

SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE VAPOR D'ÁGUA SOBRE NORDESTE BRASILEIRO (NEB) DURANTE FASES DISTINTAS DO FENOMENO ENSO

Jonathan Mota da Silva¹, Adilson Wagner Gandu²

¹Inst. de Astronomia, Geof. e Ciências Atmosféricas da Univ. de S. Paulo, São Paulo - SP, Bra., jsilva@model.iag.usp.br. ²Prof. Dr. do Dep. Ciências Atmosféricas do Inst. de Astronomia, Geof. e Ciências Atmosféricas da Univ. de S. Paulo, São Paulo - SP, Bra., adwgandu@model.iag.usp.br

RESUMO: O transporte de vapor d'água sobre o NEB foi estudado com objetivo de avaliar a variabilidade interanual do vapor d'água na atmosfera e identificar as fontes ou sumidouros de vapor d'água responsáveis pela variabilidade interanual da precipitação. Foi realizado um conjunto de simulações (*ensembles*) durante cinco meses, utilizando o modelo regional atmosférico *BRAMS*, durante janeiro a maio de 1997, 1998 e 1999. Mostrou-se que o transporte de vapor d'água sobre o NEB é zonal, de leste, contribuindo para que a água evaporada pelo oceano Atlântico seja transportada para o interior da região. O fluxo meridional de vapor d'água de sul no ano de 1998 atuou fortemente em toda faixa latitudinal, impedindo que a ZCIT alcançasse uma posição mais ao sul, enquanto que o ano de 1999 o fluxo meridional de vapor d'água foi de norte, indicando a atuação da ZCIT sobre o NEB. A diferença dos campos de divergência do fluxo de vapor d'água entre os anos de 1998 e 1997 foi mais divergente do que entre 1999 e 1997, implicando assim em ano menos chuvoso em 1998. Estes resultados indicam que o modelo representa bem o sinal da variabilidade interanual do vapor d'água no NEB.

Palavras-chave: Nordeste Brasileiro, modelagem regional, balanço de vapor d'água.

ABSTRACT: The water vapour transport on NEB was studied with the objective of evaluating the interannual variability of water vapor in the atmosphere and identifying the sources or drains of water vapor responsible for the interannual variability of precipitation. This study was accomplished through a group of simulations with five months each, using the regional atmospheric model *BRAMS*, during January to May 1997, 1998 and 1999. We showed that water vapor transport on NEB is zonal, and easterly, contributing for the evaporated water from Atlantic ocean to be transported for the interior of the region. Southerly meridional water vapor flux for the year of 1998 acted strongly in every latitude, hindering ITCZ to reach a more southern position, while during 1999 meridional water vapor flux was northerly, indicating the ITCZ actuation on NEB. The difference of the fields of water vapour flux between 1999 and 1997 was more divergent than between 1999 and 1997, implying that 1998 was the least rainiest year. These results suggest that the model represents well the sign of interannual variability of water vapor in NEB.

Key-words: Northeast Brazil, regional modeling, water vapor balance

1. INTRODUÇÃO

O transporte de vapor d'água na atmosfera é um componente importante do ciclo hidrológico, pois é através dele que a água evaporada de diversas fontes tais como os oceanos, os grandes reservatórios d'água, o solo e a vegetação, são transportados de uma região para outra. Sua análise, junto com os termos da equação do balanço d'água, identifica as fontes ou sumidouros de vapor d'água, os quais provocam variações na quantidade de água precipitada. Este tipo de análise é importante para o entendimento da variabilidade interanual da precipitação, já demonstrada em alguns trabalhos como os de Rao e Marques (1984) que estudaram as características do vapor d'água sobre o Nordeste do Brasil (NEB) para dois anos contrastantes: 1974 (chuvoso) e 1976 (seco), e observaram que nos dois anos o sentido do fluxo de vapor d'água é leste. Eles mostraram que nos níveis baixos da troposfera, durante o ano úmido o fluxo é convergente, entrando mais vapor d'água sobre o NEB do que saindo e no ano seco, o fluxo é divergente, saindo mais vapor d'água sobre o NEB do que entrando. Cavalcante et al. (2002) também estudaram as características do vapor d'água sobre NEB em dois anos contrastantes (seco e chuvosos). Seus resultados principais demonstraram que a atmosfera sobre o NEB se comportava como sumidouro de vapor d'água para o ano úmido (Evaporação - Precipitação < 0) e como fonte para o ano seco (Evaporação - Precipitação > 0).

Sendo assim, é realizado um estudo do comportamento dos termos do balanço d'água sobre o NEB com objetivo de analisar a variabilidade interanual do vapor d'água na atmosfera e identificam as fontes ou sumidouros de vapor d'água responsáveis pela variabilidade interanual da precipitação. Para isto foi realizado um conjunto de simulações (*ensembles*) durante cinco meses (janeiro a maio), com o modelo regional *BRAMS* (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) nos anos de 1997, 1998 e 1999, quando as temperaturas de superfície do mar (TSM) do Pacífico leste e central encontravam-se anormalmente neutras (ano "normal"), anormalmente quentes (*El Niño*), e anormalmente frias (*La Niña*), respectivamente.

2. METODOLOGIA

Nas simulações deste trabalho foi utilizada a versão 3.2 do modelo atmosférico BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), que vem a ser uma versão modificada do já bem documentado modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*, Cotton et al., 2003), na versão 5.04.

As simulações, cujo domínio (juntamente com a topografia da região) é apresentado na Figura 2.1, e suas principais configurações são descritas na Tabela 2.1, foram compostas por um *ensemble* (conjunto de cinco simulações), para o período de janeiro a maio dos anos de 1998 a 1999. As condições da atmosfera no instante inicial e as condições de fronteiras laterais foram fornecidas pela re-análise do NCEP-NCAR. A TSM utilizada como condição de contorno foi a observada semanalmente.

Tabela 2.1 Principais configurações utilizadas nas simulações com o modelo BRAMS. Os dados entre parênteses são referentes à segunda (2ª) grade utilizada na simulação

Número de grades	2
Pontos de grade em x	50 (90)
Pontos de grade em y	36 (70)
Centro da grade (lat/lon)	7,5S / 38,5W
Pontos de grade em z (altura)	28
Número de camadas de solo	7
Espaçamento de grade (km)	80 (20)
Parametrização Radiação	Chen e Cotton
Parametrização de nuvens cúmulos	Grell
Iniciação do solo	Heterogênea
Nível microfísica	3
Coordenada vertical	Sigma

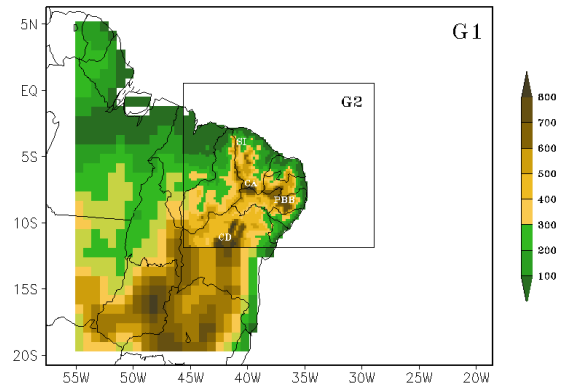


Figura 2.1 - Representação esquemática do domínio espacial utilizado na simulação e a topografia da região (m) utilizada pelo BRAMS na grade 1 (com espaçamento de 80 km) e na grade 2 (com espaçamento de 20 km). A Chapada Diamantina, o Planalto da Borborema, a Chapada do Araripe e a Serra de Ibiapaba são localizados pelas siglas CD, PBB, CA e SI, respectivamente.

2.1. TRANSPORTE DE VAPOR D'ÁGUA

Segundo Peixoto e Oort (1992), a forma climática do balanço d'água na atmosfera, após algumas simplificações, pode ser escrita como:

$$\nabla \cdot \bar{\vec{Q}} = \bar{E} - \bar{P} \quad (2.1)$$

onde $\bar{\vec{Q}} = \bar{Q}_x \vec{i} + \bar{Q}_y \vec{j}$ é o fluxo horizontal de água na forma de vapor, $\bar{E}$ é evapotranspiração e $\bar{P}$ é a precipitação, onde a barra sobre os termos representa a média temporal.

Usando o teorema de Gauss sobre o primeiro termo da equação (2.1) podemos calcular o divergente médio no espaço sobre uma região que é delimitada, conceitualmente, por paredes verticais, como as paredes de um "cubo". Esta metodologia é frequentemente utilizada em estudos regionais como os de Rao e Marques (1984) e Cavalcanti et al. (2002):

$$\left\{ \nabla \cdot \bar{\vec{Q}} \right\} = \frac{1}{A} \oint_{\gamma} \left(\bar{\vec{Q}} \cdot \vec{n} \right) d\gamma \quad (2.3)$$

onde A representa a área de uma região, $\vec{n}$ é um vetor com módulo igual a um que, em cada elemento infinitesimal, $d\gamma$, tem a direção do vetor normal a $d\gamma$.

3. RESULTADOS

Como a precipitação é mantida principalmente pela convergência (divergência) do fluxo de vapor d'água, pode-se concluir que o acréscimo (decréscimo) de precipitação é relacionado, aproximadamente, com o aumento da convergência do fluxo de vapor d'água. Portanto, foram construídos os campos de subtrações (anomalias) da divergência do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente ($\nabla \cdot \bar{\vec{Q}}$) e de

precipitação ($\bar{P}$), médios no período de fev-mai, entre os anos de 1998 e 1997, e 1999 e 1997 (Figura 3.1). Comparando os campos da diferença da divergência do fluxo de vapor d'água ($\nabla \bar{Q}$) com os campos da diferença da precipitação de ambos os anos (Figura 3.1), observa-se que os valores negativos (positivos) da anomalia de divergência, em geral, coincidem com os valores positivos (negativos) da anomalia de precipitação, indicando que nestas regiões o ano em questão é menos divergente do que o ano de 1997. Desta forma, observa-se que a alta divergência do fluxo de vapor d'água sobre a costa do NEB foi maior no ano 1998 (Figura 3.1a) e conseqüentemente a precipitação na costa foi menor, quando comparada a anomalia de precipitação do ano de 1999 (Figura 3.1c e 3.1d).

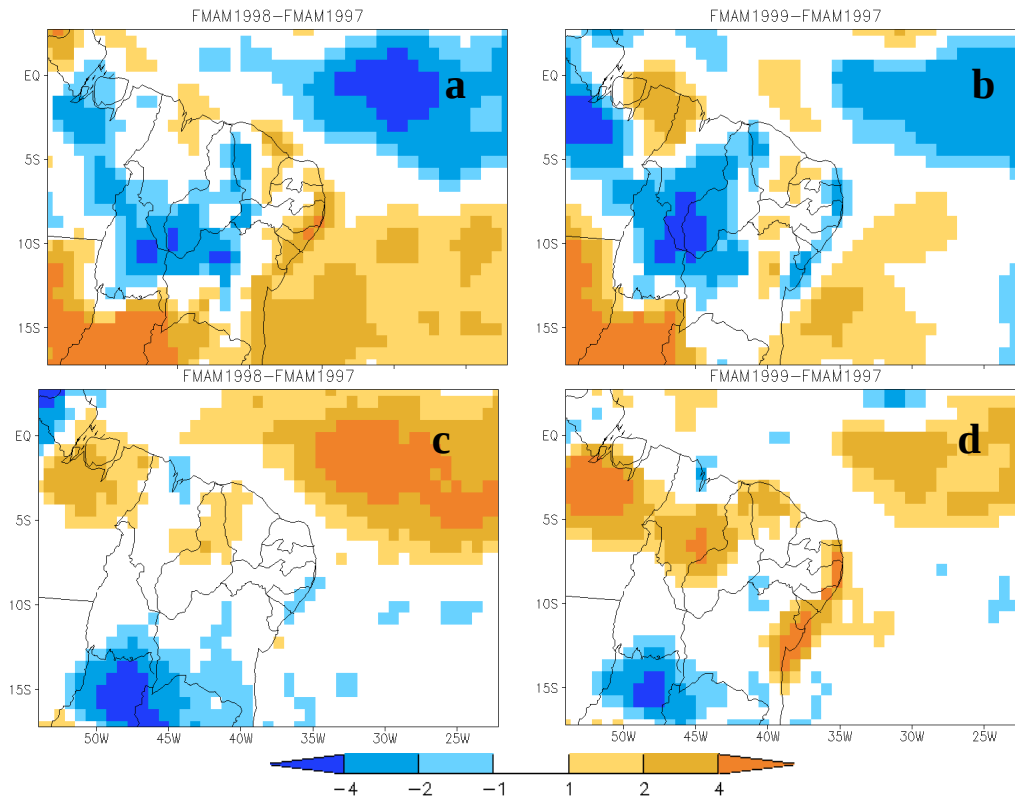


Figura 3.1 – Divergência do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente em mm.dia^{-1} para a diferença dos anos 1998 e 1997 (a) e de 1999 e 1997 (b), e precipitação em mm.dia^{-1} para a diferença de 1998 e 1997 (c) e de 1999 e 1997 (d)

A componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente ($Q_\phi \vec{j}$) pode auxiliar na determinação de um padrão que indique a atuação interanual do principal sistema indutor de chuvas no NEB, a ZCIT (Cavalcanti et al., 2002), pois os seus efeitos sobre o NEB dependem do seu posicionamento mais ao sul do equador terrestre e estão diretamente relacionados a maior ou menor intensificação do fluxo de vapor d'água. Portanto, foi realizada uma média zonal da componente do fluxo de vapor d'água ($Q_\phi \vec{j}$) (entre 44° e 33° W) em função da latitude (Figura 3.2).

Desta forma são apresentadas as curvas que representam o comportamento quinzenal ao longo de cada estação chuvosa (fev-mai) dos anos de 1998 e 1999. Nela (Figura 3.2) os valores negativos do fluxo meridional de vapor d'água indicam um transporte de norte para sul e os positivos indicam o transporte no sentido contrário.

Observa-se na Figura 3.2 que o ano de 1998 praticamente não há fluxo meridional de vapor d'água de norte, enquanto, no ano de 1999 observa-se que o transporte de fluxo meridional de norte é superior, pois neste ano há a presença de três quinzenas (2^a a 4^a), entre as latitudes 0° a 7° S, com valores entre -40 a $-20 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Estes resultados indicam que no ano em que ocorreu El Niño (1998) o fluxo meridional de sul esteve atuando fortemente em praticamente toda faixa latitudinal impedindo que a ZCIT alcançasse uma posição mais ao sul para favorecer a ocorrência de chuvas no NEB. Já o ano de La Niña (1999), o padrão do fluxo

meridional foi diferente, pois o transporte do fluxo meridional de norte indicou a atuação mais efetiva da ZCIT, embora tímida, pois a maior parte das quinzenas o fluxo meridional de vapor d'água foi de sul.

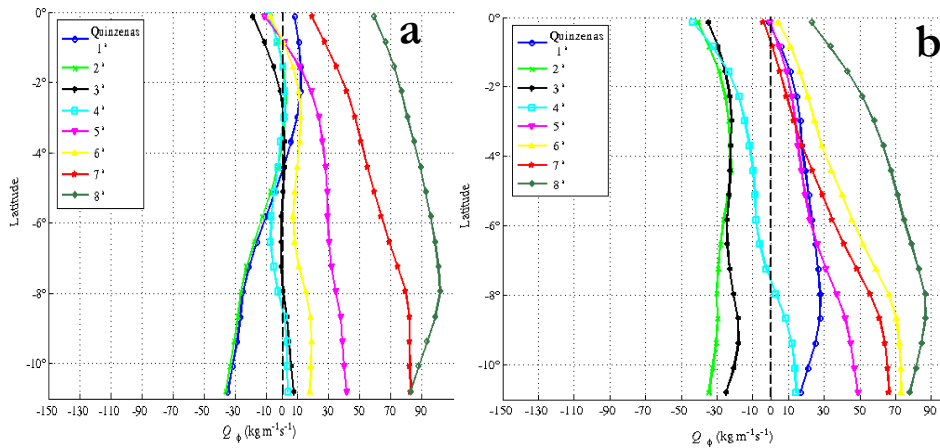


Figura 3.2 – Distribuição média zonal (44°-33° W) da componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) para: médias quinzenais dos anos de 1997 (a), 1998 (b) e 1999 (c), no período de fev-mai.

Com base na equação (2.3), foi idealizado um “cubo” com base delimitada pelas coordenadas 10°-3° S e 44°-36° W, com a altura da superfície (1000 hPa) até 400 hPa, com o objetivo de calcular o conteúdo de vapor d'água atmosférico que atravessa as faces laterais do “cubo” (faces leste, oeste, norte e sul) e assim calcular a divergência do fluxo de vapor d'água $\{\nabla \cdot \vec{Q}\}$ integrado verticalmente (média mensal) na área do norte do NEB (nNEB). A divergência do fluxo de vapor d'água $\{\nabla \cdot \vec{Q}\}$ média no mês e na área do nNEB é dada pelo conteúdo líquido de vapor d'água atmosférico que atravessou as faces laterais do “cubo”, ou seja, a soma das faces do “cubo”. As faces são definidas como: face oeste (média em 46° W ao longo de 10°-3° S, ϕ_W), face leste (média em 36° W ao longo de 10°-3° S, ϕ_E), face norte (média em 3° S ao longo de 46°-36° W, ϕ_N) e face sul (média em 10° S ao longo de 46°-36° W, ϕ_S) e são calculadas utilizando a equação (2.3).

A Figura 3.3 representa o conteúdo de vapor d'água atmosférico que atravessou as faces laterais do “cubo” (ϕ_W, ϕ_E, ϕ_N e ϕ_S) na estação chuvosa (fev-mai) para os anos de 1998 e 1999. O esquema gráfico das setas entrando (de cor azul), que são os valores negativos, no “cubo” indica a importação de vapor d'água e as setas saindo (de cor vermelha), que são os valores positivos, indicam a exportação de vapor d'água na estação chuvosa dos anos estudados (Figura 3.3).

Analisando a Figura 3.3 observa-se que a entrada de vapor d'água se dá efetivamente pela face leste (ϕ_E), onde se encontra os valores mais intensos de vapor d'água -26,24 e -25,26 $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$. Esse resultado, assim como em Cavalcanti et al. (2002), demonstra a importância do Oceano Atlântico Sul no processo de fornecimento de vapor d'água para o nNEB e que sua variabilidade depende do posicionamento do anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul.

Outra face de destaque é a face norte (ϕ_N), por representar uma variabilidade interanual no conteúdo de vapor d'água. Observa-se na Figura 3.3a que o fluxo meridional de vapor d'água no ano 1998 inibiu a penetração do conteúdo de vapor d'água na parte norte do nNEB, com o conteúdo de vapor d'água saindo da face norte de 0,87 $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, enquanto que em 1999 (Figura 3.3b) o fluxo meridional de vapor d'água permitiu a entrada de -0,21 $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ de vapor d'água.

No centro da Figura 3 encontra-se a divergência do fluxo de vapor d'água média na área do NEB durante fev-mai, que resultou da soma do conteúdo de vapor d'água nas quatro faces do “cubo” ($\phi_E + \phi_N + \phi_W + \phi_S$). Nela observa-se a divergência média na área do nNEB ($\{\nabla \cdot \vec{Q}\}$) foi negativa nos dois anos, ou seja, a precipitação excedeu a evapotranspiração.

Embora o ano 1999 a divergência média na área do nNEB tenha indicado uma maior importação de vapor d'água, esperava-se que a divergência média na área representasse a disponibilidade interanual de

vapor d'água melhor, indicando uma exportação de vapor d'água no ano de El Niño (1998) em vez de uma importação. No entanto, este resultado está coerente com a simulação de precipitação do modelo, pois o mesmo simulou valores de precipitação acima da precipitação observada (Figura não mostrada).

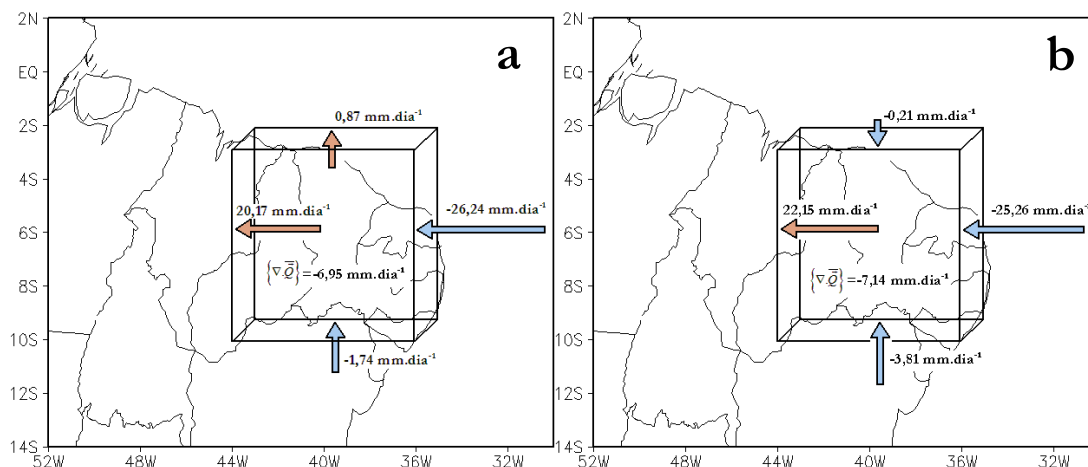


Figura 3.3 – Balanço do fluxo de vapor d'água mm.dia^{-1} nas faces laterais do “cubo” (36° - 46° W e 3° - 10° S) sobre o nNEB durante os anos de 1998 (a) e 1999 (b).

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a variabilidade do transporte de vapor d'água sobre o NEB, através de um *ensemble* de simulações realizadas com o modelo regional *BRAMS* durante a estação chuvosa (fevereiro a maio) dos anos de 1997, 1998 e 1999, quando as temperaturas de superfície do mar (TSM) do Pacífico leste e central encontravam-se anormalmente quentes (*El Niño*), e anormalmente frias (*La Niña*), respectivamente. Pode-se sintetizar, das simulações realizadas, que a análise da variabilidade interanual do vapor d'água na atmosfera mostrou que o transporte de vapor d'água sobre o NEB é zonal, de leste para oeste, contribuindo para que a água evaporada pelo oceano Atlântico fosse transportada para o interior da região. Demonstrou-se ainda que o fluxo meridional de vapor d'água de sul no ano em que ocorreu *El Niño* (1998) atuou fortemente em praticamente toda faixa latitudinal do NEB impedindo que a ZCIT alcançasse uma posição mais ao sul para favorecer a ocorrência de chuvas, enquanto que o ano de *La Niña* (1999) o fluxo meridional de vapor d'água teve sua atuação de norte, indicando a atuação da ZCIT sobre o NEB, embora timidamente. E por fim, a diferença dos campos de divergência do fluxo de vapor d'água mostrou que o ano de 1998 foi mais divergente do que o ano de 1999 e, conseqüentemente, menos chuvoso também. A soma destes resultados indica que o modelo representa bem o sinal da variabilidade interanual do fluxo de vapor d'água sobre nNEB.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAVALCANTI, E.P., GANDU A.W., AZEVEDO P., 2002: Transporte e balanço de vapor d'água atmosférico sobre o Nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Meteorologia**, v. 17, n. 2, 207-217.
- COTTON, W. R., PIELKE, R. A., WALKO, R. L., LISTON, G. E., TREMBACK, C. J., JIANG, H., MCANELLY, R. L., HARRINGTON, J. Y., NICHOLLS, M. E., CARRIO, C. G., MCFADDEN, L. P., 2001: RAMS:Current Status and future directions. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 82, 5-29.
- PEIXOTO, J., P., OORT, A. H., 1992: **Physics of Climate**. America Institute Physics, PP: 520.
- RAO, V. B., MARQUES, V. S., 1984: Water vapor characteristics over Northeast Brazil during two contrasting years. **Jour. of Climate and Applied Meteo.** AMS, Boston USA. v. 23, n. 3, 440-444.
- RAO, V. B., CAVALCANTI, I. F. A., HADA, K., 1996: Annual variations of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South American. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 101, n. D21, 26539-26551.

AGRADECIMENTOS: à FAPESP (Processos: 04/11617-0 – Bolsa de Mestrado do Primeiro autor) e ao CNPq (Processo: 304648/2005-1).