

# SIMULAÇÃO DO HSB A PARTIR DE DADOS DO SENSOR AIRS: UMA APLICAÇÃO NA INFERÊNCIA DE PERFIS VERTICAIS DE TEMPERATURA E DE UMIDADE

RODRIGO A. F. DE SOUZA<sup>1</sup>, JUAN CARLOS CEBALLOS<sup>1</sup>, JOÃO CARLOS CARVALHO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE)  
Rodovia Presidente Dutra km39, 12630-000, Cachoeira Paulista/SP

<sup>2</sup>Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSR/INPE)  
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, 12227-010, São José dos Campos/SP  
E-mail: rodrigo@cptec.inpe.br

## RESUMO

Este trabalho analisa o desempenho do modelo “Inversion Coupled with Imager” (ICI) no “modo microondas” “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA), utilizando informações do sistema de sondagem AQUA equivalentes aos sensores “Advanced Microwave Sounding Unit-A” (AMSU-A) e “Humidity Sounder for Brazil” (HSB), para recuperar perfis de temperatura e umidade sobre a região Amazônica. Canais do “Atmospheric InfraRed Sounder” (AIRS) na banda de vapor d’água foram utilizados para simular temperaturas de brilho do sensor HSB para condições de céu claro. As temperaturas de brilho simuladas, em conjunto com os dados do AMSU-A (AQUA), foram utilizadas para recuperar perfis de temperatura e umidade utilizando o modelo de inversão ICI com duas opções para perfil inicial (“first-guess”): a) banco de perfis “TOVS Initial Guess Retrieval” (TIGR); b) banco de perfis brasileiros CLASS1. A comparação com radiossondagens em Rondônia (campanha DRY-TO-WET LBA) sugere que os perfis recuperados pelo ICI, obtidos usando apenas as informações dos canais em microondas complementados com os bancos TIGR ou CLASS1, representam satisfatoriamente o perfil de temperatura. No caso do perfil de umidade, a utilização do banco regional CLASS1 apresentou melhores resultados que os obtidos com o banco TIGR, particularmente na baixa troposfera. De maneira geral, os desvios padrões encontrados na baixa troposfera para os perfis de temperatura e de umidade foram inferiores a 2,5K e 1,5g/kg, respectivamente.

**Palavras-chave:** HSB, AIRS, AQUA, ATOVS, ICI, Perfis atmosféricos, Inversão.

## ABSTRACT: ATMOSPHERIC RETRIEVALS USING AQUA (AIRS/AMSUA/SIMULATED HSB) DATA AND A BRAZILIAN SOUNDINGS DATABASE: A CASE STUDY

It was analyzed the performance of the retrieval software ICI (Inversion Coupled with Imager) in the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) “microwave mode”, using information from the AQUA sounding system equivalent to the Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) and Humidity Sounder for Brazil (HSB) sensors, to recover atmospheric profiles of temperature and moisture over the Amazon region. A set of Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) channels sensitive to water vapor band was used for simulating the HSB brightness temperatures in clear sky conditions. The simulated brightness temperatures together with AMSU-A (AQUA) information were used to recover vertical profiles of temperature and moisture using the ICI with two first guess options: a) TOVS Initial Guess Retrieval (TIGR) data base profiles; b) CLASS1 Brazilian data base profiles. The comparison with radiosonde data over Rondonia (DRY-TO-WET campaign) suggests that temperature profiles inferred by ICI using only the microwave channels and complemented with the TIGR or CLASS1, satisfactorily retrieve temperature profiles. In the case of humidity profiles, the use of CLASS1 showed better results when compared with TIGR, particularly within low troposphere. In general, the Standard Deviation near the surface is lower than 2,5K for the temperature profiles and 1,5g/kg for the moisture.

**Key words:** HSB, AIRS, AQUA, ATOVS, ICI, Atmospheric profiles, Retrieval.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento/aperfeiçoamento de metodologias para recuperação de perfis atmosféricos é de fundamental importância para a Previsão Numérica de Tempo (PNT), principalmente para o Hemisfério Sul onde existe um baixo número de radiossondagens operacionais. Além disso, devido à grande extensão territorial do Brasil e à existência de áreas remotas como é o caso da Amazônia, torna-se difícil manter redes de observações convencionais. Como parte do ambicioso programa EOS (Earth Observing System), o lançamento do satélite AQUA em 4 de maio de 2002 foi um acontecimento científico de grande importância para a agência espacial americana (NASA) e para a Agência Espacial Brasileira (AEB). O Brasil integrava-se à missão AQUA através da calibração e monitoramento de um sistema sondador de umidade, o “Humidity Sounder for Brazil” (HSB), lançado junto com o “Atmospheric InfraRed Sounder” (AIRS) e a “Advanced Microwave Sounding Unit-A” (AMSU-A) (Lambrigtsen e Calheiros, 2003). A missão AQUA oferece uma grande oportunidade para coletar dados valiosos que poderão ser utilizados para o avanço do “estado da arte” do procedimento de inversão (Aumann et al., 2003).

Nos últimos 20 anos alcançou-se um progresso considerável na recuperação de perfis atmosféricos de temperatura e de umidade a partir de sensores passivos no infravermelho e em microondas. Recentemente, o desenvolvimento de sensores com alta resolução espectral no infravermelho vem merecendo especial atenção. Por exemplo o AIRS apresenta 2378 canais e o IASI (“Infrared Atmospheric Sounding Interferometer”, a ser colocado em órbita em 2006) deverá possuir mais de 8000 canais. O AIRS foi o primeiro sondador hiperespectral de radiação infravermelha trabalhando em modo operacional. Sua finalidade principal é a obtenção de perfis atmosféricos de temperatura e umidade com alta resolução vertical, comparável à de radiossondas; dele espera-se prover melhoramentos substanciais, especialmente nas medidas de temperatura, em relação aos instrumentos anteriores (Parkinson, 2003). Ainda, a alta resolução espectral deverá ser de utilidade na detecção e perfilagem de gases minoritários.

O conjunto AIRS/AMSU/HSB é considerado o sistema de sondagem mais avançado desenvolvido até agora. Ele incorpora os avanços técnicos dos sensores AMSU-A e AMSU-B do NOAA além da resolução espectral provida pelo AIRS com relação ao HIRS (“High resolution Infrared Radiation Sounder”), que dispõe de apenas 20 canais no infravermelho. As sondagens são realizadas combinando as medidas destes três sensores. Pesquisas realizadas com dados do sistema de sondagem AQUA, em condições de nebulosidade parcial, têm mostrado a possibilidade de recuperar perfis verticais de temperatura e umidade relativa com erro médio quadrático de 1 K e 10%, respectivamente (Susskind et al., 1998; Barnet e Susskind, 1999; Susskind et al., 2003). Espera-se com isso uma melhoria da qualidade dos perfis verticais de temperatura e umidade em relação aos atuais modelos operacionais que utilizam dados NOAA (erros de 2K e 20% na temperatura e umidade relativa, respectivamente), especialmente na presença de nebulosidade, aprimorando a performance dos dados de satélites em modelos de PNT (Goldberg et al., 2003; Parkinson, 2003). Com os 2378 canais do sondador AIRS tem-se um aumento significativo na quantidade de informação sobre a atmosfera. Todavia, não é imediatamente óbvio quantificar essa informação ou utilizá-la de forma eficiente (Rodgers, 1998). A seguir, a Tabela 1 apresenta algumas características básicas dos sensores que compõem o sistema de sondagem dos satélites NOAA-16 e AQUA.

Embora o AMSU-A/AQUA e o HSB/AQUA representem avanços tecnológicos no que se refere à relação sinal ruído comparados com os AMSU-A e AMSU-B da série NOAA (Chahine et al., 2000), suas funções operacionais continuam sendo as mesmas. Os sensores HSB e AMSU-B são utilizados para realizar sondagens de umidade em condições de céu claro ou parcialmente nublado e/ou corrigir as radiancias dos sensores de infravermelho (HIRS ou AIRS) em pixels contaminados por nuvem (Lambrigtsen e Calheiros, 2003). Os sensores em microondas avaliam água líquida associada a nuvens e fornecem informação auxiliar para o aprimoramento do processo de inversão pelo sensor de

infravermelho, em particular os perfis iniciais de temperatura e de umidade utilizados como “first guess” no processo de inversão. Porém, o HSB não se encontra em operação desde o final do ano de 2002, por problemas eletrônicos. Isto restringe a abrangência do sistema de sondagem AQUA. Em particular, no que se refere à estimativa de água líquida e a correção das radiâncias no infravermelho para pixels contaminados por nuvens. Entretanto, resta a possibilidade de simular o sinal HSB a partir de dados AIRS para condições de céu claro.

A grande quantidade de informações do AIRS sugere que o comportamento espectral dos canais HSB em condições de céu claro possa ser emulado utilizando informações dos canais AIRS. Souza e Ceballos (2004a, b) têm mostrado que esta emulação é possível e acurada para os canais em 183 GHz. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é mostrar a possibilidade de inferir perfis verticais de temperatura e de umidade a partir de informações do sistema de sondagem AQUA (AMSU-A/AQUA e HSB/simulado), o qual poderia fornecer informação equivalente à dos sensores AMSU-A e -B (“Advanced Microwave Sounding Units”) dos satélites NOAA-16 e posteriores. Esta possibilidade foi testada fazendo uso do utilitário ICI (“Inversion Coupled Imager”) no modo estático. Os resultados são apresentados e discutidos nas próximas seções.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) produz rotineiramente perfis atmosféricos baseados no ICI e em arquivos do sistema de sondagem “Advanced TIROS Operational Vertical Sounder” (ATOVS) do satélite NOAA-16 (ver resultados difundidos na internet, no endereço eletrônico [http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/tovs/itpp\\_new.htm](http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/tovs/itpp_new.htm)); ainda, recebe e armazena operacionalmente o fluxo de informação do satélite AQUA incluindo a dos sensores AIRS e AMSU-A. Depreende-se que a possibilidade de uso do AQUA para sondagem com utilitários já instalados seria aplicável imediatamente à região da América do Sul que inclui o Brasil.

## **2. DADOS**

O “Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment - LBA” é uma iniciativa de pesquisa internacional liderada pelo Brasil. Ele foi projetado para gerar novos conhecimentos para entender o funcionamento climatológico, ecológico, biogeoquímico e hidrológico da Amazônia, o impacto das mudanças no uso da terra nesses funcionamentos e as interações entre a Amazônia e o sistema biogeofísico global da terra. Os dados utilizados neste trabalho correspondem ao período da campanha “DRY-TO-WET Atmospheric Mesoscale Campaign” do experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), realizada em Rondônia, entre os dias 31 de agosto e 31 de outubro de 2002, incluindo: 1) arquivos ATOVS do satélite NOAA 16 (passagens sobre o Brasil, armazenadas na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC (DSA/CPTEC). Esses arquivos apresentam a radiâncias calibradas em unidades físicas e georeferenciadas para todos os canais dos sensores do sistema ATOVS; 2) arquivos AIRS, AMSU-A e HSB do satélite AQUA, cedidos pelo “Jet Propulsion Laboratory” (JPL), Pasadena, Califórnia, os quais possuem as radiâncias calibradas em unidade físicas e georeferenciadas para cada um dos canais destes instrumentos; 3) radiossondagens realizadas durante a campanha do LBA para os horários próximos das passagens dos satélites AQUA e NOAA-16 sobre os sítios de Guajará-Mirim, Porto Velho e Ouro Preto d’Oeste. É importante comentar que os dados de radiossondagens foram considerados como sendo a “verdade terrestre” e correspondem aos dados da fase C do controle de qualidade, disponível no endereço eletrônico do experimento (<http://www.lba.iag.usp.br>). Basicamente, os dados de radiossondagem da fase C foram submetidos a um controle de qualidade baseado em métodos de inspeção visual, verossimilhança e consistência espacial e física (Longo et al., 2002). Além disso, para fins de validação foram utilizados os perfis verticais de temperatura e umidade gerados pelo modelo de inversão ICI a partir de dados sistema de sondagem ATOVS do satélite NOAA-16 (que conta com informações no infravermelho termal e em microondas),

que roda operacionalmente na DSA. O NOAA-16 possui órbitas em horários próximos dos do satélite AQUA (horários aproximados: 5 e 17 UTC e 6 e 18 UTC, respectivamente).

A base de dados de referência utilizados pelo ICI (operacional) para recuperar perfis atmosféricos é uma base dinâmica de perfis criada diariamente a partir de análises e previsões recentes do modelo global do CPTEC. O ICI pode funcionar ainda no modo estático, utilizando a base fixa de perfis TIGR. Adicionalmente, dispõe-se de uma base fixa construída com perfis sobre território brasileiro, o CLASS1 (Macedo, 2003). O TIGR é um banco climatológico de perfis gerado a partir de dados de radiossondagens pelo Laboratório de Meteorologia Dinâmica da França (LMD) e apresenta um total de 1761 perfis atmosféricos distribuídos sobre o globo terrestre. Por outro lado, o CLASS1 é um banco climatológico de perfis regionais construído a partir de um extenso conjunto de radiossondagens, distribuídas em 13 diferentes sítios sobre o território brasileiro para um período de aproximadamente 20 anos de dados. Esse banco conta com 647 perfis atmosféricos.

A seqüência de dados AQUA não incluía os dias 12 e 25 de setembro e 20 e 21 de outubro, tendo-se efetivamente 58 dias de dados. A informação compreende todas as órbitas do satélite em escala global, em conjuntos diários de 240 arquivos (120 no período matutino e 120 no período noturno). Os arquivos tinham sido pré-processados, permitindo identificar os pixels AIRS localizados sobre oceanos e considerados de céu claro.

Para analisar a qualidade dos perfis recuperados foram consideradas apenas radiossondagens correspondendo a pixels livres de nuvem sobre os sítios de Guajará-Mirim, Porto Velho e Ouro Preto d'Oeste, realizadas em horários próximos das passagens dos satélites NOAA-16 e AQUA. É importante observar que os pixels considerados como livres de nuvem foram determinados com base nas informações do modelo de inversão ICI, isto é, se o modelo de inversão informava que o pixel sobre o sítio de lançamento da radiossonda era de céu claro, a radiossonda era selecionada para a análise.

### **3. EQUIVALÊNCIA ENTE OS SENSORES AMSU-B E HSB**

O sensor AMSU-B do satélite NOAA-16 dispõe de cinco canais nas frequências de 89, 150, 183±1, 183±3 e 183±7 GHz, respectivamente, com resolução espacial de aproximadamente 15 km no nadir. O HSB é funcionalmente idêntico ao AMSU-B, com a exceção do canal de 89 GHz que não está presente. No entanto, o HSB possui melhoramentos significativos no que se refere à sensibilidade radiométrica, que resulta numa melhor imunidade às interferências que comumente afetam os dados da primeira versão do AMSU-B (Lambriksen e Calheiros, 2003).

É importante perceber que uma eventual substituição do HSB pelo AIRS é possível apenas para pixels livres de nuvem, desde que o AIRS trabalha no espectro do infravermelho. Assim sendo, no contexto do presente trabalho, a comparação entre HSB e AMSU-B foi efetuada para condições de céu claro. Foi realizado um estudo de caso comparando a temperatura de brilho observada no AMSU-B/NOAA-16 com a observada no HSB/AQUA, para três pixels localizados sobre a América do Sul (dados observados). Foram escolhidas as passagens do NOAA-16 e do AQUA do dia 29 de setembro de 2002, no horário próximo das 18 UTC. A seleção dos pixels considerados como livres de nuvens baseou-se na informação fornecida pelo arquivo de saída do ICI. Identificados os pontos de céu claro, foi selecionado o pixel HSB mais próximo. Como a informação contida no arquivo de inversão ICI é representativa de 45 km, fez-se a comparação da temperatura de brilho de cada pixel AMSU-B com a média de três por três pixels HSB. Além disso, foi realizada a comparação das temperaturas de brilho calculadas com um modelo de transferência radiativa para estes dois sensores, considerando um conjunto de 100 perfis do banco CLASS1 distribuídos sobre o Brasil, escolhidos aleatoriamente, e mais 10 radiossondas lançadas em Rondônia (sítio de Ouro Preto d'Oeste) durante o experimento do LBA. O modelo de transferência radiativa utilizado foi o "Radiative Transfer for ATOVS - RTTOV" (Saunders et al., 1999). A Figura 1 apresenta os resultados da comparação das temperaturas de brilho (Figura 1a) e a

localização geográfica dos pixels e sítios utilizados nas análises (Figura 1b). Desta comparação, conclui-se que em condições de céu claro as temperaturas dos canais HSB e AMSU-B semelhantes são essencialmente coincidentes, com desvios inferiores a 2 K para o conjunto de dados observados e desvios inferiores a 1 K para o conjunto de dados simulados. Desta forma, fica caracterizada, portanto, a equivalência entre os conjuntos AMSUA+HSB (AQUA) e AMSUA+AMSUB (NOAA 16).

## FIGURA 1

### 4. EMULAÇÃO DO SENSOR HSB

Dentre o conjunto de arquivos AIRS, foi escolhido para análise um dia de referência ou “de treinamento” (31 de agosto de 2002). Selecionaram-se  $Np = 3000$  pixels AIRS, distribuídos sobre oceanos entre as latitudes de  $60^\circ\text{N}$  e  $60^\circ\text{S}$  e considerados de céu claro. Basicamente, o processo de mascaramento tinha envolvido três etapas (Strow et al., 2002): 1) inicialmente, consideram-se alvos de  $3 \times 3$  pixels e julga-se a uniformidade das radiâncias observadas num conjunto escolhido de canais na janela atmosférica, localizados em  $800 - 1250 \text{ cm}^{-1}$  e em  $2500 - 2700 \text{ cm}^{-1}$ . A temperatura de brilho média  $Tb_m$  nesses canais é calculada para cada pixel do alvo. Este é selecionado se nenhum pixel difere em mais de 0,25 K com relação ao pixel central. Esta etapa elimina cenas parcialmente nubladas ou com alta variabilidade de vapor d’água. 2) A segunda etapa exige que as temperaturas da superfície do mar obtidas a partir dos canais escolhidos tenham diferença não superior a 0,4 K entre si. 3) Finalmente, uma tolerância de aproximadamente  $\pm 4 \text{ K}$  é considerada nas diferenças entre as temperaturas da superfície do mar observadas e as calculadas por um modelo de circulação (no caso, o do ECMWF – “European Centre for Middle-range Weather Forecast”).

A simulação de temperatura de brilho HSB foi realizada com base num modelo de regressão múltipla (Wilks, 1995), aplicado ao dia de treinamento. Assim, uma aproximação de ordem  $M$  para a temperatura de brilho  $H(i, p)$  do  $i$ -ésimo canal HSB no  $p$ -ésimo pixel seria uma combinação linear de radiâncias AIRS  $I(m, p)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ , de forma que:

$$H(i, p) = B(i) + X(i,1) * I(1, p) + \dots + X(i,m) * I(m, p) + \dots + X(i,M) * I(M, p) \quad (1)$$

onde as  $B(i)$  são constantes da regressão. A matriz  $H$  representa a temperatura de brilho simulada, a matriz  $I$  representa as radiâncias para os  $M$  canais AIRS escolhidos, e a matriz  $X$  representa os coeficientes da regressão avaliados para o dia de treinamento.

Considerando os  $Np$  pixels, foram selecionados canais AIRS altamente correlacionados com os do HSB. Para isso avaliou-se o coeficiente de correlação linear entre as radiâncias dos 2378 canais AIRS e cada um dos quatro canais HSB, separando-se  $N_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) canais com coeficientes de correlação  $r > 0,8$ . Foram identificados respectivamente 469, 528, 554 e 510 canais, a maioria deles situados na banda de absorção do vapor d’água centrada em  $6,3 \mu\text{m}$ .

A fim de avaliar a informação contida nos  $N_i$  canais, e em particular o nível de redundância nas informações, foi utilizada a análise fatorial em componentes principais. Com base nos  $Np$  pixels foram avaliadas quatro matrizes de correlação  $\mathbf{R}(N_i \times N_i)$  entre os canais AIRS. De acordo com o critério de Guttman-Kaiser, o qual sugere que o número de autovalores com valor  $\lambda > 1$  determina o número mínimo de fatores (Jackson, 1991), a análise fatorial aplicada às matrizes  $\mathbf{R}$  sugeriu a existência de não mais de cinco fatores predominantes nos quatro casos, acumulando mais de 98% da informação contida nos  $N_i$  canais. Este resultado sugere, também, que um número semelhante de canais AIRS possa ser suficiente para construir um modelo de emulação de canais HSB.

Por outro lado, o método variacional proposto por Schaerer e Wilheit (1979) gera funções peso do vapor d'água para os diferentes canais do sondador AQUA. As funções peso foram obtidas introduzindo perfis de referência de uma atmosfera tropical e uma perturbação de 10% da concentração inicial em cada nível (Garand et al., 2001). A análise da magnitude e a forma destas funções para os  $N_i$  canais AIRS associados ao  $i$ -ésimo HSB, permitiu identificar canais AIRS mais semelhantes ao perfil vertical de sensibilidade do HSB para vapor d'água (Souza e Ceballos, 2004a).

Uma vez identificados canais AIRS com respostas semelhantes aos do HSB, o modelo de regressão foi construído escolhendo  $M = 5$  dentre os  $N_i$  canais AIRS com correlação mais elevada com relação ao canal HSB respectivo. A Tabela 2 abaixo apresenta os canais escolhidos e os coeficientes  $B$  e  $X$  da regressão. As simulações de temperatura de brilho foram validadas com os dados observados do HSB para o período setembro-outubro de 2002, obtendo-se quatro seqüências temporais de desvios médios inferiores a 2 K para as latitudes entre 60°N e 60°S. Os desvios são ainda menores ao considerar apenas latitudes tropicais. Maiores detalhes da metodologia utilizada para selecionar canais AIRS utilizados para simular os canais do HSB podem ser encontrados em Souza e Ceballos, 2004b. A Tabela 3 ilustra os resultados das estimativas de temperatura de brilho dos canais AIRS utilizados para emular os canais 1, 2, 3 e 4 do HSB, sob diferentes condições de emissividade da superfície. Os resultados das simulações com o modelo direto RTTOV-7 mostram que sobre a região tropical os canais AIRS utilizados para emular os canais HSB 2, 3 e 4 não sofrem influência da emissividade da superfície continental (destacados em cinza). Isto se deve a dois fatores principais: a) os máximos das funções peso destes canais encontram-se na média e alta troposfera (acima de 3 km de altitude); b) a grande quantidade de vapor d'água existente nesta faixa de latitude. Consequentemente, propriedades da superfície, como a temperatura e a emissividade, não afetam a radiação no topo da atmosfera. Como os canais AIRS utilizados para simular as temperaturas de brilho do HSB 2 e 3 possuem o máximo das funções peso localizados em altos níveis da atmosfera (acima de 5 km de altitude), o mesmo comportamento é observado nas estimativas realizadas sobre regiões de latitudes maiores que 40 graus (destacados em cinza). Apenas os canais AIRS utilizados para simular o HSB-4 são afetados pelas propriedades da superfície no caso de uma atmosfera de altas latitudes. Como este canal apresenta o máximo de sua função peso em torno de 700 hPa, este comportamento está associado à distribuição espacial do vapor d'água, pois à medida que o pixel se distancia do equador a concentração de vapor d'água tende a diminuir e as propriedades da superfície passam a influenciar a radiação no topo da atmosfera. Como o HSB1 é um canal de janela atmosférica contaminada pelo vapor d'água, a influência da superfície na radiação no topo da atmosfera será ainda maior.

## **TABELA 2**

## **TABELA 3**

Observa-se ainda uma forte influência da superfície nos canais utilizados para simular o HSB-1 em ambas as atmosferas estudadas. Esse resultado era esperado uma vez que a frequência deste canal encontra-se na região de janela atmosférica contaminada pelo vapor d'água. Esses resultados estão em concordância com os encontrados por English (1999). Ele mostrou que não existe contribuição da superfície na temperatura de brilho para os canais de 183 GHz do AMSU-B em uma atmosfera de latitudes médias. Conclui-se que a regressão representa uma aproximação satisfatória para emular canais HSB sobre oceano em latitudes tropicais. Esta conclusão é também válida para os canais em 183 GHz sobre regiões continentais com elevada concentração de vapor d'água, como é o caso da América do Sul (em particular o Brasil).

## **5. METODOLOGIA DE RECUPERAÇÃO DE PERFIS**

Foi utilizado o modelo ICI para inferir perfis verticais de temperatura e umidade a partir das temperaturas de brilho do HSB simuladas para os sítios de Guajará-Mirim, Porto Velho e Ouro Preto

d'Oeste. O modelo de inversão ICI foi utilizado no modo climatológico (estático) considerando duas bases de dados iniciais de perfis: 1) TIGR (Lavanant et al., 1997 e Lavanant et al., 1999), com 1760 perfis representativos de diversas regiões do globo; 2) CLASS1, com 657 perfis atmosféricos de temperatura e umidade obtidos a partir de radiossondagens sobre o Brasil. A utilização do banco de perfis CLASS1 é justificada pelo fato de ser um banco de perfis típicos para o Brasil desenvolvido por Macedo (2003). O banco TIGR já está incluído no ICI, e o CLASS1 se encontra instalado na DSA para fins de pesquisa. Os perfis recuperados foram comparados com as radiossondagens e com os perfis ICI gerados operacionalmente na DSA (que utiliza informação de canais no infravermelho e em microondas). O ICI operacional utiliza informação ATOVS/NOAA 16 (HIRS, AMSU-A e AMSU-B).

Selecionaram-se os dias com passagens dos satélites NOAA-16 e AQUA sobre cada sítio estudado. A seguir, exigiu-se que os pixels NOAA-16 e AQUA fossem coincidentes e que estivessem sobre o local de lançamento da radiossonda em condições de céu claro. No caso dos dados AQUA foram utilizadas as temperaturas de brilho simuladas para os canais HSB centrados em 183 GHz, e as observadas pelo sensor AMSU-A. Para os pixels selecionados, as temperaturas de brilho observadas no AMSU-B e no AMSU-A do satélite NOAA-16 foram substituídas durante o processo de inversão pelas temperaturas de brilho dos sensores HSB (simuladas) e AMSU-A da plataforma AQUA. Finalmente, o ICI em modo estático foi instruído para inferir os perfis verticais de temperatura e umidade utilizando apenas as informações em microondas. No que se refere ao HSB, é importante observar que foram utilizadas somente as informações dos canais centrados em 183 GHz durante o procedimento de inversão.

## 6. RESULTADOS

As Figuras 2 (a, b, c) apresentam os perfis verticais de temperatura para os sítios de Guajará-Mirim (manhã), Porto Velho (manhã) e Ouro Preto (tarde). No primeiro sítio (Figuras 2a) os pixels selecionados correspondem ao dia 30 de setembro de 2002. Nos demais sítios (Figuras 2b e 2c) os pixels foram selecionados no dia 29 de setembro de 2002. É importante comentar que as diferenças nos horários das passagens dos satélites NOAA-16 e AQUA e nos horários das radiossondagens podem ter influenciado na qualidade dos resultados, principalmente próximo à superfície, induzindo desvios aparentes que poderiam ser confundidos com um viés do modelo de inversão (ICI). No entanto, o viés médio reduzido do ICI operacional sugere que este tipo de erro não ocorreu.

Nas Figuras 2 e 3 observa-se que os perfis de temperatura e umidade inferidos pelo ICI operacional são os melhores em todos os casos. O conjunto dos perfis obtidos sugere que o ICI no modo estático recupera satisfatoriamente perfis de temperatura, mesmo usando apenas as informações dos canais em microondas; além disso, os bancos CLASS1 e TIGR fornecem resultados similares entre si. Os perfis de umidade são ilustrados nas Figuras 3 (a, b, c) para os três sítios estudados. Assim como no caso da temperatura, os perfis de umidade inferidos pelo ICI operacional são os que apresentam melhores resultados. Nota-se que o ICI no modo estático subestima a umidade; todavia, evidencia-se que o uso do CLASS1 apresenta um melhor desempenho que o do banco TIGR, particularmente próximo à superfície.

### FIGURA 2

### FIGURA 3

As Figuras 4 permitem analisar com maiores detalhes o desempenho dos bancos TIGR e CLASS1, apresentando os perfis de viés e desvio padrão dos erros, considerando as radiossondagens como “verdade terrestre”. Em níveis acima de 950 hPa, o viés associado ao ICI operacional é inferior a 2 K, com desvio padrão inferior a 0,5 K. Entre 600 e 400 hPa, os perfis que usaram o TIGR apresentam viés de temperatura negativo de até -8 K; os que usaram o CLASS1 mostram viés negativo mais pronunciado na baixa troposfera (até -4 K, entre 1000 e 800 hPa). O desempenho do ICI com os dois bancos de perfis iniciais apresenta basicamente o mesmo perfil de desvios padrões (da ordem de 1 K).

No que se refere à umidade, o ICI operacional apresenta um viés inferior a 1g/kg entre 900 e 700 hPa. O perfil de viés é negativo para os dois bancos de perfis, sendo significativamente menor para o CLASS1. É relevante observar que os perfis de desvio padrão do ICI operacional e do que utiliza o banco CLASS1 são muito semelhantes, enquanto que o TIGR apresenta o maior desvio padrão na baixa troposfera (1 g/kg, entre 900 a 700 hPa). É importante notar que a utilização do modelo de inversão apenas com informações dos sensores de microondas mostrou resultados satisfatórios, particularmente no que se refere à umidade, que devem ser considerados como preliminares. No entanto, a utilização desta metodologia com a inclusão de informações de canais do infravermelho, aumentaria a resolução vertical do ICI (maior número de canais disponíveis) contribuindo para o aprimoramento da qualidade dos perfis atmosféricos.

## **FIGURA 4**

### **7. CONCLUSÕES**

No caso estudado, o ICI operacional recuperou satisfatoriamente a estrutura vertical da atmosfera em termos de temperatura e umidade, apresentando maiores diferenças na baixa troposfera (pressão maior do que 850 hPa). Neste caso, os desvios padrões observados foram inferiores a 1,5K para temperatura e 1g/kg para a umidade. Usando apenas as informações dos canais em microondas, os perfis de temperatura inferidos utilizando os bancos CLASS1 e TIGR mostraram resultados compatíveis com o perfil da radiossonda. Observou-se viés negativo pronunciado na média troposfera de aproximadamente 8K (TIGR) ou na baixa troposfera da ordem de 4K (CLASS1). Para ambos os bancos de perfis iniciais utilizados os desvios padrões para temperatura foram inferiores a 2,5K.

No caso do perfil de umidade, a utilização de um banco regional como o CLASS1 apresentou resultados mais acurados do que o uso do banco TIGR (viés de até 5g/kg). Notadamente, o viés e o desvio padrão foram da mesma ordem que os evidenciados pelo ICI operacional, inferiores a 2g/kg e 1g/kg, respectivamente. Estes resultados sugerem que o modo estático do ICI associado com bancos de radiossondagens regionais pode fornecer resultados com qualidade semelhante ao modo operacional. Estas conclusões concordam com as apresentadas por Macedo (2003).

Dado a possibilidade de simular o HSB e dado que os canais HIRS estão incluídos no espectro do sensor AIRS/AQUA, os resultados sugerem que as informações do sistema de sondagem AQUA (AIRS/AMSU-A/HSB simulado) poderiam alimentar a operação do ICI no modo estático, substituindo o sistema ATOVS (AMSU-A, AMSU-B e HIRS) numa eventual falha do satélite NOAA, fornecendo resultados de qualidade semelhante sem mudanças significativas da versão original do ICI para dados ATOVS/NOAA, com a mesma resolução espacial e temporal. Além disso, podem-se esperar resultados ainda melhores com o ICI processando dados no modo dinâmico. Outra sugestão seria a inclusão de canais do espectro infravermelho no procedimento de inferência de perfis atmosféricos, o que aumentaria a resolução vertical do modelo e, conseqüentemente, contribuiria para produzir resultados ainda melhores. Todavia outras análises devem ser realizadas com um maior número de sondagens sobre diferentes regiões do País.

### **8. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelos auxílios financeiros recebidos. Também à Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (DSA/CPTEC) e o Laboratório de Espectroscopia Atmosférica da Universidade de Maryland (ASL/UMBC), pelo apoio à realização deste trabalho.

## 9. REFERÊNCIAS

AUMANN, H. H.; CHAHINE, M. T.; GAUTIER, C.; GOLDBERG, M. D.; KALNAY, E.; MCMILLIN, L. M.; REVERCOMB, H.; ROSENKRANZ, P. W.; SMITH, W. L.; STAELIN, D. H.; STROW, L. L.; SUSSKIND, J. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products and processing systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 253-264, 2003.

CHAHINE, M. T.; AUMANN, H. H.; GOLDBERG, M. D.; MCMILLIN, L. M.; ROSENKRANZ, P. W.; STAELIN, D. H.; STROW, L. L.; SUSSKIND, J. **AIRS Algorithm Theoretical Basis Document – Microwave Instruments**, Level 1b, Part 3, JPL D-17005, Version 2.1, 2000.

ENGLISH, S. J.; JONES, D. C.; DIBBEN, P. C.; RENSHAW, R. J.; EYRE, J. R. The impact of cloud and precipitation on ATOVS soundings. In: International TOVS Study Conference, 10. (ITSC), 27 January – 02 February 1999, Bolder, Colorado USA. **Proceedings of the 10<sup>th</sup> International TOVS Study Conference**. Bolder: ITSC, 1999.

GARAND, L.; TURNER, D. S.; LAROCQUE, M.; BATES, J.; BOUKABARA, S.; BRUNEL, P.; CHEVALIER, F.; DEBLONDE, G.; ENGELEN, R.; HOLLINGSHEAD, M.; JACKSON, D.; JEDLOVEC, G.; JOINER, J.; KLEESPIES, T.; MCKAGUE, D. S.; MCMILLIN, L.; MONCET, J.-L.; PARDO, J. R.; RAYER, P. J.; SALATHE, E.; SAUNDERS, R.; SCOTT, N. A.; VAN DELST, P.; WOLF, H. Radiance and Jacobian intercomparison of radiative transfer models applied to HIRS and AMSU channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D20, p. 24017-24031, 2001.

JACKSON, J. E. **A User's Guide to Principal Components**. New York: Wiley, 569p. 1991.

LAMBRIGTSEN, B. H.; CALHEIROS, R. V. The humidity sounder for Brazil - An international partnership. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 352-361, 2003.

LAVANANT, L.; BRUNEL, P.; ROCHARD, G.; LABROT, T.; POCHIC, D. Current Status for the ICI Retrieval Scheme. In: International TOVS Study Conference, 9. (ITSC), 20-26 February 1997, Igl, Austria. **Proceedings of the Ninth International TOVS Study Conference**, Igl: ITSC, 1997.

LAVANANT, L.; BRUNEL, P.; ROCHARD, G.; LABROT, T. NOAA15 Soundings profiles retrieved with the ICI scheme. In: International TOVS Study Conference, 10. (ITSC), 27 January - 02 February 1999, Bolder, Colorado. **Proceedings of the Tenth International TOVS Study Conference**, Boulder: ITSC, 1999.

LONGO, M.; ALBRECHT, R. I.; MACHADO, L. A. T.; FISCH, G.; DIAS, M. A. F. S. Controle de Qualidade dos Dados de Radiossondagem da Campanha WET-AMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 2, p. 243-253, 2002.

MACEDO, S. R. **Um estudo das sondagens do ICI (Inversion Coupled Imager) mediante o processamento de perfis atmosféricos brasileiros**. 2003. 109 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

PARKINSON, C. L. Aqua: an Earth-Observing satellite mission to examine water and other climate variables. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 173-183, 2003.

RODGERS, C. D. Information content and optimization of high spectral resolution remote measurements. **Advanced Space Research**, v. 21, n. 3, p. 361-367, 1998.

SAUNDERS, R.; MATRICARDI, M.; BRUNEL, P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance. **Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society**, v.125, n.5, p. 1407-1425, 1999.

SCHAERER, G.; WILHEIT, T. T. A passive microwave technique for profiling of atmospheric water vapor. **Radio Science**, v. 14, n. 3, p. 371-375, 1979.

STROW, L. L.; HANNON, S. E.; SOUZA-MACHADO, S.; MOTTELER, H. Validation of the AIRS Radiative Transfer Algorithm Using ECMWF Data fields. In: The European Symposium on Aerospace Remote, (SPIE/EUROPTO), 22-25 September 2002. Crete, Greece. **Proceedings of the European Symposium on Aerospace Remote**, Crete: SPIE/EUROPTO, 2002.

SOUZA, R. A. F.; CEBALLOS, J. C. Sondador de umidade brasileiro (HSB-AQUA): 1. Substituição potencial por canais do sensor AIRS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza, CE. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004a. CD-ROM.

SOUZA, R. A. F.; CEBALLOS, J. C. Sondador de umidade brasileiro (HSB-AQUA): 2. Simulação da temperatura de brilho nos canais HSB em 183 GHz a partir de informações do sensor AIRS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza, CE. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004b. CD-ROM.

WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. San Diego, CA: Academic Press, 467 p. 1995.

| <b>Sistema de Sondagem dos Satélites</b>  |   |
|---|---|
| <b>NOAA-16</b>  | <b>AQUA</b>   |
| <b>HIRS</b><br>“High Resolution Infrared Radiation Sounder”<br>20 canais no infravermelho<br>Resolução horizontal de 18 km no nadir | <b>AIRS</b><br>“Atmospheric InfraRed Sounder”<br>2378 canais no infravermelho<br>Resolução horizontal de 15 km no nadir |
| <b>AMSU-A</b><br>“Advanced Microwave Sound Unit-A”<br>15 canais em microondas<br>Resolução horizontal de 45 km no nadir             | <b>AMSU-A</b><br>“Advanced Microwave Sound Unit-A”<br>15 canais em microondas<br>Resolução horizontal de 45 km no nadir |
| <b>AMSU-B</b><br>“Advanced Microwave Sound Unit-B”<br>5 canais em microondas<br>Resolução horizontal de 17 km no nadir              | <b>HSB</b><br>“Humidity Sounder for Brazil”<br>4 canais em microondas<br>Resolução horizontal de 15 km no nadir         |

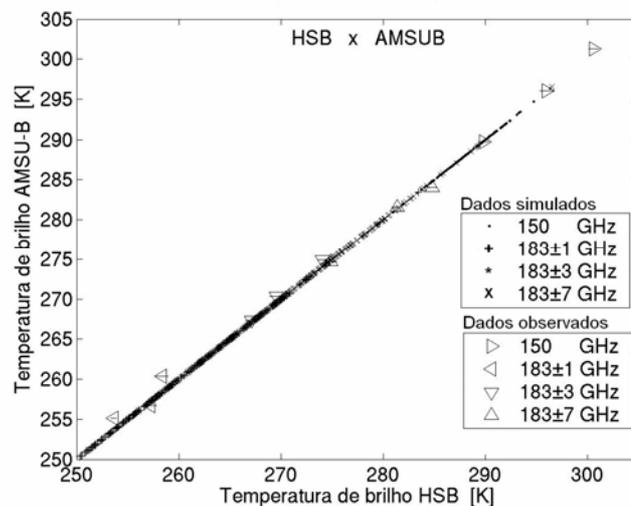
Tabela 1. Sensores que compõem os sistemas de sondagem dos satélites NOAA-16 e AQUA.

| <b>HSB – 2</b>                |               | <b>HSB – 3</b>                |               | <b>HSB – 4</b>                |               |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| Coef. de regressão: 224,73 K  |               | Coef. de regressão: 230,83 K  |               | Coef. de regressão: 229,05 K  |               |
| Canais AIRS                   | Coefficientes | Canais AIRS                   | Coefficientes | Canais AIRS                   | Coefficientes |
| 1587 (1404 $\text{cm}^{-1}$ ) | -11,96        | 1520 (1367 $\text{cm}^{-1}$ ) | 1,07          | 1438 (1324 $\text{cm}^{-1}$ ) | -1,55         |
| 1589 (1405 $\text{cm}^{-1}$ ) | -5,11         | 1524 (1369 $\text{cm}^{-1}$ ) | -1,45         | 1441 (1326 $\text{cm}^{-1}$ ) | 2,78          |
| 1600 (1411 $\text{cm}^{-1}$ ) | 5,10          | 1541 (1378 $\text{cm}^{-1}$ ) | 0,03          | 1445 (1328 $\text{cm}^{-1}$ ) | -0,18         |
| 1620 (1423 $\text{cm}^{-1}$ ) | 10,58         | 1596 (1409 $\text{cm}^{-1}$ ) | 1,61          | 1446 (1329 $\text{cm}^{-1}$ ) | -1,75         |
| 1638 (1433 $\text{cm}^{-1}$ ) | 5,29          | 1599 (1410 $\text{cm}^{-1}$ ) | 1,18          | 1448 (1330 $\text{cm}^{-1}$ ) | 2,51          |

Tabela 2. Coeficientes de regressão utilizados na simulação de temperatura de brilho para os canais HSB.

|                                      |                               | Trópicos |        |        | Altas Latitudes |        |        |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| Emissividade                         |                               | 0,3      | 0,6    | 1,0    | 0,3             | 0,6    | 1,0    |
| Simulando<br>HSB1 com<br>canais AIRS | 2202 (2505 cm <sup>-1</sup> ) | 278,05   | 289,55 | 299,90 | 241,64          | 249,58 | 256,84 |
|                                      | 2203 (2506 cm <sup>-1</sup> ) | 277,84   | 289,52 | 299,98 | 241,56          | 249,56 | 256,85 |
|                                      | 2204 (2507 cm <sup>-1</sup> ) | 277,79   | 289,52 | 300,00 | 241,51          | 249,54 | 256,85 |
|                                      | 2205 (2508 cm <sup>-1</sup> ) | 277,78   | 289,52 | 300,01 | 241,47          | 249,53 | 256,85 |
|                                      | 2216 (2520 cm <sup>-1</sup> ) | 277,66   | 289,61 | 300,19 | 240,94          | 249,40 | 256,95 |
|                                      |                               | Trópicos |        |        | Altas Latitudes |        |        |
| Emissividade                         |                               | 0,3      | 0,6    | 1,0    | 0,3             | 0,6    | 1,0    |
| Simulando<br>HSB2 com<br>canais AIRS | 1587 (1404 cm <sup>-1</sup> ) | 255,88   | 255,88 | 255,88 | 242,20          | 242,20 | 242,20 |
|                                      | 1589 (1405 cm <sup>-1</sup> ) | 249,14   | 249,14 | 249,14 | 234,89          | 234,89 | 234,89 |
|                                      | 1600 (1411 cm <sup>-1</sup> ) | 256,33   | 256,33 | 256,33 | 243,31          | 243,31 | 243,31 |
|                                      | 1620 (1423 cm <sup>-1</sup> ) | 254,18   | 254,18 | 254,18 | 239,58          | 239,58 | 239,58 |
|                                      | 1638 (1433 cm <sup>-1</sup> ) | 253,05   | 253,05 | 253,05 | 239,40          | 239,40 | 239,40 |
|                                      |                               | Trópicos |        |        | Altas Latitudes |        |        |
| Emissividade                         |                               | 0,3      | 0,6    | 1,0    | 0,3             | 0,6    | 1,0    |
| Simulando<br>HSB3 com<br>canais AIRS | 1520 (1367 cm <sup>-1</sup> ) | 266,56   | 266,56 | 266,56 | 252,43          | 252,41 | 252,38 |
|                                      | 1524 (1369 cm <sup>-1</sup> ) | 264,41   | 264,41 | 264,41 | 251,13          | 251,12 | 251,09 |
|                                      | 1541 (1378 cm <sup>-1</sup> ) | 263,81   | 263,81 | 263,81 | 250,64          | 250,62 | 250,60 |
|                                      | 1596 (1409 cm <sup>-1</sup> ) | 266,30   | 266,30 | 266,30 | 252,46          | 252,44 | 252,41 |
|                                      | 1599 (1410 cm <sup>-1</sup> ) | 264,07   | 264,07 | 264,07 | 250,59          | 250,58 | 250,56 |
|                                      |                               | Trópicos |        |        | Altas Latitudes |        |        |
| Emissividade                         |                               | 0,3      | 0,6    | 1,0    | 0,3             | 0,6    | 1,0    |
| Simulando<br>HSB4 com<br>canais AIRS | 1438 (1324 cm <sup>-1</sup> ) | 274,95   | 274,95 | 274,95 | 250,84          | 252,86 | 255,44 |
|                                      | 1441 (1326 cm <sup>-1</sup> ) | 276,66   | 276,66 | 276,66 | 249,84          | 252,43 | 255,66 |
|                                      | 1445 (1328 cm <sup>-1</sup> ) | 275,42   | 275,42 | 275,42 | 249,68          | 251,86 | 254,62 |
|                                      | 1446 (1329 cm <sup>-1</sup> ) | 276,20   | 276,20 | 276,20 | 250,46          | 252,71 | 255,54 |
|                                      | 1448 (1330 cm <sup>-1</sup> ) | 271,76   | 271,76 | 271,76 | 252,49          | 253,42 | 254,63 |

Tabela 3. Comportamento da temperatura de brilho dos canais AIRS utilizados para simular os canais HSB para diferentes valores de emissividade da superfície continental.



(a)

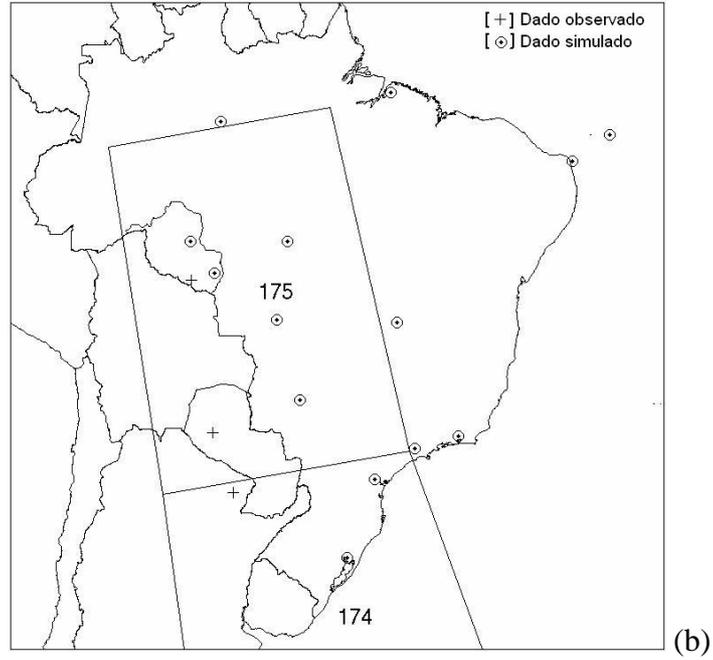
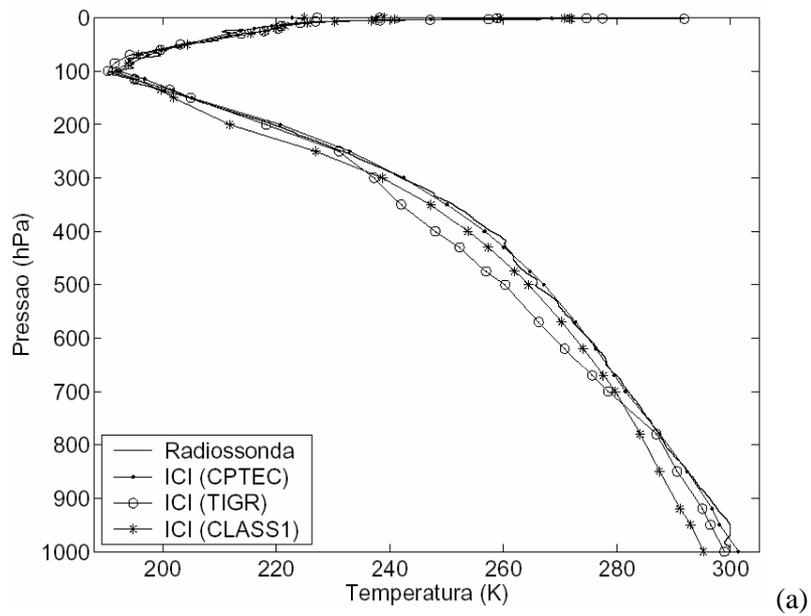


Figura 1: a) Comparação entre as temperaturas de brilho dos canais dos sensores AMSU-B e HSB; b) localização geográfica dos pixels utilizados nas análises para o dia 29 de setembro de 2002 (dado observado) e dos sítios utilizados nas simulações com o RTTOV (dado simulado).



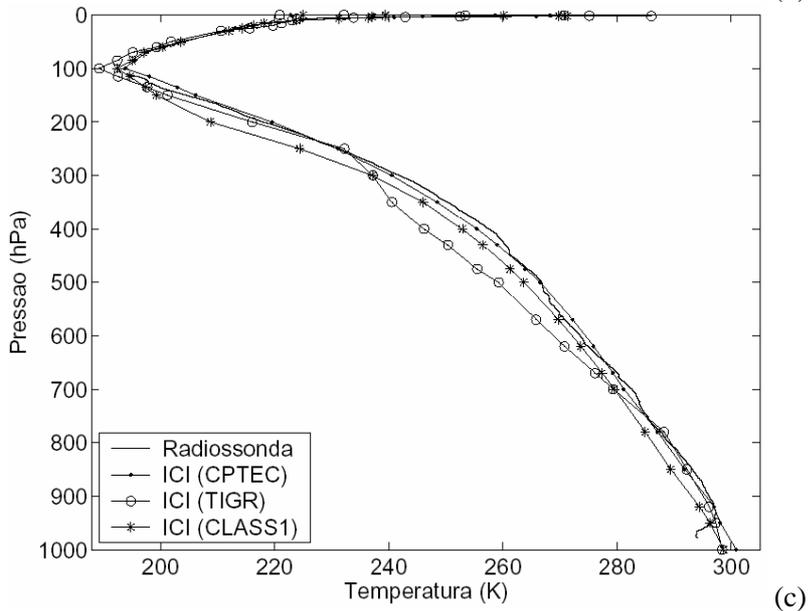
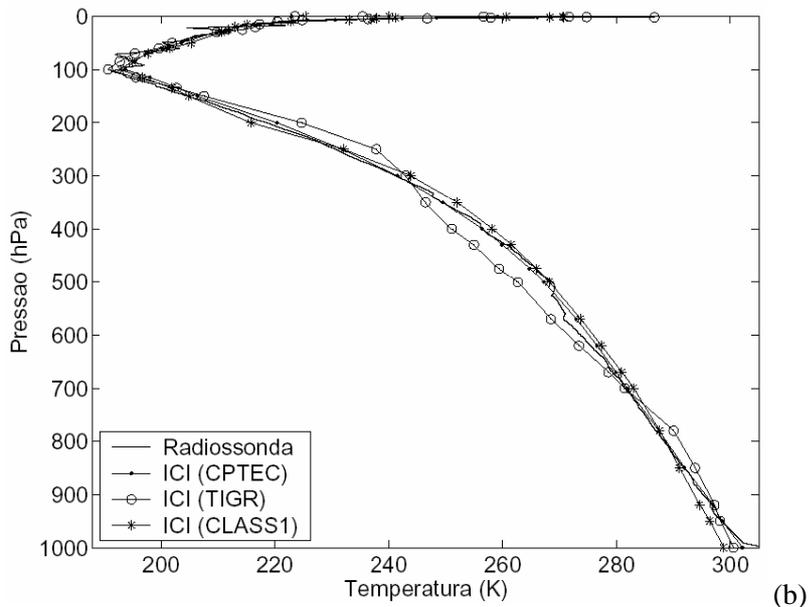
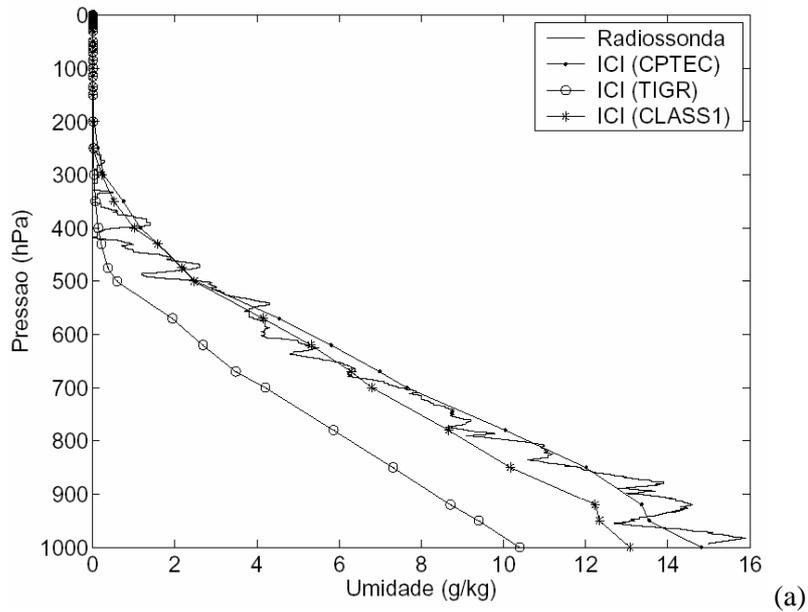


Figura 2: Perfis verticais de temperatura para os sítios: (a) Guajará-Mirim, (b) Porto velho e (c) Ouro Preto d'Oeste.



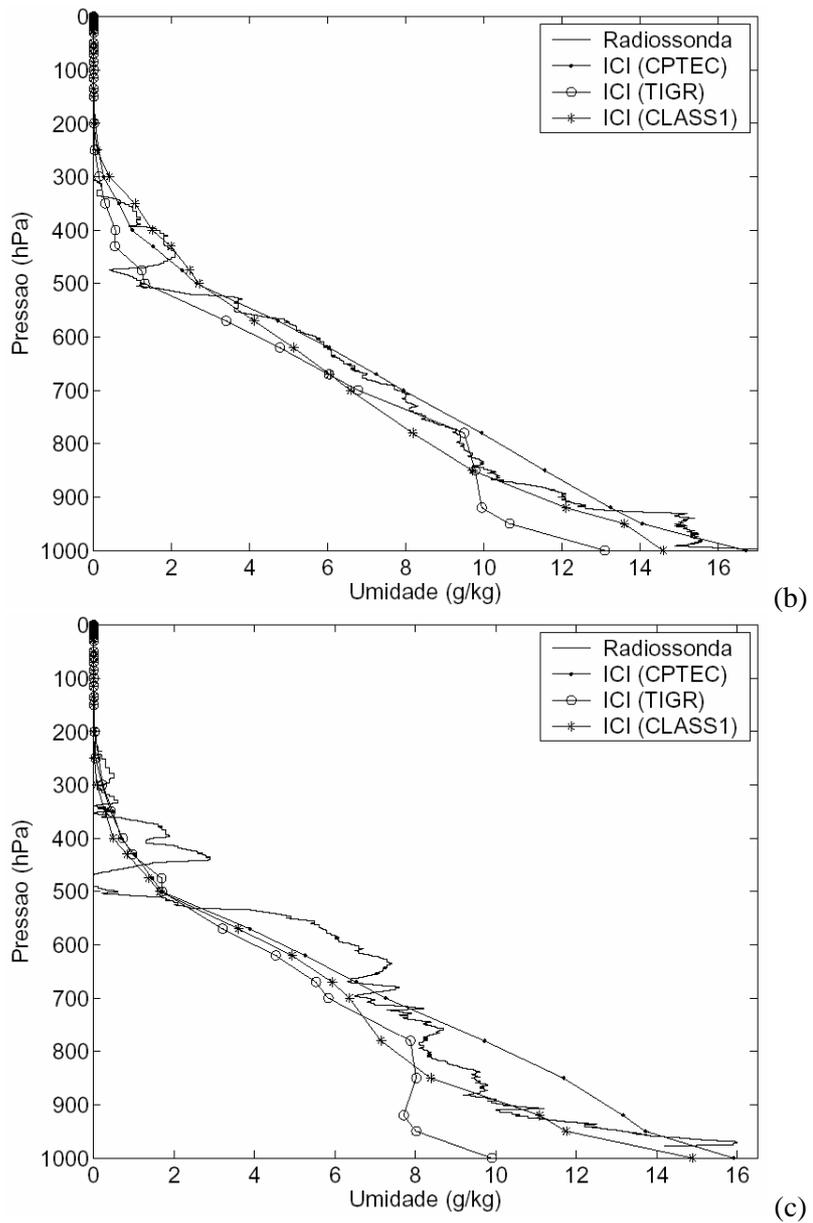


Figura 3: Perfis verticais de umidade para os sítios: (a) Guajará-Mirim, (b) Porto velho e (c) Ouro Preto d'Oeste.

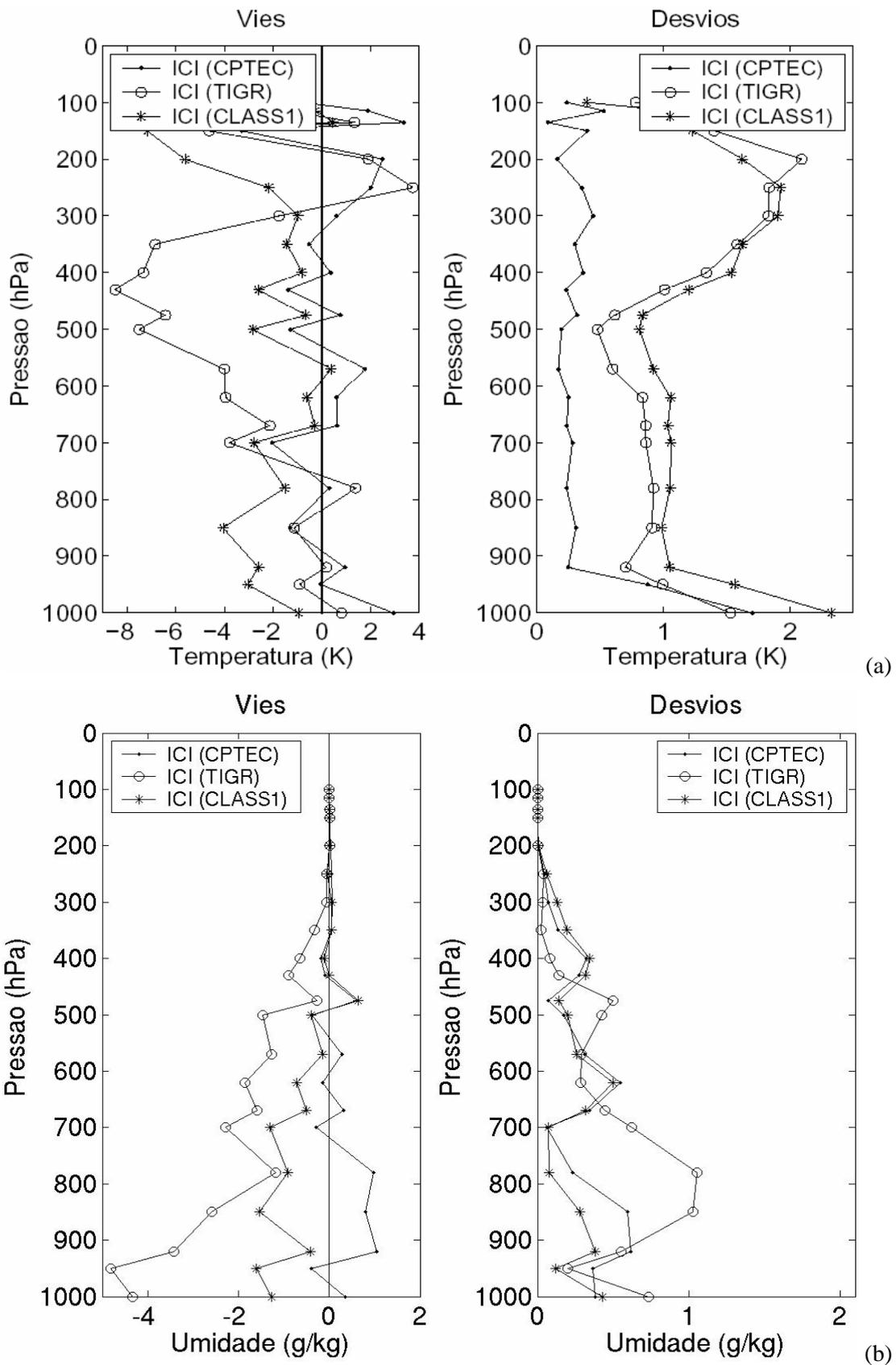


Figura 4: Perfis de viés e desvio padrão estimados a partir dos perfis recuperados: a) temperatura; b) razão de mistura.