

MEDIDAS DE OZÔNIO TOTAL POR MEIO DE SATÉLITE NO SETOR BRASILEIRO

Y. NAKAMURA, Y. YAMAZAKI, M.R. CABRAL e C.H.S. NING

*Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
C.P. 515, 12201, São José dos Campos, SP, Brasil*

Preliminary results of total ozone are presented using data from the polar orbit TIROS/NOAA satellite data. The ozone amount was obtained from the 9.6 μm channel data of the High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS) sensor aboard the satellite, and received at INPE's Meteorological Satellite Reception Station at Cachoeira Paulista. Results are compared with other satellite observation and Dobson spectrophotometer measurements obtained at Cachoeira Paulista and Natal.

São apresentados resultados preliminares de ozônio total derivados a partir de dados do satélite de órbita polar da série TIROS/NOAA. A quantidade de ozônio foi obtida a partir de observação da radiação, em 9,6 μm , pelo sensor HIRS (High Resolution Infrared Radiation Sounder), a bordo do satélite, e recebida na Estação de Recepção de Dados de Satélites Meteorológicos do Instituto de Pesquisas Espaciais em Cachoeira Paulista. Os resultados são comparados com observações de outros satélites e com medidas de espectrofotômetros Dobson instalados em Cachoeira Paulista e Natal.

INTRODUÇÃO

O ozônio é um constituinte atmosférico minoritário, concentrado principalmente na estratosfera. Ele é muito importante por absorver a radiação ultravioleta do Sol, protegendo assim a biosfera contra os efeitos danosos dessa radiação, bem como por ser o principal responsável pela estrutura térmica da baixa estratosfera e, portanto, indiretamente pelos processos físicos da circulação atmosférica.

Não obstante a natureza tenda a prover um equilíbrio entre a produção e a destruição do ozônio, eventualmente por influências antropogênicas ou por outros fatores, sua concentração apresenta variabilidades tanto temporais como espaciais. As variabilidades espaciais são relativamente grandes (Kirchhoff et al., 1985; Sahai et al., 1982). É importante salientar que, segundo os estudos de Kirchhoff et al. (1983), o ozônio apresenta também características regionais distintas. Dütsch (1981) apresenta em seu trabalho discussões sobre possíveis consequências como resultado da variação na concentração de ozônio, no clima e no sistema biológico terrestre. Um dos problemas preocupantes sobre o ozônio é a redução de sua concentração, causada pela liberação de clorofluorcarbonos (CFC) na atmosfera nos processos e pelos produtos finais de industrialização como os propelentes do tipo aerossol, aparelhos de refrigeração e embalagens plásticas em geral. Isso porque o CFC, ao encontrar os raios ultravioletas, libera cloro que, por sua vez, ao encontrar o ozônio, produz monóxido de cloro e oxigênio molecular, destruindo o ozônio. Um outro problema que vem despertando mais atenção, embora tenha sido descoberto em 1985 através de medições fei-

tas na base antártica da Baía de Halley por pesquisadores ingleses, é o assim conhecido *buraco de ozônio*. Esse buraco, resultante da brusca redução na concentração de ozônio que ocorre na Antártica em toda primavera austral (setembro/outubro), o qual tende a desaparecer durante o verão, vem atraindo esse interesse particular devido à sua extensão, que hoje é da ordem do próprio continente antártico, estar aumentando a cada ano desde a sua descoberta (Krueger et al., 1987; Kirchhoff et al., 1987a; Solomon et al., 1986; Mahlman & Feels, 1986; McElroy et al., 1986).

Apesar das pesquisas sobre o ozônio terem sido intensificadas ao longo desses últimos anos, os poucos resultados observacionais, particularmente sobre o Hemisfério Sul, têm sido um grande obstáculo à realização de estudos específicos mais profundos como estudos de circulação e monitoramento de tendências globais. Essas poucas observações disponíveis são normalmente feitas em estações de superfície utilizando espectrofotômetros Dobson e fotômetros de filtro M-83. Esses equipamentos, instalados em várias dezenas de estações de superfície espalhadas pelo globo, principalmente no Hemisfério Norte, realizam observações sistemáticas, algumas das quais desde 1925. Dados coletados por essas estações de superfície têm sido utilizados em importantes estudos como o de Dütsch (1974) sobre a variação global da quantidade total e distribuição vertical de ozônio.

No Brasil, em particular, as observações convencionais vêm sendo conduzidas com espectrofotômetros Dobson instalados desde maio de 1974 em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,00°W) e desde novembro de 1978 em Natal (6,0°S, 35,00°W). Dentre os vários estudos já realizados com esses dados, destaca-se o de Sahai et

al. (1982), com observações feitas até o ano de 1981, para a apresentação dos aspectos mais significativos do ozônio total medido e a comparação com aquelas feitas em outras estações de alta e baixa latitudes.

Dentre algumas observações não-convencionais realizadas no Brasil, destaca-se aquela realizada sobre a região de Natal, dentro de um programa de cooperação formalizada em 1978 entre o INPE e a NASA, utilizando sensores constituídos por células de concentração eletroquímica (CCE), lançados em balões atmosféricos, e sensores ópticos a bordo de foguetes. Segundo os estudos realizados por Kirchhoff et al. (1981, 1983) e Logan & Kirchhoff (1986), essas observações revelaram uma alta concentração de ozônio sobre Natal e uma grande variação sazonal no ozônio troposférico, quando comparadas com observações realizadas em outras regiões equatoriais. Além dessas observações mencionam-se aquelas realizadas durante as campanhas do Experimento Troposférico Global sobre o Amazonas, em cooperação com a NASA, cujos trabalhos foram publicados por Kirchhoff (1986, 1987a), Kirchhoff et al. (1987b) e Browell et al. (1987), bem como as medições feitas a bordo do avião Bandeirante instrumentado entre São Paulo e Curitiba (Kirchhoff et al., 1985).

Com o advento das modernas tecnologias espaciais do monitoramento ambiental por meio de sensores a bordo de satélites, a década de 70 representou o início de uma nova fase para o sistema de aquisição de dados de ozônio. Com os dados obtidos, por exemplo, entre 1970 e 1977 pelo sensor BUV (Backscattered Ultraviolet) do Nimbus 4, Hilsenrath & Schlesinger (1981) e Tolson (1981) concluíram importantes estudos que envolvem uma extensa cobertura espacial e temporal, corroborando alguns estudos anteriores feitos com as poucas observações disponíveis medidas em estações de superfície. Em 1978, com o lançamento do Nimbus 7, instrumentado com o SBUV (Solar Backscattered Ultraviolet) e com o TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), novos estudos foram realizados, os quais envolviam principalmente algoritmos de derivação (Fleig et al., 1981; Schneider et al., 1981) e validação de dados (Klenk et al., 1983; Bhatta et al., 1984).

Os satélites ambientais da série TIROS/NOAA, que entraram em operação em 1979, carregam a bordo os instrumentos TOVS (Tiros Operational Vertical Sonder) (Smith et al., 1979; Lauritson et al., 1979), que incluem no sondador de alta resolução de radiação infravermelha (HIRS) um canal (9,6 μm), que permite derivação de dados de ozônio. Esses satélites, colocados em operação aos pares, um com órbita ascendente e outra descendente, asseguram uma constante e importante fonte de dados de ozônio, especialmente pela sua ampla cobertura espacial e temporal. Resultados preliminares obtidos com algoritmos de processamento de dados TOVS, implantados no INPE, e comparações com as observações convencionais realizadas no Brasil serão apresentados a seguir.

METODOLOGIA

A radiação do canal em 9,6 μm é utilizada para o cálculo da concentração total de ozônio empregando o método de Ma et al. (1984). A concentração de ozônio é dada pela solução inversa da equação de transferência radiativa.

$$O_3(p) = O_3^i(p) \exp \frac{T_B(\nu) - T_B^i(\nu)}{\int_0^{P_s} W^i(\nu, p) \frac{dp}{p}}$$

onde:

$$W^i(\nu, p) = \frac{\partial B(\nu, T)/\partial T}{\partial B(\nu, T_B)/\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \ln p} \cdot \frac{\partial Z(\nu, p)}{\partial \ln O_3^i(p)}$$

$O_3(p)$ é a concentração de ozônio e o índice i indica a i -ésima estimativa, $T_B(\nu)$ é a temperatura de brilho medida, $T_B^i(\nu)$ é a temperatura de brilho calculada para a i -ésima estimativa do perfil de ozônio, B é a função de Planck, τ é a transmitância, ν é a frequência, T é a temperatura, p é a pressão atmosférica e o índice se refere à superfície. A equação é resolvida de forma iterativa até que a diferença entre a temperatura de brilho medida de ozônio e a calculada seja menor que o nível de ruído (aproximadamente 0,2°C), quando então $O_3(p) \approx O_3^i(p)$. A quantidade total de ozônio é obtida pela integração vertical do perfil da razão de mistura. O perfil inicial de concentração de ozônio é obtido empregando uma equação de regressão, obtida a partir de um grande volume de dados de ozonossondas e radiancias infravermelhas provenientes de dióxido de carbono estratosférico (canais 1 - 4 do HIRS). Assim, o perfil inicial é determinado a partir da correlação ozônio-temperatura, e a radiancia do canal de ozônio é utilizada para estimar a concentração total de ozônio. O processo de solução descrito acima é conhecido como método físico e é aplicável mesmo com a presença de nuvens, pois suas influências são minimizadas na derivação do ozônio (Ma et al., 1984). O método leva ainda em consideração a absorção por linhas de vapor de água e por contínuo de vapor de água. A absorção por outros gases como N_2O são desprezíveis (Valley, 1965). O efeito dos aerossóis é também pequeno (Weinreb et al., 1981; Stowe & Fleming, 1980). A absorção pelo aerossol atmosférico para a radiancia de 9,6 μm é cerca de 1 a 2%, segundo Paltridge & Platt (1976). A precisão do método é da ordem de 5% para quaisquer condições de nuvens (Ma et al., 1984).

Para a redução de dados de ozônio foram utilizados os programas que constituem o conjunto do sistema DNEXPOR desenvolvido pela CIMSS (Cooperation Institute for Meteorological Satellite Studies, Ma-

dison, WI, USA) (Smith et al., 1983), adaptados, testados e implantados no computador Burroughs 6800 do INPE por Ning et al. (1986).

RESULTADOS

Cada passagem de satélite fornece resultados numa área de aproximadamente 2000 km de longitude por 3000 km de latitude. O conteúdo total de ozônio é fornecido a cada 60 km em média.

As medidas de ozônio total dos dias 15/09/86, 17/09/86, 18/12/86 e 19/12/86 são mostrados na Fig. 1, onde a unidade utilizada é a unidade Dobson (U.S. = 0,001 atm.cm). O aumento de ozônio na direção de altas latitudes está coerente com resultados já conhecidos (Dütsch, 1970, 1974; Prabhakara et al., 1976; Tolson, 1981; Hilsenrath & Schlesinger, 1981).

A Tabela 1 mostra o conteúdo total de ozônio obtido com espectrofotômetro Dobson em Cachoeira Paulista (CP) e o valor obtido por meio de satélite. Este é um valor médio, considerando as medidas do satélite dentro de uma região de 220 km de raio, com centro em CP. O número entre parênteses indica o número de valores utilizados na média. As passagens NOAA-9 em CP foram às 15:00h local e as medidas de espectrofotômetro Dobson estão no intervalo ± 2 h da passagem do satélite. O desvio padrão foi calculado considerando o valor obtido por meio do espectrofotômetro Dobson como verdadeiro e considerando os valores do satélite dentro da região acima citada. O número de valores de ozônio utilizados no cálculo do desvio é igual ao número de valores utilizados na média. Da Tabela 1, observa-se que os valores de ozônio obtidos por meio de satélite são cerca de 15 a 20% menores que os obtidos pela estação terrestre. O erro nos resultados de TOVS é da ordem de 5%, segundo Ma et al. (1984); portanto, será aquém da diferença observada.

Sahai et al. (1982), analisando os dados de 1974 a 1981 do espectrofotômetro Dobson instalado em CP, encontraram uma média de 274 U.D.; portanto, ainda

bem acima das medidas do satélite encontradas na Tabela 1. É oportuno lembrar que o ozônio total é máximo na primavera (caso dos dois primeiros valores da tabela) e mínimo no outono. Uma análise de sete anos de BUV, realizada por Hilsenrath & Schlesinger (1981), apresenta um valor aproximado de 270 U.D. para setembro e um valor em torno de 260 U.D. para dezembro, na latitude de 20°. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho são da ordem de 10% menores. Bowman & Krueger (1985) apresentam uma média de quatro anos de ozônio total observada com TOMS a bordo do Nimbus 7. Para a região de 20° de latitude, em sua Figura 3 mostram uma média em torno de 260 U.D.

Assim, as primeiras comparações mostram os resultados obtidos no presente trabalho menores que as medidas do espectrofotômetro Dobson ou as medidas de BUV e TOMS feitas por meio de satélites. Estudos de Bhartia et al. (1984) demonstram que, em média, os valores de ozônio medidos com TOMS e os medidos com SBUV são respectivamente cerca de 6,6% e 8,3% menores que as medidas de Dobson. A maior parcela de erro parece ser causada pelo coeficiente de absorção do ozônio utilizado na região ultravioleta.

A Fig. 1 mostra que os dados de satélite vão aproximadamente até 10° de latitude e não atingem a região de Natal; porém, é oportuno fazer uma comparação aproximada com dados de 1979 a 1981 do espectrofotômetro Dobson instalado em Natal e publicado por Sahai et al. (1982). Esses autores encontraram uma média de ozônio total de 275 U.D., enquanto a Fig. 1 mostra para a região de 10° de latitude um valor aproximado de 240 U.D.. Kirchhoff et al. (1983) fizeram medidas a bordo de balões, entre 1979 e 1981, e encontraram para o ozônio total uma média de 286 U.D. em Natal. As medidas de satélites com BUV (Hilsenrath & Schlesinger, 1981) fornecem para essa região uma média de 250 U.D.. A causa da alta concentração de ozônio na região de Natal não está, ainda, bem estabelecida, mas a causa pode ser a queima de biomassa (Kirchhoff et al., 1983; Logan & Kirchhoff, 1986).

Tabela 1 – Comparação entre ozônio total obtido por meio de satélite e espectrofotômetro Dobson em Cachoeira Paulista.

Data	Ozônio Total (U.D.) Satélite	Ozônio Total (U.D.) Dobson - CP	Desvio Padrão (U.D.)	Desvio em %
15/09/86	244,0 (9)	320,0	59,0	19
17/09/86	245,0 (7)	291,0	47,0	16
18/12/86	229,0 (11)	272,0	44,0	16
19/12/86	235,0 (6)	280,0*	45,0	16

* Valor médio do mês devido à falta de dados no dia 19/12/86.

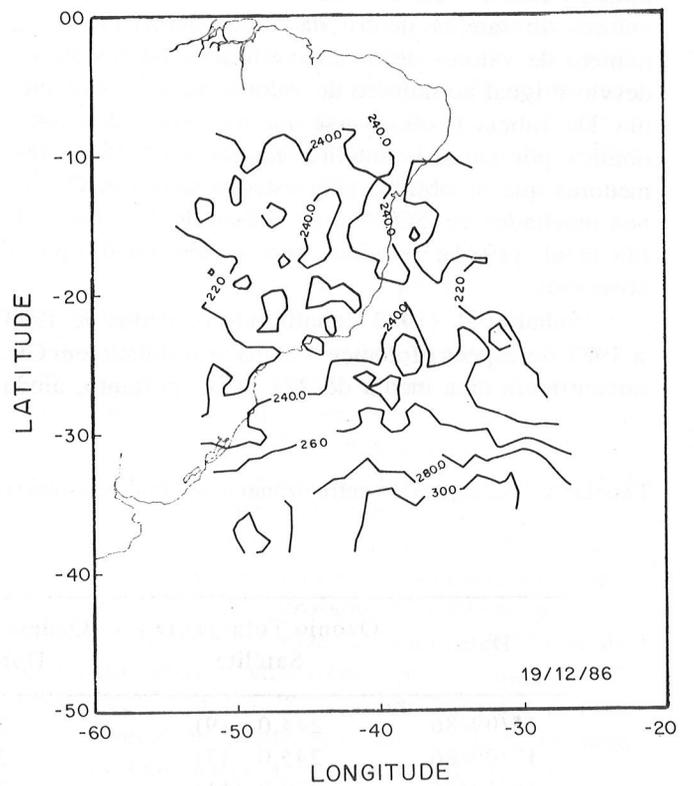
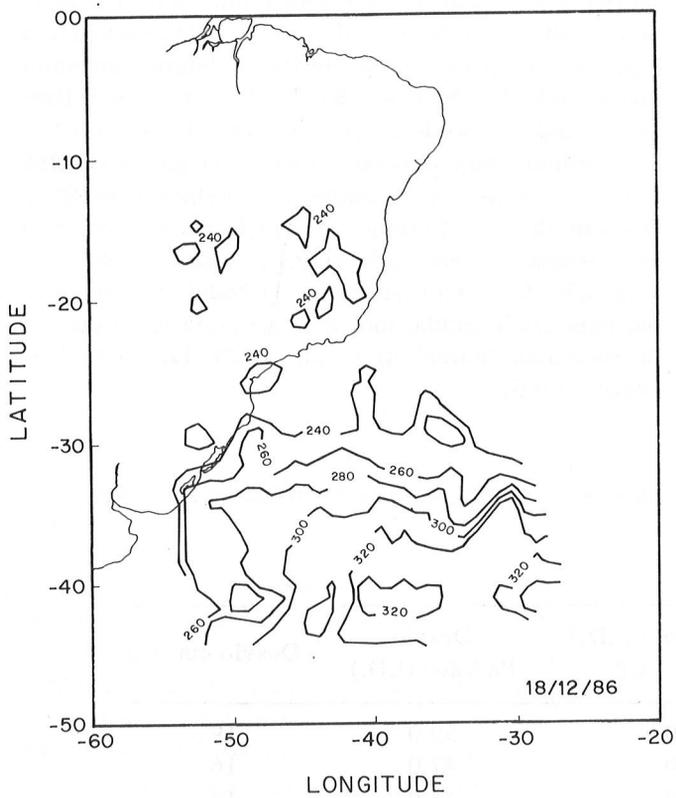
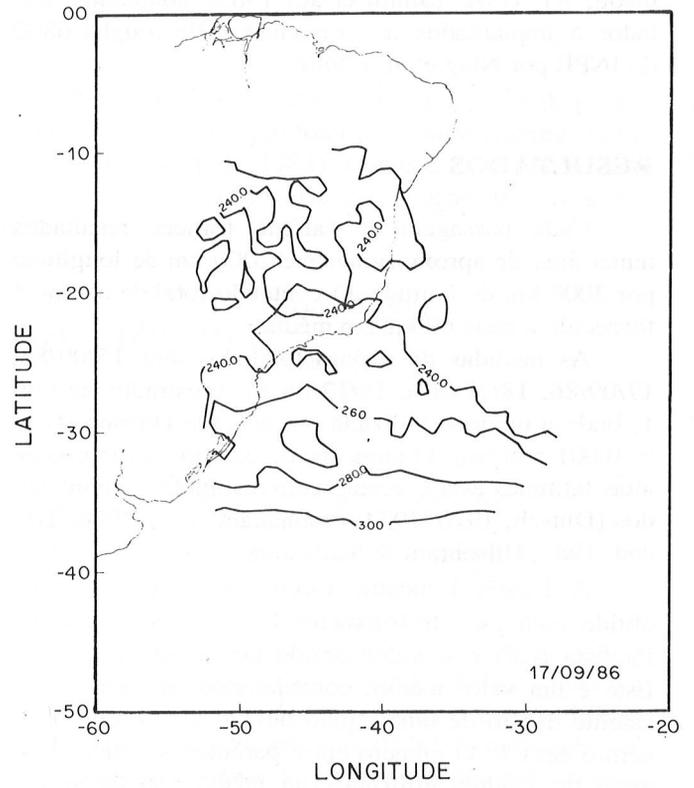
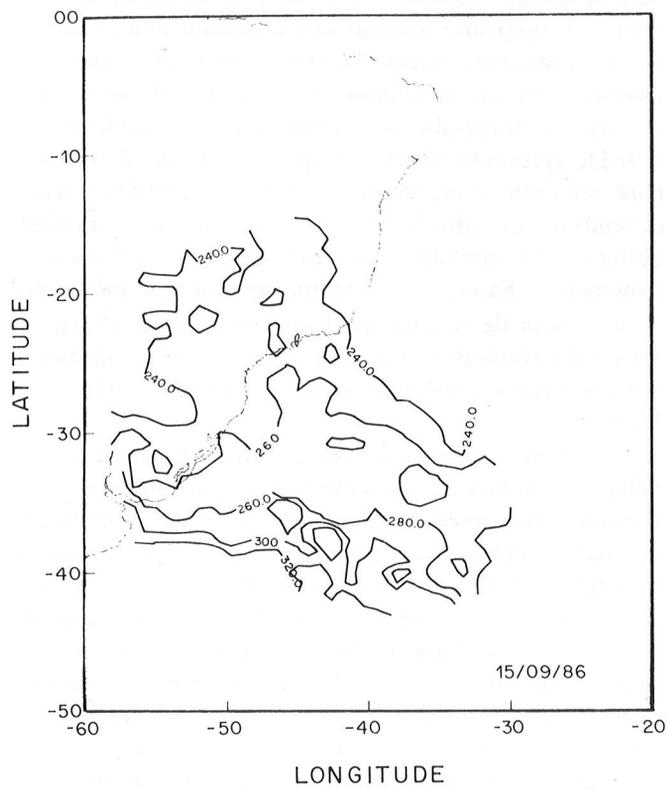


Figura 1 – Conteúdo total de ozônio (U.D.) obtido por meio de satélite nos dias 15/09/86, 17/09/86, 18/12/86 e 19/12/86.

CONCLUSÕES

As comparações preliminares das medidas de ozônio total realizadas por meio de satélite indicam valores da ordem de 15 a 20% menores que os observados com espectrofotômetro Dobson em Cachoeira Paulista, e cerca de 10% menores quando comparadas com as médias das medidas de BUV ou TOMS feitas por meio de satélites. Para a obtenção de resultados mais conclusivos é necessária a coleta de dados mais contínuos, a qual está atualmente sendo implementada. Embora a diferença acima entre as medidas de satélite

e de instrumento Dobson seja ainda considerável, as medidas de satélite são de grande importância e interesse pela sua extensa cobertura espacial e temporal, principalmente no Hemisfério Sul, onde são poucas as estações que medem rotineiramente o ozônio total.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos ao Dr. Volker W.J.H. Kirchoff pelas inúmeras sugestões e críticas a este trabalho e ao Dr. Yogeshwar Sahai, que gentilmente nos cedeu os dados do espectrofotômetro Dobson.

REFERÊNCIAS

- BHARTIA, P.K., KLENK, K.F., WONG, C.K., GORDON, D. & FLEIG, A. - 1984 - Intercomparison of the NIMBUS 7 SBUV/TOMS total ozone data sets with Dobson and M83 results. *J. Geophys. Res.*, **89**: 5239-5247.
- BOWMAN, K.P. & KRUEGER, A.J. - 1985 - A global climatology of total ozone mapping spectrometer. *J. Geophys. Res.*, **90**: 7967-7976.
- BROWELL, E.V., GREGORY, G.L., HARRISS, R.C. & KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1987 - Tropospheric ozone and aerosols distributions across the Amazon Basin. *J. Geophys. Res.*, submetido para publicação.
- DÜTSCH, H.U. - 1970 - Atmospheric ozone - a short review. *J. Geophys. Res.*, **75**: 1707-1712.
- DÜTSCH, H.U. - 1974 - The ozone distribution in the atmosphere. *Can. J. Chem.*, **52**: 1491-1504.
- DÜTSCH, H.U. - 1981 - Ozone research, past-present-future. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **62**: 213-217.
- FLEIG, A.J., KLENK, K.F., BHARTIA, P.K., LEE, K.D., WELLEMAYER, C.G. & KAVEESHWAR, V.G. - 1981 - Vertical ozone profile results from the Nimbus-4 BUV data. Preprints Fourth Conf. on Atmospheric Radiation, Amer. Meteorol. Soc., 20-26.
- HILSEN RATH, E. & SCHLESINGER, B.M. - 1981 - Total ozone seasonal and interannual variations derived from the 7 years Nimbus-4 BUV data set. *J. Geophys. Res.*, **86**: 12087-12096.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., SAHAI, Y. & MOTTA, A.G. - 1981 - First ozone profiles measured with ECC sondes at Natal (5,9°S, 35,2°W). *Geophys. Res. Lett.*, **8**: 1171-1172.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., HILSEN RATH, E., MOTTA, A.G., SAHAI, Y. & MEDRANO-B, R.A. - 1983 - Equatorial ozone characteristics as measured at Natal (5,9°S, 35,2°W). *J. Geophys. Res.*, **88**: 6812-6818.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., SAHAI, Y. & SILVA DIAS, P.L. - 1985 - Medidas de ozônio a bordo do avião Bandeirante do INPE. *Revista Brasileira de Geofísica*, **4**: 21-26.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1986 - Ground based ozone measurements in an equatorial rainforest. Spring AGU Meeting, Baltimore, 17-23.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1987 - Surface ozone measurements in Amazonia. *J. Geophys. Res.*, aceito para publicação.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., MOTTA, A.G. & AZAMBUJA, S.O. - 1987a - Camada de ozônio - um filtro ameaçado. *Ciência Hoje*, nº 28, 5: 29-33.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., BROWELL, E.V. & GREGORY, G.L. - 1987b - Ozone profile measurements in Amazonia. *J. Geophys. Res.*, submetido para publicação.
- KLENK, K.F., BHARTIA, P.K., HILSEN RATH, E. & FLEIG, A.J. - 1983 - Standard ozone profiles from balloon and satellite data sets. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22**: 2012-2022.
- KRUEGER, A.J., SCHOEBERL, M.R. & STOKARSKI, R.S. - 1987 - TOMS observations of total ozone in the 1986 Antarctic Spring. *Geophys. Res. Lett.*, **14**: 527-530.
- LAURITSON, L., NELSON, G.J. & PORTO, F.W. - 1979 - Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers, NOAA Tech. Memo. NESS 107.
- LOGAN, J.A. & KIRCHHOFF, V.W.J.H. - 1986 - Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, **91**: 7875-7881.
- MA, X.L., SMITH, W.L. & WOOLF, H.M. - 1984 - Total ozone from NOAA satellites - a physical model for obtaining measurements with high spatial resolution. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **23**: 1309-1314.
- MAHLMAN, J.D. & FEELS, S.B. - 1986 - Antarctic ozone decreases: A dynamical cause? *Geophys. Res. Lett.*, **13**: 1316-1319.
- McELROY, M.B., SALAWITCH, R.J., WOFSY, S.C. & LOGAN, J.A. - 1986 - Antarctic ozone: reductions due to synergistic interactions of chlorine and bromine. *Nature*, **321**: 759-762.
- NING, C.H.S., CABRAL, M.R., YAMAZAKI, Y., NAKAMURA, Y. & TANAKA, K. - 1986 - Processamento dos dados RHPT dos satélites da série NOAA. IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília.
- PALTRIDGE, G.W. & PLATT, C.M.R. - 1976 - Radiative processes in Meteorology and Climatology. Elsevier Scientific Publishing Co., 318 pp.
- PRABHAKARA, C., RODGERS, E.B., CONRATH, B.J., HANEL, R.A. & KUNDE, V.G. - 1976 - The Nimbus 4 infrared spectroscopy experiment 3. Observations of the lower stratospheric thermal structure and total ozone. *J. Geophys. Res.*, **81**: 6391-6399.
- SAHAI, Y., KANE, R.P. & TEIXEIRA, N.R. - 1982 - Low-latitude total ozone measurements in the Brazilian sector. *Pageoph.*, **120**: 615-624.
- SCHNEIDER, W.H., BHARTIA, P.K., KLENK, K.F. & MATEER, C.L. - 1981 - An optimum statistical technique for ozone profile retrieval time backscattered UV radiances. Preprints Fourth Conf. On Atmospheric Radiation, Toronto, AM. Meteorol. Soc., 33-37.
- SMITH, W.L., WOOLF, H.M., HAYDEN, C.M., MARK, D.Q. & McMILLIN, L.M. - 1979 - The TIROS-N operational vertical sounder. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **58**: 1177-1187.
- SMITH, W.L., WOOLF, H.M., HAYDEN, C.M., SCHREINER, A.J. & MARSHALL, J.M. - 1983 - The

- physical retrieval TOVS export package. The Technical Proceeding of the First International TOVS Study Conference, Igls, Austria, W.P. Menzel, Ed., 227-278.
- SOLOMON, S., GARCIA, R.R., ROWLAND, F.S. & WUEBBLES, D. – 1986 – On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, **321**: 755-758.
- STOWE, L.L. & FLEMING, H.E. – 1980 – The error in satellite retrieved temperature profiles due to the effects of atmospheric aerosol particles. *Remote Sensing of Environment*, **9**: 57-64.
- TOLSON, R.H. – 1981 – Spatial and temporal variations of monthly mean total columnar ozone derived from 7 years of BUV data. *J. Geophys. Res.*, **86**: 7312-7330.
- VALLEY, S.L. (ed.) – 1965 – Handbook of Geophysics and Space Environment. AFCRL, Cambridge, MA.
- WEINREB, M.P., FLEMING, H.E., McMILLIN, L.M. & HEUNDORFFER, A.C. – 1981 – Transmittances for the TIROS Operation Vertical Sounder. NOAA Tech. Rep. NES 85, U.S. Dept. Commerce, Washington, DC.

Versão original recebida em Dez./87
Versão final, em Dez./88