

EXPERIMENTO DE INTERCOMPARAÇÃO: SONDAGENS TOVS E RADIOSSONDAGENS

YOSHIHIRO YAMAZAKI
YUKITAKA NAKAMURA
MARIA ROSELI CABRAL HO
CARLOS HO SHIH NING

*Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT
Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE
C.P. 515 – 12201 – São José dos Campos – SP*

RESUMO

São apresentados resultados do Experimento TOVS/RADIOSONDA conduzido para a realização de intercomparação entre observações convencionais de radiosondagem e dados obtidos a partir das informações de sondagem remota pelo satélite NOAA-9. Os lançamentos das radiossondas foram feitos da Estação do Radar Meteorológico do Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru, em horários simultâneos com a passagem do satélite sobre a região da cidade de Bauru, Estado de São Paulo. Apesar da intercomparação ter sido feita considerando apenas 4 radiossondagens, os resultados obtidos foram de excelente qualidade em termos de temperatura. Pelas análises concluiu-se que os perfis de temperatura TOVS substituem, sem dúvida alguma, as sondagens convencionais pelo menos até o nível de 100 mb. Quanto ao perfil de temperatura do ponto de orvalho determinado por satélite, as características gerais são semelhantes ao da radiosondagem, porém os desvios são maiores, e resultados mais conclusivos sobre a confiabilidade, a ponto de substituir os dados convencionais, é ainda um aspecto a ser pesquisado. As análises comparativas entre as cartas sinóticas de ar superior preparadas com dados convencionais e dados TOVS, revelam a grande importância dos dados de satélite na previsão subjetiva.

ABSTRACT

TOVS/RADIOSONDE Experiment results are presented for intercomparison between upperair data derived from NOAA-9 satellite atmospheric sounding and radiosonde observations. Radiosondes were launched from Meteorological Radar Station of Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru, SP, simultaneous with satellite passages over Bauru region. For the intercomparison were launched only four radiosondes but the results are excellent in terms of temperature profiles. Analysis show that satellite temperature profile can perfectly replace the temperature from radiosonde soundings. Satellite dew point temperature profiles have general characteristics similar to the radiosonde soundings, but since the deviations are greater, conclusive results require more research. Comparative analysis between synoptic chart based on conventional data and TOVS data, show the great importance of satellite data in the forecasting analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os satélites meteorológicos de órbita quasi-polar heliossíncronas da série TIROS-N/NOAA, cuja sequência é também conhecida como Série Avançada TIROS-N (ATN), encontra-se em operação contínua desde outubro de 1978. Para garantir cobertura de uma mesma região geográfica a cada seis horas, tais satélites operam em pares com órbitas em quadratura. De acordo com a convenção adotada, a cobertura matutina é realizada pelo satélite de

número par (atualmente, NOAA-10) e a cobertura vespertina pelo de número ímpar (atualmente, NOAA-9), cujos horários de cruzamento com o equador geográfico verificam-se, aproximada e respectivamente, às 07:30/19:30 h e 14:30/02:30 h (hora solar local). Na Tabela 1 são apresentados os satélites TIROS-N/NOAA já lançados, com seus respectivos períodos aproximados de operação. As aproximações são consequência da degradação do sinal de transmissão ou de interrupções na operação por problemas de natureza técnica, na fase da vida útil do satélite. A continui-

dade dessa série será assegurada pelo lançamento já programado de mais quatro satélites (NOAA-H, D, I, J). Após 1991, novos instrumentos deverão compor a carga útil dos satélites ATN/NOAA (NOAA-K, L, M).

TABELA 1

Período aproximado de operação dos satélites lançados da série TIROS-N/NOAA.

Satélite	Data de Lançamento	Período Aproximado de Operação
TIROS-N	13.10.1978	19.10.1978—30.01.1980
NOAA-6	27.06.1979	27.06.1979—30.06.1986
NOAA-7	23.06.1981	24.08.1981—18.02.1985
NOAA-8	28.03.1983	03.05.1983—12.06.1984
NOAA-9	12.12.1984	10.01.1985—presente
NOAA-10	17.09.1986	11.1986—presente

O Sondador Vertical Operacional TIROS-N (TOVS—TIROS-N Operacional Vertical Sounder) é um dos principais sistemas que integram a carga útil dos satélites TIROS-N/NOAA. O TOVS é composto por três instrumentos: (1) Sondador de Radiação Infravermelha de Alta Resolução-2 (HIRS-2/High Resolution Infrared Radiation Sounder-2), sondador de alta resolução especial com 20 canais espectrais (19 no infravermelho e 1 no visível); (2) Unidade de Sondagem em Microondas (MSU — Microwave Sounding Unit), com 4 canais espectrais em microondas; e, (3) Unidade de Sondagem Estratosférica (SSU — Stratospheric Sounding Unit), modulada à pressão, com 3 canais espectrais no infravermelho. As características detalhadas destes sondadores são descritas por Schwalb (1978) e Smith *et al.*, (1979). Desde 1979, é o sistema TOVS que provê rotineiramente os dados de sondagem atmosférica por satélite para as várias organizações internacionais da meteorologia operacional.

No Brasil, o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) vem, desde a sua fundação, acompanhando a evolução tecnológica na área de satélites meteorológicos. Esforços mais recentes, especificamente voltados à utilização dos dados TOVS, resultaram na implantação experimental de algoritmos que permitem inferir, entre outros parâmetros de interesse meteorológicos, perfis verticais de temperatura e de umidade desde a superfície até a estratopausa (Yamazaki *et al.*, 1987; Ho *et al.*, 1987).

A implantação de algoritmos em caráter rotineiro no Centro de Aplicação de Satélites Ambientais (CASA), será um requisito para a operacionalização do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), não apenas pela deficiente cobertura espacial de sondagens aerológicas do País, como também, entre outros motivos, pelo tempo que leva para receber os dados TOVS globais processados no exterior e divulgados pelo Sistema Global de Telecomunicações. Assim sendo, torna-se necessária a realização de estudos que permitam avaliar a qualidade das sondagens TOVS, seu impacto em modelos de previsão numérica de

tempo, incluindo análise objetiva e iniciação, bem como a obtenção de detalhes sobre as deficiências do estado atual dessa tecnologia. Para este estudo de intercomparação foi promovido o Experimento TOVS/RADIOSSONDA, por meio do qual foram realizadas radiossondagens coincidentes e simultâneas com sondagens TOVS. A necessidade de experimentos desta natureza decorre da dificuldade de se obter dados de radiossondagens convencionais em horários e locais adequados para as avaliações TOVS.

2. EXPERIMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

O experimento de campo foi conduzido em colaboração com o Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru (IPMet/FEB). Os lançamentos foram feitos junto às instalações do radar meteorológico da cidade de Bauru/SP (22°S, 49°W), utilizando os equipamentos de rastreamento automático GMD-1A e radiossondas VIZ-1680 MHz. Os quatro lançamentos, realizados entre 16 e 19 de dezembro de 1986, foram devidamente programados para aquisição de dados de ar superior nos mesmos horários das passagens do satélite NOAA-9, com base nas previsões produzidas mensalmente pelo INPE.

Para a caracterização espacial da intercomparação, ou seja, para a definição da área representativa das radiossondagens, foram elaboradas projeções horizontais das trajetórias dos balões, conforme ilustra a Figura 1, para o lançamento do dia 18. Como se observa, a distância máxima de deslocamento em relação ao ponto de lançamento, identificada pelas coordenadas (0, 0), é da ordem de 10 Km. Como os demais lançamentos apresentaram características de

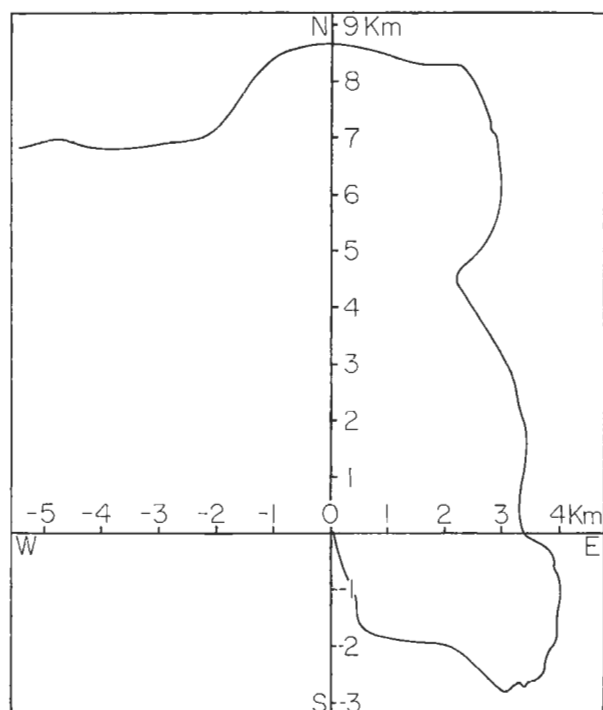


Figura 1 — Projeção horizontal da trajetória do balão de radiossondagem em Bauru no dia 18/12/86.

deslocamento semelhantes ao apresentado na Figura 1, as intercomparações foram feitas considerando a validade das informações convencionais dentro desta resolução espacial.

Os dados de satélite foram recebidos e pré-processados pela Estação de Recepção de Satélite TIROS-N/NOAA do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais) instalada em Cachoeira Paulista (22,7°S, 46,0°O). No processamento dos dados TOVS foi utilizado o "International TOVS Export Package", desenvolvido pelo Instituto de Cooperação para Estudos de Satélites Meteorológicos do NESDIS (CIMSS - Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies of NESDIS, Madison, WI (EUA)), para a inferência de perfis verticais de temperatura e de vapor d'água e de outros parâmetros como a água precipitável e a concentração total de ozônio, a partir das radiâncias medidas pelo instrumento TOVS (Smith *et al.*, 1983).

Esse processamento foi feito no computador B-6800 do INPE com as alterações descritas por Ho *et al.*, (1987). Os perfis de temperatura foram determinados a partir das radiâncias limpas, na ausência de nuvens, ou devidamente corrigidas, quando na presença delas. O programa implantado identifica alvos livres da presença de nuvens, parcialmente coberto ou totalmente coberto tratando-se de forma diferenciada no processamento. No caso de cobertura total, em particular, a temperatura é inferida a partir das informações dos quatro canais em microondas, que são menos afetados pelas nuvens. O procedimento acima encontra-se descrito no trabalho realizado, por McMillin e Dean (1982). Os perfis de temperatura foram determinados para cada malha de 3 x 3 dados HIRS, ou seja, em média a cada 60 km de distância. Para a determinação do perfil de temperatura atmosférica a partir da equação de transferência radiativa foi utilizado o método iterativo proposto por Smith (1970). Basicamente, este método resolve a equação da transferência radiativa, iterativamente, até encontrar uma concordância suficientemente boa entre as radiâncias observadas e as calculadas. A água precipitável é calculada utilizando a solução inversa da equação de transferência radiativa descrita por Smith Zhou (1982). A concentração total de ozônio é obtida pela medida de radiação infravermelha em 9,6 μm e utilizando o método descrito por Ma, Smith e Woolf (1984). Além destas variáveis são também determinados o geopotencial e o vento geostrófico. Para o processamento de 500 sondagens a partir dos dados gravados, foram gastos cerca de duas horas de CPU do computador Burroughs 6800.

3. RESULTADOS

Tendo em vista que os gráficos preparados para a análise das intercomparações entre sondagens TOVS e radiosondagens apresentam grande semelhança, a discussão será feita baseada nos resultados das sondagens apresentando sempre que possível, apenas as figuras referente ao dia 18/12 por reunir um conjunto mais completo de dados.

Na Figura 2 estão indicados por "x" alguns pontos onde foram obtidos os perfis verticais e a área varrida pelo

satélite; os círculos cheios representam as principais estações de radiosondagem do Brasil e o quadrado cheio indica a cidade de Bauru. Nem todos os pontos das sondagens constam da figura para não saturá-la visivelmente. Na Figura 3a são apresentados os perfis de temperatura obtidos a partir das medições feitas por radiosondagem (R) e satélite (S). Quanto ao perfil obtido por satélite, foi escolhido aquele mais próximo da estação de lançamento do balão de radiosondagem, que neste caso é de cerca de 85 km. Observa-se que há uma boa concordância entre os perfis, desde a superfície até aproximadamente 100 mb. Acima desta altura o erro torna-se maior. Na Figura 3b é apresentado o desvio padrão da temperatura obtida por satélite, considerando os perfis dentro de um raio de 110 km (R1) e outro de 220 km (R2), e considerando o perfil de radiosondagem, como referência. O número de perfis utilizados para o cálculo do desvio padrão estão indicados nesta figura. Em geral, como se observa, o desvio é menor que 3°C, abaixo de 100 mb. Este resultado é comparável aos encontrados por outros autores como Wark (1983), Susskind *et al.*, (1984) e Smith *et al.*, (1983). Aumentando o raio para 330 km, o número de perfis torna-se maior, porém o desvio torna-se maior também, provavelmente devido à perda na confiabilidade da temperatura com a distância. O raio R1 é uma distância satisfatória, entretanto como o número de perfis é pequeno, acredita-se que seja mais correto considerar o desvio utilizando o raio R2. Os diversos fatores que contribuem para o erro são:

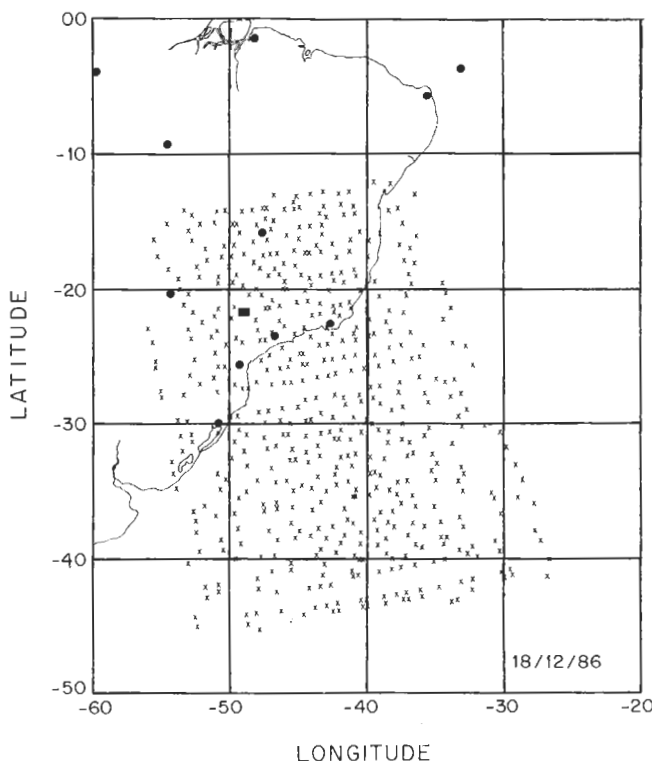


Figura 2 — Pontos selecionados (x) de sondagens TOVS do dia 18/12/86, principais estações de radiosondagem do Brasil (●) e localização da cidade de Bauru (■).

- a) as medidas de radiosondagens são essencialmente pontuais enquanto as medidas TOVS são volumétricas;
- b) as observações de radiosondagem, utilizadas como referência, são contaminadas por erros, especialmente devido ao alto teor de umidade quando as sondas atravessam as nuvens;
- c) os desvios mais acentuados próximo à superfície e na região das tropopausa são principalmente causados pelas frequentes discontinuidades no campo de temperatura, que estão além do poder de resolução vertical do TOVS (Smith et al, 1979);
- d) próximo à superfície os erros são também causados por contaminações pelas nuvens baixas (McMillin and Dean, 1982), por contribuições significativas de radiancias da própria superfície, bem como pela heterogeneidade da superfície (Wark, 1983);
- e) na média estratosfera, os grandes desvios podem ser atribuídos à grande espessura da camada que dá origem à radiação (inabilidade de resolver a estrutura fina) e aos maiores erros nas medidas de radiosondagem nessa região (Wark, 1983).

Os perfis de temperatura do ponto de orvalho determinados por satélite (S) e radiosondagem (R) para os dias 18/12/86 e 17/02/86, são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4a. e 4b. As Figuras 4c e 4d mostram o desvio

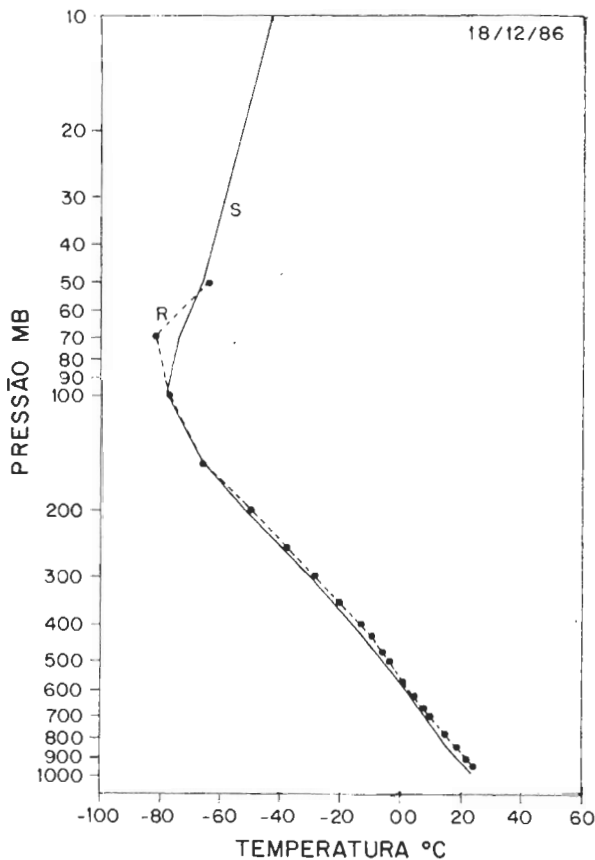


Figura 3a — Perfil vertical da temperatura determinada por satélite (S) e radiosondagem (R) no dia 18/12/86 em Bauru.

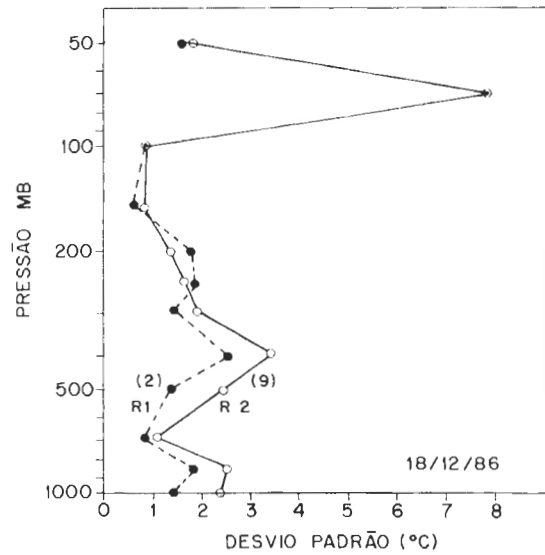


Figura 3b — Desvio padrão da temperatura em função do nível atmosférico para o dia 18/12/86, considerando raio R1 e 110 km e raio R2 de 220 km; entre parênteses encontra-se o número de perfis utilizados para o cálculo do desvio padrão.

padrão das temperaturas do ponto de orvalho dos dias 18 e 17, respectivamente, considerando os perfis TIVS dentro dos raios R1 e R2. Observa-se que o desvio padrão da Figura 4c é bem acentuado, porém o da Figura 4d é comparável ao encontrado por Eyre (1983). De maneira que, torna-se difícil saber se o maior desvio da Figura 4c é somente devido ao erro nas medidas por satélite.

Na Figura 5a são mostrados os perfis de temperaturas do Rio de Janeiro (22°S, 43°W) para o dia 17/12/86 obtidos com satélite (S) e radiosondagem (R) e na Figura 5b o desvio padrão considerando o perfil de radiosondagem como referência. Note-se que na Figura 5a os perfis de temperatura foram obtidos com diferença de 6 horas, enquanto que na Figura 3a, os perfis são simultâneos. Pelas Figuras 3b e 5b observa-se que os desvios são da mesma ordem de magnitude. Quanto maior a diferença no tempo entre os perfis de satélite e radiosondagem, maior deveria ser o desvio. Entretanto, algumas comparações com defasagem de 6 horas, indicam que essa diferença não é apreciável. Geralmente, comparações desta natureza são feitas com defasagem de até 3 horas, embora em certos estudos tenham sido utilizadas até 6 horas de defasagem (Philips et al., 1979), como no caso discutido acima.

Os mapeamentos térmicos do dia 18/12 para os níveis de 1000, 850, 500, 300 e 250 mb, são apresentados nas Figuras 6 (a, b, c, d, e), e as alturas geopotenciais para os níveis de 850, 500, 300 e 250 mb podem ser vistos nas Figuras 7 (a, b, c, d). Nas Figuras 8 (a e b) são apresentados o mapeamento do vento geostrófico em 500 e 300 mb, e na Figura 9, a carta sinótica d4 500 mb, traçada manualmente, com dados convencionais e imagens do satélite GOES-W. Pode-se observar das Figuras 8 e 9 que a circulação geral no nível de 500 mb obtida com sondagens TOVS é coerente com a da carta sinótica. Outro parâmetro impor-

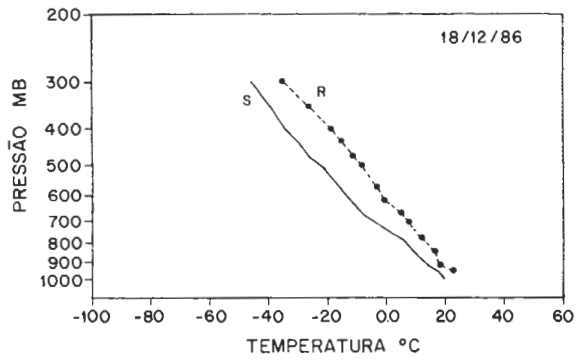


Figura 4a — Perfil vertical da temperatura do ponto de orvalho determinado por satélite (S) e radiossondagem (R) no dia 18/12/86 em Bauru.

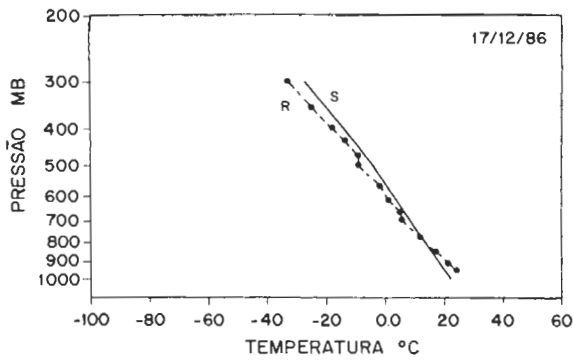


Figura 4b — Idem à Figura 4a, porém para o dia 17/12/86.

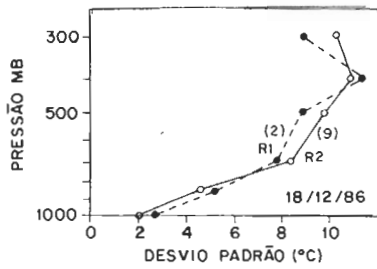


Figura 4c — Desvio padrão da temperatura do ponto de orvalho do dia 18/12/86, considerando os raios R1 e R2.

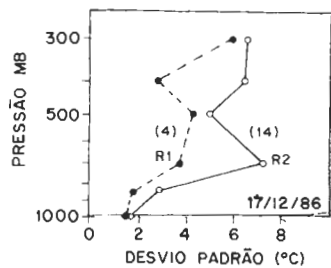


Figura 4d — Idem à Figura 4c, porém para o dia 17/12/86.

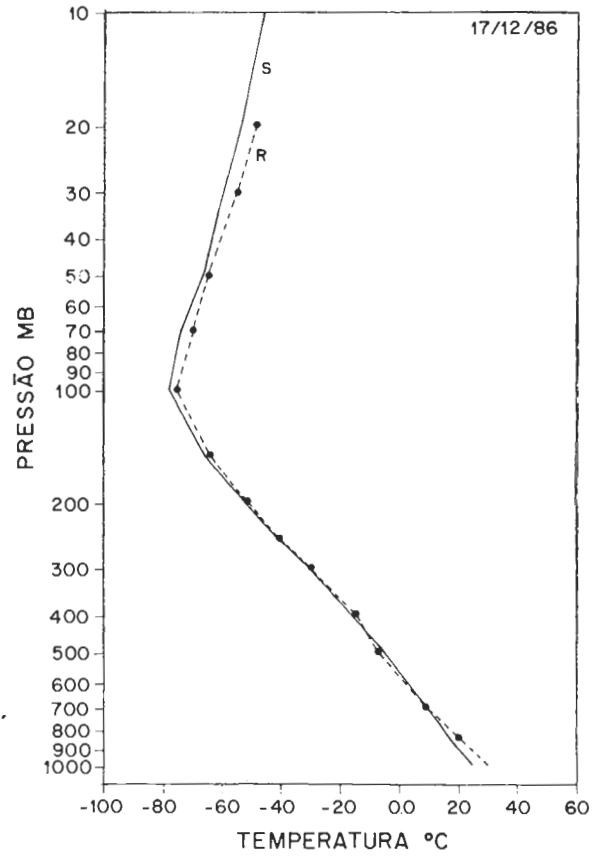


Figura 5a — Idem à Figura 4a, porém para o dia 17/12/86 no Rio de Janeiro.

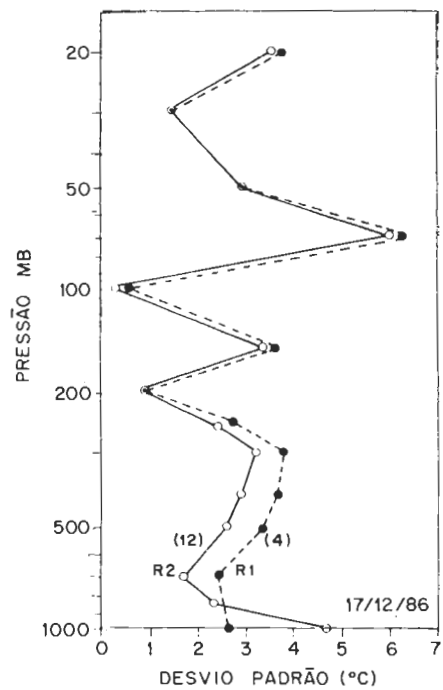


Figura 5b — Idem à Figura 3b porém para o dia 17/12/86.

tante derivado dos dados TOVS é a água precipitável e o seu mapeamento é mostrado na Figura 10. A imagem do satélite METEOSAT é mostrada na Figura 11 onde se observa que a região onde foi realizado o experimento de radiosondagem estava coberta por nuvens (Estado de

São Paulo). A análise qualitativa das Figuras 10 e 11 revelam que as regiões de máxima umidade concordam em algumas regiões, porém discordam em outras, de maneira que será necessário futuras comparações para uma conclusão significativa.

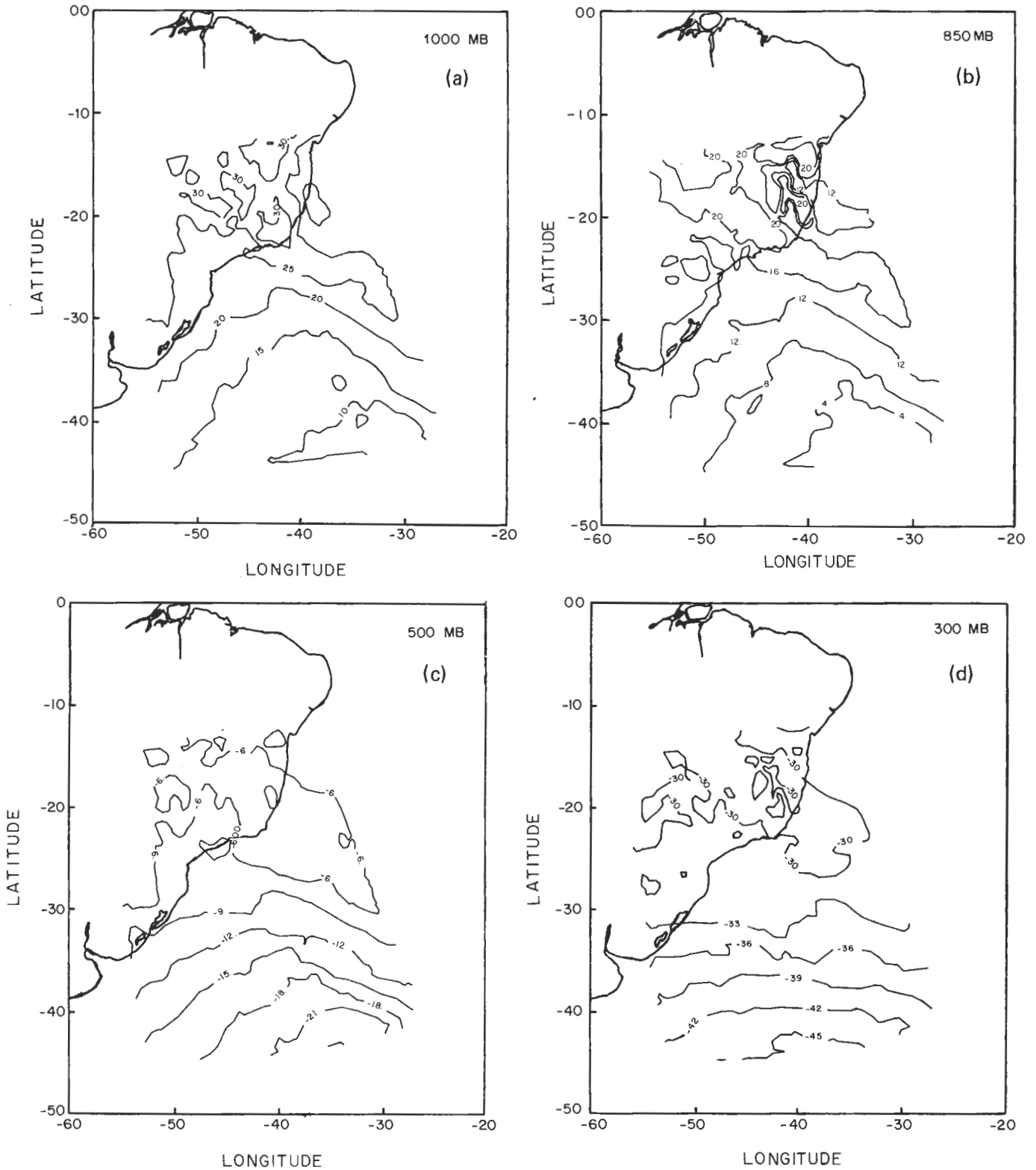


Figura 6a até 6e — Mapeamento térmico em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86. (continua...)

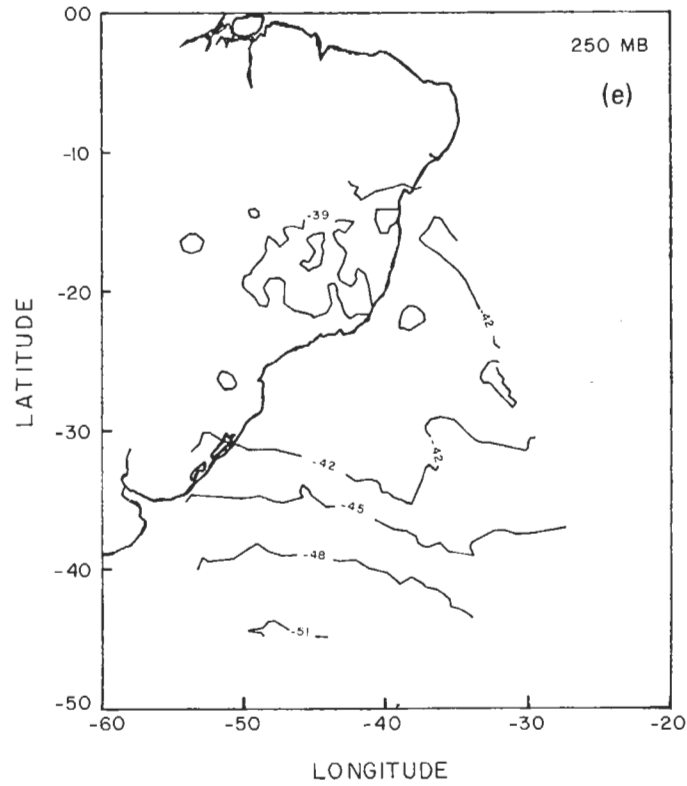


Figura 6e — Mapeamento térmico em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86. (continuação...)

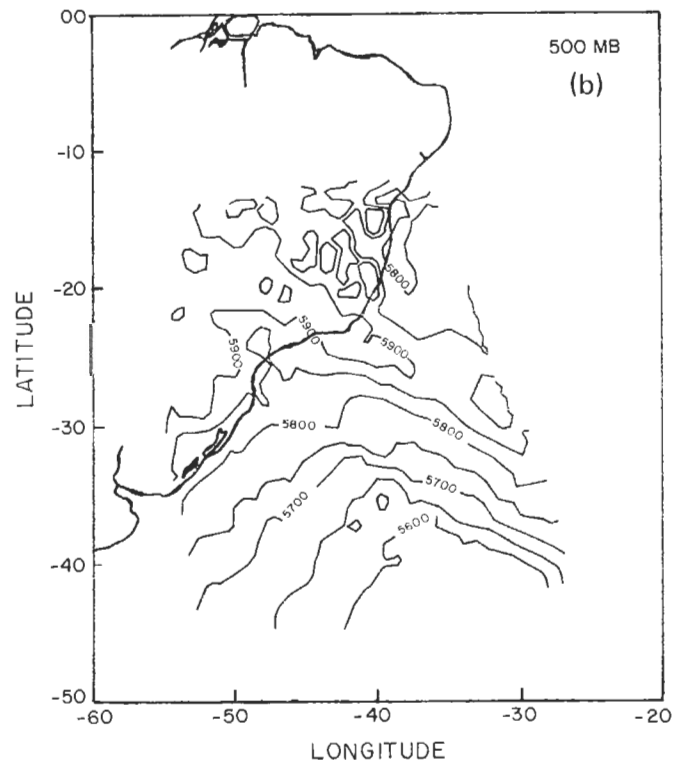
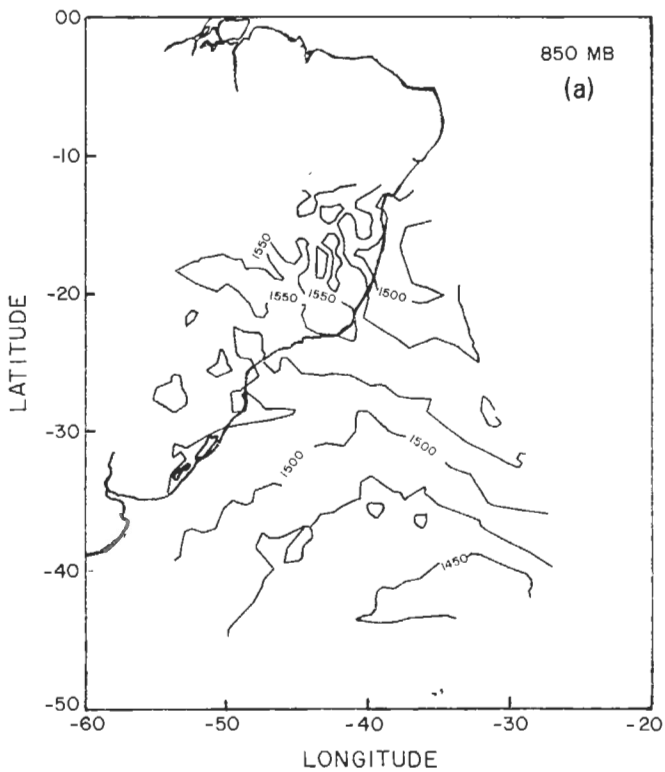


Figura 7a até 7d — Altura geopotencial (m) em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86. (continua...)

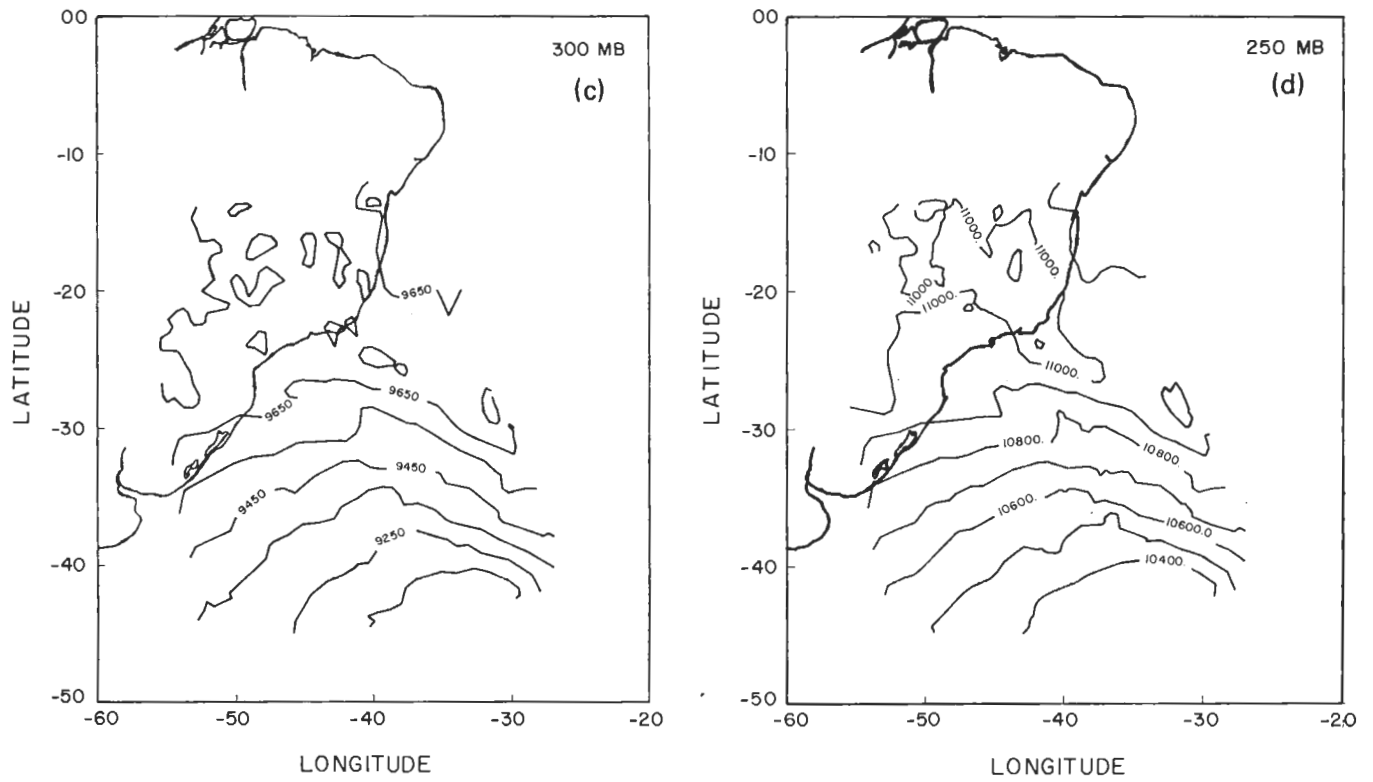


Figura 7a até 7d – (continuação...) Altura geopotencial (m) em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86.

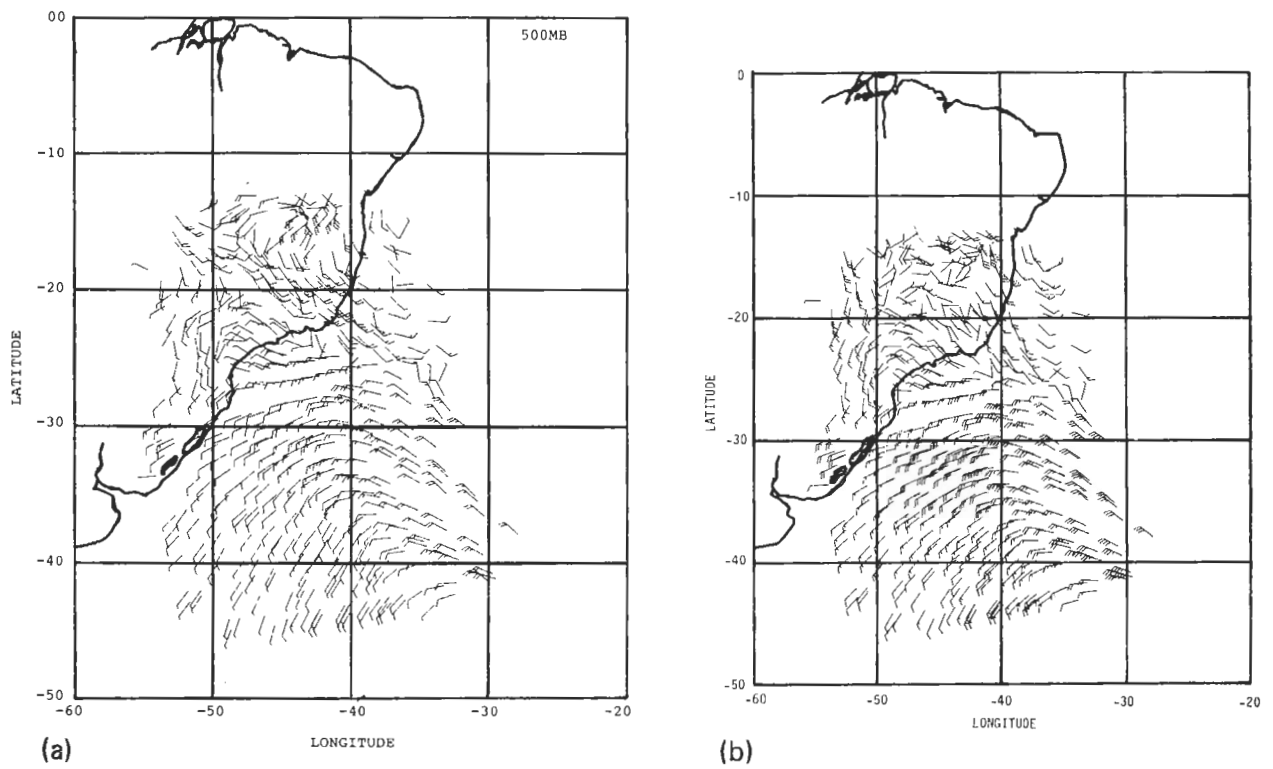


Figura 8a e b – Vento geostrófico nos níveis de 500 e 300 mb para o dia 18/12/86.

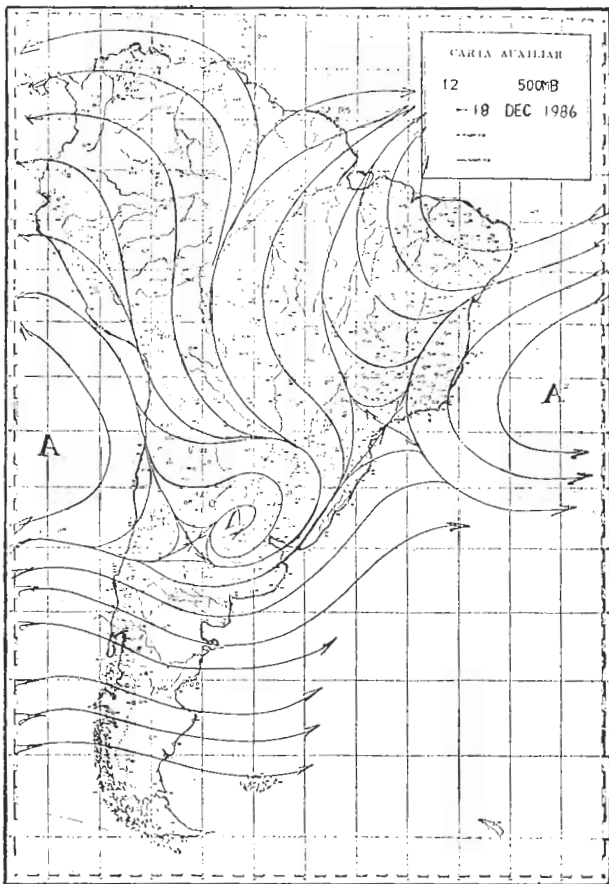


Figura 9 — Carta sinótica do nível de 500 mb para o dia 18/12/86.

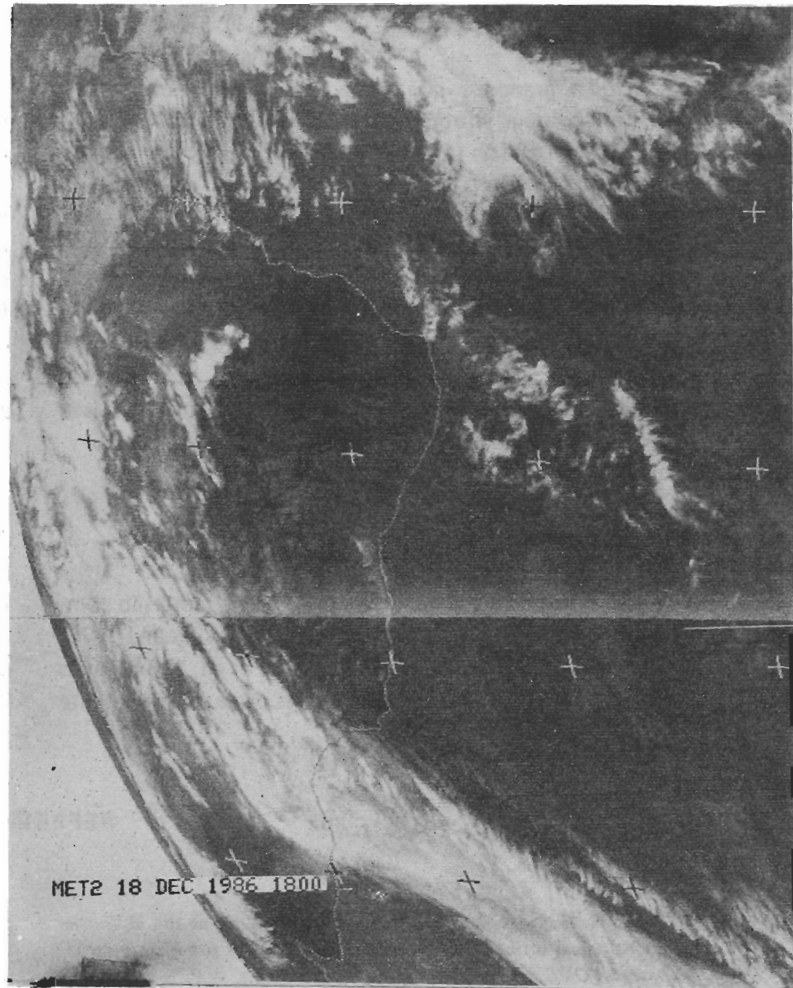


Figura 11 — Imagem do satélite METEOSAT do dia 18/12/86.

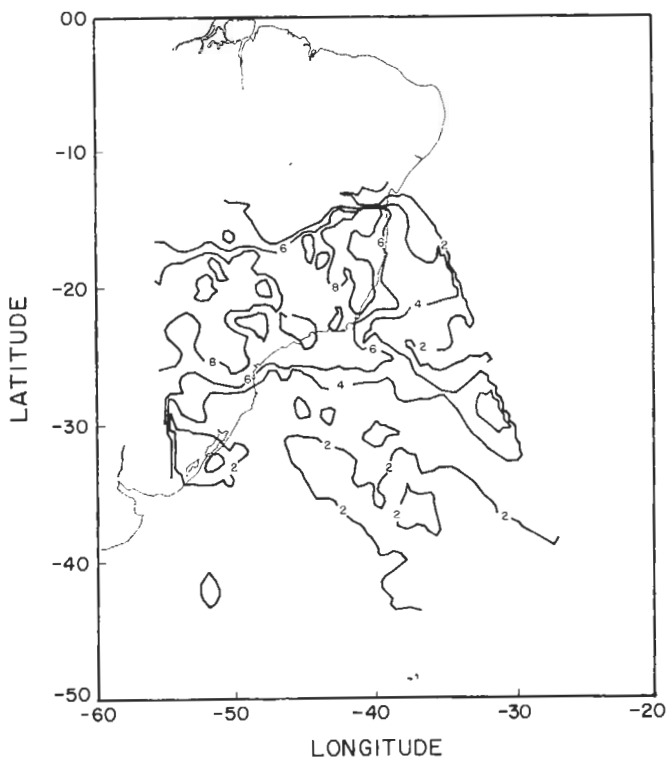


Figura 10 — Mapeamento de água precipitável total em cm para o dia 18/12/86.

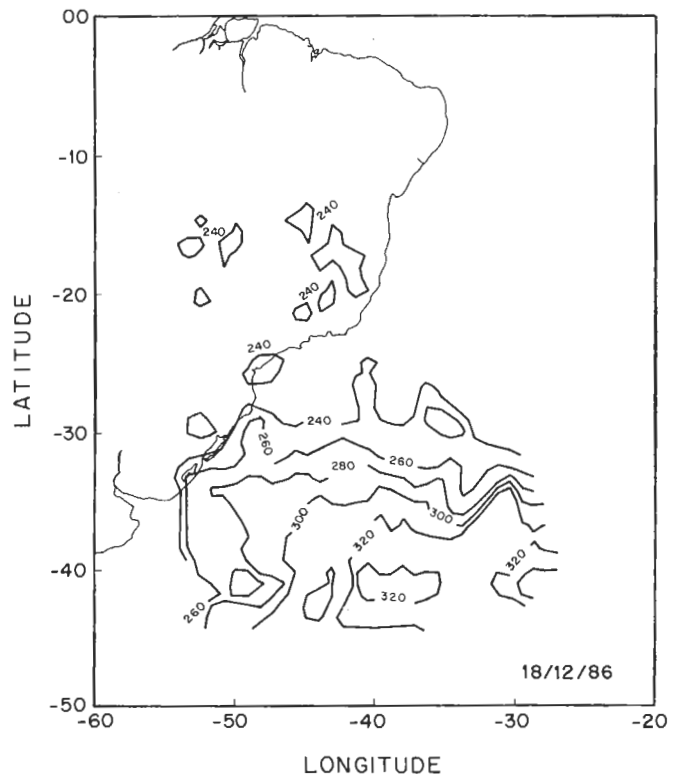


Figura 12 — Mapeamento de concentração total de ozônio em unidades Dobson do dia 18/12/86.

Outra grandeza que pode ser derivada dos dados TOVS é o conteúdo total de ozônio, mostrado na Figura 12 em unidades Döbson (1 UD = 0,001 atm cm). A medida do instrumento Döbson em Cachoeira Paulista (CP) fornece para esse dia 272 UD e a medida do satélite nessa região é de 229 UD, portanto cerca de 15% menor. Nesse caso também será necessário um número maior de comparações para a validação dos dados.

Finalmente, ressalta-se a importância de se conduzir um estudo de análise objetiva englobando os dados TOVS, para se comprovar o impacto dessas sondagens na previsão numérica de tempo para a América do Sul.

4. CONCLUSÕES

Os resultados são preliminares, porém como são comparáveis aos publicados na literatura (Philips *et al.*, 1979; Smith *et al.*, 1983; Wark, 1983; Susskind *et al.*, 1984), tudo indica a viabilidade da utilização destes produtos de satélite

para fins de pesquisa e previsões meteorológicas na região brasileira. Atualmente, centros meteorológicos operacionais de vários países (Menzel, 1983) estão processando os dados de satélite da série TIROS-N/NOAA para fins de previsão numérica de tempo. Assim, a operacionalização desse sistema apresenta grande potencial e importância devido à escassez de dados de ar superior, particularmente sobre o Hemisfério Sul.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru pelo apoio recebido à realização do Experimento TOVS/RADIOSSONDA, ao Sr. Nelson Arai pela revisão do texto e a todos aqueles que de uma forma ou outra colaboraram à apresentação do trabalho.

À FINEP/PNAE por ter possibilitado a realização do presente trabalho dentro da atividade de pesquisa do Projeto PROSAT.

REFERÊNCIAS

- EYRE, J.R. High resolution temperature retrievals at the U.K. meteorological office. *The technical Proceeding of the First International TOVS Study Conference*, Iglis, Austria, W.P. Menzel, Ed., 94-100, 1983.
- HO, C.S.N.; CABRAL, M.R.; YAMAZAKI, Y.; NAKAMURA, Y.; TANAKA, K. Procedimento dos dados HRPT dos satélites da série NOAA. *INPE-4372-PRE/1195*, set. 1987.
- MA, X.L.; SMITH, W.L.; WOOLF, H.M. Total ozone from NOAA satellites — a physical model for obtaining measurements with high spatial resolution. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23: 1309-1314, Sept. 1984.
- McMILLIN, L.M.; DEAN, C. Evaluation of a new operational technique for producing clear radiances. *J. Appl. Met.*, 21: 1005-1014, Jul. 1982.
- MENZEL, W.P. *The Technical Proceedings of the First International TOVS Study Conferences*, Iglis, Austria, W.P. Menzel, Ed., 352 pp, 1983.
- PHILIPS, N.; McMILLIN L.; GRUBER, A.; WARK, D. An evaluation of early operational temperature sounding from TIROS-N. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 60 (10): 1188-1197, Oct. 1979.
- SCHWALB, A. The TIROS-N/NOAA, A-G Satellite series NOAA, *Tech. Memo. NESS 95*, 1978.
- SMITH, W.L. Iterative solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere. *Applied Optics*, 9 (9): 1993-1999, set. 1970.
- SMITH, W.L.; WOOLF, H.M.; HAYDEN, C.M.; WARK, D.Q.; McMILLIN, L.M. The TIROS-N Operational Vertical Sounder. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 58: 1177-1187, oct., 1979.
- SMITH, W.L.; ZHOU, F.T. Rapid extraction of layer relative humidity, geopotential thickness, and atmospheric stability from satellite sounding radiometer data. *Applied Optics*, 21: 924-928, March. 1982.
- SMITH, W.L.; WOOLF, H.M.; HAYDEN, C.M.; SCHREINER, A.J.; LE MARSHALL, J.M. The physical retrieval TOVS export package. *The Technical Proceeding of the First International TOVS Study Conference*, Iglis, Austria, W.P. Menzel, Ed., 227-278, 1983.
- SUSSKIND, J.; ROSENFELD, J.; REUTER, D.; CHAHINE, M.T. Remote sensing of weather and climate parameters from HIRS2/MSU on TIROS-N. *J. Geophys. Res.*, 89 (D3): 4677-3697, Jun. 1984.
- YAMAZAKI, Y.; NAKAMURA, Y.; HO, C.S.N.; CABRAL, M.R.; TANAKA, K. Sondagem vertical da atmosfera. *INPE-4370-PRE/1195*, set. 1987.
- WARK, D.R. Validation of satellite derived atmospheric temperature and water vapor concentration using radiosonde and rocket-sond measurements. *Adv. Space Res.*, Vol. 2, nº 6, 49-58, 1983.