



## **Análise de Eventos de Vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério sul e Interação com a Troposfera pelos Dados de Reanálise do ERA Interim**

Analysis of Ozone Hole Comma Events in the South Hemisphere and interaction with troposphere  
by the ERA Interim Reanalysis data

Laís S. M. Schmalfluss<sup>1</sup>; David Mendes<sup>1</sup> & Weber Gonçalves<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Centro de Ciências Exatas e da Terra.*

*Avenida Senador Salgado Filho, 3000, Candelária, 59.078-970 Natal, Rio Grande do Norte, Brasil*

*E-mails: laisschmalfluss@hotmail.com; david.mendes22@gmail.com; weber.golcalves@ccet.ufrn*

*DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_486\\_495](http://doi.org/10.11137/2020_2_486_495); Recebido: 19/11/2018 Aceito: 14/01/2019*

### **Resumo**

A formação do ozônio ( $O_3$ ) ocorre na baixa estratosfera, camada essa acima da troposfera, o mesmo possui uma grande concentração de energia, o que interfere no perfil de temperatura em praticamente toda estratosfera. A partir da década de 80, foram identificados valores muito baixos de ozônio estratosférico sobre o Continente Antártico, principalmente nos meses de setembro e outubro. Essa diminuição foi denominada de “buraco de ozônio Antártico”, que estava diretamente ligado a ação dos cloro-fluor-carbonetos (CFCs), que quebram as ligações de ozônio. Desta forma, este trabalho tem como finalidade estudar a presença desta anomalia na concentração de ozônio estratosférico, quando o “buraco” se estende até a América do Sul (AS) e possui um formato de “vírgula”, bem como sua implicação nas condições troposféricas. Utilizamos 38 anos de dados entre os meses de agosto e novembro, onde identificamos 122 eventos de baixo ozônio sobre o sul da América do Sul, sendo que, tais eventos apresentavam um formato de “vírgula” sobre a AS. A temperatura em 100 hPa (ainda dentro da troposfera) mostrou uma diminuição durante os eventos de “vírgula”, assim como os campos de vento zonal em 100 hPa. Observou-se através do vento zonal em 200 hPa que o Jato Subtropical sofre um enfraquecimento durante os eventos, que refletem em maiores amplitudes das ondas de Rossby. A vortacidade potencial apresenta um dipolo sobre o Atlântico, na região das quebras de onda de Rossby, levando a concluir que os eventos de vírgula tem relação direta com as trocas estratosfera-troposfera, pois ocorre a ruptura da tropopausa.

**Palavras-chave:** Buraco de Ozônio; Evento Vírgula; Quebra da onda de Rossby

### **Abstract**

The formation of ozone ( $O_3$ ) occurs in the lower stratosphere, in the layer above the troposphere, so does a large concentration of energy, which interferes in the temperature profile in practically all the stratosphere. From the 80's very low values of stratospheric ozone on the Antarctic Continent, especially in the months of September and October. This reduction was denominated the “Antarctic ozone hole”, which was directly linked to chlorine-fluorocarbons (CFCs), which break down ozone bonds. Thus, this work aims to study the presence of this anomaly in the concentration of stratospheric ozone, when the “hole” extends to South America (SA) and has a “comma” format, as well as its implication in the conditions troposphere. We used 38 years of data between August and November, where we identified 122 low impact events in southern South America, and these events presented a “comma” format about AS. The temperature at 100 hPa (still within the troposphere) had a decrease during the “comma” events, like the zonal wind fields at 100 hPa. To observe the influence of wind in 200 hPa that the Subtropical Jet undergoes a weakening during the events, that reflects in greater amplitudes of Rossby waves. A potential vorticity presents a dipole over the Atlantic in the Rossby wave region, leading to comma events having direct access as stratosphere-troposphere changes, as a tropopause rupture occurs.

**Keywords:** Ozone hole; Virgule event; Rossby Wave break

## 1 Introdução

Os processos de formação do ozônio ( $O_3$ ) ocorrem em torno de 30 km de altitude e por serem altamente energéticos (Slusser *et al.*, 1999) causam a inversão no perfil de temperatura da estratosfera (Salby, 1995; Solomon, 1999). Essa produção de ozônio estratosférico é contrabalançada por vários mecanismos de perda, como a recombinação do ozônio com o oxigênio (Solomon, *et al.*, 1986) e processos de oxidação ao adentrar na troposfera (Salby, 1995).

Durante o inverno há um resfriamento da estratosfera, o que aumenta a subsidência e o gradiente latitudinal de pressão (Andrews *et al.*, 1987). Forma-se uma forte circulação de oeste em torno dos polos, denominada vórtice polar, que aumenta a variação latitudinal do  $O_3$  (WMO/UNEP, 1994). Na década de 1980, o British Antarctic Survey (BAS) identificou baixos valores de ozônio na estratosfera sobre a Antártica, presente nos meses de setembro e outubro (primavera austral) (Chubachi, 1984). Essa depleção, denominada “buraco de ozônio da Antártica” foi atribuída à ação dos cloro-fluor-carbonetos (CFCs), que quebram facilmente as ligações do  $O_3$  (Molina & Rowland, 1974). A partir desse fato, foi criado o protocolo de Montreal (1987), com a finalidade de proteger a camada de ozônio, através da redução do consumo dos CFCs.

No hemisfério sul (HS), o ozônio estratosférico apresenta máxima concentração nos meses de outubro e novembro (primavera austral), podendo também ter casos identificados nos meses de setembro e dezembro (Pinheiro *et al.*, 2011). Nas regiões tropicais, a concentração praticamente não varia, devido à incidência constante de radiação Solar (Wakamatsu *et al.*, 1989). Apesar de a região tropical ser a maior produtora de ozônio estratosférico, a circulação Brewer-Dobson transporta ozônio para as médias e altas latitudes (Brewer, 1949; Dobson, 1968), formando um cinturão de altas concentrações sobre as latitudes médias (Dobson, 1968). Na região Antártica, o vórtice forma um bloqueio entre o polo e as médias latitudes, impedindo o transporte de ozônio para dentro desse vórtice (Schoeberl *et al.*, 1992). Com o fim da noite polar (Final do Inverno Austral), o vórtice enfraquece e pode romper-se (Andrews *et al.*, 1987), sendo acompanhado por um súbito aquecimento da estratosfera superior e

uma desaceleração ou até mesmo uma reversão dos ventos de oeste (Andrews *et al.*, 1987; Limpasudavan *et al.*, 2004). Assim como, há um decaimento da temperatura dentro do vórtice (Newman & Randel, 1988), que ocorre apenas após a quebra do vórtice e não antes de sua formação (Newman & Randel, 1988), sugerindo que essas mudanças são uma consequência ao buraco de ozônio Antártico (Solomon, 1999).

Todavia, alguns autores alertavam que o “buraco” estaria causando anomalias na coluna total de ozônio (CTO) sobre latitudes mais baixas, ou seja, próximas a região tropical (Feldstein, 2011). Sobre a América do Sul (AS) há diversos relatos (Peres *et al.*, 2014), sendo que Kirchhoff *et al.*, (1996) denominaram de “efeito secundário” do buraco de ozônio, os quais são temporários e podem ter duração entre 03 e 04 dias (Kirchhoff *et al.*, 1996). Esse “efeito secundário” do buraco de ozônio sobre áreas mais povoadas provocaram preocupação, pois quando o ozônio se torna mais rarefeito, há um aumento na incidência de radiação UV-B (Salby, 1995). Uma redução de 1% na CTO gera um aumento de 1,2% na incidência de radiação UV-B (Guarnieri *et al.*, 2004). Esse tipo de radiação afeta a saúde humana e vegetal, e os principais organismos prejudicados são os unicelulares, pois uma pequena mudança na incidência de UV é suficiente para danificá-los.

Alguns autores alertam para as consequências do declínio do ozônio na mudança climática (Kang *et al.*, 2011), como uma possível mudança no regime hídrico das regiões subtropicais, durante o verão austral (Kang *et al.*, 2011). Na AS há uma diminuição acentuada do buraco de ozônio em torno de 20°S e um aumento em torno de 30°S (Kang *et al.*, 2011). Essa mudança pode ser causada pelo deslocamento para sul do Jato Sub-tropical (Kang *et al.*, 2011). Esse deslocamento do Jato Sub-tropical para sul, gera divergência em altos níveis levando a movimento ascendente anômalo nos subtropicais (Kang *et al.*, 2011).

Atkinson *et al.*, (1989) identificou uma grande diminuição no ozônio sobre a região sul da Austrália, tão significativa que afetava a média mensal da coluna total de ozônio. Como a diminuição do ozônio ocorreu apenas alguns dias após uma ruptura no vórtice da Antártica, o autor atribuiu essa diminuição ao prolongamento do “buraco de

ozônio” sobre a Austrália, esse prolongamento apresentava um formato de vórgula.

Um bom indicador da dinâmica do ozônio estratosférico é a vorticidade potencial (VP) (Atkinson *et al.*, 1989; Narayana Rao *et al.*, 2003), principalmente durante o inverno e primavera. Uma região de grande gradiente de VP, sugere a borda do vórtice e consequentemente transporte horizontal de massa é associado à sua evolução temporal (Peres *et al.*, 2014). Como o campo de VP pode fornecer informações sobre a dinâmica desses vórtices, a propagação das ondas de Rossby pode mostrar quando as deformações são irreversíveis. Sendo a borda do vórtice mais estável, os filamentos que se distanciam da borda, possivelmente devido à quebra da onda tendem a se misturar com facilidade em latitudes médias (Mcintyre & Palmer, 1983). As ondas de Rossby se propagam pelos ventos de oeste e quando adquirem grande amplitude pode haver a “quebra da onda” (Mcintyre & Palmer, 1993). Com a quebra da onda de Rossby, podem ocorrer eventos de intrusão (EI), que carregam ar estratosférico para a troposfera, levando a CTO a um súbito aumento (Baray *et al.*, 2000).

Um estudo analisando o campo de VP em 350 K (em torno de 200 hPa na latitude de 30°N) para o período de inverno e início da primavera no Hemisfério Norte (HN), mostrou que as quebras afetam o equilíbrio da CTO, pois auxiliam no transporte latitudinal desse fluido, através da ruptura da onda de Rossby (Postel & Hitchman, 1999). A frequência, estrutura e tipo de evento de quebra da onda de Rossby pode ser percebida pelo campo do vento zonal na estratosfera inferior e troposfera superior (Hood *et al.*, 1999). Pois outro mecanismo associado aos eventos de intrusão é o Jato de Altos Níveis (JAN), que auxilia no transporte de massa (Trickl *et al.*, 2011), através da quebra da tropopausa. Anomalias positivas nos valores de ozônio na região da alta troposfera estão relacionados a quebra da tropopausa, que ocorre com maior frequência nas proximidades do Jato Subtropical (Peres *et al.*, 2014).

Outra possível ligação entre a quebra da tropopausa e a circulação da célula de Hadley é mencionada por Baray *et al.*, (2000). Analisando a média do vento zonal em 200hPa, o autor observou que uma forte convergência dos ventos nas proximidades do JAN na América do Sul,

aproximadamente na mesma localização da descendência da célula de Hadley.

Neste artigo, faremos uma análise mais detalhada dos eventos de diminuição da coluna total de ozônio, mas apenas quando estes tiverem o formato de “vórgula” sobre a América do Sul e realizar análises sobre a dinâmica desses eventos e as condições troposféricas.

## 2 Dados e Métodos

### 2.1 Dados

Para este trabalho foram utilizados dados do ERA – INTERIM (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (Dee *et al.*, 2011): Coluna total de ozônio (coluna integrada), temperatura no nível de 100 hPa e vento zonal em 100 e 200 hPa e ainda vorticidade potencial no nível isentrópico de 600 K e nos níveis padrões entre 1000 hPa e 10 hPa. Todos os dados são para o quadrimestre de agosto, setembro, outubro e novembro (ASON), entre os anos de 1979 até 2016. Esses meses representam o fim do inverno quando o “buraco de ozônio” está presente na atmosfera da Antártica e começa a ficar instável e a primavera, que é quando ocorrem as maiores instabilidades antes da dissipação do “buraco” (Andrews *et al.*, 1987 ; Schoeberl *et al.*, 1992 ; Kirchhoff *et al.*, 1996). A resolução temporal de média diária e a resolução espacial de 1°x1° para todo o Hemisfério Sul com mapas de projeção polar. Apesar do enfoque do trabalho ser sobre a América do Sul, é imprescindível observar a movimentação sobre todo o hemisfério, para se ter uma visão mais ampla da dinâmica.

### 2.2 Metodologia

Para encontrarmos o padrão associado a eventos de quebra da CTO, seguimos os seguintes passos:

1) Catalogamos, a partir dos dados de CTO, todos os dias em que o buraco de ozônio se prolongou sobre o sul da América do Sul, apresentando o formato de “vórgula”. Denominando esses eventos como eventos de vórgula;

2) Utilizamos os campos médios para o período de agosto, setembro, outubro e novembro, de 1979 até 2016 na realização das análises, os quais foram elaborados para todas as variáveis da seguinte

forma:

2.1) Média do quadriênio para todos os dias do período estudado (denominado: média total);

2.2) Média do quadriênio apenas dos dias catalogados com eventos de vírgula (denominado: média vírgula);

2.3) Diferença entre média vírgula e média total.

3) Para a evolução temporal dos eventos de vírgula, utilizamos os tempos -2, -1, 0, 1, dias, como forma de compreender os momentos anteriores a diminuição do ozônio sobre o continente, pois segundo Kirchoff *et al.*, (1996) esses eventos duram em torno de 3 a 4 dias sobre um ponto. O tempo 0 é o dia em que o evento de vírgula foi registrado sobre a América do sul, representado pela média das vírgulas, explicada em 2.2. Essa evolução foi analisada apenas para a variável CTO.

4) Para as análises de CTO, temperatura em 100 hPa, vento em 100 hPa e 200 hPa e vorticidade potencial em 600 K, utilizamos o mapa projeção

polar. Para a vorticidade potencial entre os níveis padrões de pressão de 1000 hPa e 10 hPa foi feito um corte vertical na latitude de 50°S entre as longitudes de 0 e 90°W, com a finalidade de analisar o que ocorre na estrutura vertical.

Desta forma, foram analisadas as condições da troposfera durante a presença de um evento “vírgula” sobre a América do Sul.

### 3 Resultados

Foram catalogados 122 eventos de vírgula através da análise dos campos de CTO para todo o período de dados utilizado neste trabalho. Os eventos estão distribuídos em maior parte nos meses de setembro, outubro e novembro, que tiveram 34, 47 e 33, respectivamente (Figura 1). O mês de agosto foi o que apresentou a menor quantidade de eventos, tendo apenas 8, pois durante o inverno o “buraco” fica mais estável e dessa forma a ocorrência desse tipo de evento se torna mais difícil.

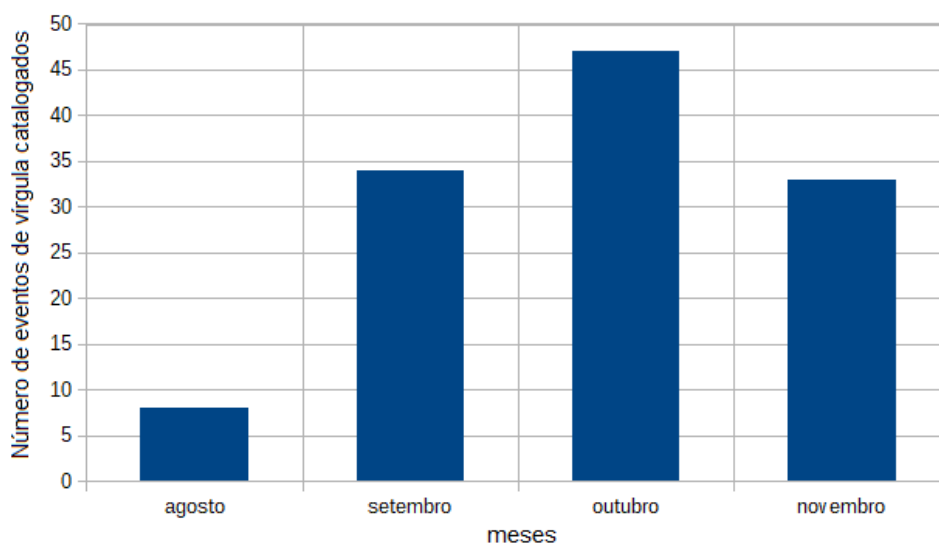


Figura 1 Distribuição do número de dias com evento de vírgula nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, entre os anos de 1979 e 2016.

A média temporal do quadrimestre para os dados de CTO é apresentada na Figura 2A. Identificamos um cinturão de altas concentrações de ozônio, que se encontra mais fortalecido sobre o lado oposto ao continente Sul Americano, localizado entre a Antártica e a Oceania. Isso sugere que os casos em que o buraco de ozônio da Antártica se prolonga sobre menores latitudes podem estar ocorrendo com maior frequência e/ou maior intensidade sobre a região da AS, fazendo com que os valores médios

de CTO baixem sobre esta região.

A partir dos 122 eventos de vírgula catalogados foi feita a média (Figura 2B), que mostra claramente a extensão do buraco de ozônio sobre o continente Sul Americano. Mostra também o cinturão das altas concentrações ao lado oposto desse continente, que tem uma configuração mais extensa longitudinalmente. O campo ainda mostra como esse prolongamento do buraco de ozônio baixa significativamente os valores de CTO sobre o

Sul da AS.

O campo da diferença entre essas duas médias é apresentado na Figura 2E afim de uma melhor comparação. Esse campo apresenta dois núcleos negativos, sobre os continentes Sul Americano e Antártico e dois núcleos positivos, lado oriental e ocidental da Antártica.

Sobre a América do Sul, localiza-se o núcleo negativo mais intenso, apontando que sobre essa região, durante as vírgulas (Figura 2C, D, E e F), CTO tinha valores mais distantes da média do que o núcleo sobre a Antártida. Assim, se estabelece que sobre a AS os eventos de vírgula têm decaimentos mais significativos. Porém durante os eventos de vírgulas a CTO também decai dentro do buraco de ozônio. Podemos atribuir essa queda pela maior abrangência espacial que o buraco de ozônio tem

durante tais circunstâncias. Os núcleos positivos também apresentam essa diferença. O núcleo mais forte fica no lado ocidental da Antártica, indicando que durante os eventos de vírgula o cinturão de altas concentrações tinha maiores valores de CTO nessa região.

Na evolução temporal da diferença das médias nos campos da Figura 2C, D, E e F, pode-se notar que os núcleos, tanto positivos quanto negativos movem-se de oeste para leste. Tais núcleos enfraquecem e equilibram-se no dia +1, indicando que a diferença entre as médias diminui logo após a passagem do evento de vírgula. Isso pode ocorrer devido ao prolongamento do buraco de ozônio para latitudes menores (evento de vírgula), deixando a atmosfera mais instável, o que possibilita a mistura da coluna total de ozônio.

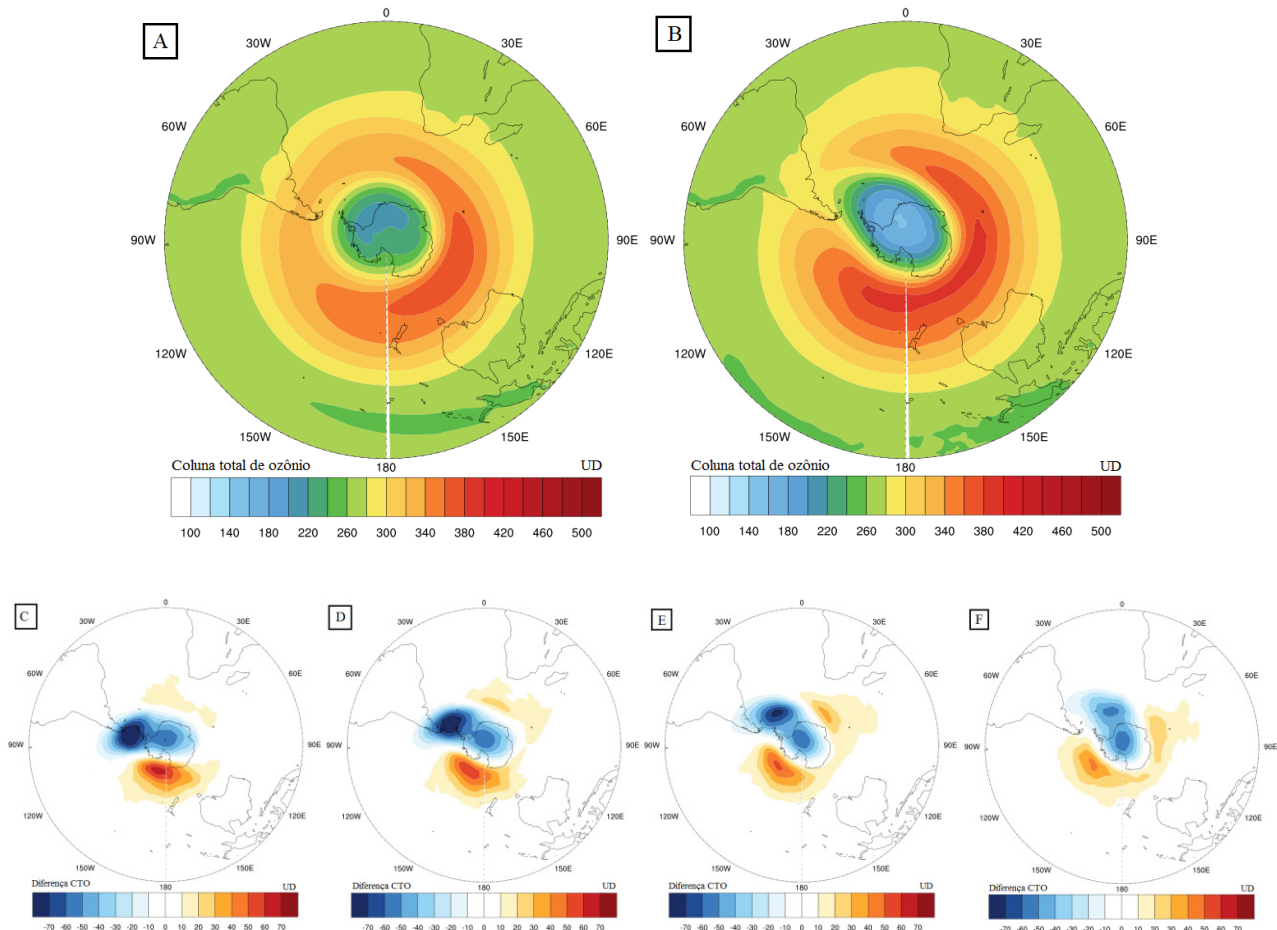


Figura 2 A. média do quadriênio ASON; B. média dos dias com eventos de vírgula. As próximas são a diferença entre as médias de A e B para os dias; C. -2 dias; D. -1 dia; E. 0 dia; F. +1 dia.

Quando analisamos a temperatura e o vento zonal em 100 hPa, temos o intuito de identificar um possível resfriamento da baixa estratosfera conforme a quantidade de ozônio diminui, pois segundo Kang *et al.*, (2011), o esgotamento do

ozônio sobre a Antártica causa o resfriamento severo da estratosfera inferior (em torno de 100 hPa), logo abaixo da camada de ozônio.

O campo da diferença da temperatura em 100 hPa (Figura 3A) entre os dias com evento de

vírgula e a média do período sem a presença de vírgula mostra um cinturão mais quente ao redor da Antártica (em torno de 6°C mais quente), que acompanha o cinturão das altas concentrações de CTO da Figura 2A. Identifica-se também uma diminuição da temperatura em 100 hPa sobre o sul da América do Sul, nitidamente associado a presença da vírgula.

Dentro do vórtice encontram-se as temperaturas mais baixas (~ menos 5°C), assim como, os valores mais baixos de ozônio (Figura 2C, D, E e F), corroborando com o mencionado por Kang *et al.*, (2011), onde o cinturão se fortalece e a vírgula adentra a AS, baixando os valores de temperatura e CTO.

A Figura 3B, mostra a diferença do vento zonal em 100 hPa idem a Figura 3A. Este campo mostra a intensa circulação de oeste que ocorre em torno do polo nesta época do ano, com aproximadamente

5m/s mais fortes que a média do quadrimestre. Nos dias em que houve evento de vírgula o campo médio apresenta uma deformação dessa circulação de oeste, que sofre um prolongamento para menores latitudes em direção à AS. Tal deformação leva o campo a uma instabilidade que facilita a troca de massa entre as latitudes. A Figura 3B também mostra um grande núcleo positivo no Atlântico próximo a AS (vento zonal 5m/s a mais que a média do quadrimestre), representando um aumento dos ventos de oeste nos dias de vírgula (deformação da circulação de oeste em torno o polo). Nas proximidades da Península Antártica e no Pacífico a Sudoeste da AS podemos observar núcleos negativos (variação de ~ -4m/s e -7m/s em relação à média). Esta diminuição dos ventos de oeste nos remete a um enfraquecimento da circulação nessas regiões, ou até mesmo, uma inversão dos ventos.

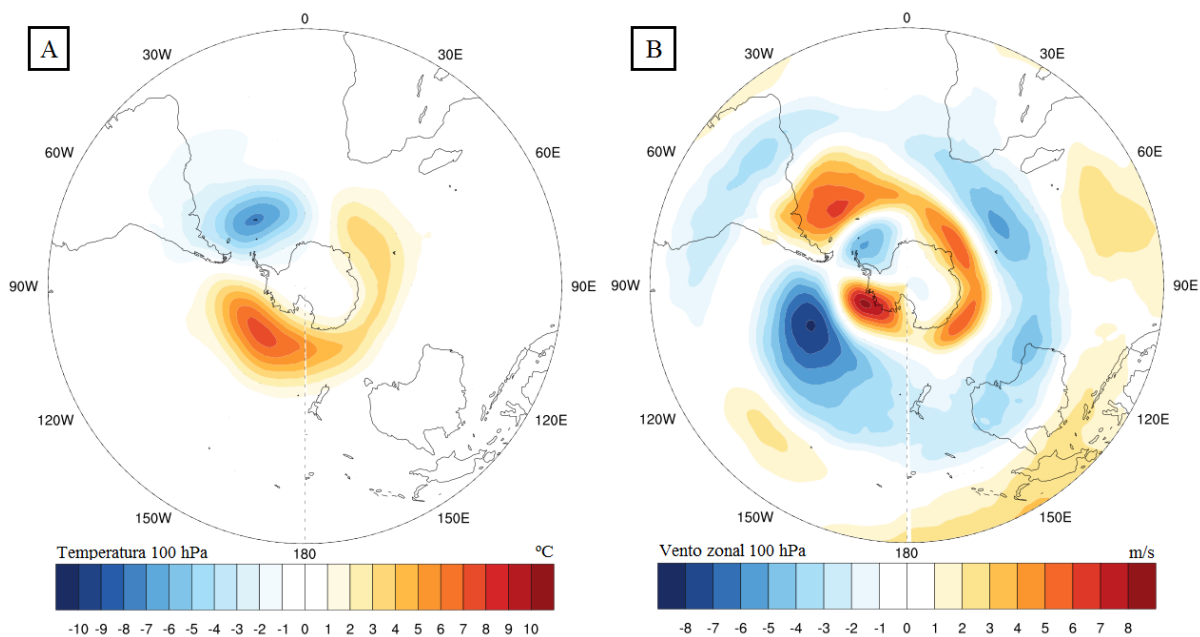


Figura 3 A. campo da diferença da temperatura em 100 hPa entre os dias com vírgulas e a média do período sem a presença de vírgula; B. Idem: para vento zonal em 100 hPa.

Esses resultados aqui mostrados confirmam os resultados de Andrews *et al.*, (1987) e Limpasudavan *et al.*, (2004), de que na primavera austral o vórtice Antártico sofre rompimentos, o que causam um enfraquecimento ou até mesmo uma reversão do vento zonal e um súbito aquecimento da alta estratosfera, principalmente na borda oposta a presença do vórtice.

O campo de vento zonal médio do quadriênio

no nível de 200 hPa (Figura 4) apresenta uma grande corrente de oeste no lado oposto ao continente Sul Americano. Os ventos são predominantes de oeste e valores entre 40m/s e 50m/s, onde os altos valores dos ventos de oeste (em torno de 35m/s) sobre a AS caracterizam a presença da corrente de jato subtropical (em torno de 30°S), que nessa época do ano se move para latitudes menores. Na diferença (Figura 4C) fica nítida a posição do Jato subtropical

quando ocorre evento de vírgula, estendendo-se sobre o Atlântico, com sua localização ligeiramente mais a sul, em torno de 33°S.

Postel & Hitchman, (1999) afirmam que quando os ventos de oeste enfraquecem, há uma tendência das ondas de Rossby ganharem maior amplitude e quanto maior essa amplitude da onda, maior a chance de quebra da tropopausa. Assim, uma inversão nos ventos de oeste pode identificar uma possível zona de quebra (Baray *et al.*, 2000). Quando

ocorre uma quebra, a média da CTO sofre uma reorganização, pois quando o ozônio da estratosfera penetra na troposfera ele começa a ser destruído por processos de oxidação (Salby, 1995). Dessa forma, a diferença na extensão e posição do jato pode ser o diferencial para que os dias com evento de vírgula ocorram ou pode ser uma consequência, pois o enfraquecimento do jato observado durante os eventos de vírgula mostra o enfraquecimento dos ventos de oeste (Feldstein *et al.*, 2011).

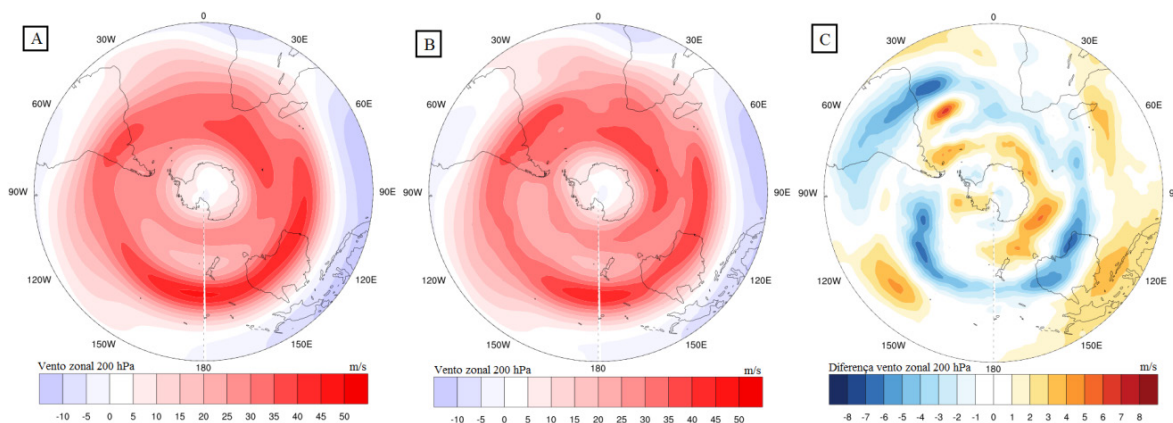


Figura 4 A. Vento zonal em 200 hPa para a média do quadrimestre; B. para a presença da vírgula; C. a diferença entre a vírgula e média. Unidade m/s.

O campo de vorticidade potencial tem sido muito utilizado como traçador da dinâmica da coluna total de ozônio (Peres *et al.*, 2014). Dessa maneira sua análise se torna de suma importância para a verificação dos padrões que ocorrem durante esses eventos de vírgula sobre a América do Sul.

A vorticidade potencial aumenta conforme a latitude aumenta, tendo valores que variam de  $-1,8 \times 10^{-4} \text{ K.kg}^{-1}.\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  a zero. O campo médio de vorticidade potencial em 600 K (em torno de 30 km) (Figura 5A) apresenta essa configuração, tendo uma região de forte gradiente de VP em torno do polo. É importante salientarmos que uma região com grande gradiente de VP pode ser utilizada para mostrar a borda do vórtice, assim como, o transporte horizontal de ozônio pode ser associado à variação temporal da VP (Bencherif *et al.*, 2003). Dessa forma ao analisar o campo para os dias com vírgula (Figura 5B) identificamos uma perturbação desse gradiente, que se estende para menores latitudes. É nítido a presença de um efeito de vírgula, como mostrado na Figura 4B, onde há um prolongamento dos menores valores da VP saindo da borda continental da Antártica em direção ao sul da América do Sul.

Tal fato é ratificado pelo campo da diferença das médias (Figura 5C), pois há um núcleo negativo de VP sobre a região afetada pela vírgula. Ele indica diminuição de VP nos dias de vírgula, assim como os núcleos positivos indicam um aumento. São observados dois núcleos positivos em torno do continente Antártico, sendo o núcleo ocidental mais intenso que o oriental, bem como alguns campos apresentados anteriormente. Um outro núcleo mais fraco é observado sobre a AS (em torno de 30°S e 50°W), formando um dipolo com o núcleo negativo mais a sul. Esse dipolo sobre o Atlântico coincide com a região das quebras de ondas de Rossby, relatadas por Postel & Hitchman, (1999) que afirmam essas rupturas auxiliam no transporte de ozônio da estratosfera para a troposfera.

Essa concordância entre esses campos mostra que estes são bons traçadores da dinâmica da coluna total de ozônio. A análise da evolução temporal do campo da diferença das médias, também mostrou o mesmo padrão desses dois campos. Com os núcleos positivos equilibrando-se e com um enfraquecimento de todos os núcleos. Esse enfraquecimento, novamente, dá-se devido à

mistura que ocorre com a instabilidade do buraco de ozônio Antártico.

Alguns autores mencionaram anteriormente que o aumento da VP em uma superfície isentrópica em torno de 600 K, pode está associado a quebra da onda de Rossby e consequentemente a entrada de massa

estratosférica para a troposfera, alterando o balanço de ozônio (Postel & Hitchman, 1999). Essas conclusões são coerentes com resultados aqui mostrados, onde há uma quebra significativa no padrão da VP em 600 K (Figura 5) e na CTO (Figura 2).

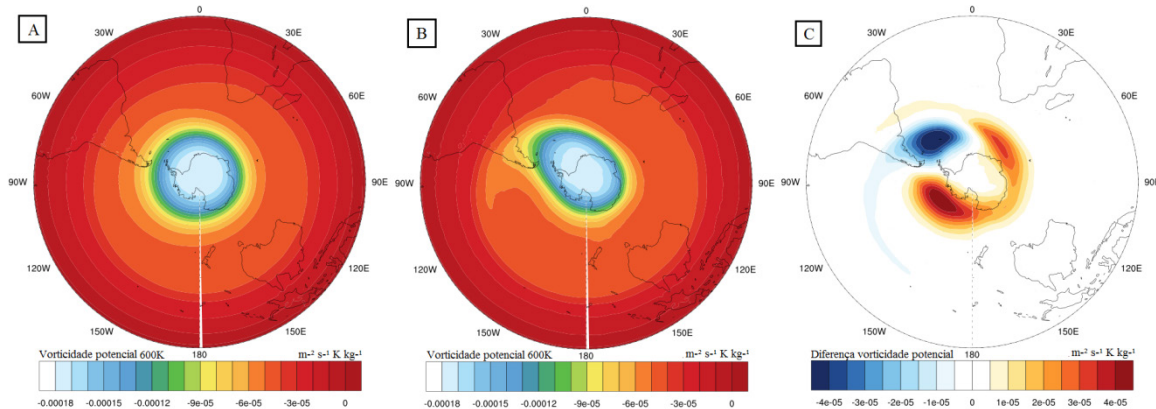


Figura 5 A. Vorticidade potencial no nível de 600 K para a média do quadrimestre; B. para a presença da vírgula; C. diferença entre a vírgula e média.

Uma maneira de identificarmos essa quebra no padrão da VP é através do corte vertical da mesma (Figura 6A, B e C). Esse corte vertical é localizado na latitude de 50°S, variando em longitudes. É notória a mudança no padrão da VP para os dias com vírgulas (Figura 6B), onde verifica-se um aprofundamento dos valores mais negativos em torno de 45°W (sul da América do Sul), desta forma, há uma diminuição

também do gradiente de VP na alta troposfera, em torno de 100 hPa (Figura 6B). A diferença entre o campo média quadrimestral e os dias com vírgula (Figura 6C), é mais nitidamente identificado este padrão, onde o comportamento, valores negativos mostram que durante os dias com vírgulas os valores mais baixos representam uma diminuição, caracterizando uma possível quebra da tropopausa.

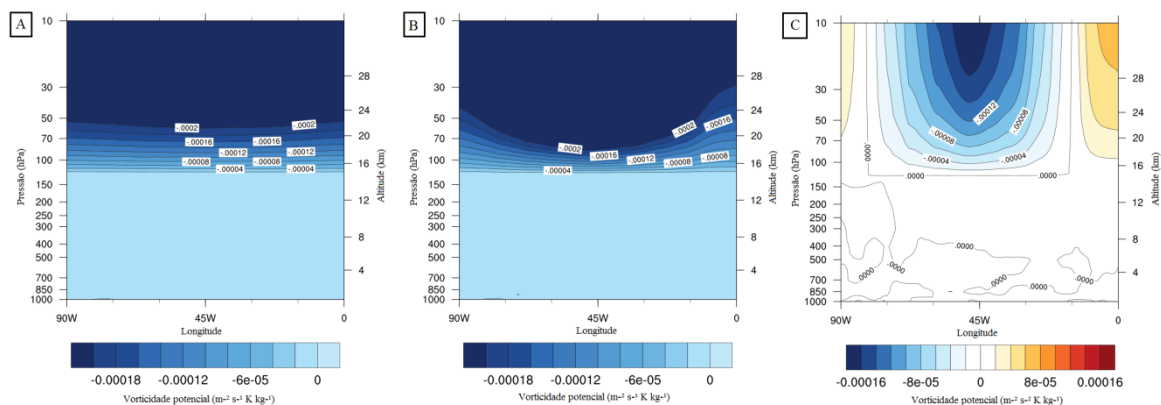


Figura 6 A. Corte vertical da vorticidade potencial na latitude de 50°S e entre as longitudes de 0° a 90°W para a média do quadrimestre; B. média dos dias com evento de vírgula; C. diferença entre os campos anteriores.

#### 4 Conclusão

Dentre os 38 anos de dados analisados para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, 122 casos de evento de vírgula foram registrados sobre a América do Sul. Pelo campo médio já se pode notar uma diminuição da quantidade de CTO

sobre a região da AS, sendo quando há a presença da vírgula, identifica-se ainda mais esses baixos valores da CTO sobre a região. O fato desses baixos valores aparecerem na média, mostra o quão significativo são os eventos de vírgula sobre essa região. Ao observar a diferença das médias, há um destaque para a região da AS, onde os baixos valores de ozônio



sofrem um maior desvio da média do quadrimestre. Esses valores também caem dentro do “buraco de ozônio”, indicando que durante as vórgulas, por ter uma maior extensão espacial, o conteúdo de ozônio fica ainda mais baixo.

Ao analisarmos outras variáveis, observamos algumas conexões com as condições da CTO. Dessa forma, foi possível observar a interação entre outras variáveis atmosféricas com o comportamento do ozônio, por meio de outros campos em outros níveis e compreender sua dinâmica. Analisando a variável temperatura em 100 hPa, concluiu-se que durante os eventos de vórgula a temperatura nesse nível sobre a área do “buraco de ozônio” não sofre alteração. Contudo, a temperatura sobre a área do “braço” da vórgula tem uma diferença negativa bastante significativa, principalmente sobre o sul da América do Sul. Com a presença da vórgula, ocorre uma instabilidade que torna mais fácil a mistura entre as áreas com menor temperatura (menos ozônio) e as áreas com maior temperatura (mais ozônio). Sendo assim, esse campo de temperatura em nível de 100 hPa mostra-se eficiente em representar a movimentação média do ozônio estratosférico.

O campo de vento zonal em 100 hPa também apresenta uma mesma evolução dos campos da CTO e da temperatura em 100 hPa. Desta forma, deduzimos que há realmente uma mistura de massa devido a deformação da circulação de oeste, implicando diretamente na evolução do efeito vórgula, principalmente sobre o sul da América do Sul.

Quando analisamos as condições do vento mais abaixo da tropopausa, como em 200 hPa, identificamos a presença do Jato Subtropical em torno de 30°S de latitude. Quando ocorrem os eventos de vórgula, esse Jato sofre um enfraquecimento e um deslocamento para sul. Tal enfraquecimento indica que os ventos de oeste perderam força e que as ondas de Rossby estão sujeitas a ganhar maior amplitude meridional, podendo romper-se.

Sabendo que os eventos de quebra da tropopausa ocorrem com maior frequência nas proximidades do JST, analisamos o campo de vorticidade potencial em superfícies isentrópicas. Nessa análise verificou-se que o campo de VP em nível de 600K é um bom traçador da dinâmica do ozônio estratosférico. Neste nível isentrópico, identificou-se um dipolo de VP sobre o oceano

Atlântico Sul, onde geralmente ocorrem as quebras de onda de Rossby. Esse dipolo indica que há advecção meridional de massa, representando o ganho de amplitude das ondas de Rossby. Isso leva a quebra da tropopausa e a entrada de massa estratosférica para a troposfera, fazendo com que a CTO sofra um súbito e tenha uma alteração no seu balanço. Essa entrada de massa da estratosfera para a troposfera foi observada verticalmente pelos campos médios de VP, em um corte vertical. Saliendo ainda mais a mistura que ocorre, não somente no plano horizontal, como entre as camadas da atmosfera.

## 5 Referências

- Andrews, D.G.; Holton, J.R. & Leovy, C.B. 1987. In Middle Atmosphere Dynamics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115(486):421-422.
- Atkinson, R.J.; Matthews, W.A.; Newman, P.A. & Plumb, R.A. 1989. Evidence of Mid-Latitude Impact of Antarctic Ozone Depletion. *Nature*, 340(6231):290-293.
- Baray, J.L.; Daniel, V.; Ancellet, G. & Legras, B. 2000. Planetary-scale tropopause folds in the southern subtropics. *Geophysical Research Letters*, 27(3):353-356. Doi:10.1029/1999GL010788
- Bencherif, H.; El Amraoui, L.; Kirgis, G.; De Bellevue, J.L.; Hauchecorne, A.; Mzé, N.; Portafaix, T.; Pazmino, A. & Goutail, F. 2011. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4°S, 70.3°E). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(1):363-373.
- Brewer, A.W. 1949. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75(326):351-363.
- Chubachi, S. 1984. Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. *Memoirs of National Institute Polar Research Japan Special*, 34:13-20.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, N.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberg, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, I.; Kållberg, P.; Köhler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.J.; Park, B.K.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*

- ety, 137(656):553-597.
- Dobson, G.M.B. 1968. Ozone in the Atmosphere. Exploring the Atmosphere. 2ed. London, Oxford University. 209 p.
- Feldstein, S.B., 2011. Subtropical Rainfall and the Antarctic Ozone Hole. *Atmospheric Science*, 332(6032):925-926.
- Guarnieri, R.A.; Guarnieri, F.L.; Contreira, D.B.; Padilha, L.F.; Echer, E.; Pinheiro, D.K.; Schuch, A.M.P.; Makita, K. & Schuch, N.J. 2004. Ozone and UV-B radiation anticorrelations at fixed solar zenith solar angles in southern Brazil. *Geofísica Internacional*, 43(1):17-22.
- Hood, L.; Rossi, S. & Beulen, M. 1999. Trends in lower stratospheric zonal winds, Rossby wave breaking behavior, and column ozone at northern midlatitudes. *Journal of Geophysical Research*, 104(20):24321-24339.
- Kang, S.M.; Polvani, L.M.; Fyfe, J.C. & Sigmond, M. 2011. Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation. *Science*, 332(6032):951-954.
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Schuch, N.J.; Pinheiro, D.K. & Harris, J.M. 1996. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. *Atmospheric Environment*, 30(9):1481-1488.
- Limpasudavan, V.; Thompson, D.W.J. & Hartmann, D.L. 2004. The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warming. *Journal of Climate*, 17(13):2584-2596.
- Mcintyre, M.E. & Palmer, T.N. 1983. Breaking planetary waves in the stratosphere. *Nature*, 305:593-600.
- Molina, M.J. & Rowland, F.S. 1974. Predicted present stratospheric abundances of chlorine species from photodissociation of carbon tetrachloride. *Journal Geophysical Research Letters*, 1(7):309-312. Doi:10.1029/GL001i007p00309.
- Narayana Rao, T.; Kirkwood, S.; Arvelius, J.; Von Der Gathen, P. & Kivi, R. 2003. Climatology of UTLS ozone and the ratio of ozone and potential vorticity over northern Europe. *Journal of Geophysical Research*, 108(D22):ac19-1 – ac19-10. Doi: 10.1029/2003JD003860.
- Newman, P.A. & Randel, W.J. 1988. Coherent ozone-dynamical changes during the Southern Hemisphere spring, 1979-1986. *Journal Geophysical Research*, 93(D10):12585-12606.
- Salby, M.L. 1995. Fundamentals of Atmospheric Physics. 1ª ed. (61). International Geophysics Series. 627 p.
- Schoeberl, M.R.; Lait, L.R.; Newman, P.A. & Rosenfield, J.E. 1992. The structure of the polar vortex. *Journal of Geophysical Research*, 97(8):7859-7882.
- Solomon, S.; Garcia, R.R.; Rowland, F.S. & Wuebbles, D.J. 1986. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 321:755-758.
- Solomon, S. 1999. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 37(3):275-316.
- Slusser, J.; Gibson, J.; Bigelow, D.; Kolinski, D.; Mou, W.; Koenig, G. & Beaubien, A. 1999. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. *Applied Optics*, 38(9):1543-1551.
- Peres, L.V.; Dos Reis, N.C.; Santos, L.O.; Bittencourt, G.D.; Schuch, S.P.; Anabor V.; Pinheiro, D.K.; Schuch, N.J. & Paes Leme, N.M. 2014. Análise Atmosférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil em 2012. Parte 2: Verificação Sinótica da Troposfera durante os Eventos. *Ciência e Natura*, 36(especial II):423-433. Doi: 10.5902/2179460X13151.
- Pinheiro, D.K.; Leme, N.P.; Peres, L.V. & Kall, E. 2011. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2008 and 2009. In: Annual Active Report 2010 – National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research, Rio de Janeiro, Editora Cubo, p. 33-37.
- Postel, G.A. & Hitchman, M.H.A. 1999. Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. *American Meteorological Society*, 56(3):359-373. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<0359:ACORWB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<0359:ACORWB>2.0.CO;2)
- Trickl, T.; Bärtsch-Ritter, N.; Eisele, H.; Furger, M.; Mücke, R.; Sprenger, M. & Stohl, A. 2011. High-ozone layers in the middle and upper troposphere above Central Europe: potential import from the stratosphere along the subtropical jet stream. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(17):9343–9366. Doi: <https://doi.org/10.5194/acp-11-9343-2011>.
- Wakamatsu, S.; Uno, I.; Veda, H.; Uehara, K. & Tateishi, H. 1989. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere. *Atmospheric Environment*, 23(8):1815-1826. Doi: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90065-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90065-6).
- WMO/ UNEP. 1994. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Genebra. 36 p.