

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS CANAIS DO SENSOR AIRS SENSÍVEIS AO MONÓXIDO DE CARBONO, TEMPERATURA E UMIDADE.

Fernando Manoel Ramos¹, Rodrigo Augusto F. de souza², Rudinei Martins de Oliveira³

¹Lab. De Computação e Matemática Aplicada (INPE), Cachoeira Paulista, SP, fernando@lac.inpe.br.

²Divisão de Satélites Ambientais (CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP, rodrigo@cptec.inpe.br.

³Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, rudinei.martins@lac.inpe.br.

Abstract: The goal of this work is to study the sensibility of the channels of AIRS sensor on board of the AQUA platform to alterations in the carbon monoxide concentration, temperature and humidity in the atmosphere, through radiance simulations for the different levels of atmospheric pressures.

Keywords: monóxido de carbono, sensoriamento remoto, modelo de transferência radiativa.

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações da comunidade científica na última década diz respeito às mudanças climáticas e suas conseqüências para a humanidade. A sensibilidade, a capacidade adaptativa, a vulnerabilidade do sistema natural e humano a essas mudanças são estudados por diversos grupos de pesquisadores. Mudanças observadas no clima e suas causas são avaliadas no terceiro relatório do “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) [1]. Segundo esse relatório, a temperatura média global aumentou entre 0,3 e 0,6 °C desde o final do século XX, e pela escala dos diferentes cenários desenvolvidos pelo IPCC “Special Report on Emission Scenarios” (SRES) a média global da temperatura do ar, projetada por modelos numéricos, sofrerá uma elevação de 1,4 a 5,8 °C até 2100. Acredita-se que a maior parte desse aquecimento seja decorrente do aumento desacelerado da emissão, por atividades humanas, de gases que retêm radiação térmica. As moléculas de alguns gases presentes na atmosfera como o dióxido de carbono (CO₂), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), o ozônio (O₃), entre outros, interagem com a radiação eletromagnética na faixa do espectro conhecida como infravermelho termal e com isso dificultam a perda para o espaço da radiação térmica, produzindo o aquecimento da superfície da Terra. É o chamado “efeito-estufa”. Esses gases são fundamentais para manter o equilíbrio climático e condições ambientais adequadas para a vida na Terra,

isto é, temperaturas que permitam a existência de água nas formas líquida e gasosa essencial à vida e ao ciclo hidrológico, respectivamente.

Importantes instrumentos para estudar esses constituintes atmosféricos são sondadores a bordo de satélites. Atualmente, esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sistemas de sondagem com alta resolução espectral, por exemplo, o “Atmospheric Infrared Sounder” (AIRS) possuindo 2378 canais e o “Infrared Atmospheric Sounding Interferometer” (IASI) com mais de 8000 canais. O AIRS foi o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com essa característica [2], lançado no dia 4 de maio de 2002 a bordo da plataforma AQUA. Com os 2378 canais do sondador AIRS tem-se um aumento significativo na quantidade de informação sobre a atmosfera terrestre, sem precedentes na história da meteorologia por satélites. Todavia, não é imediatamente óbvio quantificar essa informação ou utilizá-la de forma eficiente. A informação espectral incluída nos canais refere-se não apenas a perfis de temperatura e de umidade, mas também contém informação de outros gases presentes na atmosfera (gases minoritários). A aproximação usual para a utilização desse conjunto de dados é a seleção de bandas estreitas com um número limitado de canais, de tal forma que cada banda selecionada corresponda a um constituinte atmosférico ou um parâmetro a ser inferido [3–5].

A missão AQUA oferece uma grande oportunidade para coletar dados valiosos que poderão ser utilizados para o avanço do “estado da arte”, particularmente, na seleção de canais para a otimização de procedimentos de inversão, usados para recuperação de perfis de constituintes atmosféricos. Dessa forma, estudos que possam contribuir no sentido de utilizar as informações obtidas de forma eficiente são necessários.

Nesse contexto, este trabalho pretende estudar a sensibilidade dos canais do sensor AIRS às alterações na concentração de monóxido de carbono, tempera-

tura e umidade na atmosfera utilizando um modelo de transferência radiativa (modelo direto) para a identificação/seleção dos canais sensíveis, a fim de que os canais selecionados sejam utilizados futuramente para a inferência da concentração desse constituinte atmosférico. Com isso, buscar-se-á contribuir para a melhoria dos produtos de satélite, particularmente, na seleção de canais para a otimização do procedimento de inversão sob as condições climáticas brasileiras.

2. SONDAGEM ATMOSFÉRICA

Os 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 emissão espectral da atmosfera terrestre para inferir 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, [6]). O autor sugeriu que os perfis verticais de temperatura poderiam ser inferidos a partir da intensidade de radiação monocromática em um único canal espectral, proveniente de várias direções. Posteriormente, (Kaplan, [7]) 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 CO₂ em 15 μ m, porém a análise foi realizada com a radiação emergente de apenas uma direção fixa.

Na década seguinte, com o desenvolvimento tecnológico dos 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, [8]) apresentaram um esquema de tratamento estatístico com dados de radiossondagem para aproximar os perfis obtidos por satélite. (Chahine, [9]) 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 CO₂. Em outro estudo, (Smith, [10]) desenvolveu um método implícito para resolução desse problema. Os resultados obtidos a partir dessas 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 representava 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, especialmente, nas décadas de 1980 e 1990 quando se observou um acentuado aumento no uso de produtos em microondas pela comunidade científica em todo o mundo, em particular, por organizações oceanográficas e meteorológicas.

Um acontecimento de importância particular para a NOAA foi o lançamento, em maio de 1998, do satélite NOAA-15 contendo o sensor “Advanced Microwave Sounding Unit” (AMSU), com vinte canais divididos em dois módulos, AMSU-A e AMSU-B. Conjuntamente com o sensor “High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS)”, esses instrumentos constituem o sistema “Advanced TIROS Operational Vertical Sounder” (ATOVS) que opera a bordo dos satélites NOAA-15, 16, 17 e 18 e foram inicialmente projetados para aperfeiçoar as sondagens de temperatura realizadas com os quatro canais do “Microwave Sounding Unit” (MSU), que operava a bordo do NOAA-14. Os resultados obtidos com esse novo sistema têm mostrado uma melhora 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 previsão numérica de tempo [11, 12]. No entanto, as informações espectrais incluídas nesses canais não possibilitam estimativas das concentrações de outros gases, como por exemplo, gases de efeito estufa.

Atualmente, esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sondadores com alta resolução espectral. 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. O AIRS é o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com mais 2300 canais espectrais e representa o avanço mais importante na tecnologia de sensoriamento remoto por satélites ambientais [13–17]. Ressalta-se ainda o desenvolvimento do sensor IASI pela EUMETSAT em cooperação com o “Centre National d’ Etudes Spatiales” (CNES), lançado em outubro de 2006 a bordo do satélite METOP. Esse instrumento conta com 8461 canais espectrais (645 a 2760 cm⁻¹) e representa a nova geração dos sondadores de alta resolução espectral no

infravermelho [18].

Dos instrumentos que compõem o conjunto AQUA três deles juntos formam o mais avançado sistema de sondagem lançado ao espaço: o AIRS, o “Advanced Microwave Sounding Unit” (AMSU-A) e o “Humidity Sounder for Brazil” (HSB). Eles representam uma versão sofisticada do sistema ATOVS, complementado com o sensor “Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS) no mesmo satélite. Esses instrumentos foram projetados para satisfazer as exigências de previsão de tempo operacionais da NOAA, os objetivos de pesquisa sobre mudanças globais da NASA [18–20], e também disponibilizam um número muito maior de informação (canais), sem precedentes na história da Meteorologia por Satélites.

Dessa forma, tem-se um aumento significativo na quantidade de dados sobre a atmosfera, mas não é imediatamente óbvio como quantificá-los ou utilizá-los de forma eficiente. A informação espectral incluída nos canais refere-se não apenas a perfis de temperatura e umidade, mas também à concentração de alguns gases (CO_2 , CH_4 , O_3 , CO , entre outros). Além disso, um único canal do AIRS pode ser sensível a mais de um gás ou variável que se deseja inferir. Dentro desse contexto a comunidade científica tem despertado interesse na inferência da concentração de gases minoritários bem como informações relacionadas a temperatura e a umidade atmosférica a partir de informação obtida por sensoriamento remoto. Assim, a utilização de plataformas espaciais para a inferência de concentrações de constituintes atmosféricos pode fornecer informações valiosas para estudos posteriores que possam auxiliar e aprimorar o desempenho do modelo de inversão sobre o Brasil.

3. PROBLEMA DIRETO E PROBLEMA INVERSO

Problema direto (PD) e Problema inverso (PI) são conceitos relacionados a causas e efeitos, ou seja, a partir de um conjunto de causas é possível determinar os efeitos esperados, e vice-versa. Basicamente, resolver um problema direto requer um conhecimento completo e preciso das causas para a determinação dos efeitos, e resolver um problema inverso é determinar causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados. Matematicamente se associa às causas as condições iniciais e de contorno, sumidouro e propriedades do material e aos efeitos as propriedades calculadas a partir de um modelo direto, como temperatura, concentração, corrente elétrica, etc, [21]. Na Figura 1 tem-se uma representação esquemática do modelo direto e inverso

no contexto de sondagem remota da atmosfera a partir de instrumentos embarcados em plataformas espaciais, onde as causas são o estado atmosférico: perfis de temperatura, umidade e monóxido de carbono e o efeito é representado pela radiancia simulada e medida.

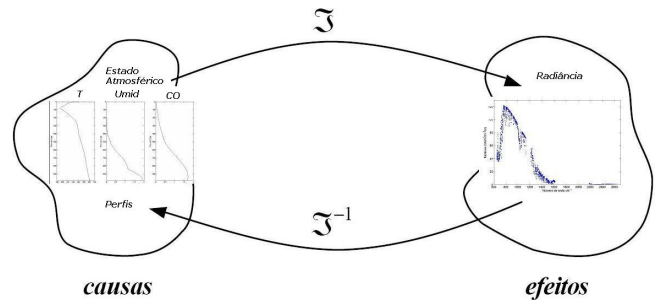


Figura 1 – Representação de problema direto e problema inverso na sondagem atmosférica Fonte: Adaptada de [21]

Os problemas diretos pertencem à classe de problemas bem-postos, sendo modelados linearmente da seguinte forma:

$$Ax = f \quad (1)$$

onde A é um operador diferencial com domínio D_A com $x \in X$ e $f \in F$. Segundo o matemático francês (Hadamard [22]) um problema bem-postos cumpre as seguintes condições:

- Existência: $\forall f \in F \implies \exists x \in D_A$ de modo que $Ax = f$;
- Unicidade; $\forall x_1$ e $x_2 \in D_A$ com $x_1 = x_2$;
- Estabilidade: $\forall x_1$ e $x_2 \in D_A$ com $Ax_1 = f_1$ e $Ax_2 = f_2 \implies x_1 \rightarrow x_2$ em x logo $f_1 \rightarrow f_2$ em F .

Já os problemas inversos pertencem à classe dos problemas mal-postos, pois, falham em um ou em todos os itens acima. Em geral, os PIs são mal condicionados falhando na terceira condição acima a de estabilidade. Pois pequenas alterações nos dados de entrada ocasionadas por ruído nos dados medidos ou observados, podem gerar grandes erros nos resultados finais. Este mal condicionamento está no fato que os auto valores associados ao modelo direto podem apresentar valores nulos ou próximos de zero, o que torna a inversão inviável [23]. Logo a Eq. 1 fica definida inversamente como:

$$x = A^{-1}f \quad (2)$$

onde A^{-1} é o operador inverso.

Em geral os problemas inversos possuem aplicações em diversas áreas de atuação: engenharia, medicina, geofísica, meteorologia, reconstrução de imagens, entre outras. As técnicas para solução de PIs podem ser divididas em duas categorias: a explícita, onde métodos de inversão são obtidos através de inversão explícita, envolvendo um operador que representa o modelo direto e a implícita, que explora exaustivamente o espaço de solução, até que o critério de parada seja satisfeito [24]. Dentre os métodos para sua solução tem-se: Inversão Direta; Decomposição em Valores Singulares; Mínimos Quadrados; Métodos de Regularização; Métodos Variacionais; Redes Neurais; Algoritmos Genéticos; Colônias de Formigas, entre outros: [21, 25–27].

4. METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados os perfis atmosféricos do banco de dados do modelo direto SARTA (“The Stand-alone AIRS Radiative Transfer Algorithm”) [28] com o objetivo de selecionar canais AIRS sensíveis ao monóxido de carbono, a temperatura e a umidade, através de simulações de radiação.

Para a identificação de canais sensíveis do sensor AIRS utilizou-se o método proposto por (Schaerer e Wilheit, [29]), também conhecido na literatura como método da perturbação ou “Jacobian Method” [30]. Basicamente, o método consiste em perturbar o perfil do constituinte atmosférico que se deseja estudar e em seguida simular o espectro de radiancias com o modelo direto. Posteriormente, faz-se uma comparação do espectro de radiação do perfil inicial com o do perfil perturbado, para diferentes níveis de pressão atmosférica, a fim de verificar quais são os canais sensíveis às alterações introduzidas. As perturbações foram feitas para os 101 níveis de pressão atmosférica. Os resultados apresentados correspondem a uma perturbação de 10% na concentração inicial dos perfis dos constituintes selecionados.

5. RESULTADOS

Durante a fase de familiarização com o modelo direto foram realizadas algumas simulações de espectros de temperatura de brilho e radiação para os canais do AIRS. As Figuras 2 e Figuras 3 apresentam as simulações realizadas.

Observa-se claramente nas Figuras 2 e Figuras 3 que o AIRS possui seus canais distribuídos em três bandas do infravermelho entre os comprimentos de onda de 650 cm^{-1} a 2700 cm^{-1} . Essa faixa espectral inclui importantes comprimentos de onda localizados na banda

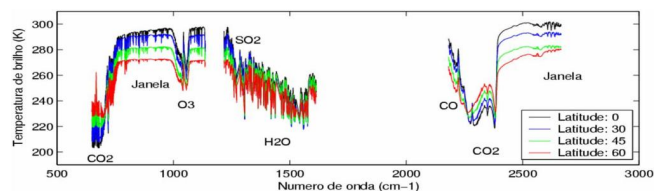


Figura 2 – Espectros de temperatura de brilho dos canais AIRS para quatro diferentes regiões do globo (latitudes).

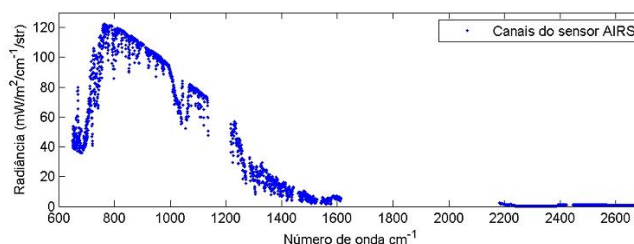


Figura 3 – Espectro simulado de radiação do AIRS.

de absorção de diversos gases presentes na atmosfera terrestre (CO , CO_2 , O_3 , H_2O , entre outros).

As simulações de temperatura de brilho e radiação mostradas anteriormente foram realizadas para diferentes perfis encontrados no banco de perfis atmosféricos do próprio modelo direto (SARTA) para condições de céu livre de nuvens. A Figura 4 ilustra os perfis utilizados nas simulações, sendo os eixos horizontais compostos pelos seguintes constituintes: temperatura em kelvin (K), umidade e monóxido de carbono em mol/cm^2 e os eixos verticais são compostos pelos níveis de pressão em (hPa).

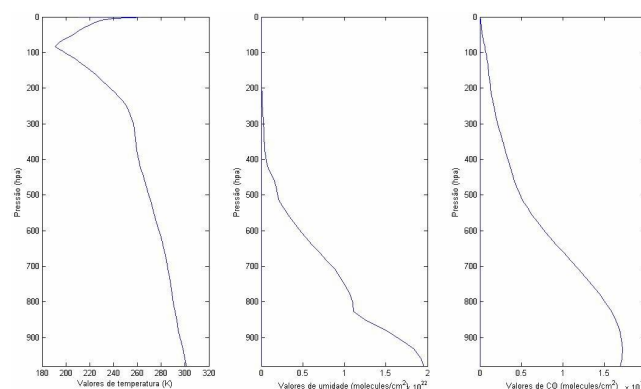


Figura 4 – Perfis de temperatura, umidade e monóxido de carbono utilizado nas simulações.

Como resultado das simulações de radiação realizadas para os 2378 canais do sensor AIRS tem-se as Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, onde as Figuras 5, 6, 7, apresentam em seus eixos a medida de radiação (eixo vertical) pelo número de onda (eixo horizontal) e as Figuras 8, 9, 10, tem em seus eixos a pressão atmosférica (eixo

vertical) e os canais do sensor AIRS (eixo horizontal). A Figura 5 apresenta os canais sensíveis ao monóxido de carbono e está dividida em A e B, onde a Figura B é um zoom da área de sensibilidade do CO. A Figura 6 apresenta os canais sensíveis à temperatura. E a Figura 7 apresenta os canais sensíveis a umidade.

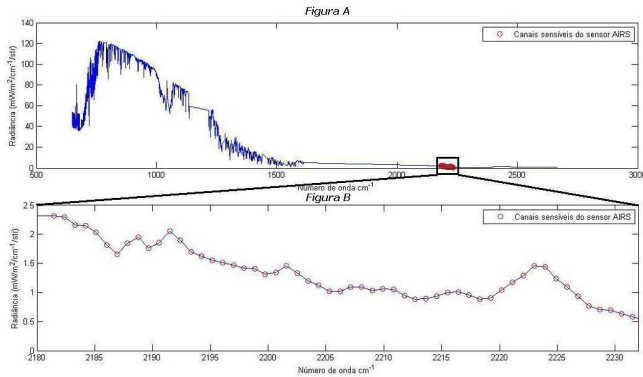


Figura 5 – Identificação dos canais sensíveis às alterações na concentração do perfil de CO.

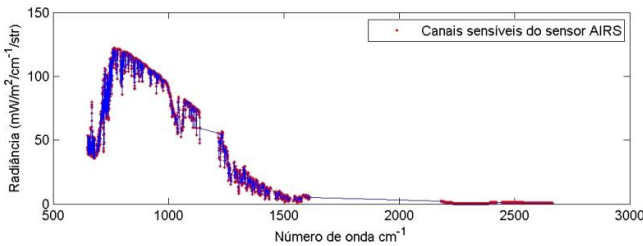


Figura 6 – Identificação dos canais sensíveis às alterações na concentração do perfil de Temperatura.

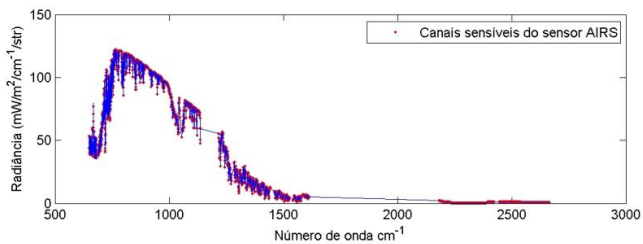


Figura 7 – Identificação dos canais sensíveis às alterações na concentração do perfil de umidade.

Nas Figuras 8, 9, 10, são apresentadas as diferenças entre a radiância calculada no perfil inicial e no perfil perturbado para diferentes níveis de pressão utilizando o perfil de CO, temperatura e umidade, as cores servem para diferenciar a sensibilidade dos canais, sendo que a cor azul é a menos sensível e a cor vermelha é a mais sensível. A Figura 8 identifica os canais sensíveis ao CO onde a região de maior sensibilidade foi entre as

camadas de pressão atmosférica de 70 hPa a 95 hPa. As Figura 9, 10 apresentam os canais sensíveis a temperatura e a umidade sendo que a região mais sensível corresponde as camadas de pressão atmosférica de 80 hPa a 100 hPa.

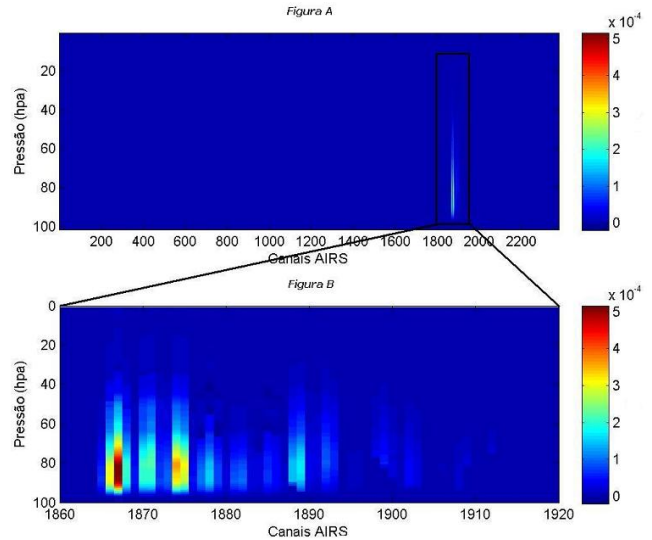


Figura 8 – Diferença entre a radiância calculada no perfil inicial e no perfil perturbado para diferentes níveis de pressão utilizando o perfil de CO.

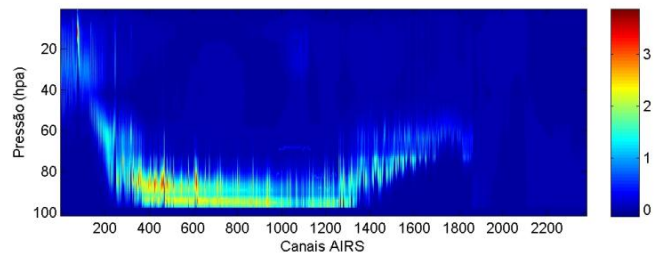


Figura 9 – Diferença entre a radiância calculada no perfil inicial e no perfil perturbado para diferentes níveis de pressão utilizando o perfil de temperatura.

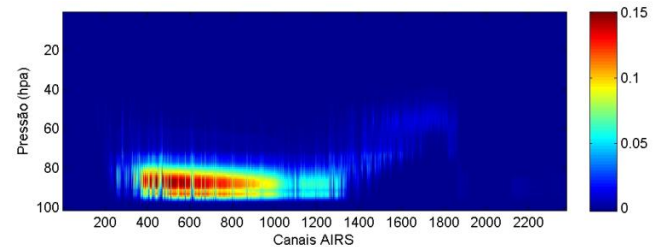


Figura 10 – Diferença entre a radiância calculada no perfil inicial e no perfil perturbado para diferentes níveis de pressão utilizando o perfil de umidade.

6. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram apresentados os procedimentos para a seleção dos canais do sondador AIRS sensíveis ao monóxido de carbono, a temperatura e a umidade na atmosfera, utilizando o modelo de transferência radiativa SARTA para a simulação de radiação. Como resultado se tem que todos os 2378 canais do AIRS são sensíveis à temperatura, seguindo de 2129 canais que são sensíveis a umidade e 55 canais sensíveis ao monóxido de carbono.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo que forneceu o auxílio financeiro.

Referências

- [1] McCarthy, J. J. and Canziani O. F. and Leary, N. A. and Dokken, D. J. and White, K. S., “IPCC: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [2] Parkinson, C. L., “AQUA: an Earth-Observing satellite mission to examine water and other climate variables”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 173–183, 2003.
- [3] Rodgers, C. D, “Information content and optimization of high spectral resolution remote measurements”, Advanced Space Research, Vol. 21, No 3, pp 361–367, 1998.
- [4] Susskind, J. and Barnett, C. and Blaisdell, J, “Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 390–409, 2003.
- [5] Barnett, C.D and Goldberg, M. and McMillin and Chahine, M.T., “Remote Sounding of Trace Gases with the EOS/AIRS Instrument ”, Proceedings of SPIE, Vol. 5548, pp 300–312, 2004.
- [6] 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, pp 133–136 , 1956.
- [7] King, J. I. F., “Inferences of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements”, Journal of the Optical Society of America , Vol. 49, pp 1004 , 1959.
- [8] Wark, D.Q., and H.E. Fleming, “Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites: Introduction ”, Monthly Weather Review, pp 351–362, 1966.
- [9] Chahine, M. T , “Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters”, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 27, pp 960–967, 1970.
- [10] Smith, W. L, “Iterative solution of the Radiative Transfer Equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere”, Applied Optics, Vol. 9, No 9, pp 1993–1999, 1970.
- [11] English, S. J. and Jones, D. C. and Dibben, P. C. and Renshaw, R. J. and Eyre, J. R, “The impact of cloud and precipitation on ATOVS soundings”, ECMWF report, 1999.
- [12] English, S. J. and R. J. Renshaw and P. C. Dibben and A. J. Smith and P. J. Rayer and C. Poulsen and F. W. Saunders and J. R. Eyre, “A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts”, Q. J. R. Meteorol. Soc, vol. 126, pp 2911–2931, 2000.
- [13] Aumann, H. H and Pagano, R. J, “Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System”, Optical Engineering, Vol. 333, No 3, pp 776–784, 1994.
- [14] Aumann, H. H and Miller, C, “Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the Earth Observing System”, Proceeding of the SPIE Meeting, Vol. 2583, No 6, pp 332–343, 1995.
- [15] Aumann, H. H and Gregorich, D. T and Gaiser, S. L and Hagan, D. F and Pagano, T. S and Strow, L. L and Ting, D, “AIRS level 1B algorithm theoretical basis document (ATBD) Part I - Infrared Spectrometer. NASA”, Novembro. eosps.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/index.php, 2000.
- [16] Fishbein, E and Farmer, C. B and Granger, S. L and Gregorich, D. T and Gunson, M. R and Hannon, S. E. and Hofstadter, M. D and Lee, S. Y and Leroy, S. S and Strow, L. L, “Formulation and validation of simulated data for the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)”, IEEE Transactions on

- Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 314–329, 2003.
- [17] Morse, P. and Bates, J. and Miller, C, “Development and test of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) for the NASA Earth Observing System (EOS)”, Proceeding of the SPIE Meeting, Vol. 3759, No 27, pp 281–292, 1999.
- [18] Aumann, H. H. and Chahine, M. T. and Gautier, C. and Goldberg, M. D. and Kalnay, E. and McMillin, L. M. and Revercomb, H. and Rosenkranz, P. W. and Smith, W. L. and Staelin, D. H. and Strow, L. L. and Susskind, J, “AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products and processing systems”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 253–264, 2003.
- [19] Chahine, M. T. and Gunson, M. and Aumann, H. and Strow, L. and Hagan, D. et al, “AIRS Algorithm Theoretical Basis Document - The AIRS team science data validation plan”, Level 2, JPL D-16822, Version 2.1.1, Junho, 2000.
- [20] Goldberg, M. D. and Qu, Y. and McMillin, L. M. and Wolf, W. and Zhou, L. and Divakarla, M, “AIRS near-real-time products and algorithms in support of numerical weather prediction”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 379–389, 2003.
- [21] Campos Velho, H. F, “Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações”, <http://www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf>, 2001.
- [22] Hadamard, J., “Sur les prolemes aux derivees partielles et leur signification physique”, Bull. Princeton Univ., Vol. 13, pp 1–20, 1902.
- [23] Débora Regina Roberti, “Problemas Inversos em Física da Atmosfera”, Universidade Federal De Santa Maria Centro De Ciências Naturais E Exatas, Abril, 2005.
- [24] Elcio Hideiti Shiguemori, “Inferência de perfis verticais de temperatura atmosférica utilizando redes neurais artificiais. ”, Proposta de Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
- [25] Muniz, W. B. and Velho, H. F. C. and Ramos, F. M, “Comparison Of Some Inverse Methods For Estimating The Initial Condition Of The Heat Equation”, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 103, No 1, pp 145–163 , 1999.
- [26] Muniz, W. B. and Ramos, F. M. and Velho, H. F. C, “Entropy and Tikhonov-based regularization techniques applied to the backwards heat equation”, Computers & Mathematics with Application, Vol. 40, No 1, pp 1071–1084, 2000.
- [27] Ramos, F. M. and Velho, H. F. C. and Carvalho, J. C. and Ferreira, N. J, “Novel Approaches On Entropic Regularization. Inverse Problems”, Computers & Mathematics with Application, Vol. 15, pp 1139–1148, 1999.
- [28] L. Larrabee Strow and Scott E. Hannon and Sergio De Souza-Machado and Howard E. Motteler, “An Overview of the AIRS Radiative Transfer Model”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No 2, pp 303–313, Fevereiro, 2003.
- [29] Schaerers, G. and Wilheit, T. T. , “A passive microwave technique for profiling of atmospheric water vapor”, Radio Science, Vol. 14, No 3, pp 371–375, 1979.
- [30] AIRES, F. and CHÉDIN, A. and SCOTT, “A regularized Neural Net approach for retrieval of Atmospheric and Surface temperatures with the IASI Instrument”, Applied Meteorology, 2001.