TOVS. Angra dos Reis, RJ, Brazil. May, 2008.
- Fjeldbo, G. KLIORE, A. J. E ESHLEMAN, V. R. The Astronomical Journal, **The neutral atmosphere of Vênus studied with the Mariner V radio occultation experiments**, 76(1): 123-140, Março 1971.
- GORBUNOV, M. E.; LAURITSEN, K. B. **Canonical transform methods for radio occultation data**. Scientific Report – Danish Meteorological Institute, Copenhagen, 2002.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System Theory and Practice**. New York: Springer-Verlag, 2001, 382 p.
- IAG-USP, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. **RACCI – Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br/lba/index.php>>. Acessado em: 09 de setembro de 2009.
- KURSINSKI, E. R. et al. Initial Results of Rádio Occultation Observations of Earth's Atmosphere using the Global Positioning System (GPS). In: **Science**. 271(1): 1107-1110, Fevereiro 1996.
- KURSINSKI, E. R. **The GPS Radio Occultation concept: theoretical performance and initial results**. Tese de doutorado, California Institute of Technology, Pasadena, California. 1997.
- KURSINSKI, E.R.; HAJJ, G.A.; LEROY, S.S.; HERMAN, B. The GPS radio occultation technique. Terrestrial. In:

- Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO).** Taiwan, 2000, pp. 53–114.
- LBA, **Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia.** Disponível em: < <http://lba.cptec.inpe.br>>. Acessado em: 09/09/2009.
- LEE, Lou-Chuang; ROCKEN, Christian; KURSINSKI, Robert. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate.** Hong Kong: Springer-Verlag. 2000. 384p.
- MELBOURNE, W. G., DAVIS, E. S., DUNCAN, C. B., HAJJ, G. A., HARDY, K. R., KURSINSKI, E. R., MEEHAN, T. K., YOUNG, L. E., YUNCK, T. P. **The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring.** In: NASA/JPL, 1994.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476p
- MONTMERLE, T. 2008. **MeteoFrance: Recent advances in the use of satellite data in the French NWP models.** In.: International TOVS Studies Conference – TOVS. Angra dos Reis, RJ, Brazil. May, 2008.
- ROCKEN, C. et. al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. **Journal Geophysic Research**, vol. 102, p. 29849 – 29866, 1997.
- ROCKEN, C. et al. COSMIC System Description. In: LEE, Lou-Chuang; ROCKEN, Christian; KURSINSKI, Robert. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate.** Hong Kong: Springer-Verlag. Capítulo 2. 2000. p. 21-52.
- WICKERT, J.; REIGBER, Ch.; BEYERLE, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T.; MEEHAM, T.; GRUNWALDT, L.; GALAS, R. GPS Rádio Occultation with CHAMP: Initial results. In: **Proc. Beacon Satellite Symposium**, Boston, Junho de 2001.
- WICKERT, Jens et. al. Three years of space based atmosphere sounding with CHAMP: Results, highlights and future prospects. Procedure: **Join CHAMP/GRACE Science Meeting**, GFZ, Potsdam - Alemanha, Julho de 2004.