

CAPÍTULO 23

INFERÊNCIA DE PERFIS ATMOSFÉRICOS

Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPaciais

23.1 Introdução

A proposta deste capítulo é apresentar a aplicação do sensor MODIS na inferência de perfis atmosféricos. Apesar deste sensor não ser essencialmente um sondador atmosférico, ele possui alguns canais espectrais que também são encontrados em sondadores atmosféricos que operam a bordo dos satélites da série NOAA. Desta forma, é possível utilizar as informações destes canais para inferir perfis verticais de temperatura e de umidade para pixel de céu claro, assim como fazer estimativas do conteúdo total de água precipitável na coluna atmosférica e total de ozônio. Estes parâmetros podem ser utilizados como informação auxiliar para corrigir efeitos atmosféricos na geração de outros produtos MODIS, tais como a temperatura da superfície do mar, a temperatura da superfície continental, as propriedades de aerossóis, a radiação FPAR, entre outros.

Por outro lado, o desenvolvimento de modelos de clima e de tempo requer monitoramento preciso dos perfis atmosféricos de temperatura e de umidade, assim como da concentração de gases minoritários e aerossóis. Até pouco tempo atrás, o monitoramento contínuo das mudanças na concentração destes constituintes atmosféricos em escala global era precário. Com o lançamento do sensor MODIS tem-se uma nova oportunidade para aprimorar estudos sobre mudanças climáticas. Além disso, os perfis MODIS (produto MOD07) podem ser utilizados em conjunto com outras informações de satélites meteorológicos para aprimorar os resultados de modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo), principalmente no Hemisfério Sul onde existe um baixo número de dados convencionais (radiossondagens).

Este capítulo apresentará um breve histórico sobre sondagem atmosférica, as características do modelo matemático utilizado operacionalmente no CPTEC e na NASA para inferir perfis atmosféricos, quais os canais MODIS utilizados para fazer sondagem atmosférica e alguns exemplos do produto MOD07.

23.2 Sondagem atmosférica: histórico

Avanços tecnológicos no início dos anos 40, durante a Segunda Guerra Mundial, conduziram às primeiras imagens de nuvens obtidas do espaço. No entanto, a primeira proposta para explorar a atmosfera terrestre inferindo sua estrutura vertical de temperatura e

umidade teve início na década seguinte. A física básica sobre sondagens remotas da atmosfera para inferência de perfis verticais de temperatura a partir de sensores de radiação a bordo de satélites foi proposta inicialmente por King (1956). O autor sugeriu que estes perfis poderiam ser inferidos a partir da intensidade de radiação monocromática em um único canal espectral, proveniente de várias direções.

Posteriormente, Kaplan (1959) avançou nos conceitos sobre as técnicas de sondagem remota da atmosfera sugerindo que fossem utilizados diversos comprimentos de onda associados à banda de absorção do CO_2 em $15\ \mu\text{m}$, porém a análise foi realizada com a radiação emergente de apenas uma direção fixa. Como a transmissividade atmosférica é função do comprimento de onda da radiação, as medidas referentes ao centro da banda (maior absorção) trazem informações predominantes das camadas superiores da atmosfera e as medidas referentes à suas bordas contêm informações com maior contribuição das camadas próximas à superfície.

Na década seguinte, com o desenvolvimento tecnológico de projetos espaciais associados aos avanços nos recursos computacionais, houve um maior interesse na utilização de novas técnicas de sondagem remota da atmosfera. Wark e Fleming (1966) apresentaram um esquema de tratamento estatístico com dados de radiossondagem para aprimorar os perfis obtidos por satélite. Chahine (1970) propôs um método iterativo para inversão da Equação de Transferência Radiativa (ETR), visando estimar os perfis verticais de temperatura na atmosfera utilizando a banda de absorção do CO_2 . Num outro estudo, Smith et al. (1970) desenvolveram um método implícito para resolução desse problema. Os resultados obtidos a partir destas técnicas eram expressivos quando aplicados a situações de céu claro. Para condições de céu nublado, os dados de satélite contaminados pela presença de nuvens deixavam a desejar, devido principalmente, à baixa resolução dos sensores da época. Assim, a presença de nuvens nos campos de visada dos sensores representavam o maior desafio. A introdução de uma nova geração de radiômetros em microondas foi o próximo passo no sentido de solucionar esse problema. Como as informações em microondas não são afetadas pela maioria dos tipos de nuvem, esses instrumentos apresentavam uma vantagem em relação aos instrumentos que operavam no infravermelho e no visível. Isso encorajou o lançamento de sensores passivos em microondas a bordo de plataformas espaciais.

Os primeiros instrumentos que operavam na faixa espectral das microondas, a bordo de plataformas espaciais no início dos anos setenta, eram usados para fornecer informações sobre a superfície terrestre e parâmetros atmosféricos. Os dados desses sensores experimentais foram utilizados para impulsionar o conhecimento sobre os instrumentos e aperfeiçoar o uso das microondas na observação da Terra a partir do espaço (Njoku, 1982).

Ainda em 1978, o radiômetro HIRS, com 19 canais entre $3,7\ \mu\text{m}$ e $15\ \mu\text{m}$ e resolução espacial de aproximadamente 17 km, combinado com o MSU, com 4 canais próximos da

banda de absorção do oxigênio (57 GHz), resultaram no primeiro sistema de sondagem operacional, o TOVS (*TIROS Operational Vertical Sounder*). Sendo o ITPP (*International TOVS Processing Package*) o pacote computacional que permite inferir perfis atmosféricos a partir das informações desse novo sistema de sondagem. Esse pacote foi desenvolvido pela CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*) da Universidade de Wisconsin em Madison, nos Estados Unidos da América. McMillin et al. (1979) e Smith et al. (1979) estão entre os que publicaram os primeiros trabalhos realizados utilizando informações do sistema TOVS, onde foram feitas comparações entre sondagens remotas utilizando os sensores HIRS e MSU e dados de radiossondagens. Os resultados obtidos indicaram que para situações de céu claro os modelos representavam razoavelmente a atmosfera; porém, para situações de nebulosidade os erros encontrados foram maiores, principalmente nas camadas próximas à superfície terrestre e na tropopausa. Smith (1991) argumentou que os resultados encontrados para situações com nebulosidade foram decorrentes do baixo número de canais em microondas e da baixa resolução espacial desses radiômetros (45 km) quando comparados aos do HIRS (17 km).

Outra abordagem no contexto da sondagem remota da atmosfera foi proposta por Chédin et al. (1985). Seu modelo, denominado 3I (*Improved Initialization Inversion*), utiliza um algoritmo híbrido para recuperar perfis meteorológicos a partir de dados de satélites da série TIROS/NOAA. Para inicializar o processo de inversão, o método utiliza um banco de perfis atmosféricos gerado a partir de dados de radiossondagens pelo LMD (*Laboratoire de Meteorologie Dynamique*) do CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) e o TIGR (*TOVS Initial Guess Retrieval*). Basicamente, o 3I compara as radiâncias observadas com as calculadas a partir dos perfis do banco TIGR. Para a solução final, o método busca um perfil atmosférico cujo espectro de radiâncias apresente a maior semelhança possível com o espectro observado pelo TOVS.

Baseado na metodologia proposta pelo método 3I, Lavanant et al. (1997; 1999) desenvolveram no CMS (*Centre de Météorologie Spatiale*) em Lannion, França, o ICI (*Inversion Coupled with Imager*), um software com características operacionais para a recuperação de perfis atmosféricos de sondagens TOVS e ATOVS (NOAA). O ICI apresenta algumas vantagens em relação ao 3I: possui mais opções quando se trata da base de dados iniciais, dispondo de uma sub-base de dados com perfis de massas de ar e possui acoplado um modelo direto de transferência radiativa, o RTTOV (*fast Radiative Transfer model for ATOVS*), capaz de processar informações em tempo real (Eyre, 1991). Os três possíveis bancos de dados a serem utilizados na seleção do melhor perfil inicial são: um banco para o processamento em tempo real composto de análises de um modelo de PNT para a época da observação, arquivos de PNT de dez dias anteriores à observação e dois bancos de dados fixos, com climatologias de perfis de radiossondagens.

Apesar da grande maioria dos sistemas de inversão utilizar informações de sondadores que operam em satélites de órbita polar, alguns esforços foram concentrados no sentido de se recuperar perfis atmosféricos a partir de informações do satélite estacionário GOES. O sistema VISSR (*Visible and Infrared Spin Scan Radiometer*) tem sido utilizado operacionalmente desde 1987 para produzir perfis verticais de temperatura e umidade. Esse sistema é composto por 12 canais espectrais. O algoritmo de inversão é similar ao ITPP/TOVS e está descrito em Hayden et al. (1988). Com o lançamento do satélite GOES-8 houve um aumento no número de canais disponíveis para realizar sondagens (de 12 para 18) e uma conseqüente melhora na qualidade dos perfis atmosféricos recuperados pelo novo sistema GOES (Menzel et al., 1998).

É importante notar que nas décadas de 1980 e 1990 observou-se um acentuado aumento no uso de produtos em microondas pela comunidade científica em todo o mundo, em particular, por organizações oceanográficas e meteorológicas. Isso se deve ao fato de que informações coletadas por sensores que operam nesse comprimento de onda não são afetadas pela maioria dos tipos de nuvem, permitindo efetuar sondagens atmosféricas sob condições de céu nublado ou parcialmente nublado.

Devido à evolução contínua dos radiômetros em microondas a bordo de satélites e à qualidade de seus produtos, a NASA lançou em novembro de 1997 o satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Esse satélite foi desenvolvido com o objetivo de estudar a precipitação e as trocas de energia entre os trópicos e subtropicais (Kummerow et al., 1998). O TRMM é composto de cinco sensores: o TMI (*TRMM Microwave Imager*), o PR (*Precipitation Radar*), o VIRS (*Visible and InfraRed Scanner*), o CERES (*Clouds and Earth's Radiant Energy System*) e o LIS (*Lightning Imaging System*). Este satélite transporta sensores ativos (PR) e passivos (TMI) na faixa das microondas e sensores na região do visível e infravermelho próximo (VIRS). Estes instrumentos auxiliam no estudo do comportamento das chuvas tropicais tanto sobre o continente como sobre o oceano (Simpson et al., 1988), a partir de técnicas que combinam informações em microondas e no infravermelho. Até então, canais de baixa frequência em microondas (em torno de 10 GHz) estavam disponíveis apenas no primeiro radiômetro em microondas, o SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*), lançado no Nimbus G em 1978.

Um acontecimento de importância particular para a NOAA foi o lançamento, em maio de 1998, do satélite NOAA-15 contendo o sensor AMSU, com vinte canais divididos em dois módulos, AMSU-A e AMSU-B. O módulo AMSU-A consiste de doze canais na região espectral de 50 - 60 GHz (banda do oxigênio) para fornecer informação sobre perfis de temperatura desde a superfície até 1 mb. Além disso, inclui os canais de 31,4 GHz e 89 GHz para monitorar precipitação e parâmetros de superfície, e o canal de 23,8 GHz utilizado para inferir o total de água precipitável sobre oceanos. O módulo AMSU-B possui quatro canais

próximos de 183,31 GHz (banda de absorção do vapor d'água) utilizados na recuperação de perfis de umidade. Conjuntamente com o sensor HIRS, esses instrumentos constituem o sistema ATOVS que opera a bordo dos satélites NOAA-15, 16 e 17 e foram inicialmente projetados para aperfeiçoar as sondagens de temperatura realizadas com os quatro canais do MSU (*Microwave Sounding Unit*). Os resultados obtidos com esse novo sistema têm mostrado uma melhora significativa na qualidade dos perfis verticais de temperatura e de umidade, principalmente sob condições de nebulosidade, melhorando o desempenho dos dados de satélites em modelos de PNT (English et al., 2000).

Se o AMSU aperfeiçoa o MSU, para aprimorar o HIRS esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sondadores com alta resolução espectral, o AIRS. O AIRS é o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com 2378 canais espectrais e representa o avanço mais importante na tecnologia de sensoriamento remoto por satélites ambientais (Aumann e Pagano, 1994). Ressalta-se ainda o desenvolvimento do sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) pela EUMETSAT (*European Organisation for the Exploration of Meteorological Satellites*) em cooperação com o CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*), a ser lançado por volta de 2006 a bordo do satélite METOP. Esse instrumento contará com 8461 canais espectrais (645 a 2760 cm^{-1}) e representará a nova geração dos sondadores de alta resolução espectral no infravermelho (Lerner et al., 2002).

Com o lançamento da plataforma AQUA no dia 4 de maio de 2002 tem-se uma nova geração de sensores para obtenção de sondagens atmosféricas sob diferentes condições de nebulosidade. Dos instrumentos que compõem o conjunto AQUA, três deles juntos formam o mais avançado sistema de sondagem lançado ao espaço: o AIRS, o AMSU-A e o HSB. Eles representam uma versão sofisticada do sistema ATOVS, complementado com o sensor MODIS no mesmo satélite, por ele mesmo, uma versão sofisticada do AVHRR. O MODIS encontra-se atualmente em operação a bordo dos satélites do programa de observação da Terra: satélites TERRA e AQUA. Esses sensores foram projetados para satisfazer as exigências de previsão de tempo operacionais da NOAA e os objetivos de pesquisa sobre mudança globais da NASA (Aumann et al., 2003).

23.3 Perfis atmosféricos utilizando o sensor MODIS

Uma das versões do algoritmo que utiliza informações MODIS para fazer a inferência de perfis atmosféricos é híbrida, isto é, um modelo de regressão estatística acoplado a um modelo físico, que se baseia na solução da ETR, ainda em fase de desenvolvimento. A versão operacional utiliza apenas a regressão estatística e encontra-se instalada na DSA/CPTEC (<http://satellite.cptec.inpe.br>) e no GDAAC (<http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS>). Os perfis são

inferidos a partir de radiâncias para céu claro para cada conjunto de 5 por 5 pixels do MODIS (aproximadamente 5 km de resolução).

Uma clara vantagem de inferir perfis atmosféricos com o MODIS é a possibilidade de combinar informações de canais espectrais localizados na região do visível e do infravermelho que possuem alta resolução horizontal, de 1 km no nadir, comparada com outros sondadores em órbita com resolução superior a 10 km. Esta diferença pode ser facilmente notada na Fig. 23.1.

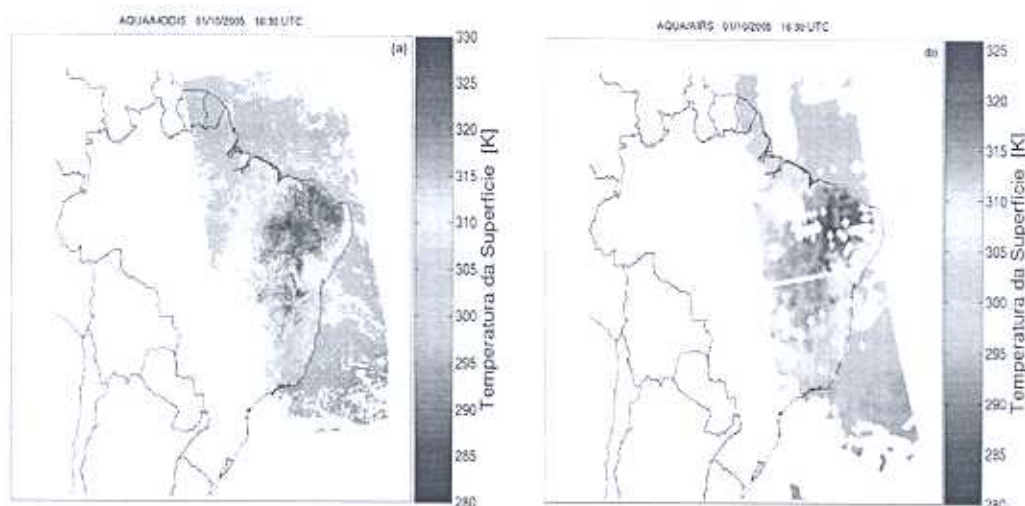


Fig. 23.1 Campos horizontais de temperatura da superfície obtidos a partir de informações dos sensores MODIS (a) e AIRS/AMSU (b) que operam a bordo do satélite AQUA, para o dia 01 de outubro de 2005, às 16:30 UTC.

As Fig. 23.1a e Fig. 23.1b ilustram campos de temperatura da superfície obtidos a partir de informações dos sensores MODIS, com resolução horizontal de 5 km, e AIRS/AMSU, com resolução horizontal de 45 km, respectivamente. Consequentemente, a maior vantagem dos perfis MODIS (produto MOD07) encontra-se na boa definição de gradientes horizontais. Por outro lado, a resolução vertical deixa a desejar quando comparada com as dos sensores hiperspectrais (com centenas de canais espectrais).

A Fig. 23.2 apresenta um exemplo de perfil vertical de temperatura atmosférica encontrado no Brasil (a), obtido a partir de informações dos sensores MODIS e AIRS, e o campo horizontal da diferença entre as temperatura (b) inferidas pelo MODIS e pelo AIRS no nível de 500 hPa. Com o maior número de canais disponíveis nos sondadores hiperspectrais é possível fazer a inferência de perfis atmosféricos além da troposfera. Todavia, os resultados encontrados na troposfera para os diferentes sensores são semelhantes. Sendo assim, outra vantagem dos dados do MODIS é a possibilidade de se utilizar as informações em diferentes

níveis de pressão para inferir a distribuição de variáveis integradas verticalmente na coluna atmosférica.

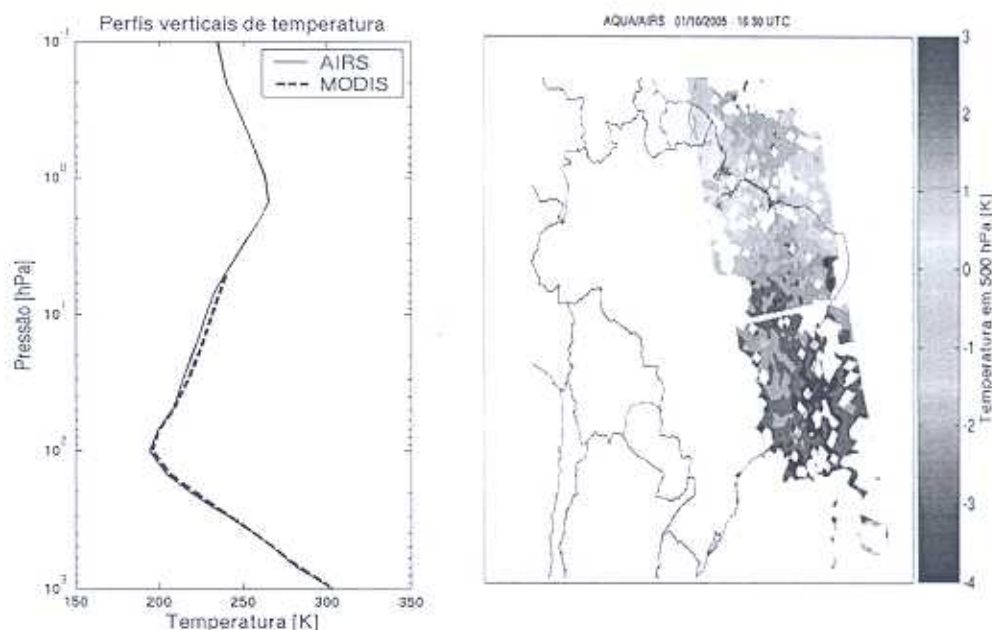


Fig. 23.2 (a) Perfis verticais de temperatura atmosférica obtidos a partir de informações do MODIS e do AIRS, para um único ponto sobre o Nordeste do Brasil, e (b) o campo horizontal da diferença entre as temperatura inferidas pelo MODIS e pelo AIRS no nível de 500 hPa, para o dia 01 de outubro de 2005, as 16:30 UTC.

O método apresentado a seguir baseia-se nos trabalhos de Li et al. (2000), Smith e Woolf (1976) e Hayden (1988) e ilustra apenas a versão estatística do algoritmo. O procedimento de inferência de perfis atmosféricos envolve a linearização da ETR. Para obter os coeficientes da regressão estatística são utilizadas as radiâncias dos canais MODIS calculadas a partir de um conjunto de radiossondagens, gerando-se um banco de dados de radiâncias MODIS associadas com perfis atmosféricos observados. Maiores detalhes sobre o modelo de transferência radiativa utilizado para calcular estas radiâncias pode ser encontrado em Hannon et al. (1996) e Eyre e Woolf (1988).

23.4 Modelo Estatístico

Considerando uma atmosfera sem espalhamento, a radiância emergente do sistema Terra-atmosfera que é detectada por um canal MODIS, para um determinado número de onda ν é dada por:

$$R_v = \varepsilon B_s \tau_s - \int_0^p B d\tau(0, p) + (1 - \varepsilon) \int_0^p B d\tau^* + R' , \quad (23.1)$$

onde R_v é a radiância espectral com número de onda v , $\tau(0, p)$ é a transmitância total do topo da atmosfera até o nível de pressão p , ε é a emissividade da superfície, B é a radiância com base na função de Planck, a qual é uma função da pressão p , o subscrito s significa superfície, τ^* é a transmitância descendente e R' é a contribuição da radiação solar refletida na região do infravermelho. Este último termo pode ser considerado desprezível para bandas com comprimentos de onda maiores do que 4 μm durante o dia.

Se a radiância observada de cada canal for conhecida R_v^m (onde m significa MODIS), então R_v^m pode ser considerada uma função não linear das propriedades atmosféricas, que inclui o perfil de temperatura, o perfil de umidade, a concentração de ozônio, a temperatura da superfície, a emissividade da superfície, entre outras variáveis. Desta forma,

$$R_v^m = R_v(T, q, O_3, T_s, \varepsilon, \dots) + \sigma_v , \quad (23.2)$$

onde o último termo da equação (σ_v) representa o ruído instrumental e outras fontes de erros. Em geral, a Eq. 23.2 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$R^m = R(X) + \sigma , \quad (23.3)$$

onde R^m contém N (canais MODIS) radiâncias observadas, o vetor X contém L (diferentes níveis de pressão) informações de temperatura atmosférica (T), de umidade (q) e de ozônio (O_3), além de temperatura da superfície e emissividade.

A solução geral da Eq. 23.3 para a inferência de perfis atmosféricos pode ser escrita na forma de uma equação de regressão (Smith et al., 1970):

$$X(i, k) = A(i, n) \cdot Y(n, k) , \quad (23.4)$$

onde A é a matriz dos coeficientes de regressão, Y é a matriz de preditores do modelo estatístico (temperaturas de brilho dos canais do infravermelho), sendo o índice i o número de parâmetros a serem inferidos, k o número de perfis e observações de superfície do conjunto de dados de “treinamento” utilizados na construção dos coeficientes de regressão, e n o número de canais utilizados no procedimento de regressão. O modelo de regressão estatística busca encontrar um operador (A) que permita estabelecer uma correspondência direta entre os dados observados (radiâncias, Y) e os parâmetros desconhecidos do problema (variáveis atmosféricas, X). Minimizando a diferença entre observações sintéticas e o modelo de regressão:

$$\frac{\partial}{\partial A} \|AY - X\|^2 = 0, \quad (23.5)$$

tem-se que:

$$A(i, n) = X(i, k) \cdot Y^T(k, n) \left[Y(n, k) \cdot Y^T(k, n) \right]^{-1}, \quad (23.6)$$

onde $(Y \cdot Y^T)$ é a covariância entre as radiâncias observadas e $(X \cdot Y^T)$ é a covariância entre as radiâncias observadas e o perfil atmosférico. O algoritmo utiliza 12 canais localizados entre 4,465 e 14,235 μm no processo de regressão. A Tab. 23.1 lista os canais utilizados, sua respectiva banda espectral e valores típicos de temperatura e radiância.

Tab. 23.1 Canais MODIS utilizados para inferência de perfis atmosféricos.

Aplicação Atmosférica	Canal	Banda espectral (μm)	Valores típicos Temperatura (K)	Valores típicos Radiância ($\text{W/m}^2 \text{sr } \mu\text{m}$)
Perfil de Temperatura	24	4,433 – 4,498	250	0,17
	25	4,482 – 4,549	275	0,59
Perfil de Umidade	27	6,535 – 6,895	240	1,16
	28	7,175 – 7,475	250	2,18
	29	8,400 – 8,700	300	9,58
Ozônio	30	9,580 – 9,880	250	3,69
Temperatura da Superfície	31	10,780 – 11,280	300	9,55
	32	11,770 – 12,270	300	8,94
Perfil de Temperatura	33	13,185 – 13,485	260	4,52
	34	13,485 – 13,785	250	3,76
	35	13,785 – 14,085	240	3,11
	36	14,085 – 14,385	220	2,08

Um dos problemas enfrentados para se construir modelos estatísticos está relacionado ao banco de dados de observações disponíveis. O ideal seria obter os coeficientes de regressão com base nas radiâncias observadas pelos canais MODIS e nos perfis de radiossondagens lançadas no mesmo horário da passagem do satélite sobre cada sítio de lançamento da radiossonda, isto é, com base em observações e medidas simultâneas. Contudo, radiossondagens são lançadas ao redor do mundo simultaneamente duas vezes ao dia (00 e 12 UTC - *Coordinated Universal Time*). Isto dificulta a construção deste banco de dados sobre um grande número de localidades.

Uma alternativa para solucionar este problema é a determinação de coeficientes “sintéticos” de regressão, os quais são gerados utilizando radiâncias calculadas com um modelo de transferência radiativa a partir de um banco de perfis atmosféricos de radiossondagens. A vantagem desta aproximação é que ela não necessita de medidas efetuadas simultaneamente com as observações de satélite. No entanto, qualquer incerteza nas estimativas de radiância com o modelo de transferência radiativa pode afetar a qualidade dos perfis inferidos pelo modelo estatístico.

Uma vez obtidos os coeficientes da regressão, faz-se a inferência de perfis atmosféricos a partir da Eq. 23.4. Outros parâmetros atmosféricos, como por exemplo, o conteúdo total de vapor d’água, de ozônio (integrados na coluna atmosférica) e índices de instabilidade atmosférica, podem ser calculados a partir das informações dos perfis inferidos pelo modelo estatístico. Estudos realizados com o sensor MODIS/TERRA mostraram que os melhores resultados na inferência do perfil de temperatura encontram-se entre 800-400 mb, onde o Erro Médio Quadrático (EMQ) é da ordem de 1 K. Próximo da superfície, este erro aumenta para 2 K. No caso do perfil de umidade, o EMQ diminui com a altitude e atinge um valor máximo de 1,5 g/kg próximo à superfície. Já o EMQ para os perfis de ozônio atingem um máximo de 0,75 ppmv em altos níveis, próximo de 50 hPa (Seemann et al., 2003). Em outro estudo, Kim et al. (2004) verificaram a qualidade dos perfis verticais de temperatura e de temperatura do ponto de orvalho (umidade), inferidos a partir de informações do sensor MODIS, comparando-os com dados de radiossondagens lançadas às 00 e 12 UTC durante o ano de 2002, em seis diferentes sítios localizados na Coreia. Os resultados dessa validação mostram que o erro médio quadrático foi de 2,0 K e de até 3,4 K para os perfis de temperatura e de temperatura do ponto de orvalho, respectivamente. Além disso, foram calculados os coeficientes de correlação entre os perfis MODIS e as radiossondagens. Os coeficientes encontrados foram 0,99 e 0,89 para os perfis de temperatura e de temperatura do ponto de orvalho, respectivamente.

23.5 Exemplos de sondagens MODIS

Os perfis atmosféricos gerados a partir de informações do sensor MODIS fazem parte do produto MOD07. Estes perfis verticais são inferidos em 20 diferentes níveis de pressão distribuídos entre 5 e 1000 hPa. Existem ainda outras variáveis atmosféricas que são calculadas a partir das informações dos perfis verticais de temperatura e de umidade, como por exemplo, índice de instabilidade, conteúdo integrado na coluna atmosférica de vapor d’água e ozônio, com as respectivas informações de geolocalização (latitude e longitude). A seguir são apresentados alguns exemplos destes produtos. A Fig. 23.3 apresenta uma

composição dos canais MODIS do visível para uma passagem do satélite TERRA sobre parte da América do Sul no dia 12 de junho de 2004, por volta das 13:00 UTC.



Fig. 23.3 Imagem MODIS do dia 12 de junho de 2004 as 13:00 UTC, construída a partir das informações dos canais do VIS (RGB).

É importante lembrar que a inferência das variáveis atmosféricas do produto MOD07 é efetuada apenas sobre áreas livres de nuvem (céu claro), com resolução horizontal de aproximadamente 5 km. A Fig. 23.4 apresenta os campos horizontais de temperatura atmosférica em 500 hPa (Fig. 23.4a), de temperatura do ponto de orvalho em 500 hPa (Fig. 23.4b) e os totais de ozônio (Fig. 23.4c) e de água precipitável (Fig. 23.4d) na coluna atmosférica. Além de campos horizontais é possível observar qual o comportamento destas variáveis na vertical em cada um dos campos de visada de céu claro. Todos estes campos foram gerados operacionalmente na DSA (Divisão de Satélites e sistemas Ambientais) do CPTEC e encontram-se disponíveis para consulta de usuários em geral no seguinte endereço eletrônico: http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/modis/modis_dsa.htm.

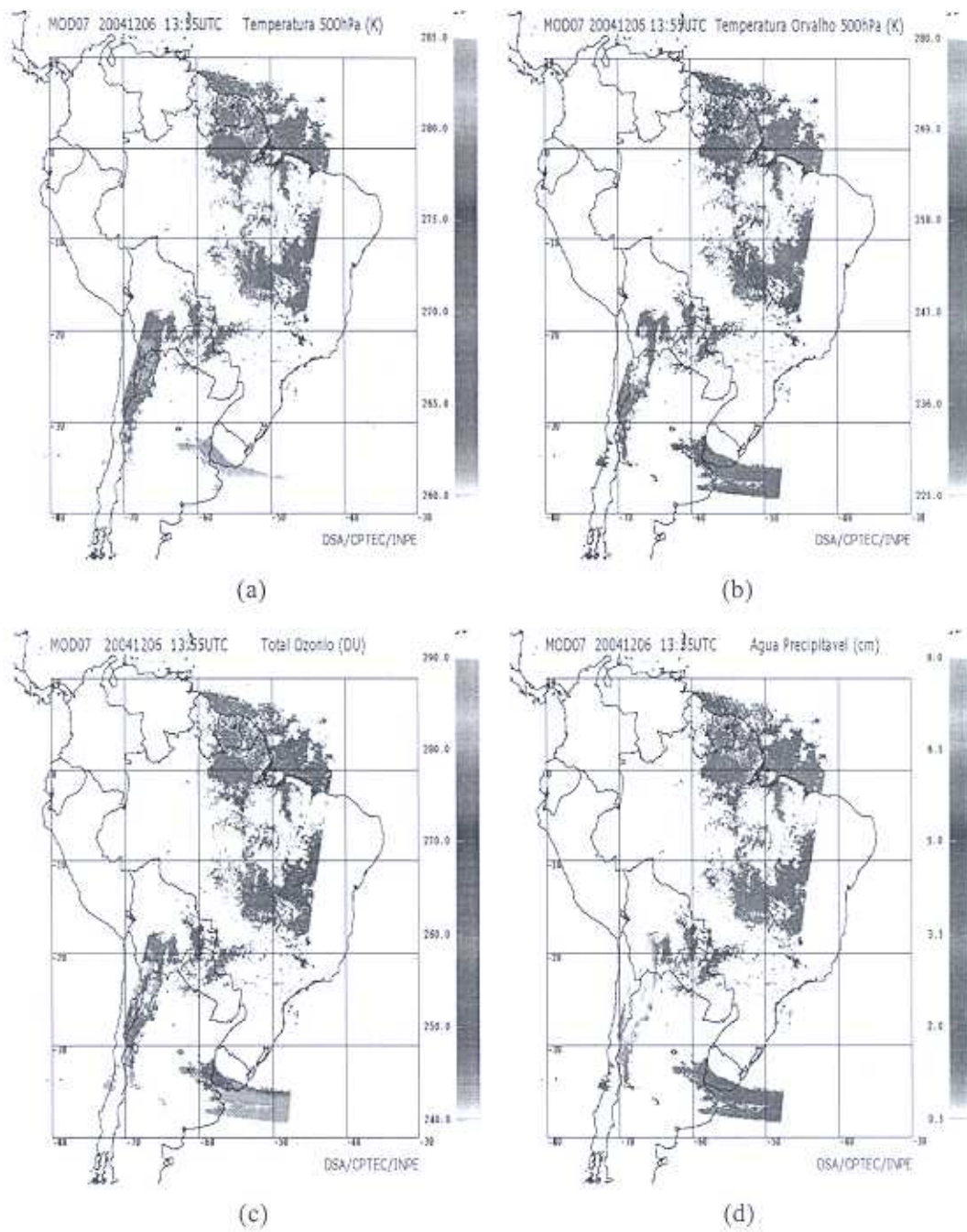


Fig. 23.4 Campos horizontais de temperatura atmosférica em 500 hPa (a), de temperatura do ponto de orvalho em 500 hPa (b), do conteúdo total de ozônio (c) e de água precipitável (d) na coluna atmosférica.

23.6 Considerações Finais

De maneira geral, os trabalhos encontrados na literatura científica têm mostrado o bom desempenho do sensor MODIS em inferir perfis atmosféricos (Seemann et al., 2003, Kim et al., 2004, entre outros). Uma clara vantagem de inferir perfis atmosféricos com este sensor é a possibilidade de combinar informações de canais espectrais localizados na região do visível e do infravermelho que possuem alta resolução horizontal, de 1 km no nadir, comparada com outros sondadores em órbita com resolução superior a 10 km. Por outro lado, uma limitação das sondagens MODIS é que os perfis são inferidos apenas em regiões de céu claro (livre de nuvens).

Além disso, é importante observar que a metodologia utilizada para inferir esses perfis atmosféricos baseia-se na técnica de regressão estatística. Essa metodologia é muito dependente do conjunto de dados utilizados para gerar os coeficientes de regressão do modelo estatístico, também conhecido como conjunto de treinamento. Dependendo do conjunto de treinamento utilizado, o modelo estatístico pode apresentar desempenho variado para diferentes regiões do globo. Outra característica do modelo estatístico é que ele não faz qualquer consideração sobre os processos físicos envolvidos no problema (representados na ETR). No entanto, encontra-se em fase desenvolvimento um algoritmo híbrido que utiliza informações MODIS para fazer a inferência de perfis atmosféricos, isto é, um modelo de regressão estatística acoplado a um modelo físico, que se baseia na solução da ETR. Com esse novo modelo espera-se obter resultados ainda melhores do que os atuais.

23.6.1 Referências Bibliográficas

Aumann, H. H. and Pagano, R. J. Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System. **Optical Engineering**, v.333, n.3, p.776-784, 1994.

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. Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters, **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.27, p. 960-967, 1970.

Chédin, A.; Scott, N. A.; Wahche, C.; Moulinier, P. Improved Initialization Inversion Method: a high resolution physical method for temperature retrievals from satellites of the TIROS-N series. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.24, n.2, p. 128-143, 1985.

English, S. J.; Renshaw, R. J.; Dibben, P. C.; Smith, A. J.; Rayer, P. J.; Poulsen, C.; Saunders, F. W.; Eyre, J. R. A Comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.126, p. 2911-2931, 2000.

Eyre, J. R. and Woolf, H. M. Transmittance of atmospheric gases in the microwave region: a fast model. **Applied Optics**, v.27, p. 3244-3249, 1988.

Eyre, J. R. **A fast radiative transfer model for satellite soundings system**. Reading: ECMWF, 1991, 86 p. (ECMWF Technical Memorandum/176).

Hannon, S.; Strow, L. L. and McMillan W. W. Atmospheric infrared fast transmittance models: A comparison of two approaches. **Proceeding SPIE conference**, v.2830, p. 94-105, 1996.

Hayden M. C. OES-VAS simultaneous temperature-moisture retrieval algorithm. **Journal of Applied Meteorology**, v.27, p. 705-733, 1988.

Kaplan, L.D. Inferences of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements, **Journal of the Optical Society of America**, v. 49, p. 1004, 1959.

Kim, Y. S.; Kwon, B. H.; Hong, K. M. Vertical temperature and moisture profile structure in lower atmosphere retrieved from TERRA/MODIS. *Gayana (Concept)*, v. 68, n. 2, p. 319-323, 2004.

Kummerow, C.; Barnes, W.; Kozu, T.; Shiue, J.; Simpson, J. The tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.15, n.03, p. 808-816, 1998.

King, J. I. F. **The radiative heat transfer of planet Earth**. In: Van Allen, J. A., ed. scientific uses of earth satellites. Ann arbor: The University of Michigan Press, p. 133-136, 1956.

Lavanant, L.; Brunel, P.; Rochard, G.; Labrot, T.; Pochic, D. Current Status for the ICI Retrieval Scheme. In: International TOVS Study Conference, 9. (ITSC), p. 20-26 February 1997, Igls, Austria. **Proceedings of the Ninth International TOVS Study Conference**, Igls: 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.

Lerner, J. A.; Weisz, E.; Kirchengast, G. Temperature and humidity retrieval from simulated infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D14, p.1-11, 2002.

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**, v.39, p.1248-1268, 2000.

McMillin, L. M.; Phillips M.; Gruber, A.; Wark, D. An evaluation of early operational temperature sounding from TIROS-N. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.60, n.10, p. 1167-1187, 1979.

Menzel, W. P. Application of GOES-9/9 soundings to weather forecasting and nowcasting. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.9, n.8, p. 2059-2077, 1998.

Njoku, E. G. Passive microwave remote sensing of the Earth from space - A review. **Proceedings of the IEEE**, v.70, n.7, p. 728-750, 1982.

Seemann, S. W.; Li, J.; Menzel, W. P.; Gumley, L. E. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. **Journal of Applied Meteorology**, v.42, p. 1072-1091, 2003.

Simpson, J.; Adler, R. F.; North, G. R. A Proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.69, n. 03, p. 278-278, 1988.

Smith, W. L.; Woolf, H. M.; Jacob, W. J. A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3 SIRS observations. **Monthly Weather Review**, v.98, n.2, p. 582-603, 1970.

Smith, W. L.; Woolf, H. M. The Use of Eigenvectors of Statistical Covariances Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations. **Journal of Atmospheric Science**, v.33, n.5, p. 1127-1140, 1976.

Smith, W. L.; Woolf, H. M.; Hayden, C. M.; Wark, D. Q.; McMillin, L. M. The TIROS-N Operational Vertical Sounder. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.60, n.5, p. 1177-1187, 1979.

Smith, W. L. Atmospheric sounding from satellites - false expectation or the key to improved weather prediction? **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.117, n.1, p. 267-297, 1991.

Wark, D.Q., and H.E. Fleming. Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites: Introduction. **Monthly Weather Review**, v.94, n.1, p. 351-362, 1966.