

Assimilação de Perfis Atmosféricos Obtidos por Rádio Ocultação GPS no CPTEC-INPE

Flávio S. Cerqueira¹, Luiz F. Sapucci¹, Dirceu Luis Herdies¹, Derek V. Schubert¹.

¹Instituto Nacional de pesquisas Espaciais – INPE, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC – Rod. Presidente Dutra, km 40 – Cachoeira Paulista – SP – CEP: 12630-000 – Brasil, email:

flavio.santos;luiz.sapucci;dirceu.herdies;derek.schubert@cptec.inpe.br

ABSTRACT: In the last decade, substantial progress in remote sensing of the atmosphere has been seen. One example is the technique in which a GPS (Global Positioning System) installed on LEO (Low Earth Orbiting) satellites allows one to obtain atmospheric profiles, with applications in Numerical Weather Prediction (NWP) and climatology. With the reduction of deficiencies in the system of meteorological data collection, these profiles have the potential to improve the quality of the model initial conditions generated in the process of data assimilation. In order to explore the benefits of this additional data source, CPTEC-INPE has initiated a process of assimilation of such data. This paper aims to disseminate meteorological community initiatives undertaken at CPTEC, discussing the current and future potential of GPS RO data to generate better numerical weather forecasts, through the assimilation of vertical temperature and humidity profiles obtained by this technique.

Palavras-chave: Rádio Ocultação GPS, Assimilação de Dados, PNT, PSAS.

1 – INTRODUÇÃO

Na meteorologia operacional, boas previsões com a utilização de modelos numéricos de previsão do tempo requerem uma acurada descrição das condições iniciais do estado da atmosfera em três dimensões, além de um bom modelo representando os processos físicos e dinâmicos da atmosfera. Pequenos erros na especificação da temperatura inicial, vento e umidade, podem crescer rapidamente fazendo com que os erros dominem na previsão subsequente (Silvestrin et al., 1996). Nesse contexto, a assimilação de dados tem um papel primordial, visto que ela é a ferramenta pela qual se busca o melhor estado inicial ao considerar todos os dados disponíveis por meio de diferentes sistemas de observação. Contudo, a rede disponível de estações meteorológicas convencionais ainda é deficiente, face à escala global na qual os mais importantes fenômenos meteorológicos estão inseridos. A distribuição das observações meteorológicas resultantes é irregular, e em muitas regiões do globo, ela é escassa, como por exemplo: sobre oceanos, desertos, regiões montanhosas ou polares. A fim de suprir essa necessidade, novas técnicas têm surgido buscando a obtenção de dados nas regiões de mais difícil acesso. Na última década, observou-se um substancial progresso na ciência e tecnologia do sensoriamento remoto da atmosfera. Com a evolução dos sistemas de navegação por satélite, com destaque para o GPS (*Global Positioning System*), tais sistemas, em conjunto com estações terrestres de monitoramento, têm despontado como uma eficaz fonte de informação no fornecimento do vapor d'água integrado na atmosfera, (*IWV-Integrated Water Vapor*). Os sinais empregados nos sistemas de navegação global por satélite são sensíveis às alterações na concentração de vapor d'água atmosférico. Trabalhos no Brasil, (Monico e Sapucci, 2008), e em outros países (Duan *et al.*, 1996; Ewardson, 1998, entre muitos outros) têm enfatizado as vantagens de exploração dessa técnica. Tais dados se destacam pela precisão e pelo baixo custo, uma vez que o sistema tem como objetivo primário servir como uma rede geodésica, e fornece dados precisos de umidade como um produto adicional. Outra importante e promissora aplicação do GPS na meteorologia é conhecida

como Rádio Ocultação GPS (RO GPS). Utilizando receptores GPS instalados em satélites de órbita baixa (*LEO- Low Earth Orbiting*), a RO GPS permite a obtenção de perfis atmosféricos com aplicação na Previsão Numérica de Tempo (PNT) e Climatologia. Sondagens por meio dessa técnica, globalmente distribuídas ao redor do globo, representam uma importante fonte de dados para os modelos numéricos. A assimilação desses dados tem sido utilizada com sucesso em importantes centros operacionais de PNT, e diversos artigos têm sido publicados sobre as possíveis técnicas de assimilação (Kuo et al.(2000), Cucurull et al.(2006), entre outros). O CPTEC-INPE buscando se inserir nesse contexto tem iniciado estudos nessa área.

O presente trabalho tem por objetivo divulgar a comunidade meteorológica as iniciativas realizadas no CPTEC com o intuito de empregar as atuais e futuras potencialidades dos dados de RO GPS na geração de melhores previsões numéricas de tempo, por meio da assimilação de perfis verticais de temperatura e umidade obtidos por essa técnica. Para isso, na próxima seção é apresentada uma breve revisão bibliográfica da técnica de Rádio Ocultação GPS, uma vez que é pouco conhecida pela comunidade meteorológica. Na seção 3 são apresentados detalhes sobre os primeiros experimentos em desenvolvimento no CPTEC-INPE, na assimilação de dados provenientes dessa técnica, e na seção 4 são discutidos os benefícios em potencial da RO GPS para a PNT.

2 - BREVE REVISÃO SOBRE RÁDIO OCULTAÇÃO GPS

A técnica de rádio ocultação teve início a partir de meados dos anos sessenta, sendo utilizada progressivamente, com grande sucesso, nas missões planetárias para medir perfis verticais de densidade e temperatura das atmosferas de Vênus, Marte e outros planetas. Com o advento do GPS, que utiliza transmissores de alto desempenho em órbita média, juntamente com receptores instalados em satélites LEO, tornou-se possível a realização de medidas da atmosfera terrestre com a precisão necessária para aplicação na meteorologia operacional e na pesquisa climática. Na obtenção de perfis atmosféricos, a técnica utilizada é baseada na variação do índice de refração observado nos sinais de rádio transmitidos, que perfilam a atmosfera enquanto o satélite se movimenta ao redor do planeta. A ocultação ocorre quando a transmissão do satélite GPS é recebida pelo satélite LEO em modo ascendente ou descendente ao redor da Terra. A figura 1 mostra um esquema ilustrativo de uma rádio ocultação GPS. As propriedades atmosféricas são deduzidas com base em medidas precisas no atraso de fase e amplitude do sinal, ao atravessar a ionosfera e a atmosfera neutra.

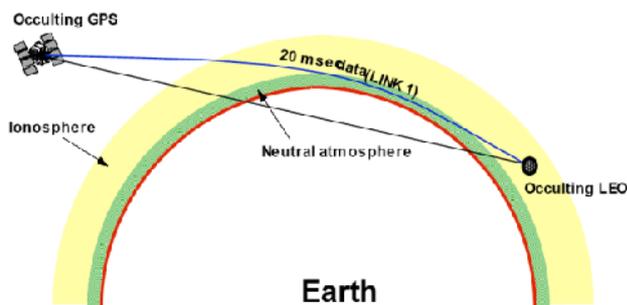


Figura 1 – Esquema ilustrativo do comportamento do sinal durante uma rádio ocultação.

O movimento relativo entre os satélites GPS e LEO promove um escaneamento vertical da atmosfera. Considerando uma geometria óptica e uma simetria esférica, um feixe atravessando a atmosfera é refratado e sofre atraso devido ao gradiente vertical de densidade do ar. À medida que o satélite se desloca, as ondas de rádio fatiam a atmosfera em sucessivas camadas. Através da variação de fase do sinal, e do conhecimento preciso das velocidades e

posições dos satélites envolvidos, obtêm-se o ângulo de curvatura (α), (Fig.2). A posição e as velocidades dos satélites em questão são determinadas com o auxílio de outros satélites, que compõem o sistema GPS, não ocultos pela Terra. O processo de obtenção do ângulo em função do parâmetro de impacto (a) é descrito por Kursinsk et al.(2000), tendo como base a geometria da ocultação em uma atmosfera esfericamente simétrica.

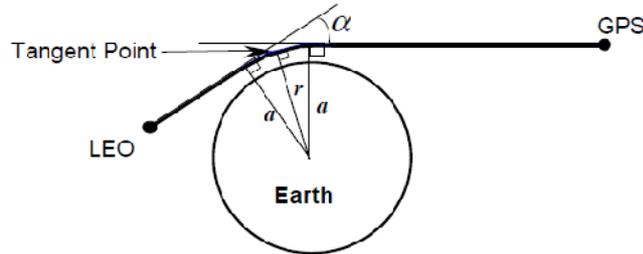


Figura 2 – Geometria de uma ocultação instantânea com o GPS e o satélite LEO. O ângulo de curvatura(α) e o parâmetro de impacto(a) são determinados por meio da alteração Doppler na frequência.

Fonte: Kuo at al.(2000)

A variação Doppler em excesso é descrita por meio de três quantidades geométricas nomeadas por: ângulo de curvatura (α), parâmetro de impacto (a) e pelo ponto tangente (r_t), conforme visualizado na figura 2. À medida que a geometria entre transmissor e receptor muda, a sequência de perturbações na frequência pode ser relacionada à sequência de pares (a , α), ligadas ao perfil do índice de refração (n) pela equação (KURSINSKI et al., 1997):

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

Onde r é a distância do centro de curvatura e a integral é sobre a porção da atmosfera acima do raio no ponto tangente(r_t). De posse desses dados, por meio de um processo denominado Inversa de Abel, é possível obter a refração $n(r)$ em termos de a e r (Fjeldbo et al.,1971).

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

Onde $a_1 = nr_t$ é o parâmetro de impacto para um feixe cujo raio tangente é r . Assim, dado (a), a equação (2) acima pode ser avaliada numericamente. O índice de refração(n), em determinado meio é definido como a velocidade da luz no vácuo dividida pela velocidade da luz no meio. Contudo, na atmosfera, o índice de refração é muito próximo da unidade, sendo assim, torna-se conveniente expressá-lo através da refratividade (N), definida como $N = (n-1) \cdot 10^6$. Na atmosfera eletricamente neutra, após a remoção dos efeitos da ionosfera, a refratividade (N) é função da temperatura (T), da pressão do ar seco (P) e da pressão do vapor d'água (P_w), sendo expressa pela equação (KURSINSKI et al.,2000):

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (3)$$

Onde T é a temperatura em Kelvin e as pressões P e P_w são dadas em hPa. O primeiro termo da equação (3) é denominado de componente seca (P,T) e o segundo termo, componente

úmida (P_w, T). Para perfis atmosféricos de RO GPS nos níveis onde a contribuição do vapor d'água pode ser desprezada ($T < 240K$), a expressão para N , em função da altura (z), reduz-se ao primeiro termo e é facilmente resolvida considerando-se as equações de estado e hidrostática. Dada uma condição de contorno, como por exemplo: $P=0$ em 150 km, obtêm-se perfis de pressão, temperatura e altura geopotencial. Na ausência de vapor d'água na atmosfera, os perfis de P e T retornados pelo primeiro termo da equação (3) correspondem aos valores atmosféricos reais. Contudo, na presença de umidade (média e baixa troposfera) é necessário levar em conta a componente úmida. Tal fato deixa o sistema indeterminado e torna necessário o conhecimento prévio e independente de uma das variáveis, a fim de se determinar as outras. Normalmente se utiliza informações de pressão, temperatura e umidade específica do modelo com seus erros característicos (matriz de covariância de erros) a fim de se encontrar a melhor estimativa para P , T e q (assimilação variacional – 1DVar).

3 - EXPERIMENTO EM DESENVOLVIMENTO

Considerando a importância de uma boa descrição das condições iniciais da atmosfera no desempenho dos modelos numéricos de previsão de tempo, bem como, o potencial dos dados de rádio ocultação GPS em fornecer dados de qualidade, com distribuição global, em regiões onde os dados convencionais são escassos, tais como, oceanos e regiões polares, espera-se que tais dados tenham um positivo impacto nos modelos numéricos de previsão de tempo. Importantes centros de previsão de tempo, como NCEP, Met Office e ECMWF já têm alcançado melhorias em algumas variáveis na PNT com a assimilação desses dados. Um experimento em andamento no CPTEC-INPE pretende avaliar o impacto de perfis de rádio ocultação GPS no sistema de assimilação operacional. Para tal, a seguinte metodologia tem sido empregada: O emprego da assimilação de perfis verticais de geopotencial e umidade específica provenientes de rádio ocultação GPS durante os meses de janeiro e agosto de 2009. Os dados utilizados são fornecidos pelo COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate*). O COSMIC é composto por um conjunto de seis satélites LEO portando receptores GPS e dispõe para os meses em questão de 2000 a 2400 perfis verticais por dia. O sistema de assimilação utilizado é o PSAS (*Physical-Space Statistical Analysis System*) que, juntamente com o modelo global do CPTEC T243L42, é conhecido por GPSAS e encontra-se operacionalmente disponível, podendo ser acessado no site do CPTEC-INPE. Para avaliar o impacto da assimilação desses dados, serão realizados dois experimentos: o primeiro, apenas com a assimilação dos dados convencionais (controle), e o segundo (teste), assimilando-se adicionalmente os perfis de rádio ocultação GPS. Serão realizadas previsões para até cinco dias em cada rodada do modelo, com as previsões do controle e do teste sendo comparadas com a própria análise do modelo, bem como com valores observados. Na comparação, será avaliado o desempenho do controle e do teste em prever temperatura, geopotencial e umidade específica em diferentes níveis. A previsibilidade de um evento de ZCAS ocorrido no mês de estudo também será utilizada para medir o impacto da assimilação dos perfis de rádio ocultação GPS. O impacto na descrição de outros fenômenos meteorológicos de grande escala, como frentes e precipitação convectiva também serão avaliados.

4 - BENEFÍCIOS EM POTENCIAL

Nos últimos anos, a técnica de RO GPS tem surgido como um dos mais promissores sistemas de observação global. Grandes centros de previsão numérica de tempo têm se utilizado dessa adicional fonte de dados para melhorar a habilidade de previsão de seus modelos numéricos. Em um estudo preliminar conduzido por Cucurrul et al.(2006), os resultados mostraram que a assimilação das observações RO GPS no modelo global do NCEP produziu uma significativa redução no viés da temperatura e da umidade para todas as

latitudes, em especial sobre o hemisfério sul e trópicos. Os benefícios da assimilação de dados RO GPS também se estenderam para outros campos, tais como, altura geopotencial de 500-hPa e vento nos trópicos, demonstrando o potencial do uso desses dados na previsão operacional. O COSMIC fornece atualmente duas mil e quinhentas sondagens diárias, uniformemente distribuídas ao redor do globo, devendo alcançar quatro mil perfis diários com o futuro lançamento de mais dois satélites. Outras missões com satélites LEO, portando receptor GPS, tais como, MetOp (*Meteorological Operational Satellite*) e GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), todas em fase de expansão, vêm corroborar para a ampliação da quantidade de dados disponíveis. Adicionalmente, outros sistemas de posicionamento global por satélite, como o europeu GALILEO e o chinês COMPASS, devem introduzir um aumento significativo no número de ocultações. Todos esses fatores imprimem uma grande expectativa sobre os benefícios em potencial da aplicação desses recursos na previsão numérica de tempo do CPTEC-INPE.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBER, C.; WARE, R. H.; ROCKEN, C.; BRAUN, J. J. Obtaining Single Path Delays from GPS Double Differences. *Geophysical Research Letters*, V.27, N.7, pp. 2661-2664, 2000.

CUCURULL, L.; DERBER, C. J.; PURSER, R.J. Assimilation of Global Positioning System Radio Occultation Observations into NCEP's Global Data Assimilation System. *Monthly Weather Review*, V.135, 2006.

DUAN, J., BEVIS, M., FANG, P., BOCK, Y., CHISWELL, S., BUSINGER, S., ROKEN, C., SOLHEIM, F., HOVE, T., WARE, R., MCCLUSK, S., HERRING, T. A. & KING, R. W., 1996. GPS meteorology: Direct Estimation of the absolute Value of Precipitable Water, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, pp. 830-838.

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

KUO, Y-H.; SOKOLOVSKIY, S.; ANTHES, R.A.; VANDENBERGHE, F. Assimilation of GPS Radio Occultation Data for Numerical Weather Prediction. *Special Issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 11(1), pag. 157-186, March 2000.

KURSINSKI, E.R.; HAJJ, G. A.; SCHOFIELD, J.T.; LINFIELD, R.P.; HARDY, K. R. Observing Earth's Atmosphere With Radio Occultation Measurements Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 102, 23429-23465, 1997.

KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; LEROY, S. S.; HERMAN, B. The GPS Radio Occultation Technique. *TAO*, Vol. 11, No. 1. pag. 53-114. March, 2000.

SAPUCCI, L F ; MACHADO, L A T ; MONICO, J F G . Aplicações dos Valores do IWV Provenientes das Redes de Receptores GPS para Suporte à Previsão Numérica de Tempo no Brasil. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 49-55, 2008.

SILVESTRIN, P.; INGMANN, I. Radio Occultation Observations using Global Navigation Satellite Signals. A New Tool for Exploring the Atmosphere. *ESA EOQ-54*, 1996.