

Eventos de Influência do Buraco de Ozônio Antártico Ocorridos em 2016 Sobre o Sul do Brasil

Events of Influence of the Antarctic Ozone Hole Occurred in 2016 Over Southern Brazil

Marco Antônio Godinho dos Reis¹ , Lucas Vaz Peres¹ , Gabriela Dornelles Bittencourt² , Damaris Kirsch Pinheiro^{2,3} , Luiz Angelo Steffene⁴ , Hassan Bencherif⁵ , Rodrigo da Silva¹ , Mateus Dias Nunes^{6,7} , José Valentin Bageston^{8,2}  & Gabriela Cacilda Godinho dos Reis⁹ 

¹Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

³Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

⁴LICIIS - LRC CEA DIGIT, Université de Reims Champagne Ardenne, Reims, França

⁵LACy - Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones, UMR 8105, Université de La Réunion, Ilha da Reunião, França

⁶Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil

⁷Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

⁸Coordenação Espacial do Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Maria, RS, Brasil

⁹Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil

E-mails: reis.marco.stm@gm ail.com; lucas.peres@ufopa.edu.br; gadornellesbittencourt@gmail.com; damaris@ufsm.br; angelo.steffene@univ-reims.fr; hassan.bencherif@univ-reunion.fr; rodrigo.silva@ufopa.edu.br; nunes.mateusdias@gmail.com; jose.bageston@inpe.br; gabihgodinho@gmail.com

Resumo

O presente trabalho objetivou identificar e analisar a dinâmica estratosférica dos eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico (BOA) ocorridos sobre o Sul do Brasil no ano de 2016. Para atingir esse objetivo, buscou-se dias de redução no conteúdo de ozônio estratosférico com base em dados médios diários da Coluna Total de Ozônio (CTO) obtidos pelo espectrofotômetro Brewer instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/INPE) (29.443752 °S, 53.823084 °O; 488,7 metros) e pelo instrumento de medição de Ozônio (*Ozone Monitoring Instrument* - OMI) a bordo do satélite Aura da NASA. Para esses dias foram realizadas análises da dinâmica da estratosfera através de campos isentrópicos de Vorticidade Potencial (PV) nos níveis de 600 e 700 K de temperatura potencial, utilizando as médias diárias de PV obtidas a partir das reanálises ERA-Interim do ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecast*) a fim de verificar a origem das massas de ar pobres em ozônio, e desta forma, a confirmação da origem dessas massas através das trajetórias retroativas obtidas com uso do modelo HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Além disso, imagens do conteúdo de ozônio do satélite OMI foram utilizadas como técnica complementar para verificar a atuação do BOA sobre o Sul do Brasil. Usando a metodologia apresentada identificou-se 6 eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil no ano de 2016 com percentagem de redução média de 11% da CTO em relação as climatologias mensais, confirmados pela passagem de filamentos polares estratosféricos sobre a região do OES, observados nos campos isentrópicos de VP nos níveis de 600 e 700 K de temperatura potencial assim como pelas trajetórias retroativas de origem polar obtidas no modelo HYSPLIT.

Palavras-chave: Ozônio estratosférico; Coluna total de ozônio; Vorticidade potencial

Abstract

The present study aims to analyze the stratospheric dynamics of the events of influence of the Antarctic Ozone Hole (BOA) that occurred over the South of Brazil in 2016. To reach this goal, days of reduction were used in the stratospheric ozone content based on Total Ozone Column (CTO) daily average data obtained from the Brewer spectrophotometer installed at the Southern Space Observatory (OES/INPE) (29.443752 °S, 53.823084 °W; 488.7 meters) and by the Ozone measuring instrument (Ozone Monitoring Instrument - OMI) onboard the NASA Aura satellite. For those days, stratosphere dynamics analyses were carried out through isentropic fields of Potential Vorticity (PV) at 600 and 700 K (Kelvin) levels of potential temperature, using the daily PV averages obtained from ERA-Interim reanalysis of ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast) to verify the origin of the ozone-poor air masses. Thus, the confirmation of the origin of these masses through the retroactive trajectories obtained using the HYSPLIT model (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) of NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). In addition, images of the ozone content of the OMI satellite were used as a complementary technique to verify the performance of BOA over Southern Brazil. Then, 6 events of influence of the Antarctic Ozone Hole were identified over the South of Brazil in 2016, with an average reduction percentage of 11% of the CTO to monthly climatologies, confirmed by the passage of stratospheric polar filaments over the OES region, observed in the VP isentropic fields at the 600 and 700 K potential temperature levels as well as by the retroactive trajectories of polar origin obtained in the HYSPLIT model.

Keywords: Stratospheric ozone; Total ozone column; Potential vorticity

1 Introdução

De relevante papel no balanço energético do planeta, o ozônio (O_3) é considerado o mais importante gás traço da atmosfera, ao lado do vapor d'água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), sendo o terceiro maior gás de efeito estufa, contribuindo aproximadamente com 8% da absorção líquida de radiação de ondas longas em céu limpo e 7% em céu nublado (Kiehl & Trenberth 1997; Schmidt et al. 2010). Esse gás desempenha importante papel na circulação atmosférica tanto da troposfera quanto da estratosfera (World Meteorological Organization 2018), sendo a região entre 20 e 30 km o local de sua maior concentração vertical, conhecida como *camada de ozônio* (London & Angell 1982; Salawitch et al. 2019).

O papel primordial do ozônio no suporte à vida na superfície terrestre reside nas suas propriedades de interceptação da radiação Ultravioleta (UV), especialmente na faixa B (UV-B: 280-320 nm) que é prejudicial aos seres vivos (Salby 1996). É majoritariamente em função de tal papel que surgiram os esforços de monitorar e melhor compreender as variabilidades e comportamentos do ozônio na estratosfera (região entre ~15 e 50 km), mais especificamente na camada de ozônio (entre 20 e 30 km de altitude) onde se encontra 90% do conteúdo de ozônio da atmosfera (World Meteorological Organization 2018). Estudos da variabilidade e dinâmica da concentração deste gás ajudam a entender, por exemplo, a razão de maiores concentrações de ozônio nas regiões polares do que na região equatorial (a cerca de 40 km de altitude), onde ocorre a sua maior produção. Esse desequilíbrio está relacionado ao transporte meridional em direção aos polos proporcionado, principalmente, pela circulação Brewer-Dobson (Brewer 1949; Dobson, Kimball & Kidson 1930), uma circulação caracterizada por movimentos ascendentes nos trópicos e descendentes em médias e altas latitudes.

Alguns elementos apontam a existência de estreitas relações entre a distribuição e variabilidade do ozônio e o comportamento dinâmico e radiativo da atmosfera, como as trocas entre a baixa estratosfera e alta troposfera, especialmente nos extratropicos e os impactos do ozônio nessas regiões (Gettelman et al. 2010; McLandress et al. 2011; McLandress, Perlwitz & Shepherd 2012; Polvani, Previdi & Deser 2011). Sobre tais relações Gettelman et al. (2010) destacou que os gradientes e trocas de gases como o ozônio e vapor d'água, na região dos extratropicos, provocam perturbações no balanço radiativo local, que por sua vez podem combinar-se à mudanças nas estruturas dinâmicas, alterando perfis de temperatura, vento e estabilidade estática da região. McLandress et al. (2011), McLandress, Perlwitz & Shepherd (2012) e Polvani, Previdi & Deser (2011) também observaram como mudanças e alterações no conteúdo de ozônio estão ligadas às mudanças

na temperatura e na circulação troposférica e estratosférica. Desses fatores decorrem, por exemplo, as menores taxas de aquecimento e resfriamento por ondas curtas observadas durante a primavera austral nas diferentes camadas da troposfera e estratosfera, assim como alterações sazonais consistentes da circulação Brewer-Dobson (Braesicke et al. 2013). Também se incluem alterações como o aumento dos ventos zonais e redução do transporte meridional de gases traços como o ozônio, especialmente nas regiões polares.

Projeções de modelos climáticos (Chiodo et al. 2018; Chiodo & Polvani 2019) evidenciaram que o aumento da concentração dos gases de efeito estufa e seu acoplamento às respostas da recuperação da camada de ozônio poderão implicar em mudanças na temperatura e na circulação estratosférica. Assim, como outros estudos mostram que os efeitos da depleção do ozônio podem se estender por outros diversos aspectos dinâmicos e climáticos, tais como fração de nebulosidade (Grise et al. 2013), frequência de ciclones no hemisfério sul (Grise et al. 2014), regimes de precipitação (Gonzalez et al. 2014; Wu & Polvani 2017), propagação de ondas planetárias (Hu et al. 2015), intensidade dos jatos (Kidston et al. 2015) e bloqueios atmosféricos (Dennison, McDonald & Morgenstern 2016).

Apesar de algumas décadas desde a descoberta do Buraco de Ozônio Antártico (BOA) (Farman, Gardiner & Shanklin 1985), a cada ano ele continuar a ocorrer com a severidade da perda química fortemente modulada por condições meteorológicas (World Meteorological Organization 2018). Juntamente com a proibição do uso de Substâncias Destruidoras do Ozônio (SDO) estabelecida pelo Protocolo de Montreal de 1987, a expectativa era de que a Coluna Total de Ozônio (CTO) se recuperasse à medida que a quantidade de SDO diminuísse em todas as regiões. Estudos recentes mostraram uma recuperação da coluna de ozônio estratosférico durante setembro (estatisticamente significativo) e outubro (estatisticamente insignificante) para a região polar do Sul (Solomon et al. 2016; Weber et al. 2018).

Um importante fenômeno de variabilidade do conteúdo de ozônio estratosférico relacionado ao BOA são os “Efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico” (Pinheiro et al. 2011). Esse fenômeno pode alcançar regiões densamente povoadas, onde os efeitos nocivos do aumento da radiação UV incidente pode causar danos à saúde de um grande número de pessoas e animais. Schuch et al. (2015) já relacionaram o declínio de espécies de anfíbios sobre a região sul do Brasil a fatores como o aumento da radiação UV sobre a região (Schuch et al. 2015). Reduções de 1% no conteúdo de ozônio podem causar aumento de até 2% na radiação ultravioleta incidente sobre a superfície terrestre (Seinfeld & Pandis 2016) e sobre o Sul do Brasil uma mesma queda de 1% no conteúdo de ozônio causa

aumento médio de 1,2% na radiação ultravioleta incidente (Guarnieri et al. 2004).

Esses efeitos secundários do BOA são caracterizados por massas de ar pobres em ozônio que se desprendem do interior do vórtice polar antártico, mais especificamente da borda do Buraco de Ozônio, e são transportadas por filamentos polares sobre regiões de médias latitudes (Marchand et al. 2005; Nash et al. 1996). Esse fenômeno que ocasiona quedas temporárias do conteúdo de ozônio foi observado primeiramente por Kirchhoff et al. (1996) sobre o Sul do Brasil, e vem sendo frequentemente observado também sobre a América do Sul e Sul do Brasil (Orte et al. 2019; Pazmiño et al. 2008; Peres 2013; Peres et al. 2011; Pérez et al. 2000; Pérez & Jaque 1998; Pinheiro et al. 2011). Sendo, portanto, o principal objeto de estudo do presente trabalho.

Alguns estudos, como Steffene et al. (2016), identificaram a ocorrência de tais eventos, especialmente em outubro de 2013, utilizando ambiente de computação pervasiva para, assim, ajudar na realização de alertas à população e as autoridades locais sobre futuros aumentos da radiação UV. A fim de identificar a condição sinótica da troposfera durante a ocorrência de dois eventos de Efeito Secundário do BOA, Peres et al. (2014) encontraram uma associação desses eventos à atuação de um sistema frontal estacionário relacionada ao afastamento da corrente de jato subtropical para o Oceano Atlântico, sobreposta por um amplo sistema de alta pressão. Um dos casos chegou a configurar uma condição de bloqueio atmosférico, sugerindo que quanto mais intensa for a massa de ar estável pós-frontal maior será a queda no conteúdo de ozônio.

Mais recentemente, com base em observações obtidas por satélite e em superfície, no Observatório Espacial do Sul (OES) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), (Bresciani et al. 2018) identificaram, em 20 de outubro de 2016, uma diminuição significativa no conteúdo de ozônio estratosférico, com redução de 120 μhPa na pressão parcial de ozônio em relação a climatologia, devido à influência do BOA atingindo latitudes médias (Uruguai e Sul do Brasil). De modo semelhante, Peres et al. (2019), para um período de 35 anos entre 1979 e 2013, também observaram a ocorrência dos eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil e identificaram um total de 62 eventos. Para os dias de ocorrência desses eventos, Peres et al. (2019) encontraram ainda um padrão de circulação estratosférica de deslocamento de uma massa de ar advectada em direção ao Sul do Brasil, embebida dentro de uma ampla região de circulação ciclônica, com ventos predominantemente de sul.

Não obstante os registros já realizados pelas pesquisas anteriormente citadas quanto aos eventos de efeito secundário do BOA no Hemisfério Sul e Sul do Brasil, continua relevante os esforços investigativos sobre

a sua ocorrência. Portanto, o presente trabalho objetivou a identificação e análise da dinâmica da estratosfera dos eventos de influência do BOA ocorridos sobre o Sul do Brasil no ano de 2016, analisando dados de conteúdo de ozônio obtidos por satélite e em superfície em São Martinho da Serra (29.26 °S, 53.48 °O), Rio Grande do Sul – RS.

2 Metodologia

2.1 Dados

A fim de identificar e analisar a dinâmica da estratosfera ligada aos eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil em 2016 foram utilizadas medidas da CTO obtidas pelo Espectrofotômetro Brewer sobre o OES, sítio observacional vinculado à Coordenação Espacial do Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, unidade do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (COESU/INPE- MCTI), assim como medições obtidas pelo satélite OMI/Aura. O espectrofotômetro Brewer utilizado foi do modelo MKIII # 167 com instalação realizada em julho de 2002 na região do Rincão dos Negrinhos, em São Martinho da Serra, onde localiza-se o OES/INPE, conforme apresentado na Figura 1. Com operação automatizada, o Espectrofotômetro Brewer é um instrumento capaz de efetuar medidas da radiação solar global na banda do Ultravioleta tipo B (UV-B) e permite a dedução da CTO, dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2), podendo também obter o perfil vertical de ozônio pela técnica de *Umkehr* e as quantidades de NO_2 estratosférico e troposférico pela técnica de *Twilight* (Kerr 2002; Kerr et al. 1985). Peres et al. (2017) avaliou os dados de monitoramento a longo prazo da CTO obtidos de 1992 a 2014 no OES, contemplando inclusive os pontos de falhas em decorrência de eventuais problemas técnicos. Os autores encontraram uma boa concordância entre a série de dados obtida em superfície pelo espectrofotômetro Brewer e a série de dados obtida por satélites, através dos instrumentos de monitoramento de ozônio OMI e TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*), atestando a acurácia dos dados.

Os dados diários da CTO medidos por satélite utilizados neste estudo foram obtidos através do instrumento de monitoramento de ozônio chamado OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), que está a bordo do satélite Aura (<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>) lançado em julho de 2004. O instrumento OMI deu continuidade às atividades do instrumento TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) que estava a bordo do satélite ERS-2, que encerrou sua atividade em 2005. O instrumento TOMS realizava medições de colunas e perfis de ozônio, aerossóis, nuvens, irradiância UV na superfície e de gases traços como NO_2 , SO_2 , HCHO, BrO e OClO. O instrumento OMI emprega

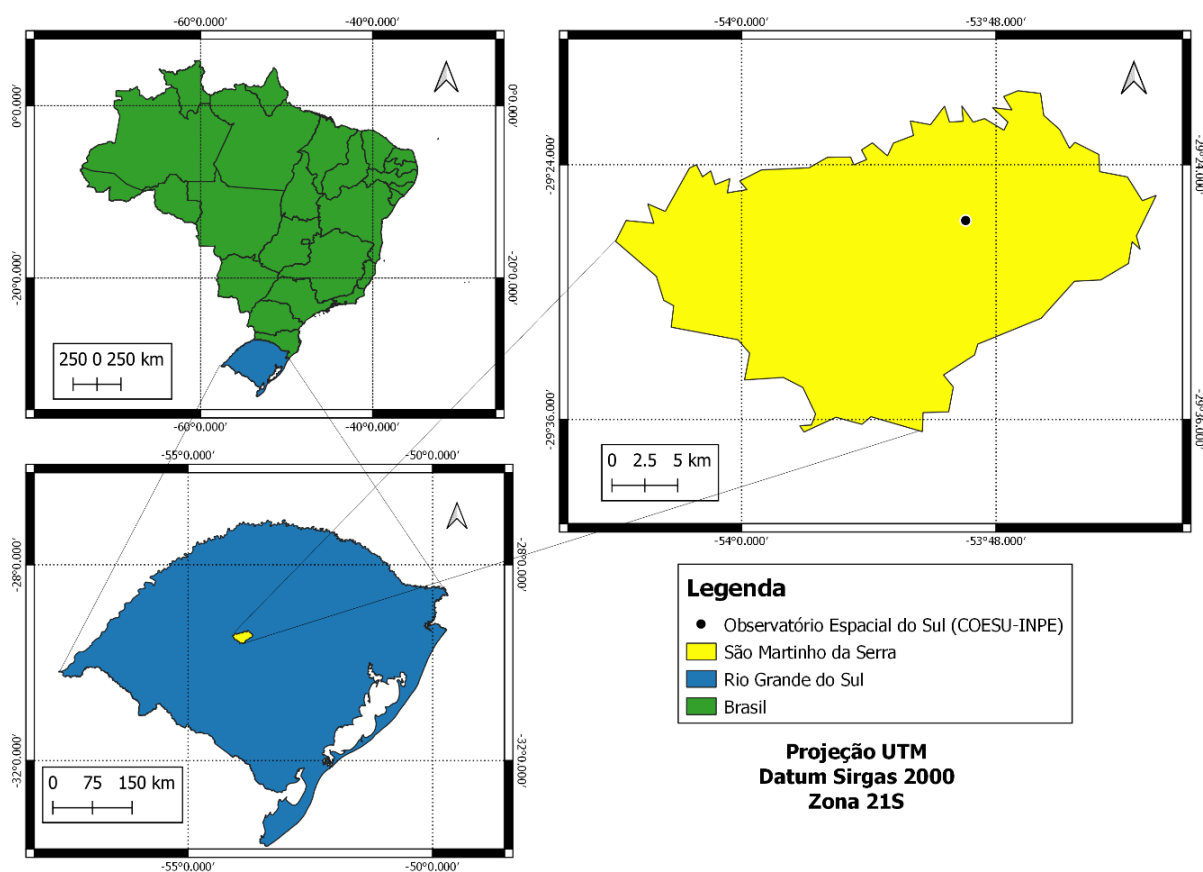


Figura 1 Mapa da localização do Observatório Espacial do Sul em São Matinho da Serra – RS.

imagem hiperespectral em um modo de varredura para observar a radiação solar retrodifundida na região do visível e ultravioleta do espectro eletromagnético (Levelt et al. 2006). As capacidades hiperespectrais melhoram a precisão das quantidades da CTO e também permitem a auto calibração radiométrica de comprimento de onda precisos de longo prazo. A Terra é observada em 740 bandas de comprimento de onda ao longo da rota do satélite, com uma faixa grande o suficiente para fornecer cobertura global em 14 órbitas (1 dia). Além disso, realiza medições através da técnica de retro dispersão de ultravioleta com duas imagens alimentando a grade do espectrômetro e possui uma resolução espacial de 13 x 25 km tendo duas bandas de ultravioleta nomeadas UV-1 (270 a 314 nm) e UV-2 (306 a 380 nm), com uma resolução espectral de 0,45 e 1 nm respectivamente (National Aeronautics and Space Administration 2020).

Para identificar os dias de ocorrência de eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil em 2016, e por extensão, analisar a dinâmica da estratosfera, foram utilizados métodos que incluem a análise da CTO, avaliação dos campos de vorticidade potencial e das trajetórias retroativas de massas de ar,

conforme descritos na próxima seção (2.2). Tais métodos foram realizados de modo semelhante às metodologias adotadas por trabalhos como Bittencourt et al. (2018), Peres (2016) e Peres et al. (2019), que também se dedicaram a investigar a ocorrência de eventos de efeito secundário do BOA no sul do Brasil.

2.2 Métodos de Análise

Conforme é apresentado resumidamente na Figura 2 ao final desta seção, neste trabalho se analisou primeiramente os dados das médias diárias da CTO para o ano de 2016 sobre a região do OES. Tais dados foram obtidos pelo instrumento OMI e pelo espectrofotômetro Brewer, em superfície. Essa análise consistiu-se na verificação dos dias no ano de 2016 em que houve queda temporária extrema no conteúdo de ozônio, ou seja, abaixo do limite da média climatológica do mês (μ) menos 1,5 do seu respectivo desvio padrão (σ), ($\mu - 1,5\sigma$) (Peres 2016). O período de análise do ano de 2016 compreendeu os meses de agosto a novembro (Peres et al. 2019; Pinheiro et al. 2011), que representa o período típico de atuação do Buraco de Ozônio Antártico (Solomon 1999).

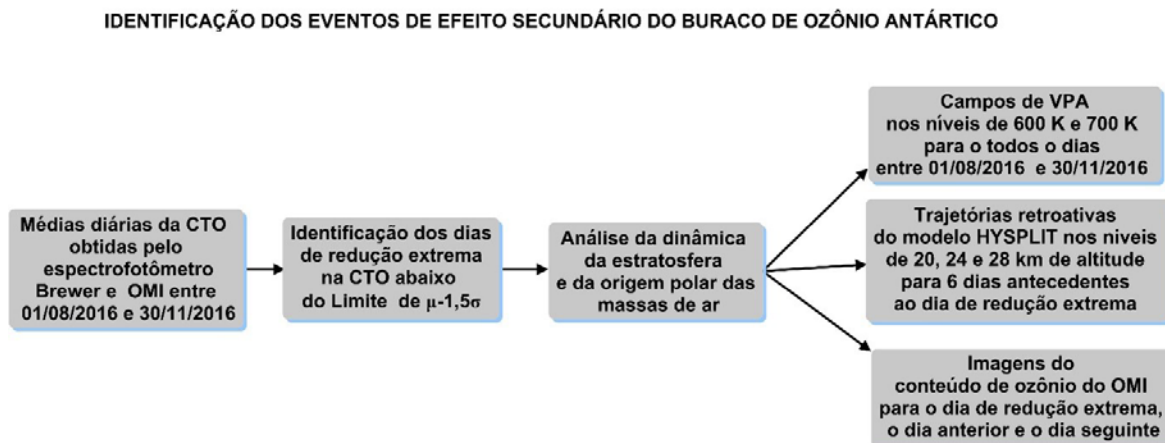


Figura 2 Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados para identificar os eventos de efeito secundário do BOA sobre o Sul do Brasil em 2016.

Utilizados como traçadores dinâmicos de grandes massas de ar (Hoskins, McIntyre & Robertson 1985), campos de Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) foram construídos para todos os dias de agosto a novembro nos níveis isentrópicos de 600 e 700K de temperatura potencial. Esses níveis representam a altura da máxima concentração de ozônio na estratosfera, ou seja, em aproximadamente 24 e 28 km de altitude. Esse parâmetro pode ser usado para estudar a dinâmica do vórtice polar antártico e, ao mesmo tempo, adotado como um rastreador de massas de ar com baixo conteúdo de ozônio que são liberadas do BOA (Bencherif et al. 2007; Semane et al. 2006; Wolfram et al. 2012). Os campos de VPA foram gerados a partir de parâmetros de temperatura para os níveis de pressão em 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa, onde a ocorrência do evento é verificada quando se observa um aumento da VPA sobre a região (Bencherif et al. 2003; Semane et al. 2006). Para isso, foram utilizadas as reanálises diárias do ERA- Interim provenientes do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$, disponíveis em <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pt/>.

Adicionalmente, outro método utilizado para auxiliar na identificação dos eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre a região de estudo foram as trajetórias retroativas de massas de ar construídas pelo modelo HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Rolph, Stein & Stunder 2017; Stein et al. 2015). Foram estimadas as trajetórias das massas de ar nos níveis de 20, 24 e 28 km de altitude, região com maiores concentrações de ozônio na atmosfera, em um período retroativo de 6 dias, em função da escala sinótica dos eventos dinâmicos na estratosfera. O modelo HYSPLIT é um sistema completo

para calcular trajetórias simples de parcelas de ar, bem como simulações de transporte complexas, transformação química e deposição (National Oceanic and Atmospheric Administration 2020). O HYSPLIT vem sendo utilizado em uma variedade de simulações, descrevendo o transporte de ar atmosférico, dispersão e deposição de poluentes e materiais particulados (Stein et al. 2015). Os métodos de cálculo do modelo envolvem uma mistura da abordagem Lagrangiana (usando no cálculo um referencial que se move com a advecção e difusão) e a metodologia Euleriana (referencial em uma grade fixa tridimensional).

Complementando a metodologia foram realizadas análises das imagens da concentração da coluna total de ozônio obtidas pelo instrumento OMI, disponível em <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>. Através das imagens foi verificado se havia a existência de alguma conexão entre o Sul do Brasil e o Buraco de Ozônio Antártico durante os dias de redução na CTO sobre o OES. Tais conexões são evidenciadas pela ejeção de massas de ar pobre em ozônio para fora do vórtice polar Antártico em direção às médias latitudes (Bittencourt et al. 2018; Peres 2016; Peres et al. 2019; Pinheiro et al. 2011).

3 Resultados e Discussões

Com base na climatologia da CTO sobre o OES calculada por Peres et al. (2019) obteve-se os valores limites de média climatológica menos 1,5 vezes o desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$) utilizados na identificação dos dias de queda temporária extrema na CTO para o ano de 2016. A Tabela 1 apresenta os valores da climatologia da coluna de O₃ e o respectivo desvio padrão, juntamente com os limites de queda em Unidades Dobson (UD) para os meses de agosto a novembro utilizados nas análises do estudo, em virtude do comportamento ativo do Buraco de Ozônio Antártico neste período (Pinheiro et al. 2011; Solomon 1999).

Tabela 1 Médias climatológicas da CTO (μ), seus respectivos desvios padrão (σ) e o limite de média mensal menos 1,5 do desvio padrão ($\mu-1,5\sigma$) em UD para os meses de agosto a novembro de 2016 na região central do estado do Rio Grande do Sul (adaptado de Peres et al. 2019).

Mês (ano de 2016)	Climatologia (μ) de O ₃ em UD	Desvio Padrão (σ) em UD	Limite ($\mu-1,5\sigma$) em UD
Agosto	284,9	9,1	271,4
Setembro	296,6	9,9	281,7
Outubro	290,2	8,8	277,0
Novembro	286,6	13,0	267,0

A série temporal de médias diárias da CTO em UD obtida pelo instrumento de satélite OMI sobre o OES é apresentada na Figura 3. Nela está representado todo o intervalo de 122 dias entre agosto e novembro de 2016, com os valores abaixo dos limites mensais de $-1,5\sigma$ marcados em cor azul, dentre os quais encontram-se aqueles posteriormente identificados como dias de eventos de influência do BOA. Na cor vermelha estão representados os valores acima do limite e que foram descartados como possíveis eventos para análise, uma vez que representam aumento da CTO. A linha em preto representa os limites de média climatológica mensal menos 1,5 vezes o desvio padrão ($\mu-1,5\sigma$) utilizados na identificação dos dias de queda temporária extrema na CTO.

Como é possível observar através da quantidade de valores abaixo do limite de $-1,5\sigma$ da Figura 3, os meses com mais casos de redução na CTO em 2016 foram setembro e outubro, com 12 dias de redução cada. Com base na série temporal da CTO para os meses de agosto a novembro, apresentadas na Figura 3, foram identificados 57 dias em que os valores da CTO apresentaram valores abaixo do limite mínimo estipulado. Dentre esses dias de redução foram identificados 6 episódios como eventos de influência do BOA. Tais eventos são apresentados na Tabela 2, onde são dispostos os respectivos dias identificados, os valores da CTO e a redução percentual que caracterizaram a chegada da massa de ar pobre em ozônio na região do OES.

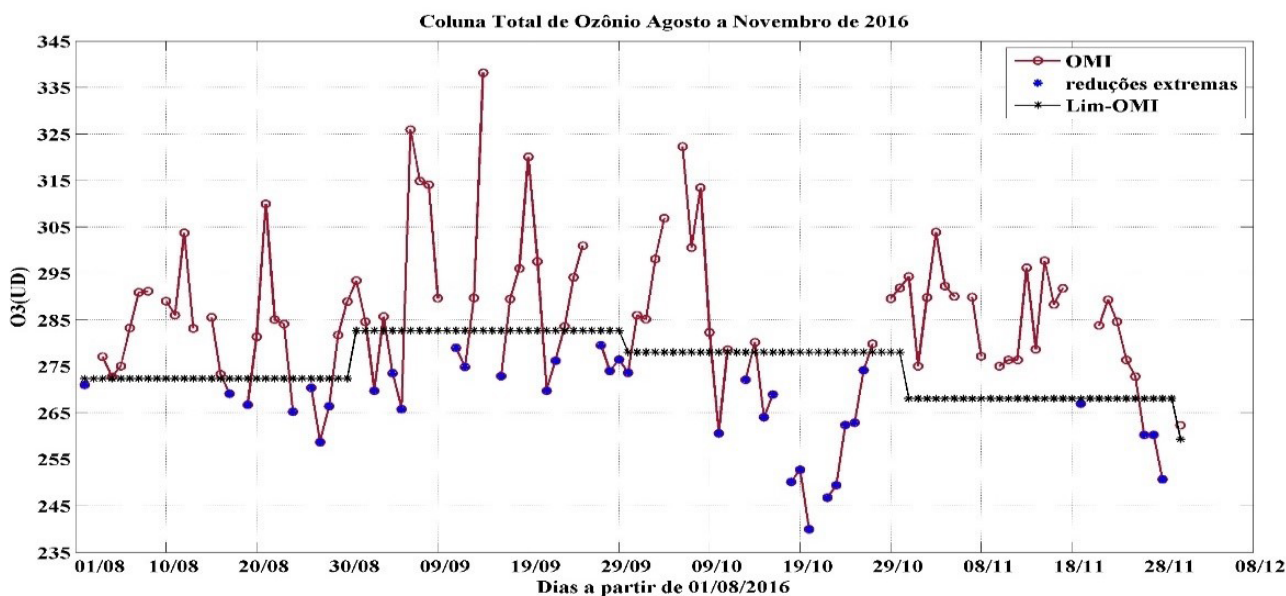


Figura 3 Média diária da CTO do instrumento OMI entre agosto e novembro de 2016 com destaque, em azul, para valores abaixo do limite $-1,5\sigma$.

Tabela 2 Eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil em 2016 com o respectivo valor médio diário da CTO e a percentagem da redução de O_3 com relação à média climatológica do mês.

Data do Evento	Média diária da CTO (UD)	Redução em relação à média climatológica do mês (%)
25/08/2016	252,8	11,2
05/09/2016	265,7	10,4
16/09/2016	279,4	5,8
29/09/2016	269,3	9,2
11/10/2016	272,1	6,8
20/10/2016	225,5	22,7
Redução média		11,0

Os seis eventos identificados em 2016, como pode ser observado na Tabela 2, apresentaram redução média de 11 % na CTO. Essa redução, embora mais acentuada, concorda com os resultados encontrados em outros trabalhos, como Peres et al. (2019), que diagnosticaram a ocorrência de 62 eventos de influência do BOA sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2013 com uma redução média de $9,35 \pm 2,93$ % no conteúdo de ozônio e anomalias negativas de vorticidade potencial.

Para demonstrar os procedimentos realizados na identificação e análise realizadas sobre a dinâmica da estratosfera dos eventos de influências do BOA apresentados na Tabela 2, foi escolhido como episódio de estudo o evento ocorrido no dia 05 de setembro de 2016, mês no qual ocorreu

ao maior número de eventos de efeito secundário do BOA no ano de 2016. No dia 05 de setembro de 2016 a coluna total de ozônio atingiu valores mínimos, abaixo do limite de $-1,5\sigma$, revelando possivelmente uma influência do BOA sobre o Sul do Brasil, quando foi registrado um valor de 265,7 UD, que representa uma redução de 10,4 % no conteúdo de ozônio em relação à média climatológica mensal para o respectivo mês (296,6 UD). Embora o dia 05 tenha sido o ápice do evento, no dia 04 de setembro a massa de ar pobre em ozônio já havia alcançado a região, o que foi confirmado através da análise de Vorticidade Potencial, porém atuando em menor intensidade, com o valor de 273,5 UD, uma redução de 7,8% em relação à média climatológica para o mês. No dia 06, os dados de conteúdo de ozônio se normalizaram, sugerindo o término da passagem da massa de ar pobre em ozônio sobre a região.

A partir da identificação da redução extrema dos valores da CTO durante o dia 5 de setembro, foi adotado como segundo método de análise para a confirmação da ocorrência do evento de influência do BOA, a análise da dinâmica da estratosfera através de campos de vorticidade potencial para os dias 4 a 6 de setembro. A análise indicou o avanço de uma massa de ar pobre em ozônio sobre o Sul do Brasil em diferentes níveis isentrópicos de temperatura potencial. A Figura 4 apresenta os campos de vorticidade potencial absoluta em PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) ao nível isentrópico de 600 K de temperatura potencial (painéis A, B e C) e ao nível de 700 K de temperatura potencial (painéis D, E e F), que representam os níveis de maior concentração de ozônio na estratosfera (World Meteorological Organization 2018).

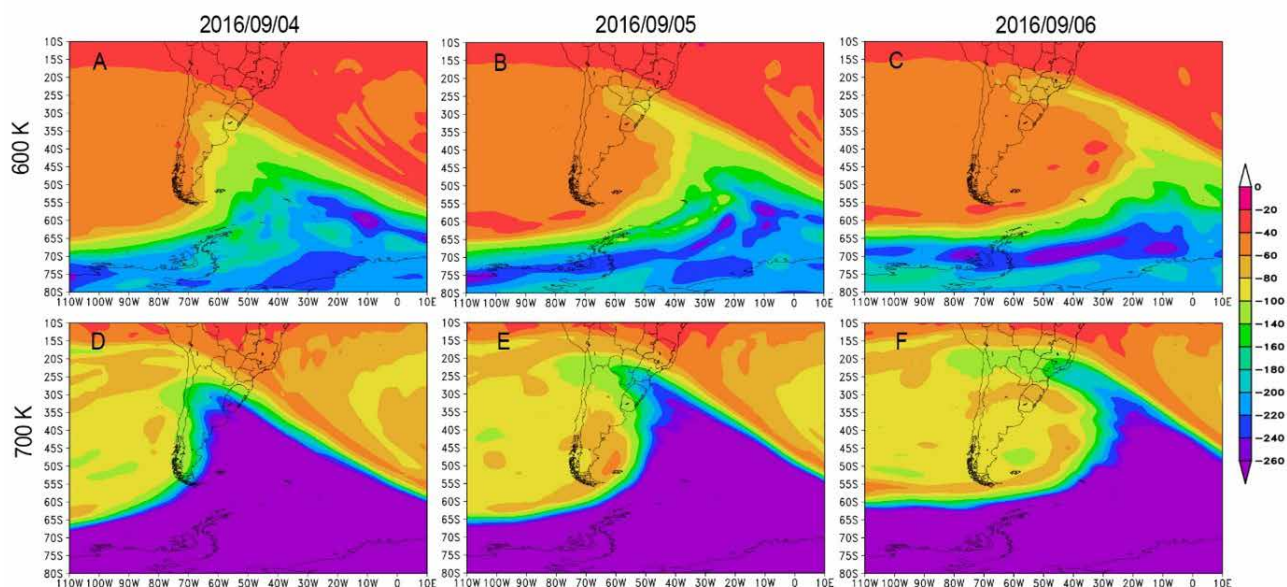


Figura 4 Vorticidade Potencial Absoluta para o nível isentrópico de 600 K de Temperatura Potencial nos dias: A. 04; B. 05 e C. 06 de setembro de 2016 e para o nível isentrópico de 700 K de Temperatura Potencial nos dias: D. 04; E. 05 e F. 06 de setembro de 2016.

Por funcionar como traçador dinâmico da estratosfera (Hoskins, McIntyre & Robertson 1985) a VPA foi utilizada para gerar tais campos e assim indicar a eventual origem polar da massa de ar pobre em ozônio. Conforme observado na Figura 4 para os dias 4 a 6 de setembro os campos de VPA evidenciaram a origem polar das massas de ar atuantes sobre a região do OES. Ocorreu aumento da VPA no intervalo de 40- 60 a 80-100 PVU (no nível de 600 K de temperatura potencial) e no intervalo de 100-150 a 200-220 PVU (no nível de 700K de temperatura potencial) sobre o Sul do Brasil. As variações da VPA observadas durante esse e os demais eventos identificados em 2016 foram de um intervalo de até 20 PVU e se alinham à escala das anomalias encontradas por Peres et al. (2019), que para a mesma região apresentaram comportamento de intensificação a partir de agosto (mês com anomalia de 8 PVU) até outubro (com anomalia de 12 PVU), e sensível enfraquecimento no mês de novembro, com 6 PVU.

Também com o auxílio de campos de VPA Bittencourt et al. (2018) observaram sobre o Sul do Brasil um padrão similar de vorticidade potencial absoluta nos níveis de 600 e 700 K durante a ocorrência de um evento no dia 20 de outubro de 2016, evento este que apresentou o maior valor absoluto na queda do conteúdo de O₃ para o ano de 2016. Os autores identificaram ainda o comportamento dinâmico da troposfera durante a ocorrência do episódio, tendo em vista a grande redução na CTO durante o evento, de 22,7% em relação a climatologia do mês de outubro.

Com metodologia semelhante de análise da dinâmica da estratosfera através de campos de vorticidade potencial, Peres et al. (2016) apontaram a ocorrência de dois eventos sobre o sul do Brasil no ano de 2012, que causaram redução

média na CTO de $12,1 \pm 2,3\%$ em relação às médias mensais climatológicas de agosto a novembro, com comportamento dinâmico da estratosfera marcados eminentemente por padrões de aumento da VPA sobre a região sul do país. Já Schmalfluss (2019) identificou 122 eventos de baixo ozônio sobre a América do Sul entre os anos de 1979 a 2016, notando a presença de prolongamentos de menores valores de vorticidade saindo da borda continental da Antártica em direção ao sul da América do Sul.

No que se refere a diferentes resoluções temporais e em diferentes altitudes da estratosfera, outros estudos também demonstraram padrões de vorticidade potencial semelhantes aos encontrados no presente trabalho. Orte et al. (2019) observaram para o período de novembro de 2014, um evento de rápida queda e recuperação do conteúdo de ozônio devido a influência do vórtice polar e do BOA sobre a região subpolar de Rio Gallegos na Argentina (aproximadamente em 51.6°S, 69.3°O). O evento identificado causou uma diminuição no ozônio de 25% e 20% em relação a climatologia nas alturas de 27 e 37 km respectivamente, devido ao transporte de massas de ar de origem polar evidenciadas em cartas de vorticidade potencial calculadas por modelos de alta resolução (0.5° x 0.5°), as quais foram utilizadas para entender e explicar a dinâmica das massas de ar nas diferentes altitudes.

Em adição à análise dos campos de VPA, a Figura 5 apresenta as trajetórias retroativas das massas de ar obtidas a partir do modelo HYSPLIT (National Oceanic and Atmospheric Administration 2020; Stein et al. 2015), para os níveis de 20, 24 e 28 km de altura, realizadas para seis dias anteriores à ocorrência do evento do dia 05 de setembro de 2016. Conforme se verifica nos percursos das

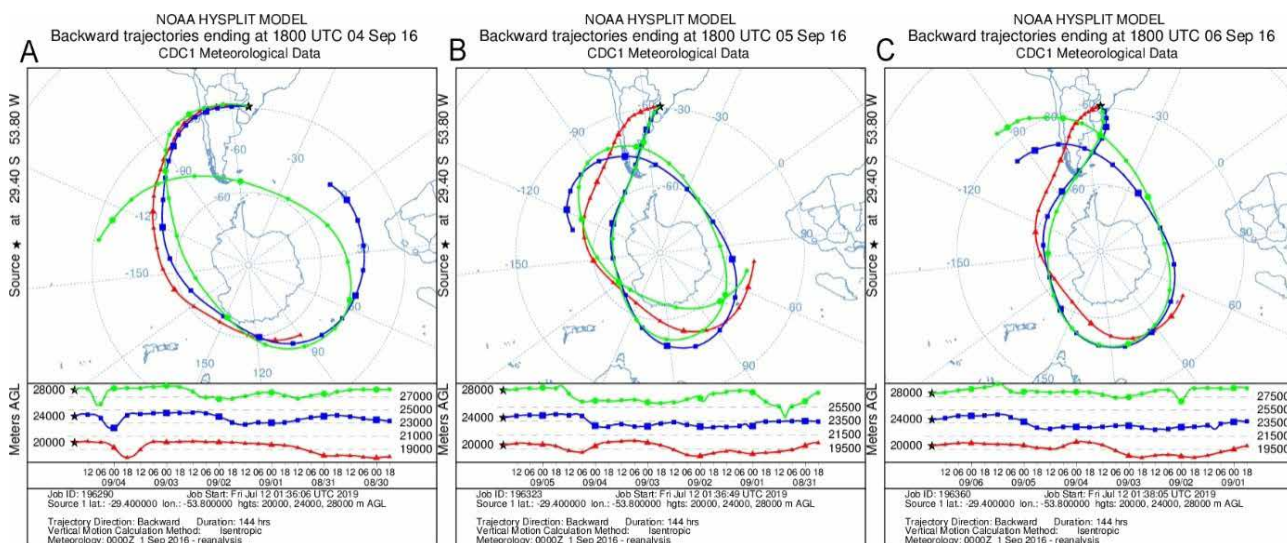


Figura 5 Trajetórias retroativas das massas de ar obtidas a partir do modelo HYSPLIT nos níveis de 20, 24 e 28 km de altura para os dias: A. 04 de setembro; B. 05 de setembro e C. 06 de setembro de 2016.

massas de ar desde a região da Antártica até o Sul do Brasil, as trajetórias retroativas nas alturas de 20 km (vermelha), 24 km (azul) e 28 km (verde) confirmam a origem polar da massa de ar pobre em ozônio identificada sobre a região do OES no dia 05 de setembro. Esse resultado corrobora o indicativo da ocorrência do evento de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre a região sul do Brasil.

Com o intuito de complementar a análise relativa à origem das massas de ar pobre em ozônio, a Figura 6 apresenta as imagens da CTO em UD obtidas pelo instrumento OMI do satélite Aura da NASA para os dias 4, 5 e 6 de setembro de 2016.

Na Figura 6 observa-se uma queda na coluna de ozônio sobre regiões polares e subpolares do hemisfério sul nos dias 4, 5 e 6 de setembro que revelam a presença do BOA influenciando a CTO sobre altas e médias latitudes

conectada à América do Sul. Essa conexão é observada através da ejeção de massas de ar pobre em ozônio para fora do Vórtice Polar Antártico, como já discutido em alguns estudos (Peres 2013; Peres et al. 2011; Pinheiro et al. 2011), e que pode ser evidenciado pela Figura 6 pelos sombreados em tons de azul e branco (200-300 UD).

Diversos estudos também utilizaram as trajetórias retroativas do modelo HYSPLIT e as imagens do conteúdo de ozônio do OMI/Aura. Bresciani et al. (2018), por exemplo, identificaram uma diminuição significativa no conteúdo de ozônio sobre o Uruguai e Sul do Brasil no dia 20 de outubro de 2016, e associaram essa redução à influência do BOA. Os autores mostraram que nos seis dias antes da massa de ar atingir estas regiões, tal massa estava ligada ao BOA, posteriormente sendo desprendida e transportada pelos ventos até atingir regiões de médias latitudes.

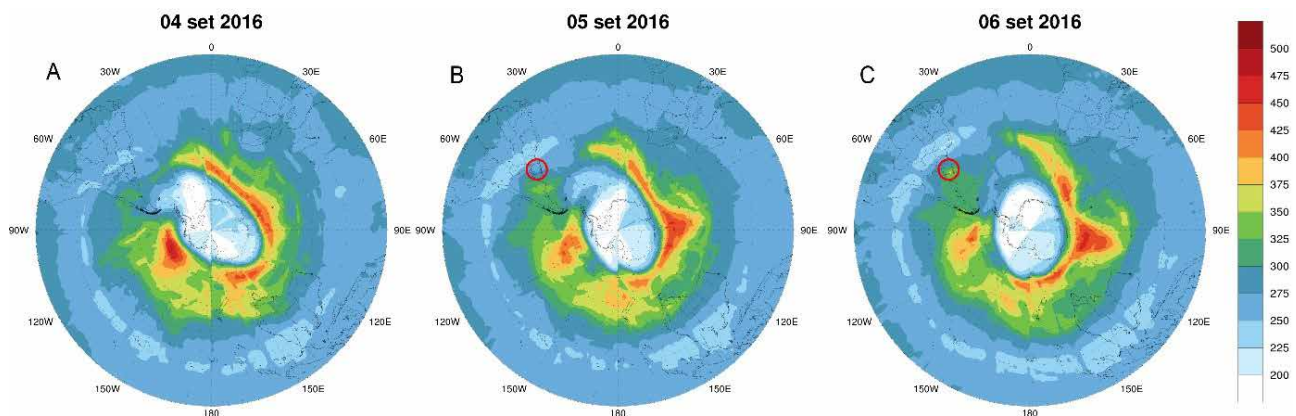


Figura 6 Imagens da CTO em UD obtidas pelo instrumento OMI para os dias: A. 04; B. 05 e C. 06 de setembro de 2016. O círculo em vermelho indica a região onde houve queda no conteúdo de ozônio.

4 Conclusões

Este estudo identificou com base em dados da CTO obtidos pelo Espectrofotômetro Brewer instalado no OES em São Martinho da Serra - RS e pelo instrumento de satélite OMI, a ocorrência e a dinâmica da estratosfera dos eventos de influência do BOA ocorridos sobre o Sul do Brasil em 2016. Para isso foram analisados campos de vorticidade potencial absoluta gerados a partir de dados de reanálise do ECMWF, trajetórias retroativas de massas de ar calculadas pelo modelo HYSPLIT e imagens do conteúdo de ozônio do instrumento de satélite OMI. Assim, foram identificados a ocorrência de 6 eventos de influência do BOA sobre o Sul do Brasil em 2016, que provocaram redução média de 11% na CTO em relação às médias climatológicas mensais de agosto a novembro sobre o OES. Essa redução identificada está em concordância com as reduções médias provocadas pelos eventos de influência do BOA ocorridos no sul do

Brasil. A origem polar das massas de ar pobres em ozônio que passaram pelo sul do Brasil durante a ocorrência dos eventos influência do BOA foram confirmadas pelos campos de vorticidade potencial absoluta nos níveis de 600 K e 700 K de Temperatura Potencial, onde foram observados aumentos em torno de 20 PVU. Trajetórias retroativas do modelo HYSPLIT nos níveis de 20, 24 e 28 km também confirmaram a origem polar das massas de ar pobre em ozônio, remetendo suas origens ao círculo polar antártico, onde o BOA estava atuante conforme indicaram as imagens do conteúdo de ozônio do instrumento de satélite OMI.

Os eventos de influência do BOA identificados em 2016 ocorreram com maior frequência no mês de setembro (3 eventos), seguido por outubro (2 eventos) e agosto (1 evento). Dentre os seis eventos de 2016 identificados, foi adotado como estudo de caso para apresentar os resultados da metodologia utilizada o evento do dia 05 de setembro de 2016, que apresentou queda de 10,4% em

relação a climatologia do mês de setembro (296,6 UD). Os campos de vorticidade potencial desse evento revelaram a passagem de uma massa de ar pobre em ozônio sobre o Sul do Brasil com o ápice da variação na VPA durante o dia 5 de setembro, mas já atingindo a região desde a véspera (04/09) e permanecendo até o dia 6 de setembro, quando a massa de ar prosseguiu em direção ao Oceano Atlântico. A origem dessa massa de ar também se confirmou pelas trajetórias retroativas do modelo HYSPLIT, nas alturas 20, 24 e 28 km de altura, com atuação do BOA sobre a região confirmada pelas imagens de conteúdo de ozônio do satélite OMI.

A metodologia empregada se mostrou eficiente para identificação e análise da dinâmica da estratosfera dos eventos de influência do BOA ocorridos sobre o Sul do Brasil em 2016. A identificação, descrição e análise da dinâmica da estratosfera realizadas contribuem com os esforços científicos que visam preencher lacunas existentes na descrição de tais eventos, e dessa forma colaborar com trabalhos futuros na construção e aperfeiçoamento de ferramentas e modelos capazes de simular os efeitos do BOA em regiões de latitudes medias.

5 Referências

- Bencherif, H., El Amraoul, L., Semane, N., Massart, S., Charyulu, D.V., Hauchecorne, A. & Peuch, V.H. 2007, 'Examination of the 2002 major warming in the southern hemisphere using ground-based and Odin/SMR assimilated data: Stratospheric ozone distributions and tropic/midlatitude exchange', *Canadian Journal of Physics*, vol. 85, no. 11, pp. 1287–300. <https://doi.org/10.1139/P07-143>.
- Bencherif, H., Portafaix, T., Baray, J.L., Morel, B., Baldy, S., Leveau, J., Hauchecorne, A., Keckhut, P., Moorgawa, A., Michaelis, M.M. & Diab, R. 2003, 'LIDAR observations of lower stratospheric aerosols over South Africa linked to large scale transport across the southern subtropical barrier', *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 65, no. 6, pp. 707–15. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(03\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(03)00006-3).
- Bittencourt, G.D., Bresciani, C., Kirsch Pinheiro, D., Jorge Schuch, N., Bencherif, H., Paes Leme, N. & Vaz Peres, L. 2018, 'A major event of Antarctic ozone hole influence in southern Brazil in October 2016: An analysis of tropospheric and stratospheric dynamics', *Annales Geophysicae*, vol. 36, no. 2, pp. 415–24. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-415-2018>.
- Braesicke, P., Keeble, J., Yang, X., Stiller, G., Kellmann, S., Abraham, N.L., Archibald, A., Telford, P. & Pyle, J.A. 2013, 'Circulation anomalies in the Southern Hemisphere and ozone changes', *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 21, pp. 10677–88. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10677-2013>.
- Bresciani, C., Dornelles Bittencourt, G., Kirsch Pinheiro, D., Jorge Schuch, N., Bencherif, H., Paes Leme, N. & Vaz Peres, L. 2018, 'Report of a large depletion in the ozone layer over southern Brazil and Uruguay by using multi-instrumental data', *Annales Geophysicae*, vol. 36, no. 2, pp. 405–13. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-405-2018>.
- 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*, vol. 75, no. 326, pp. 351–63. <https://doi.org/10.1002/qj.49707532603>.
- Chiodo, G. & Polvani, L.M. 2019, 'The response of the ozone layer to quadrupled CO₂ concentrations: Implications for climate', *Journal of Climate*, vol. 32, no. 22, pp. 7629–42. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0086.1>.
- Chiodo, G., Polvani, L.M., Marsh, D.R., Stenke, A., Ball, W., Rozanov, E., Muthers, S. & Tsigaridis, K. 2018, 'The response of the ozone layer to quadrupled CO₂ concentrations', *Journal of Climate*, vol. 31, no. 10, pp. 3893–907. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0492.1>.
- Dennison, F.W., McDonald, A. & Morgenstern, O. 2016, 'The influence of ozone forcing on blocking in the Southern Hemisphere', *Journal of Geophysical Research*, vol. 121, no. 24, pp. 14358–71. <https://doi.org/10.1002/2016JD025033>.
- Dobson, G.M.B., Kimball, H.H. & Kidson, E. 1930, 'Observations of the amount of ozone in the earth's atmosphere, and its relation to other geophysical conditions.—Part IV', *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 129, no. 811, pp. 411–33. <https://doi.org/10.1098/rspa.1930.0165>.
- Farman, J.C., Gardiner, B.G. & Shanklin, J.D. 1985, 'Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction', *Nature*, vol. 315, no. 6016, pp. 207–10. <https://doi.org/10.1038/315207a0>.
- Gettelman, A., Hegglin, M.I., Son, S.W., Kim, J., Fujiwara, M., Birner, T., Kremser, S., Rex, M., Añel, J.A., Akiyoshi, H., Austin, J., Bekki, S., Braesike, P., Brhl, C., Butchart, N., Chipperfield, M., Dameris, M., Dhomse, S., Garny, H., Hardiman, S.C., Jöckel, P., Kinnison, D.E., Lamarque, J.F., Mancini, E., Marchand, M., Michou, M., Morgenstern, O., Pawson, S., Pitari, G., Plummer, D., Pyle, J.A., Rozanov, E., Scinocca, J., Shepherd, T.G., Shibata, K., Smale, D., Teyssdre, H. & Tian, W. 2010, 'Multimodel assessment of the upper troposphere and lower stratosphere: Tropics and global trends', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 115, no. 20, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1029/2009JD013638>.
- Gonzalez, P.L.M., Polvani, L.M., Seager, R. & Correa, G.J.P. 2014, 'Stratospheric ozone depletion: A key driver of recent precipitation trends in South Eastern South America', *Climate Dynamics*, vol. 42, no. 7–8, pp. 1775–92. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1777-x>.
- Grise, K.M., Polvani, L.M., Tselioudis, G., Wu, Y. & Zelinka, M.D. 2013, 'The ozone hole indirect effect: Cloud-radiative anomalies accompanying the poleward shift of the eddy-driven jet in the Southern Hemisphere', *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 14, pp. 3688–92. <https://doi.org/10.1002/grl.50675>.

- Grise, K.M., Son, S.W., Correa, G.J.P. & Polvani, L.M. 2014, 'The response of extratropical cyclones in the Southern Hemisphere to stratospheric ozone depletion in the 20th century', *Atmospheric Science Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1002/asl2.458>.
- Guarnieri, R.A., Padilha, L.F., Guarnieri, F.L., Echer, E., Makita, K., Pinheiro, D.K., Schuch, A.M.P., Boeira, L.S. & Schuch, N.J. 2004, 'A study of the anticorrelations between ozone and UV-B radiation using linear and exponential fits in southern Brazil', *Advances in Space Research*, vol. 34, no. 4, pp. 764–8. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.06.040>.
- Hoskins, B.J., McIntyre, M.E. & Robertson, A.W. 1985, 'On the use and significance of isentropic potential vorticity maps', *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 111, no. 466, pp. 877–946. <https://doi.org/10.1002/qj.49711146602>.
- Hu, D., Tian, W., Xie, F., Wang, C. & Zhang, J. 2015, 'Impacts of stratospheric ozone depletion and recovery on wave propagation in the boreal winter stratosphere', *Journal of Geophysical Research*, vol. 120, no. 16, pp. 8299–317. <https://doi.org/10.1002/2014JD022855>.
- Kerr, J.B. 2002, 'New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 107, no. D23, p. ACH 22-1-ACH 22-17. <https://doi.org/10.1029/2001JD001227>.
- Kerr, J.B., McElroy, C.T., Wardle, D.I., Olafson, R.A. & Evans, W.F.J. 1985, 'The Automated Brewer Spectrophotometer', in C.S. Zerefos & A. Ghazi (eds), *Atmospheric Ozone*, Springer, Dordrecht, pp. 396–401. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5313-0_80.
- Kidston, J., Scaife, A.A., Hardiman, S.C., Mitchell, D.M., Butchart, N., Baldwin, M.P. & Gray, L.J. 2015, 'Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather', *Nature Geoscience*, vol. 8, no. 6, pp. 433–40. <https://doi.org/10.1038/NGEO2424>.
- Kiehl, J.T. & Trenberth, K.E. 1997, 'Earth's Annual Global Mean Energy Budget', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, no. 2, pp. 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2).
- 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*, vol. 30, no. 9, pp. 1481–4. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00362-2](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00362-2).
- Levelt, P.F., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G.W., Van Den Oord, G.H.J., Bhartia, P.K., Tamminen, J., De Haan, J.F. & Veeffkind, J.P. 2006, 'Science objectives of the ozone monitoring instrument', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 5, pp. 1199–207. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872336>.
- London, J. & Angell, J.K. 1982, 'The observed distribution of ozone and its variations', in F.A. Bower & R.B. Ward (eds), *Stratospheric Ozone and Man*, vol. 1, CRC Press, pp. 7–42.
- Marchand, M., Bekki, S., Pazmino, A., Lefèvre, F., Godin-Beekmann, S. & Hauchecorne, A. 2005, 'Model simulations of the impact of the 2002 Antarctic ozone hole on the midlatitudes', *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 62, no. 3, pp. 871–84. <https://doi.org/10.1175/JAS-3326.1>.
- McLandress, C., Perlwitz, J. & Shepherd, T.G. 2012, 'Comment on "Tropospheric temperature response to stratospheric ozone recovery in the 21st century" by Hu, Y., Xia, Y. & Fu, Q. 2011, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, no. 5, pp. 2533–40. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2533-2012>.
- McLandress, C., Shepherd, T.G., Scinocca, J.F., Plummer, D.A., Sigmund, M., Jonsson, A.I. & Reader, M.C. 2011, 'Separating the dynamical effects of climate change and ozone depletion. Part II: Southern Hemisphere troposphere', *Journal of Climate*, vol. 24, no. 6, pp. 1850–68. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3958.1>.
- Nash, E.R., Newman, P.A., Rosenfield, J.E. & Schoeberl, M.R. 1996, 'An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 101, no. D5, pp. 9471–8. <https://doi.org/10.1029/96JD00066>.
- National Aeronautics and Space Administration 2020, 'Aura | OMI', *Images, data, and information for atmospheric ozone*, NASA - Aura, viewed 1 November 2017, <<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration 2020, *HYSPLIT - 2 - Air Resources Laboratory*, NOAA - Air Resources Laboratory, viewed 1 November 2017, <<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>>.
- Orte, P.F., Wolfram, E., Salvador, J., Mizuno, A., Bègue, N., Bencherif, H., Bali, J.L., D'Elia, R., Pazmiño, A., Godin-Beekmann, S., Ohyama, H. & Quiroga, J. 2019, 'Analysis of a southern sub-polar short-term ozone variation event using a millimetre-wave radiometer', *Annales Geophysicae*, vol. 37, no. 4, pp. 613–29. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-613-2019>.
- Pazmiño, A.F., Godin-Beekmann, S., Luccini, E.A., Piacentini, R.D., Quel, E.J. & Hauchecorne, A. 2008, 'Increased UV radiation due to polar ozone chemical depletion and vortex occurrences at Southern Sub-polar Latitudes in the period [1997-2005]', *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, no. 17, pp. 5339–52. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5339-2008>.
- Peres, L.V. 2013, 'Efeito secundário do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil', Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria.
- Peres, L.V. 2016, 'Monitoramento da coluna total de ozônio e a ocorrência de eventos de influência do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil', Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria.
- Peres, L.V., Bencherif, H., Mbatha, N., Schuch, A.P., Mohamed Tohir, A., Bègue, N., Portafaix, T., Anabor, V., Kirsch Pinheiro, D., Maria Paes Leme, N., Bageston, J.V. & Jorge Schuch, N. 2017, 'Measurements of the total ozone column

- using a Brewer spectrophotometer and TOMS and OMI satellite instruments over the Southern Space Observatory in Brazil', *Annales Geophysicae*, vol. 35, no. 1, pp. 25–37. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-25-2017>.
- Peres, L.V., Kall, E., Crespo, N.M., Fontinele, J.L., Anabor, V., Kirsch, D., Schuch, N.J., Maria, N. & Leme, P. 2011, 'Caracterização sinótica do evento de efeito secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o sul do Brasil do dia 14/10/2008', *Ciência e Natura*, Supplementary Edition: Micrometeorology, pp. 323–6. <https://doi.org/10.5902/2179460X9450>
- Peres, L.V., Pinheiro, D.K., Steffene, L.A., Mendes, D., Bageston, J.V., Bittencourt, G.D., Schuch, A.P., Anabor, V., Leme, N.M.P., Schuch, N.J. & Bencherif, H. 2019, 'Long term monitoring and climatology of stratospheric fields when the occurrence of influence of the antarctic ozone hole over south of Brazil events', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 34, no. 1, pp. 151–63. <https://doi.org/10.1590/0102-77863340030>.
- Peres, L.V., dos Reis, N.C.S., dos Santos, L. de O., Bittencourt, G.D., Schuch, A.P., Anabor, V., Pinheiro, D.K., Schuch, N.J. & Leme, N.M.P. 2016, 'Análise Atmosférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil em 2012. Parte 1: Identificação dos Eventos e Análise da Dinâmica da Estratosfera', *Ciência e Natura*, vol. 38, no. 1, pp. 290–9. <https://doi.org/10.5902/2179-460X12141>.
- Peres, L.V., Reis, N.C.S. dos, Santos, L.D.O. dos, Bittencourt, G.D., Schuch, A.P., Anabor, V., Pinheiro, D.K., Schuch, N.J. & Leme, N.M.P. 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*, vol. 36, no. 2, pp. 423–33. <https://doi.org/10.5902/2179460x13151>.
- Pérez, A., Crino, E., Aguirre de Cárcer, I. & Jaque, F. 2000, 'Low-ozone events and three-dimensional transport at midlatitudes of South America during springs of 1996 and 1997', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 105, no. D4, pp. 4553–61.
- Pérez, A. & Jaque, F. 1998, 'On the Antarctic origin of low ozone events at the South American continent during the springs of 1993 and 1994', *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 21, pp. 3665–8. <https://doi.org/10.1029/1999JD901040>.
- Pinheiro, D.K., Peres, L.V., Crespo, N.M., Schuch, N.J. & Leme, N.M.P. 2011, 'Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2010 and 2011', *Annual Active Report*, pp. 34–8. <https://doi.org/10.4322/APA.2014.058>.
- Polvani, L.M., Previdi, M. & Deser, C. 2011, 'Large cancellation, due to ozone recovery, of future Southern Hemisphere atmospheric circulation trends', *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 4, pp. L04707. <https://doi.org/10.1029/2011GL046712>.
- Rolph, G., Stein, A. & Stunder, B. 2017, 'Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY', *Environmental Modelling and Software*, vol. 95, pp. 210–28. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.
- Salawitch, R.J., Fahey, D.W., Hegglin, M.I., McBride, L.A., Tribett, W.R. & Doherty, S.J. 2019, *Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*, World Meteorological Organization, Geneva.
- Salby, M.L. 1996, *Fundamentals of atmospheric physics*, Academic Press, Boulder, Colorado.
- Schmalfuss, L.S.M. 2019, 'Investigação da dinâmica do ozônio estratosférico sobre a América do Sul: casos de eventos de vírgula', Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Schmidt, G.A., Ruedy, R.A., Miller, R.L. & Lacis, A.A. 2010, 'Attribution of the present-day total greenhouse effect', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 115, no. 20, pp. D20106. <https://doi.org/10.1029/2010JD014287>.
- Schuch, A.P., Santos, M.B. dos, Lipinski, V.M., Peres, L.V., Santos, C.P. dos, Cechin, S.Z., Schuch, N.J., Pinheiro, D.K. & Loreto, E.L. da S. 2015, 'Identification of influential events concerning the Antarctic ozone hole over southern Brazil and the biological effects induced by UVB and UVA radiation in an endemic treefrog species', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 118, pp. 190–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.029>.
- Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. 2016, 'The Atmosphere and Its Constituents', in John Wiley & Sons (ed.), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp. 1–66.
- Semane, N., Bencherif, H., Morel, B., Hauchecorne, A. & Diab, R.D. 2006, 'An unusual stratospheric ozone decrease in the Southern Hemisphere subtropics linked to isentropic air-mass transport as observed over Irene (25.5°S, 28.1°E) in mid-May 2002', *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, no. 7, pp. 1927–36. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1927-2006>.
- Solomon, S. 1999, 'Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history', *Reviews of Geophysics*, vol. 37, no. 3, pp. 275–316. <https://doi.org/10.1029/1999RG900008>.
- Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, D., Mills, M.J., Neely, R.R. & Schmidt, A. 2016, 'Emergence of healing in the Antarctic ozone layer', *Science*, vol. 353, no. 6296, pp. 269–74. <https://doi.org/10.1126/science.aae0061>.
- Steffene, L.A., Pinheiro, M.K., Pinheiro, D.K. & Perez, L. V. 2016, 'Using a Pervasive Computing Environment to Identify Secondary Effects of the Antarctic Ozone Hole', *Procedia Computer Science*, vol. 83, no. BigD2M, pp. 1007–12. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.215>.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. & Ngan, F. 2015, 'Noaa's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, no. 12, pp. 2059–77. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- Weber, M., Coldewey-Egbers, M., Fioletov, V.E., Frith, S.M., Wild, J.D., Burrows, J.P., Long, C.S. & Loyola, D. 2018,

- ‘Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets—the emergence into ozone recovery’, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, no. 3, pp. 2097–117. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2097-2018>.
- Wolfram, E.A., Salvador, J., Orte, F., D’Elia, R., Godin-Beekmann, S., Kuttippurath, J., Pazmiño, A., Goutail, F., Casaccia, C., Zamorano, F., Paes Leme, N. & Quel, E.J. 2012, ‘The unusual persistence of an ozone hole over a southern mid-latitude station during the Antarctic spring 2009: A multi-instrument study’, *Annales Geophysicae*, vol. 30, no. 10, pp. 1435–49. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1435-2012>.
- World Meteorological Organization 2018, *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*, 58th edn, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva.
- Wu, Y. & Polvani, L.M. 2017, ‘Recent trends in extreme precipitation and temperature over Southeastern South America: The dominant role of stratospheric ozone depletion in the CESM large ensemble’, *Journal of Climate*, vol. 30, no. 16, pp. 6433–41. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0124.1>.

Recebido em: 07/07/2020

Aprovado em: 12/04/2021

Como citar:

Reis, M.A.G., Peres, L.V., Bittencourt, G.D., Pinheiro, D.K., Steffene, L.A., Bencherif, H., Silva, R., Nunes, M.D. & Bageston, J.V. 2021, ‘Eventos de Influência do Buraco de Ozônio Antártico Ocorridos em 2016 Sobre o Sul do Brasil’, *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 36142. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_36142