

## INFERÊNCIA DE PERFIS VERTICAIS DE TEMPERATURA E UMIDADE SOBRE O BRASIL A PARTIR DE DADOS DO SISTEMA ATOVS E UTILIZANDO O MODELO INVERSION COUPLED WITH IMAGER (ICI)

JOÃO CARLOS CARVALHO<sup>1</sup>, NELSON JESUS FERREIRA<sup>2</sup> e FERNANDO MANUEL RAMOS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agência Nacional de Telecomunicações  
SAUS Quadra 06 Blocos C, E, F e H, 70.070-940 - Brasília - DF  
jcarvalho@anatel.gov.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12.227-010  
e-mails: nelson@ltid.inpe.br; fernando@lac.inpe.br

Recebido Fevereiro 2004 - Aceito Abril 2006

### RESUMO

Este trabalho avalia a qualidade dos perfis verticais de temperatura e umidade inferidos a partir das radiancias atmosféricas medidas pelo *Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS)* sobre o Brasil. O modelo escolhido para o pré-processamento foi o *ATOVS and AVHRR Processing Package (AAPP)* e para a obtenção das sondagens o modelo de inversão *Inversion Coupled with Imager (ICI)* foi ajustado para os trópicos. As análises foram feitas valendo-se de 35 dias de dados provenientes do satélite NOAA-15, período entre 03 de fevereiro e 08 de março de 2000. A avaliação dos resultados foi feita mediante comparações com medidas *in situ* (radiosondagens) e com análises de modelos de previsão numérica de tempo. Os resultados obtidos mostram que os perfis verticais de temperatura e umidade apresentaram muito boa qualidade, e atingiram o nível de desempenho desejado pela especificação dos sensores ATOVS. Os resultados também mostram que é mais simples inferir perfis de temperatura e umidade sobre o oceano do que sobre continente, e que a condição atmosférica não afeta significativamente a acurácia do processo de inversão. Além disso, o uso de água precipitável como fonte adicional de informação durante a seleção do perfil inicial melhorou consideravelmente a estatística do erro das sondagens de umidade sobre oceano.

**Palavras-chave:** ATOVS, sondagem remota, temperatura, umidade.

### ABSTRACT: RETRIEVAL OF VERTICAL PROFILES OF TEMPERATURE AND MOISTURE OVER BRAZIL USING ATOVS DATA AND THE MODEL INVERSION COUPLED WITH IMAGER (ICI)

This paper analyses retrievals of temperature and moisture profiles over Brazil from satellite data. To accomplish this research the ATOVS and AVHRR Processing Package (AAPP) model for the ingestion and pre-processing the HRPT files and the Inversion Coupled with Imager (ICI) system were used for obtaining the sounding products. Thirty-five days of NOAA-15 satellite data over Brazil for the period of 02/03/2000 to 08/03/2000 were used as data basis. The validation was done with in-situ measurements (radiosonde profiles) and numerical weather prediction analysis. The obtained results show that the sounder products had a good accuracy and that satellite soundings had reached the levels of quality specified by the ATOVS sensors. It was shown that it is easier to retrieve these variables over oceanic areas than over land and that the atmospheric conditions do not affect significantly the accuracy of the inversion process. Also the use of precipitable water as additional source of information in the first guess selection, improved considerably the error statistics of moisture soundings over oceanic areas.

**Keywords:** ATOVS, remote sounding, temperature, moisture.

## 1. INTRODUÇÃO

Há anos as observações realizadas com radiossondas têm sido a fonte primária de dados para monitoramento das condições troposféricas. A despeito da importância deste sistema de observação, ainda existe uma carência de dados em muitas regiões da Terra. Neste sentido, a inferência de perfis verticais de temperatura e umidade a partir de dados de satélites, torna-se importante em análise meteorológica e para a assimilação de dados em modelos de previsão numérica de tempo. Estudos recentes (Smith 1991; Kidder and Haar 1995; Kalnay et al. 1998) mostram que o uso de sondagem remota para inicialização de modelos de previsão numérica de tempo resulta em um pequeno impacto positivo no Hemisfério Norte, porém tem grande impacto no Hemisfério Sul (HS). Isto em parte, ocorre em função da grande cobertura oceânica do HS, onde o número de observações é relativamente pequeno. Além disso, existem áreas remotas como é o caso da Amazônia, onde é difícil manter redes de observações convencionais.

A sondagem remota da atmosfera permite, a partir de um conjunto de radiancias espectrais, determinar a estrutura vertical de temperatura, umidade e concentração de constituintes atmosféricos. A interpretação destas medidas de radiancia em termos dos parâmetros meteorológicos requer a solução inversa da equação da transferência radiativa (ETR), pertencente à classe das equações de Fredholm de primeira espécie. Esta solução é altamente indeterminada para um dado conjunto de radiancias observadas, sendo o grau de indeterminação associado à resolução espectral e ao número de canais espectrais. Além disso, geralmente a solução apresenta-se bastante instável com relação a incertezas experimentais inerentes aos instrumentos de medidas (Rodgers 1976; Twomey 1977).

Atualmente, nota-se um grande esforço para aumentar a resolução espectral e espacial dos sondadores a bordo dos satélites meteorológicos, como exemplo, podemos citar o AMSU-B (*Advanced Microwave Sounding Unit - Module B*), o AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) e IASI (*Infrared Atmospheric Sounder Interferometer*). Além disso, um grande esforço têm sido feito no sentido de melhorar o processamento dos dados de satélite, através do aperfeiçoamento dos pacotes computacionais destinados a este fim. Devido às dificuldades inerentes de se obter soluções de problemas inversos relacionados à ETR, muitos enfoques e métodos foram desenvolvidos para extrair informação a partir dos dados provenientes dos satélites (Chahine 1970; Smith et al. 1985; Lavanant et al. 1997; Chaboureaud et al. 1998; Carvalho et al. 1999; Ramos et al. 1999; Li et al. 2000; Carvalho 2002). Um dos grandes problemas relacionados com sondagem remota da atmosfera é a obtenção de perfis verticais de temperatura e umidade sob a presença total ou parcial de nebulosidade. Isto é particularmente

importante nas regiões tropicais, onde a cobertura de nuvens é maior. Os novos instrumentos do sistema *Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS)*, a bordo dos satélites NOAA-KLMN, têm um grande potencial para melhorar a qualidade das sondagens nestas condições (Smith 1991), devido ao aumento considerável no número de canais operando na faixa espectral das microondas.

Para contribuir para esta problemática, o objetivo deste trabalho é avaliar a inferência de perfis verticais de temperatura e umidade sobre o Brasil usando dados coletados remotamente pelo sondador ATOVS. O modelo escolhido para o pré-processamento dos dados é o AAPP (*ATOVS and AVHRR Processing Package*) e para obtenção das sondagens será utilizado o modelo de inversão ICI (*Inversion Coupled with Imager*), desenvolvido pelo CMS (Centre de Météorologie Spatiale - Lannion, France), onde tem sido operacional desde 1996.

Deve-se destacar que, neste trabalho, para obter os perfis de temperatura e umidade ajustados às condições tropicais, o ICI passou pelas seguintes modificações: introdução de diferentes combinações de canais espectrais para cada condição de superfície (oceano e continente) e cobertura de nuvens (céu limpo e nublado) para a escolha do perfil inicial; e uso da água precipitável como fonte adicional de informação durante a seleção do perfil inicial. Vale salientar também que os canais do sensor AMSU-B, destinados à inferência de perfis de umidade, foram usados pela primeira vez no modelo de inversão ICI. Embora tenha sido lançado em 1998, com o satélite NOAA-15, o AMSU-B apresentou alguns problemas de calibração e de interferência da antena do sensor, fatores que dificultaram e retardaram sua utilização.

## 2. INSTRUMENTAÇÃO E MODELOS

Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta das características do sistema ATOVS/AVHRR e dos modelos AAPP e ICI utilizados da inferência de perfis verticais de temperatura e umidade utilizando-se dados transmitidos por satélites.

### 2.1. O sistema ATOVS/AVHRR

A partir de 1998, com o lançamento do satélite NOAA-15, tornou-se disponível uma nova geração de sensores para obtenção de perfis verticais de temperatura e umidade, o sistema ATOVS (*Advanced Tiros Operational Vertical Sounder*) (Goodrun et al. 1998), uma evolução do seu antecessor, o sistema TOVS (Smith et al., 1979). Este sistema possui um número maior de canais, responsável pelo aumento tanto da resolução espectral quanto espacial, principalmente na faixa das microondas. O ATOVS é composto dos seguintes instrumentos:

- a) *High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3)*, que praticamente é uma versão moderna das versões anteriores do HIRS, mantendo as mesmas características dos canais espectrais. A principal função deste sondador é a inferência de perfis verticais de temperatura e umidade na atmosfera, porém ele também é utilizado em estimativas da temperatura de superfície, parâmetros de nuvens e concentração total de ozônio; e
- b) *Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A)* e *Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B)*. Estes instrumentos contam com 20 canais na faixa de microondas, sendo 15 canais AMSU-A cujo papel principal é inferir perfis verticais de temperatura na presença de nebulosidade e auxiliar os canais infravermelho na detecção de nuvens, e 5 canais AMSU-B que estão localizados em uma faixa espectral sensível ao vapor d'água, sendo usado na inferência de perfis verticais de umidade.

## 2.2. O modelo AAPP

O AAPP é um pacote computacional, desenvolvido em plataforma Unix pela EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) com o propósito de preparar os dados recebidos diretamente dos satélites NOAA para serem usados em modelos de inversão e demais aplicações. O AAPP processa diretamente os dados de saída dos satélites NOAA/TIROS-N (atual NOAA-14) e também de seus sucessores NOAA-KLM (atuais NOAA-15, 16 e 17), que se encontram no formato *High Resolution Picture Transmission (HRPT)*, (Klaes 1997; Klaes e Scharaidt 1999). O AAPP relaciona seus módulos principais com as respectivas rotinas e padrão de saída dos dados em cada etapa. Os principais módulos deste pacote computacional são: Ingestão, Navegação e Pré-processamento que envolve a calibração, mapeamento, e máscara de nuvens.

## 2.3. O modelo ICI

O modelo de sondagem ICI foi desenvolvido pelo CMS (*Centre de Météorologie Spatiale - Lannion, France*) onde está operacional desde 1996, gerando produtos de sondagens atmosféricas tais como perfis verticais de temperatura e umidade que auxiliam a previsão numérica de tempo. Este modelo, que roda nas plataformas Unix e Linux, é capaz de processar as informações provenientes do sistema ATOVS e tem como principais características a utilização de parâmetros do AVHRR (cobertura de nuvens e temperatura de superfície) e o perfil inicial fornecido a partir de uma biblioteca de perfis representativos para a região considerada (Lavanant et al. 1997; Lavanant et al. 1999). O ICI foi planejado de forma que módulos separados possam ser substituídos ou executados de forma independente, o que lhe atribui grande

robustez e flexibilidade, facilitando a realização de experimentos e adaptações para diferentes situações. Os módulos principais são: módulo de inversão (*ICI module*), a biblioteca de perfis iniciais e o módulo de *tuning*, que é responsável pela calibração periódica do modelo (Lavanant et al. 1997). Basicamente, o processo de inversão pode ser separado em duas etapas: a primeira relacionada à seleção do perfil inicial usando um algoritmo de otimização por mínimos quadrados no espaço de radiância; a segunda é o processo de inversão propriamente dito, que usa um enfoque Bayesiano para inferir o perfil de temperatura e umidade.

## 2.4. A obtenção do perfil inicial de temperatura e umidade

O processo de obtenção do perfil inicial do modelo ICI está baseado na construção de um banco de dados de perfis atmosféricos. Esta "biblioteca" de perfis é construída com base em um conjunto de dados de radiossondagens e análises de modelos de PNT para a área de cobertura utilizada (70°S - 20°N a 100°W - 20°W), onde cada perfil é identificado com relação à origem da massa de ar (polar, latitudes médias, tropical). Os arquivos contendo os dados de análises e radiossondagens dos últimos "n" dias são usados para criar um banco de dados de perfis iniciais para o dia *d*, ou seja, o banco de dados conterá os perfis entre os dias "*d-n*" a "*d-1*". Este banco de dados "dinâmico" é suposto ser representativo do estado da atmosfera na área de cobertura da estação de aquisição dos dados. Para cada perfil é calculada a temperatura de brilho correspondente (céu claro) utilizando o modelo direto de transferência radiativa RTTOV (Eyre 1991; Saunders et al. 1998) para 10 diferentes ângulos de incidência, 2 emissividades de superfície e 10 diferentes valores de pressão na superfície. A matriz de covariância das temperaturas de brilho *B* é computada para cada classe de massa de ar. A seleção do perfil inicial é feita através de uma busca na "biblioteca" de perfis iniciais descrita anteriormente. Para completar o perfil inicial, o ICI utiliza informações auxiliares como dados de previsão de 12h da temperatura do ar em superfície e pressão em superfície. Estas informações juntamente com a temperatura da superfície (*skin temperature*), que é obtida a partir de dados AVHRR, são utilizadas para melhorar a qualidade do perfil próximo à superfície.

Além das informações mencionadas acima, para a escolha do perfil inicial foi implementada também, como fonte adicional de informação na forma de um pseudocanal, a quantidade total de água precipitável. O valor de água precipitável sobre o oceano foi calculado a partir do algoritmo de Grody (1999), que utiliza as frequências de 23GHz e 31GHz (canais 1 e 2 do AMSU, respectivamente). Sobre o continente foi desenvolvido um algoritmo baseado na regressão múltipla de grande parte dos canais do HIRS e AMSU (Carvalho 2002).

### 2.4.1. Esquema de inversão matemática do ICI

O método de inversão consiste em perturbar o perfil inicial de forma a minimizar o erro entre a medida (observação do satélite) e a temperatura de brilho (computada a partir do perfil perturbado). Seja  $x$  um vetor que representa o estado atmosférico (perfil atmosférico) e  $r^m$  um vetor de observações do satélite (temperatura de brilho ou radiâncias). Tentar inverter as observações do satélite consiste em encontrar o valor mais provável do estado atmosférico  $x$  dado o conjunto de medidas  $r^m$ , ou seja, maximizando a probabilidade condicional de  $x$  dado  $r^m$ :  $\text{Max } P(x | r^m)$ .

De acordo com o teorema de Bayes:

$$P(x | r^m) = P(r^m | x)P(x), \quad (1)$$

onde  $P(r^m | x)$  representa a probabilidade de se medir  $r^m$  quando o estado atmosférico é  $x$ ; e  $P(x)$  é a probabilidade de obter o estado atmosférico  $x$  antes de se realizar a inversão. No caso de distribuição Gaussiana dos erros, as probabilidades podem ser expressas como:

$$\begin{aligned} P(r^m | x) &= \exp\left[-1/2\{r^m - r(x)\}^T \{E\}^{-1} \{r^m - r(x)\}\right] \\ P(x) &= \exp\left[-1/2(x - x^b)^T \{C\}^{-1} (x - x^b)\right] \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $x^b$  é um vetor que representa o conhecimento *a priori* do estado atmosférico (perfil inicial);  $C$  é a matriz de covariância do erro do perfil inicial;  $r(x)$  é o vetor de temperatura de brilho simulado com o modelo de transferência radiativa ou "modelo direto";  $E$  é a matriz de covariância do erro de medida que combina o erro nas observações do satélite e também aqueles que surgem devido à aproximações no modelo direto; os superescritos  $T$  e  $-1$  denotam a matriz transposta e inversa, respectivamente.

A solução mais provável, ou seja que maximiza  $P(r^m | x)$  é aquela que minimiza a seguinte função objetivo:

$$J(x) = (x - x^b)^T C^{-1} (x - x^b) + \{r^m - r(x)\}^T E^{-1} \{r^m - r(x)\} \quad (3)$$

Para encontrar o valor mais provável de  $x$ , calcula-se o ponto onde o gradiente de  $J(x)$  com respeito a  $x$  é nulo. Assumindo que não existem mínimos múltiplos:

$$J'(x) = C^{-1}(x - x^b) - K(x)^T E^{-1} \{r^m - r(x)\} = 0 \quad (4)$$

onde  $K(x)$  contém as derivadas parciais de  $r(x)$  com respeito aos elementos de  $x$ .

Para obter a solução da Equação (4) é usado o algoritmo de otimização iterativo Newton, que produz a seguinte solução iterativa:

$$x_{n+1} = x_n - J'(x_n)^{-1} J'(x_n) \quad (5)$$

Através de manipulação de matrizes pode-se chegar a seguinte formulação para este problema:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + (x^b - x_n) + W_n \{r^m - r(x_n) - K_n(x^b - x_n)\} \\ W_n &= CK_n^T (K_n CK_n^T + E)^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

## 3. DADOS E METODOLOGIA

Este trabalho foi fruto de uma cooperação internacional estabelecida entre o Brasil e França, sendo parte desenvolvida no Centre de Météorologie Spatiale, localizado na cidade de Lannion - França, com destaque para a fase de idealização e implementação das melhorias e adaptações do modelo, e parte no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, localizado na cidade de São José dos Campos - Brasil, com ênfase para o processamento dos dados e conclusão dos trabalhos.

Foram usadas órbitas do satélite NOAA-15 transmitidas no formato HRPT pela estação de recepção do INPE, localizada na cidade de Cachoeira Paulista, SP. Para cada dia tem-se de 2 a 4 órbitas, divididas entre aquisições matutinas (em torno de 10:30 UTC) e noturnas (em torno de 22:30 UTC).

Para auxiliar o processo de inferência das sondagens remotas, foram utilizados dados provenientes do modelo operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O período de dados de previsão utilizado está compreendido entre o dia 21 de janeiro a 08 de março de 2000. Os arquivos de previsão contendo todas as variáveis de saída do modelo global se encontram no formato GRIB. Durante o processo de formação da "biblioteca" de perfis iniciais e também na validação dos resultados, foram utilizados dados de análise compreendendo o período entre 21 de janeiro a 08 de março de 2000. A Figura 1 mostra a área utilizada na formação da "biblioteca" de perfis iniciais do ICI. Estes dados são provenientes do CPTEC e também do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), sendo este último utilizado somente para a validação dos resultados. As análises do CPTEC tem uma resolução de 200 x 200 km próximo à linha do Equador e os dados de análise do ECMWF (resolução de 1°x1°) para as 00 e 12 UTC foram fornecidos pelo *Centro de Météorologie Spatiale* (CMS).

Os dados de radiossondagem provenientes do Sistema de Telecomunicações Global (GTS), foram fornecidos pelo centro de meteorologia de Toulouse/Meteo-France. Foram usadas todas as observações disponíveis para às 00 e 12 UTC sobre a área estudada (Brasil e áreas oceânicas adjacentes), para o período de 03 de fevereiro a 08 de março de 2000. Das informações contidas nas radiossondagens, foram extraídos apenas os perfis

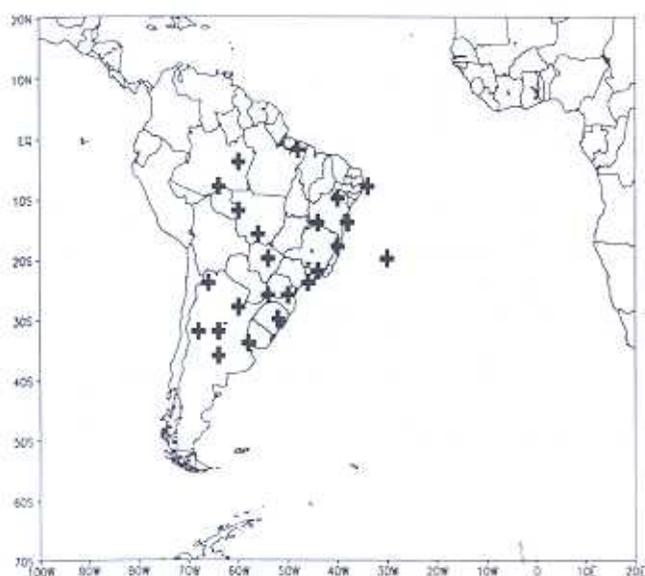


Figura 1 – Localização das estações de radiossondagens utilizadas para validação dos perfis inferidos de temperatura e umidade. Os limites da figura mostram a área utilizada pelo modelo ICI para geração da "biblioteca" de perfis iniciais.

de temperatura e umidade. Devido à baixa qualidade de algumas sondagens, os perfis foram submetidos a um controle de qualidade (Carvalho 2002), diminuindo bastante o número de observações sobre a área de estudo.

O ICI foi aplicado para o período entre 04/02/2000 e 08/03/2000. Contudo, o período entre 04/02/2000 e 23/02/2000 corresponde à formação da biblioteca de perfis iniciais e ajustes dos coeficientes internos do modelo de inversão ICI, e não envolve o processo de inversão física da ETR (somente seleção dos perfis iniciais). A partir de 24/02/2000 o processo de inversão física foi normalmente aplicado (perfis inferidos), resultando em 15 dias de perfis inferidos. O processo de comparação entre as sondagens e observações foi realizado através da co-localização destes perfis. Para cada perfil observado (análise ou radiossonda) o programa procura pelo pixel mais próximo onde foi feita a inversão até a distância limite de 100 km e intercalagem de tempo de +/- 3 horas.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados das sondagens (temperatura) ICI foram comparados com observações feitas por radiossondagens para fins de validação. A Figura 2 mostra os valores de RMSE para o perfil inicial (linha pontilhada) e perfis inferidos (linha sólida) sobre o continente (a) e sobre o oceano (b), respectivamente. Os valores médios (da superfície até 10 hPa) do RMS, média e desvio padrão do perfil inicial e perfil inferido, são apresentados na Tabela 1. Ao se analisar estes resultados, deve-se levar em consideração o número muito menor de observações de radiossondagem comparado ao número de perfis provenientes dos campos de análise, sobretudo sobre o oceano, onde o número de observações diminuiu drasticamente sobre a zona de estudo. Apesar da baixa quantidade de co-localizações, a comparação com perfis de radiossondagem mostra uma tendência similar à encontrada quando se compara com dados de análise, ou seja, os erros maiores são encontrados sobre o continente, e próximos a superfície. Acima de 100 hPa os perfis de radiossondas são extrapolados com base em um modelo de extrapolação climatológica, isto explica os erros maiores encontrados nesta região.

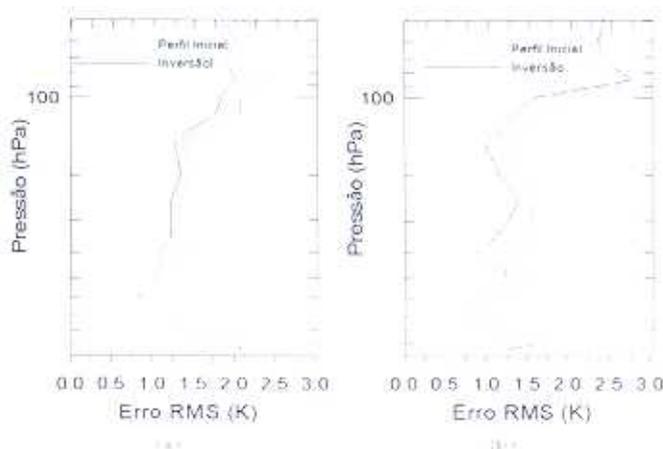


Figura 2 – Erro RMS dos perfis de temperatura (ICI - radiossonda) para diferentes tipos de superfície: a) continente (140 perfis), e b) oceano (22 perfis).

Tabela 1 – Valores do RMS, média e desvio padrão (da superfície até 10 hPa) dos perfis de temperatura inicial e inferido, sobre o oceano e continente. A estatística foi realizada para as radiossondagens disponíveis na região para o período de 23 de fevereiro a 08 de março de 2000.

Estatística	Continente		Oceano	
	Perfil Inicial	Inversão	Perfil Inicial	Inversão
N. Pontos	140	140	22	22
Média (K)	-0.40	-0.25	-0.34	-0.20
StDev (K)	2.04	1.86	1.56	1.35
RMS (K)	1.70	1.51	1.61	1.44

Os campos de análises, apesar da evolução dos modelos de previsão e esquemas de assimilação de dados, podem apresentar em algumas situações erros significativos na representação do estado atmosférico, e que os perfis de radiossondagens ainda são a melhor fonte de validação para as sondagens atmosféricas. Infelizmente, o baixo número de radiossondagens não permite fazer o mesmo tipo de comparação para os campos de temperatura, o que possibilitaria uma validação mais realista dos

resultados. Neste caso, uma comparação de perfis verticais em diferentes pontos se torna mais adequada, como é discutida a seguir. A Figura 3 mostra a estatística do erro entre os perfis inferidos e os perfis de radiossondagem (em azul) e entre os perfis inferidos e a análise (em vermelho), sobre diferentes regiões do Brasil. São mostrados o desvio médio (linha tracejada) e RMS (linha contínua). Pode-se observar que individualmente erro se aproxima da estatística média para todas as sondagens

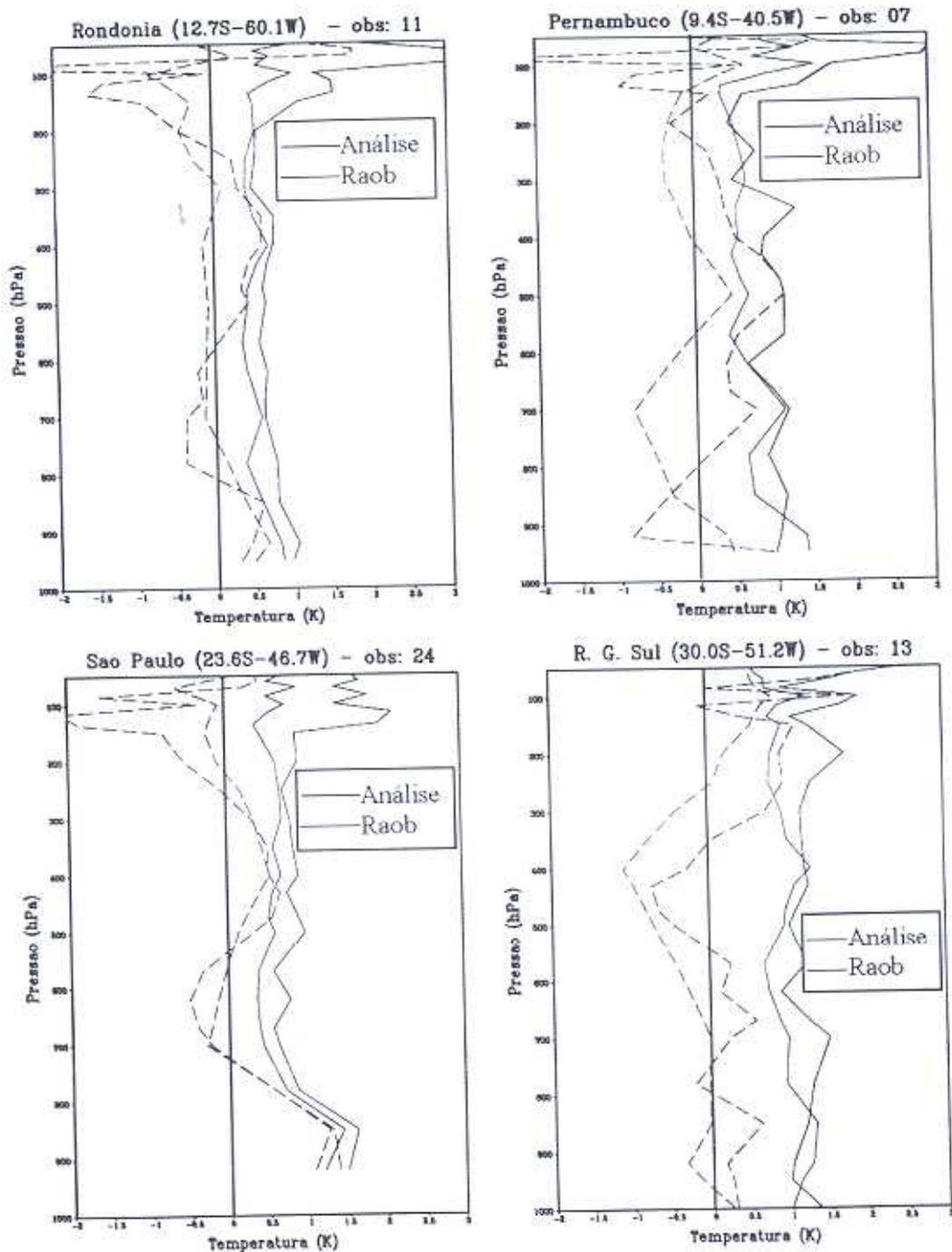


Figura 3 – Estatística do erro entre os perfis inferidos e de radiossondagem (em azul) e entre os perfis inferidos e análise (em vermelho), em diferentes regiões do Brasil. São mostrados o desvio médio (linha tracejada) e RMS (linha contínua).

com valores abaixo de 1.5 K, exceto em alguns locais como é o caso dos pontos localizados acima de 100 hPa para os perfis de radiossondagem. Neste caso, o aumento do erro está provavelmente associado à extrapolação dos perfis de radiossondagem. Outro fato que chama a atenção neste gráfico é o viés (BIAS) que existe próximo à superfície dos perfis sobre Pernambuco e São Paulo. O mesmo não acontece com outros pontos, como em Porto Alegre e Rondônia. No caso de São Paulo o viés ocorre tanto para a radiossondagem quanto para a análise, enquanto sobre Pernambuco o aumento próximo a superfície pode estar relacionado a um problema de extrapolação do perfil de radiossondagem para a temperatura da superfície. Contudo, de um modo geral, o baixo nível de erro verificado em diferentes regiões do país mostra que o modelo de inversão ICI está bem

ajustado para os diferentes padrões de temperatura encontrados. Pode-se notar também que a diferença entre o erro calculado com relação à análise e à radiossondagem é pequena.

Na Figura 4 apresenta-se uma comparação entre os perfis inferidos, iniciais e de radiossondagens. Foram selecionados somente aqueles em que havia uma diferença entre o horário da radiossondagem e a passagem do satélite menor que 1 h. A Figura 4-a corresponde a uma situação de céu limpo e a 4-b de céu nublado. Nas duas situações, o perfil inicial selecionado pelo modelo e o inferido no processo de inversão apresentam valores bastante próximos dos medidos pela radiossonda. O RMS calculado para os perfis inferidos (entre 1000 hPa e 100 hPa) foi de 0.82 K e 1,12 K para a primeira e segunda situação, respectivamente.

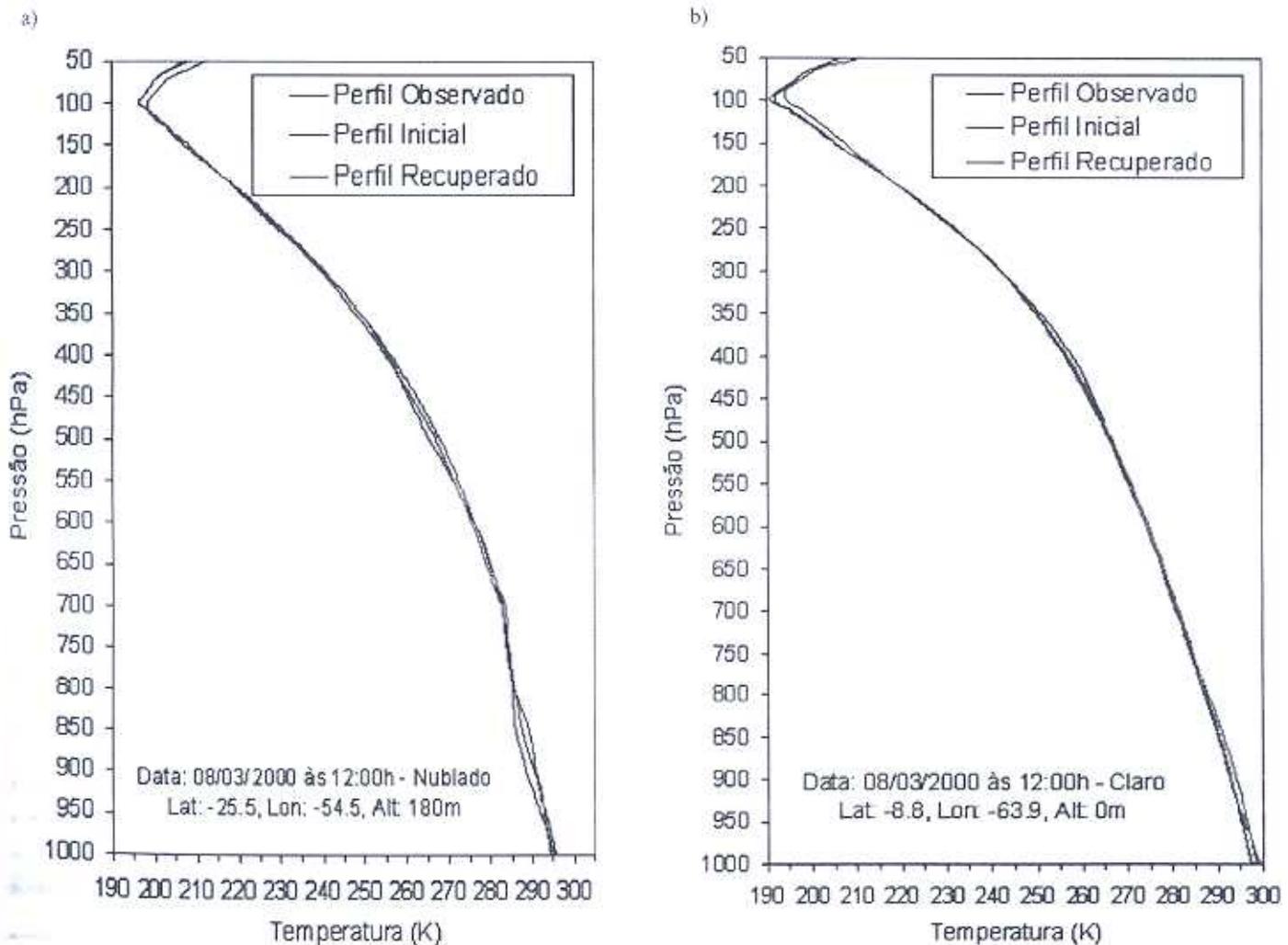


Figura 4 – Comparação entre perfis de temperatura inferidos e de radiossondagem para: a) condição de céu limpo (08/03/2000 às 12:00 UTC; 8.8°S, 63.9°W); b) condição de céu nublado (08/03/2000 às 12:00 UTC; 25.5°S, 54.6°W).

No que se refere à habilidade do sistema ATOVS, e em particular do instrumento AMSU-B, em reconstruir a quantidade e distribuição da umidade presente na atmosfera, as comparações com radiossondagens foram feitas da mesma forma que as de temperatura. Além das dificuldades normalmente encontradas no processo de inferência de perfis verticais de temperatura, na sondagem vertical de umidade existem outras dificuldades que são intrínsecas aos campos de umidade na atmosfera. Dentre estas dificuldades pode-se destacar a grande variabilidade espacial e temporal dessa variável, sobretudo, quando se refere a regiões tropicais. Esta variabilidade dificulta a comparação com dados observacionais, necessária ao processo de validação. Além dos fatores de ordem meteorológica, existem também problemas relacionados ao nível de sensibilidade dos sensores a bordo do satélite. Os canais sensíveis à umidade atmosférica apresentam um nível de ruído bem maior quando comparados aos canais utilizados para sondagem de temperatura, e, como consequência, tem-se um aumento do erro no produto final (perfis verticais de umidade).

Para se avaliar a representatividade do processo de inferência dos perfis verticais de umidade do modelo ICI, os perfis de satélite/radiossondas foram intercomparados. O erro RMS para o perfil inicial (linha pontilhada) e perfis inferidos (linha sólida) sobre o continente (a) e sobre o oceano (b), são apresentados na Figura 5. Em geral, o erro RMS é menor que 2.5 g/kg e decresce com a altura. Contudo, sobre o oceano o perfil inferido apresentou um erro máximo em torno de 700 hPa, acompanhando a tendência do perfil inicial. Obviamente, estas intercomparações são limitadas pelo número relativamente pequeno de observações de radiossondagens disponíveis, especialmente sobre o oceano. Na comparação com dados de análise também foi verificado um pico de erro em torno de 700 hPa sobre o oceano, porém com menor intensidade. A estatística do erro médio (da superfície até 500 hPa) para os perfis inicial e inferido de umidade específica é apresentada na Tabela 2. Ao contrário do valor observado quando os perfis foram comparados com dados de análise (não mostrado), o desvio médio (em módulo) é maior sobre o oceano do que sobre o continente, porém com sinais trocados. Já o desvio padrão é menor sobre o oceano e o erro RMS é praticamente o mesmo em ambas situações. Contudo, o baixo número de pontos

de comparações sobre o oceano torna a estatística menos robusta, prejudicando assim a análise dos resultados.

A Figura 6 mostra a estatística do erro na umidade específica entre os perfis inferidos e os de radiossondagem (em azul) e entre os inferidos e a análise (em vermelho), sobre diferentes regiões do Brasil. São mostrados o desvio médio (linha tracejada) e o RMS (linha contínua). Nota-se que para cada caso observado, a estatística do erro apresenta comportamento diferente, ou seja, cada região tem uma característica particular. Isto difere do observado para os perfis de temperatura. O melhor resultado (com relação a radiossondagem) foi observado para Rondônia e São Paulo. Verificou-se também grande diferença entre o erro calculado com relação a radiossondagem e a análise, sendo o segundo significativamente menor. Os resultados com relação à sondagem de umidade, sugerem que ainda existem melhorias a serem realizadas no sentido de se obter um perfil de sondagem cuja qualidade seja mantida em todas as condições. Separar o algoritmo de seleção do perfil inicial em diferentes módulos, que sejam representativos das várias regiões climáticas do país, pode ser uma possível solução para este problema. Ainda assim, os erros observados estão dentro do esperado pela especificação do sensor (1.5 g/kg), exceto para a sondagem sobre Porto Alegre, cujo erro RMS chega a 2.0 g/kg.

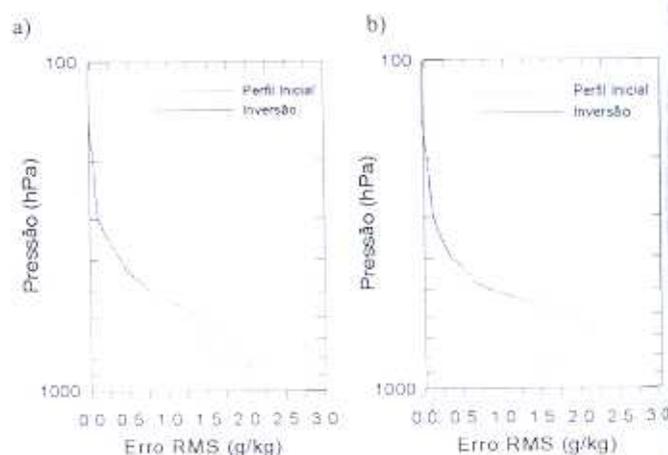


Figura 5 – Erro RMS dos perfis de umidade específico (ICI - radiossonda) para diferentes tipos de superfície: a) continente (140 perfis) e b) oceano (22 perfis).

Tabela 2 – Valores de RMS, média e desvio padrão (da superfície até 500 hPa) do perfil inicial e inferido de umidade específica (g/kg) sobre o oceano e continente, para o período de 23 de fevereiro a 08 de março de 2000.

Estatística	Continente		Oceano	
	Perfil Inicial	Inversão	Perfil Inicial	Inversão
N. Pontos	140	140	22	22
Média	-0.86	-0.20	0.93	0.51
StDev	2.28	2.25	1.57	1.58
RMSE	1.92	1.75	1.85	1.75

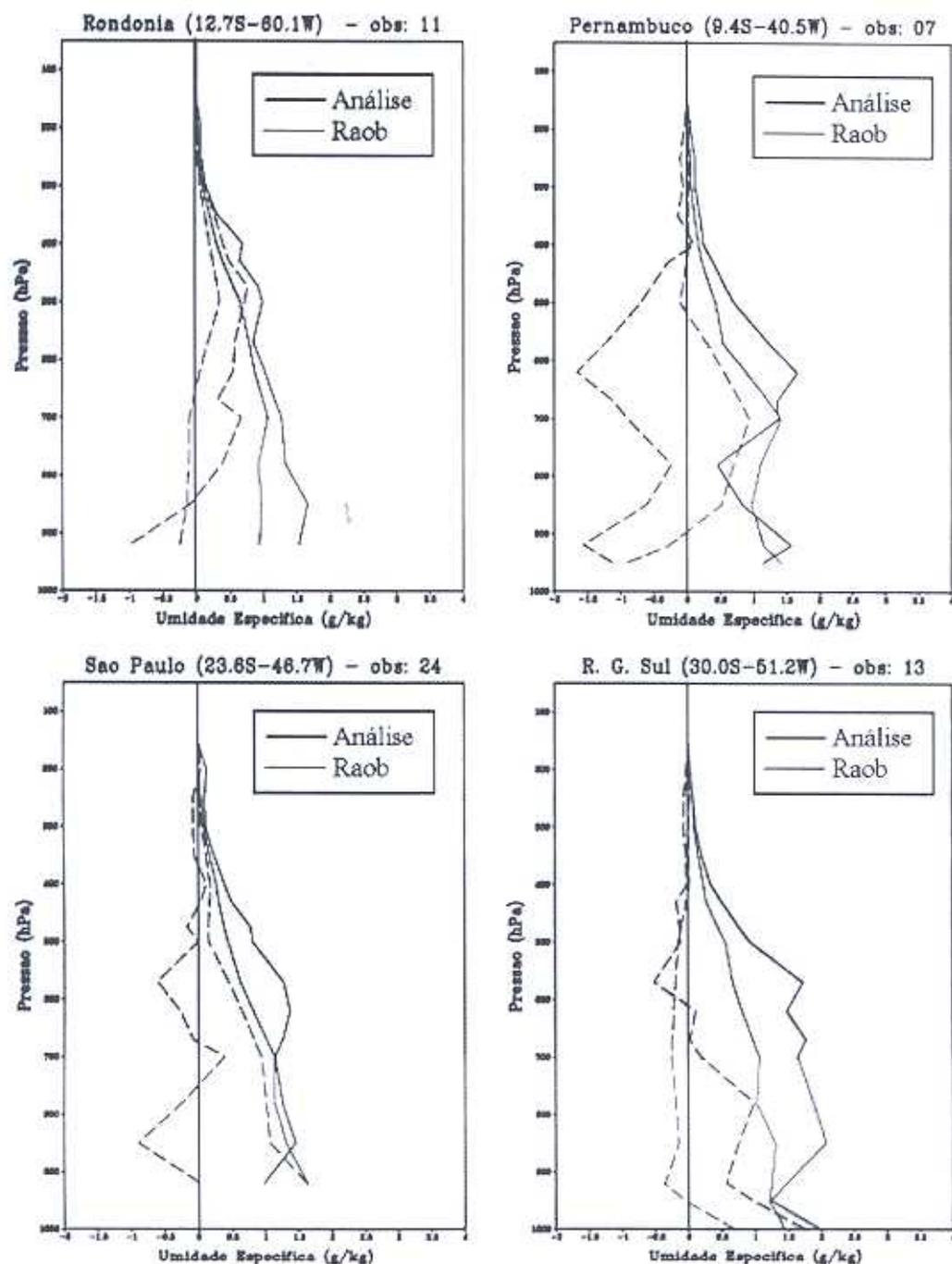


Figura 6 - Estatística do erro entre os perfis inferidos e de radiossondagem (em azul) e entre os perfis inferidos e análise (em vermelho), sobre diferentes regiões do Brasil. São mostrados o desvio médio (linha tracejada) e RMS (linha contínua).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de contribuir para o aprimoramento do conhecimento relativo a sondagens atmosféricas utilizando-se de satélites meteorológicos, a presente pesquisa teve por objetivo: estudar e explorar a habilidade do conjunto de canais que constituem o sistema ATOVS em reconstruir a estrutura vertical de temperatura e umidade sobre o Brasil. Com base

nos resultados apresentados, conclui-se que a inferência dos perfis de temperatura utilizando o modelo ICI ajustado para os trópicos atingiu os níveis de qualidade desejados pela especificação dos sensores ATOVS, que prevê erros até 1.5 K. Os erros RMS para os perfis de temperatura foram de 1.09 K e 1.2 K, respectivamente sobre oceano e continente. Apesar dos bons resultados obtidos, existem alguns pontos onde o esquema de sondagem ainda apresenta problemas, como é o caso das

inversões próximo da superfície terrestre (sobre o continente), onde a influência de alguns parâmetros como temperatura e emissividade é significativa, e os erros na estimativa da altura da tropopausa, responsável pela maior parte dos erros encontrados na alta troposfera. Vale ressaltar que a inferência de perfis de temperatura e umidade próxima à superfície e também na região da tropopausa tem sido um grande desafio para pesquisadores deste tema (Carvalho 1998 e English 1999).

Um dos principais objetivos desta pesquisa, e onde concentrou-se a maior parte dos esforços, está relacionado à inferência dos perfis de umidade utilizando o sensor AMSU-B. Extrair informação da umidade atmosférica, a partir de satélite com precisão suficiente para serem utilizados pela comunidade meteorológica, tem sido um dos grandes desafios na área de sondagem remota. Do ponto de vista qualitativo, os perfis inferidos mostraram que o modelo de inversão consegue identificar bem a estrutura do campo de umidade. As regiões com maior e menor valores de umidade, que podem estar associadas a diferentes massas de ar são bem representadas pelo modelo, principalmente nas sondagens realizadas sobre o oceano. Ao se realizar uma análise quantitativa, verificou-se que o erro RMS entre os níveis de 1000 e 300 hPa foi de 12,24% e 18,12% sobre o oceano e continente, respectivamente. Estes valores estão dentro daquilo que se esperava para o sensor AMSU-B (20% ou 1,5g/kg). Os valores maiores de desvio padrão foram encontrados nos níveis mais próximos da superfície terrestre (2,48 g/kg e 1,22g/kg sobre o continente e oceano, respectivamente).

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se a realização de uma estatística do modelo para vários meses e em diferentes estações do ano, visando estabelecer uma climatologia do ICI e também dos diversos algoritmos auxiliares que são utilizados. Com relação ao modelo de inversão, seria importante testar outros algoritmos de otimização, pois conforme foi mencionado, o algoritmo usado pelo ICI não consegue obter melhoras significativas sobre o perfil inicial, sobretudo para o perfil de umidade.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores anônimos que contribuíram significativamente para o aprimoramento desse artigo e ao CNPq pelo apoio para a execução da pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, J. C.; RAMOS, F. M.; FERREIRA, N. J.; CAMPOS VELHO, H. F. Retrieval of vertical temperature profiles in the atmosphere, **3rd International Conference on Inverse Problems in Engineering**, Port Ludlow, USA, 1999.
- CARVALHO, J. C. Modelagem e análise de sondagens remotas sobre o Brasil utilizando-se o sistema ICI. São José dos Campos: **INPE**, 2002. 230p. Tese (Doutorado em Meteorologia).
- CHABOUREAU, J.-P.; CHÉDIN, A.; SCOTT, N. A. Remote sensing of the vertical distribution of the atmospheric water vapor from the TOVS observations: Method and validation, **Journal of Geophysical Research**, vol. 103, n.D18, p. 8743-8752, 1998.
- CHAHINE, M. T. Inverse problems in radiative transfer; determination of atmospheric parameters. **Journal of Atmospheric Science**, vol. 27, n. 6, p. 960-967, 1970.
- EYRE, J. R. A fast radiative transfer model for satellite soundings system. **ECMWF Technical Memorandum**, n. 176, 1991.
- GOODRUN, G.; KIDWELL, K. B.; WINSTONS, W. NOAA KLM user's guide. U.S. Department of Commerce, **National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Service, Data, and Information Service**, 2000.
- GRODY, N.; WENG, F.; FERRARO, R. Application of AMSU for obtaining water vapour, cloud liquid water precipitation, snow cover and sea ice concentration. **Technical Proceedings of the Tenth International TOVS Study Conference**, Boulder, Colorado, Jan. 1999.
- KALNAY, E.; LORD, S. J.; MCPHERSON, R. D. Maturity of operational numerical weather prediction: medium range. **Bulletin of American Meteorological Society**, vol. 12, p. 2753-2769, 1998.
- KIDDER, S. Q.; HAAR, T. H. V. **Satellite meteorology an introduction**. Academic Press, INC, 1995.
- KLAES, K. D.; SCHRAIDT, R. The European ATOVS and AVHRR Processing Package (AAPP) Development. **Technical Proceedings of the Tenth International TOVS Study Conference**, Boulder, Colorado, Jan., 1999.
- KLAES, K. D. ATOVS data processing in Europe. **Technical Proceedings of the Ninth International TOVS Study Conference**, Igls, Austria, Feb., 1997.

- AVANT, L.; BRUNEL, P.; ROCHARD, G.; LABROT, T. NOAA15 Soundings profiles retrieved with the ICI scheme. **Technical Proceedings of the Tenth International TOVS Study Conference**, Boulder, Colorado, Jan., 1999.
- AVANANT, L.; BRUNEL, P.; ROCHARD, G.; LABROT, T.; POCHIC, D. Current Status for the ICI Retrieval Scheme. **Technical Proceedings of the Ninth International TOVS Study Conference**, Igl, Austria, Feb., 1997.
- LI, J.; WOLF, W.; MENZEL, W. P.; ZHANG, W.; HUANG, H.-L.; ACHTOR, T. H. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: the algorithm and validation. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, p. 1948-1968, 2000.
- CAMPOS, F. M.; CAMPOS VELHO, H. F.; CARVALHO, J. C.; FERREIRA, N. J. Novel approaches on entropic regularization. **Inverse Problems**, vol. 15, n. 5, p. 1139-1148, 1999.
- RODGERS, C. D. Retrieval of the atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. **Reviews of Geophysics and Space Sciences**, vol. 14, p. 609-624, 1976.
- SAUNDERS, R. W.; MATRICARDI, M.; BRUNEL, P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, vol. 125, p. 1407-1425, 1998.
- SMITH, W. L. Atmospheric Soundings from satellite - false expectation or the key to improved weather prediction? **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, vol. 117, p. 267-297, 1991.
- SMITH, W. L.; WOOLF, H. M.; SCHRIENER, A. J. Simultaneous retrieval of surface and atmospheric parameters: a physical analytically direct approach. **Advances in Remote Sensing**, vol. 7, 1985.
- SMITH, W. L.; WOOLF, H. M.; HAYDEN, C. M. The TIROS-N operational vertical sounder. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 60, p. 1117-1187, 1979.
- TWOMEY, S. **Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Interactive Measurements**. Amsterdam, Elsevier Scientific, 1977.