

EFETOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO DA ANTÁRTICA OBSERVADOS EM SANTA MARIA, RS, BRASIL

V.W.J.H.Kirchhoff
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
12201-970 S.José dos Campos, S.Paulo, Brasil

N.J.Schuch e D.K.Pinheiro
Universidade Federal de Santa Maria, NEPAE
Cidade Universitária, 97119-900 Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

Um decréscimo relativamente grande na coluna de ozônio estratosférico foi observado no sul do Brasil (29,5° S) em 1993, no final de outubro. Este decréscimo de ozônio foi observado quando o comportamento normal da coluna de ozônio em latitudes baixas deveria mostrar valores anuais máximos, de modo que tal decréscimo é inesperado. As medidas locais de ozônio estratosférico foram feitas usando duas técnicas distintas. Dois sistemas independentes de espectrofotômetro Brewer, que detectaram um forte decréscimo da coluna de ozônio em Santa Maria, e também a distribuição vertical da concentração do ozônio foi observada com sondas de ozônio lançadas em balão, o que mostrou uma diminuição uniforme da concentração de ozônio com altura na estratosfera, com valores muito baixos de ozônio na baixa estratosfera. Estes baixos valores na parte mais baixa da estratosfera são uma característica dos perfis obtidos na Antártica, na primavera. Além das duas técnicas citadas, dados de ozônio do sistema NASA- TOMS, representando uma terceira técnica distinta de observação de ozônio estratosférico, indicaram ótima correlação com as técnicas locais, o que não deixa dúvidas quanto à realidade do decréscimo de ozônio observado no sul do Brasil em outubro de 1993. A magnitude do fenômeno observado pode ser considerada elevada. Isto porque, por comparação, a magnitude da variação sazonal é de ordem de 30 Unidades Dobson (UD), sendo que um dos decréscimos observados chegou à profundidade de 60 UD. Parece que não existe mecanismo físico ou químico conhecido na estratosfera de latitudes baixas, que possa ser responsabilizado por tal variação anômala, e tão intensa. No entanto, o período particular do ano, e inspeção dos dados TOMS de coluna de ozônio nos dias de observação das perturbações em pauta, mostram uma clara ligação (em termos de concentração de ozônio) entre a região do buraco de ozônio da Antártica e o sul da América do Sul. Esta ligação estende-se para o norte sobre o oceano Atlântico, num caminho curvado para oeste, atingindo as latitudes tropicais.

Esta evidência dos dados TOMS, e mais a assinatura característica Antártica nos dados das sondagens em Santa Maria, indicam que as massas de ar amostradas no sul do Brasil em outubro de 1993 tinham origem Antártica, sob a influência do buraco de ozônio, que exportou para o Brasil massas de ar com um déficit em ozônio estratosférico.

INTRODUÇÃO

Para a formação do buraco de ozônio da Antártica são necessários certos requisitos só encontrados na Antártica. Não existe, portanto, buraco de ozônio em outras latitudes (Stolarski, 1988). A redução de ozônio que caracteriza o buraco, é o resultado de uma cadeia de reações químicas complexas que necessitam da presença de partículas (Wofsy et al., 1988). Além das condições químicas, a formação do buraco na primavera do Hemisfério Sul exige as condições especiais de circulação e clima disponíveis na Antártica. A priori, portanto, não se espera que o buraco de ozônio tenha influência direta sobre latitudes tropicais. Por outro lado, o buraco de ozônio sendo de fato uma grande extensão geográfica onde existe uma falta de ozônio, que está preso à atmosfera antártica na primavera, mas que está livre para se mover para outras latitudes em outras épocas do ano, principalmente após a quebra do vórtice polar, esta enorme massa de ar pobre em ozônio vai acabar tendo alguma influência sobre latitudes mais baixas, talvez até regiões tropicais em casos extremos. É isto que se quer dizer quando se fala em efeito secundário

do buraco de ozônio. Alguns autores já analisaram outros casos e discutiram a possibilidade de massas de ar pobre em ozônio perturbarem latitudes mais baixas (Prather e Jaffe, 1990; Prather et al., 1990; Thompson, 1991; Kane, 1991). Para latitudes médias próximas da Austrália, houve discussão de Atkinson et al., (1989). O presente relato parece ser o primeiro que aponta perturbações em latitudes sub-tropicais e tropicais.

A fim de monitorar variações de ozônio estratosférico, especialmente mas não exclusivamente, em latitudes tropicais, quatro espectrofotômetros do tipo Brewer foram instalados em território Brasileiro (Kirchhoff et al., 1993). Observações no sul do Brasil em 1992 mostraram mínimos durante outubro quando esta é a época dos máximos. Este comportamento inesperado, que foi observado durante alguns dias apenas, fez com que se planejasse um experimento bem mais completo para tentar documentar mais uma vez tal fenômeno. Assim, em 1993, foi organizada pelo INPE, uma expedição científica ao Sul do Brasil, em colaboração com a Universidade de Santa Maria, levando dois espectrofotômetros

Brewer, e algumas sondas de ozônio para medida do perfil vertical. Este relatório descreve os dados obtidos em 1993.

INSTRUMENTOS E MÉTODOS

O espectrofotômetro Brewer é um sistema moderno de observação da camada de ozônio, de operação automática, operado à distância por computador. O instrumento opera da superfície continuamente, acompanhando o movimento do sol, e seus dados primários são a medição da radiação ultravioleta do sol. Tem a grande vantagem, sobre o seu irmão gêmeo o espectrofotômetro Dobson, além de ser totalmente automático, de poder medir também a intensidade do UV-B, e as colunas de SO₂ e NO₂. Sua maior diferença instrumental com relação ao Dobson é que usa uma grade de difração para obter a resolução espectral necessária para a medida. Durante o experimento de outubro de 1993, foram instalados dois espectrofotômetros Brewer em Santa Maria (29,5° S, 53,5° W), Rio Grande do Sul, Brasil, no campus da Universidade local. Ambos os instrumentos deram os mesmos resultados, que são mostrados a seguir.

Medidas adicionais foram feitas usando sondas de ozônio do tipo ECC (Electro-Chemical Concentration Cell) lançadas em balão. Esta é a mesma técnica que tem sido usada em Natal, Rio

Grande do Norte, Brasil (Kirchhoff et al., 1991) durante muitos anos. Seu conceito de funcionamento tem base nas propriedades de uma solução química através da qual se circula ar ambiente. As moléculas de ozônio misturadas ao ar quando entram em contato com a solução liberam elétrons através de reações químicas, elétrons que então passam a circular entre os eletrodos da solução. A corrente elétrica que é assim formada é diretamente proporcional à concentração do ozônio no ar. O valor da corrente elétrica é amplificada e sinais eletromagnéticos correspondentes são enviados ao receptor de terra, enquanto o balão sonda sobe na atmosfera. Obtém-se medidas de ozônio na troposfera e estratosfera. Duas sondagens foram feitas com sucesso durante o experimento de outubro e permitiram verificar em que altura se verificou a diminuição da concentração do ozônio. As sondagens foram feitas próximas do local de operação dos espectrofotômetros.

RESULTADOS

Como informação básica, mostra-se na Fig. 1 a variação sazonal do ozônio estratosférico para duas estações Dobson operadas no Brasil, Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° W) e Natal (5,8° S, 35,2° W). Os dados apresentados são as médias mensais para 19 anos de dados para Cachoeira Paulista e 13 anos de dados para Natal. As barras

verticais são os desvios padrão da média, e refletem a variabilidade de ano para ano, da ordem de 15 UD. Pode-se notar que há um mínimo no mês de abril-maio e um máximo em setembro-outubro. A amplitude da variação sazonal é da ordem de 30 UD. É também importante notar que as duas estações, separadas por quase 17 graus de latitude, tem quase a mesma variação sazonal. Dado que Santa Maria está separada de Cachoeira Paulista por apenas 7 graus de latitude, parece razoável supor, em princípio, que comportamento semelhante deve ser observado também em Santa Maria, ou seja, um mínimo em abril-maio e um máximo em setembro-outubro, com uma amplitude da variação de ordem de 30 UD.

Os valores de coluna de ozônio observados em Santa Maria em 1993, em setembro e outubro, estão mostradas na Fig. 2. Mostram-se as médias diárias individuais em UD. Pode-se observar dois decréscimos intensos de curta duração, um em 19 de outubro, e o outro em 28 de outubro. Estes dois eventos estão separados por um período, curto também, de aparente recuperação para valores normais esperados, centrados no dia 26 de outubro. Em 19 de outubro de 1993, com 250 UD, a coluna de ozônio esteve tão baixa quanto durante o mínimo sazonal de abril-maio da Fig. 1, da ordem de 60 UD abaixo da "média aparente" de aproximadamente 310

UD correspondente a setembro. O segundo evento teve uma amplitude um pouco menor, da ordem de 40 UD. Portanto, pode-se dizer que as magnitudes destes decréscimos de outubro são intensos, quando comparados com a variação sazonal.

Os baixos valores observados pelos espectrofotômetros foram também observados pelas sondagens especiais lançadas em balão. A Fig. 3 mostra o resultado das sondagens dos dias 26 e 28, respectivamente quando a coluna de ozônio estava indicando os períodos de recuperação e o segundo evento de decréscimo, mostrados na Fig. 2. Deve-se observar duas diferenças fundamentais entre a sondagem de 26 e a de 28 de outubro. Em primeiro lugar, os valores de ozônio no dia 28 são menores em todas as alturas na estratosfera alta, isto é, não há decréscimos de ozônio em alguma altura privilegiada. Isto faz com que a coluna dia 28 de outubro seja menor do que a do dia 26, em concordância com o resultado dos espectrofotômetros; em segundo lugar, ocorre um fenômeno muito interessante na baixa estratosfera, em torno de 16-17 km de altura, onde a concentração do ozônio é extremamente baixa, em comparação com a do dia 26. Próximo a 16 km, quase 75% do ozônio foi destruído entre outubro 26 e outubro 28. Este resultado torna-se importante quando se discute a interpretação dos resultados.

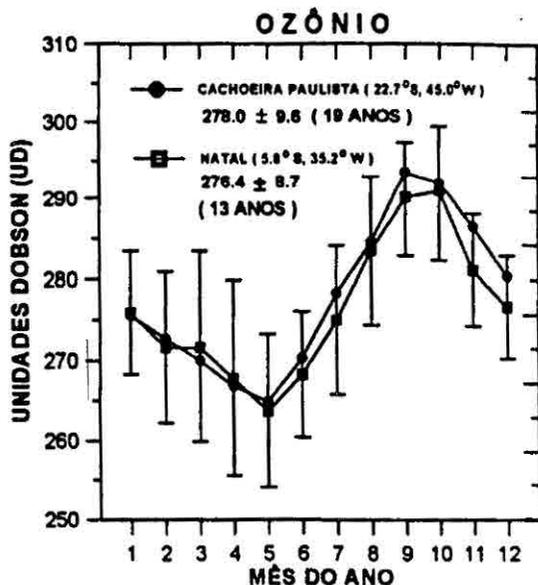


Figura 1 - Variação sazonal de ozônio estratosférico representando uma coleção de 19 anos de dados para Cachoeira Paulista, e 13 anos de dados para Natal. As barras verticais são os desvios padrão das médias.

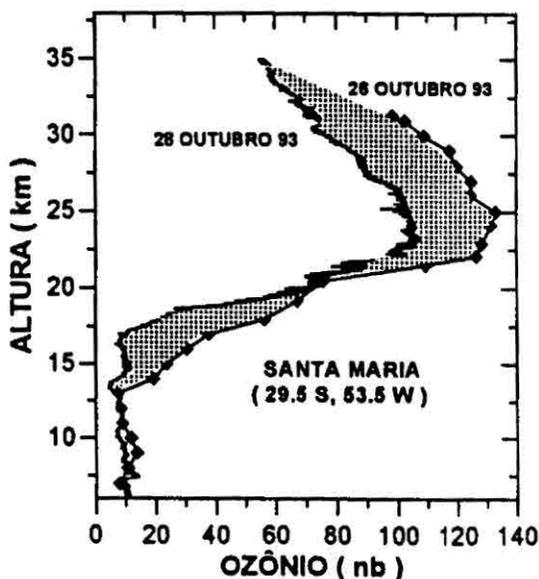


Figura 2 - Medidas de ozônio obtidas com espectrofotômetro Brewer em Santa Maria, RS, (linhas grossas) e com o instrumento TOMS (linhas finas), mostrando os decréscimos de ozônio de outubro de 1993.

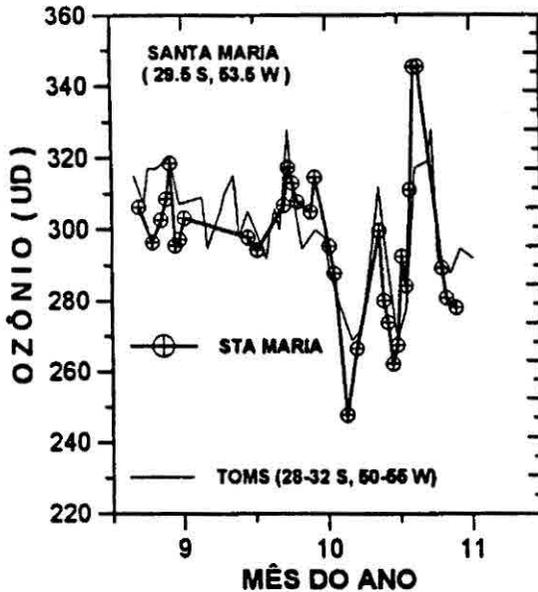


Figura 3 - Resultados de sondagens de ozônio obtidas simultaneamente com os dados dos espectrofotômetros. Dias 26 e 28 de outubro de 1993.

Em resumo, observações de ozônio feitas durante o mês de outubro de 1993 no sul do Brasil, usando duas técnicas de observação diferentes, mostram sem nenhuma dúvida de que dois grandes decréscimos de ozônio ocorreram. Estes eventos podem ser considerados incomuns porque ocorreram numa escala de tempo muito rápida, numa época em que normalmente a coluna de ozônio passa por um máximo, e porque os decréscimos observados foram muito intensos.

DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO

Com base nas observações de longo prazo feitas nas estações

de baixas latitudes Cachoeira Paulista e Natal, parece claro que os eventos descritos para outubro de 1993 em Santa Maria são de natureza diferente das variações já observadas. Por causa do período das observações, outubro, e a coincidência do desenvolvimento do buraco de ozônio da Antártica em setembro-outubro, parece óbvio fazer uma conexão entre estes dois casos. A dificuldade com esta Tese, evidentemente, é a grande separação geográfica entre a área de atuação do buraco de ozônio da Antártica e o sul do Brasil, bem como a identificação de um fenômeno físico de transporte das massas de ar estratosféricas sobre uma distância tão grande, sabendo

que a maior parte do transporte convencional na região polar é do tipo zonal.

A intensa circulação de oeste para leste que forma o vórtice polar, circunscreve os baixos valores de coluna de ozônio da região polar. Quando esta formação começa a mudar na primavera, quebrando o padrão do vórtice polar, é que grandes massas de ar separam-se da região polar. Esta quebra do vórtice não é um evento único e suave. Ao contrário, verifica-se uma série de pequenas erosões, com desacelerações e em alguns casos até de reversões dos movimentos zonais. É nestas ocasiões de intensa turbulência que massas de ar de dimensões várias, podem-se separar do ar tipicamente polar e vagar em separado, como remanescentes polares, para outras latitudes (Atkinson et al., 1989). Este é um dos possíveis mecanismos, de natureza transiente, que pode contribuir para trazer massas de ar pobres em ozônio para latitudes mais baixas.

Como passo seguinte para investigar uma possível causa para as observações no sul do Brasil, consultou-se a seguir os arquivos de dados TOMS. Os mapas de ozônio global obtidos pelo TOMS, solicitados a colegas da NASA-Goddard Space Flight Center, foram uma revelação. Os mapas estão mostrados na Fig. 4, a,b, e c. Além disto, usaram-se os dados TOMS localizados; obtiveram-se médias de coluna de ozônio para a faixa entre 28 a 32 graus de latitude sul, e entre 50 e 55 graus oeste. Estas médias foram usadas para comparação

com as medidas locais. É a segunda curva mostrada na Fig. 2.

Os dados TOMS a que nos referimos foram obtidos a bordo do satélite russo METEOR 3, e os mapas globais são mostrados na Fig. 4, numa projeção que mostra o continente Sul Americano no centro da figura. A Fig. 4a mostra a distribuição do ozônio para o dia 18 de outubro. Este foi um dia antes do primeiro grande decréscimo de ozônio observado no sul do Brasil, e mostrado na Fig. 2. Como no caso do segundo grande decréscimo de ozônio do dia 28 de outubro, mostrado na Fig. 4c, existe uma faixa de ozônio reduzido (mostrada na figura por uma faixa azul) entre o sul do Brasil e a localização Antártica do buraco de ozônio. Esta faixa de ozônio reduzido estende-se diretamente da Antártica sobre o oceano Atlântico, para o norte e o noroeste, sobre uma área relativamente estreita que cobre o norte da Argentina, Uruguai, e o sul do Brasil, cobrindo parcialmente os sub-trópicos e alcançando os trópicos. É interessante observar que durante o curto espaço de tempo que chamamos de período de recuperação, quando os valores de ozônio voltaram próximos aos seus valores normais, representativos do dia 26 de outubro, os dados do TOMS não mostram esta faixa de valores baixos de ozônio entre a Antártica e o sul do Brasil. Isto mostra a Fig. 4b. Os dados TOMS mostram, portanto, uma clara ligação física entre o buraco de ozônio da Antártica e o sul do Brasil, mas apenas numa faixa estreita.

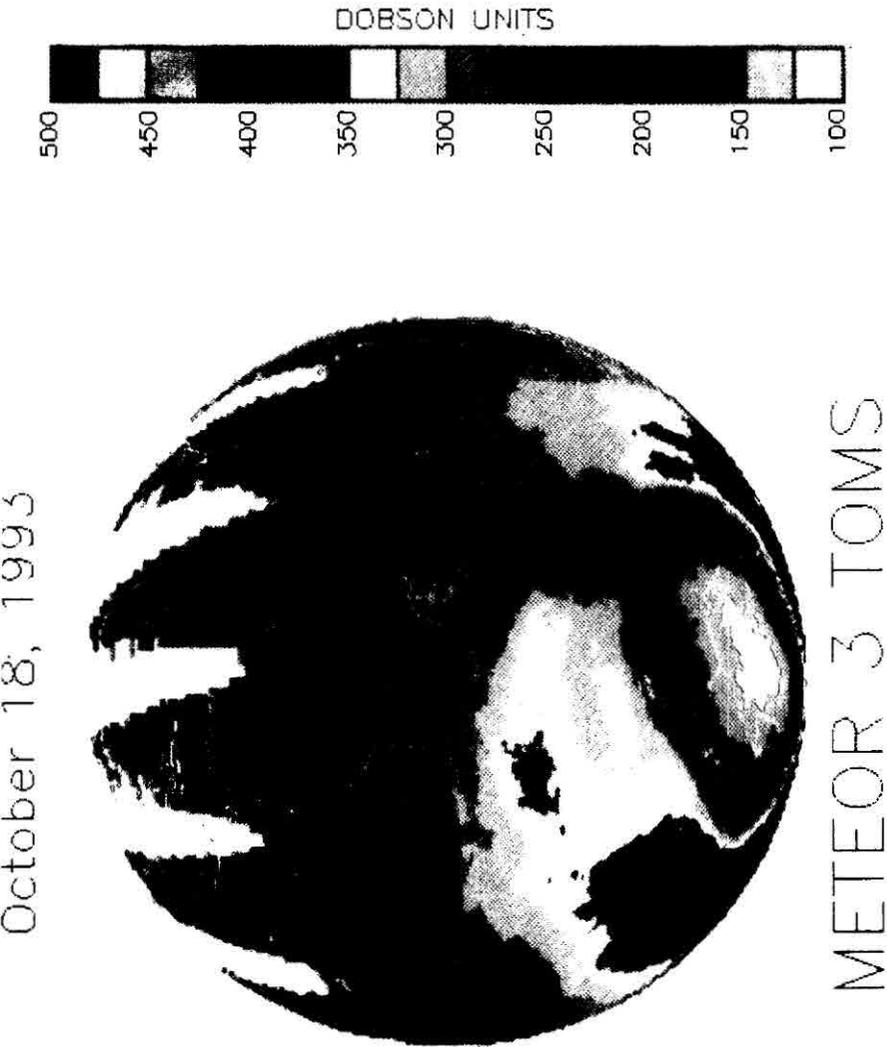


Figura 4a - Dados de ozônio do instrumento TOMS obtidos a bordo do satélite METEOR 3, mostrando a faixa estreita de ozônio reduzido (em azul) que aparece ligando o buraco de ozônio da Antártica com o sul do Brasil, em outubro 18.

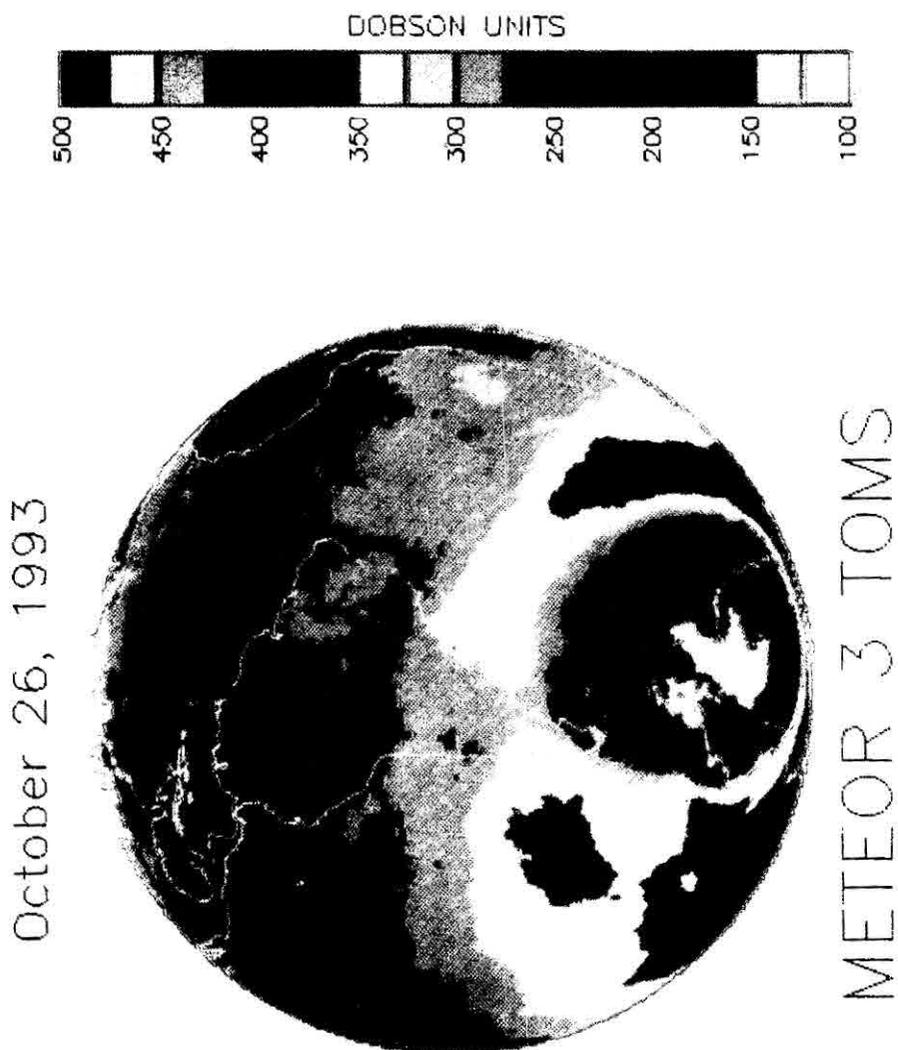


Figura 4b - Mostra o mesmo que em a, mas para o dia 26 de outubro (período de recuperação).

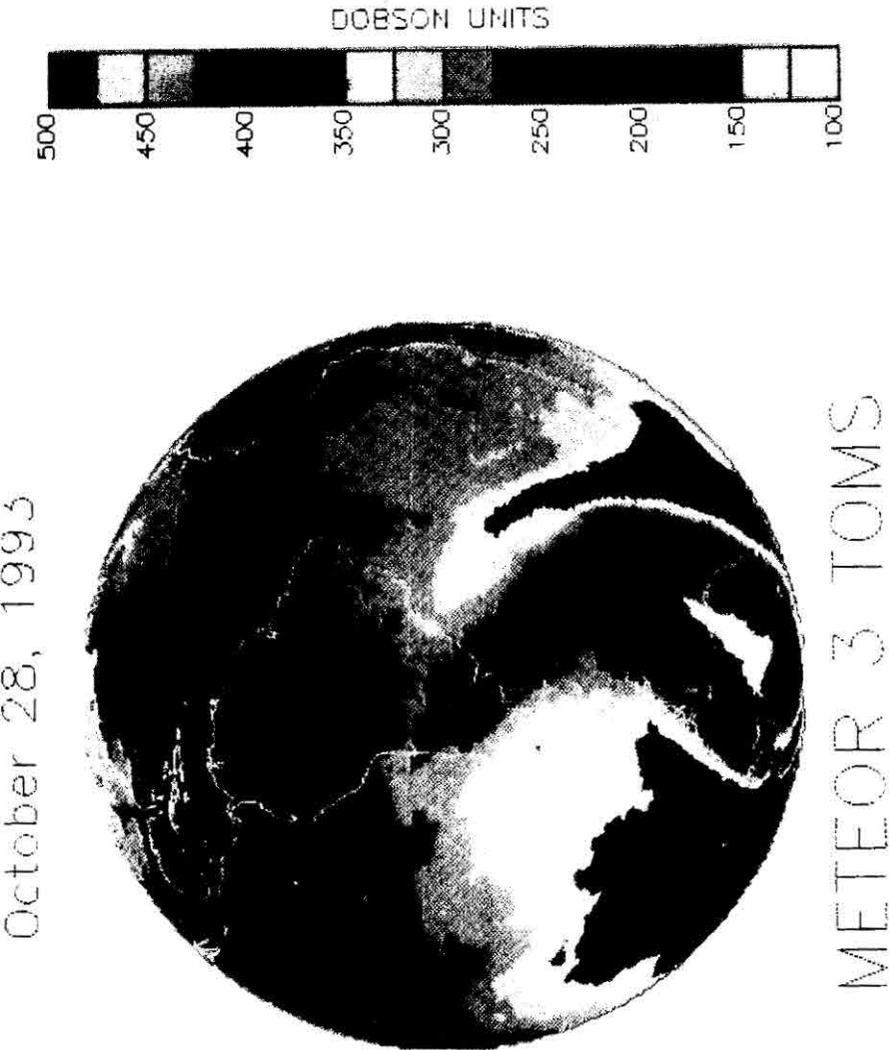


Figura 4c - Para outubro 28, quando mais uma vez aparece uma faixa relativamente estreita de ozônio reduzido entre o buraco de ozônio da Antártica e o sul do Brasil (dados processados pela NASA).

Recapitulando, notamos já duas peças de evidências, independentes uma da outra, que os eventos observados no Sul do Brasil são de fato resultados secundários do fenômeno do buraco de ozônio da Antártica. Em primeiro lugar, observamos um fato interessante nas sondagens de ozônio de Santa Maria, que mostraram na baixa estratosfera um comportamento semelhante ao que se observa em sondagens Antárticas, ou seja, concentrações reduzidas em torno de 16-17 km de altura (Ver, por exemplo, Kirchhoff et al., nesta edição). Na Antártica, durante o período de formação do buraco de ozônio (setembro-outubro) a pressão parcial de ozônio praticamente se anula nestas alturas, em várias ocasiões, associadas ao buraco. O motivo é que nesta faixa de alturas, a destruição do ozônio Antártico é muito eficiente. Parece claro, portanto, que as sondagens em Santa Maria, dia 28 de outubro, são evidência adicional de que as massas de ar observadas no sul do Brasil tinham origem Antártica.

A outra evidência independente, é claro, vem diretamente dos dados TOMS. A Fig. 4 mostra sem dúvida de que existe uma ligação física entre a região Antártica e o sul do Brasil. Esta formação de uma faixa estreita de decréscimos de coluna de ozônio deve ser um fenômeno transiente e

pouco conhecido, mas cálculos de Prather e Jaffe (1990) mostram que massas de ar Antártico podem permanecer isoladas por períodos de 7 a 20 dias, após a sua separação do vórtice polar. Esta duração é tempo suficiente para sua propagação para latitudes mais baixas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Profs. Paulo J. Sarkis e Augusta M.P.Schuch da Universidade de Santa Maria, e a Adauto Motta, José Alves, e José Chagas do INPE. Agradecemos em especial ao Diretor do INPE, Marcio N.Barbosa pelo seu apoio. Agradecemos apoio financeiro do CNPq, FAPESP, e FAPERGS. Agradecemos ao colega da NASA Ernest Hilsenrath pelos dados do TOMS.

