



Análise do Ozônio Troposférico sobre o Observatório Espacial do Sul de 1996 a 2000

Damaris K. Pinheiro¹, Robinson L. Manfro^{1,2}, Rafael Peres^{1,2}, Samara Carbone^{1,2}, Caroline Bertagnolli^{1,2}, Nelson J. Ferreira³ e Nelson J. Schuch². ¹Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, ²Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, ³Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE – MCT.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

Dentro da Parceria entre o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM e o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, sondagens atmosféricas para medida de perfis de ozônio troposférico e estratosférico tem sido desenvolvidas no Observatório Espacial do Sul (29,4°S, 53,8°W) desde 1996. Neste trabalho são analisadas 50 sondagens lançadas de novembro de 1996 a **dezembro de 2000**. Foram analisadas todas as sondagens que atingiram a altitude mínima de 17,5 km, a altitude da tropopausa sobre a região. A variação sazonal de ozônio troposférico no Observatório Espacial do Sul é ao redor de 55%. A média do ozônio troposférico no período é $31,3 \pm 5,7$ UD (máximo em outubro de 40,2 UD e mínimo em março de 22,9 UD). O ozônio troposférico representa aproximadamente 12% da coluna total de ozônio (9% em março e 15% em outubro). Cerca de 62 % das sondagens apresentaram picos secundários de ozônio na troposfera. A altitude média da presença dos picos está ao redor 3,3 km, mas houve ocorrência de picos numa faixa de 0,9 a 6,1 km. A média da pressão parcial de ozônio nesta extensão de altitude sem os picos é $19,5 \pm 3,5$ μ hPa, enquanto que com os picos a média é de $38,8 \pm 10,6$ μ hPa. A distribuição sazonal dos picos é desigual, ocorrendo principalmente em janeiro, novembro e dezembro, com 100%, 91% e 70% das sondagens mensais, respectivamente.

Introdução

O ozônio é um importante gás da atmosfera terrestre, especialmente na estratosfera, onde absorve radiação solar ultravioleta, aquecendo a atmosfera; ele apresenta uma grande variabilidade no espaço e no tempo, especialmente na troposfera onde o tempo de residência é curto.

A distribuição vertical de ozônio é determinada desde os anos 30 por medidas do tipo Umkehr e medidas em balões (Whitten and Prasad, 1985), mais esporadicamente são efetuadas medidas com foguetes e, nas últimas décadas, observações com satélites. O ozônio total tem sido monitorado na superfície e por satélites nas últimas décadas, com uma cobertura global dos instrumentos em satélites (Herman et al., 1993). Observações de satélites estão determinando perfis

verticais de ozônio na alta atmosfera com precisão crescente (McPeters et al., 1997; WMO, 1998; Kelder e Eskes, 2004). Contudo, perfis de ozônio medidos *in-situ* por ozoniosondas a bordo de balões são obtidos principalmente no Hemisfério Norte (Thompson et al., 2003a). Não existem muitas estações de sondagem de ozônio no Hemisfério Sul, sendo a sua distribuição geográfica desigual no globo terrestre e seus programas de observação frequentemente cobrem períodos de tempo diferentes (Fortuin and Kelder, 1998). Uma das mais antigas estações do Hemisfério Sul é a de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil (6° S, 35° W), a qual desenvolve lançamentos semanais de sondas de ozônio desde 1978 (Logan and Kirchhoff, 1986; Kirchhoff et al., 1991). Desde 1998, o Programa SHADOZ – Southern Hemisphere ADditional OZonesondes tem aumentado a base de dados de sondagens de ozônio no Hemisfério Sul (Thompson et al., 2003a, 2003b, 2004). Entretanto, as estações do SHADOZ localizam-se em latitude tropicais (todas abaixo de 25° S e nove abaixo de 20° S). Assim, as médias latitudes (30° – 60° S) permanecem sem cobertura de sondagens.

No Brasil, apenas duas estações efetuam lançamentos de sondas de ozônio, Natal, no Rio Grande do Norte, e o Observatório Espacial do Sul, no Rio Grande do Sul. Sondagens atmosféricas medindo o perfil vertical de ozônio, assim como perfis de temperatura e umidade relativa, têm sido efetuadas no Observatório Espacial do Sul (29,4°S, 53,8°W) desde 1996.

No período de 1996 a 2000, foram lançadas sondas de ozônio no Observatório Espacial do Sul, as quais coletaram dados de pressão parcial de ozônio, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa com a altitude de subida dos balões.

Geralmente, os balões sobem até cerca de 30 a 40 km de altitude. Porém, como neste trabalho o objeto de interesse é o ozônio troposférico, serão consideradas as sondagens que alcançaram a altitude mínima da tropopausa que, para o Observatório Espacial do Sul, é de 17,5 km (Guarnieri et al., 2004). Esta altitude foi determinada através de estudos dos perfis de temperatura obtidos pelas mesmas sondagens.

Metodologia

O Sistema de Processamento Meteorológico Zeemet W-9000 é um conjunto de equipamentos modulares integrados e software, que fornece perfis de dados meteorológicos de alta resolução através da utilização de dados coletados por telemetria, da radiossonda e da sonda de ozônio, quando está acoplada ao sistema, e que permitem a medição da média e baixa atmosfera. Assim, as medidas de ozônio efetuadas pela sonda de ozônio, ao longo de sua ascensão junto com o balão, são

enviadas pela radiossonda, juntamente com dados meteorológicos por ela medidos, para a antena em solo.

Assim, o pacote de ozônio W-9000/Microsonda Mark II consiste de elementos de equipamentos e software, que permitem sondar com uma Microsonda Mark II especialmente configurada, acoplada a uma sonda de ozônio do tipo ECC – Célula de Concentração Eletroquímica (Komhyr, 1969), e obter o perfil vertical dos dados de ozônio, pressão, temperatura, umidade relativa e ventos. O conjunto radiossonda e sonda de ozônio é lançado acoplado em balões meteorológicos que podem ser tanto de 1500 litros quanto de 2000 litros, dependendo da altura que se quer medir.

A ozoniossonda ECC (Célula de Concentração Eletroquímica) é construída em uma estrutura rígida principal, onde são montados os motores acionadores da bomba de gás, construída em Teflon/Vidro, os tubos de teflon, uma célula de concentração eletroquímica sensível a ozônio e uma caixa da interface eletrônica, conforme apresentado na Figura 1. Para subir até a estratosfera, o conjunto é alojado em uma caixa de poliestireno moldado impermeável.

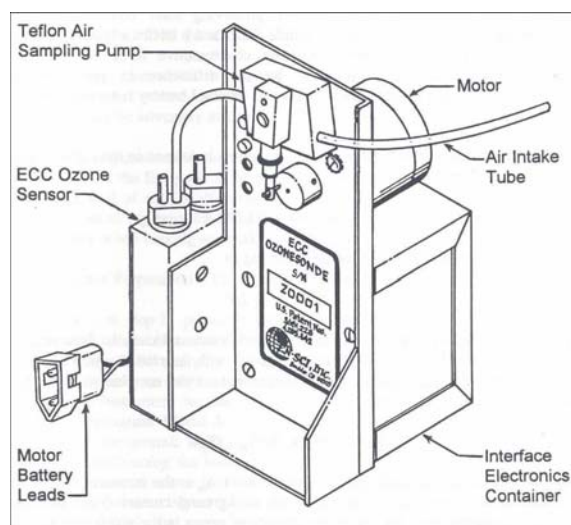
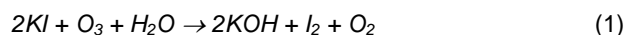


Fig. 1: Ozoniossonda de Célula de Concentração Eletroquímica do Sistema de Processamento Meteorológico W – 9000 (Fonte: Manual de Treinamento de Ozônio do Sistema de Processamento Meteorológico W-9000, 1996), instalado no OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra.

O sensor de ozônio da sonda ECC é constituído de dois eletrodos de platina imersos em soluções de iodeto de potássio (KI) de diferentes concentrações em câmaras de ânodo e cátodo separadas. As câmaras são ligadas com uma ponte iônica que, em adição com um íon, retarda a associação dos eletrólitos de ânodo e cátodo, preservando, deste modo, suas concentrações. Os eletrólitos contém brometo de potássio (KBr) e um mediador, no qual a concentração em cada meia célula é a mesma. Obtém-se uma tensão na célula de aproximadamente 0,13 V, que é proveniente da diferença da concentração de iodeto de potássio das duas meias

células. Desta forma, não é necessária uma bateria externa para operar a célula.

Quando o ozônio do ar entrar no sensor por ação da bomba da sonda, é formado iodo no cátodo da meia célula de acordo com a relação:



A célula converte o iodo molecular em íons de iodo de acordo com:



Durante este tempo, dois elétrons fluem para o circuito externo da célula. Medindo o fluxo de elétrons (isto é, a corrente da célula), junto com a relação da quantidade de ar que entra na célula por unidade de tempo, obtém-se a concentração de ozônio que entra por unidade de tempo. A concentração de ozônio de uma amostra de ar é dada por:

$$p_3 = 4,307 \times 10^{-3} (i_m - i_b) T_p t \quad (3)$$

Onde p_3 é a pressão parcial de ozônio em nanobars, i_m é a medida da corrente de saída do sensor em microampéres, i_b é a corrente de background do sensor (isto é, a corrente residual emanando da célula em ausência de ozônio no ar), em microampéres, T_p é a temperatura da bomba, em Kelvins e t é o tempo, em segundos, tomado pela bomba da sonda para forçar uma amostra de gás de 100 ml de ar direto no sensor.

A coluna troposférica de ozônio pode ser calculada a partir da integral dos perfis de ozônio até a altitude da tropopausa, aqui considerada como 17,5 km. As sondagens foram processadas em um programa desenvolvido por Fernando Luis Guarnieri, sendo que a metodologia usada para obtenção do perfil médio segue a descrita em Guarnieri et al. (2004).

Resultados

Foi realizado um total de 50 lançamentos de sondas atmosféricas entre novembro de 1996 e dezembro de 2000. Na Tabela 1 são mostradas as distribuições das sondagens por estação. Nesta análise, somente as sondagens que alcançaram 17,5 km pelo menos (altitude média para a tropopausa) são usadas.

Tabela 1: Número de sondagens por estações do ano no Observatório Espacial do Sul, de Nov/1996 até Dez/2000.

Meses	Nº. sondas	Meses	Nº. sondas
Dez/Jan/Fev	18	Jun/Jul/Ago	6
Mar/Abr/Mai	8	Set/Out/Nov	18

Na base de dados usada, os meses de verão (Dez/Jan/Fev) e primavera (Set/Out/Nov) possuem mais sondagens que outono e inverno. Isto está relacionado à estação chuvosa que impede lançamentos de balões no período de outono e inverno.

Considerando a tropopausa como o ponto onde o gradiente térmico é zero (temperatura mínima na

sondagem), a altitude média é 17,5 km (aproximadamente 90 hPa) e sua temperatura é -70°C (Guarnieri et al., 2004). A temperatura média da tropopausa obtida de uma série de radiossondagens para o período 1961-1990 de -20° a -30°S é de aproximadamente -70°C a -75°C com altitudes entre 16 e 17 km (Gaffen-Seidel et al., 2001).

O perfil médio de ozônio troposférico dado por estação, como definido na Tabela 1, é mostrado na Figura 2. Pode ser visto que as pressões parciais de ozônio troposférico abaixo de 250 hPa são maiores durante o verão e primavera que durante o inverno e outono.

A variação sazonal de ozônio no Observatório Espacial do Sul é ao redor 55% para ozônio troposférico, sendo a média da coluna de ozônio troposférico de $31,3 \pm 5,7$ UD (máximo em outubro de 40,2 UD e mínimo em março de 22,9 UD). O ozônio troposférico representa aproximadamente 12% do ozônio total (9% em março e 15% em outubro). A climatologia de Fishman et al. (1992), que usa TOMS e dados de ozoniossondas, mostrou valores semelhantes para a latitude do Observatório, aproximadamente 20 UD no período de março a maio e entre 35 e 40 UD no período de setembro a novembro.

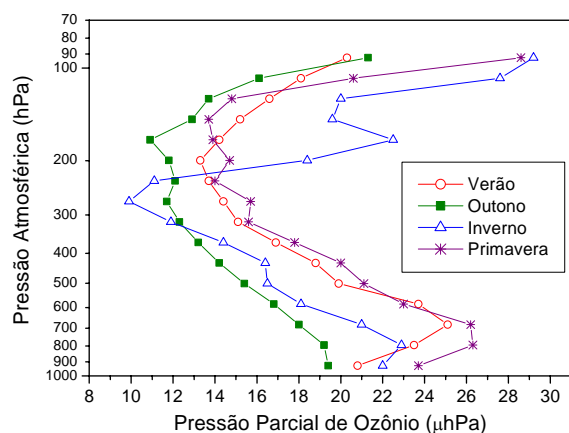


Fig. 2 – Média sazonal dos perfis de ozônio troposférico das 50 sondagens no Observatório Espacial Sul, de Nov. 1996 para Dez. 2000. É mostrado o perfil de ozônio durante o verão (círculos abertos vermelhos), primavera (estrelas roxas), outono (quadrados cheios verdes) e inverno (triângulos abertos azuis).

Kirchhoff et al. (1991) analisou dados de sondas de ozônio de 1978 a 1988 em Natal. Observou uma variação sazonal maior na troposfera que na estratosfera, e o ozônio da troposfera durante um ano variou entre 20 UD a 37 UD.

Baldy et al. (1996) analisou ozônio troposférico a partir de observações de sondas de ozônio na Ilha Reunião (Reunion Island, 21°S , 55°E) num período de 1 ano, e observou uma média de 30 UD, com valores de máximo

de 50 UD. Observações de ozônio total troposférico através de satélites (Nimbus7 e TOMS) entre 1979 e 1992 obtiveram médias de $34,4 \pm 6,34$ UD em Natal ($5,8^{\circ}\text{S}$, $35,2^{\circ}\text{W}$) e $31,4 \pm 6,7$ UD em Cuiabá (15°S , 56°W) (Ziemke et al., 1998). Assim, o ozônio troposférico total no Observatório Espacial do Sul é semelhante, em média anual, a Natal, Cuiabá e Ilha Reunião, estações estas situadas a baixas latitudes.

A Figura 3 mostra um exemplo da presença de um pico secundário de ozônio na troposfera. Foram observados tais eventos em 31 das 50 sondagens, portanto ocorrendo em 62% das sondagens. A altitude média de presença de pico está ao redor de 3,3 km, mas há a ocorrência de picos numa faixa de 0,9 – 6,1 km. A média de pressão parcial de ozônio nesta extensão de altitude sem os picos é de $19,5 \pm 3,5$ μhPa, enquanto com os picos têm uma média de $38,8 \pm 10,6$ μhPa. A distribuição sazonal dos picos é desigual, ocorrendo principalmente em janeiro, com 5 eventos, novembro, com 10 eventos, e dezembro, com 7 eventos, significando 100%, 91% e 70% das sondagens mensais, respectivamente. Ocorrências semelhantes foram observadas através de Baldy et al. (1996) na Ilha Reunião e, neste caso, as fontes do pico eram zonas de intensas queimas de biomassa.

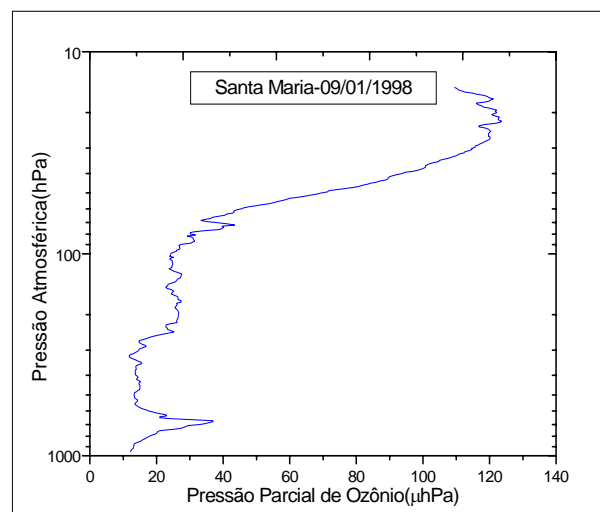


Fig. 3 – Exemplo de ocorrência do pico secundário de ozônio na troposfera em sondagem efetuada dia 09 de Janeiro de 1998 no Observatório Espacial do Sul.

O Observatório Espacial do Sul fica situado perto do centro geográfico do Rio Grande Sul. Uma análise do número de pontos de altas intensidades de emissão de calor, obtido a partir do satélite NOAA-12 para o período de 1996 a 2000, mostrou que o período máximo de queima da biomassa no estado do Rio Grande do Sul se dá nas estações de verão e primavera. Foram observadas 95% de todas as ocorrências de queimadas entre os meses de novembro a fevereiro.

A variação do número das queimadas de 1996 a 2000 e a variação da porcentagem das sondagens com pico secundário de ozônio para o mesmo período com os meses do ano é mostrado na Figura 4. Uma comparação entre o número dos pontos de alta emissão de energia termal e as ocorrências dos picos pode ser feita. A comparação mostra que o período de máxima ocorrência de pico secundário de ozônio está no mesmo período do ano no qual as ocorrências de queima de biomassa são máximas. Isto indica que a fonte do pico secundário de ozônio troposférico está relacionada a eventos de queima da biomassa. Porém, para comprovar é necessário fazer análise das trajetórias dos ventos para verificar esta possibilidade.

A porcentagem de sondagens com picos durante julho e abril não é representativa porque em ambos os meses houve só um lançando com pico secundário de ozônio para um total de 2 e 3 lançamentos, respectivamente.

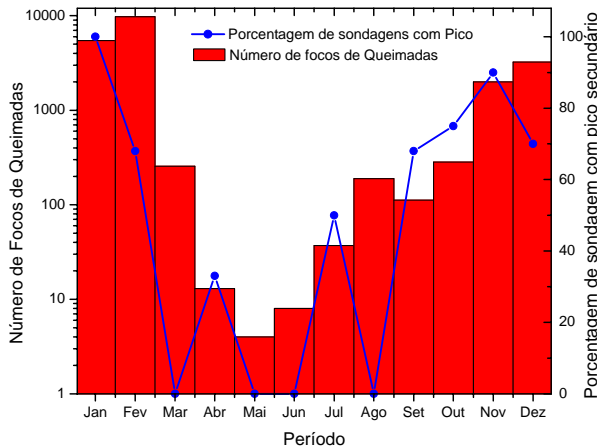
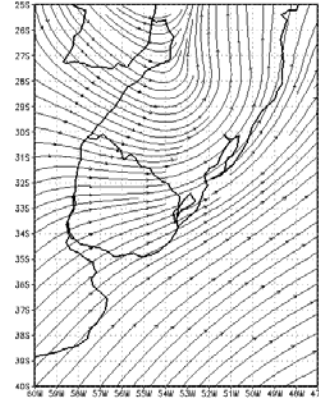


Fig. 4 – Número total de focos de queimadas obtido pelo satélite NOAA-12 no Estado do Rio Grande do Sul de 1996 a 2000 (barras vermelhas) e porcentagem das sondagens com ocorrências de pico secundário de ozônio troposférico (linha azul).

Um estudo de caso foi desenvolvido para verificar a fonte da massa de ar que originou o pico secundário do dia 25/11/1997. Utilizou-se o software GRADS (Grid Analysis and Display System) para visualizar o campo de ventos e as trajetórias de massa de ar para o dia 24/11/1997. Os dados meteorológicos utilizados para a análise foram obtidos na página do Climate Diagnostics Center – CDC do NOAA. O gráfico apresentado na Figura 5 foi obtido para o dia 24/11/1997 e para o nível de 700hPa (aproximadamente 3000 m), onde se concentrou o pico secundário de ozônio troposférico na sondagem do dia 25/11/1997. Uma análise dos dados do satélite NOAA-12 mostra que no dia 24/11/1997 uma queimada foi observada no Município de Uruguaiana, RS, conforme observado na Figura 6. Uma análise comparativa dos dois dados, campo de ventos e foco de queimada na região de Uruguaiana, indica que a massa de ar proveniente da queimada em Uruguaiana no dia 24/11/1997 seria a provável fonte do excesso de ozônio troposférico observado no pico secundário detectado pela

sondagem do dia 25/11/97 no Observatório Espacial do Sul, levando assim um dia para atingir a região ou ainda sendo observável no dia seguinte.

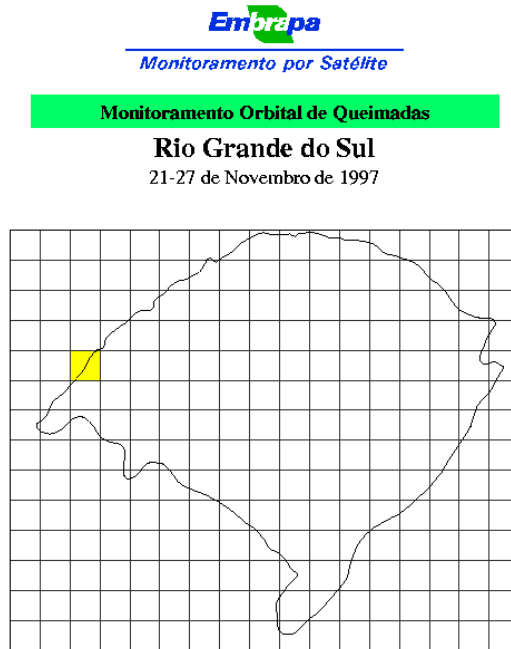
Linhas de Corrente a 700mb – 06Z24NOV1997



GRADS: 00AA/0025

2009-03-23-14:39

Fig. 5 – Linhas de corrente do campo de ventos para o dia 24 de novembro de 1997, nível de 700 hPa sobre o estado do Rio Grande do Sul.



Embrapa
 Monitoramento por Satélite
Monitoramento Orbital de Queimadas
Rio Grande do Sul
 21-27 de Novembro de 1997

Total de queimadas: 1
 Total de quadriculas com queimadas: 1
 Número mínimo de queimadas: Estatística não significativa
 Número máximo de queimadas: Estatística não significativa
 Número médio de queimadas: Estatística não significativa
 Desvio padrão de queimadas: Estatística não significativa

Legenda
 Nenhum
 1 ponto
 Sem ocorrência
 Sem ocorrência

Dados do Satélite NOAA: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-MCT)
 Ma. processado Digital Le. Arte Final: Embrapa Monitoramento por Satélite (CNPq)
 Interpretação Espacial e Análise Ambiental (ECONORÇA)
 Difusão: Agência Estado (A/E)

Fig. 6 – Foco de queimada localizada no Município de Uruguaiana, RS, no dia 24/11/1997, observada pelo satélite NOAA-12. Montagem efetuada pela EMBRAPA, através de seu Programa de Monitoramento Orbital de Queimadas.

Conclusões

A variação sazonal do ozônio troposférico sobre o Observatório Espacial do Sul é em torno de 55%, sendo a coluna média de ozônio troposférico de 31,3 +/- 5,7 UD (máximo em outubro de 40,2 UD e mínimo em março de 22,9 UD). Integrado, o ozônio troposférico representa 12% aproximadamente (31 UD) do ozônio total, com mínimo de 9% em março e máximo de 15% em outubro. O ozônio troposférico no Observatório Espacial do Sul é semelhante a outros locais de baixas latitudes no Hemisfério Sul (Natal, Cuiabá e Ilha de Reunião). Picos secundários de ozônio troposférico são observados em 62% das sondagens no Observatório Espacial do Sul, mas acontece principalmente nos meses de janeiro e novembro. Os picos acontecem na faixa de 480-920 hPa e tem média de pressão parcial de ozônio de $38,8 \pm 10,6$ μ hPa. De acordo com dados do satélite NOAA-12, os maiores períodos de queima da biomassa no estado do Rio Grande Sul de 1996 a 2000 aconteceram entre novembro a fevereiro, indicando assim que as queimadas seriam as principais fontes de ozônio troposférico na região. Uma análise de caso efetuada para o pico secundário do dia 25/11/1997 sugere que a massa de ar proveniente de uma grande queimada em Uruguaiiana no dia 24/11/1997 seria a provável fonte do excesso de ozônio troposférico.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio da FAPERGS e CNPq pelas bolsas concedidas, e ao Ministério do Meio Ambiente e Agência Espacial Brasileira pelo apoio financeiro. Agradecimentos especiais ao Dr. Fernando Luis Guarneri, pelo fornecimento de programas, e a NOAA pelo fornecimento dos dados do satélite NOAA-12's e do CDC.

Referências Bibliográficas

- Baldy, S., Ancellet, G., Bessafi, M. et al. Field observations of the vertical distribution of tropospheric ozone at the island of Reunion (southern tropics). *J. Geophys. Res.* 101, 23,835-23,849, 1996.
- Climate Diagnostics Center – CDC <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>
- Fishman, J., Brackett, V. G., Fakhruzzaman, K. Distribution of tropospheric ozone in the tropics from satellite and ozonesonde measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.* 54, 589-597, 1992.
- Fortuin, J. P. F., Kelder, H. An ozone climatology based on ozonesonde and satellite measurements. *J. Geophys. Res.* 103, 31,709-31,734, 1998.
- Gaffen-Seidel, D. J., Ross, R. J., Angell, J. K. Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes. 2nd SPARC General Assembly, Mar del Plata, Argentina, 6-10 Nov., Proceedings, [CD-ROM], 2001.
- Guarneri, F. L., Echer, E., Pinheiro, D. K. et al. Vertical ozone and temperature distributions above Santa Maria, Brazil (1996-1998). *Adv. Space Res.* 34, 759-763, 2004.
- Herman, J. R., McPeters, R., Larko, D. Ozone depletion at northern and southern latitudes derived from January 1979 to December 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer data. *J. Geophys. Res.* 98, 12,783-12,793, 1993.
- Kelder, H., Eskes, H. Satellite observations of ozone and tropospheric composition, and chemical data assimilation, in: Zerefos, C. (Ed), *Ozone*, Vol. II, Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium, 1,193-1,194, 2004.
- Kirchhoff, V. W. J. H., Barnes, R. A., Torres, A. L. Ozone climatology at Natal, Brazil, from in situ ozonesonde data. *J. Geophys. Res.* 96, 10,899-10,909, 1991.
- Komhyr, W. D. Electrochemical concentration cell for gas analysis. *Ann. Geophys.* 25, 203-210, 1969.
- Logan, J. A., Kirchhoff, V. W. J. H. Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.* 91, 7,875-7,881, 1986.
- McPeters, R. D., Labow, G. J., Johnson, B. J. A satellite-derived climatology for balloonsonde estimation of total ozone column. *J. Geophys. Res.* 102, 8,875-8,885, 1997.
- Thompson, A.M., Witte, J. C., Oltmans, S. J. et al. The 1998 – 2000 SHADOZ (Southern Hemisphere ADDitional OZonesondes) tropical ozone climatology. 1. Comparison with TOMS and ground-based measurements. *J. Geophys. Res.* 108, 8238, doi:10.129/2001JD000967, 2003a.
- Thompson, A.M., Witte, J. C., Oltmans, S. J. et al. The 1998 – 2000 SHADOZ (Southern Hemisphere ADDitional OZonesondes) tropical ozone climatology. 2. stratospheric and tropospheric ozone variability and the zonal wave-one, *J. Geophys. Res.* 108, 8241, doi:10.129/2002JD002241, 2003b.
- Thompson, A.M., Witte, J. C., Schmidlin, F. J. et al. SHADOZ (Southern Hemisphere ADDitional OZonesondes): a project overview and new insights on tropical tropospheric ozone, in: Zerefos, C. (Ed), *Ozone*, Vol. II, Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium, 1,193-1,194, 2004.
- Whitten, R. C., Prasad, S.S. *Ozone in Free Atmosphere*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 288p, 1985.
- WMO, World Meteorological Organization, SPARC/IO₃C/GAW Assessment of trends in the vertical distribution of ozone, WMO Global ozone research and monitoring project, Report No. 43, 289p, Geneva, 1998.
- Ziemke, J. R., Chandra, S., Bhartia, P. K. Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: The assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques. *J. Geophys. Res.* 103, 22,115-22,127, 1998.