

Estimativa de Perfis de Vapor D'água com Medidas de Radio Ocultação utilizando Redes Neurais Artificiais

Rosangela Saher Cintra¹
José Demisio Simões Silva¹
Haroldo Fraga de Campos Velho¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.
{rosangela.cintra, demisio}@lac.inpe.br

Abstract. Artificial Neural Network (ANN) is applied to estimate high-resolution humidity profiles in the troposphere. The use of satellites together Global Positioning System data supply data to study the atmosphere and opens perspectives to improve research on climate and the capacity on weather forecast. In this sense, many techniques were developed for retrieving atmospheric profiles (temperature, pressure and water vapor) using GPS radio occultation. A new method based on ANN to retrieve water vapor profiles is presented. In this paper, a fully connected multi-layer network is constructed. By comparing the retrieved profiles with the corresponding ones from the CHAMP-ISCD (*Challenging Mini-satellite satellite Payload for Geoscientific Research and Application*), it can be concluded the ANN is convenient and an accurate tool to get humidity profiles. This method constructs humidity profiles from satellite data. The retrieved profiles of water vapor pressure profiles presents bias of 0.06 hPa and maximum standard deviation of 0.75 hPa. These results can be employed to the atmospheric data assimilation to improve the initial condition of the models of Numerical Weather Prediction.

Palavras-chave: vapor water profile, GPS satellite, artificial neural network, multilayer perceptron, pressão do vapor d'água, satélites GPS, redes neurais artificiais, perceptron de múltiplas camadas.

1. Introdução

A atmosfera terrestre é uma camada gasosa que se mantém envolvendo a Terra graças à ação do campo gravitacional, sendo o ar atmosférico uma mistura de gases constituído de ar seco acrescido de vapor d'água (variável no espaço e no tempo). Ela é subdividida em regiões distintas (**Figura 1**). A troposfera é a sua camada mais próxima da superfície, o principal meio de transporte de massa (água, partículas sólidas, poluentes, etc.). Acima dessa camada está a estratosfera, que abriga a camada de ozônio que protege a Terra da infiltração dos raios ultravioleta. Acima da estratosfera está a alta atmosfera, importante por conter elementos especiais e camadas ionizadas, e atuar como meio de comunicação de satélites. Em face desta distribuição, a troposfera é de maior interesse como fonte de umidade, elemento básico para a formação de precipitações.

A umidade do ar diz respeito ao vapor d'água contido na atmosfera, o qual constitui elemento essencial do ciclo hidrológico, como fonte de todas as precipitações e controlador da evapotranspiração do planeta (**Figura 1**). O vapor d'água, presente na atmosfera da terra desempenha um papel fundamental na regulação do clima no nosso planeta. O conhecimento da distribuição vertical e horizontal do vapor d'água em escala global é requerido para aplicações de previsão numérica de tempo, modelagem climática e estudos de mudanças globais do clima.

Alguns índices definem a umidade do ar, como:

- Pressão do vapor (e), neste trabalho denominado (vp), é a fração da pressão do ambiente devido à fração de vapor d'água no ar. Em geral é expressa em milibar (mb), sendo que 1 mb é igual 10^3 dina/cm², ou 1 hPa é igual a 1 mb. Esta pode ser calculada em função da temperatura, porém, aqui a vp foi recuperada de dados do satélite CHAMP.

- Pressão de saturação do vapor (e_s). Existe um limite superior para a quantidade de vapor d'água no ar, que é função da temperatura, então e_s é a máxima pressão do vapor que o ar pode suportar a uma dada temperatura. A máxima pressão do vapor em espaço saturado, pode ser calculado utilizando a fórmula aproximada de Magnus:

$$\log_{10}(e_s) = -2937.4/T - 4.9283 * \log_{10}(T) + 23.5470 \quad (1)$$

onde T é a temperatura em Kelvin (ou, $273.15 + T$ (°C)). Assume-se que a vaporização do calor latente é constante com a temperatura. Após a inversão e_s é dado em hPa.

I.

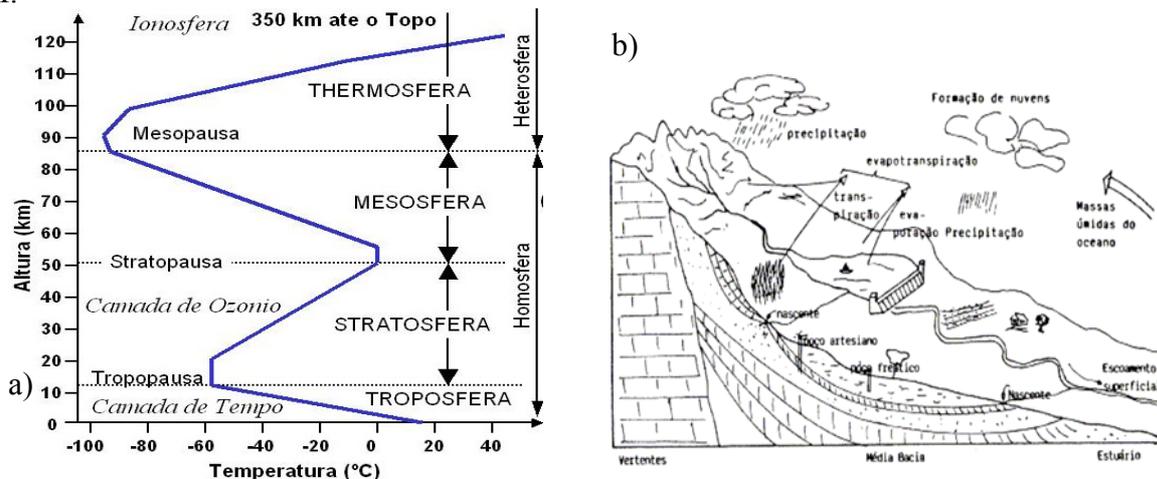


Figura 1 – (a) Camadas da atmosfera e (b) ciclo hidrológico que acontece na troposfera.

Existem várias formas de se estimar a quantidade de vapor d'água no ar. No sensoriamento remoto da nossa atmosfera, as sondagens verticais por satélites meteorológicos têm fornecido perfis atmosféricos (temperatura, pressão e vapor de água) de alta resolução para estudar a atmosfera. Em conjunto com satélites de baixa órbita, dados de GPS (*Global Positioning System*), abre perspectivas para melhorar as pesquisas sobre o clima e tempo. Neste sentido, desenvolveram-se técnicas de estimação de perfis atmosféricos a partir de dados de ocultação GPS. O satélite GPS/MET (*Global Positioning System/Meteorology*) lançado em 1995 tem mostrado a viabilidade de sondagens refrativas da atmosfera usando sinais dos satélites GPS. O satélite LEO (*Low Earth Orbit*) mede a fase da frequência dual do GPS transportado pelos sinais de rádio em fases. As trajetórias de raio têm alguma componente paralela à velocidade do vetor do transmissor GPS e ao receptor de LEO, um deslocamento Doppler é observado na frequência. O deslocamento Doppler é uma função da velocidade de satélite e do ângulo em que o raio cruza o vetor velocidade. Como os raios são refrangidos (isto é, inclinados) na atmosfera, a projeção da trajetória do raio ao longo do vetor velocidade do LEO é modificado e "um excesso" do deslocamento do Doppler é medido. Sullivan et al. (1997)

Sob a suposição de simetria esférica, o ângulo de curvatura, determinado pelo Doppler, está relacionado a refratividade. Em regiões secas da atmosfera, o perfil de refratividade pode ser facilmente convertido em pressão e temperatura, convenientes para objetivos meteorológicos Kuo et al. (1996). Na presença de vapor de água, contudo, alguma informação adicional deve ser combinada com o perfil de refratividade para produzir perfis de pressão, temperatura, e pressão do vapor de água. Kursinski et al. (1995).

A ocultação é o fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da sobreposição por outro corpo celeste. As sondagens atmosféricas da temperatura e do vapor

de água são recuperadas das medidas da RO (Radio Oculação) do GPS que também auxiliam nos estudos da mudança climática. A **Figura 2** mostra o comportamento do sinal GPS quando esse atravessa a atmosfera terrestre, no momento em que acontece uma ocultação do satélite.

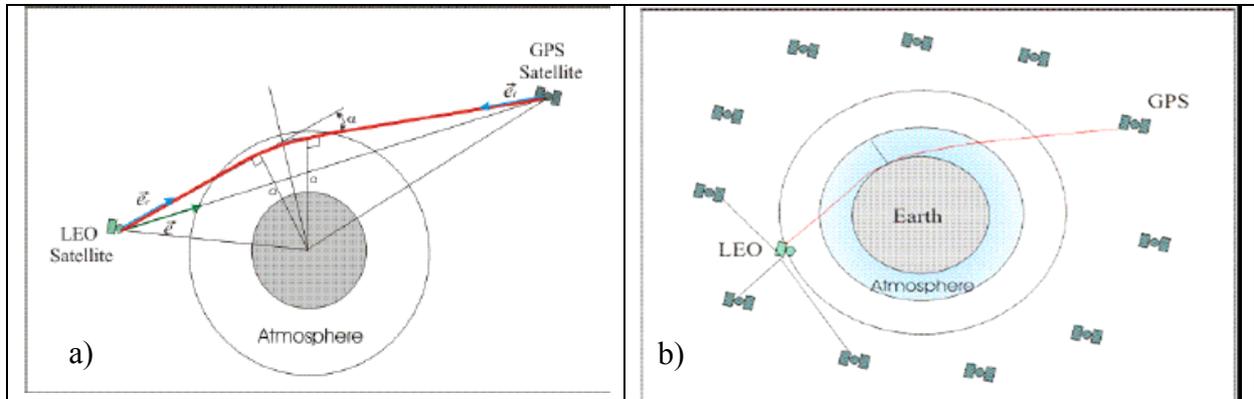


Figura 2 – (a) Geometria da ocultação do GPS; (b) esquema da ocultação no satélite LEO.

Neste trabalho, apresenta-se um novo método inverso de recuperar perfis de temperatura baseado em redes neurais artificiais (RNA), cujos resultados são comparados com perfis verticais de pressão do vapor d'água disponibilizados pelo Centro de Dados e Sistema de Informação do CHAMP, disponíveis em (ISDC – <http://isdc.gfz-postdam.de/champ/>).

2. Metodologia

Redes Neurais Artificiais podem ser utilizadas para estimação de variáveis meteorológicas porque permitem estabelecer uma relação não linear entre elas. E para estimar perfis de umidade desenvolveu-se um Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC) com neurônios totalmente interconectados. “Perceptrons” de múltiplas camadas são os modelos de redes neurais mais usados. Estes modelos “aprendem” a partir de exemplos e executam uma regressão não polinomial destes dados. A rede utilizada possui 3 camadas sendo: uma camada de entrada, uma camada escondida e uma camada de saída. Cada camada tem um número pré-determinado de neurônios e padrões de neurônios e padrões de conectividade fixos. Neste artigo, a rede possui quatro entradas, oito neurônios na camada escondida e dois neurônios de saída. A topologia utilizada está apresentada na **Figura 3**.

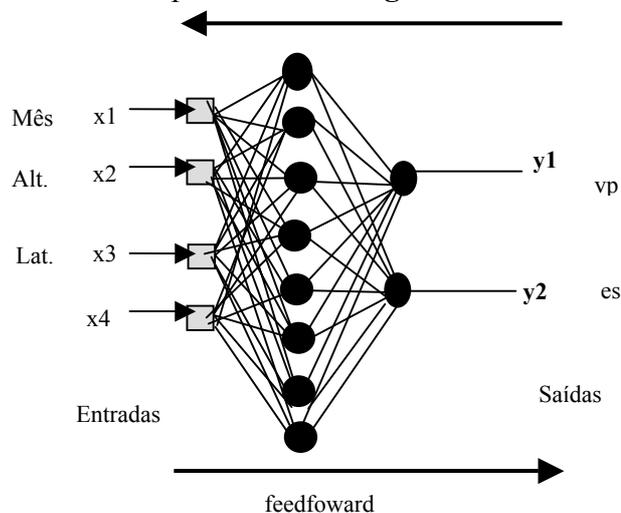


Figura 3 - Topologia da PMC utilizada a estimação de perfil de umidade

Para treinar o PMC, ou seja, encontrar um conjunto de pesos w_{ji} de modo que um conjunto de entradas x_i forneça um conjunto de saídas desejadas y_i , utilizou-se o algoritmo de retropropagação (*backpropagation*), que calcula os gradientes das multicamadas para obter os pesos adequados respectivos de cada conexão que produz a saída desejada. Este algoritmo utiliza aprendizagem supervisionada, onde pares de entradas e saídas por meio de um mecanismo de correção de erros, são usados para ajustar os pesos da rede. O treinamento ocorre em duas fases: *forward* e *backward*. A relação entre os exemplos de entrada e o resultado obtido é verificada e logo que a média dos erros for menor que o critério pré-determinado, então o treinamento está completo. A função de ativação dos neurônios e sua derivada são calculadas explicitamente, utilizando a função linear na camada escondida e na camada de saída. A função linear é definida como:

$$y_j(t) = a_j(t) = f(\sum w_{ij}o_i(t) - b_j) \quad (2)$$

onde $a_j(t)$ é a função ativação da camada j no passo t , w_{ij} é o peso da conexão entre o neurônio i na camada anterior e o neurônio j , o_i é a saída do neurônio da camada anterior no passo t , b_j é o limiar (bias) do neurônio j e $y_j(t)$ é a saída do neurônio j .

3. Aplicação

O satélite alemão LEO denominado CHAMP, faz parte de uma missão geo-científica para determinação da gravidade e do campo magnético da Terra, e pode-se utilizar a técnica de RO GPS para o estudo da atmosfera terrestre. A vantagem desta técnica de sensoriamento remoto com abrangência global inclui a combinação de alta resolução vertical e alta precisão dos dados. Este satélite coleta diariamente até 250 perfis de temperatura, distribuídos em uma resolução vertical aproximada de 0,5 km na troposfera e 1,5 km na estratosfera.

Os dados utilizados, com base nos satélites de referência, estão disponíveis na Internet pelo serviço GFZ já mencionado. O período adquirido das RO foi de 17 de dezembro de 2002 a 15 de fevereiro de 2003 na região da América do Sul entre 35S e 5S de latitude e entre 80W a 50 W de longitude, conforme **Figura 4**.

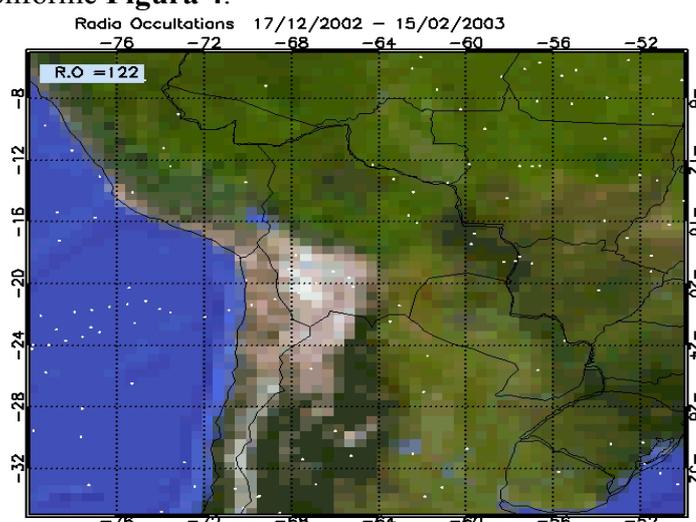


Figura 4 – Cobertura de dados de ocultação do período, os pontos brancos são os locais RO.

Foram selecionados 104 grupos (perfis) de dados de ocultação VPWP (*Vertical Water Profiles of Atmospheric Parameters*) provenientes do ISDC-CHAMP, incluindo a data e horário da ocultação e séries com altitudes em intervalos de 0,1 km. A refratividade é uma

quantidade indireta obtida da transformada de Abel. Gobunov e Kornblueh (2003). Foram utilizadas 8.830 informações divididas em 104 grupos de perfis de dados até 12 km. (somente na troposfera, a camada da atmosfera que tem umidade).

O PMC deste trabalho apresentou o seguinte desenvolvimento?

- Dados de entrada (x) - 69 pares de mês, latitude, altitude e refratividade de um perfil vertical foram escolhidos como vetores de entrada.
- Dados de saída (y) - 69 pares de pressão do vapor d'água para a altitude respectiva e a temperatura utilizada para cálculo da pressão de saturação do vapor conforme equação (1), obtendo es como vetores de saída.

E estes são usados para o treinamento da RNA, apresentados como verdade, à procura da relação entre a refratividade e o vapor de água, ao lado da refratividade, o mês, a latitude e a altitude representam a variação geográfica e sazonal da temperatura, nesta tarefa, foram 6076 grupos de exemplos.

O restante, 35 perfis, 2761 grupos de refratividade, latitude, altitude e mês foram usados para generalização e recuperação dos perfis de umidade.

A relação entre os vetores de entrada e o de saída é representada como:

$$pv_k = es_k = f_k(m, l, z_k, r); \quad k = 1, \dots, N_z \quad (4)$$

onde m é mês, l é a latitude em graus, z_k é a altura em Km, N_z é o número total de níveis (camadas atmosféricas) considerados na inversão, r é refratividade, $f(.)$ representa a RNA-PMC, pv é a pressão do vapor d'água em hPa, e es é a pressão de saturação do vapor em hPa.

No processo de treinamento da RNA, um erro médio é colocado como critério de convergência. A relação entre os exemplos e o resultado obtido é verificada e logo que a média dos erros for menor que o critério pré-determinado, o treinamento termina e os pesos das conexões são utilizados para recuperação de outros perfis.

Todos os dados estão próximos a estações de radiossonda do projeto SALLJEX (South American Low Level Jet Experiment), onde em trabalho futuro pretende-se avaliar com o instrumento "in situ" com perfis de umidade relativa e os perfis de vapor d'água estimados pela RNA.

4. Resultados

Os resultados são perfis pontuais, ou seja, para uma determinada latitude/longitude e para um determinado dia e horário. Os gráficos apresentados são de um determinado perfil. Alguns exemplos foram escolhidos dentro do período (17 de dezembro a 15 de fevereiro). Podem ser observados nas **Figuras 5, 6 e 7**.

Os perfis recuperados pela RNA (em vermelho/magenta) são comparados com os perfis do ISCD-CHAMP (em cian/azul), o perfil recuperado pela RNA revela as modificações detalhadas, cuja estrutura é semelhante ao correspondente VWP. As maiores diferenças ficaram entre 2 e 3 hPa, mas o maior erro está no topo onde estão retornando umidade negativa, talvez o treinamento deva ser refeito ou a normalização dos dados deva ser revista. Este erro está bem claro no cálculo estatístico abaixo apresentado. Considerando as altitudes dos perfis recuperados, entre 1 a 12 km, a média separada por meses, também o erro quadrático médio e o viés entre os perfis de vp e es recuperados pela RNA e os produtos do CHAMP na tabela 1 e 2. Os perfis de média e desvio padrão para as altitudes, separadas por meses, podem ser verificadas na Figura 8. O maior desvio padrão é de 0.82 hPa (dez/2003), 0,67 hPa (jan/2003) e 0,65 hPa (fev/2003) de pressão do vapor corresponde aproximadamente a 52%, 41% e 50% e 0,76 hPa (dez/2002), 0,61 hPa (jan/2003) e 0,79 hPa (fev/2003) de desvio padrão de pressão de saturação do vapor. Próximo a 1 e 2 km as diferenças aumentam devido a poucos dados de treinamento.

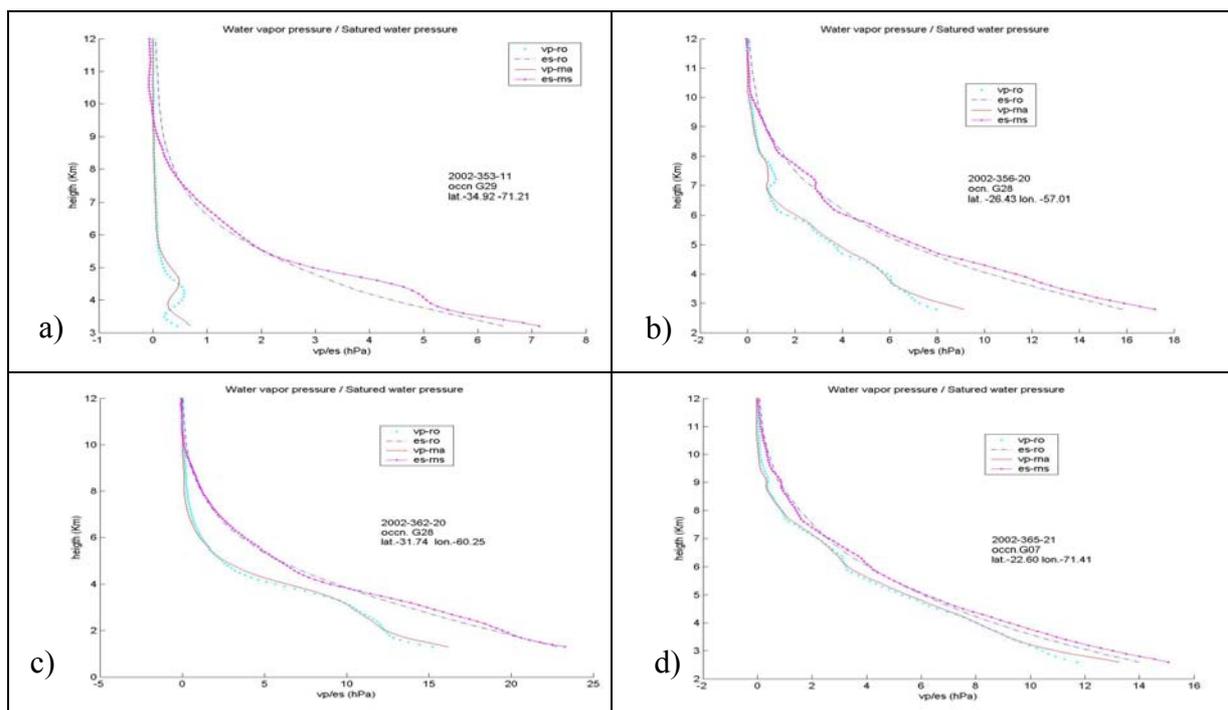


Figura 5 – Comparação dos perfis de pressão do vapor (vermelho/continuo) e pressão de saturação do vapor (magenta /dashed) estimados pela RNA com produtos do CHAMP VWP. a) $-34,92/-71,21$ em 22/12(20hs). b) $-28,43/-57,01$ 25/12(21hs). c) $-31,74/-60,25$ em 28/12(20 hs). d) $-22,80/-71,41$ em 31/12(21 hs).

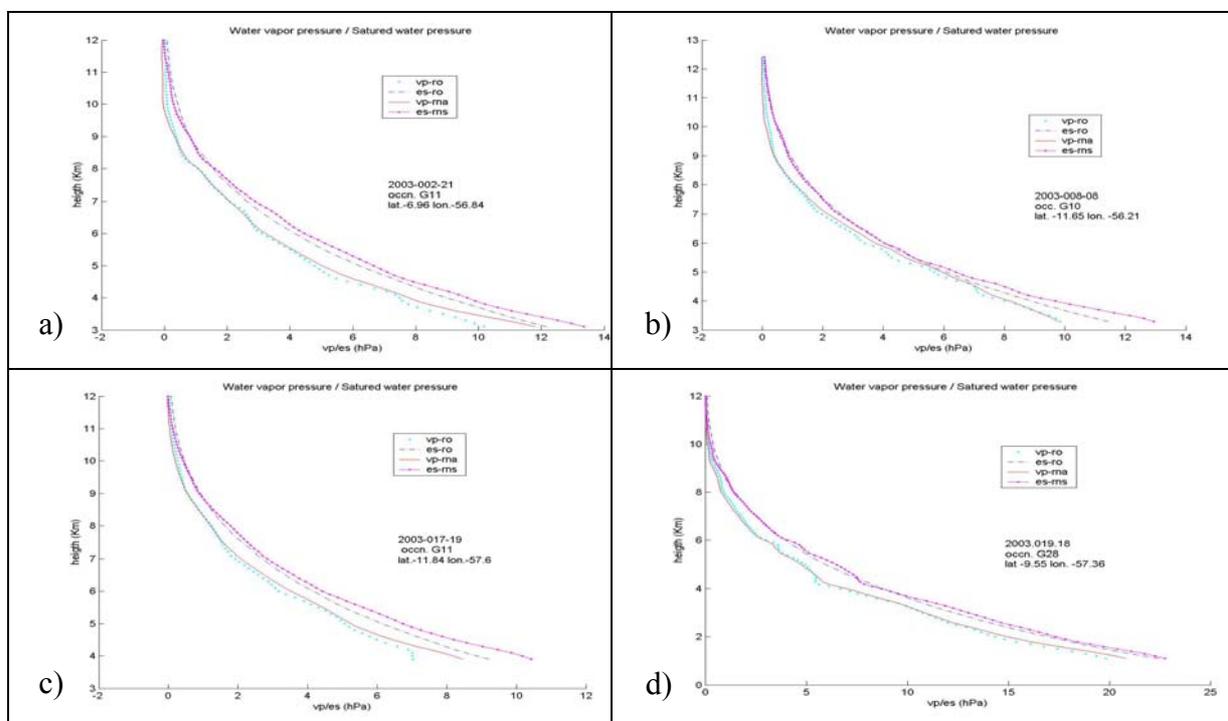


Figura 6 – Comparação dos perfis de pressão do vapor (vermelho/continuo) e pressão de saturação do vapor (magenta /dashed) estimada pela RNA com produtos do CHAMP VWP. a) $-6,96/-58,84$ em 02/01(21hs). b) $-11,06/-56,21$ em 08/01(8hs). c) $-11,34/-57,80$ em 1712 (19 hs). d) $-9,35 /-57,36$ em 19/01 (18 hs).

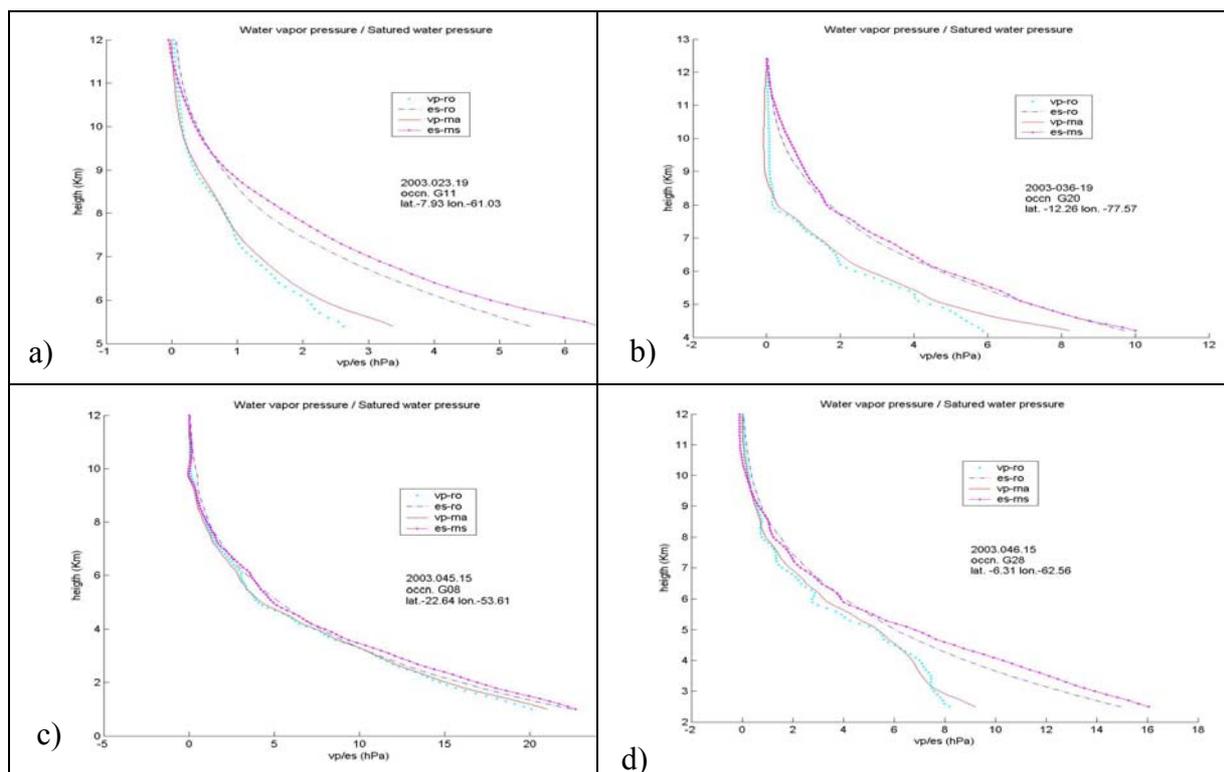


Figura 7 – Comparação dos perfis de pressão do vapor (vermelho/contínuo) e pressão de saturação do vapor (magenta /dashed) estimada pela RNA com produtos do CHAMP VWP. a)-7,93/-61,03 em 23/01(19hs). b)-12,29/-77,57 em 05/02(19hs). c)-22,64/-53,61 em 14/02(15 hs). d)-6,31 /-62,31 em 15/02(18 hs).

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos da comparação da Pressão do vapor e Pressão de vapor do vapor d'água estimadas pela RNA e produto CHAMP

Pressão do Vapor (vp)						Pressão de Saturação do Vapor (es)					
meses	Média RNA (hPa)	Média CHAMP (hPa)	Estatística			meses	Média RNA (hPa)	Média CHAMP (hPa)	Estatística		
			Bias	RMS	RMS (hPa)				Bias	RMS	RMS (hPa)
Dez/2002	2,54	2,48	0,05	0,065	0,165	Dez/2002	4,20	4,05	0,13	0,059	0,249
Jan/2003	2,17	2,09	0,06	0,067	0,146	Jan/2003	3,62	3,41	0,17	0,078	0,284
Fev/2003	3,29	3,21	0,07	0,049	0,162	Fev/2003	4,38	4,17	0,07	0,060	0,162

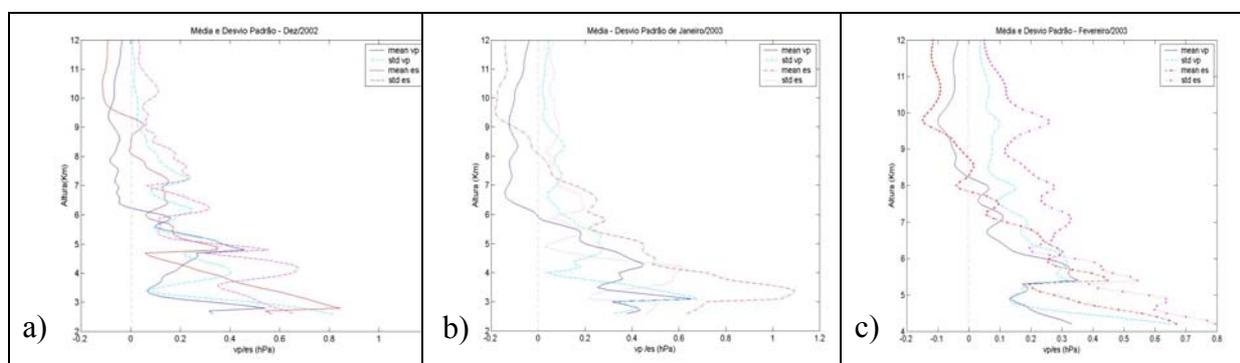


Figura 8 – Estatísticas das diferenças sendo em (azul/ sólido) média e (magenta/dashed) o desvio padrão da pressão do vapor; em (vermelho/dashed-dot) media e (magenta/dot) desvio padrão da pressão de saturação do vapor. a) para o mês de dezembro de 2002; b) para o mês de janeiro de 2003 e c) para fevereiro de 2003.

5. Conclusão

Neste trabalho analisou-se o uso de dados de Radio Ocultação do GPS para recuperação de perfis de umidade, utilizando um novo método baseado em RNA. Com base nos resultados obtidos, empiricamente conclui-se que o método responde satisfatoriamente à variabilidade e distribuição do vapor d'água na atmosfera. A estimativa da pressão do vapor e pressão de saturação de vapor permite relacionar diretamente a refratividade da RO com a quantidade de vapor d'água (para um determinado perfil vertical).

O vapor d'água é um composto muito importante no balanço de energia e sistemas globais e é considerado um elemento chave na variação climática. Este parâmetro é igualmente importante na previsão de tempo, como observação de umidade para o campo de condições iniciais dos modelos numéricos de previsão, através da assimilação de dados. As observações convencionais por radiossonda oferecem cobertura espacial bastante limitada, particularmente na América do Sul, então é de grande importância um método de estimativa do vapor d'água na atmosfera a partir de dados de satélite. Cintra. (2004).

A utilização de redes neurais constitui uma ferramenta útil e com grande simplicidade computacional na utilização de dados do sensoriamento remoto com grande disponibilidade. Uma vez treinada a rede, a obtenção das estimativas pode ser em tempo real à obtenção dos dados de satélite. Verificando sempre atualização de treinamento das redes para os diferentes meses do ano. Novas configurações de redes serão testadas em busca de uma precisão maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Cristiano Max Wrasse (CEA/INPE) pela aquisição dos dados junto ao ISDC-CHAMP.

6. Referências

Artigo em Revista:

Kuo Y. H., Zuo, X. and Guo, Y.R., 1996. Variational Assimilation of Precipitable Water Using Nonhydrostatic Mesoscale adjoint Model. Part I? Moisture retrieval. **Mon. Wea. Rev.**, 124, pp.122-147.

Kursinski, E. R., G. A. Hajj, S. S. Leroy, and T. Schofield, 1995. Observing tropospheric water vapor by radio occultations using Global Positioning system. **Geophys. Res. Lett.** 22, pp. 2365-2368.

Sullivan, D. B, Herman, B.M, Feng, D. Flitner, D.E. Ward, D.M. 2001: Retrieval of Water Vapor Profiles from GPS/MET Radio Occultations. **Bulletin of the American Meteorological Society.**

Livro:

Haykin, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Bookmann, 2001.

Mickay, G. A., 1970. Precipitation. **Handbook of the Principles of Hydrology**. Water information Center. New York. P.2-1 a 2-111.

Tese:

Cintra, R. S. **Implementação do Sistema de Assimilação de Dados em Espaço Físico para o Modelo Global do CPTEC**. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

Eventos:

Randel, D. L.; Haar, V. T. H.; Ringerud, M.A. Observed variability of total column water vapor related to atmospheric temperature. In 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, UNESCO, Paris, France, 25-29 May, 1998. **Pre-Prints**. American Meteorological Society, 1998 v.1,p. 15-17.