

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**EFEITO SECUNDÁRIO DO BURACO DE OZÔNIO
ANTÁRTICO SOBRE O SUL DO BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lucas Vaz Peres

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

EFEITO SECUNDÁRIO DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE O SUL DO BRASIL

Lucas Vaz Peres

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Climatologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obter o grau de **Mestre em Meteorologia.**

Orientadora: Profa. Dra. Damaris Kirsch Pinheiro
Co-Orientador: Prof. Dr. Vagner Anabor

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Peres, Lucas Vaz
EFEITO SECUNDÁRIO DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE
O SUL DO BRASIL / Lucas Vaz Peres.-2013.
178 p.; 30cm

Orientadora: Damaris Kirsch Pinheiro
Coorientador: Vagner Anabor
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2013

1. Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico 2.
Química da atmosfera 3. Espectrofotômetros Brewer 4.
Vorticidade Potencial 5. Condição Sinótica Troposférica
I. Pinheiro, Damaris Kirsch II. Anabor, Vagner III.
Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados para Lucas Vaz Peres.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho é permitida, desde que, citada a fonte.

Endereço: Rua Rio Branco, 1975 - Parque Pinheiro Machado - Santa Maria - RS.

Endereço Eletrônico: lucasvazperes@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**EFEITO SECUNDÁRIO DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO
SOBRE O SUL DO BRASIL**

Elaborada por
Luvaz Vaz Peres

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

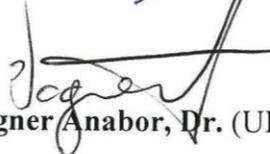
COMISSÃO EXAMINADORA:



Damaris Kirsch Pinheiro, Dra.
(Presidente/Orientador, UFSM)



David Mendes, Dr. (UFRN)



Vagner Anabor, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 01 de fevereiro de 2013.

Aos meus pais (Justo e Eloiza) e a minha noiva (Andressa) por todo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha noiva Andressa, companheira de todas as horas, por todo amor, carinho e paciência a mim destinados.

Aos meus pais, Justo e Eloiza, meu irmão Justo Junior, tios, primos, sogros e cunhados por sempre acreditarem em mim e que, mesmo distantes, sempre se fizeram presentes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFSM pela oportunidade e apoio financeiro.

Aos professores dos cursos de Graduação e de Mestrado em Meteorologia da UFSM pelos conhecimentos transmitidos.

A minha orientadora Dra. Damaris Kirsch Pinheiro pela amizade, paciência, confiança, ensinamentos transmitidos e por acreditar em mim desde os tempos de graduação, mesmo sabendo que eu estava afastado dos estudos há oito anos por ter servido ao Exército Brasileiro.

Ao Exército Brasileiro, onde labutei por oitos anos, alcançando o posto de 1º Tenente R2 de Infantaria, pelo reforço na formação de meu caráter e experiência de vida.

Ao professor Vagner Anabor da UFSM pelo apoio e amizade e ao Dr. Nelson Jorge Shuch pelo auxílio e transmissão de seus conhecimentos de vida.

Aos colegas da Meteorologia (graduação e pós) pelo auxílio e incentivo nos momentos difíceis.

A Centro Regional Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CRS/INPE pela infraestrutura física disponibilizada e aos colegas integrantes do Laboratório Troposfera Estratosfera – Radiação Ultravioleta e Ozônio, pela paciência, companheirismo e auxílio nas atividades do Programa de Monitoramento de Ozônio Atmosférico.

Aos colegas Daniel Caetano Santos e Pablo Oliveira e Diogo Custódio, meteorologistas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela amizade e auxílio em minha pesquisa.

A CAPES pela concessão da bolsa de fomento, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Antártico de Pesquisas Ambientais (INCT-APA), CNPq (processo nº 574018/2008-5) e FAPERJ (processo nº E-16/170.023/2008), bem como ao Projeto ATMANTAR nº 52.0182/2006-5, PROANTAR/MCT/CNPq.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

EFEITO SECUNDÁRIO DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE O SUL DO BRASIL

AUTOR: LUCAS VAZ PERES

ORIENTADORA: DAMARIS KIRSCH PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 01 de fevereiro de 2013

Na presente Dissertação foram identificados os eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos sobre o Sul do Brasil no período entre 1979 e 2011. Para isso, foram analisados os dados médios diários da coluna total de ozônio obtidos através dos Espectrofotômetros Brewer modelo MKIV #081 durante o período de 1992 – 2000, modelo MKII #056 de 2000 – 2002 e modelo MKIII #167 de 2002 até os dias atuais, instalados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTI (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m) e pelos instrumentos de satélite Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) e Ozone Monitoring Instrument (OMI) para a mesma latitude do Observatório Espacial do Sul na falta de dados do equipamento de superfície, buscando dias de quedas no conteúdo de ozônio. Para estes dias, foram realizadas análises isentrópicas de vortacidade potencial utilizando dados de reanálise fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction/Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), a fim de verificar a origem da massa de ar pobre em ozônio. A confirmação da origem polar das massas de ar deu-se através da análise das trajetórias retroativas confeccionadas através do modelo Hysplit da NOAA. Além disso, foi também realizada uma análise complementar através das imagens do conteúdo de ozônio dos satélites TOMS e OMI, verificando-se a atuação do Buraco de Ozônio na região Antártica e sua conexão com o Sul do Brasil. A metodologia empregada mostrou-se eficaz na identificação de 66 eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, os quais apresentaram uma queda média de $8,66 \pm 3,13$ % no conteúdo de ozônio. Foi realizada a identificação do padrão de circulação estratosférica através da confecção do campo médio da vortacidade potencial para os dias de ocorrência do fenômeno. Além disso, foram mostradas as análises das condições sinótica troposférica durante a ocorrência de dois eventos, observando-se que em ambos os casos, os eventos ocorreram em uma situação pós frontal sobre o Sul do Brasil, associada à passagem da região de entrada polar da corrente de jato subtropical ou polar, caracterizada pela ocorrência de evento de quebra da tropopausa onde ocorre intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera, e avanço de um sistema de alta pressão pós frontal que impede a formação de nebulosidade significativa. Aproveitando o ambiente operacional do Grupo de Modelagem Atmosférica (GRUMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), utilizando dados da saída do modelo de previsão numérica de tempo Global Forecast System (GFS) na confecção de mapas de vortacidade potencial, pode-se realizar eficazmente a previsão do início da chegada de massas de ar estratosféricas de origem polar sobre o Sul do Brasil durante o período da primavera do ano de 2012, com pelo menos quatro dias de antecedência, coincidindo estes transportes com os eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil identificados no corrente ano.

Palavras-chave: Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico. Espectrofotômetros Brewer. Vortacidade Potencial. Condição Sinótica Troposférica.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

INFLUENCE OF THE ANTARCTIC OZONE HOLE EPISODE OVER SOUTHERN OF BRAZIL

AUTOR: LUCAS VAZ PERES

ORIENTADORA: DAMARIS KIRSCH PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 01 de fevereiro de 2013

In this Dissertation were identified events of influence of the Antarctic ozone hole over the South of Brazil that occurred in the period between 1979 and 2011. For this, we analyzed the daily average data of total ozone column obtained through the Brewer Spectrophotometers MKIV #081 model during the period 1992-2000, MKII model #056 of 2000-2002 and MKIII #167 model from 2002 to the present day, installed in the Southern Space Observatory—OES/CRS/INPE – MCTI (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m) and by satellite instruments Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) and Ozone Monitoring Instrument (OMI) to the same latitude of the southern Space Observatory in the absence of surface equipment data, searching for days of falls in ozone content. For these days, isentrópicas analyses were conducted of potential vorticity using Reanalysis data provided by the National Centers for Environmental Prediction Atmospheric Research (NCEPNCAR), in order to verify the origin of ozone-poor air mass. Confirmation of the origin of polar air masses took place through the analysis of the trajectories retroactive made through the Hysplit model of NOAA. In addition, it was also conducted a complementary analysis through the pictures of the ozone content of TOMS and OMI, the ozone hole in the Antarctic region and its connection to the South of Brazil. The methodology used was effective in the identification of 66 events of the Influence of Antarctic Ozone Hole over south of Brazil, which showed an average drop of 8.66 ± 3.13 in the ozone content. The identification of the stratospheric circulation pattern through the medium of the vorticity field potential for the occurrence of the phenomenon was performed. In addition, were shown an analysis of synoptic weather troposphere during the occurrence of two events, noting that in both cases, the events occurred in a situation front post on the South of Brazil, coupled with the passage of the input region polar polar or subtropical jet stream, characterized by the occurrence of the event of the tropopause folding where stratospheric air intrusion occurs in the troposphere, and advancement of a high-pressure front post system that prevents the formation of significant cloud cover. Leveraging the operating environment of the Atmospheric Modeling Group (GRUMA) at the Federal University of Santa Maria (UFSM), using data from the output of numerical weather forecasting model Global Forecast System (GFS) in making maps of potential vorticity, can carry out effectively the clue of the forecast arrival of stratospheric air masses of polar origin on the southern Brazil during the spring of the year of 2012 with at least four days in advance, coinciding with the events of transport these side effects of the Antarctic ozone hole over the South of Brazil identified in the current year.

Key Words: Influence of the Antarctic ozone hole. Brewer Spectrophotometers. Potential Vorticity. Synoptic Weather Troposphere.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Imagem do Satélite TOMS da NASA, ilustrando o buraco de ozônio Antártico durante a primavera austral.....	34
Figura 2.1 – (a) Curvas de irradiância solar no topo da atmosfera e no nível do mar. Regiões pintadas indicam as moléculas responsáveis pela absorção. (b) Espectro de absorção das moléculas de oxigênio e ozônio	40
Figura 2.2– Seção transversal de absorção do ozônio e oxigênio na região do ultravioleta e visível	40
Figura 2.3 – Profundidade de penetração da radiação solar UV na atmosfera terrestre para $\mu_0 = 1$ (cosseno do ângulo zenital) e perfil médio de ozônio. As linhas indicam a altura em que a profundidade óptica é igual a um	41
Figura 2.4 – Representação da variação da temperatura do ar com a altitude mostrando as camadas atmosféricas	41
Figura 2.5 – Comparação da concentração do ozônio estratosférico em função da altitude previsto pelo mecanismo de Chapman e observado sobre o Panamá (9°N) em 13 de novembro de 1970	42
Figura 2.6 – Taxas de formação de O ₃ (moléculas/cm ³ s) como função da fotólise do O ₂	44
Figura 2.7 – Concentrações de ozônio (em 10 ¹² moléculas/cm ³) em função da altitude e latitude	45
Figura 2.8 – Coluna total de ozônio histórica em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio	46
Figura 2.9 – Esquema do transporte das massas de ar na estratosfera.....	46
Figura 2.10 – Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio em função da latitude e altitude entre os anos de 1980-1989.	47
Figura 2.11 – Perfis médios de ozônio para outubro em diversas estações da Antártica	49
Figura 2.12 – Perfil vertical de ozônio medido na Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz para os dias 15 de setembro e 20 de outubro de 1992	50
Figura 2.13 – Variação da área média do contorno de 220 UD sobre a Antártica e mínimos médios diários observados, de 1979 até 2011, sobre o Continente Antártico, em latitudes entre 60° e 90°S, obtidos com instrumentos TOMS e OMI de 1 de setembro a 30 de novembro de cada ano.....	50
Figura 2.14 – Área coberta por temperaturas menores que 195, 189 e 185 K para 465 K de temperatura potencial (~20 Km) no hemisfério Sul	51
Figura 2.15 – Contornos de media zonal da velocidade do vento zonal (m/s) em 21 de agosto de 1995, valores positivos representam vento de oeste.....	52
Figura 2.16 – Quantidade de ozônio (ppmv) versus latitude equivalente para a superfície de 465K de temperatura potencial em 15 de setembro de 1992. Pontos são medidas individuais e a linha a média. A linha vertical denota a borda do vórtice	53
Figura 2.17 – Frequência relativa de aparecimento das NEPs em observações de satélites SAM II, função da altura e do mês, sobre (a) Ártico e (b) Antártica	54
Figura 2.18 – Corte vertical do evento de quebra de tropopausa do dia 13 de março de 1978	58

Figura 2.19 – Perfil vertical de ozônio para os dias 26 e 28 de outubro (a) e dados da coluna total de Ozônio coletados pelo Espectrofotômetro Brewer entre os meses de setembro e outubro de 1993 (b) para Santa Maria, RS, Brasil. Trajetória retroativa da massa de ar para 25 km de altura (c) e imagem do satélite METEOR 3 TOMS para o dia 28 de outubro de 1993	61
Figura 2.20 – Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul (adaptada de Satyamurty et al., 1998; pg. 125). Em relação à baixa troposfera tem-se: ANE ventos alísios de nordeste, ASE ventos alísios de sudeste, ASAS anticiclone subtropical do Atlântico Sul, ASPS anticiclone subtropical do Pacífico Sul, B baixa pressão, BC baixa do Chaco – região de baixas térmicas, BNE região de baixas térmicas no noroeste argentino, CCM complexo convectivo de mesoescala, FF frente fria, FQ frente quente, JBN jato de baixos níveis a leste dos Andes, LI linha de instabilidade tropical, LIP linha de instabilidade pré-frontal, NV nuvem vírgula, RC regiões ciclogênicas, ZCAS zona de convergência do Atlântico Sul e ZCIT zona de convergência intertropical. Já em relação à alta troposfera tem-se: AB alta da Bolívia, BL região de bloqueios atmosféricos, CNE cavado do nordeste do Brasil, JS jato subtropical, JP jato polar, VCAN sub vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais, VCAN trop vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais	64
Figura 2.21 – Representação esquemática de um sistema frontal clássico	65
Figura 2.22 – (a) Padrão idealizado de movimento ageostrófico e divergência próximo a corrente de jato; (b) Circulação transversal direta; (c) Circulação transversal indireta	69
Figura 3.1 – Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT em São Martinho da Serra (29,42°S, 53,87°O), Rio Grande do Sul, Brasil e o Espectrofotômetro Brewer #167.....	71
Figura 3.2– (a) Distribuição normal padrão salientando a aplicação do filtro $\mu_i - 1,5\sigma_i$. (b) Distribuição de frequência de ocorrência dos dados da coluna total de ozônio coletados no Observatório Espacial do Sul entre 1979 e 2011. Linha preta representa o ajuste dos dados a uma distribuição normal de frequência e as linhas vermelhas salientam a aplicação do filtro $\mu_i - 1,5\sigma_i$	75
Figura 4.1 – Correlação entre os dados da coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul obtidos pelo espectro fotômetro Brewer e pelos diferentes instrumentos de satélite. (a) Dataset #1, (b) Dataset #2, (c) Dataset #3 e (d) Dataset #4. A linha sólida representa o slop unitário para o qual os dados estão de acordo	83
Figura 4.2 – Evolução das diferenças relativas entre dados da coluna total de ozônio obtidos pelos instrumentos de satélite e pelo espectrofotômetro Brewer. Em preto é mostrada a diferença relativa entre o Dataset #3 e em cinza a diferença relativa entre o Dataset #4	84
Figura 4.3 – Série de dados da média diária da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 2011 para a região do Observatório Espacial do Sul	85
Figura 4.4 – Climatologia mensal da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 2011 para a região do Observatório Espacial do Sul	86

Figura 4.5 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 14 e 22 de agosto de 1997 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de agosto	89
Figura 4.6 –	Vorticidade Potencial e vento para 17(a) e 19 (b) de agosto de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 19 e 18 de agosto de 1997 respectivamente.....	90
Figura 4.7 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 30 de agosto e 08 de setembro de 2009 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de setembro	91
Figura 4.8 –	Vorticidade Potencial e vento para 02(a) e 03 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 03 e 02 de setembro de 2009 respectivamente	92
Figura 4.9 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 16 e 26 de outubro de 2010 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de outubro	93
Figura 4.10 –	Vorticidade Potencial e vento para 02 (a) e 03 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 03 e 04 de setembro de 2009 respectivamente	94
Figura 4.11 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 28 de outubro e 04 de novembro de 2008 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de setembro	95
Figura 4.12 –	Vorticidade Potencial e vento para 31 de outubro (a) e 01 de novembro (b) de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) ambas para o dia 01 de novembro de 2008.....	96
Figura 4.13 –	Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos a cada ano entre 1979 e 2011 (a), ocorridos a cada mês (b) e distribuição de frequência de porcentagem de queda da coluna total de ozônio (c).....	99
Figura 4.14 –	Campo médio de vorticidade potencial e vento (a) para três dias antes, (b) para dois dias antes, (c) um dia antes, (d) no dia, (e) um dia depois e (f) dois dias depois da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011	103
Figura 4.15 –	Desvio padrão do Campo médio de vorticidade potencial (a) para três dias antes, (b) para dois dias antes, (c) um dia antes, (d) no dia, (e) um dia depois e (f) dois dias depois da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011	104

Figura 4.16 – Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste (b), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (c), e imagem de satélite GOES 10 do vapor d'água as 23:30 UTC (d) do dia 02 de setembro de 2009	106
Figura 4.17 – Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste (b), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (c), e imagem de satélite GOES 10 do vapor d'água as 23:45 UTC(d) do dia 03 de setembro de 2009	108
Figura 4.18 – Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (b), e imagem de satélite GOES 10 realçada as 12:00 (c) do dia 12 de outubro de 2010.....	110
Figura 4.19 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 08 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	114
Figura 4.20 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 09 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	115
Figura 4.21 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 10 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	116
Figura 4.22 –Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 11 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	117
Figura 4.23 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 12 de setembro de 2012 as 12:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	118
Figura 4.24 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 13 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	119
Figura 4.25 – Mapas de Vorticida Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS no dia 14 de setembro de 2012 as 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24(c), 36(d), 48(e), 60 (f), 72(g), 84(h) e 96(i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.....	120

Figura 4.26 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 10 e 18 de setembro de 2012 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de setembro.....	121
Figura 4.27 –	Vorticidade Potencial e vento para 13(a) e 14 (b) de setembro de 2012 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 14 e 13 de setembro de 2012 respectivamente	122
Figura 4.28 –	Valores da coluna total de ozônio entre os dias 11 e 18 de outubro de 2012 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de outubro	123
Figura 4.29 –	Vorticidade Potencial e vento para 13(a) e 14 (b) de outubro de 2012 a 620K e imagem do satélite OMI (c) para 13 de outubro de 2012.....	124
Figura A.1:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 24 e 23 de setembro de 1982 respectivamente.....	147
Figura A.2:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de outubro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 12 (b) de outubro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 12 e 10 de outubro de 1982 respectivamente..	148
Figura A.3:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 21 de outubro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 21 (b) de outubro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d), ambas para o dia 21 de outubro de 1982.....	148
Figura A.4:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 30 de setembro de 1983. Vorticidade Potencial e vento para 29 (a) e 30 (b) de setembro de 1983 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 01 de outubro e 30 de setembro de 1983 respectivamente.....	149
Figura A.5:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de outubro de 1983. Vorticidade Potencial e vento para 13 (a) e 14 (b) de outubro de 1983 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 15 e 13 de outubro de 1983 respectivamente..	149
Figura A.6:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 1984. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 16 (b) de outubro de 1984 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 17 e 16 de outubro de 1984 respectivamente..	150

Figura A.7:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de setembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de setembro de 1985 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 15 e 14 de setembro de 1985 respectivamente	150
Figura A.8:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de outubro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de outubro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 16 e 15 de outubro de 1985 respectivamente ..	151
Figura A.9:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de novembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 05 (a) e 07 (b) de novembro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 07 e 06 de novembro de 1985 respectivamente	151
Figura A.10:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 27 de novembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 27 (b) de novembro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 28 e 26 de novembro de 1985 respectivamente	152
Figura A.11:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de setembro de 1986. Vorticidade Potencial e vento para 11 (a) e 13 (b) de setembro de 1986 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 12 e 11 de setembro de 1985 respectivamente	152
Figura A.12:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 06 de setembro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 05 (a) e 06 (b) de setembro de 1990 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 07 e 05 de setembro de 1990 respectivamente	153
Figura A.13:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 17 de setembro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 17 (b) de setembro de 1990 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 18 e 17 de setembro de 1990 respectivamente	153
Figura A.14:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 01 de outubro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 29 de setembro (a) e 01 (b) de outubro de 1990 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 01 de outubro e 30 de setembro de 1990 respectivamente.....	154

- Figura A.15: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de outubro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 07 (a) e 08 (b) de outubro de 1990 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 08 e 07 de outubro de 1990 respectivamente.. 154
- Figura A.16: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 10 de outubro de 1992. Vorticidade Potencial e vento para 09 (a) e 10 (b) de outubro de 1992 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 10 e 09 de outubro de 1992 respectivamente.. 155
- Figura A.17: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de agosto de 1993. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de agosto de 1993 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 27 e 24 de agosto de 1993 respectivamente..... 155
- Figura A.18: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 31 de outubro de 1993. Vorticidade Potencial e vento para 29 (a) e 31 (b) de outubro de 1993 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 31 de outubro e 01 de novembro de 1993 respectivamente..... 156
- Figura A.19: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 17 de setembro de 1994. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 17 (b) de setembro de 1994 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 18 e 17 de setembro de 1994 respectivamente..... 156
- Figura A.20: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de outubro de 1994. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 26 (b) de outubro de 1994 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 26 e 21 de outubro de 1994 respectivamente.... 157
- Figura A.21: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de setembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 13 (a) e 15 (b) de setembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 15 e 13 de setembro de 1997 respectivamente..... 157
- Figura A.22: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 09 de outubro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 09 (b) de outubro de 1997 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 09 e 07 de outubro de 1997 respectivamente 158
- Figura A.23: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 17 (b) de outubro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 17 e 14 de outubro de 1997 respectivamente 158

- Figura A.24: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 02 de novembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 01 (a) e 02 (b) de novembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 03 e 02 de novembro de 1997 respectivamente 159
- Figura A.25: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 19 de novembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 18 (a) e 19 (b) de novembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 19 de novembro de 1997 159
- Figura A.26: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 24 de outubro de 1998. Vorticidade Potencial e vento para 23 (a) e 24 (b) de outubro de 1998 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 25 e 24 de outubro de 1998 respectivamente 160
- Figura A.27: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de agosto de 1999. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de agosto de 1999 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de agosto de 1999 respectivamente .. 160
- Figura A.28: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 23 e 21 de setembro de 2000 respectivamente 161
- Figura A.29: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 09 de outubro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 08 (a) e 09 (b) de outubro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 10 e 09 de outubro de 2000 respectivamente 161
- Figura A.30: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de outubro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de outubro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de outubro de 2000 respectivamente 162
- Figura A.31: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de novembro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 07 (b) de novembro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 07 e 05 de novembro de 2000 respectivamente 162
- Figura A.32: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de agosto de 2001. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de agosto de 2001 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 16 e 14 de agosto de 2001 respectivamente .. 163

Figura A.33:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 2001. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 2001 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 24 e 23 de setembro de 2001 respectivamente.....	163
Figura A.34:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 18 de agosto de 2002. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 18 (b) de agosto de 2002 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 18 de agosto de 2002	164
Figura A.35:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 02 de outubro de 2003. Vorticidade Potencial e vento para 01 (a) e 02 (b) de outubro de 2003 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 03 e 01 de outubro de 2003 respectivamente	164
Figura A.36:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de outubro de 2003. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de outubro de 2003 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 15 de outubro de 2003.....	165
Figura A.37:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 22 de agosto de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 22 (b) de agosto de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 22 e 21 de agosto de 2004 respectivamente ..	165
Figura A.38:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de setembro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 11 (a) e 12 (b) de setembro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 13 e 12 de setembro de 2004 respectivamente.....	166
Figura A.39:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de setembro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de setembro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de setembro de 2004 respectivamente.....	166
Figura A.40:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de outubro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 30 de setembro (a) e 02 (b) de outubro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 02 e 01 de outubro de 2004 respectivamente.....	167
Figura A.41:	Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 16 (b) de outubro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 16 de outubro de 2004.....	167

- Figura A.42: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 29 (b) de setembro de 2005 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 29 e 30 de setembro de 2005 respectivamente .. 168
- Figura A.43: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 11 de outubro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 11 (b) de outubro de 2005 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 12 e 11 de outubro de 2005 respectivamente..... 168
- Figura A.44: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de outubro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 21 (a) e 23 (b) de outubro de 2005 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 24 e 23 de outubro de 2005 respectivamente..... 169
- Figura A.45: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 20 de agosto de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 17 (a) e 20 (b) de agosto de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) ambas para o dia 21 de agosto de 2006 169
- Figura A.46: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de outubro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 08 (b) de outubro de 2006 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 08 e 05 de outubro de 2006 respectivamente..... 170
- Figura A.47: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de outubro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 13 (b) de outubro de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 13 e 12 de outubro de 2006 respectivamente..... 170
- Figura A.48: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 28 de outubro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 27 (a) e 28 (b) de outubro de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 28 e 26 de outubro de 2006 respectivamente..... 171
- Figura A.49: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 19 de novembro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 18 (a) e 19 (b) de novembro de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 20 e 17 de novembro de 2006 respectivamente 171
- Figura A.50: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de agosto de 2007. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 16 (b) de agosto de 2007 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 16 e 15 de agosto de 2007 respectivamente 172

- Figura A.51: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de setembro de 2007. Vorticidade Potencial e vento para 12 (a) e 13 (b) de setembro de 2007 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 14 e 12 de setembro de 2007 respectivamente.. 172
- Figura A.52: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 28 de setembro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 26 (a) e 28 (b) de setembro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 28 e 30 de setembro de 2008 respectivamente.. 173
- Figura A.53: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de outubro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 12 (b) de outubro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 12 e 11 de outubro de 2008 respectivamente 173
- Figura A.54: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 25 de outubro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 24 (a) e 25 (b) de outubro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 25 e 24 de outubro de 2008 respectivamente 174
- Figura A.55: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2009. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 29 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 30 e 25 de setembro de 2009 respectivamente.. 174
- Figura A.56: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de agosto de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 07 (b) de agosto de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 08 e 06 de agosto de 2010 respectivamente 175
- Figura A.57: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de setembro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 07 (a) e 08 (b) de setembro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 09 e 08 de setembro de 2010 respectivamente.. 175
- Figura A.58: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de outubro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 12 (a) e 13 (b) de outubro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 13 e 12 de outubro de 2010 respectivamente 176
- Figura A.59: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 22 de outubro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 21 (a) e 22 (b) de outubro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 23 e 22 de outubro de 2010 respectivamente 176
- Figura A.60: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 05 de setembro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 04 (a) e 05 (b) de setembro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 06 e 05 de setembro de 2011 respectivamente.. 177

Figura A.61: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 30 (b) de setembro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 30 e 29 de setembro de 2011 respectivamente ..177

Figura A.62: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 21 de outubro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 21 (b) de outubro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 22 e 19 de outubro de 2011 respectivamente.....178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Processos químicos chaves e ciclos catalíticos do ozônio	43
Tabela 2.2 – Classes das Nuvens Estratosféricas Polares.....	55
Tabela 4.1 – Parametros estatísticos obtidos por análise de regressão linear entre os quatro diferentes conjuntos de dados de instrumentos de satélite e espectrofotômetro Brewer para dados da coluna total de ozônio sobre o Observatório Espacial do Sul.....	82
Tabela 4.2 – Valores da média climatológica mensal e respectivo desvio padrão da coluna total de Ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul entre 1979 e 2011.....	87
Tabela 4.3 – Médias climatológicas da coluna total de ozônio e seus respectivos desvios padrão e limite de média menos 1,5 desvios padrão ($\mu - 1,5\sigma$) para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, no período entre 1979 e 2011, para a região do Observatório Espacial do Sul (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m).....	88
Tabela 4.4 – Datas de ocorrência dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, além do valor da coluna total de ozônio, o nível isentrópico do transporte e a porcentagem de redução do conteúdo de ozônio em relação a média mensal climatológica	98

LISTA DE ABREVIATURAS

C	– Celsius
CCM	– Complexos Convectivos de Mesoescala
CFCs	– Clorofluorcarbonos
Cl ₂	– Cloro Molecular
ClO	– Monóxido de Cloro
ClONO ₂	– Nitrato de Cloro
CRS	– Centro Regional Sul
DS	– Direto ao Sol
FMI	– Finnish Meteorological Institute
GFS	– Global Forecast System
GRUMA	– Grupo de Modelagem Atmosférica
GrADS	– Grid Analysis and Display System
H ₂ O	– Água
HCl	– Ácido Clorídrico
HOCl	– Ácido Hipocloroso
hPa	– Hector Pascal
HNO ₃	– Ácido Nítrico
HNO ₃ .3H ₂ O	– Ácido Nítrico Tri-hidratado (NAT)
HYSPLIT	– HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
INPE/MCTI	– Instituto Nacional de pesquisas espaciais/Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação
JBN	– Jato de Baixos Níveis
JP	– Jato Polar
JST	– Jato Subtropical
K	– Kelvin
km	– Kilometros
LI	– Linhas de Instabilidade
N ₂ O ₅	– Pentóxido de Dinitrogénio
NASA	– National Aeronautics and Space Agency
NCEP/NCAR	– National Centers for Environmental Prediction/National Atmospheric Research
NEPs	– Nuvens Estratosféricas Polares
NIVR	– Programa Aeroespacial da Netherlands's Agency
NO ₂	– Dióxido de Nitrogénio
NO ₃	– Nitrato
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration
O ₂	– Oxigênio Molecular
O ₃	– Ozônio Molecular
OES	– Observatório Espacial do Sul

OH	– Hidroxila
OMI	– Ozone Monitoring Instrument
S	– Sul
SCM	– Sistemas Convectivos de Mesoescala
SBUV	– Solar Backscattered Ultraviolet
SO ₂	– dióxido de enxofre
TOMS	– Total Ozone Mapping Spectrometer
TTE	– Trocas entre a Troposfera e a Estratosfera
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria
UD	– Unidade Dobson ($2,69 \times 10^{16}$)
UV	– Ultra Violeta
UVB	– Ultra-Violeta do tipo B
VCANs	– Vortice Ciclônico de Altos Níveis
VP	– Vorticidade Potencial
VPA	– Vorticidade Potencial Absoluta
μm	– Micrômetros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	33
1.1 Objetivos	36
1.1.1 Objetivo Geral	36
1.1.2 Objetivos Específicos	37
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
2.1 Ozônio Atmosférico	39
2.2 Propriedades Ópticas do Ozônio	39
2.3 Formação e Destruição do Ozônio Atmosférico	42
2.4 Distribuição do Ozônio na Atmosfera	44
2.5 O Buraco de Ozônio	48
2.5.1 O Vortice Polar	51
2.5.2 Nuvens Estratosféricas Polares	54
2.6 Dinâmica do Ozônio Atmosférico através da Vorticidade Potencial	57
2.7 Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico	60
2.8 Circulação Troposférica e a Influência sobre o Ozônio Estratosférico	62
2.9 Sistemas Meteorológicos de Tempo que Atingem o Sul do Brasil	63
3 DADOS E METODOLOGIA	71
3.1 Dados Utilizados no Monitoramento do Conteúdo de Ozônio Sobre o Sul do Brasil	71
3.2 Identificação dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil	74
3.2.1 Análise da Série de Dados da Coluna Total de Ozônio Para o Sul do Brasil	74
3.2.2 Análise Isentrópica de Vorticidade Potencial das Massas de Ar	76
3.2.3 Confirmação da Origem das Massas de Ar	76
3.2.4 Análise das Imagens do Conteúdo de Ozônio dos satélites TOMS e OMI	77
3.3 Identificação do Padrão Médio de Circulação Estratosférica Durante a Ocorrência de Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico	77
3.4 Análise dos Padrões de Circulação Troposféricos	78
3.5 Utilização da Saída do Modelo GFS na Previsão da Chegada das Massas de Ar Pobre em Ozônio Sobre o Sul do Brasil	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1 Monitoramento do Conteúdo de Ozônio sobre o Sul do Brasil	82

4.2 Análise dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011	88
4.2.1 Análise de eventos característicos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil	88
4.2.1.1 Evento do dia 18 de agosto de 1997	89
4.2.1.2 Evento do dia 03 de setembro de 2009	91
4.2.1.3 Evento do dia 07 de outubro de 2007	93
4.2.1.4 Evento do dia 01 de novembro de 2008	95
4.2.2 Estatística dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil	97
4.3 Padrão Médio de Circulação Estratosférica Durante a Ocorrência de Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil	100
4.4 Análise Sinótica Troposférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil	105
4.4.1 Análise Sinótica Troposférica do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de Setembro de 2009	105
4.4.2 Sistemas Sinóticos de Tempo Durante a Ocorrência do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do dia 13 de Outubro de 2010	109
4.5 Previsão e análise dos Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do ano de 2012	110
4.5.1 Previsão e análise do evento de 14 de Setembro de 2012	111
4.5.2 Análise do Evento de 14 de Outubro de 2012	123
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE A - Imagens de Confirmação dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil	147

1 INTRODUÇÃO

O gás ozônio é o principal gás traço constituinte da estratosfera, sendo, juntamente com o vapor d'água, essencial para a vida e o balanço energético do planeta, exibindo um papel chave no suporte da vida na superfície terrestre devido a sua capacidade de interceptação da radiação UV nociva aos seres vivos (Salby, 1996).

O transporte meridional do ozônio estratosférico é um dos fatores essenciais para a concentração deste constituinte atmosférico em uma determinada região do planeta (Gettelman et al., 2011; Guo et al., 2012; Ploeger et al., 2012; Bracci et al., 2012; Albers e Nathan, 2012), explicando inclusive a maior concentração do ozônio nas regiões polares ao invés da região equatorial, onde há maior produção, em virtude de uma circulação em escala global, chamada circulação Brewer-Dobson, onde massas de ar estratosféricas da região equatorial são transportadas horizontalmente em direção aos pólos (Brewer, 1949; Dobson, 1968), sendo esta circulação estratosférica ainda muito estudada nos dias atuais (Roscoe, 2006; Stenke et al., 2009; Okamoto et al., 2011; Weber et al., 2011; Young et al., 2012).

A utilização da Vorticidade Potencial em estudos que a correlacionam com o transporte de constituintes químicos traços como o ozônio, óxido nitroso e vapor d'água (Schoeberl, 1989) sobre superfícies isentrópicas na baixa estratosfera foi apontado primeiramente por Danielsen em 1968 (Lary et al., 1995). Esta variável tem um importante papel traçador na dinâmica de massas de ar de grande escala, comportando-se como uma superfície material onde a temperatura potencial é conservada (Hoskins et al., 1985).

A Vorticidade Potencial pode ser utilizada como coordenada horizontal (Norton et al., 1994) e na determinação da borda do vórtice polar estratosférico como sendo a região de máximo gradiente na vorticidade potencial, capturando os efeitos da isolação da distribuição de gases traços dentro do vórtice polar (Nash et al., 1996; Marchand et al., 2005).

Entretanto, sua utilização foi largamente difundida em estudos de trocas entre a estratosfera e a troposfera em região onde há intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera e vice versa (Holton et al., 1995; Sthol et al., 2003; Jing et al., 2005; Bithell et al., 2000; Gerasopoulos et al., 2006; De Bellevue et al., 2006; Sprenger et al., 2007; Nakamura, 2007; El Amraoui et al., 2010; Clain et al., 2010; Liu et al., 2011), sendo utilizada também em estudos de transporte horizontal de massas de ar e seu conteúdo de ozônio na estratosfera (Bencherife et al. 2003; 2011; Semane et al., 2006; Werner et al., 2011; Bracci et al., 2012).

A descoberta da massiva destruição do conteúdo de ozônio durante as primaveras do Hemisfério Sul, denominada de “Buraco de Ozônio Antártico” (Chubachi, 1984; Farman et al., 1985; Solomon, 1999), mostrado na Figura 1.1, causado pela formação do Vórtice Polar Estratosférico (Schoeberl e Hartman, 1991; Francis e Salby, 2001; Varotsos e Tzanis, 2012; Roscoe et al., 2012; Blessmann et al., 2012) e pela ocorrência de reações heterogêneas na superfície das Nuvens Estratosféricas Polares (Solomon et al., 1986; David et al., 2005; Keckhut et al., 2007; Alexander et al., 2011; Lambert et al., 2012; Achtert et al., 2012; Terao et al., 2012), despertou o interesse da comunidade científica. Muitos estudos a fim de monitorar o conteúdo de ozônio polar, tanto sobre o Hemisfério Sul (Hofmann et al., 1997; Solomon, 1999; Muller et al., 2008; McElroy and Fogal, 2008; Klekociuk et al., 2011; Hassler et al., 2011; Salby et al., 2012; Scannell et al., 2012), como sobre o Hemisfério Norte, onde ocorre um fenômeno similar e suas diferenças com o ocorrido no pólo sul (Chubachi et al., 2005; Tripathi et al., 2006; Solomon et al., 2007; Fioletov, 2008; Shepherd, 2008; Maney et al., 2011b) passaram a ser confeccionados.

EP/TOMS Corrected Total Ozone for Oct 7, 2000

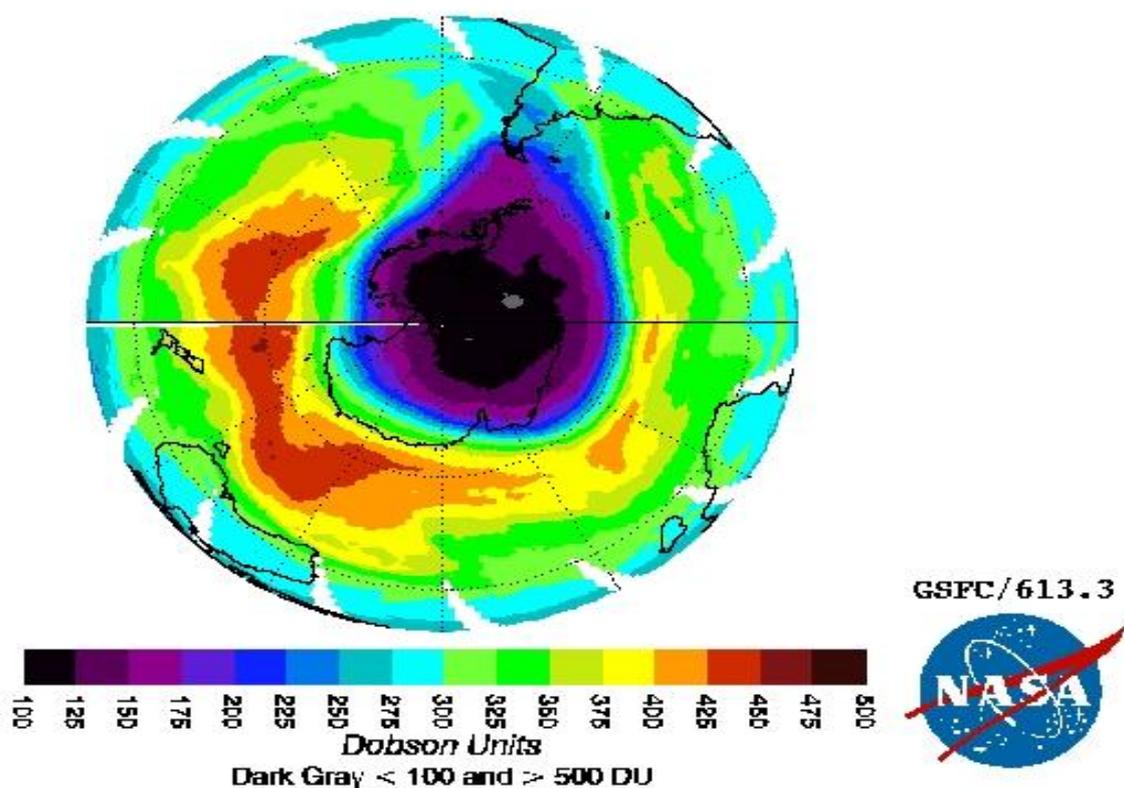


Figura 1.1 – Imagem do Satélite TOMS da NASA, ilustrando o buraco de ozônio Antártico durante a primavera austral.

As mudanças climáticas podem afetar os processos dinâmicos e termodinâmicos da estratosfera, modificando a força dos vórtices polares, com isso aumentando a depleção do ozônio sobre as regiões polares (Austin et al., 2003; Newman e Nash, 2000) que também podem ter sua destruição e produção influenciados pelas variações solares (Zerefos et al., 1997) ou ainda sofrer influência da temperatura da estratosfera, que é influenciada pela estabilidade do inverno afetando os vórtices polares (Chipperfield e Jones, 1999; Shindell et al., 1998; Manney, 2005).

Regiões de médias latitudes próximas às regiões polares podem ter seu conteúdo de ozônio diretamente influenciado pela passagem da borda do buraco de ozônio sobre estas regiões, causando drásticas reduções do conteúdo de ozônio e aumento dos níveis de radiação ultravioleta que chega a superfície (Larry et al. 1995; Kirchoff et al. 1997; Perez et al. 1998; Marchand et al. 2003; 2005; Pazmino et al. 2005; 2008; Casiccia et al., 2008; De Laat et al., 2010). Estas regiões são densamente povoadas, principalmente no hemisfério Norte, onde também se observa a formação de mini buracos de ozônio (Semane et al. 2002; Martinez-Lozano et al., 2011).

Anomalias extremas no conteúdo total de ozônio em médias latitudes da estratosfera são associadas com o transporte meridional de regiões onde as concentrações climatológicas são mais baixas ou altas (Koch et al., 2002; 2005).

O vórtice polar pode ser perturbado pelo aumento da atividade da onda planetária que pode contribuir para ejeção de massas de ar para fora do vórtice polar através de filamentos em direção ao equador (Schoeberl, 1988; Schoeberl et al., 1992) ocasionados por eventos de quebra da onda de Rossby (Norton, 1994; Semane et al., 2006; Shepherd, 2007; Ndarana e Waugh, 2010; Shepherd e Mclandress, 2011; Ndarana et al., 2012), transportando massas de ar de origem polar em direção a médias latitudes (Marchand et al., 2003).

Massas de ar que se desprendem do vórtice polar antártico podem permanecer isoladas de 7 a 20 dias após sua separação do vórtice polar, período que pode ser suficiente para propagação para baixas e médias latitudes, causando uma diminuição temporária na coluna total de ozônio sobre estas regiões (Prather e Jaffe, 1990; Waugh, 1993; Waugh et al., 1994; Manney et al., 1994; Garny et al., 2007).

A passagem de massas de ar originárias do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil (29,4 °S; 53,8°W) foi primeiramente observada por Kirchoff et al. (1996), ocasionando uma queda temporária do conteúdo de ozônio sobre esta região, sendo este tipo de fenômeno denominado de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico e frequentemente observado sobre a América do Sul (Perez e Jaque, 1998; Perez et al., 2000;

Pinheiro et al., 2011; 2012; Peres et al., 2012), Sul do continente africano (Semane et al., 2006; Sivakumar et al., 2007) e Nova Zelândia (Brinksma et al., 1998).

O entendimento dos padrões atmosféricos, tanto troposféricos como estratosféricos, e sua relação com a variação do conteúdo de ozônio está sendo considerado como uma nova linha de pesquisa em ozônio (Ohring et al., 2010). Esta nova linha de pesquisa formou-se devido a realização de diversos trabalhos científicos neste sentido, onde foi analisada a correlação da coluna de ozônio com variáveis meteorológicas (Ancellet et al. 1994; Canziani et al. 2002; 2008; Canziani e Legnani, 2006; Braesicke et al., 2008; Rogal et al., 2010; Feldstein, 2011; Kang et al., 2011; Bracegirdle, 2011; Midya et al., 2012), principalmente a influência da corrente de jato na Alta Troposfera (Ray et al., 2004; Tang e Prather, 2010; Bukin et al., 2011; Manney et al., 2011a; Trickl et al., 2011).

O evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorrido sobre o Sul do Brasil no dia 13 de outubro de 2010 foi estudado por Peres et al. (2012), sendo observada uma queda de 5,6% no conteúdo de ozônio, mostrando que o evento ocorreu após a passagem de um sistema frontal troposférico, associado à passagem da região de entrada polar da corrente de jato subtropical e do sistema de alta pressão pós frontal em superfície, causando intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera e auxiliando no transporte da massa de ar estratosférica pobre em ozônio que atingiu o Sul do Brasil. Esta condição troposférica de tempo é semelhante a encontrada por Peres et al. (2011) para o evento do dia 14 de outubro de 2008.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Identificar e analisar a ocorrência de eventos de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil, no período entre 1979 e 2011, caracterizando padrões como altitude preferencial de chegada da massa de ar pobre em ozônio e intensidade da queda na coluna de ozônio.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a. Identificação dos padrões médios de circulação estratosférica através da obtenção dos campos médios de Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) e vento para a altitude preferencial de chegada da massa de ar pobre em ozônio, para os dias de ocorrência de eventos de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil.
- b. Análise dos campos troposféricos, como pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa, corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste, e vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa, dos dias de ocorrência de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil, e verificação da existência de uma conexão entre o padrão de circulação troposférico e estratosférico durante a ocorrência do fenômeno.
- c. Utilização dos dados da saída do modelo GFS para confecção dos mapas estratosféricos de Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) e vento a fim de se fazer previsão da chegada das massas de ar pobre em ozônio sobre o Sul do Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ozônio Atmosférico

O Gás Ozônio foi descoberto no ano de 1840 quando Christian Fredrich Schönbein detectou um odor particular, nomeado por ele de “ozone” (do grego para cheiro “ozein”), na liberação de oxigênio durante um experimento de eletrólise de água acidulada. Estudos subsequentes, ainda no século 19, sugeriam que o ozônio seria uma molécula alotrópica de oxigênio, constituída por três átomos, de formula O_3 ou $O O O$.

Em 1858, o Frances André Houzeau desenvolveu um método de medida quantitativa do ozônio envolvendo uma mistura de iodo e arsênio e descobriu que o ozônio está presente no ar natural. Este método foi usado pelo químico Albert Levy para fazer medidas contínuas do conteúdo de ozônio entre 1877 e 1907 no Observatório Municipal do Parque Mountsouris em Paris.

Nas primeiras décadas do século 20, surgiram as primeiras medidas da coluna integrada total de ozônio baseadas na absorção da radiação ultravioleta (UV), quando os cientistas franceses Charles Fabry and Henri Buisson estimaram que, se trazido para a superfície da Terra, em condições padrões de temperatura e pressão, a coluna total de ozônio teria uma camada de cerca de 3 mm de espessura (Fabry e Buisson, 1913). Alguns anos mais tarde, o cientista britânico G.M.B Dobson desenvolveu um espectrofotômetro para medidas da coluna de ozônio, o qual foi instalado em diferentes locais do mundo, sendo ainda muito utilizado nos dias atuais, tendo sua medida padrão chamada de Unidade Dobson (UD) em reconhecimento a sua contribuição (Dobson 1930, 1968).

2.2 Propriedades Ópticas do Ozônio

O ozônio na estratosfera exibe um papel chave no suporte da vida na superfície terrestre devido a sua capacidade de interceptação da radiação UV nociva, permitindo a vida (Salby 1996).

Entretanto, diversos constituintes atmosféricos também absorvem parte da radiação solar, como mostrado na Figura 2.1 (a).

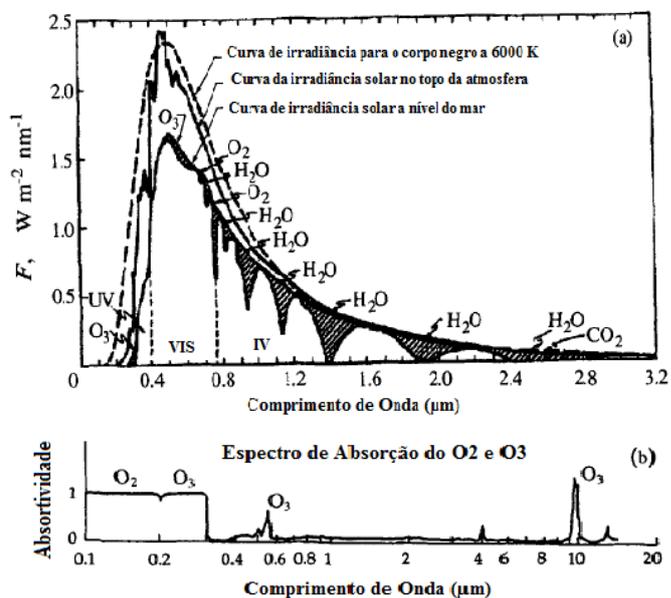


Figura 2.1 – (a) Curvas de irradiância solar no topo da atmosfera e no nível do mar. Regiões pintadas indicam as moléculas responsáveis pela absorção. (b) Espectro de absorção das moléculas de oxigênio e ozônio. Fonte: Modificado Seinfeld e Pandis (2006), pg. 118.

Oxigênio e ozônio são responsáveis pela remoção quase completa da radiação incidente com comprimento de onda menor que 290 nm Figura 2.1 (b). Já o ozônio possui três bandas principais de absorção, a banda de Hartley (200-300 nm), com intensa absorção, a banda de Huggins (300-360 nm) com uma absorção mais fraca e ainda tendo uma mais fraca interação com a radiação acima de 400 nm, na faixa do visível e infravermelho, chamada de banda de Chappuis (440-850 nm) (Liou, 2002), conforme a Figura 2.2.

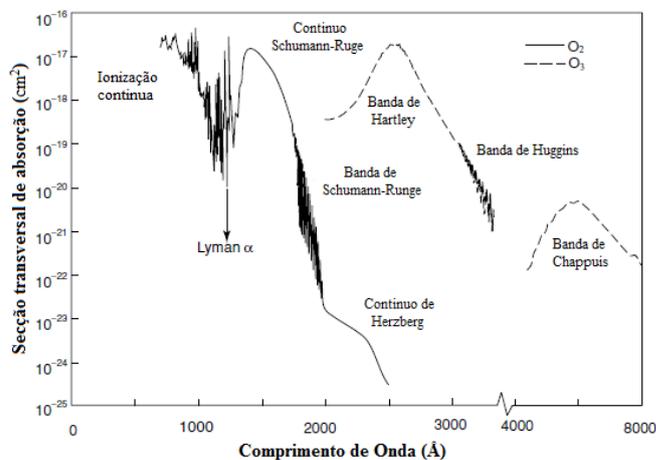


Figura 2.2 – Secção transversal de absorção do ozônio e oxigênio na região do ultravioleta e visível. Fonte: Modificado de Brasseur e Solomon (1986).

A Figura 2.3 mostra a profundidade de penetração da radiação solar UV na atmosfera da terrestre, onde as moléculas de nitrogênio e oxigênio absorvem esta radiação em níveis mais altos, resultado da fotodissociação e ionização destas moléculas. Em níveis mais baixos, oxigênio e ozônio impedem que boa parte da radiação UV chegue à superfície da Terra (Liou, 2002).

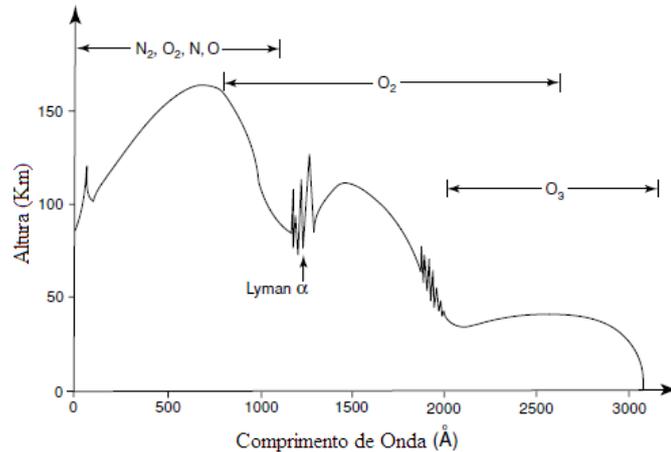


Figura 2.3: Profundidade de penetração da radiação solar UV na atmosfera terrestre para $\mu_0 = 1$ (cosseno do ângulo zenital) e perfil médio de ozônio. As linhas indicam a altura em que a profundidade óptica é igual a um. Fonte: Modificado de Liou 2002.

Comprovando sua importância, a camada de ozônio estratosférica absorve virtualmente toda a radiação ultravioleta solar de comprimentos de onda entre 240 e 290 nm, que são prejudiciais para organismos unicelulares e células mais superficiais de plantas e animais. Além disso, grande parte do intervalo de comprimento de onda entre 290 e 320 nm, chamado de UV-B e que é biologicamente ativo, também é absorvido.

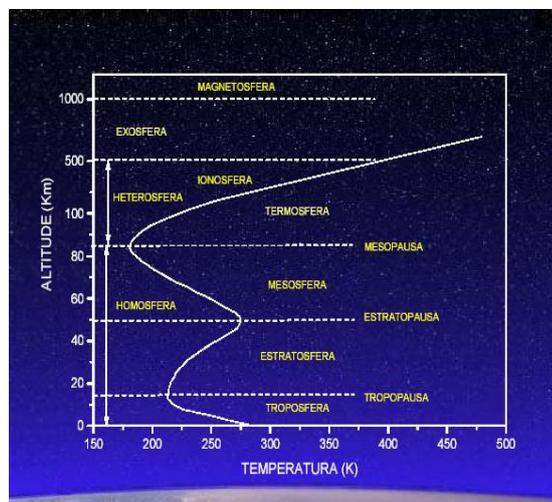


Figura 2.4 – Representação da variação da temperatura do ar com a altitude mostrando as camadas atmosféricas; adaptada de Brasseur e Solomon, 1986.

Uma redução de 1% no ozônio estratosférico pode levar a um aumento de até 2% no UV-B e aumentar a incidência de câncer de pele em indivíduos suscetíveis (Seinfeld e Pandis, 2006). Sobre o Sul do Brasil, esta mesma redução no conteúdo de ozônio leva a um aumento médio de 1,2% na radiação ultravioleta (Guarnieri et al., 2004). Devido a esta absorção de radiação ultravioleta, a molécula do ozônio termina liberando energia na forma de calor, fazendo com que a temperatura comece a aumentar com a altitude na estratosfera, conforme a Figura 2.4, onde sua concentração é maior. (Slusser, 1999).

2.3 Formação e Destruição do Ozônio Atmosférico

Em 1930, o cientista britânico Sydney Chapman propôs uma teoria fotoquímica para a produção e destruição do ozônio na estratosfera, chamada de mecanismo de Chapman, no qual o ozônio é continuamente produzido na atmosfera a uma altura de 30 km, em um ciclo iniciado pela dissociação do O_2 (R1) (Chapman, 1930).

Entretanto, a descoberta de Chapman superestima os perfis de ozônio observados na estratosfera, conforme a Figura 2.5, o que motivou diversos estudos, resultando em reações químicas adicionais de perda de ozônio, os chamados de ciclos catalíticos.

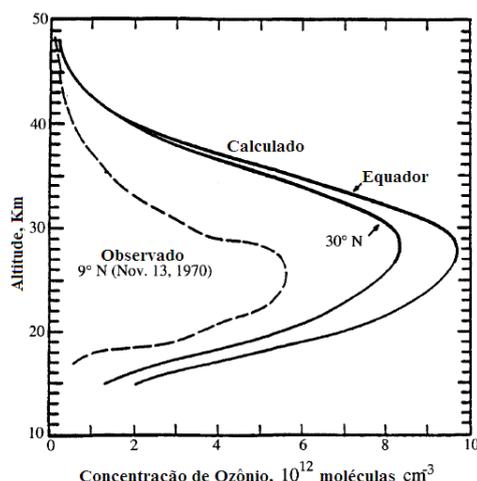


Figura 2.5 – Comparação da concentração do ozônio estratosférico em função da altitude previsto pelo mecanismo de Chapman e observado sobre o Panamá (9°N) em 13 de novembro de 1970. Fonte: Modificado Seinfeld e Pandis (2006), pg. 158.

Estes ciclos catalíticos elucidaram o papel do hidrogênio (Bates e Nicolet, 1950), dos óxidos de nitrogênio (Crutzen, 1970; 1971), do cloro, flúor (Stolarski e Cicerone, 1974;

Stolarski e Rundel, 1975), do bromo (Wofsy, 1975), do acoplamento entre estas famílias que formam compostos reservatórios de longo tempo de vida, aeronaves supersônicas (Johnston, 1971) e vulcões na química do ozônio estratosféricos.

Em 1974, Mario Molina e F. Sherwood Roland identificaram que o cloro liberado pelos clorofluorcarbono produzidos pelo homem seria a maior fonte do cloro que destrói ozônio na estratosfera (Molina e Roland, 1974). Por seus estudos pioneiros, Crutzen, Molina e Rowland ganharam o premio Nobel da Química em 1995.

Tabela 2.1: Processos químicos chaves e ciclos catalíticos do ozônio. Fonte: adaptada de Solomon 1999.

Processo Químico	Numero da Reação
Mecanismo de Chapman ^a	
$O_2 + h\nu \rightarrow 2O$	R1
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	R2
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$	R3
$O(^1D) + M \rightarrow O + M$	R4
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$	R5
$O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	R7
Ilustração do ciclo catalítico do hidrogênio impar ^b	
$O + OH \rightarrow O_2 + H$	R8
$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	R9
$O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$	R10
Net Cycle 1: $O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$	R11
$HO_2 + O_3 \rightarrow OH + 2O_2$	R12
Net Cycle 2: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Ilustração do ciclo catalítico do nitrogênio impar ^c	
$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	R14
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$	R15
Net Cycle 3: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
Ilustração do ciclo catalítico do cloro impar ^d	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$	R17
Net Cycle 4: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$	R18
$Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$	R19
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 5: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Ilustração do ciclo catalítico Cl-Br ^e	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$	R21
$BrO + ClO \rightarrow Br + ClO_2$	R22
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 6: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
Algumas importantes reações de acoplamento e reservatório	
$ClO + NO \rightarrow Cl + NO_2$	R23
$Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3$	R24
$HO_2 + ClO \rightarrow HOCl + O_2$	R25
$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$	R26
$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$	R27
Reações heterogêneas chaves	
$HCl + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2$	R28
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	R29
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl$	R30
$HCl + HOCl \rightarrow H_2O + Cl_2$	R31
$BrONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOBr$	R32
$HCl + BrONO_2 \rightarrow HNO_3 + BrCl$	R33
$HCl + HOBr \rightarrow H_2O + BrCl$	R34

^aChapman [1930].

^bBates and Nicolet [1950]; Hampson [1964].

^cCrutzen [1970]; Johnston [1971].

^dStolarski and Cicerone [1974]; Molina and Molina [1987].

^eMcElroy et al. [1986]; Tuing et al. [1986].

Devido à rapidez com que ocorrem as reações R2 e R3 e a rápida interconversão entre O e O3, criou-se a denominação Oxigênio ímpar, que é a soma das concentrações de O+O3 sendo produzido somente por R1 e consumido somente por R7: Oxigênio ímpar, $O_x=O+O_3$.

A Tabela 2.1 mostra de forma simplificada todos os ciclos catalíticos envolvidos na química do ozônio estratosférico, sendo a reação R2 a única de produção de ozônio em praticamente toda a atmosfera, tanto na troposfera quanto na estratosfera.

O ozônio é a forma dominante de oxigênio ímpar na estratosfera abaixo de 50 km, representando 99%, possibilitando assumir que as taxas de formação do ozônio como função da latitude, altitude e estação do ano podem ser calculadas com base na taxa de fotólise do O_2 , sendo mais alta próxima do equador e aumenta com a altitude, refletindo a dependência da variação latitudinal da radiação solar e do ângulo zenital, conforme a Figura 2.6.

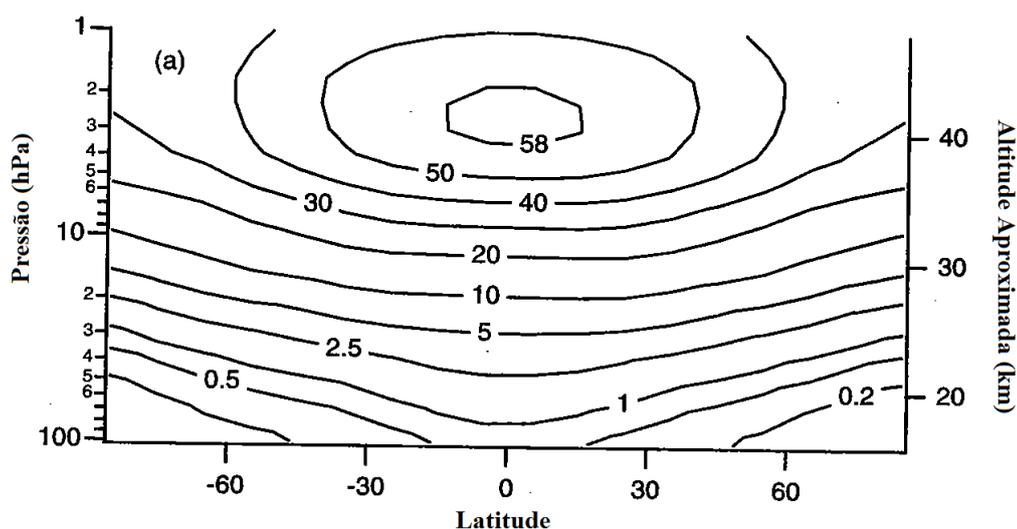


Figura 2.6 – Contornos da média anual da taxa de produção de O_x (em 10^5 moléculas/cm³.s) a partir da fotólise do O_2 , obtido do modelo de circulação climatológica bi-dimensional Goddard. Adaptado de Dessler 2000, pg 53.

2.4 Distribuição do Ozônio na Atmosfera

Aproximadamente 90% do conteúdo de ozônio concentram-se na estratosfera a uma altura entre 15 e 35 km (London, 1985; WMO, 1995), numa região conhecida como camada de ozônio devido a grande abundância deste elemento a estas alturas (Kirchhoff, 1991), restando a troposfera uma significativa quantidade entre 10 e 15 % da abundância natural do ozônio (Fishman et al.,1990).

Entretanto, a região de maior produção não condiz com a região de maior concentração no conteúdo de ozônio. Nota-se na Figura 2.7, que as taxas de produção de ozônio são mais altas no equador e a cerca de 40 km de altitude, enquanto que o pico de concentração localiza-se em latitudes mais em direção aos polos.

As máximas concentrações de ozônio, mesmo no equador, localizam-se a cerca de 25 km ao invés de 40 km, onde a taxa de produção é mais alta. Nos pólos, a concentração máxima de ozônio está em altitudes abaixo de 25 km (em torno de 18 km), enquanto que a produção de ozônio máxima ocorre em altitudes maiores que 40 km.

Pode-se verificar pela Figura 2.8, a qual representa a média climatológica da coluna total de ozônio antes da diminuição antropogênica do ozônio em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio, a existência de uma assimetria norte-sul na concentração de ozônio onde os mais altos valores da coluna de ozônio são encontrados a altas latitudes na primavera local e os mais baixos valores nos trópicos durante todo o ano.

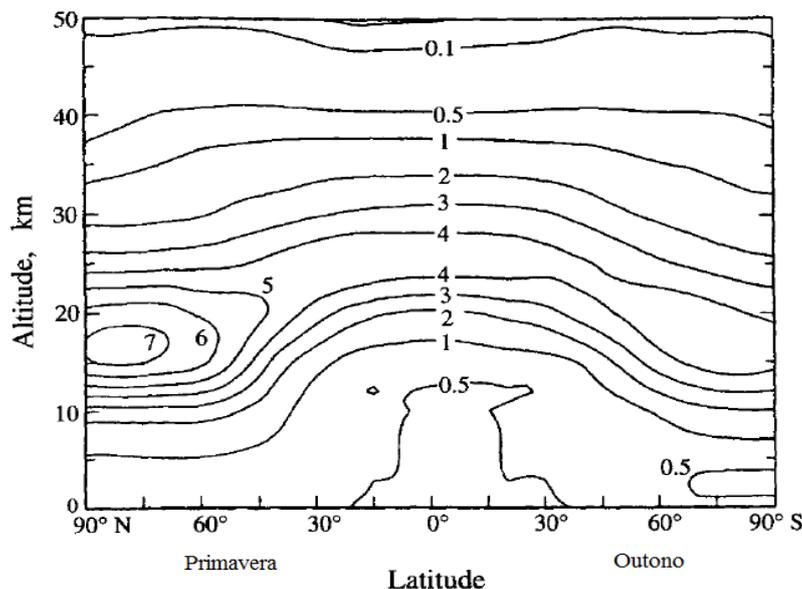


Figura 2.7 – Concentrações de ozônio (em 10^{12} moléculas/cm³) em função da altitude e latitude. Fonte: Seinfeld e Pandis, 2006, pg. 148.

A explicação para esta falta de alinhamento está no papel do transporte horizontal e vertical que redistribui as massas da atmosfera, evidenciando que a maior concentração de ozônio nos pólos é resultado do movimento do ar para o norte e para baixo no Hemisfério Norte, por exemplo, ou para o sul e para baixo no Hemisfério Sul, que transporta ozônio de regiões equatoriais de altas altitudes onde a produção de ozônio é maior.

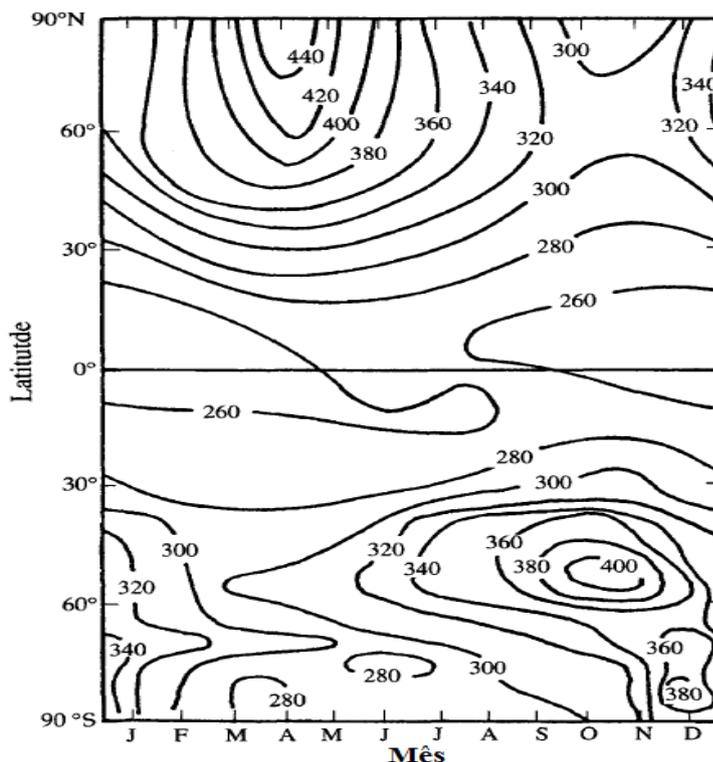


Figura 2.8 – Coluna total de ozônio histórica em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio. Fonte: Seinfeld e Pandis, 2006, pg. 149.

A Figura 2.9 mostra o esquema do transporte horizontal e vertical na estratosfera, responsável por levar o ozônio dos trópicos para os pólos, além de mostrar as trocas de ozônio entre a troposfera e a estratosfera que ocorrem principalmente em regiões de médias latitudes (Stohl et al., 2003).

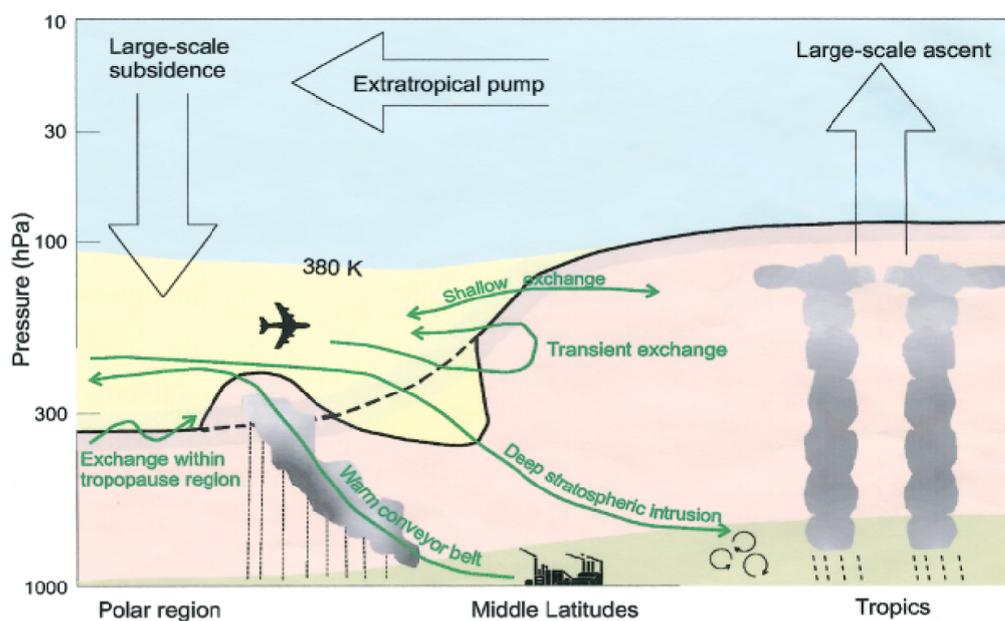


Figura 2.9 – Esquema do transporte das massas de ar na estratosfera. Fonte: Stohl *et al.*, 2003.

Este esquema tem sua origem nos estudos de Dobson, 1930, e Brewer, 1949 que inferiram a existência uma célula de circulação estratosférica, mostrada na Figura 2.10, caracterizada por movimento ascendente nos trópicos e descendentes para médias e altas latitudes observada através de medidas de componentes traços da atmosfera como ozônio, vapor d'água e, posteriormente, com Holton et al. (1995), através do cloro, num ciclo de aproximadamente 5 anos (Solomon, 1999).

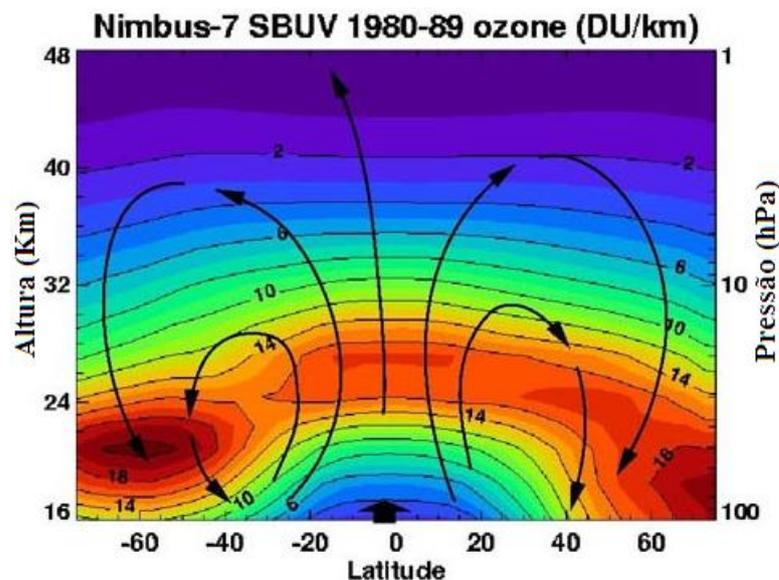


Figura 2.10 – Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio em função da latitude e altitude entre os anos de 1980-1989. Fonte NASA, Junho de 2000. Acessado em Janeiro de 2013.

A escala de tempo do transporte estratosférico do equador para os pólos é da ordem de 3 a 4 meses, sugerindo que o tempo de vida do ozônio na estratosfera seja muito mais longo que o tempo necessário para que o transporte ocorra, podendo variar no equador, de 3 anos em 15 km, a 1 dia em 40 km.

Nas regiões tropicais, as variações sazonais podem ser negligenciadas, uma vez que a radiação solar pode ser considerada constante durante o ano todo (Warkamatzu, 1989). Com o aumento da latitude, tem-se maior variação sazonal na concentração do ozônio estratosférico, tendo a máxima concentração na primavera, período onde as regiões próximas aos pólos são caracterizadas por fortes correntes de ar descendentes que transportam o ozônio produzido em camadas acima de 20 km de altitude, sendo transportado por estas correntes de ar em direção aos pólos na alta estratosfera e em direção ao equador na baixa estratosfera, e mínima no outono. (Seinfeld e Pandis, 2006).

2.5 O Buraco de Ozônio

A equipe de cientistas britânicos lideradas por Joseph Farman e colaboradores causou surpresa na comunidade científica no ano de 1985 (Farman et al., 1985), ao reportar a massiva destruição anual do ozônio estratosférico sobre a Antártida durante a primavera polar, em um nível de observação que a química do cloro era incapaz de explicar, sendo este fenômeno denominado pela imprensa popular de “Buraco de Ozônio Antártico”.

Antes desta descoberta, foi teorizada a idéia de que as atividades humanas poderiam afetar o ozônio estratosférico com efeitos relativamente pequenos. Porém, após esta descoberta foi fortemente estabelecido que as emissões de compostos químicos por atividades humanas poderiam causar espetaculares mudanças no ozônio estratosférico (Dessler, 2000).

Em seu trabalho, Farman e colaboradores mostraram que os dados da coluna total de ozônio coletados de superfície na estação britânica Halley Bay na Antártida (76°S) estavam diminuindo desde 1977, passando os valores médios mensais do mês de outubro de valores acima de 350 UD em meados da década de 70, para valores aproximados de 100 UD e que os perfis verticais de ozônio obtidos por balões mostraram que a diminuição ocorre entre 10 e 20 km de altura, causando surpresa por sua magnitude e localização, uma vez que, de acordo com a química do cloro, o esperado era a diminuição do ozônio se manifestar em médias e baixas latitudes e a uma altura entre 35 e 45 km.

Em um estudo similar efetuado um ano antes na estação antártica japonesa, o pesquisador japonês S. Chubachi encontrou resultados semelhantes aos de Farman et al. (1985). Entretanto, seus resultados ficaram restritos à comunidade científica do Japão devido ao meio de divulgação (Chubachi, 1984).

Porém, os dados do instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) e SBUV (Solar Backscattered Ultraviolet) a bordo do satélite Nimbus 7, aparentemente não estavam detectando tal diminuição vista nos dados coletados em solo, o que acabou com uma inspeção nos dados de satélite que estavam de fato sendo rejeitados por estarem fora de um intervalo previamente estabelecido. Uma vez descoberta e corrigida esta falha, os dados de satélite confirmaram as medidas de solo da estação britânica (Stolarski, 1986).

Observações feitas em outros locais do continente Antártico confirmaram os resultados encontrados por Farman e Chubachi, como se pode ver na Figura 2.11, que mostra esta elevada diminuição no conteúdo de ozônio sobre todo o continente através de dados de sondagens feitas por balões (Komhyr, 1986) e outros métodos independentes como o uso do

infravermelho (Farmer, 1987) e espectroscopia do visível (Mount, 1987) em observações da coluna total de ozônio (Solomon, 1999).

Perfil Vertical de Ozônio

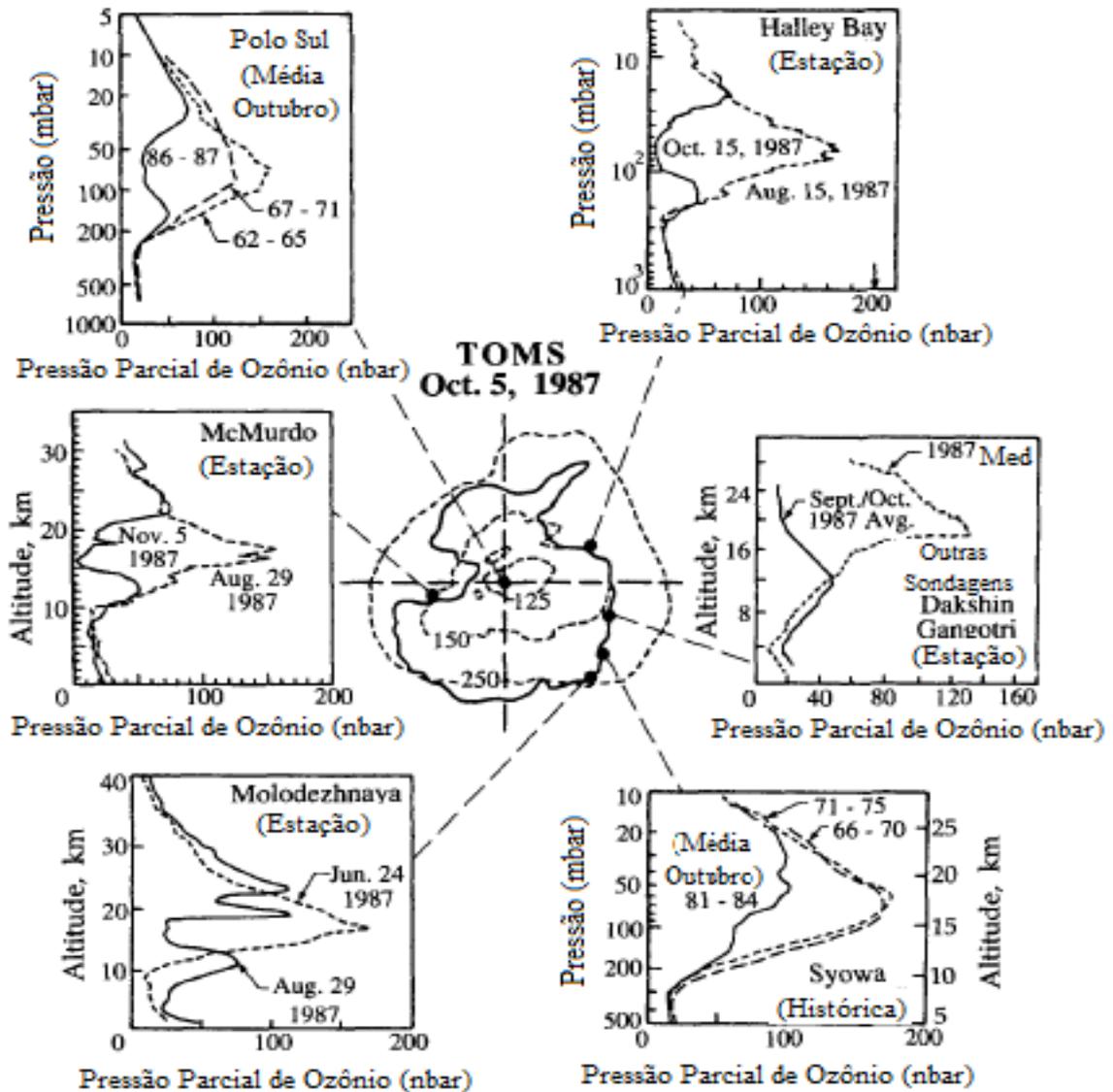


Figura 2.11 – Perfis médios de ozônio para outubro em diversas estações da Antártica. Fonte: Seinfeld e Pandis, 2006, pg. 171.

O “Buraco Ozônio” foi definido como a região com valores inferiores a dois terços do nível histórico, ou seja, 220 UD (Hofmann, 1997).

Posteriormente, observações similares feitas na Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz mostraram semelhante redução no conteúdo de ozônio observada em outras estações no continente antártico (Kirchhoff, 1995), como observado na Figura 2.12.

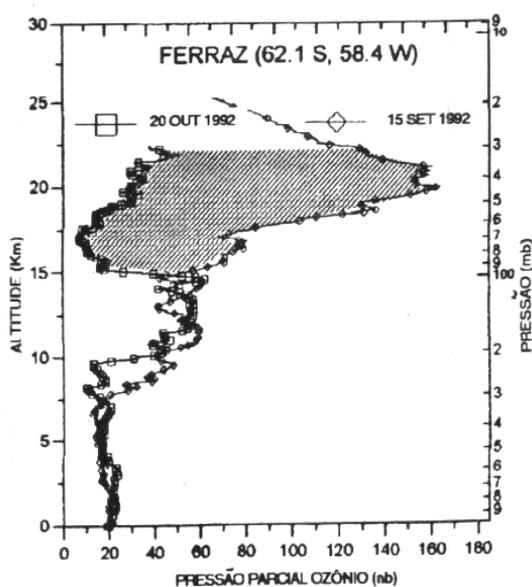


Figura 2.12 – Perfil vertical de ozônio medido na Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz para os dias 15 de setembro e 20 de outubro de 1992. Fonte: Kirchhoff et al., 1995.

Os valores da área média do buraco de ozônio e mínimos diários da coluna de ozônio para o continente Antártico entre os anos de 1979 e 2011 são apresentados nas Figuras 2.13. Observa-se que a área do Buraco de Ozônio Antártico sofreu uma tendência de aumento entre as décadas de 80 e 90, estabilizando em valores elevados a partir dos anos 2000, mesmo comportamento encontrado para os mínimos valores médios diários, só que para uma tendência de diminuição nos valores.

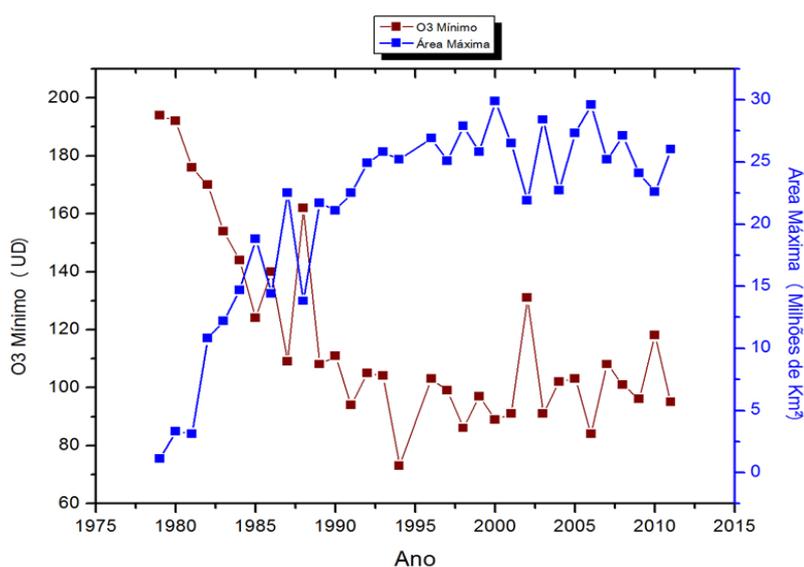


Figura 2.13 – Variação da área média do contorno de 220 UD sobre a Antártica e mínimos médios diários observados, de 1979 até 2011, sobre o Continente Antártico, em latitudes entre 60° e 90°S, obtidos com instrumentos TOMS e OMI de 1 de setembro a 30 de novembro de cada ano (Fonte: NASA Ozone Hole Watch, acessado em 2012).

O conflito de teorias relacionadas à existência do buraco de ozônio ligadas ao ciclo solar (Callis e Natarajan, 1986) e a pura dinâmica estratosférica (Tung et al., 1986; Mahlman e Fels, 1986) foi discutido por Solomon em 1988. Entretanto, estas teorias não eram consistentes com o observado, assim como os ciclos catalíticos dos CFCs (clorofluorcarbonos) em sua fase gasosa e o mecanismo envolvendo o dímero de ClO, o Cl_2O_2 (Molina et al., 1987) não poderia levar a tamanha queda na coluna de ozônio, sendo a melhor explicação proposta por Solomon (1986), que sugeriu que o cloro ativado na superfície das nuvens estratosféricas polares, observadas na Antártica devidos as baixas temperaturas (183 K), poderiam destruir o ozônio na baixa estratosfera polar em poucas semanas, chegando aos níveis observados (Solomon, 1999).

2.5.1 O Vórtice Polar

O primeiro passo na criação do buraco de ozônio é a formação do vórtice polar (Schoeberl e Hartman 1991). Com a chegada da noite polar durante o inverno, não há aquecimento por absorção de radiação solar, contudo a emissão da radiação terrestre continua, causando um resfriamento na baixa estratosfera da Antártica, como pode ser visto na Figura 2.14, que acoplado com as temperaturas relativamente mais quentes em médias latitudes causam a formação de um forte gradiente de pressão norte-sul entre estas regiões que acaba criando, por causa da força de coriolis, um forte vento zonal (Desler, 2000).

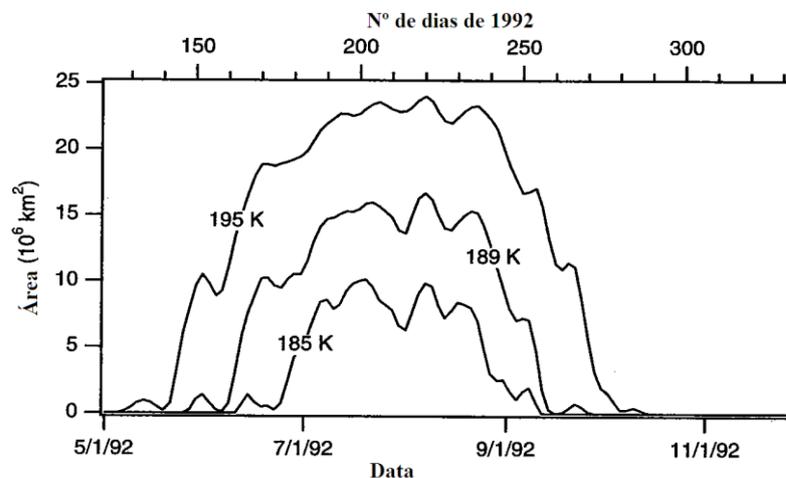


Figura 2.14 – Área coberta por temperaturas menores que 195, 189 e 185 K para 465 K de temperatura potencial (~20 Km) no hemisfério Sul. Fonte: Desler, 2000, pag 155.

A Figura 2.15 apresenta os contornos de velocidade do vento zonal, mostrando uma região de forte velocidade do vento próximo a 60°S, sendo esta região conhecida como o jato da noite polar, que se estende verticalmente a partir de 100 hPa, alcançando velocidade próxima de 100 m/s entre 30 e 35 km de altura.

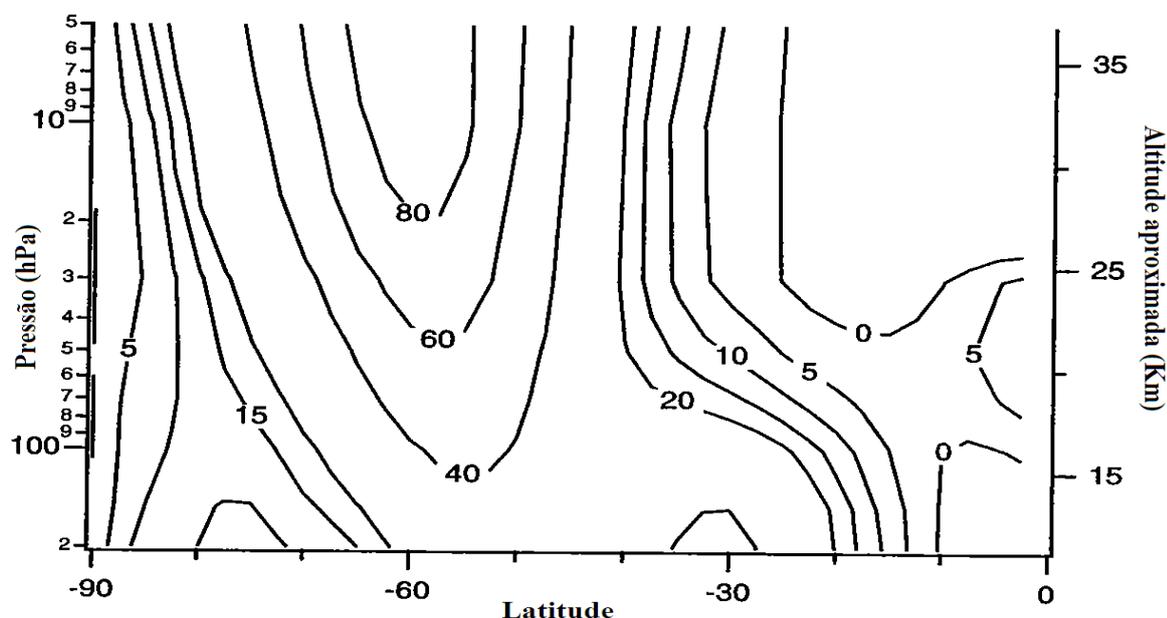


Figura 2.15 – Contornos de média zonal da velocidade do vento zonal (m/s) em 21 de agosto de 1995, valores positivos representam vento de oeste. Fonte: Adaptado de Desler, 2000, pag 156.

Análise científica do vórtice, usa a definição de um máximo gradiente na vorticidade potencial junto a sua borda (Nash et al., 1996), capturando os efeitos da isolamento da distribuição de gases traços dentro do vórtice.

Em 1992, o vórtice polar antártico cobriu uma área de aproximadamente 35 milhões de km², encobrindo praticamente toda área a sul de 60 °S. Entretanto, o mesmo sofre influência das condições meteorológicas na determinação de seu tamanho a cada ano, configurando uma entidade diferente do buraco de ozônio, tanto que entre 1980 e 1996, sua área de cobertura permaneceu constante, enquanto que a do buraco de ozônio experimentou um dramático aumento, como visto na Figura 2.13, chegando a cobrir dois terços do vórtice na década de 90.

O vórtice polar apresenta duas importantes propriedades que influenciam na formação do buraco de ozônio. A primeira é devido às temperaturas frias no interior do vórtice que dão suporte a formação das nuvens estratosféricas polares, as quais apresentam um papel essencial na química do buraco de ozônio, como discutido no próximo item deste capítulo.

A segunda propriedade é a formação de uma barreira de mistura na borda do vórtice polar que isola a estratosfera da Antártica da estratosfera de médias latitudes entre 18 e 35 km de altura, como mostra a Figura 2.16 através de medidas de concentração de ozônio na superfície de 465 K de temperatura potencial, aproximadamente 20 km de altura (Schoeberl et al., 1992; Bowman, 1993).

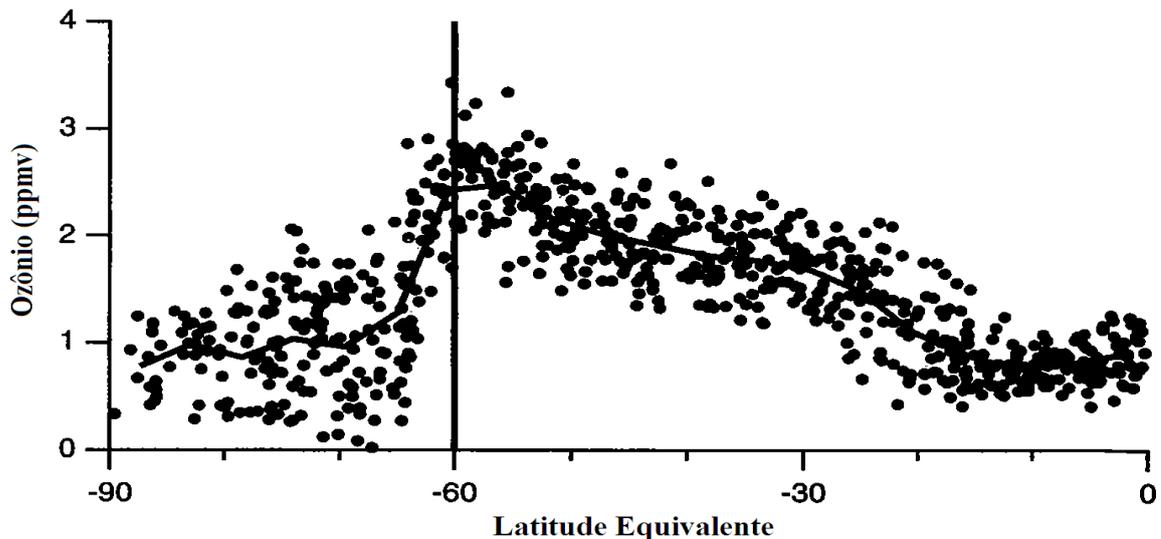


Figura 2.16 – Quantidade de ozônio (ppmv) versus latitude equivalente para a superfície de 465K de temperatura potencial em 15 de setembro de 1992. Pontos são medidas individuais e a linha a média. A linha vertical denota a borda do vórtice. Fonte: Desler, 2000, pag 157.

Esta barreira isola a massa de ar dentro do vórtice, o que é de fundamental importância na formação e manutenção do buraco de ozônio, tornando negligenciável o transporte horizontal para dentro do vórtice polar de constituintes traços como ozônio e CFCs.

A maior estabilidade do vórtice Antártico é resultado da distribuição quase simétrica do oceano a sua volta. O vórtice menos estável do Ártico tende a misturar mais com o ar dos arredores e não mantém a isolamento e as baixas temperaturas do pólo Sul.

Com o retorno da luz solar no fim do inverno, começa o aquecimento do vórtice polar que reduz o gradiente latitudinal de pressão, reduzindo a velocidade do vento no entorno do vórtice, reduzindo a estabilidade e isolamento do vórtice. O sistema de vento sofre uma abrupta transição para o regime de vento de verão num evento chamado de aquecimento estratosférico final (Manney et al., 1994; Hess, 1991) que ocorre tipicamente ao final de novembro para dezembro, dependendo da latitude, o que acaba quebrando o vórtice em massas de ar menores, as quais misturam-se com ar de médias latitudes, marcando o fim do buraco de ozônio para aquele ano.

2.5.2 Nuvens Estratosféricas Polares

A presença das Nuvens Estratosféricas Polares (NEPs) sobre o Pólo Sul é documentada desde as primeiras expedições feitas a esta região, porém esta denominação surgiu com McCormick em 1982, que primeiramente apresentou observações de satélite de nuvens de alta altitude na estratosfera do Ártico e da Antártica (Solomon, 1999).

Para as temperaturas muito frias, em torno de 183 K (-90°C), encontradas dentro do vórtice polar a uma altitude de 15 a 20 km, a pequena quantidade de vapor d'água e ácido nítrico condensam formando as NEPs. Porém, a exata temperatura de formação depende da pressão e da abundância dos constituintes traços, sendo uma condição típica a temperatura de 196 K, válida para aproximadamente 20 km de altura (Desler, 2000).

Devido à necessidade de baixas temperaturas, as NEPs se formam apenas durante o inverno e início da primavera nas regiões polares, a partir da tropopausa até altas altitudes como aproximadamente 26 km, sendo seu aparecimento mais freqüente na Antártica que no Ártico, devido as suas temperaturas menores conforme se observa na Figura 2.17.

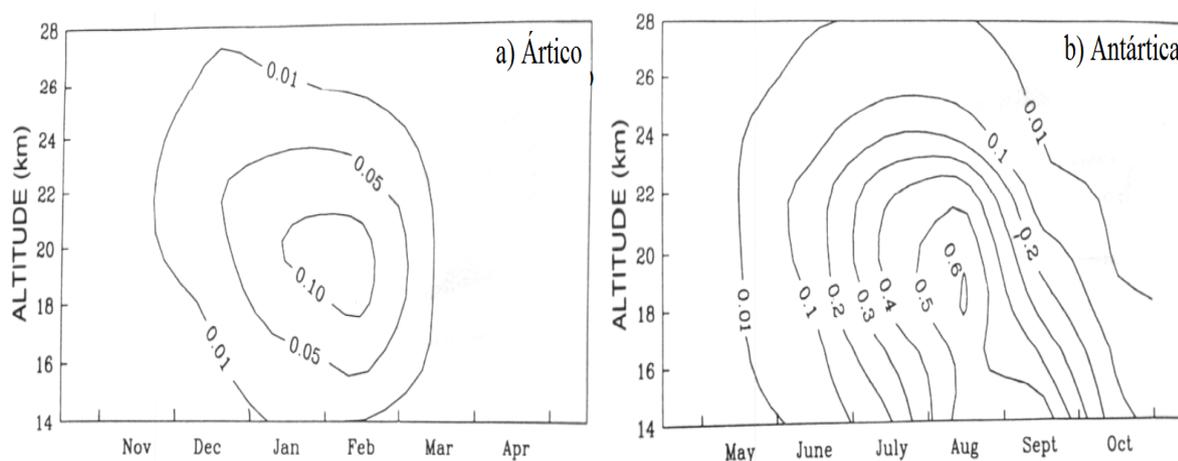


Figura 2.17 – Freqüência relativa de aparecimento das NEPs em observações de satélites SAM II, função da altura e do mês, sobre (a) Ártico e (b) Antártica. Fonte: Adaptado de Salby, 1996.

As NEPs são classificadas em dois tipos, Tipo I e Tipo II, sendo o Tipo I subdividido em Tipo Ia e Tipo Ib, mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classes das Nuvens Estratosféricas Polares. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1998, pg 193.

Classificação	Composição	Estrutura	Temperatura Aproximada de Formação
Tipo I a	HNO ₃ · 3 H ₂ O (NAT)	Cristalino, Não Esférico	~190 – 195 K
Tipo I b	HNO ₃ /H ₂ SO ₄ /H ₂ O	Esférico, Líquido ^a	~190 – 195 K
Tipo II	H ₂ O Gelo	Cristalino, Não Esférico	~188 – 190 K

^aSolução ternária super resfriada.

As Nuvens do Tipo Ia são formadas por partículas cristalinas de ácido nítrico tri-hidratado (HNO₃·3H₂O), chamado de NAT, que se forma para temperaturas abaixo de 195 K, enquanto o Tipo Ib consiste de uma solução ternária super-resfriada de HNO₃/H₂SO₄/H₂O, também formada a mesma temperatura, tendo um raio típico entre 0,5 e 1 µm.

O Tipo II é formado a temperatura abaixo de 190 K, por partículas não esféricas de gelo cristalizado, com raio característico entre 5 e 20 µm (Toon, 1990).

Solomon, em 1986, sugeriu que as espécies reservatório como o HCl e o ClONO₂ poderiam reagir na superfície das NEPs, acelerando a diminuição do ozônio na baixa estratosfera da Antártida, uma vez que estas reações heterogêneas liberam o cloro reativo que posteriormente pode ser ativado rapidamente por fotólise.

Primeiramente, o HCl gasoso é absorvido eficientemente pelas partículas das NEPs, congelando. Em seguida, ocorre a reação heterogênea entre o gás ClONO₂ e a partícula sólida da nuvem:



Onde (S) denota que a espécie está na fase sólida, na superfície do gelo.

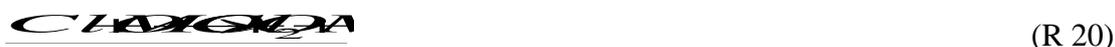
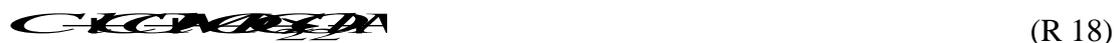
Esta reação libera cloro molecular (Cl₂) como gás e retém o ácido nítrico na partícula. Esta é a mais importante reação de ativação do cloro na estratosfera polar. Esta mesma reação se ocorresse em fase gasosa, seria extremamente lenta.

O Cl₂ gasoso liberado das NEPs pela reação (R 28) rapidamente fotolisa, produzindo átomos de cloro livre, enquanto o HNO₃ permanece no gelo das nuvens, levando à remoção global dos óxidos de nitrogênio da fase gasosa. Esta prisão do HNO₃ facilita a destruição do ozônio, removendo os NO_x do sistema, que deveriam reagir com o ClO formando a espécie reservatório ClONO₂.

Com a volta de luz solar no início da primavera austral, o cloro molecular se dissocia, liberando o átomo de cloro.



Um mecanismo de perda de ozônio altamente eficiente se segue:



A reação entre ClONO_2 e $\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ é muito lenta em fase gasosa e ocorre de forma mais rápida em fase sólida:



O HOCl gasoso pode fotolisar rapidamente liberando o átomo de cloro ou pode participar da seguinte reação heterogênea:



Se N_2O_5 está presente, outra reação heterogênea pode ocorrer reconvertendo HCl em cloro ativo:



O produto em fase gasosa ClNO_2 , o cloreto nitrílico, é rapidamente fotolisado em cloro ativo.

Esta cadeia de reações só é interrompida quando o átomo de cloro voltar à forma das espécies reservatório através da reação com o NO_2 .

Portanto, as baixas temperaturas são necessárias para formar o vórtice polar e as Nuvens Estratosféricas Polares que fornecem as superfícies para que as reações heterogêneas se realizem.

As espécies reservatório ClONO_2 e N_2O_5 reagem heterogeneamente com as nuvens nas quais o HCl foi absorvido, produzindo os gases Cl_2 , HOCl e ClNO_2 . A luz do Sol é então necessária para fotolisar o Cl_2 , HOCl e ClNO_2 , que são resultantes das reações heterogêneas, liberando o cloro reativo que ataca o ozônio.

No início, o ClO só acumula, visto que não tem O para reagir com ele. Entretanto, uma vez que a sua concentração é suficientemente grande, o ciclo catalítico ocorre. Desde que o NO_x esteja preso na forma de HNO_3 nas NEPs, o efeito moderador do NO_x , através da formação do ClONO_2 , está ausente. De fato, a massiva destruição de ozônio ocorrida requer uma baixíssima concentração de HNO_3 na fase gasosa. O processo que retira esse HNO_3 da fase gasosa é a formação das NEPs a temperaturas abaixo de 195 K.

Eventualmente, a massa polar aquece quebrando o vórtice polar e, pela absorção da luz solar, as NEPs evaporam, liberando o HNO_3 . O HNO_3 fotolisa e reage com o OH, liberando os NO_x em fase gasosa:



A reação do NO_2 com o ClO prende o cloro no composto reservatório ClONO_2 . Devido à importante contribuição para o aquecimento da estratosfera da molécula de ozônio, e devido aos baixos níveis de ozônio no Buraco, o aquecimento normal após inverno (na primavera) é atrasado, prolongando ainda mais a duração do Buraco de Ozônio.

No Ártico, o fenômeno ocorre com muito menos intensidade, pois sua temperatura é cerca de 10 K mais alta que a da Antártica. As nuvens são bem menos abundantes no Ártico e tendem a desaparecer antes que a radiação solar penetre na estratosfera. Além disso, o vórtice é menos estável, permitindo a entrada de massas de ar de outras regiões. Todos estes fatores combinados mantêm os níveis de ozônio no Ártico mais elevados que na Antártica (Chubachi et al., 2005; Tripathi et al., 2006; Solomon et al., 2007).

2.6 Dinâmica do Ozônio Atmosférico através da Vorticidade Potencial

A Vorticidade Potencial (PV) tem um importante papel traçador na dinâmica de massas de ar de grande escala, comportando-se como uma superfície material onde a temperatura potencial é conservada (Hoskins et al., 1985), podendo ser usada como coordenada horizontal (Norton et al., 1994). É frequentemente utilizada em estudos correlacionando PV e constituintes químicos traços como o ozônio, óxido nitroso e vapor d'água (Schoeberl, 1989) sobre superfícies isentrópicas na baixa estratosfera, como apontado primeiramente por Danielsen em 1968 (Lary et al., 1995).

Holton et al. (1995) estudou as Trocas entre a Troposfera e a Estratosfera (TTE) de constituintes traços através de PV em superfícies isentrópicas e relacionou estes eventos a padrões troposféricos, como ciclones desprendidos, frontogenese e eventos de quebra de tropopausa, como mostrados na Figura 2.18, em regiões onde há intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera. Novas perspectivas sobre este assunto foram discutidas

posteriormente por Stohl et al. (2003) e Jing et al. (2005) que estimou o fluxo vertical de ozônio que cruza a tropopausa isentropicamente.

O domínio da borda do vórtice polar e seus filamentos polares foram definidos como sendo a região de forte gradiente de PV, onde massas de ar com PV menor que o valor limiar da borda de fora são consideradas como inclusas dentro do vórtice, guardando suas diferentes características químicas e sendo o centro do vórtice definido como a região de mínimo de PV, ou Máximo de Vorticidade Potencial Absoluta (PVA) (Marchand et al., 2005).

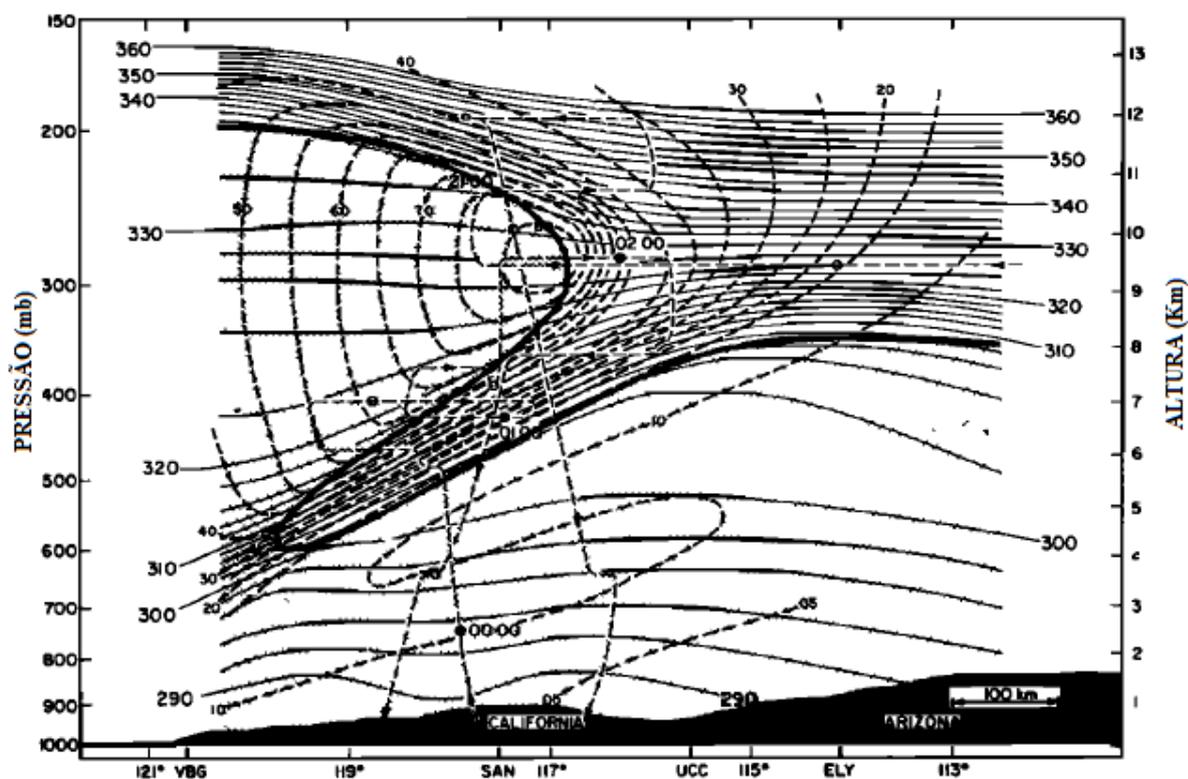


Figura 2.18 – Corte vertical do evento de quebra de tropopausa do dia 13 de março de 1978. Fonte: Holton et al., 1995.

A temperatura potencial de uma parcela de ar é definida como a temperatura que a parcela teria se fosse expandida ou comprimida adiabaticamente de seu estado real de pressão e temperatura para uma pressão padrão (geralmente 1000 mb). Pode-se obter uma expressão a partir da Primeira Lei da Termodinâmica e da Lei dos Gases Ideais (Rogers e Yau, 1989):

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (\text{R } 39)$$

A temperatura potencial pode ser interpretada como uma marca da posição vertical de uma parcela de ar. Esta variável aumenta com a altura lentamente na troposfera e

rapidamente na estratosfera. O ar estratosférico tende a se manter em superfícies isentrópicas por muitos dias, pois a temperatura potencial é grande em altas altitudes dificultando o movimento do ar para cima ou para baixo.

A vorticidade é uma grandeza que indica o grau de rotação de um fluido e, matematicamente, é um campo vetorial definido como o rotacional da velocidade. O módulo da componente vertical da vorticidade é um importante traçador dinâmico, pois carrega informações sobre o comportamento das coordenadas horizontais da velocidade.

A **Vorticidade Potencial (PV)** é uma extensão do conceito de vorticidade para superfícies de temperatura potencial constante. Esta grandeza é definida de modo que, nas superfícies isentrópicas, essa quantidade conserva-se. Matematicamente, tem-se que a vorticidade potencial é definida como o produto entre duas grandezas, uma identificando o grau de rotação do fluido e outra a estratificação das camadas:

$$PV = \zeta_{\theta} + f \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (\text{R } 40)$$

Onde ζ_{θ} é a vorticidade relativa em superfícies isentrópicas, f é a vorticidade planetária, $(\zeta_{\theta} + f)$ é a vorticidade absoluta em superfícies isentrópicas e $(d\theta/dp)$ é a medida (Índice) da estabilidade da atmosfera.

A partir da equação (R 40) pode-se ver que a grandeza PV pode ser estimada apenas através do conhecimento das componentes horizontais da velocidade do vento (u e v) e de como varia a temperatura potencial nos diferentes níveis verticais de pressão. Dessa forma, a evolução de PV em uma superfície isentrópica pode ser usada como uma substituta para o estudo do transporte de constituintes traços, em superfícies isentrópicas (Holton, 2004).

A variação da Vorticidade Potencial em superfície isentrópica pode ser aplicada ao transporte horizontal de ozônio na estratosfera, mostrando que a origem tropical ou polar das massas de ar pobre em ozônio pode ser identificada, respectivamente, por baixos e altos valores de Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) (Bencherife et al., 2003; Semane et al., 2006; Bencherif et al., 2011; Pinheiro et al., 2011).

2.7 Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico

Em seu efeito primário, o Buraco de Ozônio Antártico, durante a primavera austral, influencia o conteúdo de ozônio da região polar, onde se observam quedas superiores a 25 % em relação à média climatológica da região, ou seja, valores inferiores a 220 UD (Hofmann et al., 1997). Devido a sua extrema importância, este fenômeno segue sendo estudado e monitorado desde a década de 80 (Hofmann et al., 1997; Solomon, 1999; Muller et al., 2008; McElroy e Fogal, 2008; Klekociuk et al., 2011; Hassler et al., 2011; Salby et al., 2012; Scannell et al., 2012).

As regiões de médias e baixas latitudes podem sofrer influência direta ou indireta do Buraco de Ozônio. A influência direta ocorre quando a borda do vórtice polar, juntamente com o Buraco de Ozônio em si, passa diretamente sobre regiões de médias latitudes, como sobre o Sul do Chile e da Argentina, que são regiões povoadas, causando drásticas reduções do conteúdo de ozônio e respectivo aumento na radiação ultravioleta que alcança a superfície (Larry et al., 1995; Kirchhoff et al., 1997; Perez et al., 1998; Marchand et al., 2003; Marchand et al., 2005; Pazmino et al., 2005; 2008; Casiccia et al., 2008; De Laat et al., 2010).

A influência indireta ocorre quando o vórtice polar se desestabiliza, com a chegada da primavera, devido ao aumento das temperaturas e aumento da atividade de onda planetária ocasionados por eventos de quebra da onda de Rossby (Norton, 1994; Semane et al., 2006; Shepherd, 2007), quando o vórtice polar se desestabiliza, com a chegada da primavera, devido ao aumento das temperaturas e aumento da atividade de onda planetária ocasionados por eventos de quebra da onda de Rossby (Norton, 1994; Semane et al., 2006; Shepherd, 2007) Cálculos de Prather e Jaffe (1990) indicam que massas de ar da Antártica podem permanecer isoladas por um período de 7 a 20 dias depois da sua separação do vórtice, período que pode ser suficiente para propagação para médias e baixas latitudes (Waugh, 1993; Waugh et al., 1994; Manney et al., 1994; Garny et al., 2007).

A passagem de massas de ar originárias do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil foi primeiramente observada por Kirchhoff et al. (1996), a partir de dados de dois espectrofotômetros Brewer, instalados em Santa Maria, em outubro de 1993, e de sondas lançadas através de balões, sendo observado que a redução local de ozônio estava associada à entrada de uma massa de ar de origem polar, como visto na Figura 2.19. Este tipo de fenômeno foi denominado como eventos de Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico.

Este tipo de fenômeno foi observado sobre outras regiões da América do Sul (Perez e Jaque, 1998; Perez et al., 2000), Sul do Continente Africano (Semane et al., 2006; Sivakumar et al., 2007) e Nova Zelândia (Brinksma et al., 1998), mostrando seu caráter global de ocorrência.

O estudo feito por Pinheiro et al. (2011) identificou a ocorrência de seis eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre os anos de 2008 e 2009, com queda média de $9,7 \pm 3,3 \%$ em relação a suas respectivas médias mensais climatológicas.

Neste estudo, considerou-se que houve ocorrência do fenômeno quando o valor da coluna total de ozônio fosse menor que o valor da média climatológica do mês, menos 1,5 do desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$), além de um aumento na vorticidade potencial absoluta no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, indicando a origem polar da massa de ar pobre em ozônio, as quais foram confirmadas por trajetórias retroativas confeccionadas pelo modelo HYSPLIT da NOAA e pelas imagens do conteúdo de ozônio do instrumento OMI.

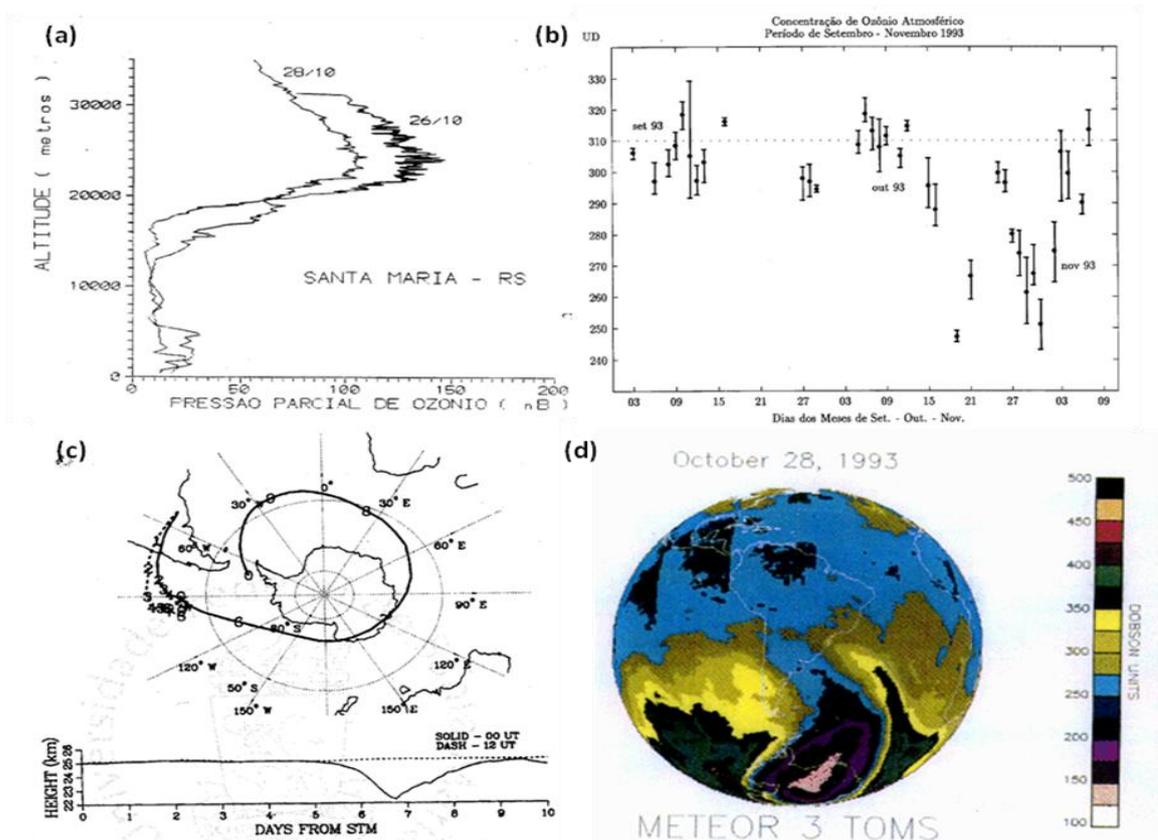


Figura 2.19 – Perfil vertical de ozônio para os dias 26 e 28 de outubro (a) e dados da coluna total de Ozônio coletados pelo Espectrofotômetro Brewer entre os meses de setembro e outubro de 1993 (b) para Santa Maria, RS, Brasil. Trajetória retroativa da massa de ar para 25 km de altura (c) e imagem do satélite METEOSAT 3 TOMS para o dia 28 de outubro de 1993. Fonte: Adaptado de Kirchhoff et al., 1996.

O monitoramento da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil torna-se importante, uma vez que, sobre esta região densamente povoada do planeta, foi observado por Guarnieri et al. (2004) que uma diminuição de 1% no conteúdo de ozônio pode causar um aumento médio de 1,2 % da radiação ultravioleta.

2.8 Circulação Troposférica e a Influência sobre o Ozônio Estratosférico

Inúmeros trabalhos científicos vêm relacionando a condição de circulação troposférica e sua influência sobre o ozônio estratosférico, sendo este tipo de estudo considerado como uma nova linha de pesquisa em ozônio (Ohring, 2010). Distúrbios em escala sinótica na estratosfera inferior de média para altas latitudes do Hemisfério Sul são associados a sistemas sinóticos troposféricos, os quais podem perturbar a estratosfera até o nível de pressão de 50 hPa (Canziani e Legnani, 2006). A ocorrência de eventos de bloqueio atmosférico na troposfera foi associada a uma anomalia negativa no conteúdo de ozônio de 90 UD sobre a região do Conesul da América do Sul (Canziani et al., 2002).

O fluxo trans-equatorial de ozônio da região do alto Tibet em direção ao Hemisfério Sul, durante um estudo de caso em agosto de 1998, ocorreu em conjunto com a amplificação de um anticiclone no Oceano Índico no Hemisfério Sul e intensificação de um cavado no Sul da Austrália, estabelecendo uma via de transporte de ar de regiões de mínimo ozônio da estratosfera tropical, em torno das bordas de anticiclones, para regiões de máximo ozônio sobre regiões de cavados amplificados subtropicais (Rogal et al., 2010).

O impacto da condição meteorológica sobre a coluna de ozônio em escala de tempo interanual foi estudado por Braesicke et al. (2008), sendo observado a relação entre a altura geopotencial no nível de 200 hPa e a variação no conteúdo de ozônio.

A formação do Buraco de Ozônio Antártico a cada ano causa um aumento da precipitação na região subtropical do Hemisfério Sul, uma vez que causa um deslocamento para sul da corrente de jato extratropical durante o verão austral (Feldstein, 2011), destacando assim a importância do conteúdo de ozônio das regiões polares no ciclo hidrológico das regiões subtropicais (Kang et al., 2011).

A coluna total de ozônio diminui de forma constante, antes e durante a formação de um ciclone, seguida por uma tendência de aumento após a dissipação do ciclone. Observa-se

também que, quando o ciclone atinge o seu pico de intensidade indicado pelo seu máximo de velocidade do vento, há uma queda súbita na coluna total de ozônio sobre as regiões onde o ciclone se intensificou (Midya et al., 2012).

O principal padrão de circulação troposférico correlacionado ao transporte de ozônio estratosférico é a corrente de jato, que desempenha importante papel na distribuição vertical de ozônio (Bukin et al., 2011) e atua diretamente nas trocas entre a troposfera e a estratosfera (Tang e Prather, 2010; Manney et al., 2011a; Trickl et al., 2011). A corrente de jato também está associadas às trocas no caso da troposfera para a estratosfera juntamente com a convecção tropical e sistemas pré frontais (De Bellevue et al., 2006) ou no caso do transporte ocorrer da estratosfera para a troposfera junto a ocorrência de ciclones extratropicais (Holton et al., 1995), baixas desprendidas (Ancellet et al. 1994), eventos de quebra da tropopausa associados a condição troposférica pós frontal (Sthol et al., 2003).

Aproveitando-se desta nova linha de estudo de ozônio, Peres et al. (2012) analisou o sistema sinótico de tempo associado ao evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos sobre o Sul do Brasil no dia 13 de outubro de 2010, sendo observada que a queda no conteúdo de ozônio associada ao transporte da massa de ar polar, ocorreu após a passagem de um sistema frontal, onde o deslocamento da região pós frontal da corrente de jato subtropical causou intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera e auxiliou no transporte da massa de ar estratosférica pobre em ozônio que atingiu o Sul do Brasil.

2.9 Sistemas Meteorológicos de Tempo que Atingem o Sul o Brasil

O Sul do Brasil, próximo a 30°S, é uma região de médias latitudes extratropical, com precipitação bem distribuída ao longo do ano (Rao e Hada, 1990) e com totais pluviométricos elevados entre 1050 e 1750 mm/ano (Reboita et al., 2010). Ao redor do planeta, essa região latitudinal (30° Norte e Sul) está sobre influência do ramo descendente da célula de Hadley e Ferrel, que inibe os movimentos verticais ascendentes (Wallace e Hobbs, 2006; Peixoto e Oort, 1992).

Os padrões atmosféricos que influenciam na condição de tempo sobre o Sul do Brasil tem grande variabilidade em relação às demais regiões do país, uma vez que sistemas meteorológicos transientes atuam sobre a região.

Os principais sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul sugeridos por Satyamurty, Nobre e Silva-Dias (1998) e Reboita et al. (2010) são apresentados na Figura 2.20.

Na baixa e alta troposfera pode-se identificar a atuação sobre o Sul do Brasil dos seguintes sistemas atmosféricos:

1. Ciclones extratropicais e Sistemas Frontais;
2. Nuvens Vírgula;
3. Linhas de Instabilidade Pré-Frontais;
3. Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs);
4. Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) Subtropicais;
5. Jatos de Baixos Níveis;
6. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul;
7. Bloqueios Atmosféricos;
8. Correntes de Jato Subtropical e Polar.

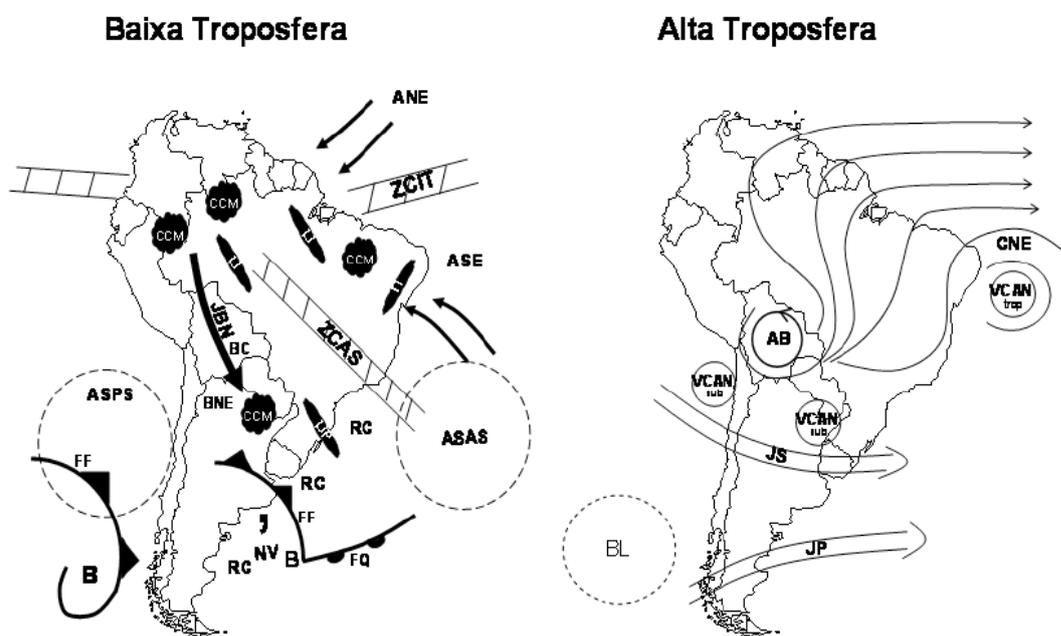


Figura 2.20 – Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul (adaptada de Satyamurty et al., 1998; pg. 125). Em relação à baixa troposfera tem-se: ANE ventos alísios de nordeste, ASE ventos alísios de sudeste, ASAS anticiclone subtropical do Atlântico Sul, ASPS anticiclone subtropical do Pacífico Sul, B baixa pressão, BC baixa do Chaco – região de baixas térmicas, BNE região de baixas térmicas no noroeste argentino, CCM complexo convectivo de mesoescala, FF frente fria, FQ frente quente, JBN jato de baixos níveis a leste dos Andes, LI linha de instabilidade tropical, LIP linha de instabilidade pré-frontal, NV nuvem vírgula, RC regiões ciclogênicas, ZCAS zona de convergência do Atlântico Sul e ZCIT zona de convergência intertropical. Já em relação à alta troposfera tem-se: AB alta da Bolívia, BL região de bloqueios atmosféricos, CNE cavado do nordeste do Brasil, JS jato subtropical, JP jato polar, VCAN sub vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais, VCAN trop vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais. Fonte Reboita et al. (2010), pg 199.

Um sistema frontal clássico, mostrado na Figura 2.21, é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície. As frentes são fronteiras entre duas massas de ar com características distintas, especialmente em termos de densidade, temperatura, umidade e pressão, que se estendem sobre milhares de quilômetros. Uma frente fria ou quente ocorre sempre entre dois centros de altas pressões, em um eixo em forma de cavado. A formação e o desenvolvimento de ciclones na atmosfera, denominados de ciclogênese, são estudados desde o século XIX, em razão da grande importância que tais sistemas assumem no transporte de calor, na umidade e na quantidade de movimento, além de mudanças no tempo nas regiões em que atuam.

Somente após o final da primeira Guerra Mundial, o primeiro modelo conceitual mais realístico de ciclones extratropicais foi descrito por Bjerknes (1919) e Bjerknes e Solberg (1922). Em médias latitudes, as frentes normalmente ocorrem como parte de grandes sistemas de tempestades, conhecidos como ciclones de latitudes médias ou ciclones extratropicais.

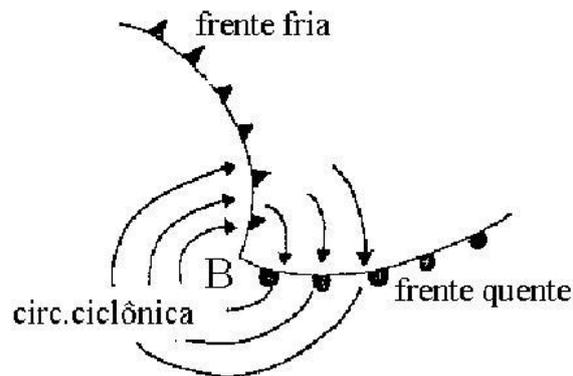


Figura 2.21 – Representação esquemática de um sistema frontal clássico. Fonte: Master IAG USP, 2004.

De acordo com o modelo clássico da Escola Norueguesa, as frentes podem ser classificadas como frente fria, quente, estacionária e oclusa.

A frente fria ocorre quando uma massa de ar frio avança em direção a uma massa de ar quente. A superfície formada inclina-se para o lado do ar frio, com a altura. As frentes frias normalmente são bem definidas no inverno pelo contraste de massas de ar, principalmente na baixa troposfera. Enquanto a frente fria está ainda distante, temperaturas quentes e céu claro predominam em sua vanguarda. Quando a frente fria passa por uma determinada região, o ar denso e frio toma o lugar do ar quente, que é forçado a subir rapidamente. Essa rápida subida do ar quente causa o aparecimento de nuvens cumuliformes, formando as linhas pré-frontais, que se desenvolvem justamente nas proximidades da linha frontal. Enquanto a frente está

ainda a uma distância de 10 a 50 km, muitas trovoadas podem se desenvolver nas linhas de instabilidade pré-frontal, trovoadas estas que podem ser acompanhadas por granizo, ventos de rajadas e intensa precipitação (Silva Dias, 1987). Após a passagem da frente fria, as temperaturas diminuem e o céu geralmente começa a clarear ou permanece com nebulosidade estratiforme e baixa, isso se deve a atuação do sistema de alta pressão pós frontal em superfície. Este sistema de alta pressão pós frontal é um centro de alta pressão que se desprende do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul quando da sua passagem pela cordilheira dos Andes e que acaba sendo englobado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul quando este alcança o oceano Atlântico em uma situação pós frontal sobre o Sul do Brasil.

A frequência média de ocorrência de sistemas frontais sobre o Sul do Brasil é de quatro eventos por mês entre os meses de abril a dezembro (Lemos e Calbete, 1996; Britto e Saraiva, 2001).

Uma frente quente ocorre quando uma massa de ar quente tenta tomar o lugar de uma massa de ar mais frio. Quando uma frente quente se aproxima, o ar aquecido entra em contato com o ar mais frio e denso e começa a subir, formando uma rampa pouco inclinada. Longe e adiante da frente, as nuvens cirros normalmente aparecem. Como a rampa não é muito inclinada, as nuvens possuem pouco desenvolvimento vertical, com seus topos mais baixos do que os da frente fria. Quando a frente passa por uma determinada região, ela normalmente é acompanhada de uma precipitação leve e contínua de chuva ou chuvisco. A frente quente normalmente é causada na América do Sul pelo retorno de uma frente fria que, em uma situação de bloqueio atmosférico, não consegue avançar.

Uma vez que uma frente fria normalmente se move mais rápido do que uma frente quente, parte de uma frente fria pode se encontrar com uma frente quente e criar uma frente oclusa. Na frente oclusa, a frente fria pode erguer a frente quente e deslocá-la.

Outro tipo de sistema frontal é a frente estacionária. A orografia ou um específico padrão de tempo, como um bloqueio atmosférico (Marques e Rao, 1999; 2000; Nascimento e Ambrizzi, 2002), podem causar o retardamento de uma frente fria ou quente e torná-la estacionária. Isso normalmente ocorre quando os ventos dos níveis superiores começam a soprar paralelamente à frente. quando uma frente se encontra em tal situação, seu deslocamento é mínimo por algum tempo, podendo chegar a três ou mais dias.

O transporte de umidade da região tropical para o Sul do Brasil se dá através do Jato de Baixos Níveis (JBN), fluxo de norte abaixo do nível de 700hPa (Means, 1952; 1954) que se forma a leste dos Andes e transporta calor e umidade da região amazônica para o sudeste

da América do Sul, sendo adisponibilização da umidade transportada importante para esses sistemas, favorecendo as ciclogêneses (Reboita, 2008).

Os jatos de baixos níveis são classificados como um movimento de escala meso- β , com características espaciais entre 20 e 200 km (largura) ou até mais de 500 km de comprimento (Marengo e Soares, 2002), que ocorrem dentro dos dois primeiros quilômetros da atmosfera, associados a uma forte oscilação diurna do vento na camada limite planetária (Wu e Raman, 1997).

Os ciclones em superfície também podem estar associados aos VCANs. Campetella e Possia (2006) e Reboita et al. (2009) mostram que o sudeste da AS (nordeste da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul) é a região de maior frequência destes sistemas quando considerada toda a AS e oceanos adjacentes. Miky Funatsu et al. (2004) e Iwabe e Da Rocha (2009) estudaram ciclones na costa do Uruguai e sul do Brasil que se formaram associados a tais sistemas.

Com relação aos sistemas com a forma de vírgula invertida no Hemisfério Sul (vírgula no Hemisfério Norte), estes correspondem aos vórtices ciclônicos de escala subsinótica (500-1000 km) formados em uma massa de ar frio, no lado polar da zona frontal e da corrente de jato, cuja nebulosidade associada é de origem convectiva (Businger e Reed, 1989).

Os bloqueios atmosféricos são outro tipo de sistemas que podem causar precipitações intensas ou estiagens, dependendo da sua localização. Quando um anticiclone permanece quase estacionário por um tempo, perturba a corrente zonal, impedindo a propagação dos sistemas para leste, com isso há uma bifurcação do escoamento zonal em dois ramos, que adquire componentes meridionais. Nesta situação, o anticiclone recebe o nome de anticiclone de bloqueio (Damião, 2007; Damião et al., 2008).

Quando os bloqueios estão localizados no Pacífico Sul, por exemplo, próximo a 32°S, ocorre o impedimento da passagem dos sistemas de tempo sobre o sul do Brasil. Entretanto, quando se localizam mais ao sul, como por exemplo, em torno de 60°S, o ramo do escoamento zonal norte faz com que os sistemas transientes passem sobre o Sul do Brasil promovendo precipitações elevadas (Nascimento e Ambrizzi, 2002).

Os SCM são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas, que apresentam área com contínua precipitação, pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva, possuindo formas variadas (Houze, 1993; Houze, 2004; Machado e Rossow, 1993; Machado et al., 1998). Podem ser classificados como: Linhas de Instabilidade (LI), os que possuem forma de linha; Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), os que apresentam um

formato circular ou simplesmente, SCM, os de formas irregulares, sendo que ambos os tipos ocorrem com frequência sobre o Sul do Brasil (Anabor et al., 2008).

A corrente de jato é definida como uma corrente de ar em forma de um estreito conduto, geralmente próximo da tropopausa, cujo eixo localiza-se ao longo de uma linha de velocidade máxima e de fortes cisalhamentos horizontais e verticais. O núcleo da corrente de jato é a linha ao longo da qual as velocidades do vento são máximas tanto na vertical quanto na horizontal.

Descoberta durante a Segunda Guerra Mundial, quando aviões bombardeiros sobrevoavam as Ilhas Japonesas, como apontado por Riehl (1969), a corrente de jato localiza-se entre 9.000 e 13.000 m de altitude e geralmente tem vários milhares de quilômetros de comprimento, centenas de quilômetros de largura e vários quilômetros de espessura. A velocidade do vento ao longo do eixo principal da corrente de jato é, no mínimo, de 140 km/h, podendo superar os 300 km/h.

Existem dois tipos de correntes de jato: o Jato Subtropical (JST) e o Jato Polar (JP). O JST é relativamente constante em sua posição em determinada estação do ano, e predomina nos campos médios sazonais do vento. Enquanto que, o JP é altamente variável em sua posição dia a dia sobre uma ampla faixa de latitudes médias e subtropicais. No Hemisfério Sul, o JST aparece geralmente acima dos 13.000 m, na faixa de latitude que vai de 20° a 40°S, e o JP encontra-se entre 8.000 e 10.000 m de altitude, oscilando entre 30°S e 70°S. O JST localiza-se aproximadamente sobre o paralelo 30°S e concentrado próximo aos 200 hPa. Por sua vez, o JP está ao sul do paralelo 50°S e concentrado em 250 hPa.

Essas correntes de jato são uma parte importante do sistema de troca de calor da Terra, uma vez que ajudam na transferência do superávit de energia dos trópicos em direção aos pólos e do excesso de frio das regiões polares em direção ao equador. As correntes de jato são também ingredientes chave na previsão de tempo. O jato polar marca frequentemente os limites entre o ar polar frio e o ar subtropical mais quente. O jato subtropical usualmente separa o ar subtropical mais frio do ar tropical ainda mais quente. Cada uma dessas regiões limites inclui um gradiente de temperatura significativa e uma grande quantidade de energia dinâmica, portanto as áreas que eles afetam frequentemente experimentam padrões de tempo bastante dinâmicos.

O JST tem sua posição média oscilando aproximadamente entre 30° e 35°S, ao passo que o JP apresenta uma posição média que oscila entre 55° e 35°S. Nota-se também que o JP mostra uma forte variabilidade, pois depende da posição dos sistemas frontais.

Durante o inverno, as frentes frias atingem latitudes mais baixas, como, por exemplo, o leste da região Nordeste. Durante o verão, o JP fica restrito as latitudes mais altas, tendo sua posição mais ao sul, próximo dos 45°S. O JST também pode atingir latitudes altas nesses casos, se fundindo em apenas um jato ao JP (Gallego et al., 2005), que está associado aos sistemas transientes (Hoskins e Hodges 2005).

Na vizinhança do núcleo da corrente de jato, é esperado um padrão de quatro células de divergência-convergência, mostrado na Figura 2.22 (a), chamado de circulação transversal, onde na região de entrada da corrente de jato, a componente ageostrófica é direcionada para menores valores de altura geopotencial, ocasionando divergência no primeiro quadrante e convergência no segundo, sendo chamada de circulação transversal direta (b), com ar quente subindo e ar frio descendo.

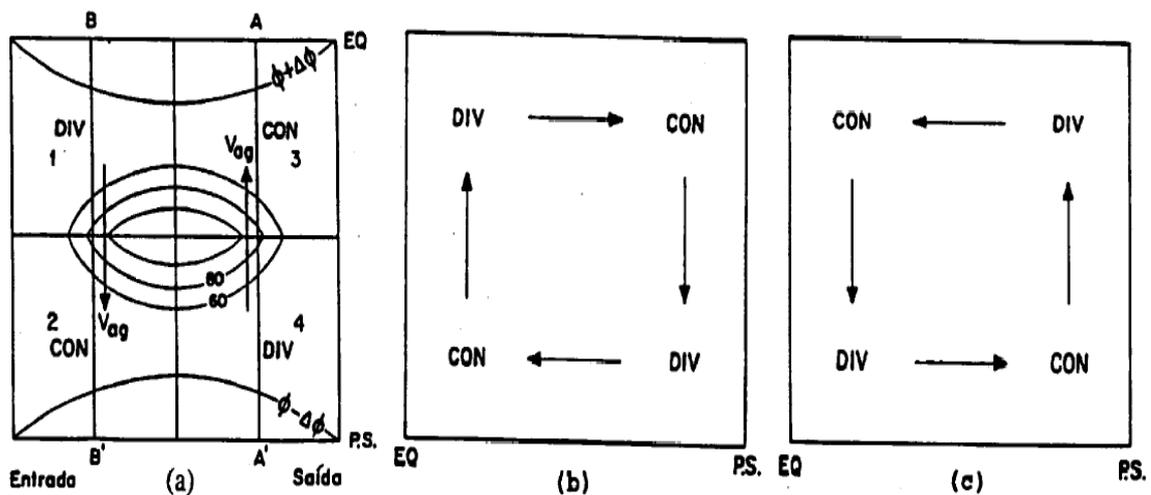


Figura 2.22 – (a) Padrão idealizado de movimento ageostrófico e divergência próximo a corrente de jato; (b) Circulação transversal direta; (c) Circulação transversal indireta. FONTE: Adaptado de Guedes (1985).

O contrário ocorre na saída da corrente de jato, onde se observa convergência no terceiro quadrante e divergência no quarto, sendo chamada de circulação transversal indireta (c), com ar quente descendo e ar frio subindo (Blackmon et al., 1977).

As áreas de divergência em altos níveis na entrada e saída da corrente de jato são responsáveis pelo desenvolvimento e intensificação da convecção nessas regiões, pois provocam movimento vertical ascendente, devido à convergência de massa em baixos níveis. As áreas de convergência em altos níveis na entrada e saída da corrente de jato são regiões de movimento vertical descendente, onde ocorrem os eventos de quebra da tropopausa, com intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera, inibindo a formação de nebulosidade significativa devido à divergência de massa em baixos níveis.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados Utilizados no Monitoramento do Conteúdo de Ozônio Sobre o Sul do Brasil

O monitoramento da coluna total de ozônio sobre o Sul do Brasil é realizado através dos dados da coluna total de ozônio obtido através dos Espectrofotômetros Brewer modelo MKIV #081 durante o período de 1992 – 2000, modelo MKII #056 de 2000 – 2002 e modelo MKIII #167 de 2002 até o momento, instalados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTI (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m), em São Martinho da Serra, Figura 3.1, a partir de um convênio entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTI). Neste estudo também são utilizados dados obtidos pelos instrumentos: Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), que esteve a bordo dos satélites Nimbus-7, Meteor-3 e Earth Probe da National Aeronautics and Space Agency (NASA); e Ozone Monitoring Instrument (OMI), o qual substituiu os dados do TOMS desde 2006, quando este saiu de operação. Este último equipamento está a bordo do satélite ERS-2, sendo uma contribuição do Programa Aeroespacial da Netherlands's Agency (NIVR) em colaboração com o Finnish Meteorological Institute (FMI) para a Missão Aura EOS. Ambos dados de satélites são coletados para a mesma localização do Observatório Espacial do Sul.

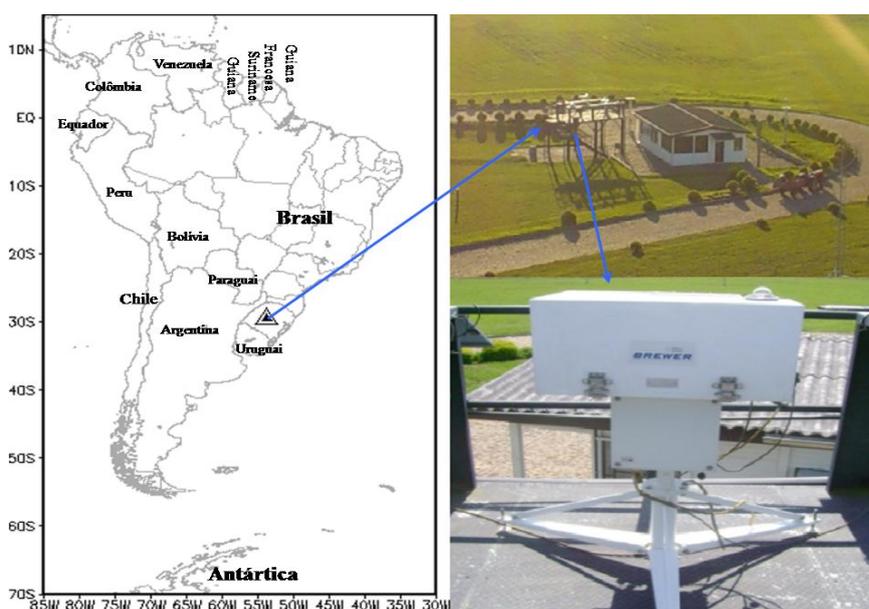


Figura 3.1: Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCTI em São Martinho da Serra (29,42°S, 53,87°O), Rio Grande do Sul, Brasil e o Espectrofotômetro Brewer #167.

O Espectrofotômetro Brewer é um instrumento instalado no solo, totalmente automatizado que efetua medidas da radiação solar global na banda de Ultravioleta do tipo B – UVB para isso cinco comprimentos de onda 306,3; 310,1; 313,5; 316,8; 320,1 nm, com resolução aproximada de 0,5 nm e permite a dedução da coluna total dos seguintes gases atmosféricos: ozônio (O_3), dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2), podendo também obter o perfil vertical de O_3 pela técnica de *Umkehr* e as quantidades de NO_2 estratosférico e troposférico pela técnica de *Twilight*. O instrumento Brewer #167, atualmente localizado no Observatório Espacial do Sul, pertence à rede Brasileira de Brewer, recebendo checagens e testes diários, semanais e mensais, além de ser bianualmente calibrado por comparação com o instrumento padrão de referência Brewer #017 pertencente à empresa International Ozone Services Inc., que presta os serviços de calibração na América do Sul, garantindo qualidade nos dados da coluna total de ozônio (WMO, 1996).

A aquisição dos dados de satélite para esta análise foi realizada através do Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), que foi um instrumento desenvolvido pela National Aeronautics and Space Agency (NASA) e mediu ozônio diariamente fornecendo mapas globais de alta resolução de ozônio total contido na atmosfera. Esse instrumento existiu de 1978 a 2005, iniciando suas medidas com o lançamento do satélite Nimbus-7, continuando de 1991 a 1994 a bordo do satélite Meteor-3 e desde 1996 a bordo do Earth Probe, parando de operar no final de 2005 devido a problemas de calibração.

O TOMS utiliza a técnica Backscatter Ultraviolet (BUV), um método de medida que determina ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre na direção do satélite. O TOMS faz amostragem da radiação UV retroespalhada em seis comprimentos de onda, que sofrem absorção diferencial pelo ozônio. Comparando essas medidas entre si com as medidas provenientes do Sol, o algoritmo do TOMS calcula a coluna total de ozônio (McPeters et al., 1996; Herman et al., 1996; MCPeters et al., 1998).

Os dados de ozônio do TOMS utilizados neste estudo são do algoritmo processado na versão 8, disponíveis no site da NASA (Bhartia e Wellemeyer, 2002).

No final do ano de 2005, o equipamento TOMS parou de realizar suas medidas, passando a ser disponibilizados no site da NASA dados do Ozone Monitoring Instrument (OMI). Este equipamento opera desde agosto de 2004 a bordo do satélite ERS-2. O equipamento mede outros componentes atmosféricos que o TOMS, como o conteúdo total de O_3 , NO_2 , SO_2 e aerossóis (ATBD-OMI-01, 2002).

Assim como o TOMS, o OMI realiza medidas pela técnica Backscatter Ultraviolet (BUV), com duas imagens alimentando a grade do espectrômetro. Tem duas faixas de ultravioleta: UV-1, 270 a 314 nm e UV-2 306 a 380 nm com resolução espectral de 1 – 0,45 nm.

A validação dos dados de satélite foi realizada através de comparação com os valores médios diários da coluna total de ozônio obtido pelos Espectrofotômetros Brewer, utilizando o método Direto ao Sol (DS) durante dias livres de nebulosidade. Foram usadas as medidas *overpass* da coluna total de ozônio obtidas pelos satélites já mencionados, utilizando valores da média diária. Esta comparação tem a finalidade de possibilitar a sua utilização no preenchimento da série de dados obtida no Observatório Espacial do Sul pelos Espectrofotômetros Brewer.

A comparação entre os diferentes conjuntos de dados foi realizada separando os conjuntos de pares de dados da seguinte maneira:

Dataset #1: Nimbus7 – Brewer;

Dataset #2: Meteor3 – Brewer;

Dataset #3: Earth Prob – Brewer;

Dataset #4: Omi – Brewer;

O período de medidas do Brewer utilizado nesta análise se estendeu de junho de 1992 até junho de 2009. Para os pares de dados foram calculados os coeficientes estatísticos de regressão linear (*Slope and intercept*), o coeficiente de correlação (R^2), o erro raiz quadrado médio (RMSE). Além disso, foi calculado também o erro do ruído absoluto médio (MABE) e o erro do ruído médio (BEM) de maneira análoga a realizada por outros autores (Antón et al., 2009; 2010; Ialongo et al., 2008), sendo os dois últimos calculados da seguinte maneira:

$$MABE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Satellite_i - Brewer_i|}{Brewer_i} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Satellite_i - Brewer_i}{Brewer_i} \quad (2)$$

Onde N é o número de pares em cada conjunto.

Uma série de dados dos valores da média diária da coluna total de ozônio sobre o Sul do Brasil foi formada para o período completo entre 1979 e 2011 utilizando preferencialmente dados dos Espectrofotômetros Brewer que atuaram no Observatório Espacial do Sul entre os anos de 1992 até o momento.

Complementando a série de dados para o período entre 1979 e 1992 e preenchendo as discontinuidades devido a problemas mecânicos do equipamento ou aos dias nublados ou

com chuva, onde o espectrofotômetro não faz medidas válidas pelo método de DS (Direto ao Sol), foram usados dados da coluna total de ozônio, fornecidos pelo instrumento *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) e pelo instrumento *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), coletados para a mesma latitude do Observatório Espacial do Sul. Após a criação da série de dados, foi realizado o cálculo das médias mensais climatológicas e seus respectivos desvios padrão.

3.2 Identificações dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil

Os eventos de Influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil ocorridos entre 1979 e 2011 são identificados através da análise de quatro ingredientes (Pinheiro et al., 2011; 2012; Peres et al, 2012).

Primeiramente, é realizada uma análise da série de dados da coluna total de ozônio, verificando quedas temporárias extremas sobre a região do Observatório Espacial do Sul. Para os dias de queda na coluna total de ozônio, é realizada uma análise isentrópica de vorticidade potencial a fim de verificar a origem polar da massa de ar pobre em ozônio. Confirmando a origem polar da massa de ar pobre em ozônio, são analisadas as trajetórias retroativas das massas de ar pobre em ozônio através do modelo Hysplit da NOAA e realizada uma análise complementar através das imagens do conteúdo de ozônio dos satélites TOMS e OMI, verificando-se a atuação do Buraco de Ozônio Antártico e sua conexão com o Sul do Brasil. Os ingredientes em questão são apresentados a seguir.

3.2.1 Análise da Série de Dados da Coluna Total de Ozônio Para o Sul do Brasil

Utilizando a série de dados formada para o monitoramento do conteúdo de ozônio sobre o Sul do Brasil, foram escolhidos os eventos de mínimo na coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul, onde foram verificados todos os dias dos meses de agosto, setembro, outubro e novembro para o período entre 1979 e 2011.

O critério adotado para a escolha dos dias de queda no conteúdo ozônio foi o de que o valor médio diário da coluna total de ozônio fosse menor que o valor da média climatológica do mês menos 1,5 do seu respectivo desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$), o que significa dizer que, se os dados fossem colocados em uma Distribuição Normal de Frequência, trabalhar-se-ia com os valores mínimos extremos, representando 6,67% do total dos dias e as variações em torno de 5% da média climatológica mensal (Wilks, 2006), conforme mostrado na Figura 3.2 (a).

Observando a frequência de ocorrência dos dados da média diária da coluna total de ozônio coletados no Observatório Espacial do Sul no período entre 1979 e 2011, verifica-se que estes se distribuem próximos a uma distribuição normal de frequência, com leve desvio para valores menores que a média climatológica, conforme a Figura 3.2 (b), possibilitando a utilização do critério comentado acima.

Este critério estatístico foi escolhido após inúmeros testes, onde se percebeu que a utilização do limite de média menos 1 desvio padrão ($\mu - 1\sigma$) ou média menos 2 desvio padrão ($\mu - 2\sigma$) não deveriam ser utilizados para latitudes próximas a 30°S , uma vez que no primeiro caso as diferenças em torno da média ficam em torno de 3%, valor facilmente atingido por variações exclusivas do ozônio troposférico e, no segundo caso, as variações ficam em torno de 7% da média, excluindo diversos eventos de comprovada influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o conteúdo de ozônio do Sul do Brasil.

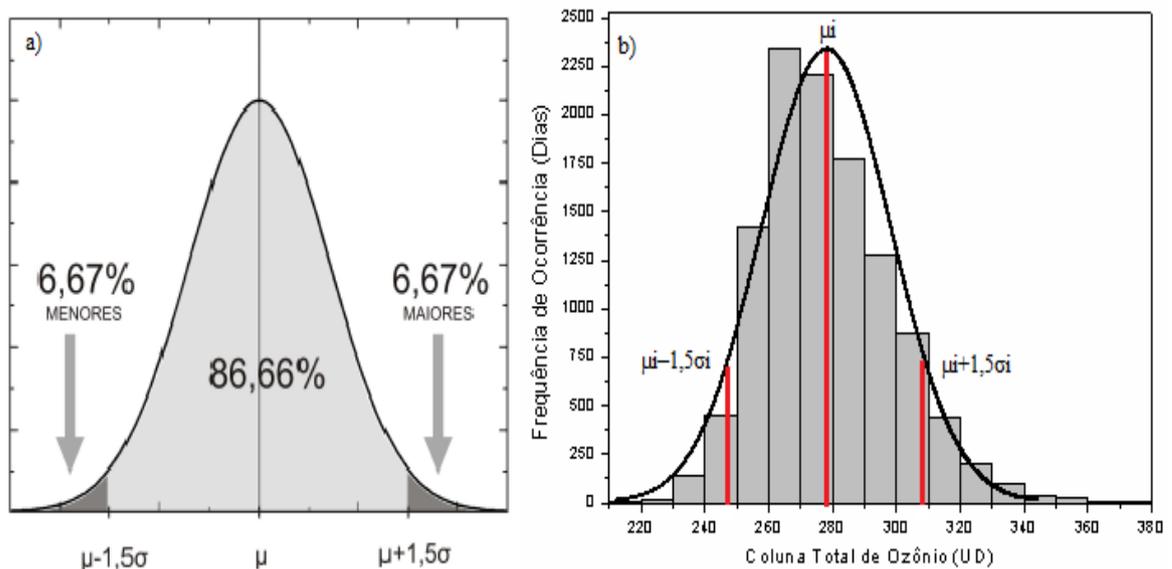


Figura 3.2: (a) Distribuição normal padrão salientando a aplicação do filtro $\mu - 1,5\sigma$. Fonte: Caetano 2008. (b) Distribuição de frequência de ocorrência dos dados da coluna total de ozônio coletados no Observatório Espacial do Sul entre 1979 e 2011. Linha preta representa o ajuste dos dados a uma distribuição normal de frequência e as linhas vermelhas salientam a média e a aplicação do filtro $\mu \pm 1,5\sigma$.

3.2.2 Análise Isentrópica de Vorticidade Potencial das Massas de Ar

A evolução de PV em superfície isentrópica pode ser usada como uma substituta para o estudo do transporte de constituintes traços como o ozônio (Hoskins et al. 1985, Lary et al. 1995; Holton 1995; Rao et al. 2003; Liniger and Davies 2004; Jing et al. 2005), em estudos originalmente realizados por Danielsen (1968).

A presente análise tem a finalidade de verificar se houve variação na Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) dos dias anteriores para o dia em questão, dando indícios da origem polar da massa de ar pelo aumento na VPA, ou origem equatorial da massa de ar pela diminuição nos valores de VPA (Bencherif et al., 2003; Semane et al., 2006; Pinheiro et al., 2011; Bencherif et al., 2011; Pinheiro et al., 2012; Peres et al., 2012).

Para os dias em que o valor da coluna total de ozônio ficou abaixo do valor limite de 1,5 desvio padrão, foi realizada a análise isentrópica, que consiste na confecção de mapas de Vorticidade Potencial em superfícies isentrópicas, para os níveis de 620, 630 e 640 K de temperatura potencial, representando as alturas de 24, 26 e 28 km respectivamente.

Para confecção dos vapas de Vorticidade Potencial, são usados os parâmetros diários das componentes meridional (v-wind) e zonal (u-wind) do vento e de temperatura para os níveis de pressão 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 mbar, fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction/National Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), dados de reanálises disponíveis em <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml> (Kalnay et al., 1996). Estes mapas de VP são gerados no software de domínio público GrADS (Grid Analysis and Display System), onde é verificado se houve aumento na Vorticidade Potencial Absoluta dos dias anteriores para o dia em questão, dando indícios da origem polar da massa de ar pobre em ozônio.

3.2.3 Confirmação da Origem das Massas de Ar

A confirmação da origem das massas de se dá a partir da confecção das trajetórias retroativas das massas de ar através do modelo HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), desenvolvido através do esforço conjunto entre a National

Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e *Australia's Bureau of Meteorology*, disponível em <http://www.arl.noaa.gov/ready/open/traj.html>, o qual pode ser rodado interativamente na web (Gupta et. al., 2007), sendo utilizado os dados de reanálise do NCEP/NCAR, disponibilizado pelo próprio modelo. Este programa serve como uma confirmação para a análise isentrópica, complementando a visualização da origem das massas de ar realizada para seis dias anteriores à ocorrência do evento para as alturas de 20, 24 e 28 km de altura, verificando se ela passou pela região polar.

3.2.4 Análise das Imagens do Conteúdo de Ozônio dos satélites TOMS e OMI

Outra análise complementar é feita através da observação das imagens de conteúdo de ozônio dos instrumentos de satélite TOMS e OMI da NASA, disponíveis em <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>, para os referidos dias de queda na coluna de ozônio sobre o Sul do Brasil, verificando a existência de conexão entre a região do Buraco de Ozônio Antártico e o Sul do Brasil, através da ejeção de massas de ar pobre em ozônio para fora do vortice polar Antártico (Pinheiro et al., 2011; 2012; Peres et al., 2012).

3.3 Identificação do Padrão Médio de Circulação Estratosférica Durante a Ocorrência de Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico

A identificação dos padrões climatológicos de circulação estratosférica foi realizado através da obtenção dos campos médios de Vorticidade Potencial Absoluta (VPA) e vento para a altitude preferencial de chegada da massa de ar pobre em ozônio, para os dias de ocorrência de eventos de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil a partir dos dados fornecidos pelo NCEP/NCAR com a utilização do software GrADS.

O objetivo desta análise é salientar o padrão médio reinante de circulação estratosférica durante a ocorrência dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o sul do Brasil.

3.4 Análise dos Padrões de Circulação Troposféricos

Assim como mostrado em alguns trabalhos científicos, o conteúdo de ozônio estratosférico interage com os sistemas de circulação troposférica como principalmente a corrente de jato (Bukin et al., 2011; Manney et al., 2011a; Trickl et al., 2011), entre outras variáveis meteorológicas (Canziani et al., 2002; Canziani and Legnani, 2006; Braesicke et al., 2008; Rogal et al., 2010; Feldstein, 2011; Kang et al., 2011; Bracegirdle, 2011; Midya et al., 2012), sendo este tipo de estudo considerado como uma nova linha de pesquisa em ozônio (Ohring, 2010).

Entretanto, pouco se sabe sobre as condições de circulação troposférica durante a ocorrência de eventos de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil. Para preencher esta lacuna, foram realizados alguns estudos de caso, onde foi desenvolvida a análise dos campos troposféricos como pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa, corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste, e vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa, confeccionados também com o auxílio dos parâmetros diários fornecidos pela NCEP/NCAR através do software de GrADS. Além disso, imagens de satélite GOES 10 e 12 do infravermelho realçado, foram utilizadas para complementar a análise de padrões troposféricos.

No campo corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste, deve-se ter o cuidado de transformar o dado de velocidade vertical Omega, disponibilizado pela reanálise do NCEP/NCAR, na componente vertical da velocidade do vento. Além disso, deve-se realçar componente vertical da velocidade do vento através de um fator de correção de 10^2 , uma vez que em distúrbios de escala sinótica, este termo é duas ordens de grandeza menor que componente meridional do vento também plotado neste mapa. Este tipo de realce permite a visualização dos movimentos ascendentes e descendentes da atmosfera, tais como intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera.

A análise dos padrões de circulação troposférico tem por objetivo identificar os padrões em que os eventos de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil ocorrem (Peres et al., 2012), a fim de identificar alguma conexão entre a estratosfera e a troposfera durante a ocorrência deste tipo de evento e verificar se a condição de circulação próxima à tropopausa pode, de alguma maneira, auxiliar no transporte das massas de ar pobre em ozônio da região do buraco de ozônio em direção ao Sul do Brasil.

3.5 Utilização da Saída do Modelo GFS na Previsão da Chegada das Massas de Ar Pobre em Ozônio Sobre o Sul do Brasil

Aproveitando a estrutura operacional de previsão do tempo do Grupo de Modelagem Atmosférica (GRUMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), foi utilizada a saída da rodada operacional do modelo de previsão numérica de tempo Global Forecast System (GFS) para gerar os campos de Vorticidade Potencial e vento para o nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, através dos dados dos parâmetros diários das componentes meridional (v-wind) e zonal (u-wind) do vento e de temperatura para todos os níveis verticais atmosféricos disponíveis, com o intuito de prever a chegada de massas de ar pobre em ozônio oriundas do Buraco de Ozônio Antártico.

O modelo GFS é um modelo global de previsão do tempo que é rodado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e tem 64 níveis verticais e uma resolução horizontal de 1° X 1° de latitude e longitude. Seus campos de previsão são gerados para um intervalo máximo de 3 horas (ou seja, 03, 09, 12, 15, 18 e 24 UTC), iniciando as 00 UTC ou 12 UTC de cada dia (Yoo e Li, 2002). Sua documentação pode ser encontrada no endereço eletrônico: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/officenotes>.

Campos de Vorticidade Potencial e vento no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, utilizando a estrutura operacional do GRUMA e a saída do modelo GFS, já estão disponíveis operacionalmente para visualização do público em geral no seguinte endereço eletrônico: <http://www.gruma.ufsm.br/gruma/gdpdt/gdpdt.html#15>.

Posteriormente, caso sua eficiência seja comprovada, pode-se utilizar esta saída operacional do modelo e a estrutura do GRUMA para operacionalizar a previsão, com pelo menos quatro dias de antecedência da chegada das massas de ar pobre em ozônio oriundas da região do Buraco de Ozônio Antártico, prevendo assim a ocorrência de eventos futuros de “Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico” sobre o Sul do Brasil.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho são descritos seguindo a seguinte disposição:

- Monitoramento do conteúdo de ozônio sobre o Sul do Brasil.
- Análise dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011.
 - Análise de exemplos eventos característicos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil;
 - Evento do dia 18 de agosto de 1997;
 - Evento do dia 03 de setembro de 2009;
 - Evento do dia 07 de outubro de 2007;
 - Evento do dia 01 de novembro de 2008;
 - Estatística dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil.
- Padrão Médio de Circulação Estratosférica Durante a Ocorrência de Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil.
- Análise Sinótica Troposférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil.
 - Análise Sinótica Troposférica do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de Setembro de 2009;
 - Sistemas Sinóticos de Tempo Durante a Ocorrência do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do dia 13 de Outubro de 2010;
 - Transferência de energia sobre um vórtice quente da Corrente das Agulhas.
- Previsão e análise dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do ano de 2012.
 - Previsão e análise do evento de 14 de Setembro de 2012;
 - Análise do Evento de 14 de Outubro de 2012.

4.1 Monitoramento do Conteúdo de Ozônio sobre o Sul do Brasil

O monitoramento do conteúdo de ozônio sobre o Sul do Brasil foi realizado para o período entre 1979 e 2011, com dados médios diários da coluna total de ozônio obtidos pelos Espectrofotômetros Brewer, instalados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTI (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m), pelo instrumento TOMS a bordo dos satélites Nimbus-7, Meteor-3 e Earth Probe da National Aeronautics and Space Agency (NASA), e pelo Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo do satélite ERS-2.

Primeiramente, foi realizada uma comparação entre os dados do equipamento de solo e dos instrumentos de satélite. Os conjuntos de pares de dados foram separados e a análise de regressão linear para os conjuntos de pares de dados foi calculada, conforme a Figura 4.1.

A correlação entre o instrumento de satélite TOMS/Nimbus7 e o Brewer (Dataset #1) no período entre fevereiro de 1993 e maio de 1993 foi efetuada com 95 pares de dados (a). A correlação entre o instrumento TOMS/Meteor3 e o Brewer (Dataset #2) entre junho de 1992 e julho de 1994 foi calculada com 1665 pares de dados (b). Entre o instrumento TOMS/Earth Prob e o Brewer (Dataset #3), a correlação foi desenvolvida pelo período entre agosto de 1996 e dezembro de 2005, tendo 1862 pares de dados (c). Finalmente, a correlação entre o instrumento OMI e o Brewer (Dataset #4) foi calculada entre outubro de 2004 e junho de 2009, tendo 1019 pares de dados (d). A Tabela 4.1 apresenta o número de pares de dados de cada conjunto, parâmetros estatísticos obtidos pela análise de regressão linear como coeficiente angular (*slop*), coeficiente de correlação quadrático (R^2) e RMSE, além dos parâmetros BEM e MABE calculados para os quatro diferentes conjuntos de pares de dados.

Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos obtidos por análise de regressão linear entre os quatro diferentes conjuntos de dados de instrumentos de satélite e espectrofotômetro Brewer para dados da coluna total de ozônio sobre o Observatório Espacial do Sul.

	Dataset #1	Dataset #2	Dataset #3	Dataset #4
N	95	165	1862	1019
Slope	0.993 ± 0.003	0.983 ± 0.002	1.003 ± 0.001	0.990 ± 0.001
R^2	0.9991	0.9991	0.9992	0.9995
RMSE (%)	2.926	2.977	2.9146	2.134
MBE (%)	-0.51 ± 2.99	-1.62 ± 3.01	0.42 ± 2.90	-0.92 ± 2.16
MABE (%)	2.47 ± 1.78	2.87 ± 1.86	2.31 ± 1.80	1.86 ± 1.43

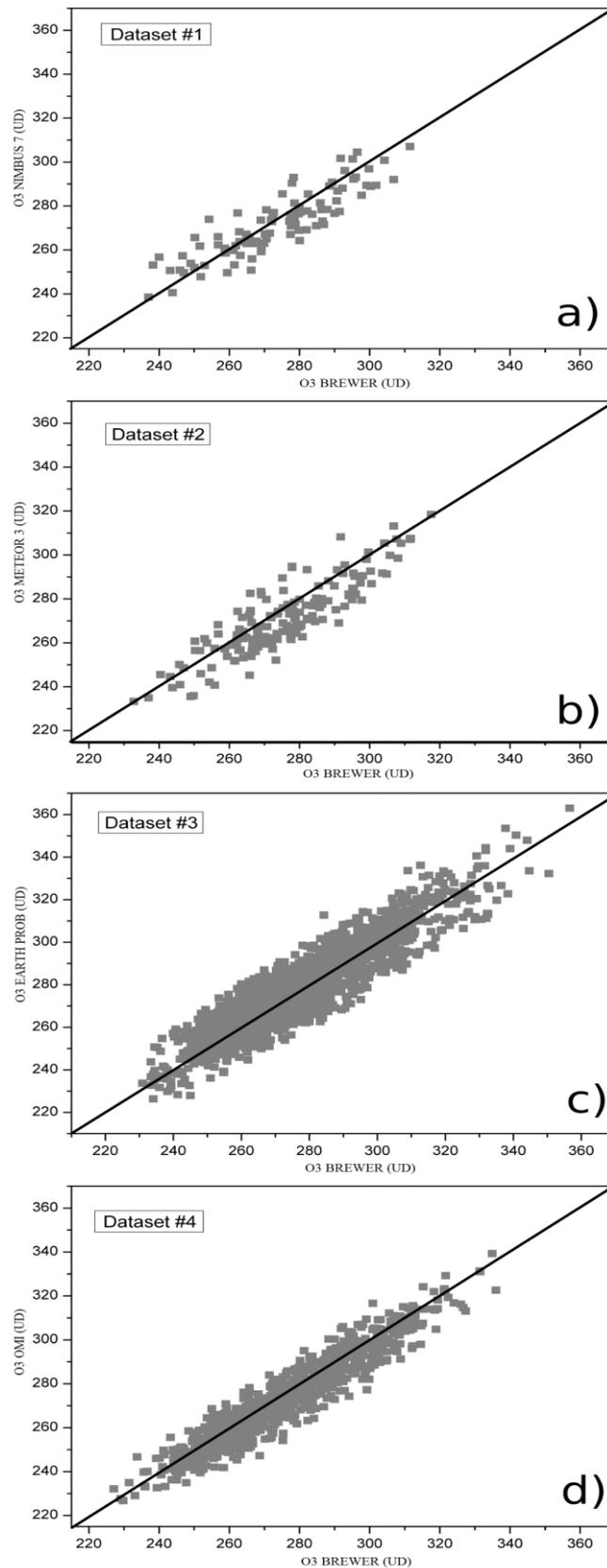


Figura 4.1: Correlação entre os dados da coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul obtidos pelo espectrofotômetro Brewer e pelos diferentes instrumentos de satélite. (a) Dataset #1, (b) Dataset #2, (c) Dataset #3 e (d) Dataset #4. A linha sólida representa o *slope* unitário para o qual os dados estão de acordo.

Todos os conjuntos de dados mostram boa correlação entre os diferentes instrumentos de satélite e o instrumento de solo representado pelo Brewer, uma vez que todos os coeficientes angulares foram muito próximos do unitário e os R^2 foram virtualmente um (0.999 ± 0.001). Estes revelam um alto grau de proporcionalidade entre os conjuntos de dados com um pequeno espalhamento, uma vez que os valores de RMSE foram relativamente baixo, perto de 2,9% para todos os instrumentos TOMS e perto de 2,1% para instrumento OMI.

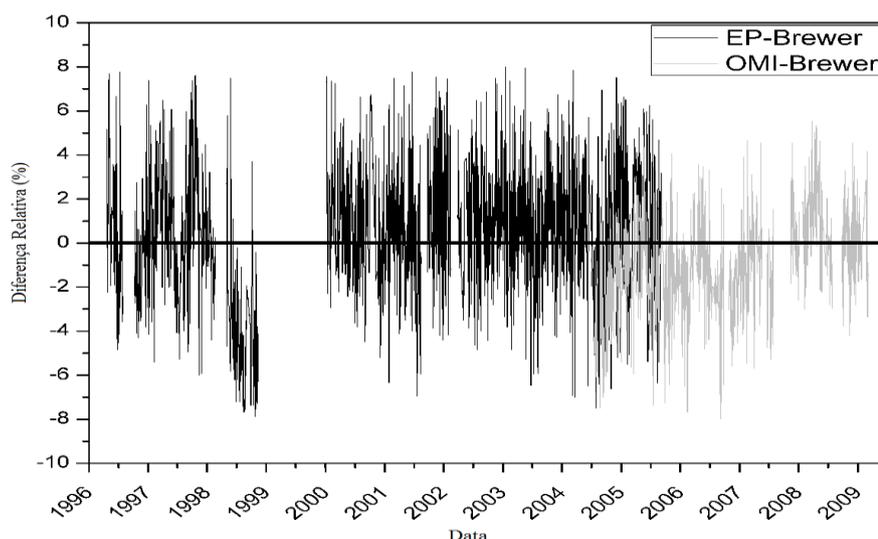


Figura 4.2: Evolução das diferenças relativas entre dados da coluna total de ozônio obtidos pelos instrumentos de satélite e pelo espectrofotômetro Brewer. Em preto é mostrada a diferença relativa entre o Dataset #3 e em cinza a diferença relativa entre o Dataset #4.

Os pequenos valores de MBE, menores que 2%, indicam uma não significativa superestimação ou subestimação dos dados dos instrumentos de satélite em relação ao Brewer. Entretanto, observa-se que, de uma maneira geral, os instrumentos de satélite Nimbus 7, Meteor 3 e OMI subestimam os dados do Brewer e que o instrumento de satélite Earth Probe superestima os dados do Brewer.

O leve aumento no parâmetro MABE de 2,47% do Dataset #1 para 2,87% do Dataset #2 deve-se muito à diferença em quantidade de dados entre os dois conjuntos. Entretanto, a posterior diminuição observada para 2,31% no Dataset #3 e para 1,86% no Dataset #4, associados com desvios padrão menores que 2%, indicam que o espalhamento entre os dados diminuiu devido ao lançamento de instrumentos de satélite mais modernos e pelas correções nos algoritmos dos instrumentos de satélite realizadas ao longo do tempo (Bhartia e Wellemeyer, 2002).

A série diária de diferenças relativas das medidas da coluna total de ozônio para os conjuntos de pares de dados Dataset #3 e Dataset #4 é mostrado na Figura 4.2, onde pode-se

observar que o instrumento Earth Probe, na maioria dos dias, superestimou em torno de 4% os dados de Brewer, excluindo os anos de 1998 e 1999, quando o Espectrofotômetro Brewer #081 não estava funcionando corretamente, sendo substituído posteriormente pelo Brewer #056 em 2000.

Entretanto, o instrumento de satélite OMI subestimou em torno de 2% os dados do Brewer até meados do ano de 2007, quando passou a superestimar os valores em torno de 2% e a partir de meados do ano de 2008 vem mantendo uma superestimação menor que 2%, considerando valores médios. Em julho de 2009, o instrumento Brewer apresentou problemas novamente, ficando fora de operação até novembro de 2010. Os conjuntos de pares de dados Dataset #1 e Dataset #2 foram omitidos desta análise devido ao seu baixo número de pares de dados.

Ao final das comparações, foi confeccionada uma série de dados diários da coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul, no Sul do Brasil, com a finalidade de manter o contínuo monitoramento de longo tempo da camada de ozônio sobre a região, seguindo critérios descritos a seguir. Primeiramente, a série foi preenchida com dados de Brewer. Na falta do dado de Brewer, preencheu-se com o dado do instrumento de satélite que melhor se correlaciona com o Brewer no período. Se houver uma mesma correlação entre diferentes instrumentos de satélite com o Brewer, preencheu-se com os dados do instrumento que foi lançado mais recentemente. A série completa dos dados, de 1979 a 2011, usada nesta análise está apresentada na Figura 4.3.

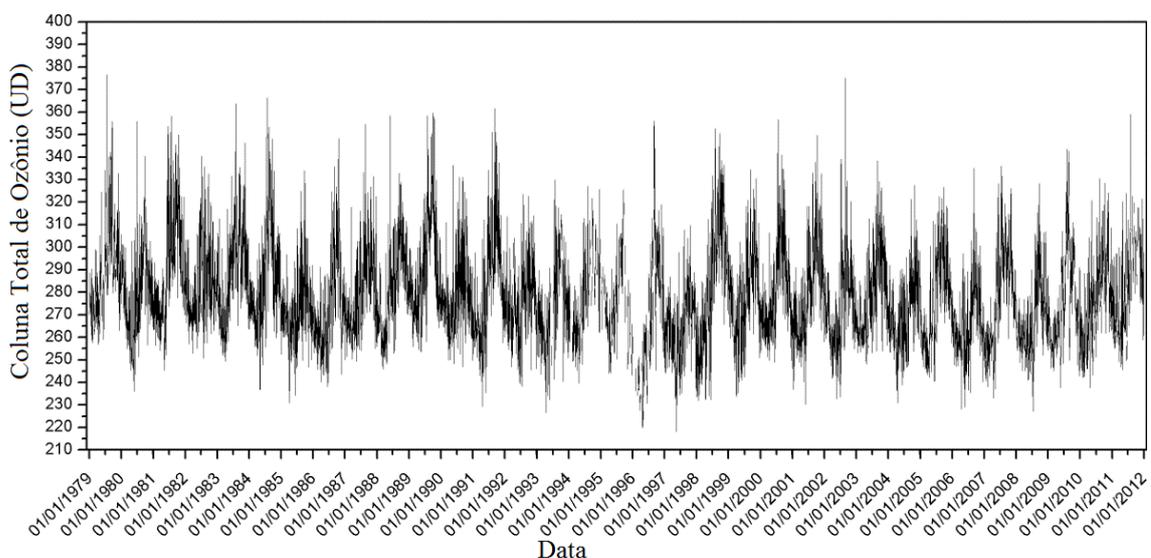


Figura 4.3: Série de dados da média diária da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 2011 para a região do Observatório Espacial do Sul.

Os dados da coluna total de ozônio dos instrumentos de satélite são usados apenas para completar os dados do Brewer em dias em que este último instrumento não tenha realizado medidas válidas, como no caso de dias chuvosos ou com nebulosidade ou panes de qualquer natureza.

Todos os dados obtidos por instrumentos de satélites correlacionaram-se bem com os dados de Brewer, já que obtiveram valores de R^2 acima de 0,99, podendo então fazer parte da série de dados. Não há um conjunto de dados de satélite com valores muito diferente dos dados do Brewer, já que todos os parâmetros de comparação calculados foram coerentes com os encontrados em trabalhos semelhantes, como, por exemplo, para a região da Sudoeste da Espanha, estação de Roma na Itália e outras estações de monitoramento ao redor do planeta (Hendrick et al., 2011; Antón et al., 2010; Ialongo et al., 2008; Keckhut et al., 2010).

Entretanto, parâmetros como o RMSE e MABE, mostrados na Tabela 4.1, indicam que o instrumento de satélite que melhor se correlaciona com o Brewer é o OMI, seguido pelo Earth Probe, Ninbus 7 e, por último, o Meteor 3. Porém, a fim de preenchimento da série de dados, e devido a pouca quantidade de pares de dados entre Brewer e Nimbus 7 (Dataset #1) e por este ter sido lançado anteriormente, seus dados receberam última prioridade para completar a série de dados, ficando os dados do instrumento Meteor 3 como quarta opção para completar a série de dados.

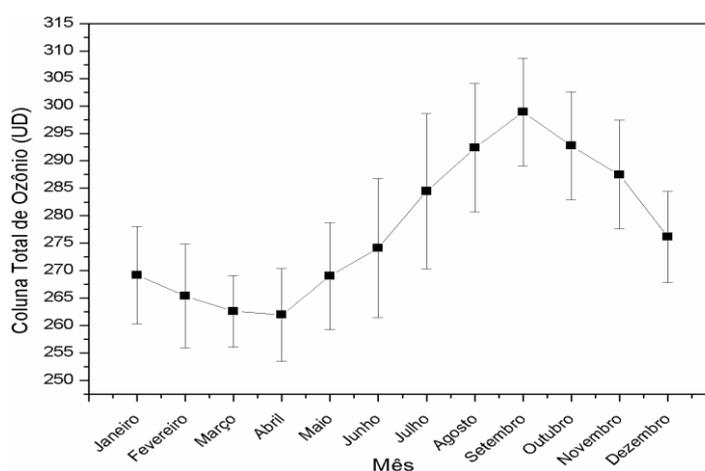


Figura 4.4: Climatologia mensal da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 2011 para a região do Observatório Espacial do Sul.

A Figura 4.3 mostra está série de dados, onde se observa uma variação sazonal com maiores valores na primavera e menores valores no outono de cada ano. Esta variação sazonal fica evidente na Figura 4.4 que mostra a média mensal climatológica dos dados da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 2011, sendo seus valores apresentados na Tabela

4.2, juntamente com seus respectivos desvios padrão, alcançando o valor de $262,0 \pm 8,6$ UD no mês de abril e $298,9 \pm 10,0$ UD em setembro.

O contínuo monitoramento de longo prazo da coluna total de ozônio através de dados obtidos por instrumentos de satélite e por instrumentos de solo sobre o Sul do Brasil, a manutenção destes registros através da confecção de uma série de dados de médias diárias e o cálculo de suas médias mensais climatológicas é de vital importância para a detecção de alterações no conteúdo de ozônio sobre esta região, causadas por eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil (Kirchhoff et al., 1996; Pinheiro et al., 2011).

As médias mensais climatológicas e seus respectivos desvios padrão da série de dados da coluna total de ozônio, para o período entre 1979 e 2011 sobre a região do Observatório Espacial do Sul foram calculadas e estão sendo mostradas na Figura 4.4 e na Tabela 4.2. Todos os dias com medidas foram considerados para os cálculos das médias mensais climatológicas, inclusive os que apresentaram queda na coluna total de ozônio devido aos efeitos de influência do Buraco de Ozônio Antártico. Pode-se observar claramente um ciclo sazonal bem definido, com maiores valores durante a primavera e menores valores durante o outono. Este comportamento é considerado normal para a Camada de Ozônio em regiões de médias latitudes (London, 1985), como o Sul do Brasil.

Tabela 4.2: Valores da média climatológica mensal e respectivo desvio padrão da coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul, entre 1979 e 2011.

Mês	Média Climatológica (UD)	Desvio Padrão (UD)
Janeiro	269,19	8,86
Fevereiro	265,4	9,51
Março	262,6	6,51
Abril	261,95	8,45
Mai	269,01	9,73
Junho	274,1	12,67
Julho	284,47	14,13
Agosto	292,38	11,65
Setembro	298,87	9,8
Outubro	292,73	9,85
Novembro	287,47	9,89
Dezembro	276,13	8,32

4.2 Análise dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011

O Buraco de Ozônio Antártico atua durante o período da primavera do Hemisfério Sul (Solomon, 1999). Portanto, neste estudo é enfatizada a análise dos dados para este período, entre os meses de agosto a novembro, uma vez que, para haver influência, o próprio Buraco de Ozônio tem que estar atuante.

Desta forma, foram calculados, e são apresentados na Tabela 4.3, os valores das médias climatológicas, desvio padrão e o valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão ($\mu - 1,5\sigma$), utilizados para selecionar os eventos de queda na coluna de ozônio, para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, para o período entre 1979 e 2011 sobre a região do Observatório Espacial do Sul.

Para demonstrar a eficácia da metodologia empregada na identificação dos eventos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, foram selecionados quatro eventos característicos, um para cada mês de foco da análise, os quais são apresentados a seguir.

Tabela 4.3: Médias climatológicas da coluna total de ozônio e seus respectivos desvios padrão e limite de média menos 1,5 desvios padrão ($\mu - 1,5\sigma$) para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, no período entre 1979 e 2011, para a região do Observatório Espacial do Sul (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m).

Mês	O3 (UD)	SD (UD)	$\mu - 1,5\sigma$ (UD)
Agosto	292,38	11,65	274,91
Setembro	298,87	9,80	284,17
Outubro	292,73	9,85	277,95
Novembro	287,47	9,89	272,63

4.2.1 Análise de eventos característicos de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil

Na presente seção, são apresentados quatro exemplos de eventos característicos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, sendo selecionado

um para cada mês de foco da análise, de agosto a novembro, comprovando a eficácia da metodologia empregada na identificação dos eventos.

4.2.1.1 Evento do dia 18 de agosto de 1997

O evento característico selecionado para o mês de agosto foi o do dia 18 de agosto de 1997, que apresentou valor da coluna total de ozônio de 242,6 UD, representando uma redução de 17,0% em relação à média climatológica do mês de agosto que é de $292,38 \pm 11,65$ UD.

Os valores da coluna total de ozônio entre os dias 14 e 22 de agosto de 1997 são mostrados na Figura 4.5, sendo observada uma queda temporária na coluna de ozônio para o período, onde o menor valor do evento ocorreu no dia 18 ficando abaixo da linha contínua que representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de agosto, voltando a alcançar valores mais altos nos dias seguintes à passagem do evento.

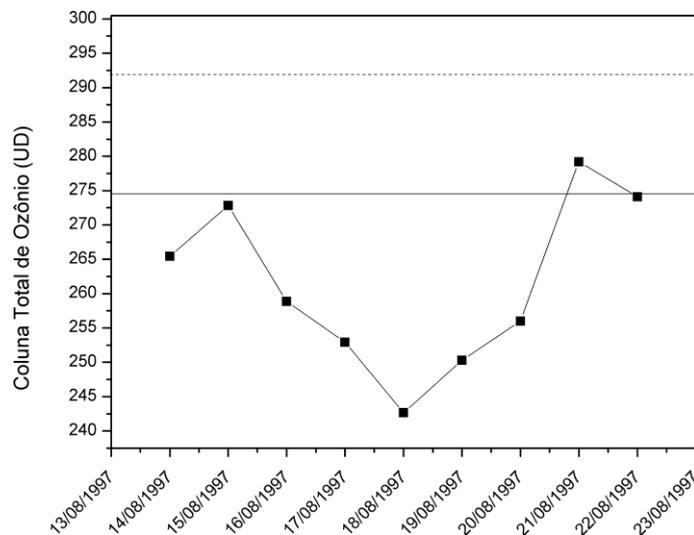


Figura 4.5: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 14 e 22 de agosto de 1997 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa o valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de agosto.

Uma massa de ar com elevados valores de vorticidade potencial absoluta e ventos em giro ciclônico, predominantemente de sul, oriunda do Sul da América do Sul, ocasionou o transporte da massa de ar pobre em ozônio que alcançou o Sul do Brasil do dia 17 (a) para 19 (b) de agosto de 1997 (Figura 4.6), ficando evidenciado o indício da origem polar da massa de

ar (Semane et al., 2006) através da análise isentrópica no nível de 620 K de temperatura potencial. As partes em branco visualizadas neste tipo de Figura a Sul de 45° de latitude representam a não existência de dados de altitude, que são basicamente inferidos por medidas de satélite nestas regiões e, que pela ausência da radiação solar nesta época do ano, deixam de ser coletados.

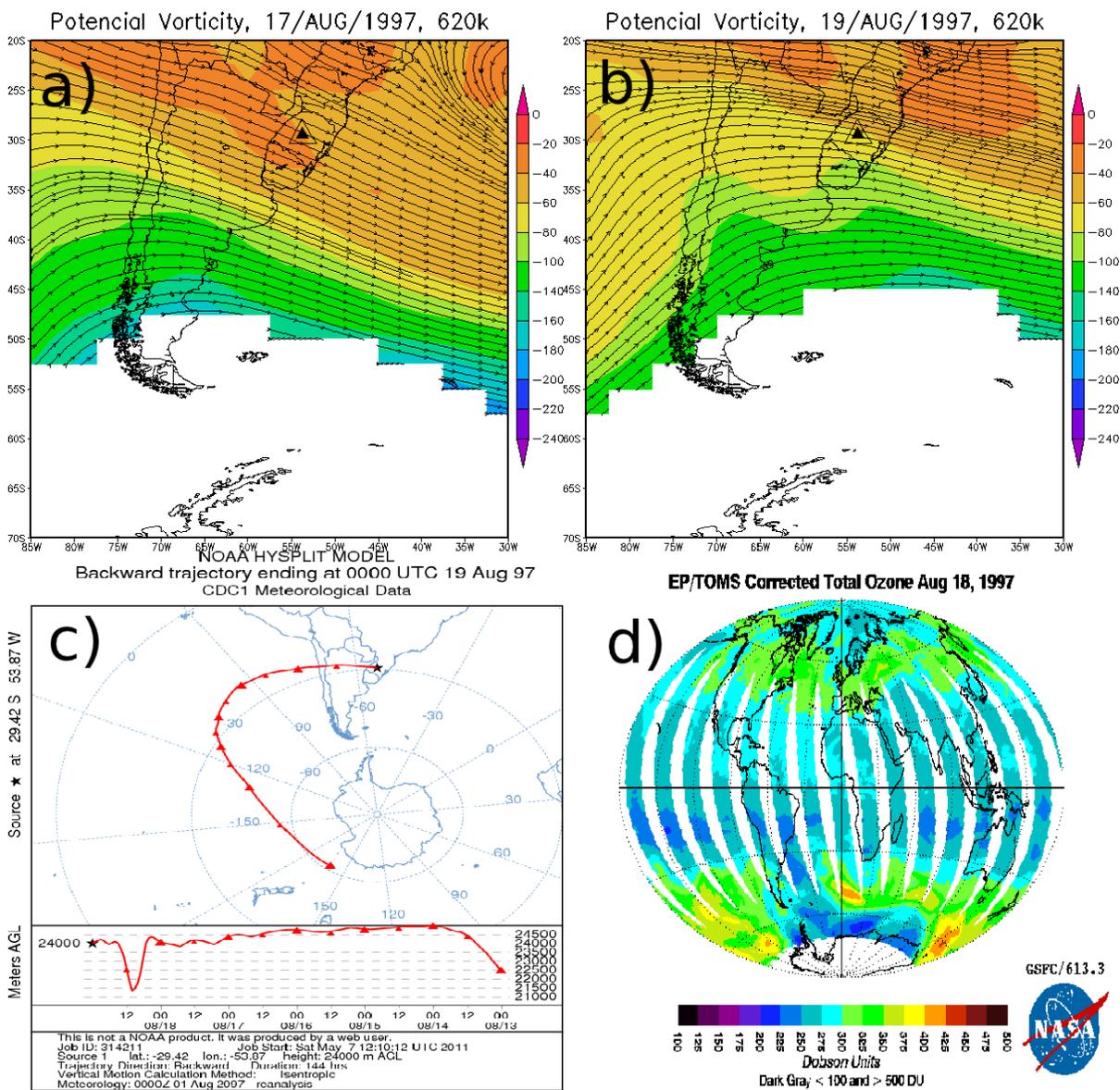


Figura 4.6 – Vorticidade Potencial e vento para 17(a) e 19 (b) de agosto de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 19 e 18 de agosto de 1997 respectivamente.

Ainda na Figura 4.6, observa-se que a trajetória retroativa da massa de ar confeccionada para a altura de 24 km e seis dias anteriores ao dia 19 de agosto de 1997 (c) confirmou a passagem da massa de ar pobre em ozônio pela região Antártica e a imagem de

satélite OMI do dia 18 de agosto de 1997 (d) complementou a análise, através da observação da atuação da borda do Buraco de Ozônio Antártico nesta data com valores inferiores a 220 DU (Hofmann, 1997). Além disso, uma conexão entre o Buraco de Ozônio Antártico e o Sul do Brasil durante o evento é verificada na Figura 4.6 (d), confirmando a ocorrência do evento de influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, causando uma queda temporária da coluna total de ozônio sobre a região.

4.2.1.2 Evento do dia 03 de setembro de 2009

No dia 03 de setembro de 2009, o Brewer apresentou uma coluna total de ozônio de 256,3 UD, representando uma redução de 14,2% em relação à média climatológica do mês de setembro, que é de $298,87 \pm 9,80$ UD.

Os valores da coluna total de ozônio entre os dias 30 de agosto e 08 de setembro de 2009 para a região do Observatório Espacial do Sul são mostrados na Figura 4.7. Similarmente ao caso apresentado anteriormente, apesar do valor mais baixo ser no dia 02, apenas no dia 03 de setembro é que todas as outras condições para caracterização do efeito secundário, como variação de VPA e trajetória retroativa da massa de ar, se evidenciam.

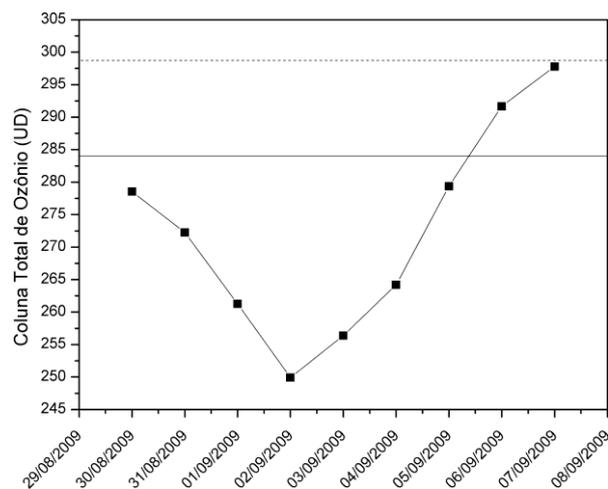


Figura 4.7: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 30 de agosto e 08 de setembro de 2009 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de setembro.

Neste evento, a influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil fica evidenciada através da análise isentrópica, quando no dia 02 (a) de setembro observa-se a

aproximação de uma ampla área de vento com circulação ciclônica predominantemente de sul e menores valores de vorticidade potencial absoluta no nível de 620 K que se encontra sobre o centro sul da Argentina.

No dia 03 (b) de setembro, estes ventos de sul chegam sobre o Sul do Brasil, trazendo uma massa de ar de origem polar que faz aumentar a Vorticidade Potencial Absoluta sobre a região. A trajetória retroativa da massa de ar (c) e a imagem de satélite OMI (d) complementam a análise, evidenciando a origem polar da massa de ar e a conexão entre o Buraco de Ozônio e o Sul do Brasil durante o evento, observado na Figura 4.8.

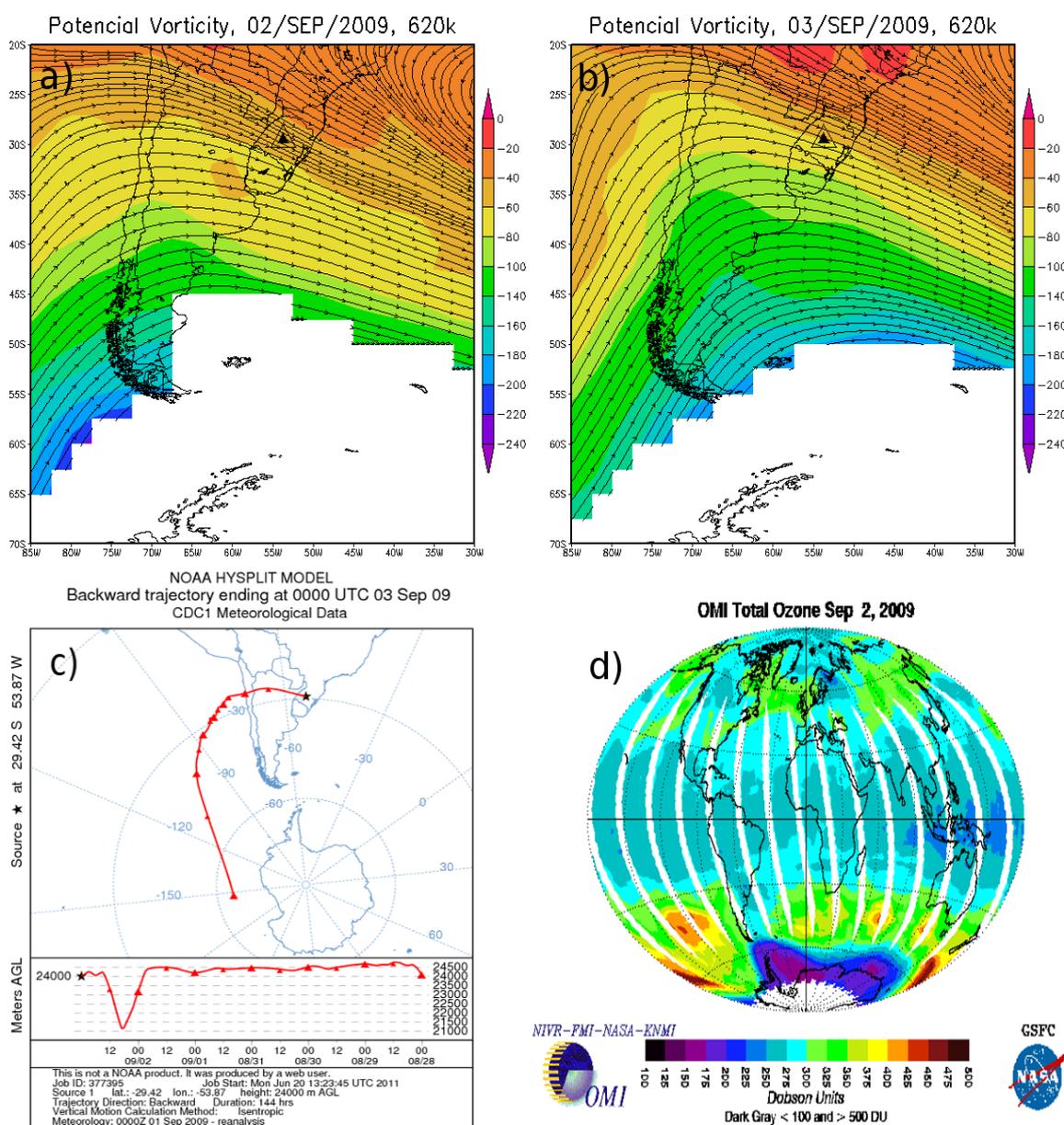


Figura 4.8 – Vorticidade Potencial e vento para 02(a) e 03 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 03 e 02 de setembro de 2009, respectivamente.

4.2.1.3 Evento do dia 07 de outubro de 2007

O evento do dia 07 de outubro de 2007 apresentou valor da coluna total de ozônio de 259,5 UD, representando uma redução de 11,4% em relação à média climatológica do mês de outubro que é de $292,73 \pm 9,85$ UD. Os valores da coluna total de ozônio entre os dias 03 e 11 de outubro de 2007 para a região do Observatório Espacial do Sul são mostrados na Figura 4.9, observando-se que o conteúdo de ozônio do dia 07 de outubro de 2007 ficou abaixo da linha que representa o valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de outubro, aumentando seus valores nos dias seguintes.

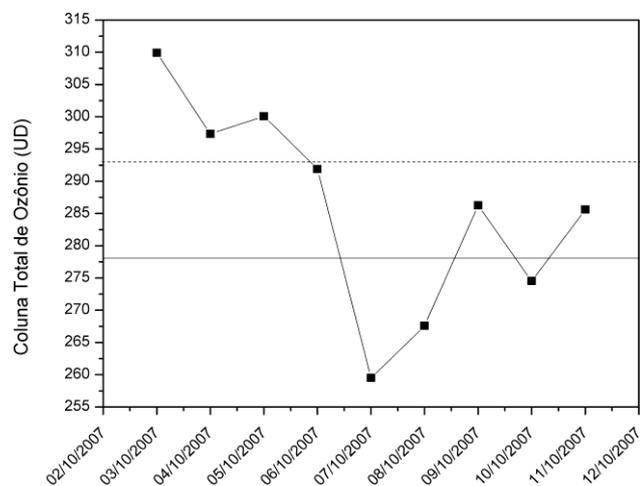


Figura 4.9: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 16 e 26 de outubro de 2010 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de outubro.

No dia 06 de outubro de 2007 (a) a massa de ar com vorticidade potencial absoluta maior, pobre em ozônio, estava sobre o Sul da Argentina e do Chile. Entretanto, os ventos predominantemente de Sul, envoltos em uma circulação ciclônica, proporcionaram o avanço desta massa de ar que se instalou definitivamente sobre o Sul do Brasil no dia 08 de outubro de 2007 (b). A trajetória retroativa da massa de ar (c) mostra a passagem desta pela borda do continente Antártico e a imagem do satélite OMI (d) complementa a análise, evidenciando a atuação do Buraco de Ozônio sobre a região da passagem da massa de ar e a conexão entre o Buraco de Ozônio e o Sul do Brasil durante o evento, conforme verificado na Figura 4.10, ocasionando a queda temporária na coluna de ozônio observada na Figura 4.9.

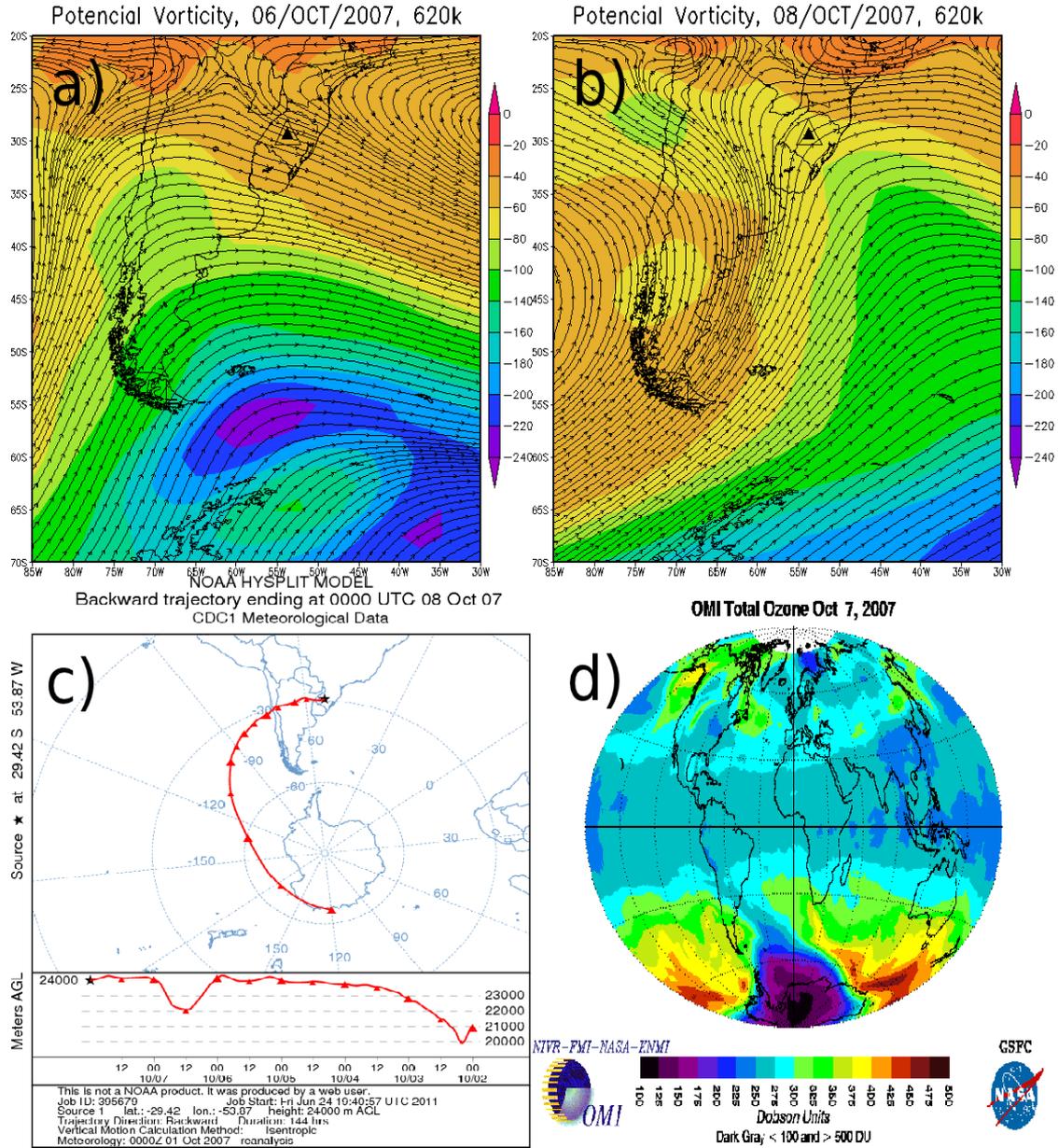


Figura 4.10 – Vorticidade Potencial e vento para 02 (a) e 03 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 03 e 04 de setembro de 2009, respectivamente.

4.2.1.4 Evento do dia 01 de novembro de 2008

Já o evento do dia 01 de novembro de 2008 apresentou valor da coluna total de ozônio de 252,1 UD, representando uma redução de 12,3% em relação à média climatológica do mês de novembro, $287,47 \pm 9,89$ UD.

Os valores da coluna total de ozônio entre os dias 28 de outubro e 05 de novembro de 2008 são mostrados na Figura 4.11, sendo observada uma queda temporária na coluna de ozônio no primeiro dia de novembro, abaixo da linha contínua que representa o valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para este mês, voltando a alcançar valores mais altos nos dias seguintes.

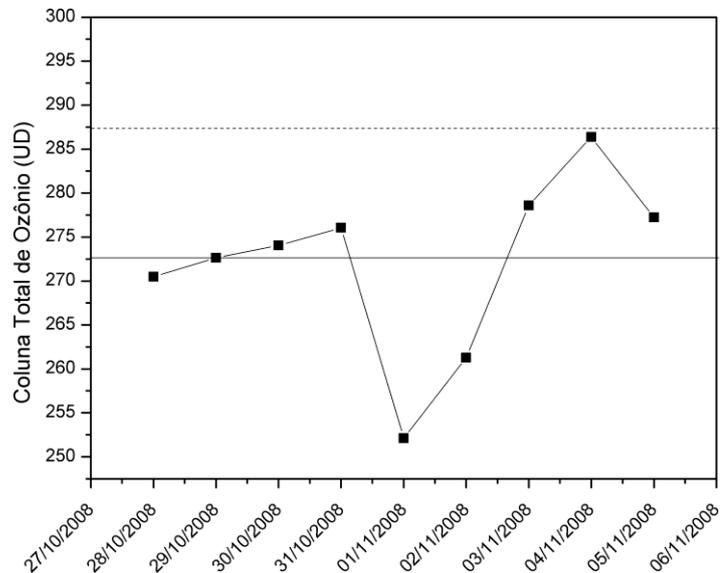


Figura 4.11: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 28 de outubro e 04 de novembro de 2008 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de novembro.

No presente evento, verifica-se que a massa de ar com valores de vorticidade potencial absoluta maiores, pobre em ozônio, associada a fortes gradientes de Vorticidade Potencial Absoluta, estava sobre a região da foz do Rio da Prata e o Sul do Brasil, no dia 33 de outubro de 2008 (a). Já no dia 01 de novembro (b), a massa de ar com Vorticidade Potencial Absoluta maior se estabelece sobre o Sul do Brasil, trazida por uma ampla região de vento em giro ciclônico, predominantemente de sul, no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial (b).

A trajetória retroativa (c) mostra que esta massa de ar pobre em ozônio, que atingiu o Sul do Brasil, passou próximo ao centro do continente Antártico e, juntamente com a imagem de satélite OMI (d), complementam a análise, evidenciando a origem polar da massa de ar e a conexão entre o Buraco de Ozônio e o Sul do Brasil durante a ocorrência do evento, como visto na Figura 4.12.

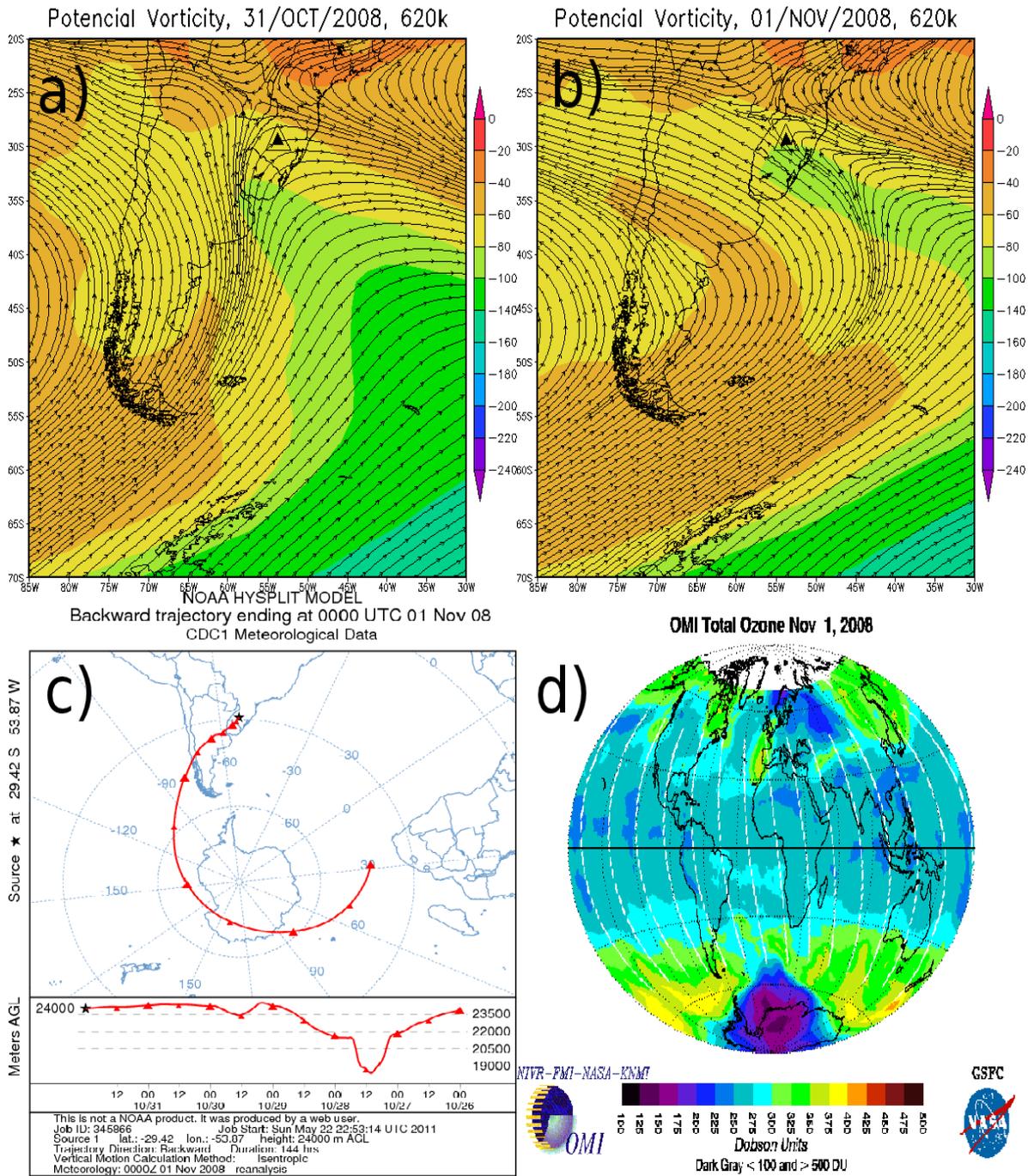


Figura 4.12 – Vorticidade Potencial e vento para 31 de outubro (a) e 01 de novembro (b) de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d), ambas para o dia 01 de novembro de 2008.

4.2.2 Estatística dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil

Aplicando a mesma metodologia utilizada no item anterior, para o período completo de trinta e três anos de dados (de 1979 a 2011), foram identificados 66 eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, ocorrendo, em média, dois eventos por ano, com porcentagem média de queda na coluna total de ozônio de $8,66 \pm 3,14\%$.

As datas de ocorrência dos eventos, o valor da coluna total de ozônio, o nível isentrópico em que ocorreu o transporte da massa de ar pobre em ozônio e a porcentagem de redução do conteúdo de ozônio em relação à média mensal climatológica são mostradas na Tabela 4.4.

A partir destes dados, observa-se que o transporte isentrópico da massa de ar pobre em ozônio da região do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil ocorreu, preferencialmente, no nível de 620 K de temperatura potencial, com a ocorrência de cinquenta e cinco eventos, ou seja, 83,33% dos eventos totais. Minoritariamente, o transporte da massa de ar pobre em ozônio ocorreu em 7,57% dos casos no nível isentrópico de 630 K de temperatura potencial e 9,10% das vezes no nível isentrópico de 640 K de temperatura potencial, representando cinco e seis eventos, respectivamente.

A quantidade de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos a cada ano é apresentada na Figura 4.13 (a), onde se observa que, entre os anos de 1979 e 1981, não ocorreram eventos, sendo apenas no ano de 1982 a identificação do primeiro evento. Logo no primeiro ano em que eventos foram identificados houve, a ocorrência de três eventos.

Durante a sequência de anos, entre 1982 e 1986, houve a ocorrência de, no mínimo, um evento por ano, entretanto, no ano de 1985, ocorreram quatro eventos. Entre os anos de 1987 e 1989, novamente não foi observada a ocorrência de eventos, sendo novamente observados no ano de 1990, com a ocorrência de quatro eventos, e não observados no ano de 1991.

Entre os anos de 1995 e 1996 não houve identificação de eventos, no entanto, no ano seguinte, 1997, houve o maior número de eventos registrados em um mesmo ano, no total de seis eventos.

A partir de 1997 não houve mais registros de anos sem ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil. Os eventos ocorreram, mesmo que em menor número, como nos anos de 1998, 1999 e 2002, onde foi registrado apenas um evento, ou em maior número, como nos anos de 2004 e 2006, com cinco eventos, ou os anos de 2000, 2008 e 2010, com quatro eventos registrados.

Tabela 4.4: Datas de ocorrência dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, além do valor da coluna total de ozônio, o nível isentrópico do transporte e a porcentagem de redução do conteúdo de ozônio em relação à média mensal climatológica de 1979 a 2011.

Data	O3	Nível	Redução (%)	Data	O3	Nível	Redução (%)
12/10/1982	271,4	620	7,3	23/09/2001	274,0	630	8,3
21/10/1982	261,7	620	10,6	18/08/2002	254,2	620	13,0
23/09/1982	278,2	620	6,9	02/10/2003	279,8	620	4,4
30/09/1983	273,4	620	8,5	15/10/2003	270,6	620	7,5
14/10/1983	277,4	630	5,2	22/08/2004	263,5	620	9,9
16/10/1984	262,6	630	10,3	12/09/2004	276,4	620	7,5
15/09/1985	283,3	640	5,2	26/09/2004	276,3	620	7,6
15/10/1985	258,3	620	11,8	03/10/2004	275,6	620	5,8
07/11/1985	263,4	620	8,4	16/10/2004	253,6	620	13,4
27/11/1985	264,1	620	8,1	29/09/2005	280,6	640	6,1
12/09/1986	270,5	640	9,5	11/10/2005	274,0	620	6,4
06/09/1990	246,9	640	17,4	23/10/2005	278,4	620	4,9
17/09/1990	268,3	630	10,2	20/08/2006	269,7	620	7,7
01/10/1990	276,7	620	5,5	07/10/2006	260,7	630	10,9
08/10/1990	261,0	620	10,8	13/10/2006	276,4	620	5,6
10/10/1992	267,2	620	8,7	28/10/2006	259,1	620	11,5
26/08/1993	267,5	620	8,5	19/11/2006	271,9	620	5,4
31/10/1993	240,4	620	17,9	16/08/2007	275,3	640	5,9
17/09/1994	278,5	620	6,8	13/09/2007	274,9	620	8,0
26/10/1994	274,5	620	6,2	07/10/2007	259,5	620	11,4
18/08/1997	242,6	620	17,0	28/09/2008	275,2	620	7,9
14/09/1997	255,0	620	14,7	12/10/2008	267,8	620	8,5
09/10/1997	275,5	640	5,9	25/10/2008	259,5	620	11,4
16/10/1997	265,1	620	9,4	01/11/2008	252,1	620	12,3
02/11/1997	267,9	620	6,8	03/09/2009	256,3	620	14,2
19/11/1997	266,4	620	7,3	29/09/2009	270,2	620	9,6
24/10/1998	260,0	620	11,2	08/08/2010	271,2	620	7,2
26/08/1999	270,3	620	7,6	08/09/2010	280,8	620	6,0
23/09/2000	270,1	620	9,6	13/10/2010	276,2	620	5,7
09/10/2000	276,0	620	5,7	22/10/2010	261,7	620	10,6
26/10/2000	269,5	620	7,9	05/09/2011	283,6	620	5,1
07/11/2000	262,8	620	8,6	29/09/2011	283,3	620	5,2
15/08/2001	273,6	620	6,4	21/10/2011	278,7	620	4,8

O elevado número de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil encontrados nos anos de 1985, 1997 e 2006, corroboram com os resultados mostrados por Bodeker et al. (2007), que encontrou uma anomalia negativa nos valores da coluna total de ozônio em médias latitudes do Hemisfério Sul, sendo uma das prováveis causas, o transporte de ar pobre em ozônio oriundo do Buraco de Ozônio Antártico, como o ocorrido nos eventos identificados para estes anos.

A Figura 4.13 (b) mostra a quantidade de eventos ocorridos nos quatro meses de foco da análise realizada. Foi observada a ocorrência de nove eventos durante o mês de agosto, ou seja, 13,64% dos eventos, vinte eventos no mês de setembro, ou seja, 30,3% dos eventos. A maior parte dos eventos, em número de trinta, ocorreram no mês de outubro, ou seja, 45,46 % dos eventos, restando apenas 10,6% dos eventos no mês de novembro com a ocorrência de sete eventos.

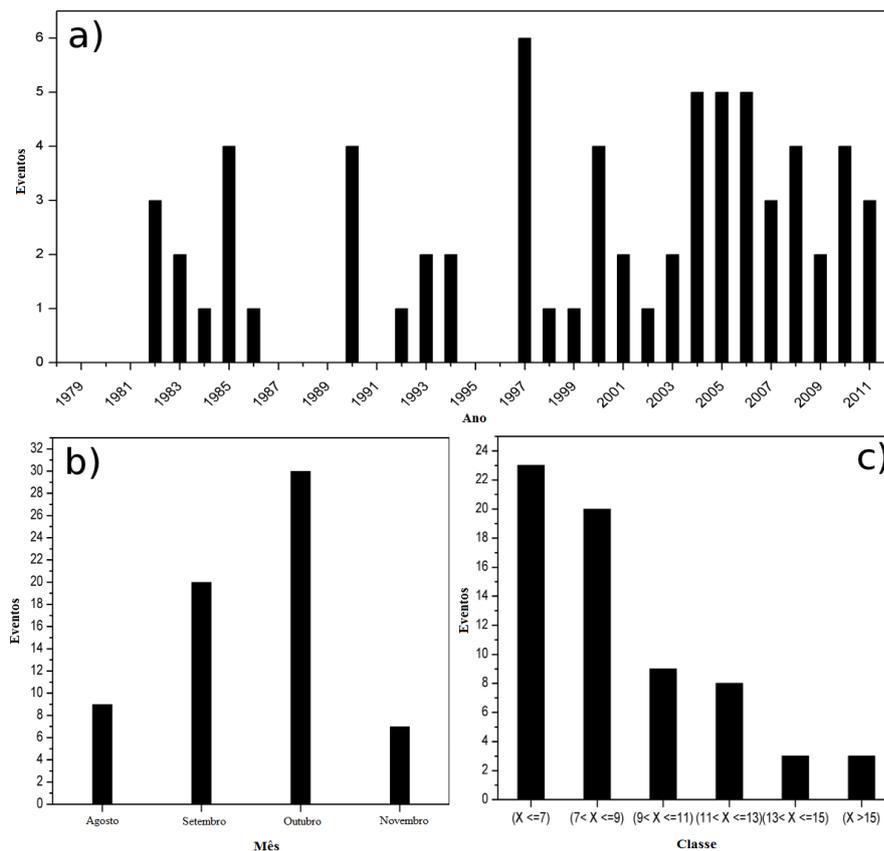


Figura 4.13: Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos a cada ano, entre 1979 e 2011 (a), ocorridos a cada mês (b) e distribuição de freqüência de porcentagem de queda da coluna total de ozônio (c).

As porcentagens de queda da coluna total de ozônio em relação a sua média climatológica mensal, durante os eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio

Antártico sobre o Sul do Brasil, foram separadas em categorias da seguinte forma e mostradas na Figura 4.13 (c):

- Quedas inferiores ou iguais a 7% ($X \leq 7$).
- Quedas superiores a 7% e inferiores ou iguais a 9% ($7 < X \leq 9$).
- Quedas superiores a 9% e inferiores ou iguais a 11% ($9 < X \leq 11$).
- Quedas superiores a 11% e inferiores ou iguais a 13% ($11 < X \leq 13$).
- Quedas superiores a 13% e inferiores ou iguais a 15% ($13 < X \leq 15$).
- Quedas superiores a 15% ($X > 15$).

A maioria dos eventos apresentou quedas na coluna total de ozônio de, no máximo, 9%, totalizando 65,1 % de todos os casos analisados. Esta maioria divide-se em duas categorias, 34,8% dos eventos (23 casos) com quedas inferiores a 7% e 30,3% dos eventos (20 casos) com quedas superiores a 7% e inferiores ou iguais a 9%. Eventos com quedas superiores a 9% e inferiores ou iguais a 11% representaram 13,6% dos eventos (9 casos), e quedas superiores a 11% e inferiores ou iguais a 13% representaram 12,1% dos eventos (8 casos). Os eventos mais extremos de queda na coluna total de ozônio foram os menos frequentes. Quedas superiores a 13% e inferiores ou iguais a 15%, bem como superiores a 15%, ocorreram em três eventos cada, representando cada uma das categorias 4,5% dos casos.

4.3 Padrão Médio de Circulação Estratosférica Durante a Ocorrência de Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil

A fim de identificar um padrão médio de circulação estratosférica durante a ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011, foi confeccionado o campo médio para vorticidade potencial e vento no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, uma vez que este é o nível isentrópico onde a maior parte dos eventos foi identificada conforme observado na Tabela 4.4.

Os campos médios de vorticidade potencial e vento entre três dias antes e dois dias depois da ocorrência do evento são apresentados na Figura 4.14 e na Figura 4.15, são apresentados os campos de desvio padrão da vorticidade potencial para o período mencionado.

Observa-se no campo médio de três dias antes do evento, Figura 4.14 (a), que o Sul do Brasil está sobre influência de um anticiclone centrado no oceano Atlântico e escoamento

zonal vindo do oceano Pacífico passando pelo norte da Argentina, com valores de vorticidade potencial absoluta entre 40 e 60 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$, sem evidências de transporte isentrópico.

Dois dias antes do evento, Figura 4.14 (b), o escoamento passa a ser influenciado por uma ampla área de vento com circulação ciclônica e começa a se observar o avanço de uma massa de ar com maiores valores de vorticidade potencial absoluta sobre o Sul do Chile e Argentina. Entretanto, não há variação de vorticidade potencial sobre o Sul do Brasil.

Na véspera da ocorrência do evento, Figura 4.14 (c), observa-se a intensificação da área de circulação ciclônica do vento e o avanço da massa de ar com vorticidade potencial absoluta maior, entre 60 e 80 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$, chegando sobre o Uruguai. No dia do evento, Figura 4.14 (d), o campo de vento se intensifica na região de circulação ciclônica, ganhando uma forte componente de sul e a massa de ar com vorticidade potencial entre 60 e 80 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$ chega sobre o Sul do Brasil. No dia seguinte a ocorrência do evento, Figura 4.14 (e), a massa de ar com vorticidade potencial entre 60 e 80 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$ se instala completamente sobre o estado do Rio Grande do Sul e o vento prossegue com intensa componente de sul. Finalmente, dois dias após a ocorrência do evento, Figura 4.14 (f) observa-se uma desintensificação do campo de vento, ganhando componente mais zonal sobre o Sul do Brasil e o recuo para sul da massa de ar com vorticidade potencial entre 60 e 80 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$, dando indícios do fim do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil.

Nos campos de desvio padrão da média, Figura 4.15, observa-se em todos os casos menores valores próximos ao equador e maiores valores em médias latitudes, sendo esta uma condição de normalidade, visto que próximo ao equador a variação intrasazonal de temperatura é menor que em médias latitudes, onde ocorre a passagem de distúrbios transientes (Hoskins e Hodges 2005).

Sobre a região do Observatório Espacial do Sul, três dias antes da ocorrência do evento (a), da Figura 4.15, o valor do desvio padrão ficou em 10 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$. Com o avanço da onda de maiores valores de vorticidade potencial absoluta, mostrado nos campos médios, os valores de desvio padrão aumentam progressivamente a partir de dois dias antes (b), ficando próximo a 12 unidades e entre 12 e 15 unidades um dia antes da ocorrência do evento (c), estabilizando nestes valores no dia de ocorrência do evento (d). Após a ocorrência do evento, os valores de desvio padrão diminuem, alcançando valores entre 10 e 12 unidades no dia seguinte (e) e dois dias (f) depois do evento. A análise do desvio padrão da média, mostrando valores de variação da vorticidade potencial absoluta entre 12 e 15 unidades, indica que a utilização da escala de 20 em 20 unidades nos mapas de VPA na identificação dos eventos está dentro de um

parâmetro aceitável, uma vez que se houverem variações deste tipo, já é passível de mudança na escala de VPA e se consegue identificar o deslocamento das massas de ar pobre em ozônio que atingem o Sul do Brasil.

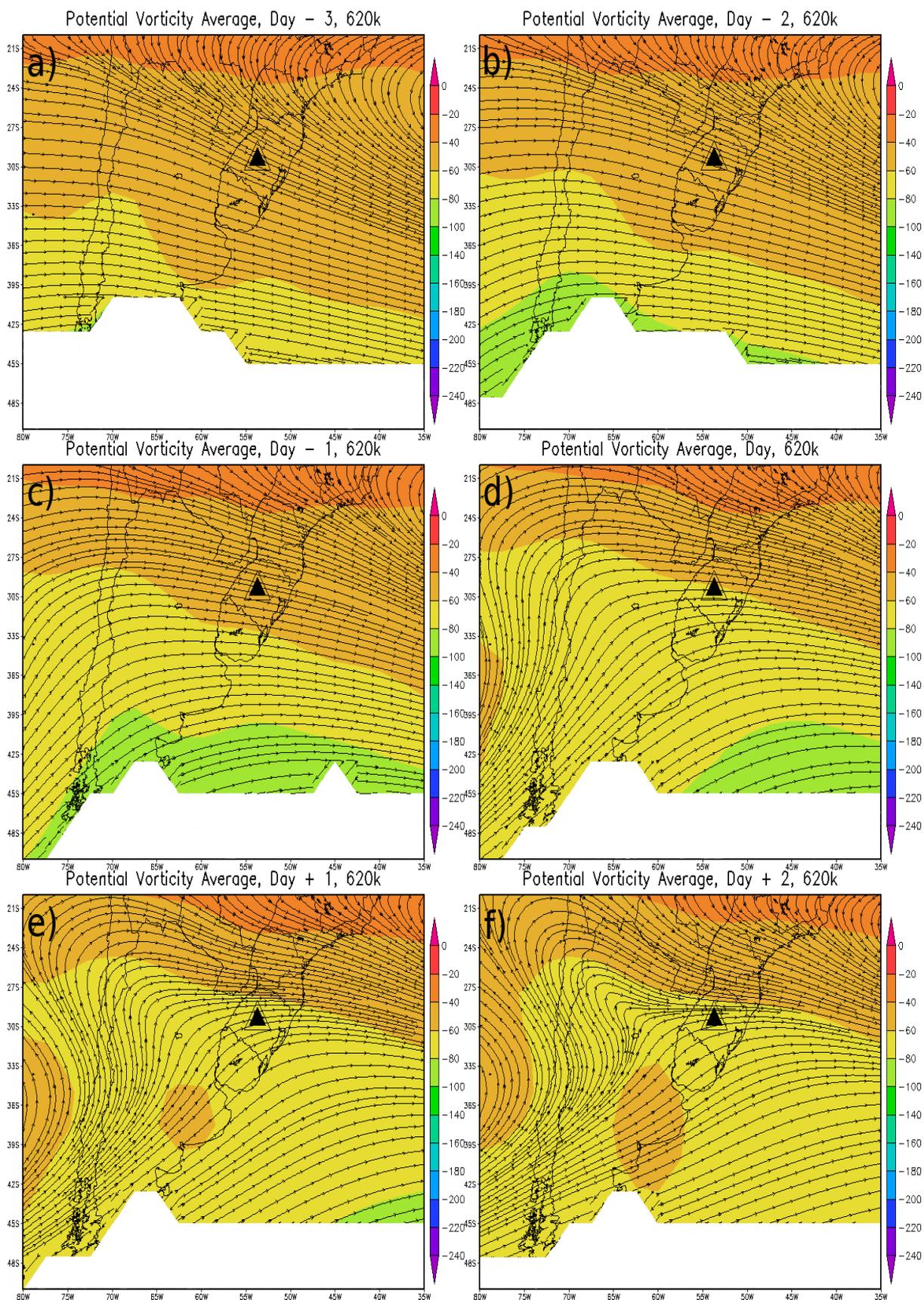


Figura 4.14: Campo médio de vorticidade potencial e vento (a) para três dias antes, (b) para dois dias antes, (c) um dia antes, (d) no dia, (e) um dia depois e (f) dois dias depois da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011.

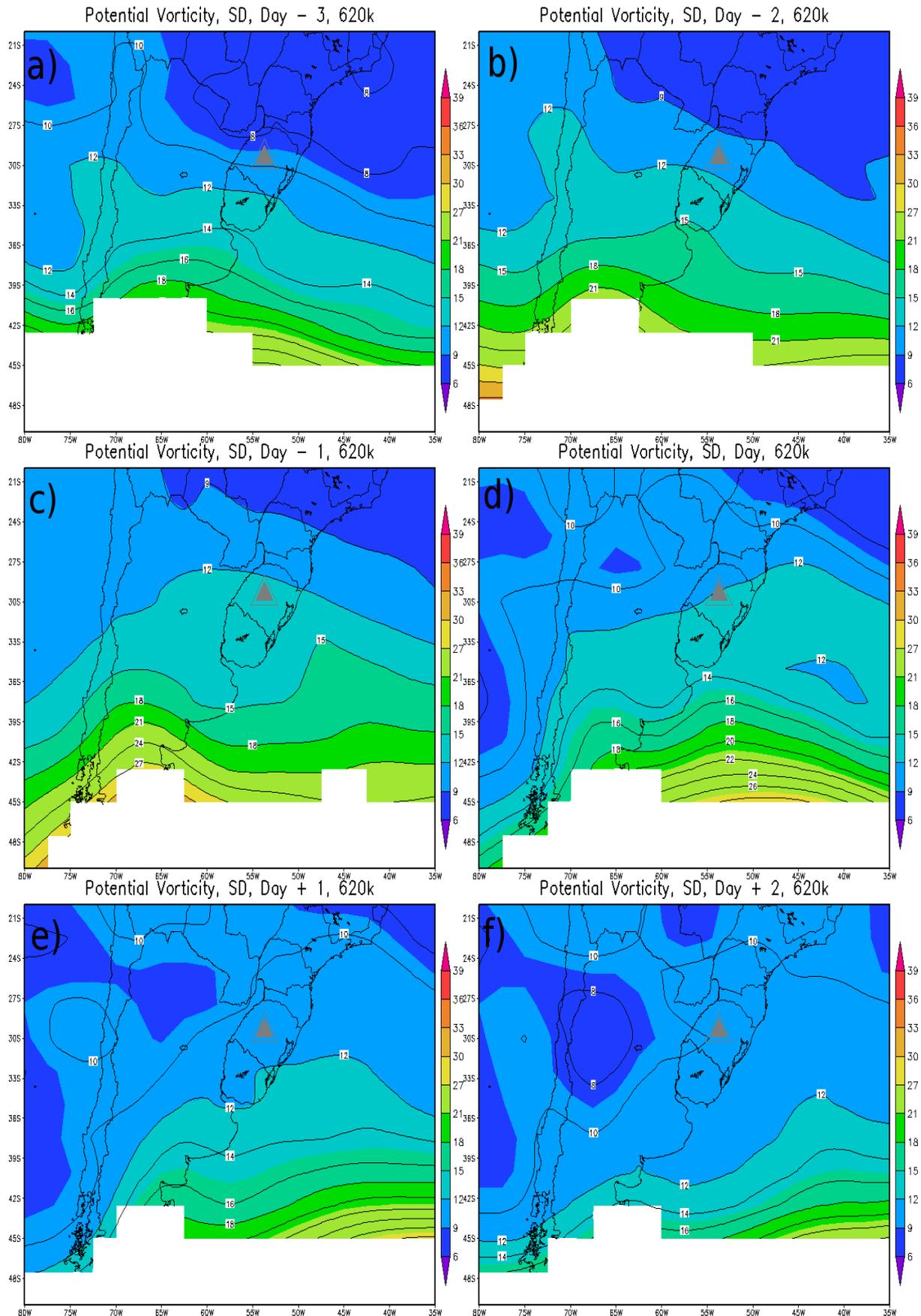


Figura 4.15: Desvio padrão do Campo médio de vorticidade potencial (a) para três dias antes, (b) para dois dias antes, (c) um dia antes, (d) no dia, (e) um dia depois e (f) dois dias depois da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil entre 1979 e 2011.

4.4 Análise Sinótica Troposférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil

A região do Observatório Espacial do Sul, onde está localizado o Espectrofotômetro Brewer, está próxima a 30° S de latitude no Sul do Brasil e tem por característica a passagem de distúrbios atmosféricos transientes, sendo atingida por diversos fenômenos meteorológicos de tempo. Os mais significativos na baixa troposfera são a passagem de frentes frias, formação de sistemas convectivos de mesoescala e ciclones extratropicais, já na alta troposfera, a formação e passagem das correntes de jatos subtropical e polar (Satyamurty et al, 1998).

Em virtude disso, é esperado que a chegada de massas de ar estratosféricas pobre em ozônio sobre o Sul do Brasil coincidam com a ocorrência de algum destes fenômenos mencionados. Como a previsão de tempo troposférica ocorre diariamente de forma operacional, torna-se importante compreender a conexão entre o sistema sinótico troposférico de tempo e o transporte de massas de ar pobre em ozônio oriundas do Buraco de Ozônio Antártico que atingem o Sul do Brasil, de forma a facilitar futuras identificações de ocorrência destes eventos.

No presente item da Dissertação é apresentada a análise sinótica troposférica de um evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil.

4.4.1 Análise Sinótica Troposférica do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de Setembro de 2009

O evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de setembro de 2009 é considerado um dos exemplos de eventos característicos, sendo sua análise dos dados da coluna total de ozônio e de circulação estratosférica mostrada na seção 4.2.1.2 desta Dissertação, através das Figuras 4.7 e 4.8, onde foi mostrada a chegada ao Sul do Brasil de uma massa de ar de origem polar que aumentou o valor da Vorticidade Potencial Absoluta e reduziu a coluna de ozônio ao valor de 256,3 UD, representando uma redução de 14,2% em relação à média climatológica do mês de setembro.

A análise sinótica troposférica de tempo foi realizada tanto para o dia 02, como para o dia 03 de setembro de 2009, uma vez que no dia 03 houve a reunião de todas as condições para ocorrência do fenômeno.

No dia 02 de setembro de 2009, Figura 4.16, o sistema sinótico de tempo observado sobre o Sul do Brasil foi a atuação de uma frente fria com baixa velocidade de deslocamento adquirindo característica estacionária.

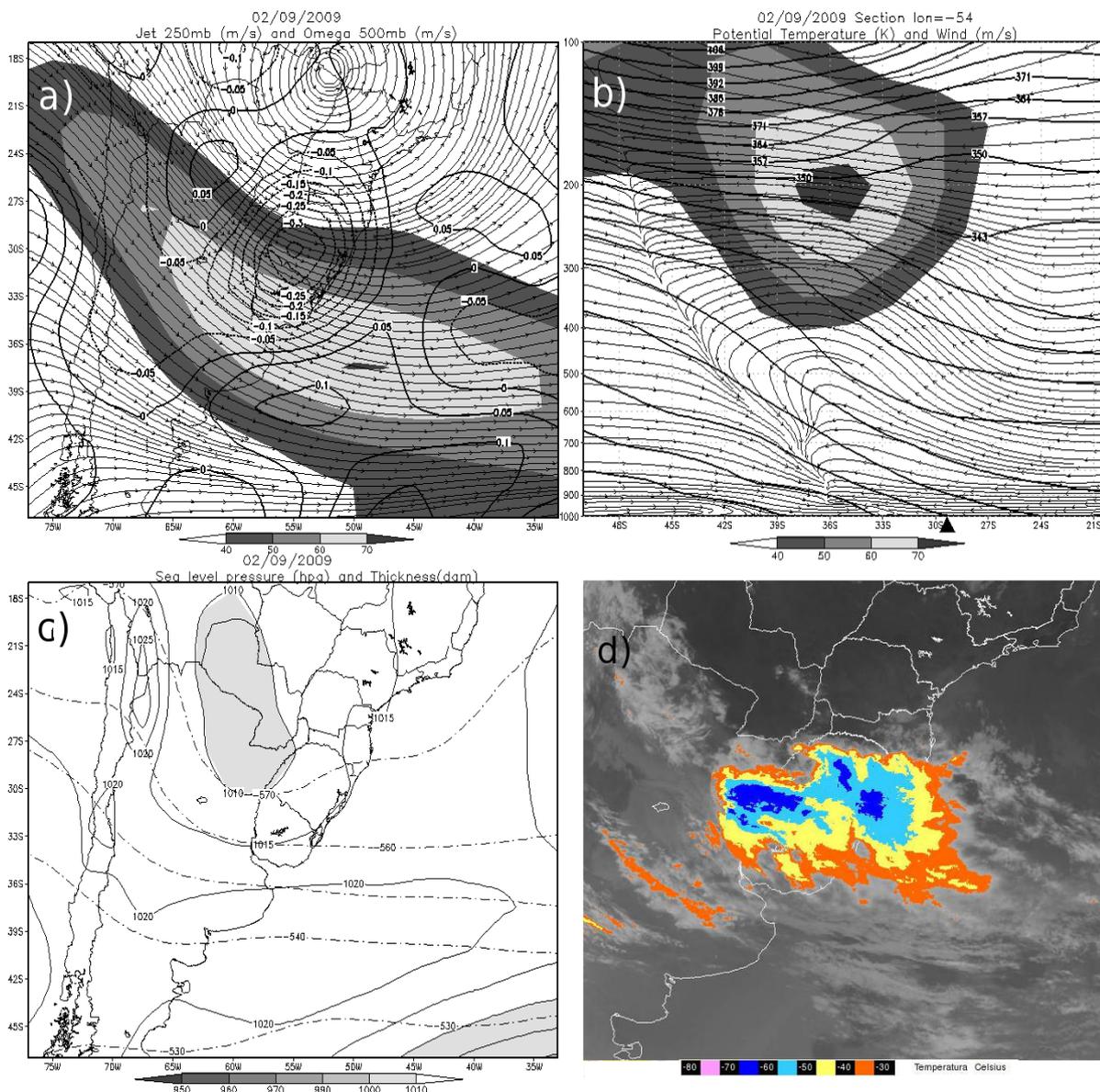


Figura 4.16: Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste (b), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (c), e imagem de satélite GOES 10 do vapor d'água as 23:30 UTC (d) do dia 02 de setembro de 2009.

A presença da região de entrada equatorial da corrente de jato polar no campo de vento em 250 hPa, juntamente com um centro de valores negativos de velocidade vertical Omega no

nível de 500 hPa (a), os quais são indicativos de uma região favorável a movimento ascendente de massas de ar, sobre o Sul do Brasil e Uruguai, deu suporte a formação de uma rampa frontal sobre estas regiões, observado no corte vertical de temperatura potencial e vento (b).

A Sul desta região, em torno de 40°S, na região de entrada polar da corrente de jato, observa-se a ocorrência de um fenômeno chamado de envelopamento da tropopausa (Holton et al., 1995; Tang et al., 2010), em resposta ao intenso movimento descendente do ar característico desta região da corrente de jato, onde a tropopausa colapsa, gerando um fluxo confluyente de massa de ar que tem duração de um a dois dias, influenciando o conteúdo de ozônio através da intrusão de ar da estratosfera para dentro da troposfera, ocorrida nesta região (Bithell et al., 2000; Gerasopoulos et al., 2006; De Bellevue et al., 2006; Sprenger et al., 2007; Nakamura, 2007; El Amraoui et al., 2010; Liu et al., 2011).

Holton et al. (1995) estudaram as Trocas entre a Troposfera e a Estratosfera (TTE) de constituintes traços através de PV em superfícies isentrópicas, relacionando estes eventos a padrões troposféricos, como ciclones desprendidos, frontogenese e envelopamento da tropopausa, em região onde há intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera. Novas perspectivas sobre este assunto foram discutidas posteriormente por Stohl et al. (2003) e Jing et al. (2005) que estimou o fluxo de ozônio que cruza a tropopausa isentropicamente e ocorrem também sobre o subtropical do Hemisfério Sul.

Observa-se, ainda, a atuação de uma região de baixa pressão em superfície e forte gradiente de espessura entre os níveis de 1000 e 500 hPa, caracterizando um sistema frontal (c). Todos estes fatores ocasionaram a formação de uma intensa nebulosidade sobre o Sul do Brasil (d).

No dia 03 de setembro de 2009, Figura 4.17, o sistema frontal deslocou-se lentamente para norte, levando consigo a corrente de jato polar, caracterizada por movimento ascendente em sua região de entrada e o centro de valores negativos de velocidade vertical omega (a), a rampa frontal no campo do corte vertical de temperatura potencial e vento (b), o sistema de baixa pressão em superfície e forte gradiente de espessura entre os níveis de 1000 e 500 hPa, que dá origem formação do jato polar (c) e a banda de nebulosidade associada ao sistema frontal, aproximando do Sul do Brasil uma região de ar estável, sem nebulosidade significativa (d).

A área de estabilidade que ingressou sobre o Sul do Brasil ao longo do dia 03 de setembro de 2009, Figura 4.17, está associada ao sistema de alta pressão pós frontal em superfície (c), que se posicionou sobre o Sul do Brasil, levando consigo a região de

envolvimento da tropopausa, a retaguarda do sistema frontal, caracterizada por uma ampla região de intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera (b). Ocorre assim o transporte do ar da região da tropopausa e da baixa estratosfera de regiões de latitudes mais elevadas, onde havia a atuação do buraco de ozônio Antártico, em direção a latitude de 30°S. Isto ocorre juntamente com a região de entrada polar da corrente de jato (a), caracterizada por movimento subsidente do ar, a qual influencia a distribuição vertical de ozônio (Bukin et. al., 2011; Manney et al., 2011a; Trickl et al., 2011).

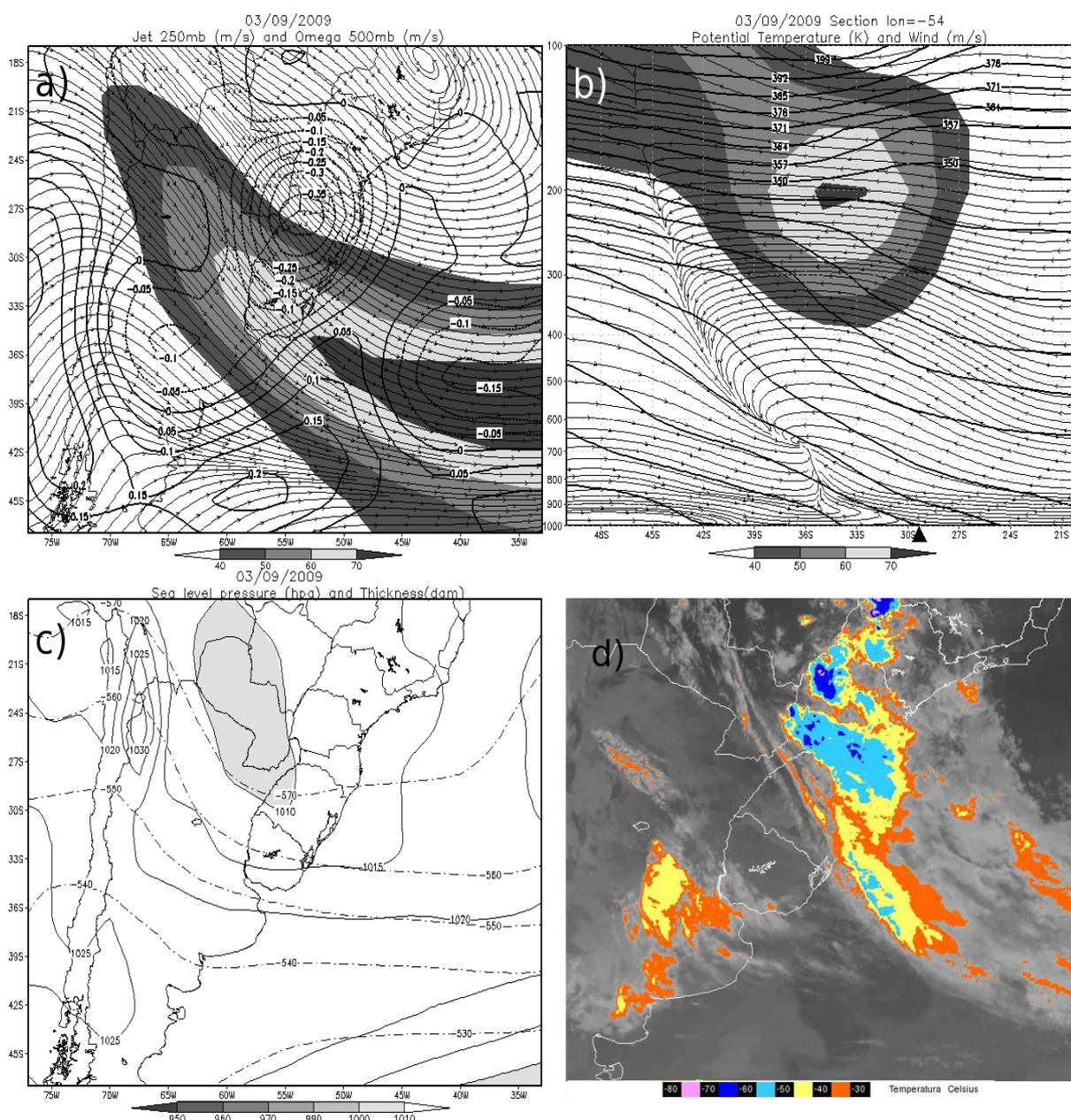


Figura 4.17: Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), corte vertical de temperatura potencial e vento para a longitude de 54° oeste (b), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (c), e imagem de satélite GOES 10 do vapor d'água às 23:45 UTC (d) do dia 03 de setembro de 2009.

Esta ampla região de subsidência, em direção ao polo, da posição da rampa frontal e sobre a região da entrada polar da corrente de jato, conhecida como envelopamento da tropopausa (Tang et al., 2010; Chen et al., 2011), que se deslocou lentamente à retaguarda do sistema frontal, em direção ao Sul do Brasil, ocasionou o evento de intrusão de ar da estratosfera para dentro da troposfera (Sthol et al., 2003) e pode ter auxiliado no transporte da massa de ar pobre em ozônio da região Antártica para a latitude de 30°S.

4.4.2 Sistemas Sinóticos de Tempo Durante a Ocorrência do Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do dia 13 de Outubro de 2010

A análise dos sistemas sinóticos de tempo durante a ocorrência do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de outubro de 2010 foi realizada por Peres et al., 2012, sendo sua análise de circulação estratosférica mostrada no apêndice A desta Dissertação, através da Figuras A.58, onde foi mostrada a chegada ao Sul do Brasil de uma massa de ar de origem polar que aumentou o valor da Vorticidade Potencial Absoluta e reduziu a coluna de ozônio ao valor de 276,2 UD, representando uma redução de 5,7% em relação à média climatológica do mês de outubro.

Devido a chegada da massa de ar pobre em ozônio ter ocorrido no dia 12 de outubro de 2012, o sistema sinótico de tempo foi analisado para este dia, sendo observado a atuação da região de entrada polar da corrente de jato subtropical no nível de 250 hPa, que exerce papel importante na distribuição vertical de ozônio (Bukin et al., 2011) e valores positivos de velocidade vertical Omega no nível de 500 hPa (a), indicando movimento de subsidência do ar sobre o Sul do Brasil, favorecendo a intrusão de ar da estratosfera para dentro da troposfera (Sthol et al., 2003).

Além disso, observa-se a atuação de um intenso sistema de alta pressão pós-frontal ao nível do mar (b) sobre o Sul do Brasil, onde a divergência do ar, característica deste tipo de sistema de pressão, deixou o Sul do Brasil com tempo estável, sem nebulosidade significativa, como visto na imagem de satélite (c) mostrado na Figura 4.18.

O sistema sinótico de tempo atuante durante o evento foi a presença de um sistema de alta pressão pós-frontal ao nível do mar que, em conjunto com a passagem da corrente de jato subtropical sobre o Sul do Brasil, causaram a intrusão de ar estratosférico para dentro da

troposfera e podem ter auxiliado no transporte da massa de ar pobre em ozônio da região Antártica em direção ao Sul do Brasil.

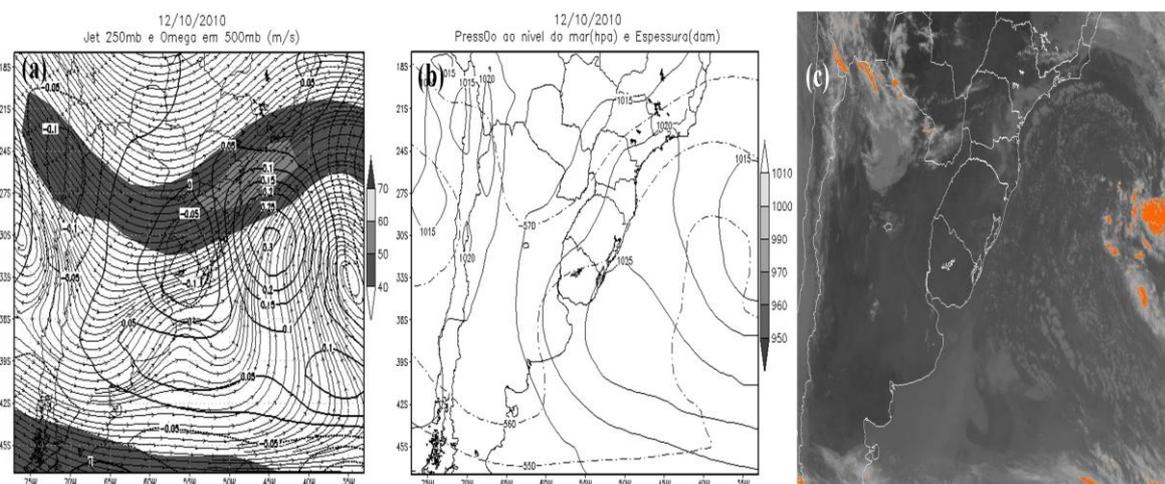


Figura 4.18: Campos médios diários de vento em 250 hPa e Omega em 500 hPa (a), pressão ao nível do mar e espessura entre 1000 e 500 hPa (b), e imagem de satélite GOES 10 realçada às 12:00 (c) do dia 12 de outubro de 2010. Fonte: Adaptado de Peres et al., 2012.

4.5 Previsão e Análise dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil do ano de 2012

O Grupo de Modelagem Atmosférica (GRUMA) da Universidade Federal de Santa Maria possui um ambiente operacional de previsão diária troposférica do tempo, onde utiliza a saída do modelo de previsão numérica de tempo Global Forecast System (GFS) na confecção dos mais variados mapas de previsão do tempo. A homepage do GRUMA e seus diversos produtos podem ser visualizados no seguinte link: <http://www.gruma.ufsm.br/gruma/>.

Utilizando esta estrutura, mapas de vorticidade potencial e vento sobre a superfície isentrópica de 620 K de temperatura potencial também passaram a ser confeccionados, a partir de maio de 2012, com o intuito de prever o transporte de massas de ar estratosféricas oriundas do Buraco de Ozônio Antártico que possivelmente pudessem atingir o Sul do Brasil e causar a ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico, visto que a vorticidade potencial serve como traçador dinâmico das massas de ar atmosféricas, inclusive estratosféricas, e seus respectivos constituintes traço, como o ozônio.

Os mapas de previsão da vorticidade potencial e vento sobre a superfície isentrópica de 620 K de temperatura potencial estão disponíveis para o público no seguinte link: <http://www.gruma.ufsm.br/gruma/gdpdt/gdpdt.html#15>.

Entre os meses de agosto e novembro, foi realizada a previsão das variáveis vorticidade potencial e vento no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, através dos mapas disponibilizados pelo GRUMA, com o intuito de prever possíveis chegadas de massas de ar pobre em ozônio sobre o Sul do Brasil.

São apresentados a seguir os dois prováveis eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, um detectado pela previsão de Vorticidade potencial e vento e o outro que não foi detectado devido a problemas técnicos no sistema computacional de *clusters* da instituição.

4.5.1 Previsão e análise do evento de 14 de Setembro de 2012

Analisando diariamente os mapas de vorticidade potencial e vento sobre a superfície isentrópica de 620 K de temperatura potencial, disponibilizados pelo GRUMA a cada 12 horas, para um período de 96 horas à frente, observou-se, a partir do dia 08 de setembro de 2012, uma provável chegada de massa de ar oriunda de altas latitudes sobre a fronteira do Brasil com o Uruguai, que ocorreria no dia 12 de setembro de 2012.

A previsão da evolução do transporte da massa de ar, utilizando vorticidade potencial e vento como traçador dinâmico estratosférico, a partir da 00 UTC do dia 08 de setembro de 2012 até as 00 UTC do dia 12 de setembro de 2012, é mostrada na Figura 4.19. Nesta Figura, pode-se observar o início do desprendimento de uma massa de ar da região antártica, com vorticidade potencial absoluta maior, que avança em direção ao litoral sul do Chile (a, b, c, d, e). Posteriormente, o campo de vento se intensifica sobre o litoral chileno (f), formando uma ampla área de circulação ciclônica que avança sobre o continente (g), atingindo o centro-norte da Argentina (h) e o Uruguai e extremo Sul do Brasil (i).

A previsão inicializada às 00 UTC do dia 09 de setembro de 2012 (a), apresentada na Figura 4.20, mostra a influência de um intenso centro de circulação anticiclônica sobre o Sul do Brasil, localizado sobre o centro do continente Sul Americano (a), seu deslocamento em direção ao oceano atlântico (b), avanço de uma região de circulação ciclônica e maiores valores de vorticidade potencial absoluta sobre o oceano Pacífico Sul (c). Este avanço

prossegue para norte e oeste (d), atingindo o continente no litoral do Chile (e), centro sul da Argentina (f), intensificando a componente de sul do vento sobre o oceano Pacífico (g), fazendo com que a massa de ar com a vorticidade potencial absoluta maior atinja o Sul do Brasil (h) e se intensifique nesta região (i).

Na análise e previsão da evolução da vorticidade potencial e vento iniciada no dia 10 de setembro de 2012, Figura 4.21, observa-se o início do desprendimento da massa de ar com vorticidade potencial maior sobre o oceano Pacífico Sul, imersa em uma área de vento em circulação cilônica (a), que se intensifica deslocando para norte (b), passando a ganhar uma componente de oeste no deslocamento (c, d), atingindo o centro-norte da Argentina (e) e Uruguai (f). O Sul do Brasil é atingido por esta massa de ar apenas no dia 13 de setembro (g), com um dia de atraso em relação ao mostrado na Figura 4.20, onde a massa de ar chegava ao Sul do Brasil ainda no dia 12. Entretanto, a massa de ar com vorticidade potencial maior somente se instala completamente sobre o Sul do Brasil no dia 14 de setembro (h, i).

A análise e previsão da evolução da vorticidade potencial e vento, iniciada no dia 11 de setembro de 2012, Figura 4.22, mostra uma massa de ar com maiores valores de vorticidade potencial absoluta imersa em uma área de vento em circulação ciclônica já atuando sobre o centro-sul da Argentina (a), intensificando em direção ao oceano Pacífico (b), ganhando componente para norte e oeste (c), intensificando os ventos de sul sobre o oceano Pacífico (d), atingindo o Uruguai (e). Esta massa de ar intensifica-se sobre o centro sul da Argentina e atinge o Sul do Brasil no dia 13 de setembro às 00 UTC (f), intensificando sua atuação sobre esta região (g) e se deslocando em direção ao oceano Atlântico (h, i).

No dia 12 de setembro de 2012, a rodada do modelo GFS para as 00 UTC não foi salva no banco de dados devido a problemas com a internet. Por isso, é analisada a rodada das 12 UTC, conforme a Figura 4.23. Nesta análise, observa-se que, praticamente, toda a região do Cone Sul da América do Sul está sobre a influência de uma ampla área de circulação ciclônica (a), onde está embebida a massa de ar com maiores valores de Vorticidade Potencial Absoluta que atingem o Uruguai (b) e posteriormente o Sul do Brasil, ao longo do dia 13 de setembro (c), intensificando sobre o Sul do Brasil e ganhando componente de oeste no deslocamento (d), indo em direção ao oceano Atlântico (e) e iniciando o processo de desintensificação (f), ganhando componente para sul (g) e extinguindo a região de circulação ciclônica (h, i).

Na véspera da ocorrência do evento, dia 13 de setembro de 2012, a análise e previsão da evolução da vorticidade potencial e vento, rodada às 00 UTC deste dia, Figura 4.24, mostra a massa de ar com maiores valores de Vorticidade Potencial Absoluta embebida em ampla

área de circulação ciclônica, atuando sobre o centro da Argentina e alcançando o Uruguai (a). Ao longo da previsão, esta massa de ar atinge o Sul do Brasil ainda no dia 13 de setembro (b), intensificando sobre o Uruguai e Sul do Brasil (c). Às 12 UTC do dia 14 de setembro, a massa de ar aparece atuando sobre os três estados da região Sul do Brasil (d), vindo a ganhar forte componente de oeste e se deslocando para o oceano Atlântico (e), perdendo a característica de circulação ciclônica (f) e perdendo completamente a característica da ocorrência do evento (g, h, i).

Finalmente no dia 14, a análise da Vorticidade Potencial Absoluta e vento da rodada realizada às 00 UTC, Figura 4.25, mostra a atuação da massa de ar, com maiores valores de Vorticidade Potencial Absoluta, embebida em ampla área de circulação ciclônica sobre o Sul do Brasil (a), que segue atuando sobre esta região e se deslocando sobre o oceano Atlântico até o dia 15 de setembro às 00 UTC (b, c), quando seu deslocamento ganha componente para sul e esta massa de ar deixa de atuar sobre o Sul do Brasil (d), atuando exclusivamente sobre o oceano Atlântico (e), evidenciando o fim da influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil neste evento (f, g, h, i).

Resumidamente, partir da análise da previsão da circulação estratosférica através dos campos de vorticidade potencial gerados pelo GRUMA, com dados da saída do modelo GFS, obteve-se indícios da chegada de uma massa de ar polar sobre o Sul do Brasil às 00 UTC do dia 12 de setembro, na previsão inicializada às 00 UTC do dia 08 de setembro, e às 12 UTC do dia 12 de setembro, na previsão inicializada às 00 UTC do dia 09 de setembro. Na previsão inicializada às 00 UTC do dia 10 de setembro, a massa de ar polar atinge o Sul do Brasil às 00 UTC do dia 13 de setembro, mostrando um atraso de um dia em relação à previsão inicializada às 00 UTC do dia 08 de setembro, vindo o mesmo a ocorrer na previsão inicializada às 00 UTC do dia 11 de setembro.

A partir da previsão inicializada às 12 UTC do dia 12 de setembro, observa-se a chegada sobre o Sul do Brasil da massa de ar polar estratosférica às 12 UTC do dia 13 de setembro. Enquanto, na previsão inicializada às 00 UTC do dia 13 de setembro, observa-se a chegada da massa de ar polar às 12 UTC do mesmo dia. Já a análise da previsão iniciada às 00 UTC do dia 14 de setembro observa a atuação da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil neste mesmo horário.

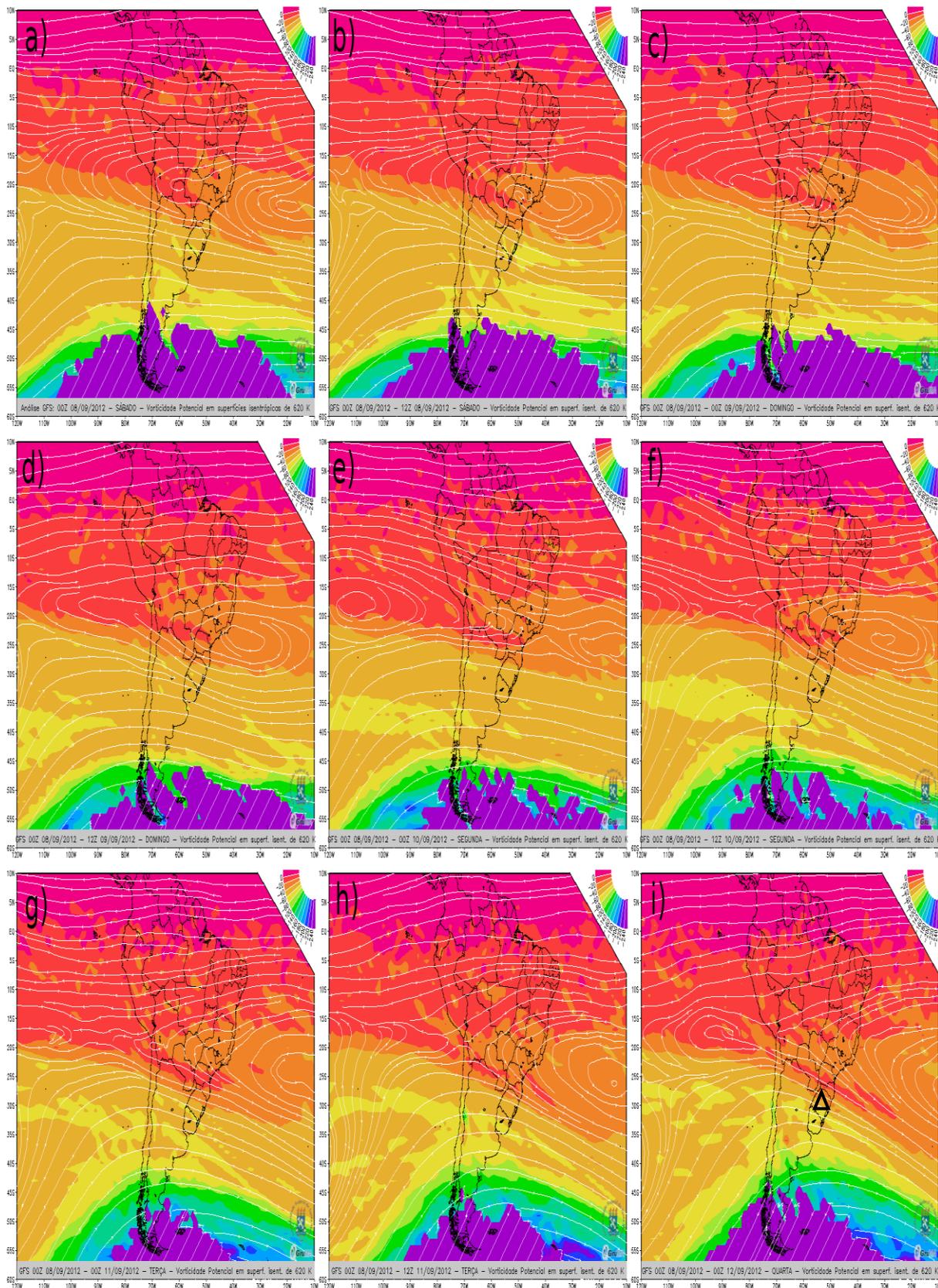


Figura 4.19: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 08 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

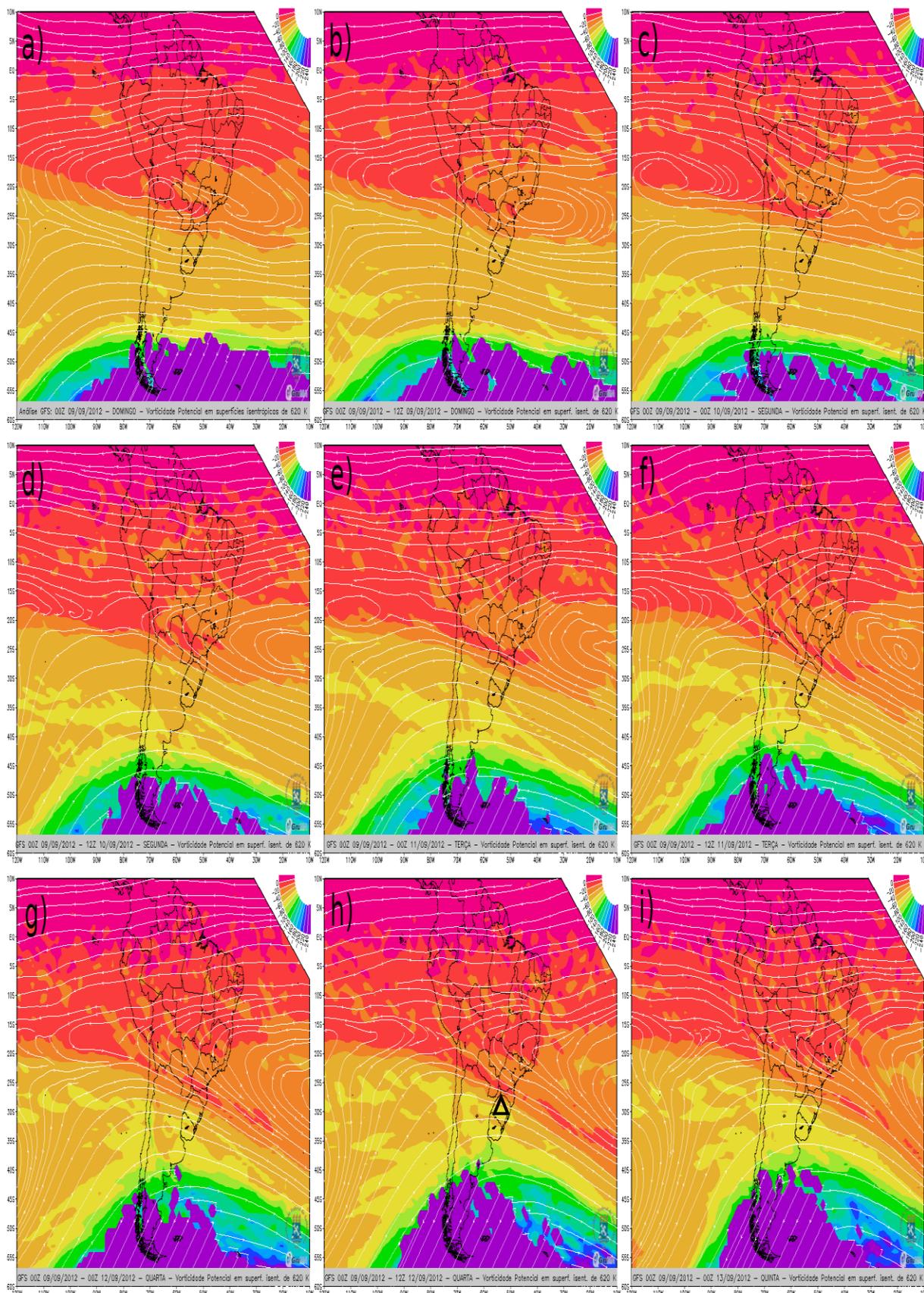


Figura 4.20: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 09 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

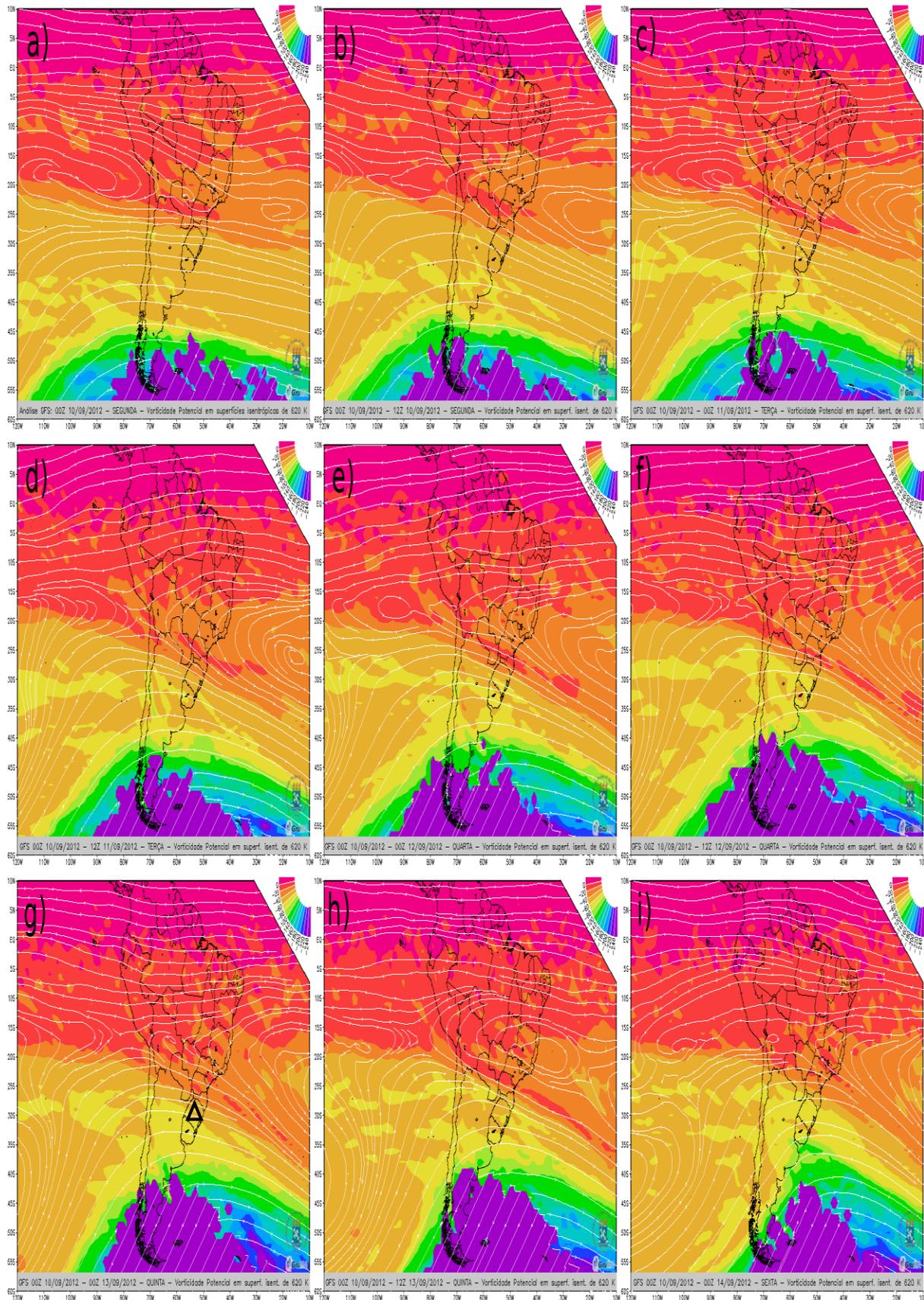


Figura 4.21: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 10 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

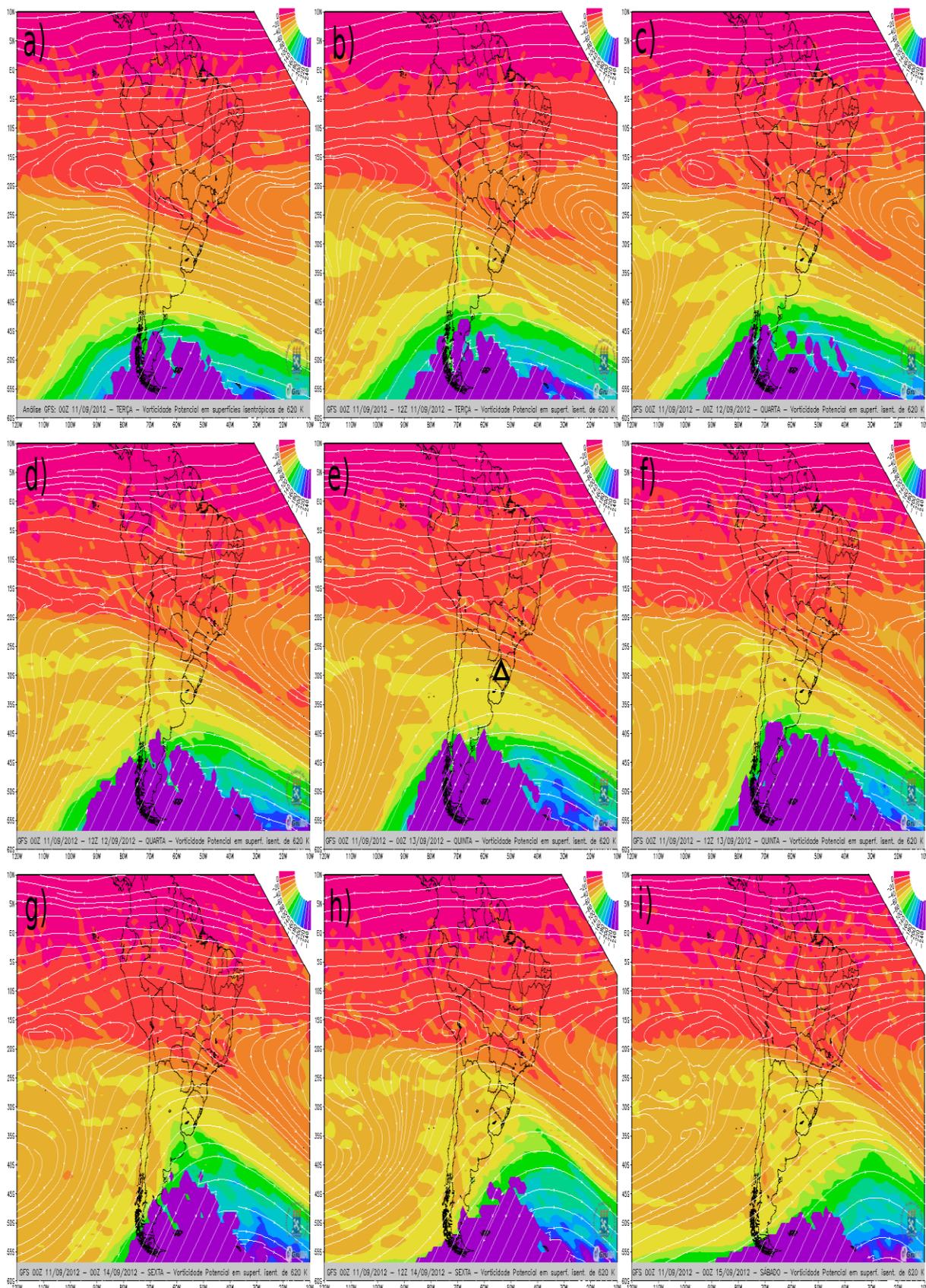


Figura 4.22: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 11 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

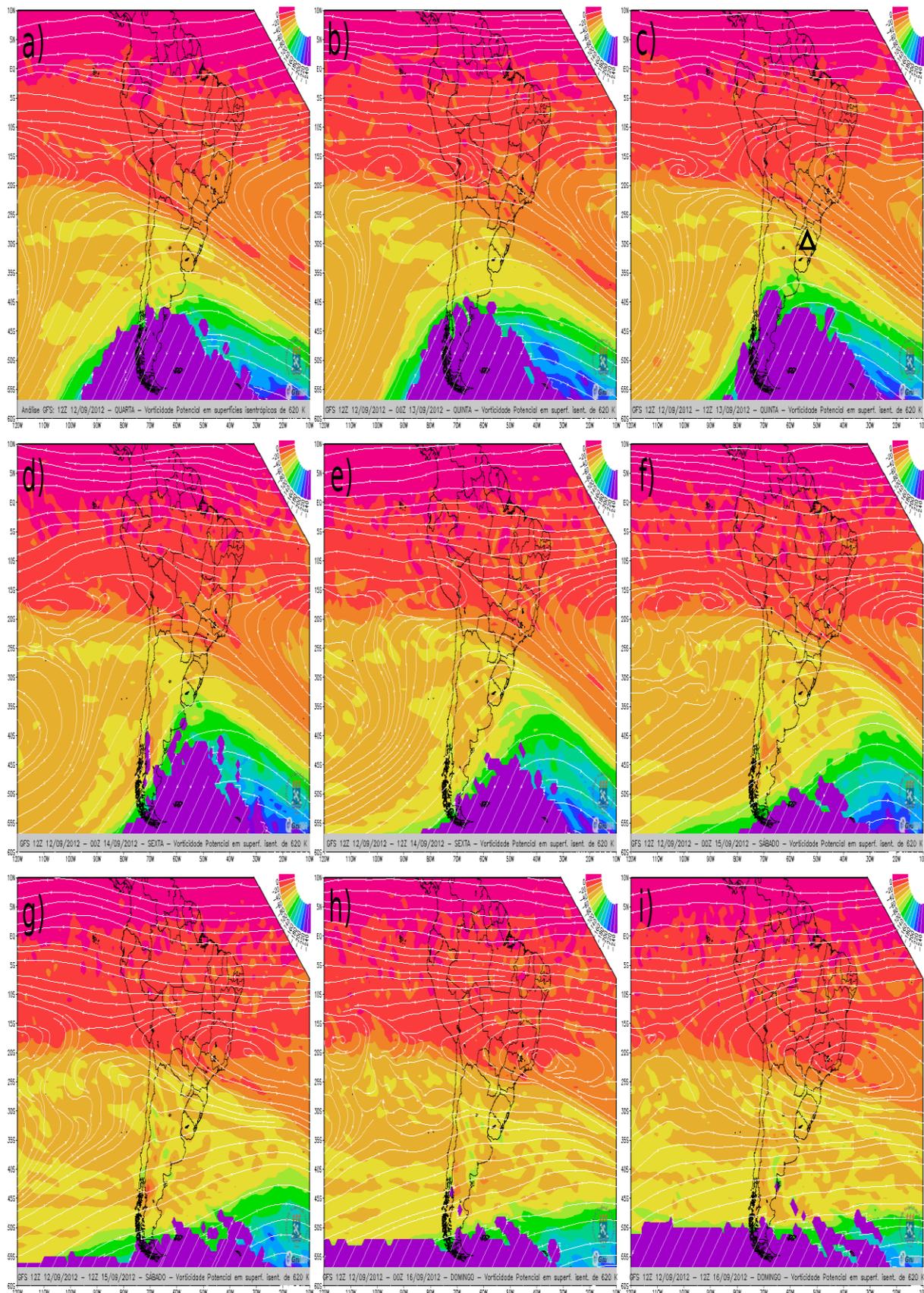


Figura 4.23: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 12 de setembro de 2012 às 12:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

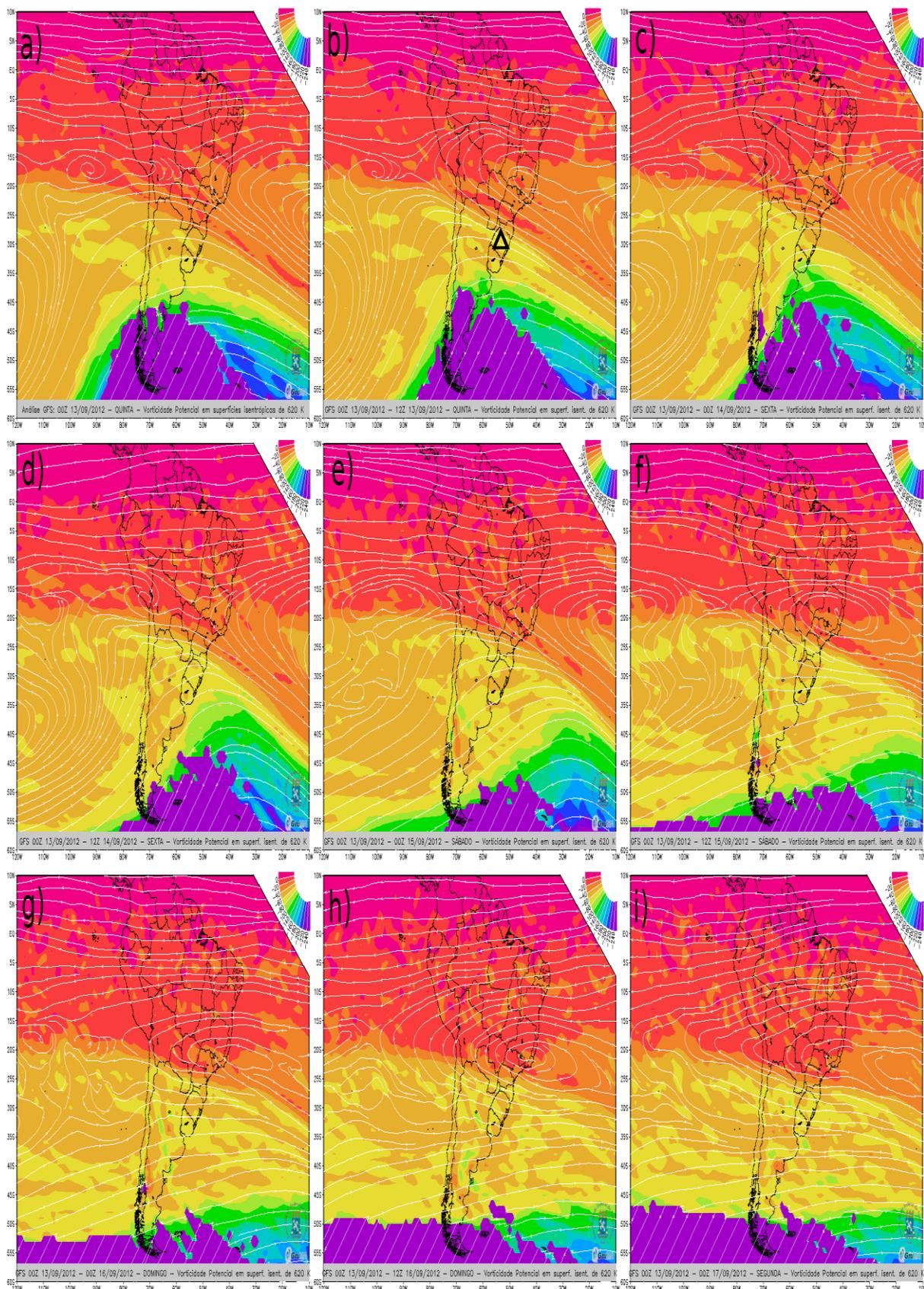


Figura 4.24: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 13 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

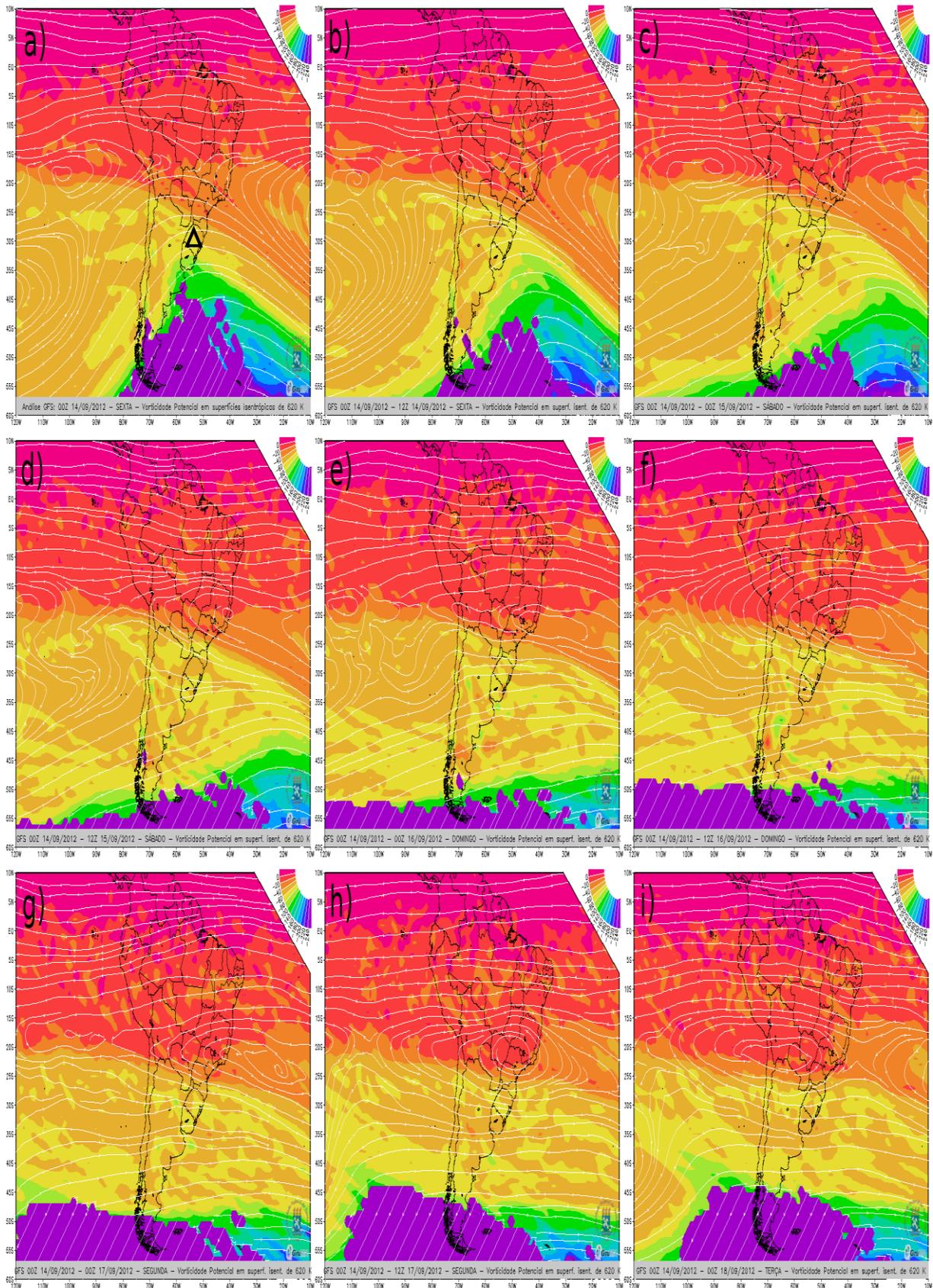


Figura 4.25: Mapas de Vorticidade Potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados de saída do modelo GFS no dia 14 de setembro de 2012 às 00:00 UTC. Análise (a) e previsão para 12 (b), 24 (c), 36 (d), 48 (e), 60 (f), 72 (g), 84 (h) e 96 (i) horas à frente. O triângulo preto indica o momento da chegada da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

A previsão da evolução da vorticidade potencial sobre a superfície isentrópica mostrou-se eficaz na identificação do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de setembro de 2012, conforme mostrado nas Figuras 4.19 a 2.25. Apesar do atraso apresentado pelo modelo GFS, onde a chegada da massa de ar de origem polar sobre o sul do Brasil era esperada para o dia 12 de setembro, a partir da previsão inicializada no dia 08 de setembro, foi possível prever que haveria a chegada do evento, que veio a ocorrer realmente somente no dia 14 de setembro, conforme os dados da coluna total de ozônio e de reanálise da NCEP/NCAR.

Analisando os dados da coluna total de ozônio, para o período entre os dias 10 e 18 de setembro de 2012, Figura 4.26, observa-se uma queda temporária no conteúdo de ozônio abaixo do limite de média mensal climatológica do período entre 1979 e 2011 menos 1,5 desvio padrão, onde o valor mais baixo no conteúdo de ozônio foi alcançado no dia 14 de setembro, de 267,8 UD, representando uma redução de 10,4% em relação à média climatológica do mês de setembro, $298,87 \pm 9,8$ DU, aumentando seus valores nos dias seguintes.

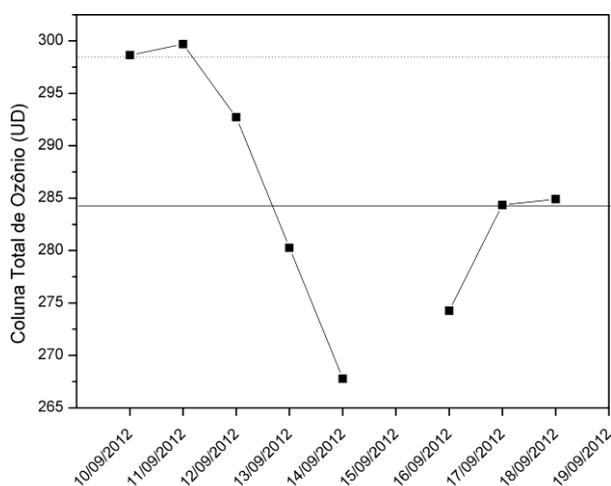


Figura 4.26: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 10 e 18 de setembro de 2012 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de setembro.

A partir dos mapas de vorticidade potencial no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial confeccionados com dados do NCEP/NCAR, observa-se na Figura 4.27, no dia 13 de setembro de 2012 (a), a massa de ar com vorticidade potencial absoluta maior já se encontrava sobre o centro-norte da Argentina e Uruguai. Os ventos predominantemente de Sul, envoltos em uma circulação ciclônica, proporcionaram o avanço desta massa de ar que se instalou definitivamente sobre o Sul do Brasil no dia 14 de setembro

de 2012 (b). A trajetória retroativa da massa de ar, confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA, do dia 14 de setembro (c), e a imagem do conteúdo de ozônio do satélite OMI, do dia 13 de setembro (d), complementam a análise, evidenciando a origem polar da massa de ar e a conexão entre o Buraco de Ozônio com o Sul do Brasil durante o evento que ocasionou a queda temporária na coluna de ozônio, confirmando a ocorrência do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de setembro de 2012.

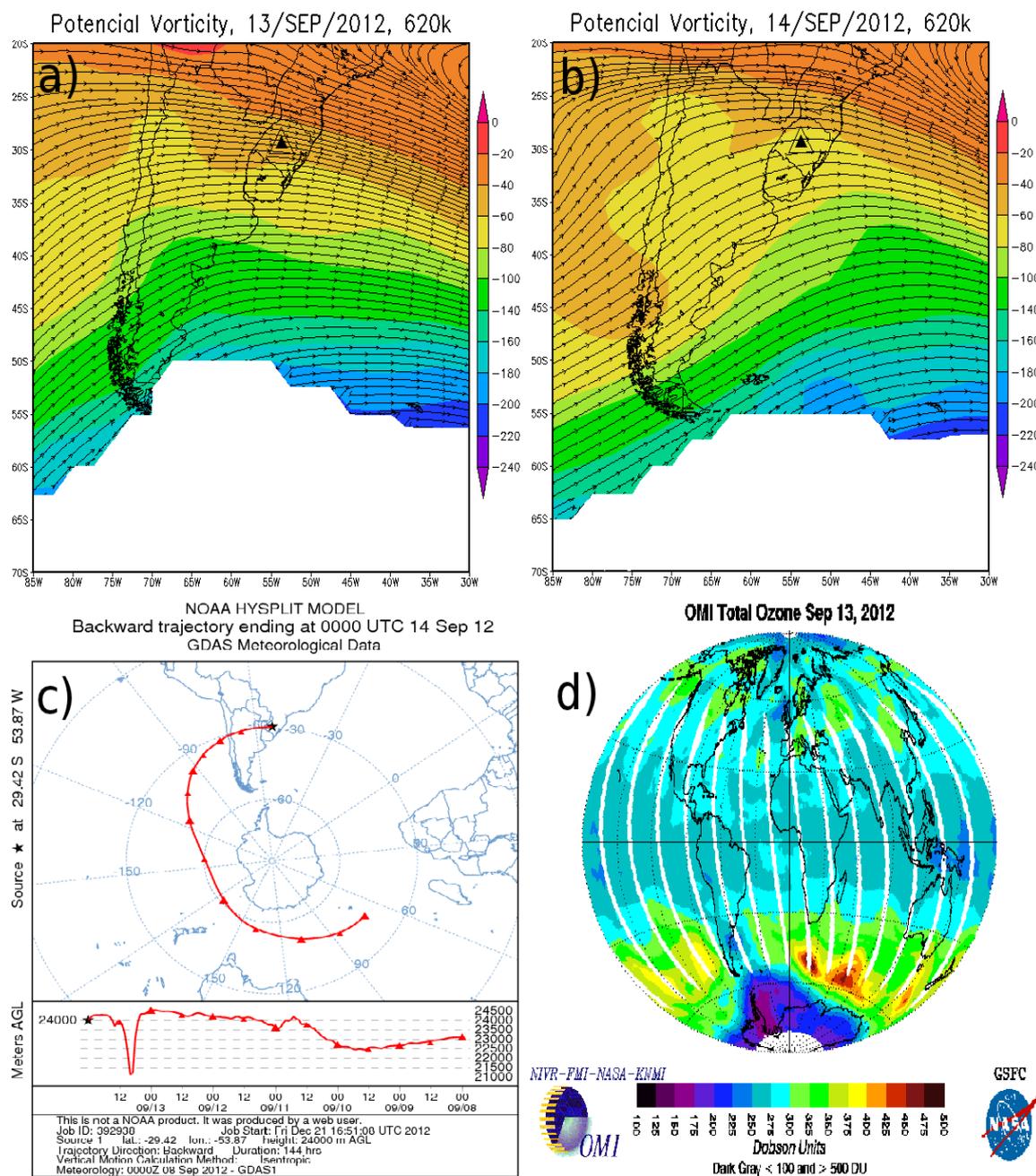


Figura 4.27: Vorticidade Potencial e vento para 13 (a) e 14 (b) de setembro de 2012 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 14 e 13 de setembro de 2012, respectivamente.

4.5.2 Análise do Evento de 14 de Outubro de 2012

De maneira análoga a realizada no evento anterior, foi realizada, de forma eficaz, a previsão do transporte das massas de ar estratosféricas através da vorticidade potencial com dados da saída do modelo GFS confeccionados pelo GRUMA. Entretanto, por motivos de problemas computacionais no *cluster* da instituição, os mapas não puderam ser salvos e, por este motivo, é apresentado neste item somente a análise do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de outubro de 2012.

Os dados da coluna total de ozônio para o período entre os dias 11 e 18 de outubro de 2012 foram analisados, Figura 4.28, observando-se uma queda temporária no conteúdo de ozônio abaixo do limite de média mensal climatológica, do período entre 1979 e 2011, menos 1,5 desvio padrão, que alcançou, no dia 14 de setembro, dia da menor queda, o valor de 252,6 UD, representando uma redução de 13,7% em relação à média climatológica do mês de outubro, $292,7 \pm 9,85$ UD, aumentando seus valores nos dias seguintes.

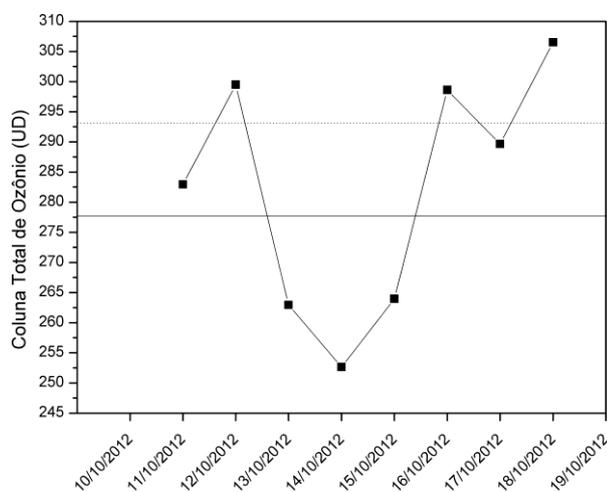


Figura 4.28: Valores da coluna total de ozônio entre os dias 11 e 18 de outubro de 2012 para a região do Observatório Espacial do Sul. Linha tracejada representa o valor da média climatológica e a linha contínua representa valor limite de média climatológica menos 1,5 desvios padrão para o mês de outubro.

Os mapas de vorticidade potencial no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, confeccionados com dados do NCEP/NCAR, Figura 4.29, mostram que, no dia 13 de outubro de 2012 (a), uma intensa massa de ar com vorticidade potencial absoluta maior encontrava-se sobre o centro-norte da Argentina e Uruguai e os ventos predominantemente de Sul, envoltos em uma circulação ciclônica, proporcionaram o avanço desta massa de ar sobre o Sul do Brasil no dia 14 de outubro de 2012 (b). A trajetória retroativa da massa de ar,

confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA, do dia 14 de setembro (c), mostra sua passagem por cima do continente Antártico e a imagem do conteúdo de ozônio do satélite OMI, do dia 13 de setembro (d), complementa a análise, mostrando a conexão entre o Buraco de Ozônio com o Sul do Brasil, comprovando a origem polar da massa de ar pobre em ozônio que atingiu o Sul do Brasil e ocasionou a queda temporária na coluna de ozônio, confirmando a ocorrência do evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil no dia 14 de outubro de 2012.

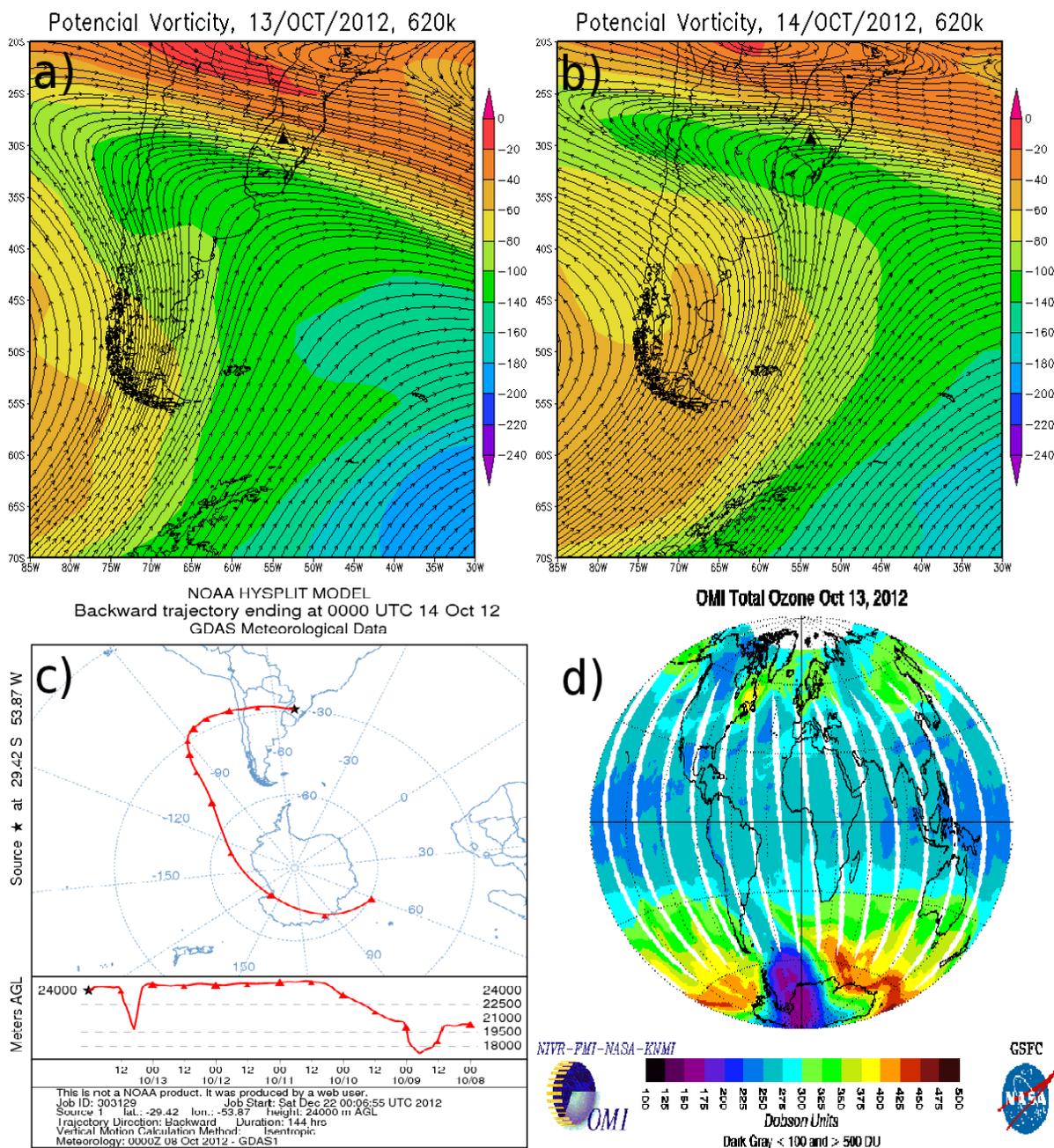


Figura 4.29: Vorticidade Potencial e vento para 13(a) e 14 (b) de outubro de 2012 a 620K e imagem do satélite OMI (c) para 13 de outubro de 2012.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram analisados os dados da média diária da coluna total de ozônio obtidos através de Espectrofotômetros Brewer, pelos instrumentos de satélite *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) e *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), sobre a região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTI (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m).

A comparação entre os dados obtidos pelo instrumento de solo e pelos instrumentos de satélite mostra um bom acordo entre os pares de dados, com R^2 maior que 0,99 e RMSE menor que 3%, indicando que não existe discrepância significativa entre os dados de satélite e de superfície sobre o Sul do Brasil. O parâmetro MBE indica que os dados do TOMS/Nimbus 7, TOMS/Meteor 3 e OMI subestimam os dados do Espectrofotômetro Brewer, enquanto que os dados do TOMS/Earth Prob superestimam os dados de Brewer. O bom acordo entre os dados de Brewer e de satélite proporcionaram a complementação da série de dados médios diários da coluna total de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul, entre o período de 1979 e 2011, utilizando preferencialmente dados do Espectrofotômetro Brewer e complementando, na sua falta, com dados dos diferentes instrumentos de satélite.

A série de dados confeccionada serve para o monitoramento da coluna total de ozônio sobre o Sul do Brasil, sendo suas médias mensais climatológicas e seus respectivos desvios padrões calculados. O comportamento sazonal da coluna total de ozônio mostra um máximo atingido na primavera, em setembro de cada ano, e mínimos no outono, em abril. Este comportamento é normal para a latitude de 30°S, onde se localiza o Observatório Espacial do Sul.

A influência do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, através da ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico, entre o período de 1979 e 2011, foi verificada observando-se os dias de queda no conteúdo de ozônio através de um limite estatístico, onde o valor da coluna total de ozônio deveria ser menor que o valor da média mensal climatológica menos 1,5 do seu respectivo desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$). Para os meses de foco da análise, de agosto a novembro, foi possível observar o indício da origem polar da massa de ar pobre em ozônio, através do aumento de vortacidade potencial absoluta nos níveis isentrópicos de 620, 630 e 640 K de temperatura potencial, e confirmar esta origem polar através de trajetórias retroativas da massa de ar confeccionadas pelo modelo Hysplit da NOAA e pelas imagens do conteúdo de ozônio dos instrumentos de satélite TOMS e OMI.

A metodologia mencionada acima se mostrou eficaz, pois, no período entre 1979 e 2011, foram identificados 66 eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, com uma queda média de $8,66 \pm 3,13$ % no conteúdo de ozônio durante a ocorrência do evento, sendo que destes, 83,33% foram observados no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, nível preferencial de transporte das massas de ar estratosféricas pobre em ozônio que atingem o Sul do Brasil oriundas do Buraco de Ozônio Antártico. Identificou-se também a ocorrência de nove eventos durante o mês de agosto, vinte eventos no mês de setembro, trinta eventos no mês de outubro e sete eventos no mês de novembro.

A maior parte dos eventos, 44% dos casos, são de pequena intensidade, com quedas inferiores a 9% na coluna total do ozônio, em relação a sua respectiva média mensal climatológica. Entretanto, quedas de grande intensidade, superiores a 13 % em relação a sua respectiva média mensal climatológica, ocorreram somente em 9% dos eventos.

O padrão médio de circulação estratosférica, confeccionado através dos campos médios e de desvio padrão da vorticidade potencial, no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, indica que a massa de ar com maiores valores de vorticidade potencial absoluta passa pelo centro-norte da Argentina dois dias antes da ocorrência do evento de Efeito Secundário sobre o Sul do Brasil, deslocando-se para norte e atingindo o Uruguai um dia antes da ocorrência do evento e causando um aumento de vorticidade potencial absoluto sobre o Sul do Brasil de 20 unidades no dia do evento, permanecendo sobre o Sul do Brasil até dois dias depois do evento.

O campo de desvio padrão mostra que, um dia antes e no dia da ocorrência do evento, ocorrem os maiores valores de desvio padrão sobre o Sul do Brasil, entre 12 e 15 $\text{mKs}^{-2}\text{hPa}^{-1}$, evidenciando que a escolha da escala de 20 em 20 unidades de vorticidade potencial é eficaz na identificação de transporte de massas de ar estratosféricas sobre o Sul do Brasil.

Analisando a condição sinótica troposférica dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico ocorridos nos dias 03 de setembro de 2009 e 13 de outubro de 2010, observou-se que ambos os eventos ocorreram em uma situação pós-frontal sobre o Sul do Brasil, associada à passagem da região de entrada polar da corrente de jato subtropical ou polar, caracterizada pela ocorrência de evento de quebra da tropopausa onde ocorre intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera, e avanço de um sistema de alta pressão pós-frontal que impede a formação de nebulosidade significativa.

O deslocamento da corrente de jato de latitudes maiores, em direção ao Sul do Brasil, pode ser o principal mecanismo meteorológico troposférico que auxilia no transporte das

massas de ar estratosféricas pobre em ozônio durante a ocorrência de eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil.

A utilização dos dados do modelo GFS na confecção de mapas de vorticidade potencial, realizada pelo GRUMA, mostrou-se eficaz na previsão de eventos de transporte de massas de ar estratosférica de origem polar sobre o Sul do Brasil. Foi possível verificar indícios da chegada da massa polar com, pelo menos, quatro dias de antecedência, apesar de mostrar um atraso de dois dias na chegada real do evento. No evento ocorrido no dia 14 de setembro de 2012, observou-se indícios da chegada sobre o Sul do Brasil de uma massa de ar estratosférica de origem polar no dia 12 de setembro, a partir da rodada do modelo GFS desenvolvida no dia 08 de setembro. Durante os dias subsequentes, foi possível verificar o dia correto da chegada do evento, sendo observada, na análise da previsão inicializada às 00 UTC do dia 14 de setembro, a atuação da massa de ar de origem polar sobre o Sul do Brasil.

A análise realizada através dos dados da coluna total de ozônio, dos mapas de vorticidade potencial confeccionados com dados do NCEP/NCAR, da trajetória retroativa do modelo Hysplit da NOAA e pela imagem do conteúdo de ozônio do instrumento de satélite OMI, mostraram que a massa de ar pobre em ozônio chegou ao Sul do Brasil somente no dia 14 de setembro de 2012 confirmando a ocorrência do evento, que teve queda de 10,4% em relação à média climatológica do mês de setembro.

Outro evento confirmado de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, ocorrido no ano de 2012, foi o do dia 14 de outubro, onde a queda na coluna total de ozônio em relação à média climatológica do mês de outubro foi de 13,7%, tendo a origem polar da massa de ar comprovada pelo aumento na vorticidade potencial absoluta, pela trajetória retroativa da massa de ar do modelo Hysplit e pela imagem do conteúdo de ozônio do instrumento de satélite OMI, mostrando a existência de uma conexão entre o Buraco de Ozônio Antártico e o Sul do Brasil.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas sugestões a serem exploradas em trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia utilizada na identificação dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil para outras regiões do país, como sobre o Sudeste e Centro Oeste do Brasil e outras regiões do planeta, como o Sul do

Continente Africano, Austrália e Nova Zelândia no Hemisfério Sul e regiões de médias latitudes no Hemisfério Norte.

- Aplicar técnicas climatológicas, como análise de componentes principais, análise de *cluster* e EOF nos campos estratosféricos de vorticidade potencial e troposféricos de condição sinótica, durante os eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, a fim de confeccionar um modelo conceitual de circulação troposférica e estratosférica.
- Validar a previsão dos campos de vorticidade potencial confeccionados operacionalmente pelo GRUMA com dados da saída do modelo GFS, através da comparação quantitativa com os campos confeccionados com dados do NCEP/NCAR.
- Realizar a simulação numérica dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil, com o intuito de ajustar um modelo que possa prever eventos futuros de transporte de massas de ar pobre em ozônio oriundas do Buraco de Ozônio Antártico em direção ao Sul do Brasil.
- Realizar previsões climáticas da ocorrência de eventos futuros de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Brasil utilizando modelos globais de clima como o SPEEDY MODE do ICTP-TRIESTE da Itália, ou o modelo regional WRFV3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHTERT, P.; ANDERSSON, M. K.; KHOSRAWI, F.; GUMBEL, J. On the linkage between tropospheric and Polar Stratospheric clouds in the Arctic as observed by space-borne lidar. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 12, n. 8, p. 3791-3798, 2012.

ALBERS, J. R.; NATHAN, T. R. Pathways for Communicating the Effects of Stratospheric Ozone to the Polar Vortex: Role of Zonally Asymmetric Ozone. **J. Atmos. Sci.**, v. 69 (3), p. 785-801, 2012.

ALEXANDER, S. P.; KLEKOCIUK, A. R.; PITTS, M. C.; MCDONALD, A. J.; Arevalo-Torres, A. The effect of orographic gravity waves on Antarctic polar stratospheric cloud occurrence and composition. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 116, n. D06109, 2011.

ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; MORAES, O. L. L. Serial upstream-propagating mesoscale convective system events over Southeastern South America. **Mon. Weather Rev.**, v. 136, p. 3087-3105, 2008.

ANCELLET, G.; BEEKMANN, M.; PAPAYANNIS, A. Impact of a Cutoff low Development on Downward Transport of Ozone in the Troposphere. **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. D2, p. 3451-3468, 1994.

ANTÓN, M.; LÓPEZ, M.; VILAPLANA, J. M.; KROON, M.; MCPETERS, R.; BAÑÓN, M.; SERRANO, A. Validation of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at the Iberian Peninsula. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 114, n. D14307, 2009.

ANTÓN, M.; VILAPLANA, J. M.; KROON, M.; SERRANO, A.; PARIAS, M.; CANCELLO, M. L.; DE LA MORENA, B. A. The Empirically Corrected EP-TOMS Total Ozone Data Against Brewer Measurements at El Arenosillo (Southwestern Spain). **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 48, n.7, p. 3039-3045, 2010.

ATBD-OMI-01 "OMI Instrument, Level 0-1b **Processor, Calibration and Operations,**" in **OMI Algorithm Theoretical Basis Document**, vol. I, Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Cent.2002. [Online]. Available: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/OMI/ATBD-OMI-01.pdf.

AUSTIN, J.; SHINDELL, D.; BEAGLEY, S. R.; BRÜHL, C.; DAMERIS, M.; MANZINI, E.; NAGASHIMA, T.; NEWMAN, P.; PAWSON, S.; PITARI, G.; ROZANOV, E.; SCHNADT, C.; SHEPHERD, T. G. Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 3, p. 1-27, 2003.

BATES, D. R.; NICOLET, M. Atmospheric hydrogen. **Publ. Astron. Soc. Pac.**, v. 62, p. 106-110, 1950.

BENCHERIF, H.; PORTAFAIX, T.; BARAY, J. L.; MOREL B.; BALDY S.; LEVEAU, J.; HAUCHECORNE, A.; KECKHUT, P.; MOORGAWA A.; MICHAELIS, M. M.; DIAB, R. LIDAR observations of lower stratospheric aerosols over South Africa linked to large scale transport across the southern subtropical barrier. **J. Atmos. Sol-Terr. Phys.**, v. 65, p. 707–715, 2003.

BENCHERIF, H.; EL AMRAOUI, L.; KIRGIS, G.; DE BELLEVUE, J. L.; HAUCHECORNE, A.; MZÉ, N.; PORTAFAIX, T.; PAZMINO, A.; GOUTAIL, F. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4°S, 70.3°E). **Atmos. Chem. Phys.**, v. 11, p. 363–373, 2011.

BHARTIA, P. K.; WELLEMEYER, C. **TOMS-V8 total O3 algorithm, in OMI Algorithm Theoretical Basis Document**, P. K. Bhartia, Ed., vol. II. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Cent., 2002, pp. 15–31. OMI Ozone Products, ATBD-OMI-02. [Online]. Available: http://www.knmi.nl/omi/documents/data/OMI_ATBD_Volume_2_V2.pdf

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiskes Publikasjoner**, v.1, n. 2, p. 1–8, 1919

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the polar frontal theory of atmospheric circulation. **Geofysiskes Publikasjoner**, v. 3, n. 1, p. 3–18, 1922.

BITHELL, M.; VAUGHAN, G.; GRAY, J. J. Persistence of stratospheric ozone layers in the troposphere. **Atmos. Environ.**, v. 34, n. 16, p. 2563–2570, 2000.

BLACKMON, M.L., WALLACE, J.M, LAU, N.C, MULLEN, S.L. An observational study of the northern hemisphere wintertime circulation. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 34, n. 7, p. 1040-1053, Jul.1977.

BLESSMANN, D.; WOHLTMANN, I.; LEHMANN, R.; REX, M. Persistence of ozone anomalies in the Arctic stratospheric vortex in autumn. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 12, n. 11, p. 4817-4823, 2012.

BODEKER, G. E.; GARNY, H.; SMALE, D.; DAMERIS, M.; DECKERT, R. The 1985 Southern Hemisphere mid-latitude total column ozone Anomaly. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 7, p. 5625–5637, 2007.

BRACCI, A.; CRISTOFANELLI, P.; SPRENGER, M.; BONAFE, U.; CALZOLARI, F.; DUCHI, R.; LAJ, P.; MARINONI, A.; ROCCATO, F.; VUILLERMOZ, E.; BONASONI, P. Transport of Stratospheric Air Masses to the Nepal Climate Observatory-Pyramid (Himalaya; 5079 m MSL): A Synoptic-Scale Investigation. **J Appl. Meteorol. Clim.**, v. 51, n. 8, p. 1489-1507, 2012.

BRACEGIRDLE, T. J. The seasonal cycle of stratosphere-troposphere coupling at southern high latitudes associated with the semi-annual oscillation in sea-level pressure. **Clim. Dynam.**, v. 37, p. 2323–2333, 2011.

BRAESICKE P.; BRUEHL, C.; DAMERIS, M.; DECKERT, R.; EYRING, V.; GIORGETTA, M. A.; MANCINI, E.; MANZINI, E.; PITARI, G.; PYLE, J. A.; STEIL, B. A model intercomparison analysing the link between column ozone and geopotential height anomalies in January. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 8, n. 9 p. 2519-2535, 2008.

BRASSEUR, G.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the Middle Atmosphere**, 2nd ed., D. Reidel, Norwell, Mass., 1986.

BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v.75, p. 351-363, 1949.

BRINKSMA, E. J.; MEIJER, Y. J.; CONNOR, B. J.; MANNEY, G. L.; BERGWERFF, J. B.; BODEKER, G. E.; BOYD, I. S.; LILEY, J. B.; HOGERVORST, W.; HOVENIER, J. W.; LIVESEY, N. J.; SWART, D. P. J. Analysis of record-low ozone values during the 1997 winter over Lauder, New Zealand. **Geophys. Res. Lett.**, v. 25, n. 15, p. 2785-2788, 1998.

BRITTO, F. P.; SARAIVA, J. M. B. Estudo da Precipitação Associada aos sistemas frontais na cidade do Rio Grande na estação de Inverno. **Geografia em Atos**, UNESP-Presidente Prudente, v. 1, n. 3, p. 107-122, 2001.

Bowman, K. P. Large-scale isentropic mixing properties of the Antarctic polar vortex from analyzed winds. **J. Geophys. Res.**, v. 98, p. 23013-23027, 1993.

BUKIN, O. A.; SUAN AN, N.; PAVLOV, A. N.; STOLYARCHUK, S. Y.; SHMIRKO, K. A. Effect that Jet Streams Have on the Vertical Ozone Distribution and Characteristics of Tropopause Inversion Layer. **Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 47, n. 5, p. 610-618, 2011.

BUSINGER, S.; REED, R. J. Cyclogenesis in cold air masses. **Weather Forecast.**, v.4, p. 133-156, 1989.

CAETANO, L. S. Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antárticosobre a Região Sul do Brasil. 2008. Trabalho de Graduação em Física (Monografia). Universidade Federal de Santa Maria. 2008.

CALLIS, L. B.; M. NATARAJAN. The Antarctic ozone minimum: Relationship to odd nitrogen, Odd chlorine, the final warming, and the 11-year solar cycle, **J. Geophys. Res.**, v. 91, n. 10, p. 771-10,798, 1986.

CANZIANI, P. O.; COMPAGNUCCI, R. H.; BISCHOFF, A. S.; LEGNANI, W. E. A study of impacts of tropospheric synoptic processes on the genesis and evolution of extreme total ozone anomalies over southern South America. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 107, n. D24, p. ACL 2-1-ACL 2-25, 2002.

CANZIANI, P. O.; LEGNANI, W. E. Tropospheric-stratospheric coupling: Extratropical synoptic systems in the lower stratosphere, Part a. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 129, n. 592, p. 2315-2329, 2006.

CANZIANI, P. O.; MALANCA, F. E.; AGOSTA, E. A. Ozone and upper troposphere/lower stratosphere variability and change at southern midlatitudes 1980-2000: Decadal variations. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 113, n. D20101, 2008.

CAMPETELLA, C.; POSSIA, N. Upper-level cut-off lows in southern South America. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 96, n. 1-2, p. 181-191, 2006.

CASICCIA, C.; ZAMORANO, F.; HERNANDEZ, A. Erythemal irradiance at the Magellan's region and Antarctic ozone hole 1999-2005. **Atmosfera**, v. 21 n.1, p. 1-12, 2008.

CHEN, X. L.; MA, Y. M.; KELDER, H.; SU, Z.; YANG, K. On the behaviour of the tropopause folding events over the Tibetan Plateau. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 11, p. 5113-5122, 2011.

CHIPPERFIELD, M. P.; JONES, R. L. Relative influences of atmospheric chemistry and transport on Arctic ozone trends. **Nature**, v. 400, p. 551-555, 1999.

CHUBACHI, S. Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. **Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jpn. Spec.**, v. 34, p. 13-20, 1984.

CHUBACHI, S.; MIYAGAWA, K.; MAKINO, Y. A case study of the low total ozone event over Europe on 14 February 2001. **Int. J. Remote Sens.**, v. 26, n. 16, p. 3423-3431, 2005.

CLAIN, G.; BARAY, J. L.; DELMAS, R.; KECKHUT, P.; CAMMAS, J. P. A lagrangian approach to analyse the tropospheric ozone climatology in the tropics: Climatology of stratosphere-troposphere exchange at Reunion Island. **Atmos. Environ.**, v. 44, n. 7, p. 968-975, 2010.

CRUTZEN, P. J. The influence of nitrogen oxide on the atmospheric ozone content. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 96, p. 320-327, 1970.

CRUTZEN, P. J. Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen-oxide atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 76, p. 7311-7327, 1971.

DAMIÃO, M. C. M. **Bloqueios Atmosféricos sobre o Hemisfério Sul: Diagnóstico, Impacto Climático e Mecanismos físicos associados**, Tese de Doutorado, Universidade de Lisboa, 250 pg, 2007.

DAMIÃO, M. C. M.; TRIGO, R. M.; CAVALCANTI, I. F. A.; DA CAMARA, C. C. Blocking Episodes in the Southern Hemisphere: Impact on the Climate of Adjacent Continental Areas, **Pure and Applied Geophysics**, v. 165, p. 1-22, 2008.

DANIELSEN, E. F. Stratospheric-tropospheric exchange based upon radioactivity, ozone and potential vorticity. **J. Atmos. Sci.**, v. 25, p. 502-518, 1968.

DAVID, C.; BEKKI, S.; BERDUNOV, N.; MARCHAND, M.; SNELS, M.; MÉGIE, G. Classification and scales of Antarctic polar stratospheric clouds using wavelet decomposition. **J. Atmos. Sol-Terr. Phys.**, v. 67, p. 293-300, 2005.

DE BELLEVUE, J. L.; RECHOU, A.; BARAY, J. L.; ANCELLET, G.; DIAB, R. D. Signatures of stratosphere to troposphere transport near deep convective events in the southern subtropics. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 111, n. D2410, 2006.

DE LAAT, A. T. J.; VAN DER A, R. J.; ALLAART, M. A. F.; VAN WEELE, M.; BENITEZ, G. C.; CASICCIA, C.; LEME, N. M. P.; QUEL, E.; SALVADOR, J.; WOLFRAM, E. Extreme sunbathing: Three weeks of small total O-3 columns and high UV radiation over the southern tip of South America during the 2009 Antarctic O-3 hole season. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, n. L14805, 2010.

DESSLER, A. **The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone**. International geophysics series, v. 74, Academic Press, 2000.

DOBSON, G. M. B., Observations of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. **Proc. R. Soc. London, Ser. A.**, v. 129, n. 411, 1930.

DOBSON, G. M. B., Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: A history. **Appl. Opt.**, v. 7, p. 387-405, 1968.

EL AMRAOUI L.; ATTIE, J. L.; SEMANE, N.; CLAEYMAN, M.; PEUCH, V. H.; WARNER, J.; RICAUD, P.; CAMMAS, J. P.; PIACENTINI, A.; JOSSE, B.; CARIOLLE, D.; MASSART, S.; BENCHERIF, H. Midlatitude stratosphere – troposphere exchange as diagnosed by MLS O3 and MOPITT CO assimilated fields. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 10, p. 2175–2194, 2010.

FABRY, C.; BUISSON, M. L'absorption de l'ultraviolet par l'ozone et la limite du spectre solaire, **J. Phys.**, v. 3, p. 196-206, 1913.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. **Nature**. 315: 207-210, 1985.

FARMER, C. B.; TOON, G. C.; SHAPER, P. W.; BLAVIER, J. F.; LOWES, L. L. Stratospheric trace gases in the spring 1986 Antarctic atmosphere. **Nature**, v. 329, p. 126-130, 1987.

FELDSTEIN, S. B. Subtropical Rainfall and the Antarctic Ozone Hole. **Atmospheric Science**, v. 332, n.6032, p. 925-926, 2011.

FIOLETOV, V. E. Ozone Climatology, Trends, and Substances that Control Ozone. **Atmos. Ocean**, v. 46, n. 1, p. 39-67, 2008.

FISHMAN, J.; WATSON, C. E.; LARSON, J. C; LOGAN, J. A. Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. **J. Geophys. Res.**, v. 95, p. 3599-3617, 1990.

FRANCIS, G. L.; SALBY, M. L. Radiative Influence of Antarctica on the Polar-Night Vortex. **J. Atmos. Sci.**, v. 58, p. 1300 -1309, 2001.

GALLEGO, D.; RIBERA, P.; GARCÍA, R.; GIMENO, L.; HERNANDEZ, E. A new look for the Southern Hemisphere jet stream. **Clim. Dynam.**, v. 24, p. 607–621, 2005.

GARNY, H.; BODEKER, G. E.; DAMERIS, M. Trends and variability in stratospheric mixing: 1979–2005. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 7, p. 5611–5624, 2007.

GETTELMAN, A.; HOOR, P.; PAN, L. L.; RANDEL, W. J.; HEGGLIN, M. I.; BIRNER, T. The Extratropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere. **Rev. Geophys.**, v. 49, n. RG3003, 2011.

GERASOPOULOS, E.; ZANIS, P.; PAPASTEFANOU, C.; ZEREFOS, C. F.; IOANNIDOU, A.; WERNLI, H. A complex case study of down to the surface intrusions of persistent stratospheric air over the Eastern Mediterranean. **Atmos. Environ.**, v.40, p. 4113–4125, 2006.

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. A study of the anticorrelations between ozone and UV-B radiation using linear and exponential fits in southern Brazil. **Adv. Space Res.**, v. 34, p. 764–768, 2004.

GUEDES, R. L. **Condições de grande escala associado a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul.** São Paulo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade de São Paulo, 1985.

GUO, D.; WANG, P.; ZHOU, X.; LIU, Y.; LI, W. Dynamic Effects of the South Asian High on the Ozone Valley over the Tibetan Plateau. **Acta Meteorol. Sin.**, v. 26, n. 2, p. 216–228, 2012.

GUPTA, S.; LAL, S.; VENKATARAMANI, S.; RAJESH, T. A.; ACHARYA, Y. B. Variability in the vertical distribution of ozone over a subtropical site in India during a winter month. **J. Atmos. Sol-Terr. Phys.**, v. 69, p. 1502–1512, 2007.

HASSLER, B.; DANIEL, J. S.; JOHNSON, B. J.; SOLOMON, S.; OLTMANS, S. J. An assessment of changing ozone loss rates at South Pole: Twenty-five years of ozonesonde measurements. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 116, n. D22301, 2011.

HERMAN, J. R.; BHARTIA, P. K.; KRUEGER, A. J.; MCPETERS, R. D.; WELLEMEYER, C. G.; SEFTOR, C. J.; JAROSS, G.; SCHLESINGER, B. M.; TORRES, O.; LABOW, G.; BYERLY, W.; TAYLOR, S. L.; SWISSLER, T.; CEBULA, R. P.; GU, X. Y. **Meteor-3 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide**, NASA, Washington, DC, Tech. Rep. 1996.

HESS, P. G. Mixing processes following the final stratospheric warming. **J. Atmos. Sci.**, v. 48, p. 1625–1641, 1991.

HOFMANN, D. J.; OLTMANS, S. J.; HARRIS, J. M.; JOHNSON, B. J.; LATHROP, J. A. Ten years of ozone sonde measurements at the South Pole: Implications for recovery of springtime Antarctic ozone. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v.102, p. 8931–8943, 1997.

HOLTON, J. R.; HAYNES, P. H.; MCINTYRE, M. E.; DOUGLASS, A. R.; ROOD, R. B.; PFISTER, L. Stratosphere-troposphere Exchange. **Rev. Geophys.**, v. 3, n. 3, p. 403–439, 1995.

HOLTON, J. R. **An introduction to Dynamic Meteorology**, Elsevier Academic Press, 4^a Edition, 535 p., San Diego, USA, 2004.

HOSKINS, B. J.; McINTYRE, M. E.; ROBERTSON, A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 111, p. 877-946, 1985.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A New on Southern Hemisphere Storm Tracks. **J. Climate**, v. 18, p. 4108-4129, 2005.

HOUZE, R.A. **Cloud dynamics**. Academic Press, 1993. 573p.

HOUZE, R. A. JR. Mesoscale convective systems, **Rev. Geophys.**, v. 42, n. RG4003, 2004.

IALONGO, I.; CASALE, G. R.; SIANI, A. M. Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 8, p. 3283–3289, 2008.

IWABE, C. M. N.; DA ROCHA, R. P. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. **J. Geophys. Res.**, v. 114, n. D09101, 2009.

JING, P.; CUNNOLD, D. M.; YANG, E. S.; WANG, H. J. Influence of isentropic transport on seasonal ozone variations in the lower stratosphere and subtropical upper troposphere. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 110, n. D10110, 2005.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 77, n. 3, p. 437 – 471, 1996.

KANG, S. M.; POLVANI, L. M.; FYFE, J. C.; SIGMOND, M. Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation. **Science**, v. 332, p. 951-954, 2011.

KECKHUT, P.; DAVID, C.; MARCHAND, M.; BEKKI, S.; JUMELET, J.; HAUCHECORNE, A.; HÖPFNER, M. Observation of Polar Stratospheric Clouds down to the Mediterranean coast. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 7, p. 5275–5281, 2007.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149p.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; DA SILVA, F.R.; BARREIRA, R. A. The Antarctic ozone hole as observed at the brazilian Antarctic station in 1992. In: Medrano-Balboa, R. A.; Pereira, E. B. ed. **Ciências Espaciais e Atmosféricas na Antártica**. São José dos Campos: Transtec, 1995, p. 45-64.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N. J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J. M. Evidence for an ozone hole perturbation at 30° south. **Atmos. Environ.**, v. 33, n. 9, p. 1481-1488, 1996.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SAHAI, Y.; CASICCIA, C. A. R.; ZAMORANO, F.; VALDERRAMA, V. Observations of the 1995 ozone hole over Punta Arenas, Chile. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 102, n. D13, p. 16109-16120, 1997.

KLEKOCIUK, A. R.; TULLY, M. B.; ALEXANDER, S. P.; DARGAVILLE, R. J.; DESCHAMPS, L. L.; FRASER, P. J.; GIES, H. P.; HENDERSON, S. I.; JAVORNICZKY, J.; KRUMMEL, P. B.; PETELINA, S. V.; SHANKLIN, J. D.; SIDDAWAY, J. M.; STONE, K. A. The antarctic ozone hole during 2010. **Australian Meteorological and Oceanographic Journal**, v. 61, n. 4, p. 253-267, 2011.

KOCH, G.; WERNLI, H.; STAEHELIN, J.; PETER, T. A Lagrangian analysis of stratospheric ozone variability and long-term trends above Payerne (Switzerland) during 1970–2001. **J. Geophys. Res.**, v. 107, n. D19, p. ACL 2-1–ACL 2-14, 2002.

KOCH, G.; WERNLI, H.; SCHWIERZ, C.; STAEHELIN, J.; PETER, T. A composite study on the structure and formation of ozone miniholes and minihighs over central Europe. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, n. L12810, 2005.

KOMHYR, W. D.; GRASS, R. D.; LEONARD, R. K. Total ozone decrease at South Pole, Antarctica, 1964-1985, **Geophys. Res. Lett.**, v.13, p.1248-1251, 1986.

JOHNSTON, H. S. Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust. **Science**, v, 173, p. 517-522, 1971.

LAMBERT, A.; SANTEE, M. L.; WU, D. L.; CHAE, J. H. A-train CALIOP and MLS observations of early winter Antarctic polar stratospheric clouds and nitric acid in 2008. **Atmos. Chem. Phys.**, v.12, n.6, p.2899-2931, 2012.

LARY, D.; CHIPPERFIELD, M.; PYLE, J.; NORTON, W.; RIISHOJGAARD, L. Three-dimensional tracer initialization and general diagnostics using equivalent PV latitude-potential-temperature coordinates, **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 121, p. 187– 210, 1995.

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas Frontais que Atuaram no Litoral de 1987 a 1995. **In Climanálise Especial de 10 anos**. CPTEC, 1996.

LINIGER M. A.; DAVIES H. C. Seasonal differences in extra-tropical potential vorticity variability at tropopause levels. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 109, n. D117102, 2004.

LIU, K., N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**, Second Edition. International geophysics series, v. 84, Academic Press, 2002.

LIU, J. J.; JONES, D. B. A.; ZHANG, S.; KAR, J. Influence of interannual variations in transport on summertime abundances of ozone over the Middle East. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 116, n. D20310, 2011.

LONDON, J. Observed distribution of atmospheric ozone and its variations. In: Whitten, R. C.; Prasad, S. S. ed. **Ozone in the free atmosphere**. New York: Van Nostrand Reinhold. cap. 1, p. 11 – 80. 1985.

MACHADO, L.A.T.; ROSSOW, W.B. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. **Mon. Weather Rev.**, v. 121, p. 3234-3260, 1993.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Mon. Weather Rev.**, v. 126, p. 1630-1654, 1998.

MAHLMAN, J. D.; FELS, S. B. Antarctic ozone decreases: A dynamical cause? **Geophys. Res. Lett.**, v. 13, p. 1316-1319, 1986.

MANNEY, G. L.; ZUREK, R. W.; NEIL, A. O.; SWINBANK, R. On the motion of air through the stratospheric polar vortex. **J. Atmos. Sci.**, v. 51, p. 2973-2994, 1994.

MANNEY, G. L.; SABUTIS, J. L.; ALLEN, D. R.; LAHOZ, W. A.; SCAIFE, A. A.; RANDALL, C. E.; PAWSON, S.; NAUJOKAT, B.; SWINBANK, R. Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming. **J. Atmos. Sci.**, v. 62, n. 3, p. 690-707, 2005.

MANNEY, G. L.; HEGGLIN, M. I.; DAFFER, W. H.; SANTEE, M. L.; RAY, E. A.; PAWSON, S.; SCHWARTZ, M. J.; BOONE, C. D.; FROIDEVAUX, L.; LIVESEY, N. J.; READ, W. G.; WALKER, K. A. Jet characterization in the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS): applications to climatology and transport studies. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 11, p. 6115-6137, 2011a.

MANNEY, G. L.; SANTEE, M. L.; REX, M.; LIVESEY, N. J.; PITTS, M. C.; VEEFKIND, P.; NASH, E. R.; WOHLTMANN, I.; LEHMANN, R.; FROIDEVAUX, L.; POOLE, L. R.; SCHOEBERL, M. R.; HAFFNER, D. P.; DAVIES, J.; DOROKHOV, V.; GERNANDT, H.; JOHNSON, B.; KIVI, R.L.; KYRO, E.; LARSEN, N.; LEVELT, P. F.; MAKSHITAS, A.; MCELROY, C. T.; NAKAJIMA, H.; PARRONDO, M. C.; TARASICK, D. W.; VON DER GATHEN, P.; WALKER, K. A.; ZINOVIEV, N. S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. **Nature**, v. 478, n. 7370, p. 469-475, 2011b.

MARCHAND, M.; GODIN, S.; HAUCHECORNE, A.; LEFEVRE, F.; BEKKI, S.; CHIPPERFIELD, M. P. Influence of polar ozone loss on northern mid-latitude regions estimated by a high resolution chemistry transport model during winter 1999-2000. **J. Geophys. Res.**, v. 108, n. 8326, 2003.

MARCHAND, M.; BEKKI, S.; PAZMINO, A.; LEFÈVRE, F.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAUCHECORNE, A. Model simulations of the impact of the 2002 Antarctic ozone hole on midlatitudes. **J. Atmos. Sci.**, v. 62, p. 871-884, 2005.

MARENGO, J. A.; SOARES, R. W. Episódios de jatos em baixos níveis ao leste dos Andes durante 13-19 de abril de 1999. **Rev. Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p. 35-52, 2002.

MARQUES, R. F. C.; RAO; V. B. A diagnosis of a long-lasting blocking event over the Southeast Pacific Ocean. **Mon. Weather Rev.**, v. 127, p. 1761-1776, 1999.

MARQUES, R. F. C.; RAO; V. B. Interannual variations of blocking in the Southern Hemisphere and their energetic. **J. Geophys. Res.**, v. 105, p. 4625-4636, 2000.

MARTINEZ-LOZANO, J. A.; UTRILLAS, M. P.; NUNEZ, J. A.; TAMAYO, J.; MARIN, M. J.; ESTEVE, A. R.; CANADAD, J.; MORENO, J. C. Ozone mini-holes over Valencia (Spain) and their influence on the UV erythemal radiation. **Int. J.Climatol.**, v. 31, n. 10, p. 1554-1566, 2011.

McCormick, M. P.; STEELE, H. M.; HAMILL, P.; CHU, W. P.; SWISSLER, T. J. Polar stratospheric cloud sightings by SAM II. **J. Atmos. Sci.**, v. 39, p. 1387-1397, 1982.

MCELROY, C.T.; FOGAL, P. F. Understanding Ozone Depletion: Measurements and Models. **Atmos. Ocean**, v. 46, n. 1, p.15-37, 2008.

MCPETERS, R. D.; BHARTIA, P. K.; KRUEGER, A. J.; HERMAN, J. R.; SCHLESINGER, B. M.; WELLEMEYER, C. G.; SEFTOR, C. J.; JAROSS, G.; TAYLOR, S. L.; SWISSLER, T.; TORRES, O.; LABOW, G.; BYERLY, W.; CEBULA, R. P. **Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide**, NASA, Washington, DC, Tech. Rep. 1996.

MCPETERS, R. D.; BHARTIA, P. K.; KRUEGER, A. J.; HERMAN, J. R.; WELLEMEYER, C. G.; SEFTOR, C. J.; JAROSS, G.; TORRES, O.; MOY, L.; LABOW, G.; BYERLY, W.; TAYLOR, S. L.; SWISLER, T.; CEBULA, R. P. **Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) data products user guide**, NASA, Washington, DC, Tech. Rep. TP-1998-206895, 1998.

MEANSL, L. On thunderstorm forecasting in the central United States, **Mon. Weather Rev.**, v. 80, p. 165-189, 1952.

MEANSL, L. A study of the mean southerly wind-maximum in low levels associated with a period of summer precipitation in the middle west. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 35, p. 166-170, 1954.

MIDYA, S. K.; DEY, S. S.; CHAKRABORTY, B. Variation of the total ozone column during tropical cyclones over the Bay of Bengal and the Arabian Sea. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 17, n. 63-71, 2012.

MIKY FUNATSU, B.; GAN, M. A.; CAETANO, E. A case study of orographic cyclogenesis over South America. **Atmósfera**, v. 17, n. 2, p. 91-113, 2004.

MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. **Nature**, v. 249, p. 820-812, 1974.

MOLINA, M. J.; TSO, T. L.; MOLINA, L. T.; WANG, F. C. Y. Antarctic stratospheric chemistry of chlorine nitrate, hydrogen chloride, and ice: Release of active chlorine. **Science**, v. 238, p. 1253-1257, 1987.

MOUNT, G. H.; SANDERS, R. W.; SCHMELTEKOPF, A. L.; SOLOMON, S. Visible spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica, 1, Overview and daily variations of NO₂ and O₃ during austral spring, 1986. **J. Geophys. Res.**, v. 92, p. 8320-8328, 1987.

MÜLLER, R.; GROOß, J. U.; LEMMEN, C.; HEINZE, D.; DAMERIS, M.; BODEKER G. Simple measures of ozone depletion in the polar stratosphere. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 8, p. 251-264, 2008.

NAKAMURA, N. Extratropical stratosphere-troposphere mass exchange associated with isentropic mixing: A 1992–2005 climatology derived from advection-diffusion calculations. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 112, n. D24303, 2007.

NASA. *Studying Earth's Environment From Space*. June 2000. (Acessado em Janeiro de 2013) < http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/ozone/class/Chap_6/6_Js/6-03.jpg.

NASA. *Ozone Hole Watch*. Agosto de 2011. (acessado em dezembro de 2012). < <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html>>

NASCIMENTO, E. L.; AMBRIZZI, T. The Influence of Atmospheric Blocking on the Rossby Wave Propagation in Southern Hemisphere Winter Flows. **J. Meteorol. Soc. Jpn.**, v. 80, n. 2, p. 139-159, 2002.

NASH, E. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E.; SCHOEBERL, M. E. An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity. **J. Geophys. Res.**, v. 101, p. 9471–9478, 1996.

NDARANA, T.; WAUGH, D. W. The link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 136, n. 649, p. 869-885, 2010, Part b.

NDARANA, T.; WAUGH, D. W.; POLVANI, L. M.; CORREA, G. J. P.; GERBER, E. P. Antarctic ozone depletion and trends in tropopause Rossby wave breaking. **Atmos. Sci. Lett.**, v. 13, n. 3, p. 164-168, 2012.

NEWMAN, P. A.; NASH, E. R. Quantifying the wave driving of the stratosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 105, p. 12485-12497, 2000.

NORTON, W. A. Breaking Rossby waves in a model stratosphere diagnosed by a vortex – following coordinate system and a technique for advecting material contours. **J. Atmos. Sci.**, v. 51, p. 654-673, 1994.

OHRING, G.; BOJKOV, R. D.; BOLLE, H. J.; HUDSON, R. D.; VOLKERT, H. Radiation and Ozone: Catalysts for Advancing International Atmospheric Science Programmes for over half a century. **Space Research Today**, v. 177, n. 1, p. 16 – 31, 2010.

OKAMOTO, K.; SATO, K.; AKIYOSHI, H. A study on the formation and trend of the Brewer-Dobson circulation. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 116, n. D10117, 2001.

PAZMINO, A.F.; GODIN-BECKMANN, S.; GINZBURG, M.; BEKKI, S.; HAUCHECORNE, A.; PIACENTINI, R.D.; QUEL, E. J. Impact of Antarctic polar vortex occurrences on total ozone and UVB radiation at southern Argentinean and Antarctic stations during 1997-2003 period. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 110, n. D03103, 2005.

PAZMINO, A. F.; GODIN-BEEKMANN, S.; LUCCINI, E. A.; PIACENTINI, R. D.; QUEL, E. J.; HAUCHECORNE, A. Increased UV radiation due to polar ozone chemical depletion and vortex occurrences at Southern Sub-polar Latitudes in the period [1997-2005]. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 8, n. 17, p. 5339-5352, 2008.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of climate**. [S.l.]: Springer, 1992.

PERES, L. V.; KALL, E.; CRESPO, N.M; FONTINELE, J. L.; ANABOR, V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N.J.; LEME, N.M.P. 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**, Ed. Suplementar, Universidade Federal de Santa Maria, p. 323 – 326, 2011.

PERES, L. V.; Crespo, N., M.; Da Silva, O.; K., HUPFER, N.; Anabor, V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; LEME, N., P. Synoptic weather system associate with influence of the Antarctic Ozone Hole over South of Brazil at October, 13th, 2010. **Annual Active Report 2011 - National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**, 2012. In Prees.

PEREZ, A.; DE CARCER, I. A.; TOCHO, J.O.; CRINO, E.; SANDOVAL, H. F. R.; BERNI, M. E.; DA SILVA, L.; HENRIQUES, D.; CUSSO, F.; JAQUE, F. The extent of the ozone hole over South America during the spring of 1993, 1994, and 1995. **J. Phys. D Appl. Phys.**, v. 31, n. 7, p. 812-819, 1998.

PEREZ, A.; JAQUE, F. On the Antarctic origin of low ozone events at the South American continent during the springs of 1993 and 1994. **Atmos. Environ.**, v. 32, n. 21, p. 3665-3668, 1998.

PEREZ, A.; CRINO, E.; DE CARCER, I. A.; JAQUE, F. Low-ozone events and three-dimensional transport at midlatitudes of South America during springs of 1996 and 1997. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 105, n. D4, p. 4553-4561, 2000.

PINHEIRO, D. K.; LEME, N. P.; PERES, L. V.; KALL, E. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2008 and 2009. **Annual Active Report 2010 - National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**, v. 1, p. 33-37, 2011.

PINHEIRO, D. K.; PERES, L. V.; Crespo, N. M.; SCHUCH, N. J.; LEME, N., P. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2010 and 2011. **Annual Active Report 2011 - National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**, 2012. In Prees.

PLOEGER, F.; KONOPKA, P.; MUELLER, R.; FUEGLISTALER, S.; SCHMIDT, T.; MANNERS, J. C.; GROOSS, J. U.; GUENTHER, G.; FORSTER, P. M.; RIESE, M. Horizontal transport affecting trace gas seasonality in the Tropical Tropopause Layer (TTL). **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 117, n. D09303, 2012.

PRATHER, M.; JAFFE, H. Global impact of the Antarctic ozone hole: chemical propagation. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 95, p. 3413-3492, 1990.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 42, p. 81–91, 1990.

RAO, T. N.; KIRKWOOD, S.; ARVELIUS, J.; VON DER GATHEN, P.; KIVI, R. Climatology of UTLS ozone and the ratio of ozone and potential vorticity over northern Europe. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 108, n. D22, 2003.

RAY, E. A.; ROSENLOF, K. H.; RICHARD, E.; PARRISH, D.; JAKOUBEK, R. Distributions of ozone in the region of the subtropical jet: An analysis of in situ aircraft measurements. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v.109, n. D8, 2004.

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos e Sensibilidade**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG–USP, 359 pg., 2008.

REBOITA, M. S.; NIETO, R.; GIMENO, L.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Cutoff-Low Systems: Comparison NCEP versus RegCM3. **In 2nd International Lund RCM Workshop**, Lund University, Suécia, 4-8 de maio de 2009.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

RIEHL, H. Tropopause circulations and jet stream. World survey climatology. **Climate of Free Atmosphere**, v.4, p. 85-204, 1969.

ROGAL, M.; HITCHMAN, M. H.; BUKER, M. L.; TRIPOLI, G. J.; STAJNER, I.; HAYASHI, H. Modeling the effects of Southeast Asian monsoon outflow on subtropical anticyclones and midlatitude ozone over the Southern Indian Ocean. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 115, n. D20101, 2010.

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. **A Short Course in Cloud Physics**.-3rd ed. International series in natural philosophy, v. 133, Pergamon, 1989.

ROSCOE, H. K. The Brewer–Dobson circulation in the stratosphere and mesosphere – Is there a trend? **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 38, p. 2446–2451, 2006.

ROSCOE, H. K.; FENG, W.; CHIPPERFIELD, M. P.; TRAINIC, M.; SHUCKBURGH, E. F. The existence of the edge region of the Antarctic stratospheric vortex. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v.117, n. D04301, 2012.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. International geophysics series, v. 61, Academic Press, 1996.

SALBY, M. L.; TITOVA, E. A.; DESCHAMPS, L. Changes of the Antarctic ozone hole: Controlling mechanisms, seasonal predictability, and evolution. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 117, n. D10111, 2012.

SATYAMURTY, P., NOBRE, C. A., and SILVA DIAS, P. L. South America. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*. Eds. Karoly D. J.; Vicent, D. G. **American Meteorological Society, Meteorological Monographs**, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998.

SCANNELL, C.; HURTMANS, D.; BOYNARD, A.; HADJI-LAZARO, J.; GEORGE, M.; DELCLOO, A.; TUINDER, O.; COHEUR, P. F.; CLERBAUX, C. Antarctic ozone hole as observed by IASI/MetOp for 2008-2010. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 5, n 1, p. 123-139, 2012.

SHINDELL, D. T.; RIND, D.; LONERGAN, P. Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. **Nature**, v. 392, p. 589-592, 1998.

SCHOEBERL, M. R. Dynamics weaken the polar hole. **Nature**, v. 336, p. 420-421, 1988.

SCHOEBERL, M. R. Reconstruction of the constituent distribution and trends in the Antarctic polar vortex from ER-2 flight observations, **J. Geophys. Res.**, v.94, p.16.815-16.845, 1989.

SCHOEBERL, M. R.; HARTMAN, D. L. The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. **Science**, v. 251, p. 46-52, 1991.

SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E. The structure of the polar vortex. **J. Geophys. Res.**, v.97, p.7859-7882, 1992.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. Nova York: John Wiley and Sons, 1998.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc. 2006.

SEMANE, N.; TEITELBAUM, H.; BASDEVANT, C. A very deep ozone minihole in the Northern Hemisphere stratosphere at mid-latitudes during the winter of 2000. **Tellus A**, v. 54, n. 4, p. 382-389, 2002.

SEMANE, N.; BENCHERIF, H.; MOREL, B.; HAUCHECORNE, A.; DIAB, R. D. An unusual stratospheric ozone decrease in Southern Hemisphere subtropics linked to isentropic air-mass transport as observed over Irene (25.5° S, 28.1° E) in mid-May 2002. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 6, p. 1927-1936, 2006.

SHEPHERD, T. G. Transport in the Middle Atmosphere. **J. Meteorol. Soc. Jpn.**, v. 85B, p. 165-191, 2007.

SHEPHERD, T. G. Dynamics, Stratospheric Ozone, and Climate Change. **Atmos. Ocean**, v. 46, n. 1, p. 117-138, 2008.

SHEPHERD, T. G.; MCLANDRESS, C. A Robust Mechanism for Strengthening of the Brewer-Dobson Circulation in Response to Climate Change: Critical-Layer Control of Subtropical Wave Breaking. **J. Atmos. Sci.**, v. 68, n. 4, p. 784-797, 2011.

SIVAKUMAR, V.; PORTAFAIX, T.; BENCHERIF, H.; GODIN-BEEKMANN, S.; BALDY, S. Stratospheric ozone climatology and variability over a southern subtropical site: Reunion Island (21°S; 55°E). **Annales of Geophysics**, v. 25, p. 2321–2334, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 133-150, 1987.

SOLOMON, S.; GARCIA, R. R.; ROWLAND, F. S.; WUEBBLES, D. J. On the depletion of Antarctic ozone. **Nature**, v. 321, p. 755-758, 1986.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Rev. Geophys.**, v. 37, n. 3, p. 275-316, 1999.

SOLOMON, S.; PORTMANN, R. W.; THOMPSON, D. W. J. Contrasts between Antarctic and Arctic ozone depletion. **PNAS**, v. 104, n. 2, p. 445-449, 2007.

SPRENGER, M.; WERNLI, H.; BOURQUI, M. Stratosphere–Troposphere Exchange and Its Relation to Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause. **J. Atmos. Sci.**, v. 64, n. 5, p. 1587-1602, 2007.

STENKE, A.; DAMERIS, M.; GREWE, V.; GARNY, H. Implications of Lagrangian transport for simulations with a coupled chemistry-climate model. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 9, p. 5489–5504, 2009.

STOHL, A.; WERNLI, H.; BOURQUI, M.; FORSTER, C.; JAMES, P.; LINIGER, M.A.; SEIBERT, P.; SPRENGER, M. A new perspective of stratosphere-troposphere exchange. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 84, p. 1565-1573, 2003.

SLUSSER, J.; GIBSON, J.; BIGELOW, D.; KOLINSKI, D.; MOU, W.; KOENIG, G.; BEAUBIEN, A. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. **Applied Optics**, v. 38, n.9, p. 1543-1551, 1999.

STOLARSKI, R. S.; CICERONE, R. J. Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone, *Can. J. Chem.*, v. 52, p. 1610-1615, 1974.

STOLARSKI, R. S.; RUNDEL, R. D. Fluorine chemistry in the stratosphere. **Geophys. Res. Lett.**, v. 2, p. 443-446, 1975.

STOLARSKI, R. S.; KRUEGER, A. J.; SCHOEBERL, M. R.; MCPETERS, R. D.; NEWMAN, P. A.; ALPERT, J. C. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. **Nature**, v. 322, p. 808-811, 1986.

TANG, Q.; PRATHER, M. J. Correlating tropospheric column ozone with tropopause folds: the Aura-OMI satellite data. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 10, p. 14875-14896, 2010.

TERAO, Y.; SUGITA, T.; SASANO, Y. Ozone loss rates in the Arctic winter stratosphere during 1994-2000 derived from POAM II/III and ILAS observations: Implications for relationships among ozone loss, PSC occurrence, and temperature. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 17, n. D05311, 2012.

TRICKL, T.; BÄRTSCH-RITTER, N.; EISELE, H.; FURGER, M.; MÜCKE, R.; SPRENGER, M.; STOHL, A. High-ozone layers in the middle and upper troposphere above Central Europe: potential import from the stratosphere along the subtropical jet stream. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 11, p. 9343–9366, 2011.

TRIPATHI O. P.; GODIN-BEEKMANN, S.; LEFÈVRE, F.; MARCHAND, M.; PAZMIÑO, A.; HAUCHECORNE, A.; GOUTAIL, F.; SCHLAGER, H.; VOLK, C. M.; JOHNSON, B.; KÖNIG-LANGLO, G.; BALESTRI, S.; STROH, F.; BUI, T. P.; JOST, H. J.; DESHLER, T.; VON DER GATHEN, P. High resolution simulation of recent Arctic and Antarctic stratospheric chemical ozone loss compared to observations. **Journal Atmospheric Chemistry.**, v. 55, p. 205–226, 2006.

TUNG, K. K.; KO, M. K. W.; RODRIGUEZ, J. M.; SZE, N. D. Are Antarctic ozone variations a manifestation of dynamics or chemistry? **Nature**, v. 333, p. 811-814, 1986.

MASTER USP IAG. Ensino. Meteorologia Sinótica. Setembro de 2004. (acessado em Janeiro de 2013). <<http://www.master.iag.usp.br/ensino/Sinotica/AULA09/AULA09.HTML>>.

VAROTSOS, C.A.; TZANIS, C. A new tool for the study of the ozone hole dynamics over Antarctica. **Atmos. Environ.**, v. 47, p. 428-434, 2012.

YOUNG, P. J.; ROSENLOF, K. H.; SOLOMON, S.; SHERWOOD, S. C.; FU, Q.; LAMARQUE, J. F. Changes in Stratospheric Temperatures and Their Implications for Changes in the Brewer Dobson Circulation, 1979-2005. **J. Climate**, v. 25, n. 5, p. 1759-1772, 2012.

WAKAMATSU, S.; UNO, I.; UEDA, H.; UEHARA, K.; TATEISHI, H. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere. **Atmos. Environ.**, v. 23, p. 1815–1826, 1989.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science : An Introductory Survey** . [S.l.]: Academic press, 2006.

WAUGH, D. W. Subtropical stratospheric mixing linked to disturbances in the polar vortices. **Nature**, v. 365, p. 535–537, 1993.

WAUGH, D.; PLUMB, R.; ATKINSON, R. J.; SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; LOEWENSTEIN, M.; TOOHEIT, D.; AVALLONE, L.; WEBSTER, C.; MAY, R. Transport out of the lower stratospheric vortex by Rossby wave breaking. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 99, p. 1071–1088, 1994.

WEBER, M.; DIKTY, S.; BURROWS, J. P.; GARNY, H.; DAMERIS, M.; KUBIN, A. J.; ABALICHIN, J.; LANGEMATZ, U. The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time scales. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 11, p. 11221–11235, 2011.

WERNER, R.; STEBEL, K.; HANSEN, H. G.; HOPPE, U. P.; GAUSA, M.; KIVI, R.; VON DER GATHEN, P.; ORSOLINI, Y.; KILIFARSKA, N. Study of the seasonal ozone variations at European high latitudes. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 47, p. 740–747, 2011.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences** . Second. [S.l.: s.n.], 2006.

WOFSY, S. C.; MCELROY, M. B.; YUNG, Y. L. The chemistry of atmospheric bromine, **Geophys. Res. Lett.**, v. 2, p. 215-218, 1975.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994**. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37, Geneva, 1995.

WU, Y. H.; RAMAN, S. Effect of land-use pattern on the development of low-level jets. **J. Appl. Meteorol.**, v. 36, n. 5, p. 573-590, 1997.

YOO, H.; LI, Z. Evaluation of cloud properties in the NOAA/NCEP global forecast system using multiple satellite products. **Clim. Dynam.**, v. 39, n. 12, p. 2769-2787, 2012.

ZEREFOS, C. S.; Tourpali, K; Bojkov, B. R.; Balis, D. S.; Rognerund, B.; Isaksen, I. S. A. Solar activity-total ozone relationships: observations and model studies with the heterogeneous chemistry. **J. Geophys. Res-Atmos.**, v. 102, n. D1, p. 1561-1569, 1997.

APÊNDICE A - Imagens de Confirmação dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil

Na presente seção, são apresentadas, da Figura A.1 até a Figura A.62, as imagens utilizadas na análise de cada um dos eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil identificados na Tabela 4.4, com exceção dos eventos usados como exemplos característicos dos meses de agosto a novembro e do ano de 2012, apresentados anteriormente.

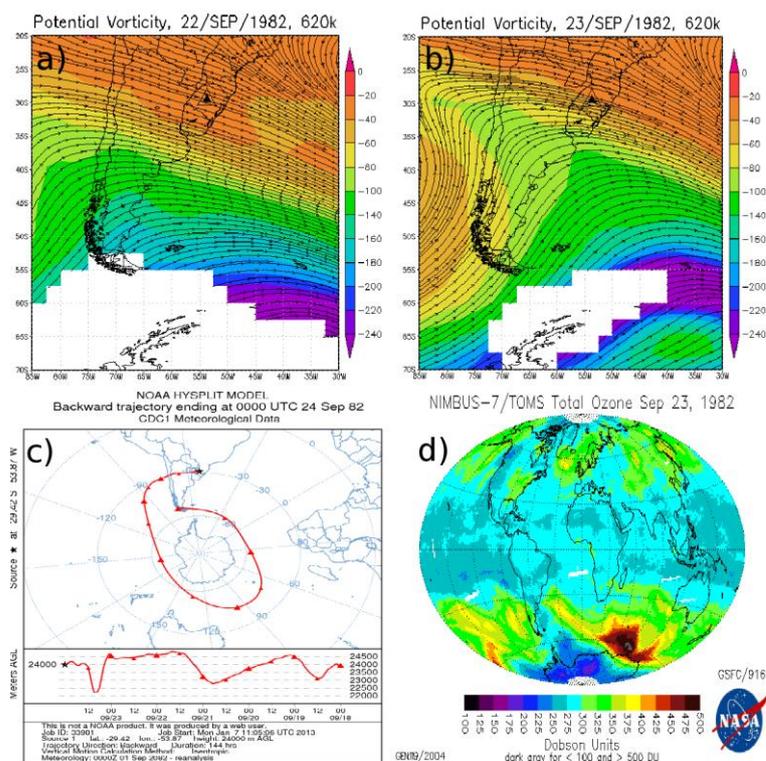


Figura A.1: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 24 e 23 de setembro de 1982 respectivamente.

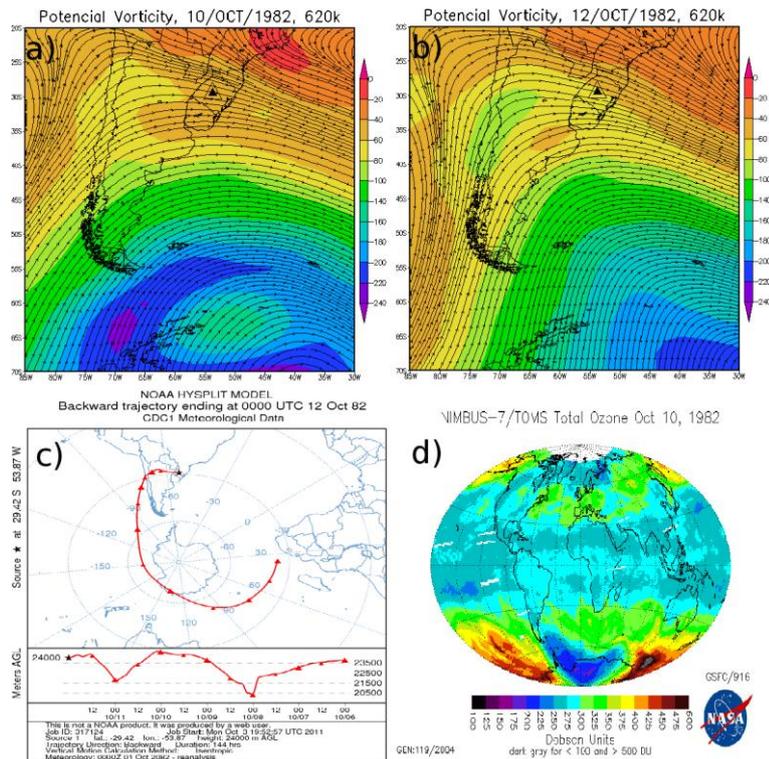


Figura A.2: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de outubro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 12 (b) de outubro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 12 e 10 de outubro de 1982 respectivamente.

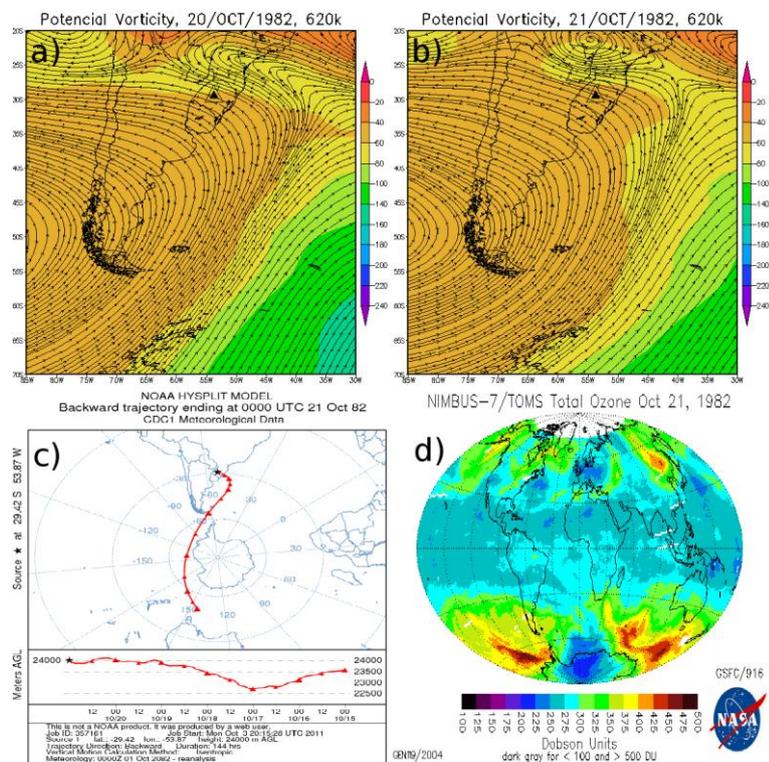


Figura A.3: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 21 de outubro de 1982. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 21 (b) de outubro de 1982 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d), ambas para o dia 21 de outubro de 1982.

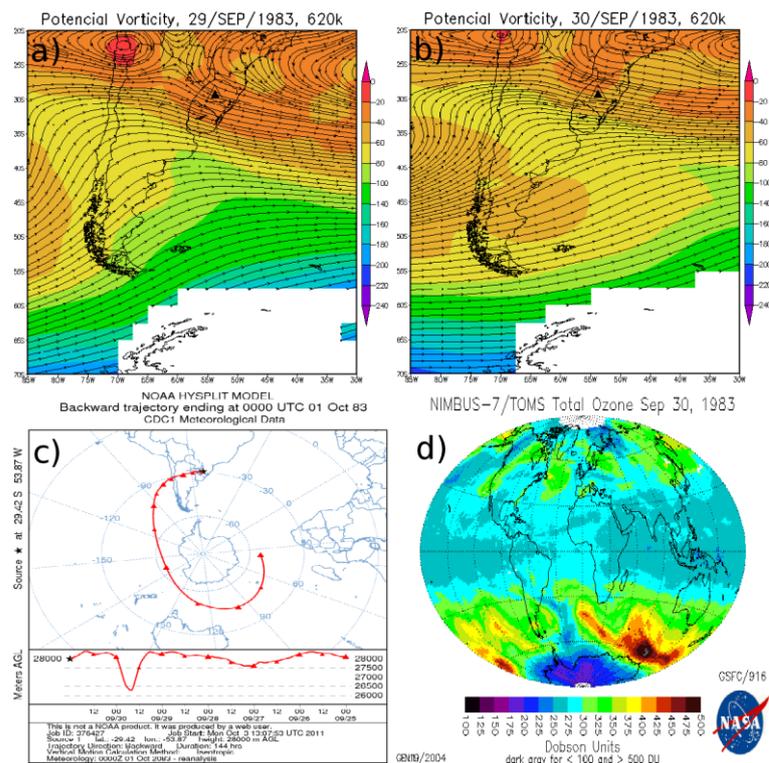


Figura A.4: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 30 de setembro de 1983. Vorticidade Potencial e vento para 29 (a) e 30 (b) de setembro de 1983 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 01 de outubro e 30 de setembro de 1983 respectivamente.

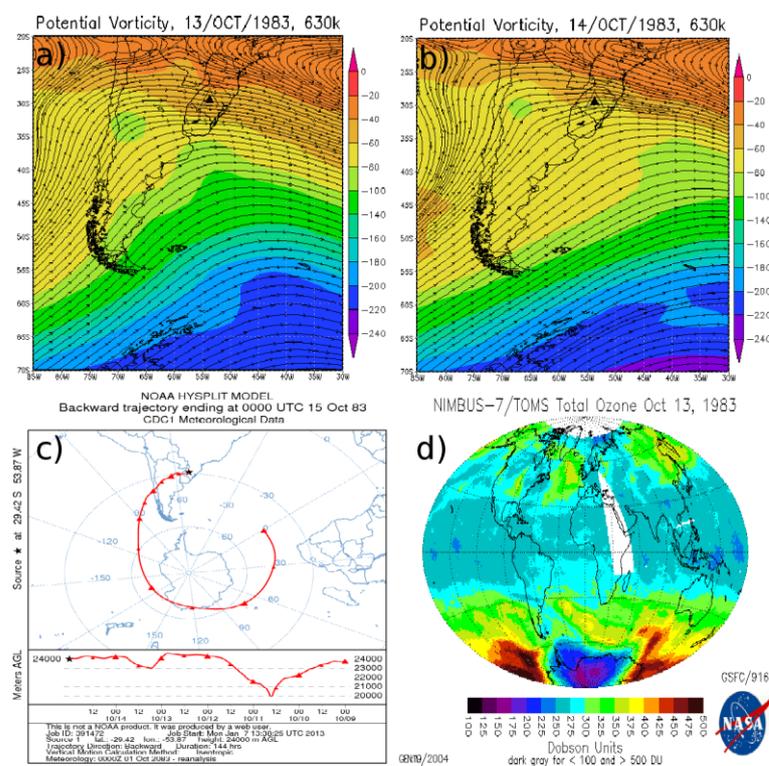


Figura A.5: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de outubro de 1983. Vorticidade Potencial e vento para 13 (a) e 14 (b) de outubro de 1983 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 15 e 13 de outubro de 1983 respectivamente.

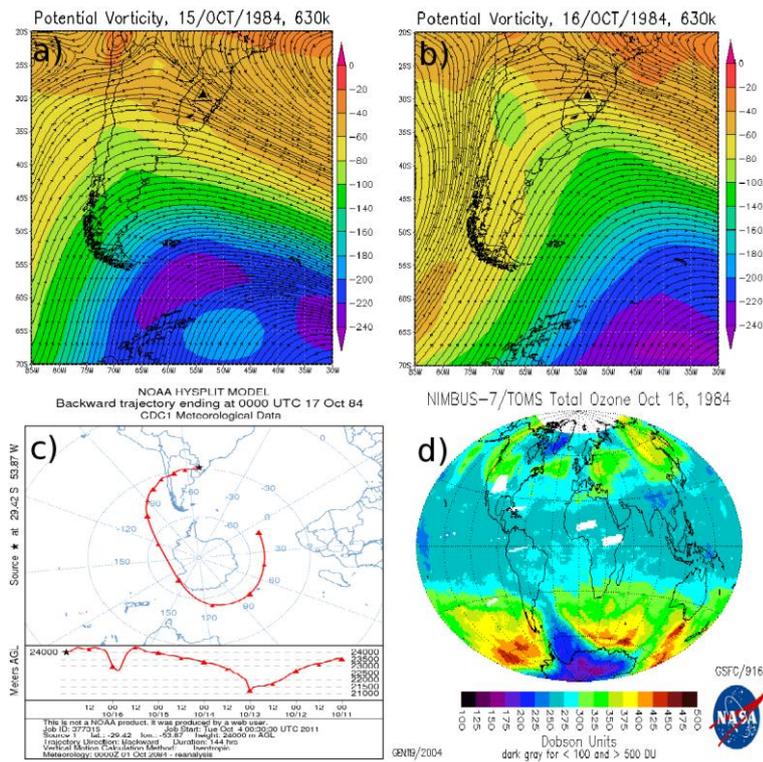


Figura A.6: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 1984. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 16 (b) de outubro de 1984 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 17 e 16 de outubro de 1984 respectivamente.

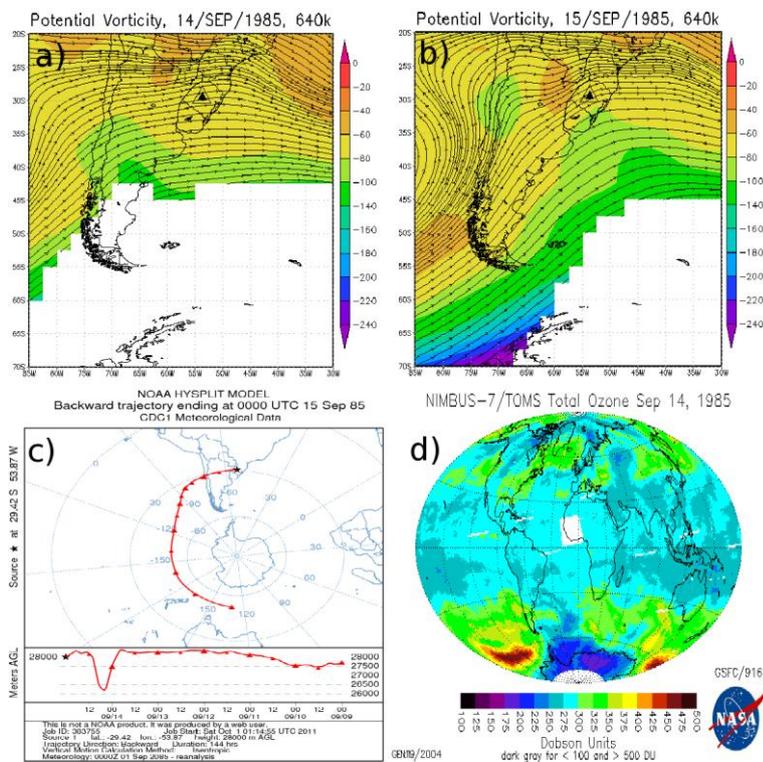


Figura A.7: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de setembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de setembro de 1985 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 15 e 14 de setembro de 1985 respectivamente.

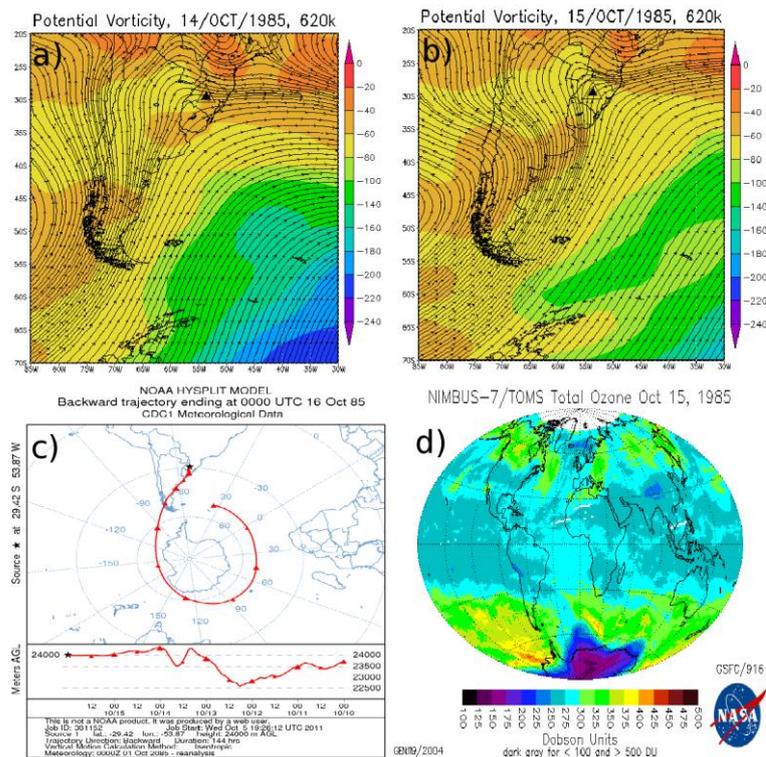


Figura A.8: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de outubro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de outubro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 16 e 15 de outubro de 1985 respectivamente.

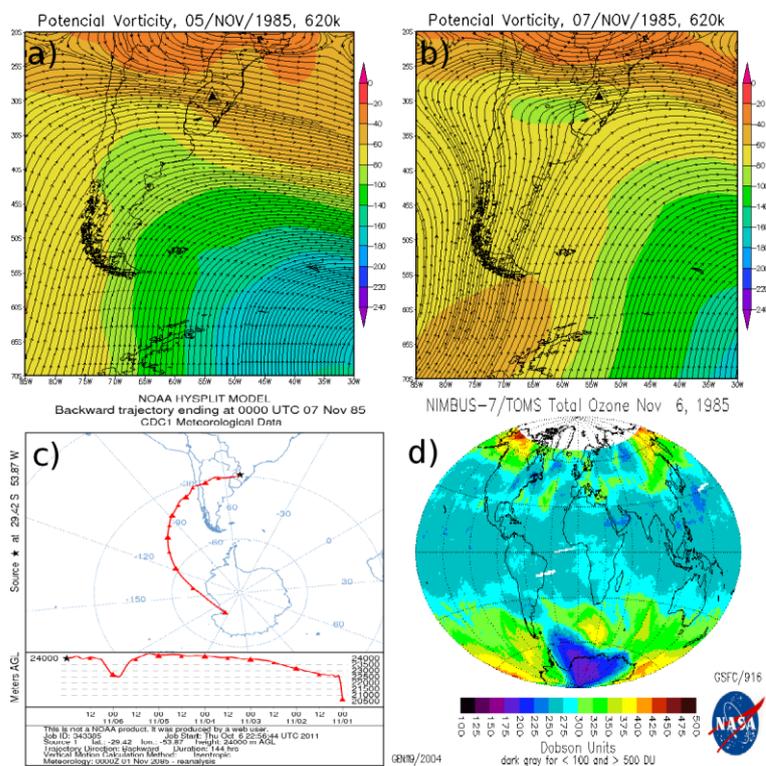


Figura A.9: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de novembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 05 (a) e 07 (b) de novembro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 07 e 06 de novembro de 1985 respectivamente.

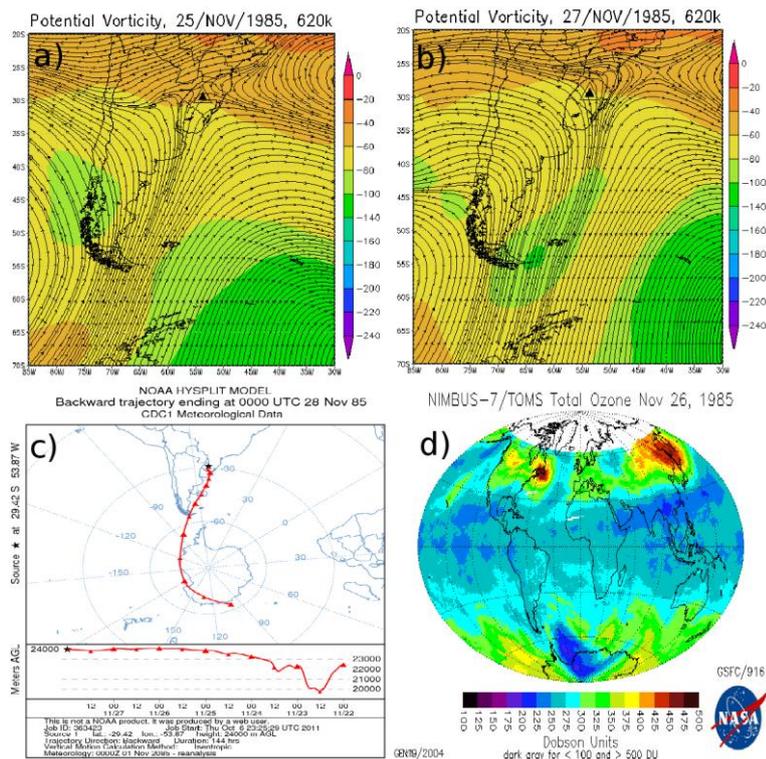


Figura A.10: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 27 de novembro de 1985. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 27 (b) de novembro de 1985 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 28 e 26 de novembro de 1985 respectivamente.

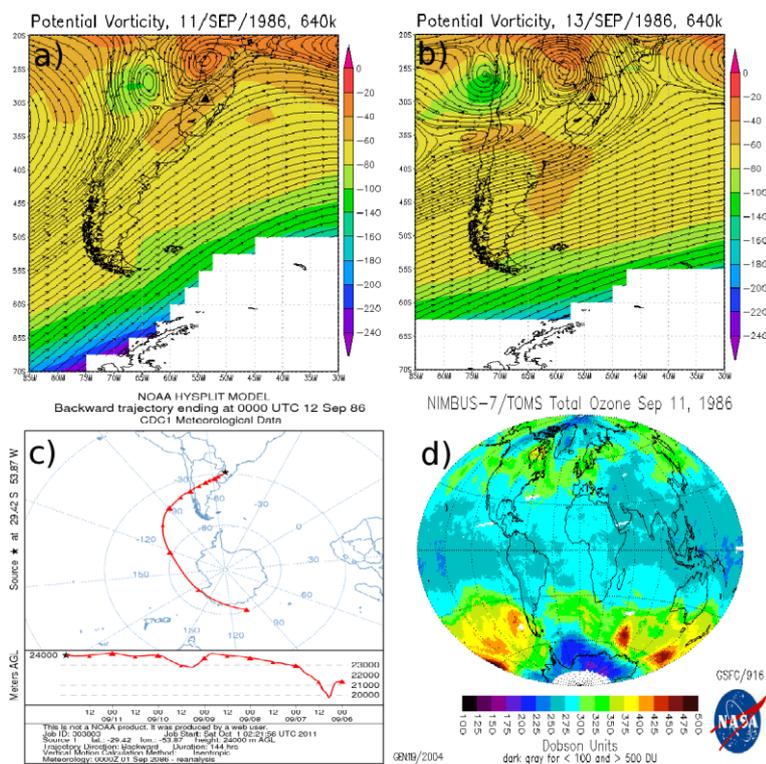


Figura A.11: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de setembro de 1986. Vorticidade Potencial e vento para 11 (a) e 13 (b) de setembro de 1986 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 12 e 11 de setembro de 1985 respectivamente.

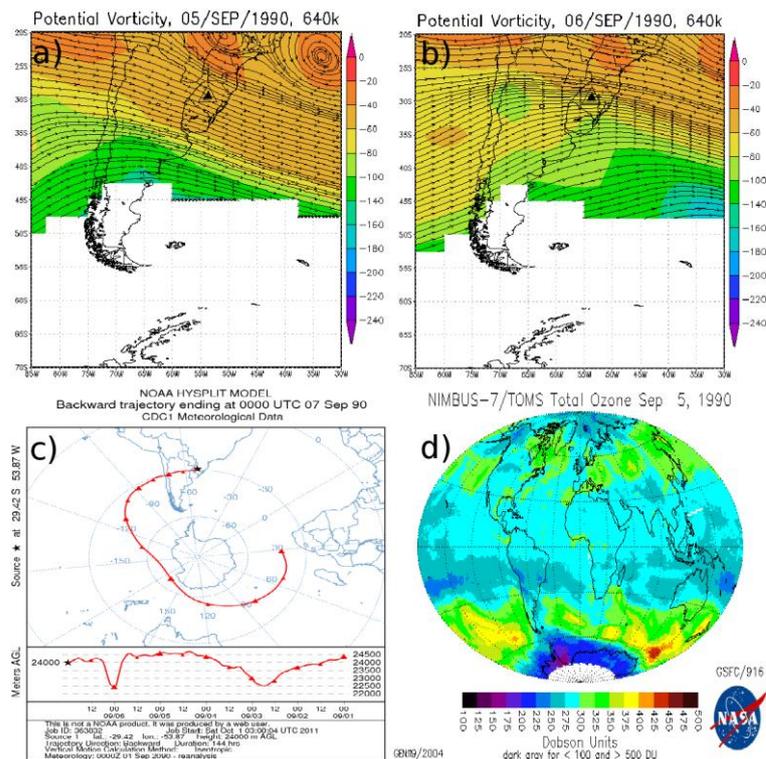


Figura A.12: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 06 de setembro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 05 (a) e 06 (b) de setembro de 1990 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 07 e 05 de setembro de 1990 respectivamente.

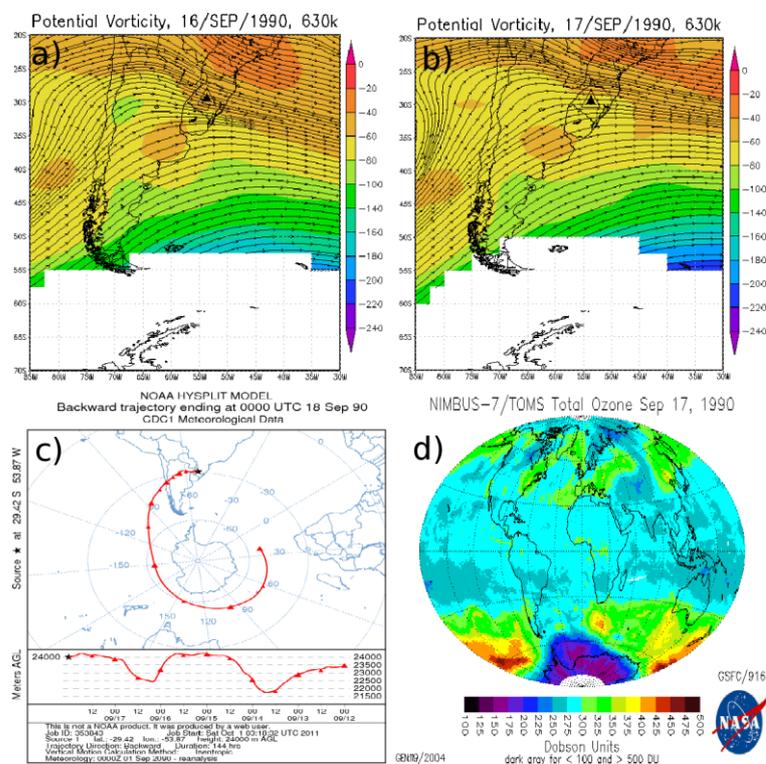


Figura A.13: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 17 de setembro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 17 (b) de setembro de 1990 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 18 e 17 de setembro de 1990 respectivamente.

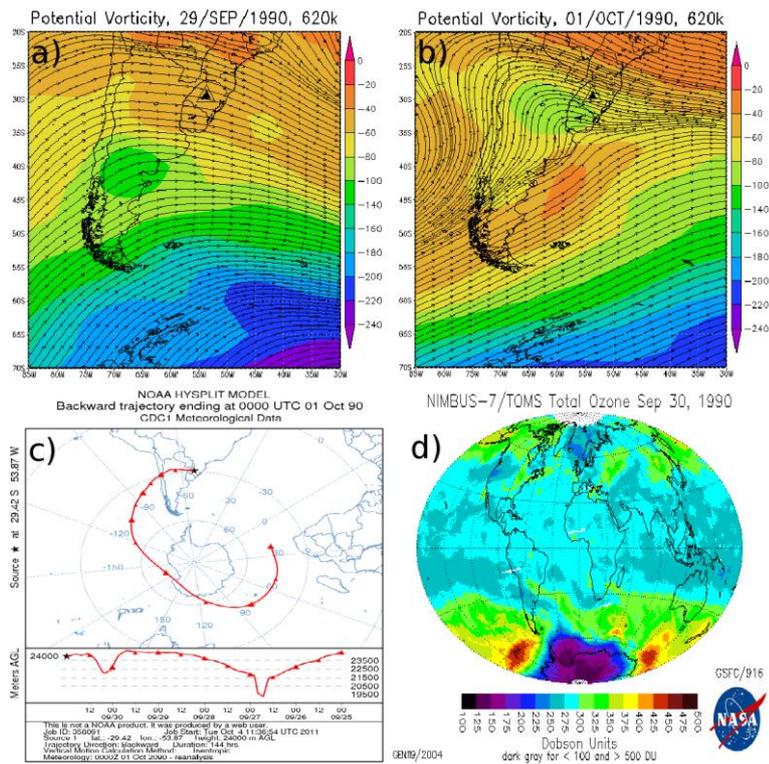


Figura A.14: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 01 de outubro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 29 de setembro (a) e 01 (b) de outubro de 1990 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 01 de outubro e 30 de setembro de 1990 respectivamente.

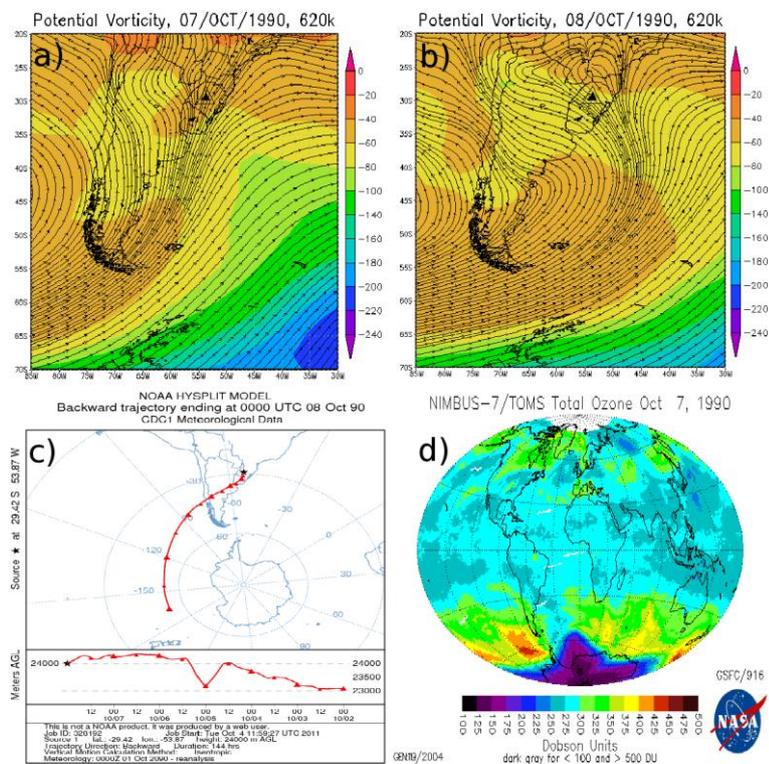


Figura A.15: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de outubro de 1990. Vorticidade Potencial e vento para 07 (a) e 08 (b) de outubro de 1990 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 08 e 07 de outubro de 1990 respectivamente.

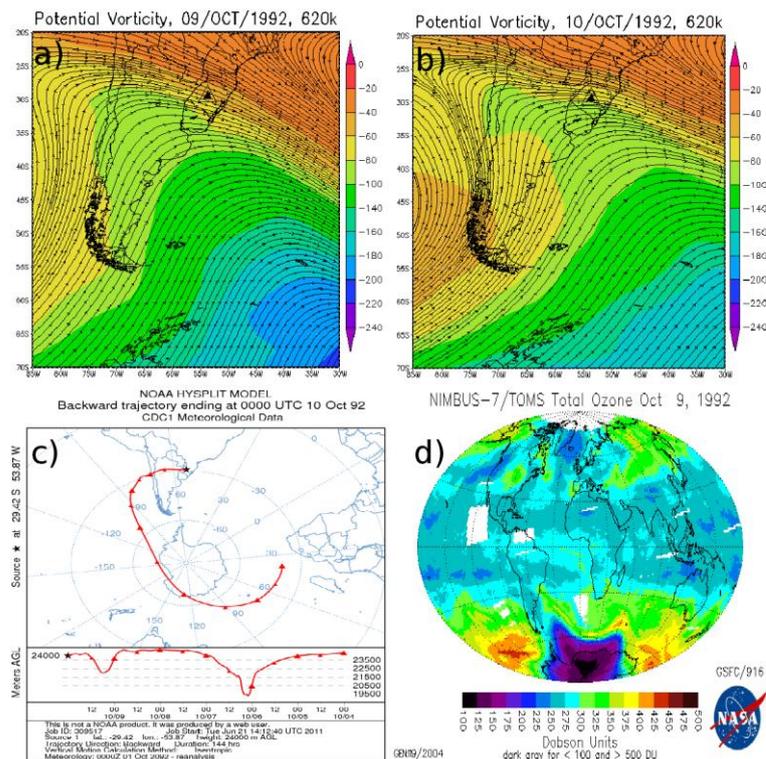


Figura A.16: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 10 de outubro de 1992. Vorticidade Potencial e vento para 09 (a) e 10 (b) de outubro de 1992 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Nimbus 7 (d) para os dias 10 e 09 de outubro de 1992 respectivamente.

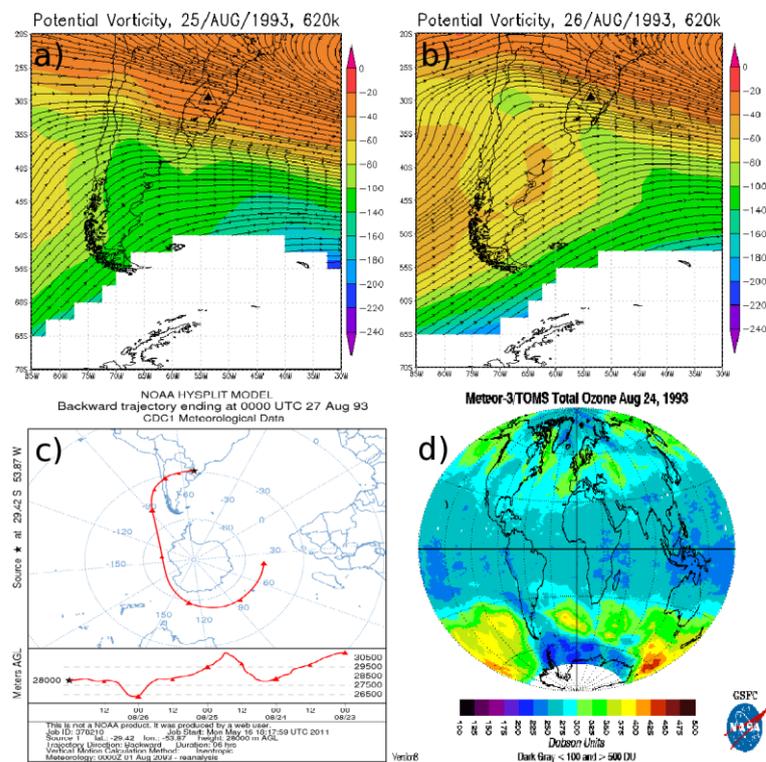


Figura A.17: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de agosto de 1993. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de agosto de 1993 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 27 e 24 de agosto de 1993 respectivamente.

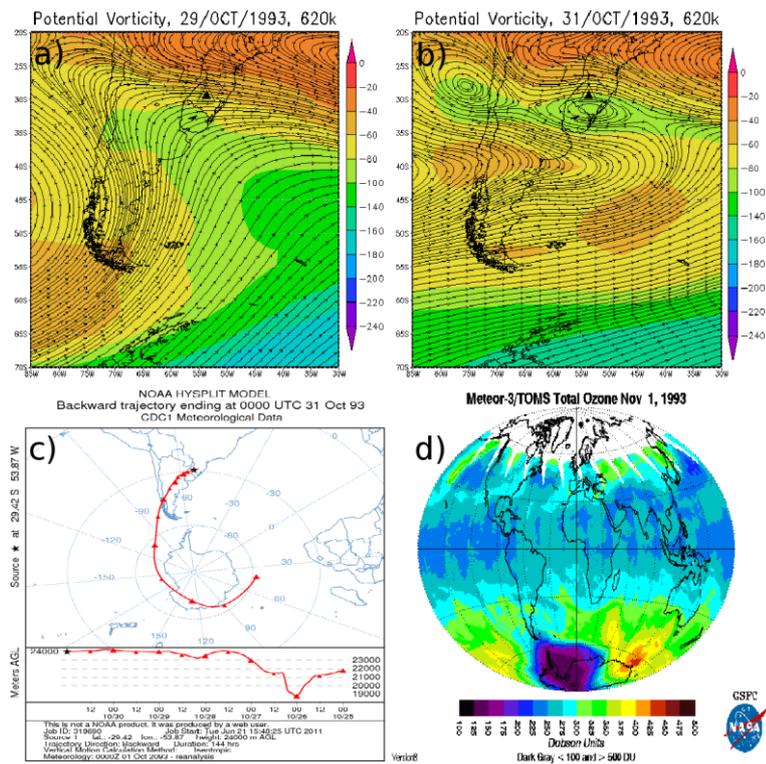


Figura A.18: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 31 de outubro de 1993. Vorticidade Potencial e vento para 29 (a) e 31 (b) de outubro de 1993 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 31 de outubro e 01 de novembro de 1993 respectivamente.

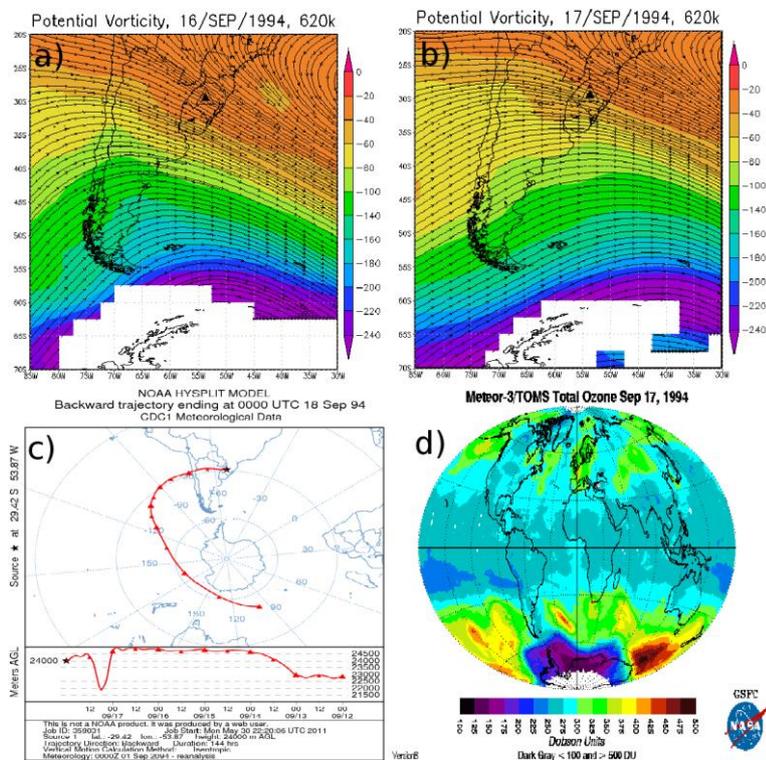


Figura A.19: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 17 de setembro de 1994. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 17 (b) de setembro de 1994 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 18 e 17 de setembro de 1994 respectivamente.

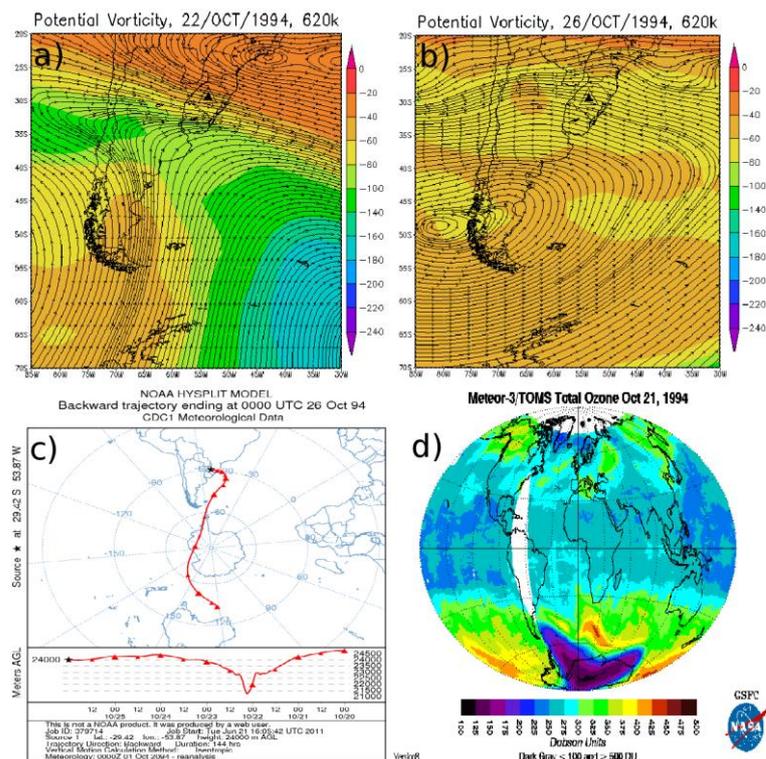


Figura A.20: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de outubro de 1994. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 26 (b) de outubro de 1994 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Meteor 3 (d) para os dias 26 e 21 de outubro de 1994 respectivamente.

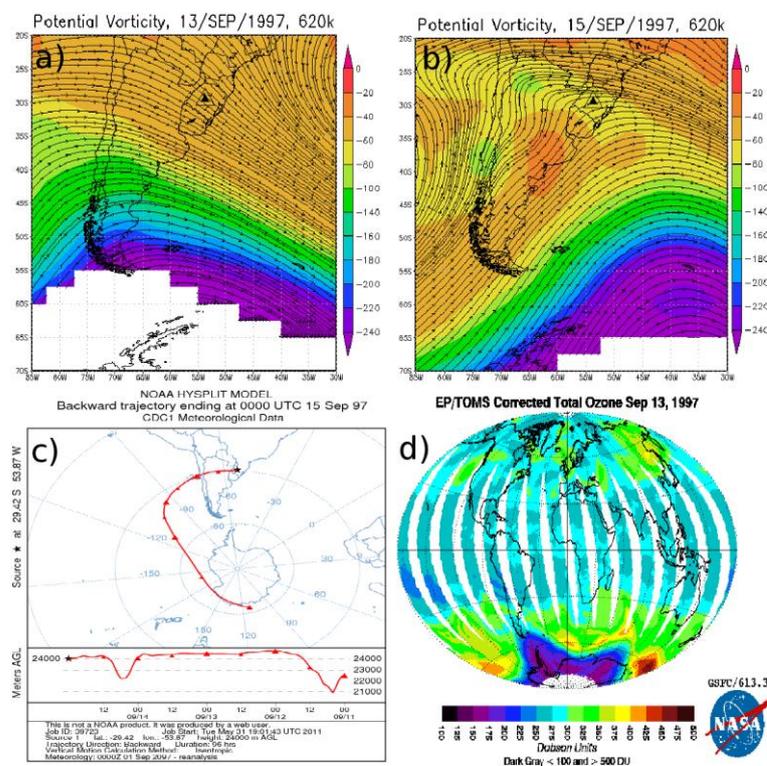


Figura A.21: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 14 de setembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 13 (a) e 15 (b) de setembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Probed (d) para os dias 15 e 13 de setembro de 1997 respectivamente.

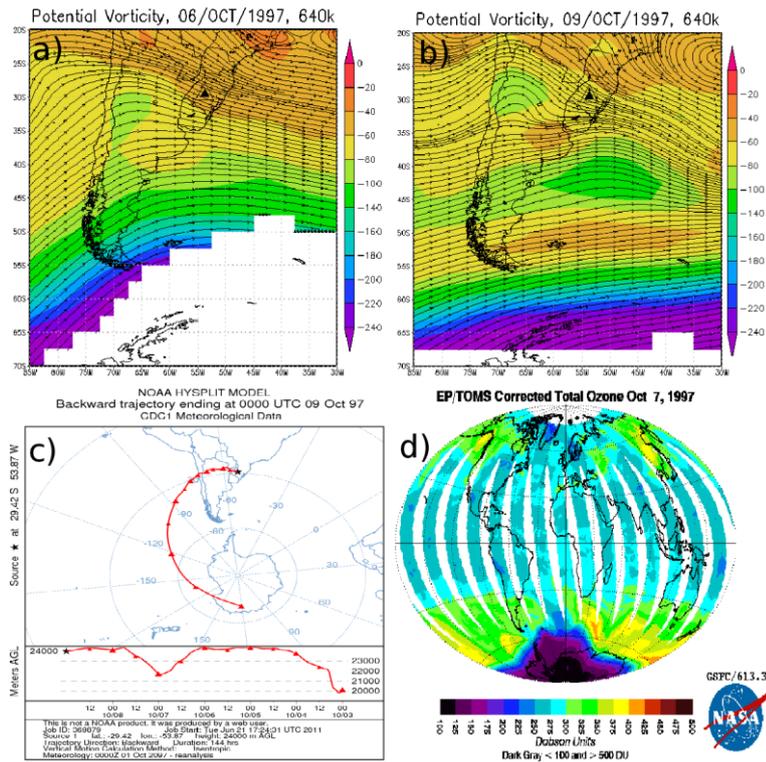


Figura A.22: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 09 de outubro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 09 (b) de outubro de 1997 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 09 e 07 de outubro de 1997 respectivamente.

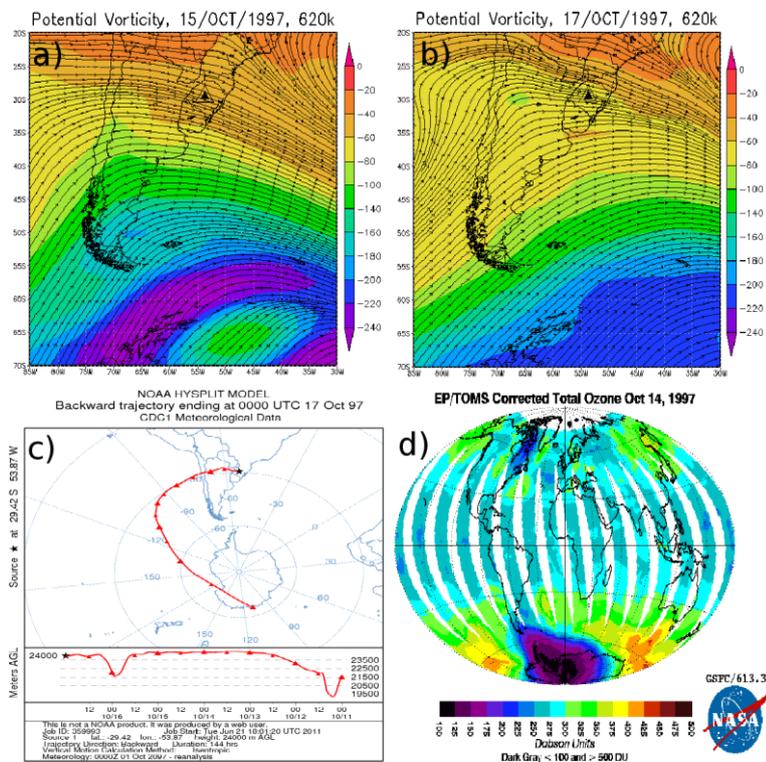


Figura A.23: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 17 (b) de outubro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 17 e 14 de outubro de 1997 respectivamente.

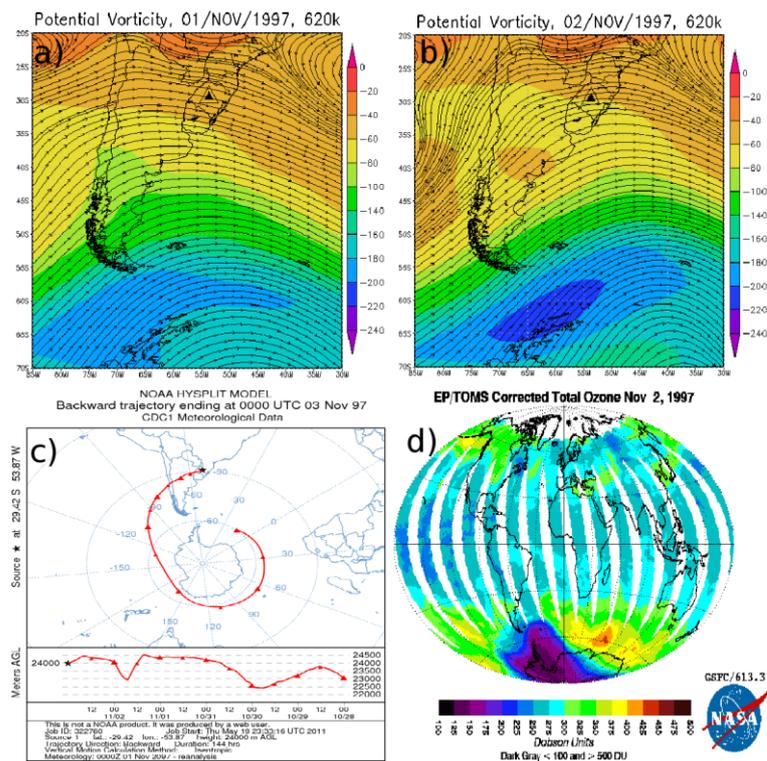


Figura A.24: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 02 de novembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 01 (a) e 02 (b) de novembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Probed (d) para os dias 03 e 02 de novembro de 1997 respectivamente.

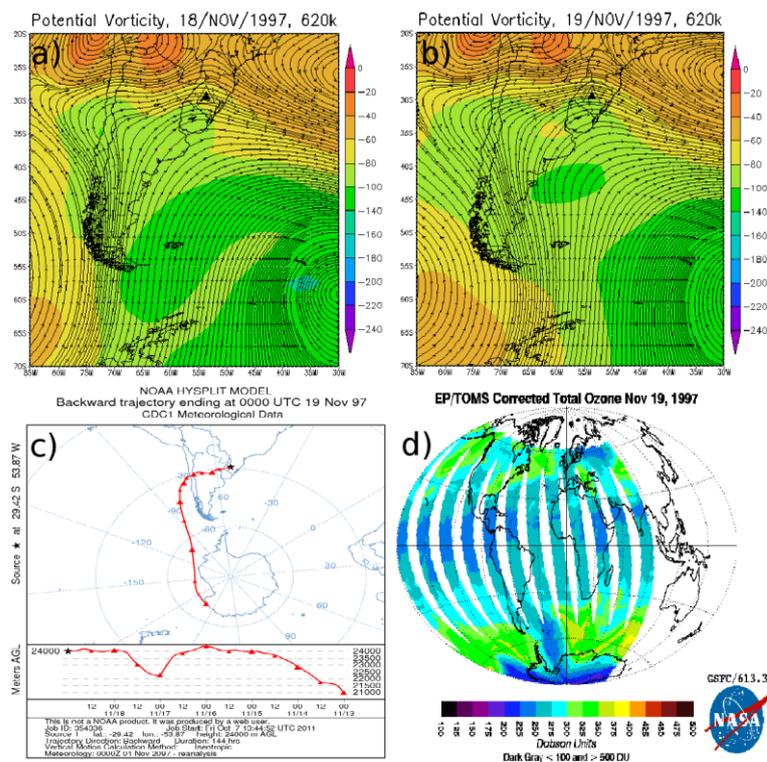


Figura A.25: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 19 de novembro de 1997. Vorticidade Potencial e vento para 18 (a) e 19 (b) de novembro de 1997 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Probed (d) ambas para o dia 19 de novembro de 1997.

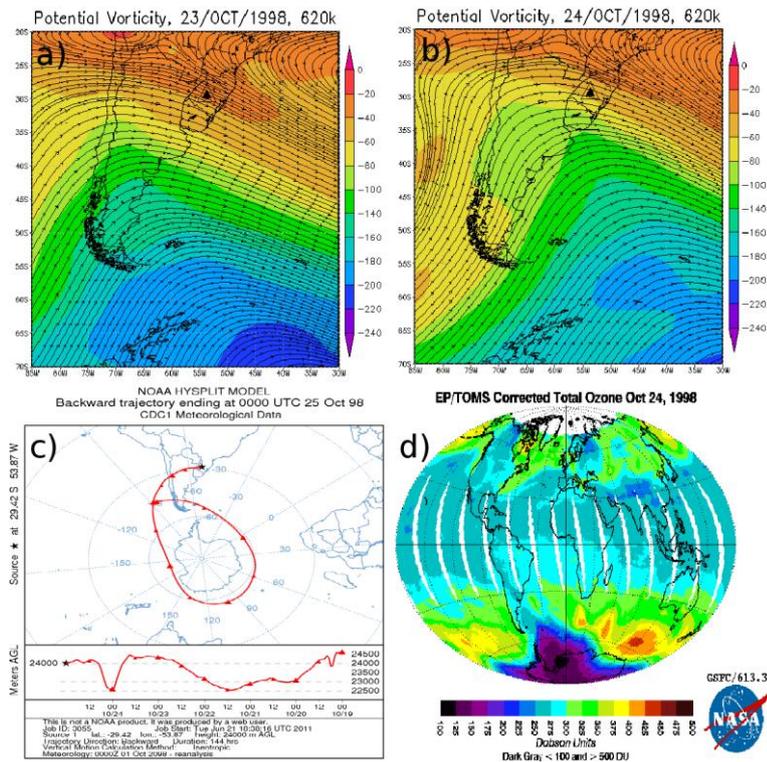


Figura A.26: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 24 de outubro de 1998. Vorticidade Potencial e vento para 23 (a) e 24 (b) de outubro de 1998 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 25 e 24 de outubro de 1998 respectivamente.

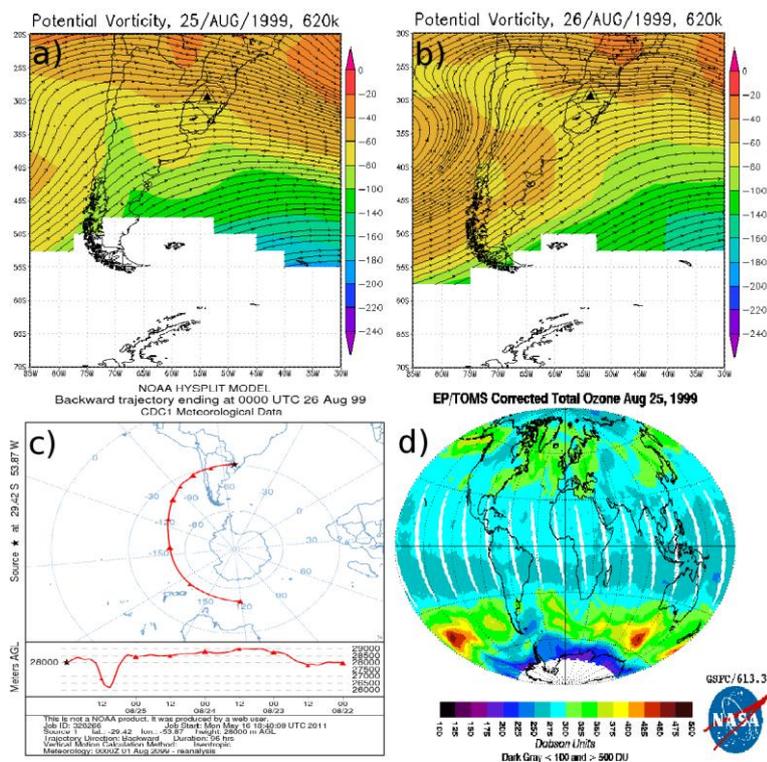


Figura A.27: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de agosto de 1999. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de agosto de 1999 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de agosto de 1999 respectivamente.

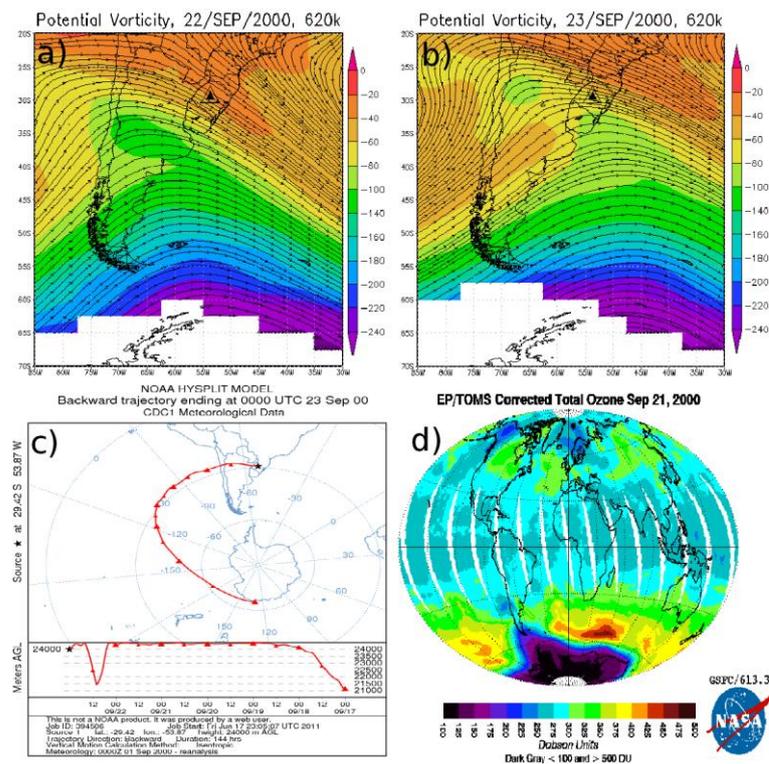


Figura A.28: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 23 e 21 de setembro de 2000 respectivamente.

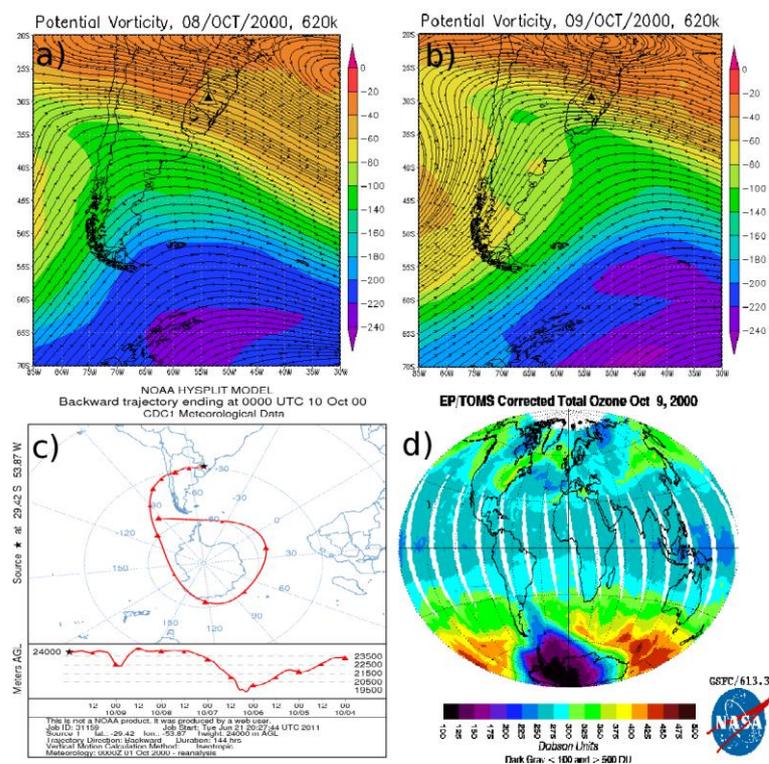


Figura A.29: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 09 de outubro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 08 (a) e 09 (b) de outubro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 10 e 09 de outubro de 2000 respectivamente.

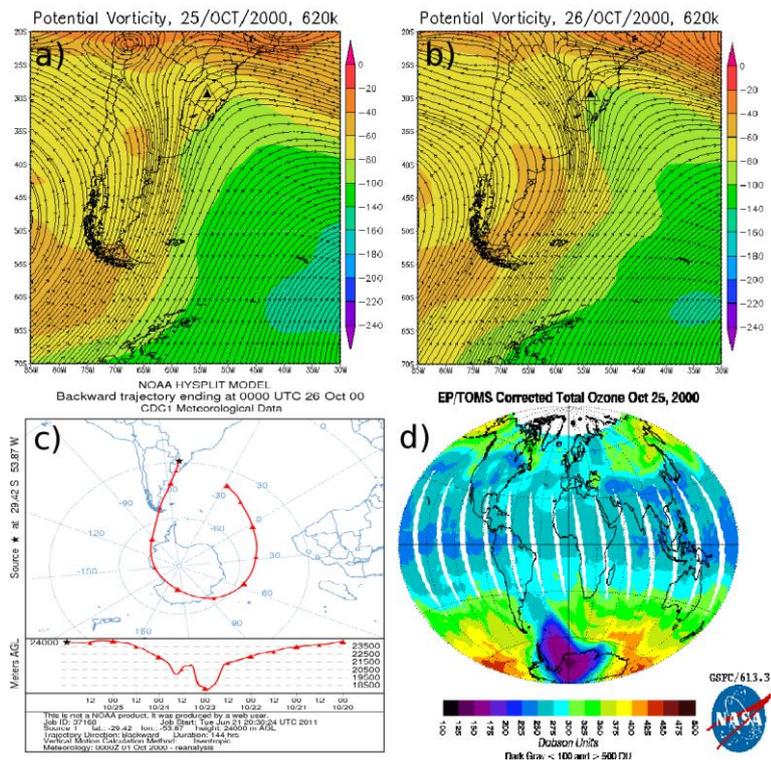


Figura A.30: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de outubro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de outubro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de outubro de 2000 respectivamente.

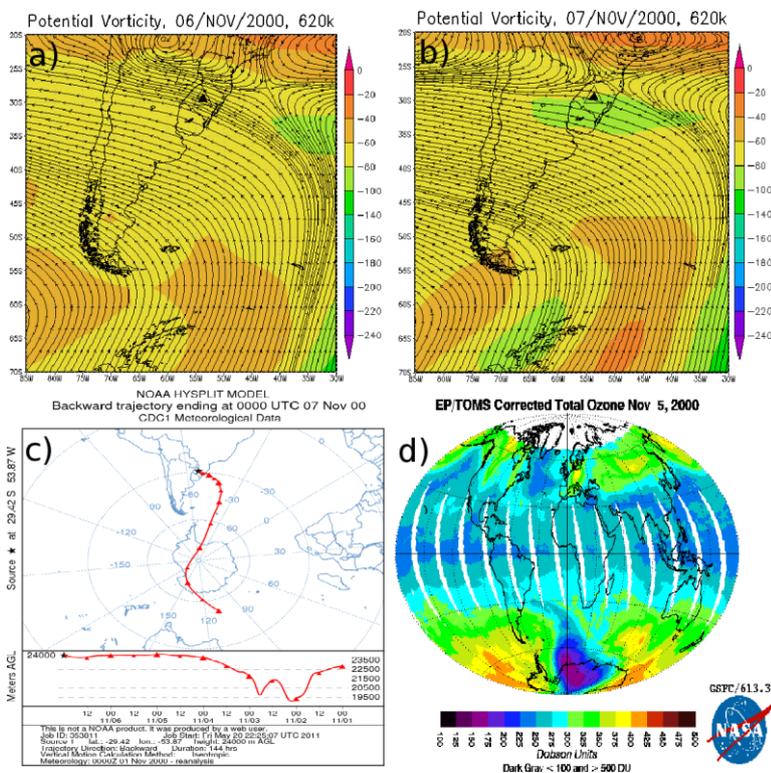


Figura A.31: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de novembro de 2000. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 07 (b) de novembro de 2000 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 07 e 05 de novembro de 2000 respectivamente.

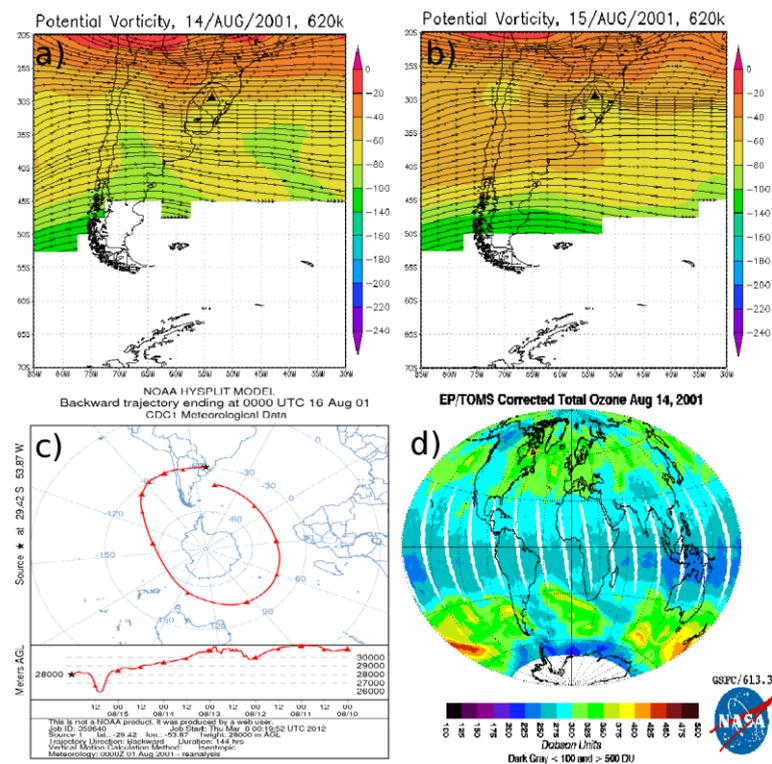


Figura A.32: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de agosto de 2001. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de agosto de 2001 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 16 e 14 de agosto de 2001 respectivamente.

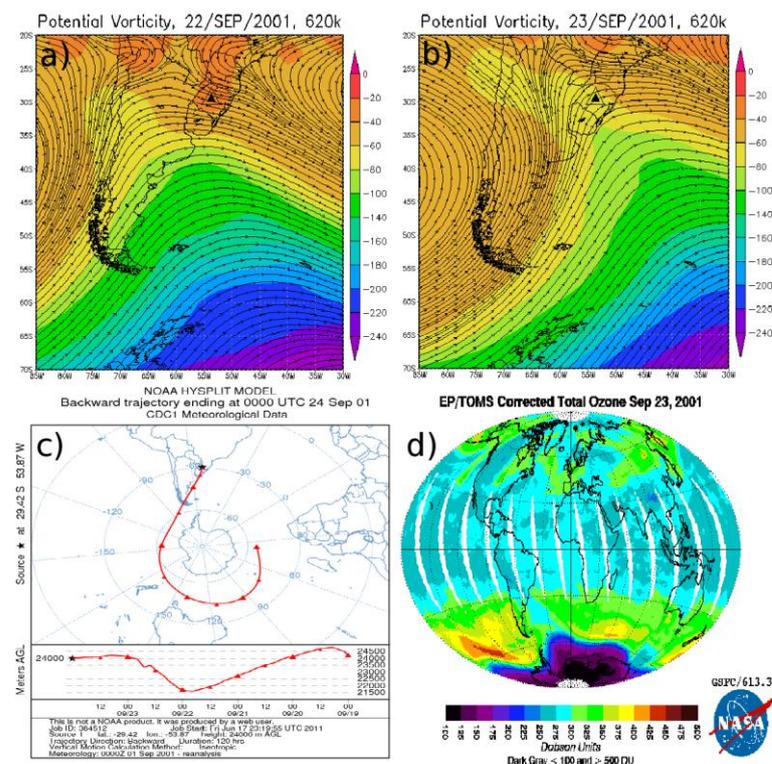


Figura A.33: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de setembro de 2001. Vorticidade Potencial e vento para 22 (a) e 23 (b) de setembro de 2001 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 24 e 23 de setembro de 2001 respectivamente.

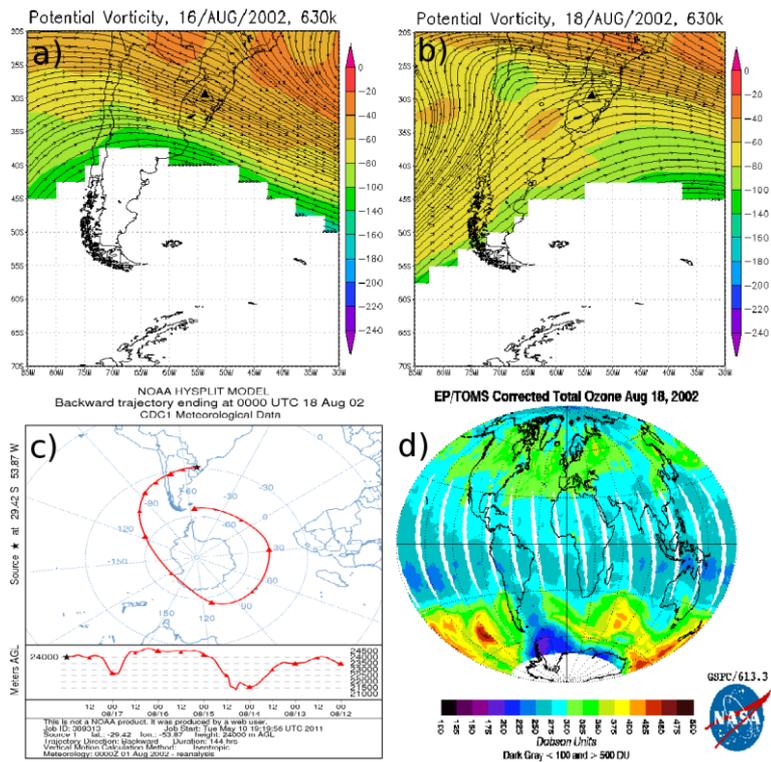


Figura A.34: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 18 de agosto de 2002. Vorticidade Potencial e vento para 16 (a) e 18 (b) de agosto de 2002 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 18 de agosto de 2002.

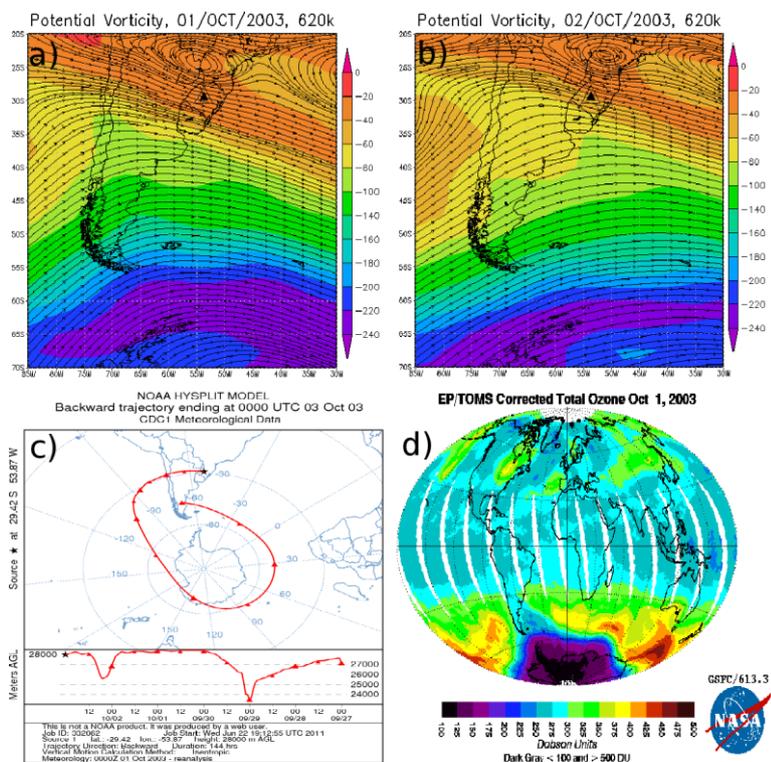


Figura A.35: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 02 de outubro de 2003. Vorticidade Potencial e vento para 01 (a) e 02 (b) de outubro de 2003 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 03 e 01 de outubro de 2003 respectivamente.

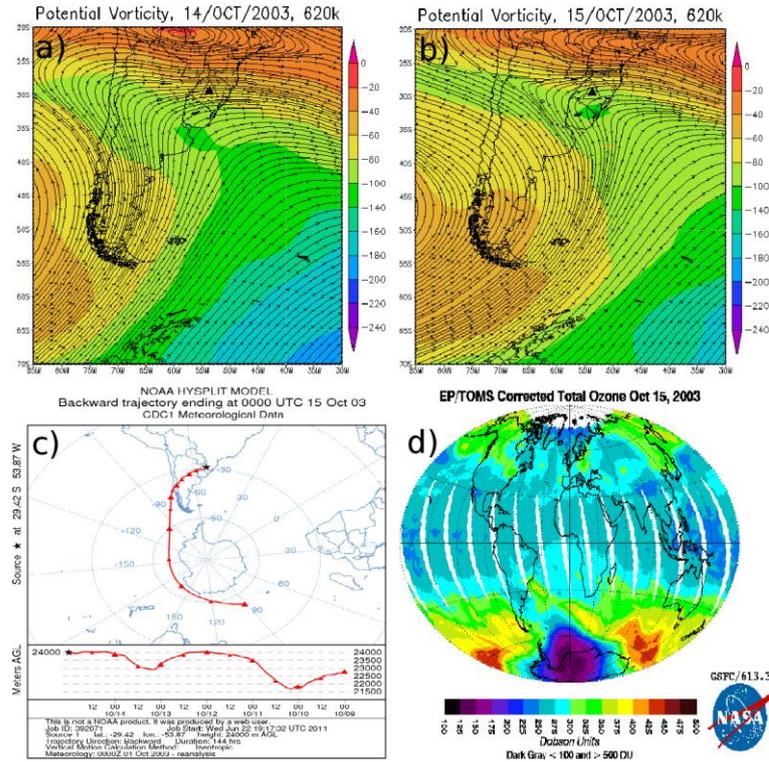


Figura A.36: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 15 de outubro de 2003. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 15 (b) de outubro de 2003 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 15 de outubro de 2003.

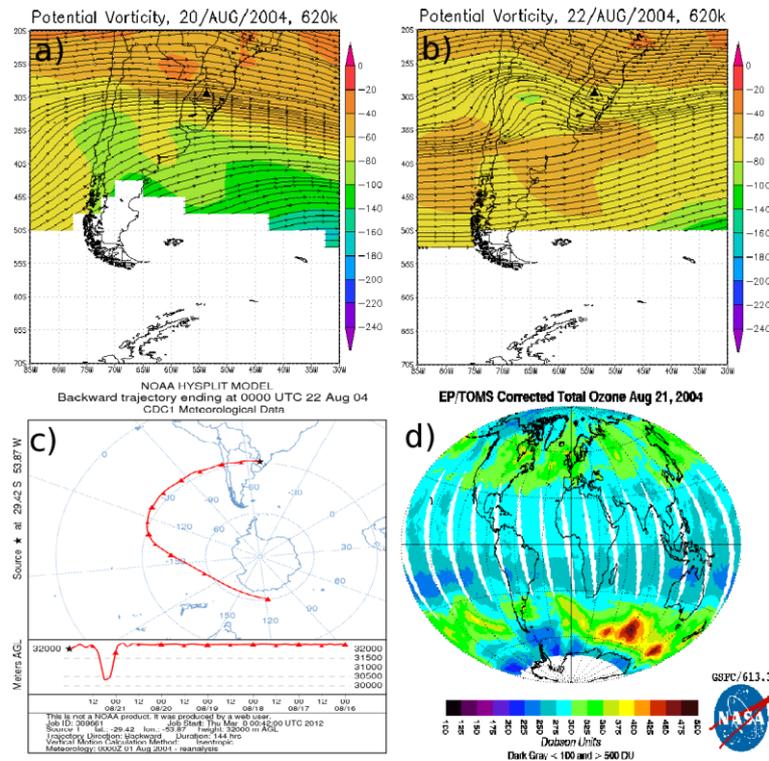


Figura A.37: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 22 de agosto de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 22 (b) de agosto de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 22 e 21 de agosto de 2004 respectivamente.

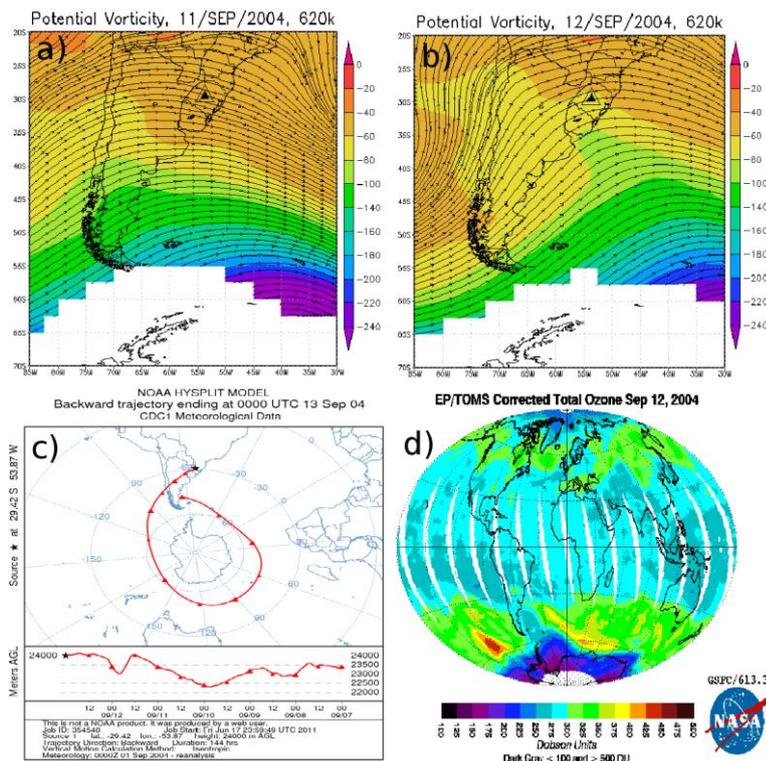


Figura A.38: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de setembro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 11 (a) e 12 (b) de setembro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 13 e 12 de setembro de 2004 respectivamente.

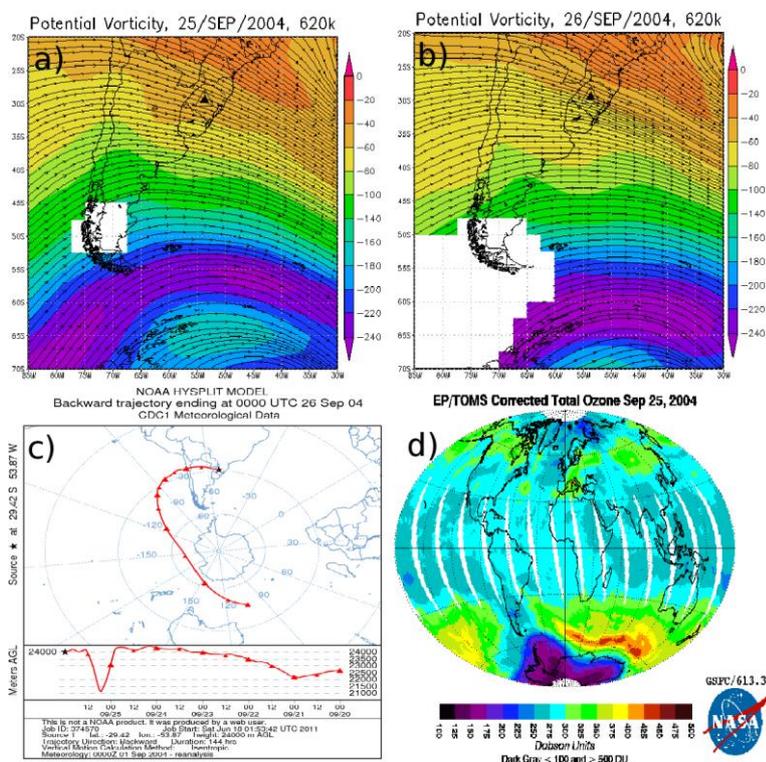


Figura A.39: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 26 de setembro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 25 (a) e 26 (b) de setembro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 26 e 25 de setembro de 2004 respectivamente.

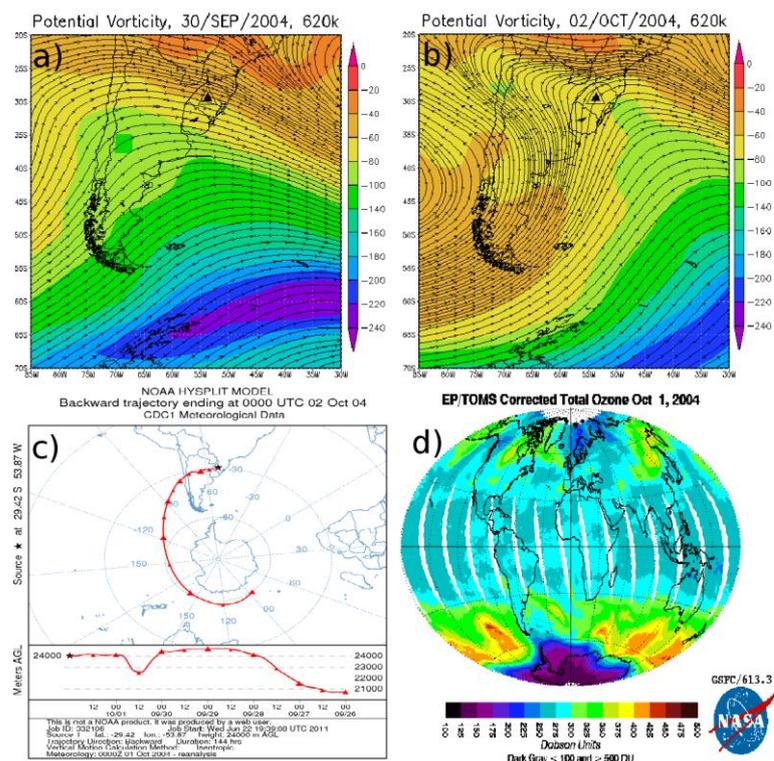


Figura A.40: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 03 de outubro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 30 de setembro (a) e 02 (b) de outubro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) para os dias 02 e 01 de outubro de 2004 respectivamente.

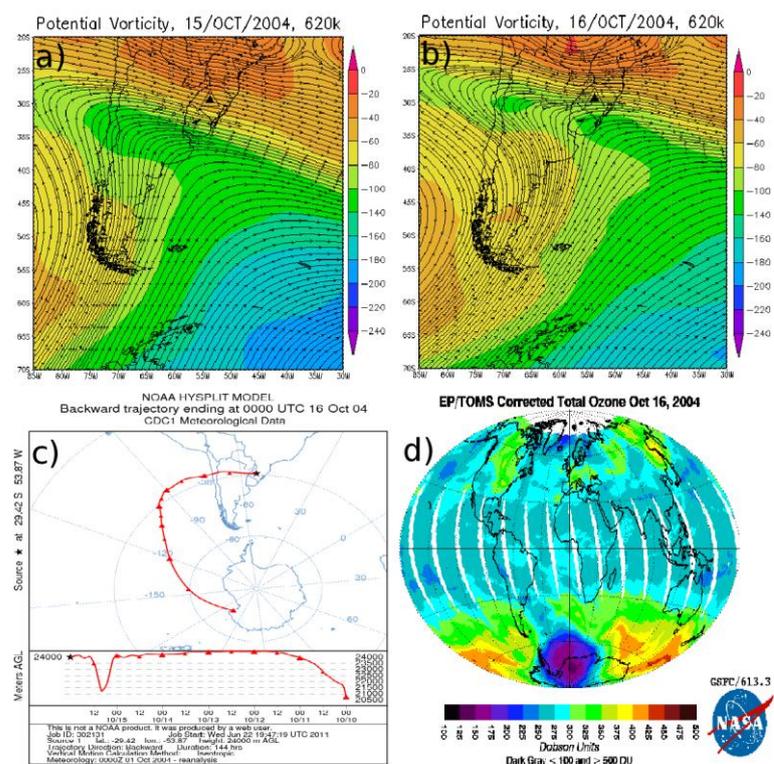


Figura A.41: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de outubro de 2004. Vorticidade Potencial e vento para 15 (a) e 16 (b) de outubro de 2004 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite Earth Prob (d) ambas para o dia 16 de outubro de 2004.

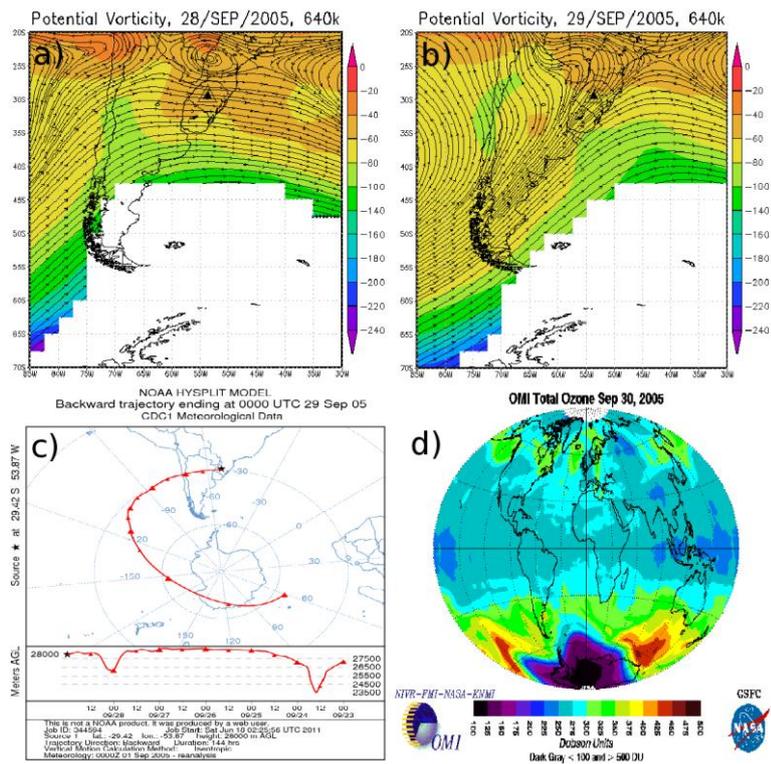


Figura A.42: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 29 (b) de setembro de 2005 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 29 e 30 de setembro de 2005 respectivamente.

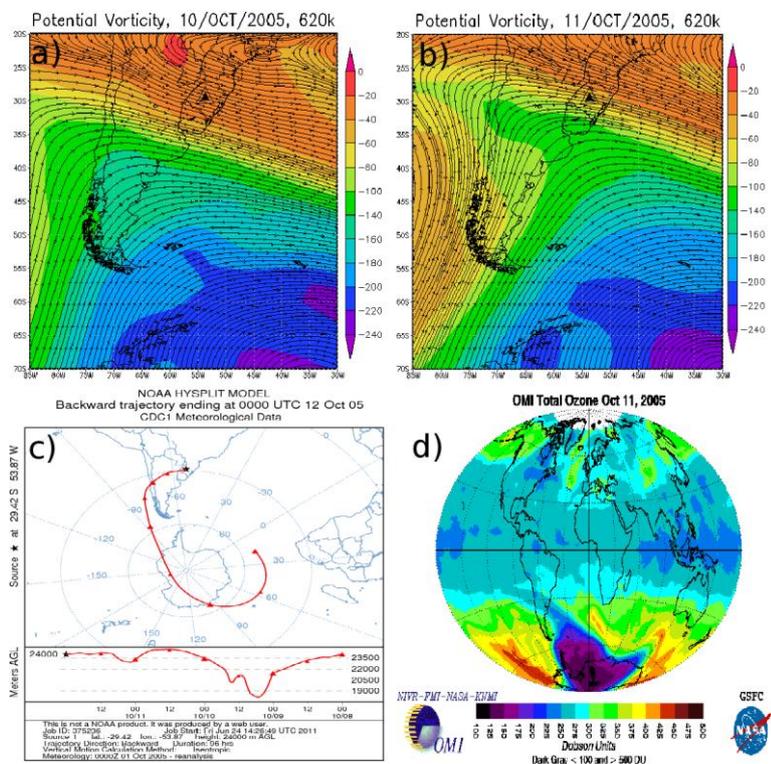


Figura A.43: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 11 de outubro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 11 (b) de outubro de 2005 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 12 e 11 de outubro de 2005 respectivamente.

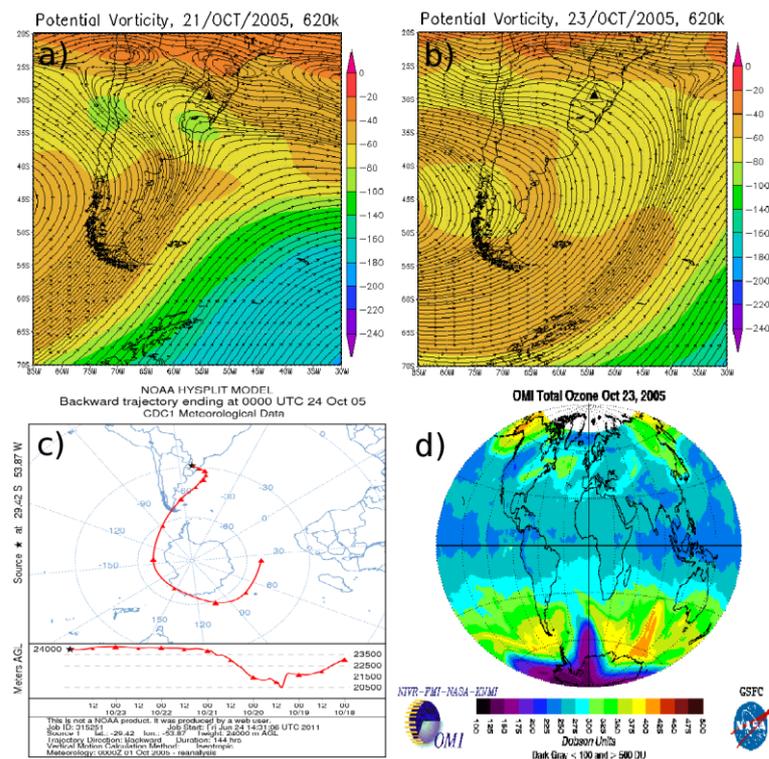


Figura A.44: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 23 de outubro de 2005. Vorticidade Potencial e vento para 21 (a) e 23 (b) de outubro de 2005 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 24 e 23 de outubro de 2005 respectivamente.

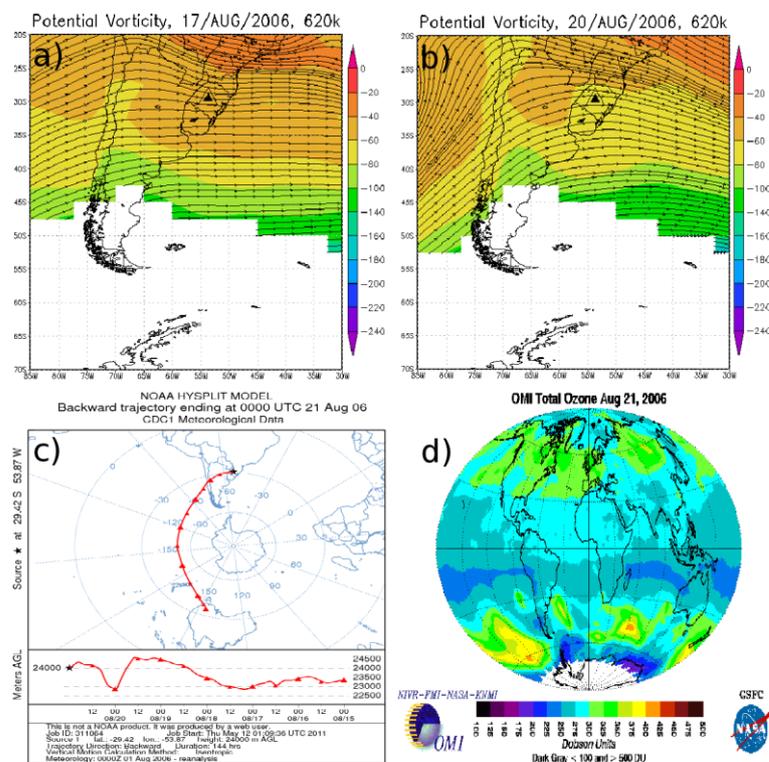


Figura A.45: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 20 de agosto de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 17 (a) e 20 (b) de agosto de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) ambas para o dia 21 de agosto de 2006.

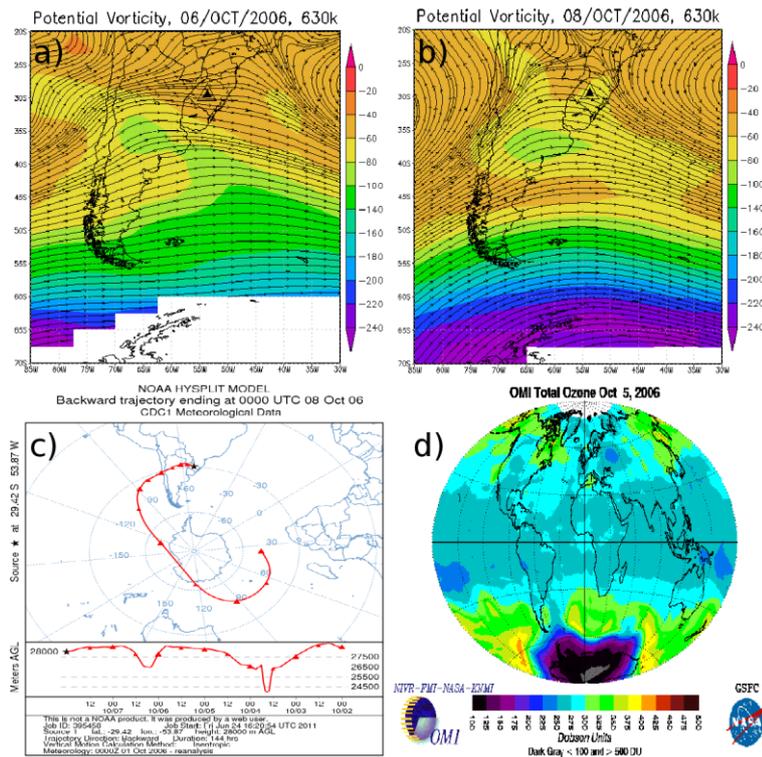


Figura A.46: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 07 de outubro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 08 (b) de outubro de 2006 a 630K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 08 e 05 de outubro de 2006 respectivamente.

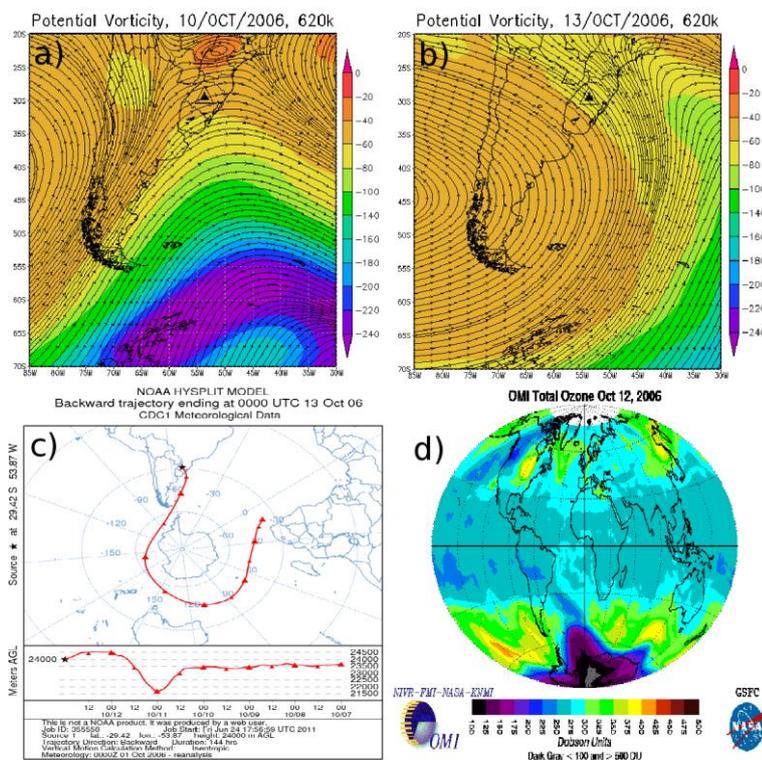


Figura A.47: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de outubro de 2006. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 13 (b) de outubro de 2006 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 13 e 12 de outubro de 2006 respectivamente.

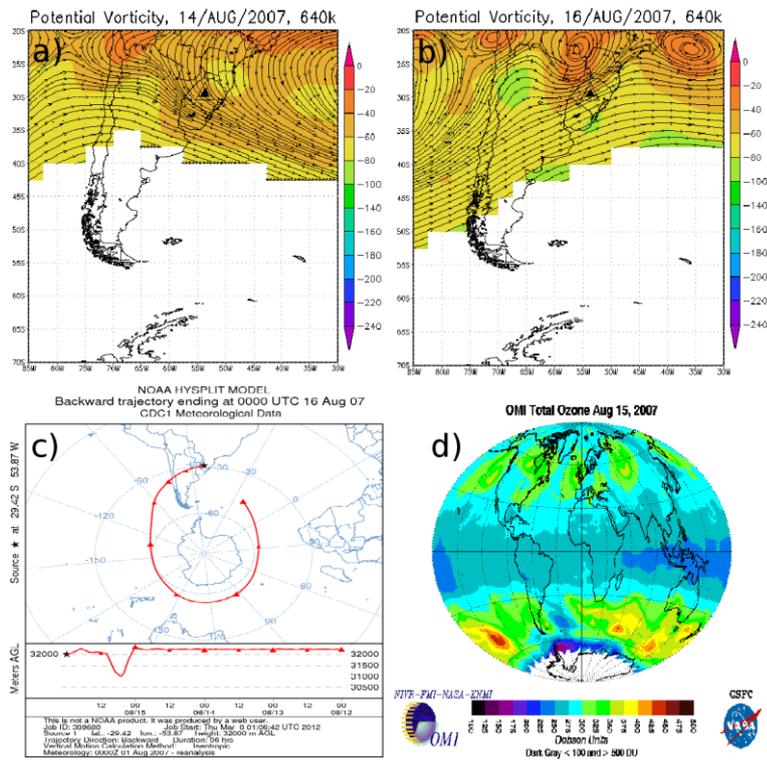


Figura A.50: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 16 de agosto de 2007. Vorticidade Potencial e vento para 14 (a) e 16 (b) de agosto de 2007 a 640K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 16 e 15 de agosto de 2007 respectivamente.

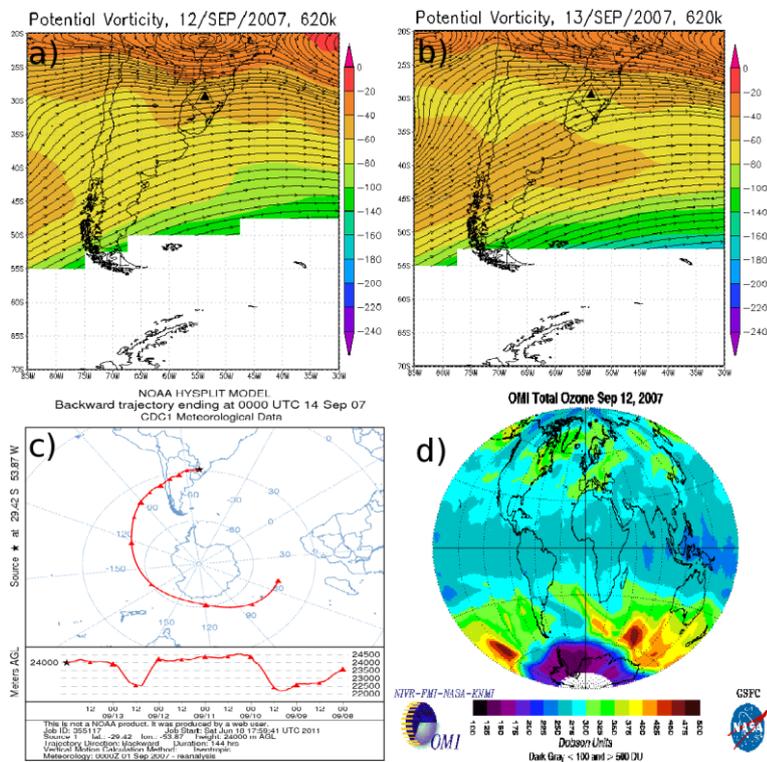


Figura A.51: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de setembro de 2007. Vorticidade Potencial e vento para 12 (a) e 13 (b) de setembro de 2007 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 14 e 12 de setembro de 2007 respectivamente.

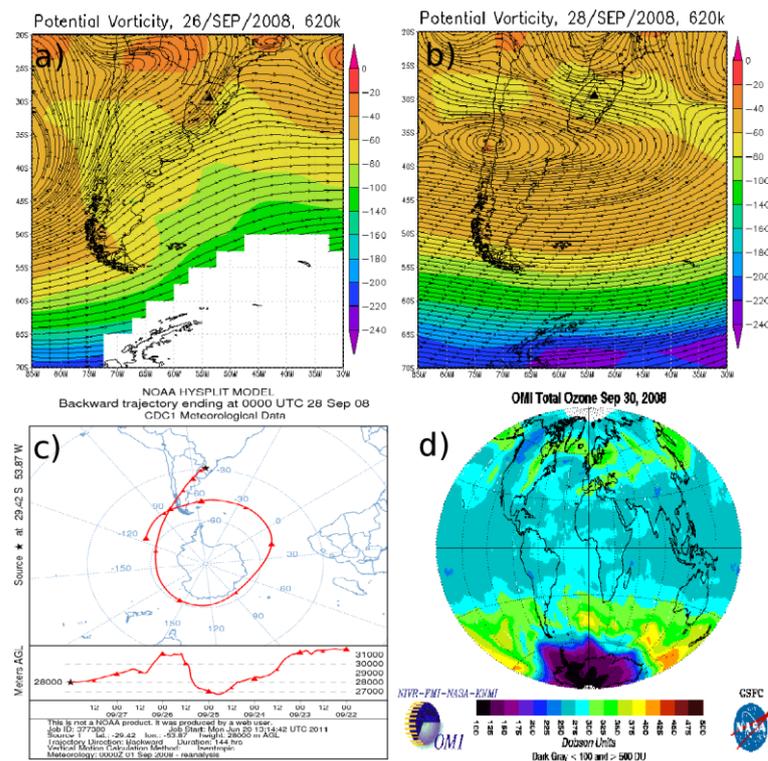


Figura A.52: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 28 de setembro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 26 (a) e 28 (b) de setembro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 28 e 30 de setembro de 2008 respectivamente.

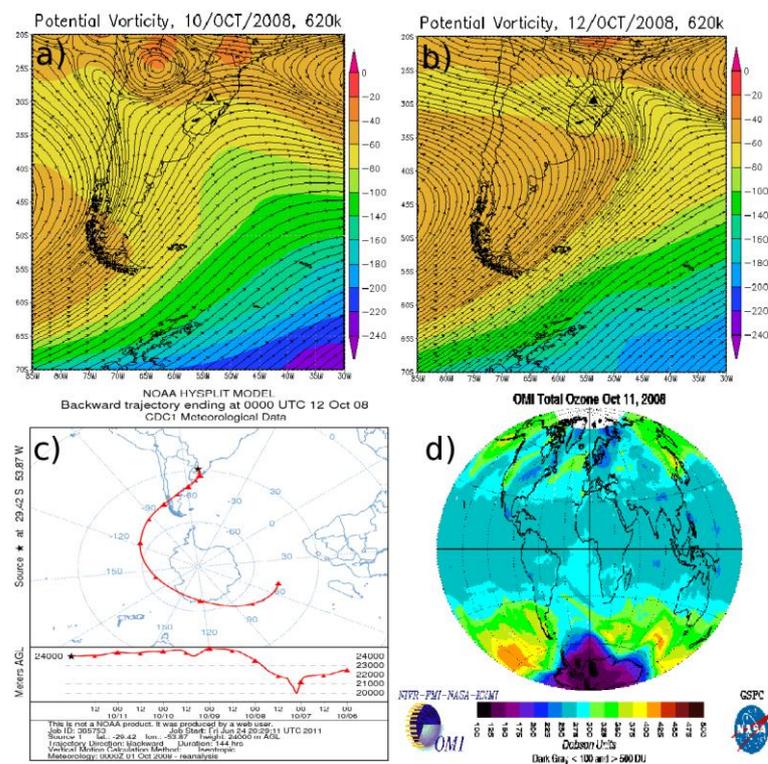


Figura A.53: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 12 de outubro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 10 (a) e 12 (b) de outubro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 12 e 11 de outubro de 2008 respectivamente.

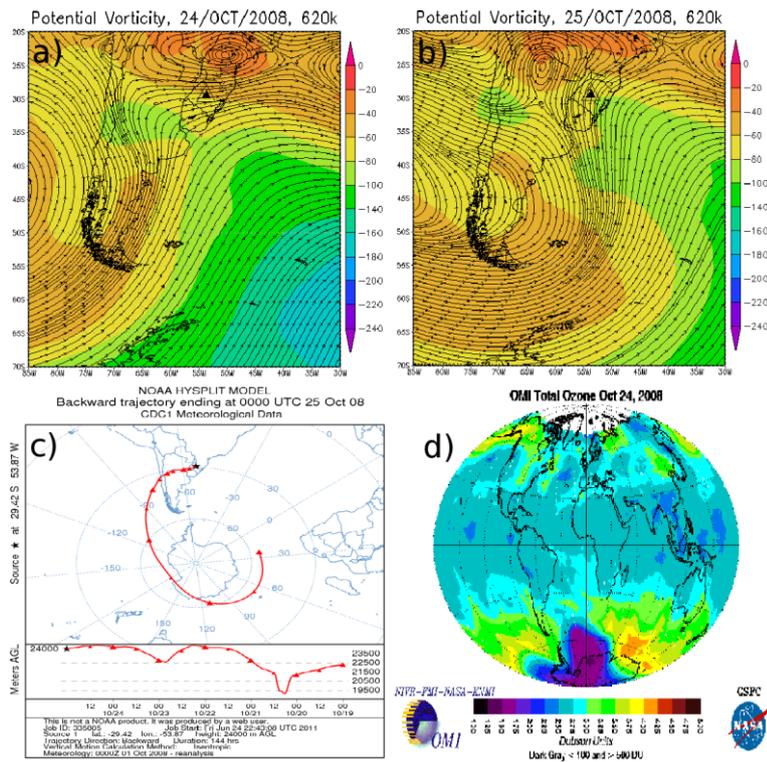


Figura A.54: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 25 de outubro de 2008. Vorticidade Potencial e vento para 24 (a) e 25 (b) de outubro de 2008 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 25 e 24 de outubro de 2008 respectivamente.

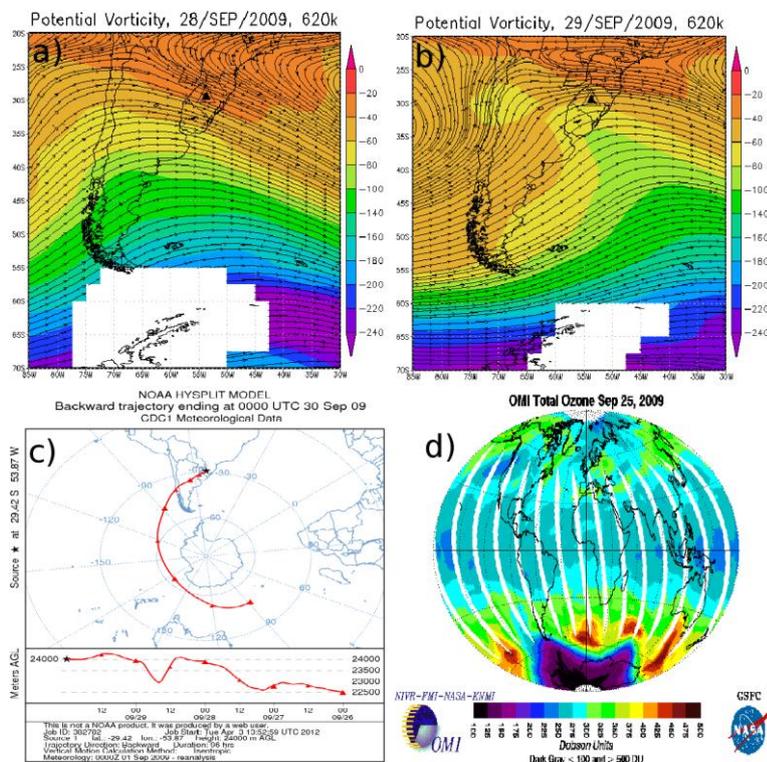


Figura A.55: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2009. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 29 (b) de setembro de 2009 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 30 e 25 de setembro de 2009 respectivamente.

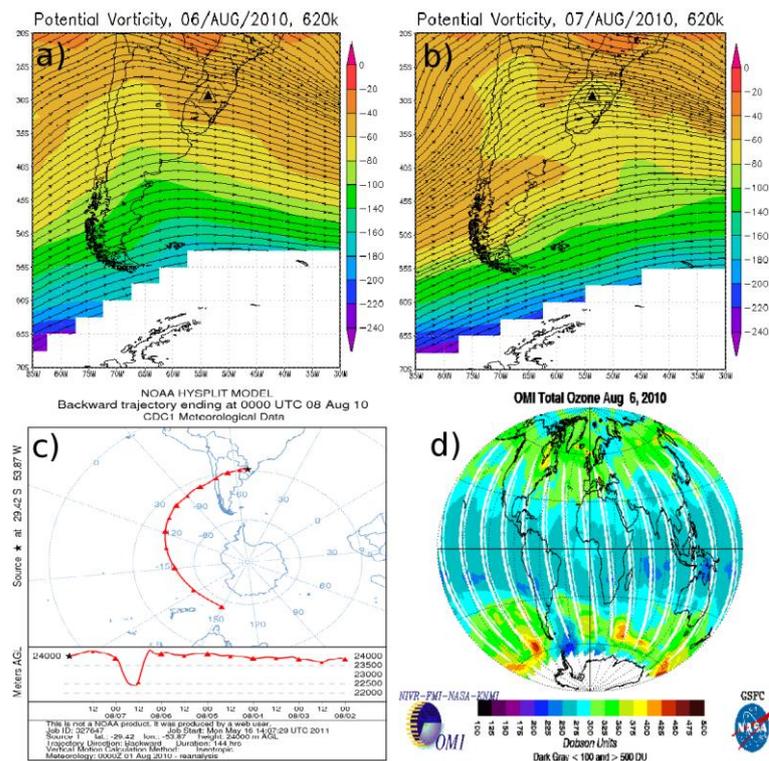


Figura A.56: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de agosto de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 06 (a) e 07 (b) de agosto de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 08 e 06 de agosto de 2010 respectivamente.

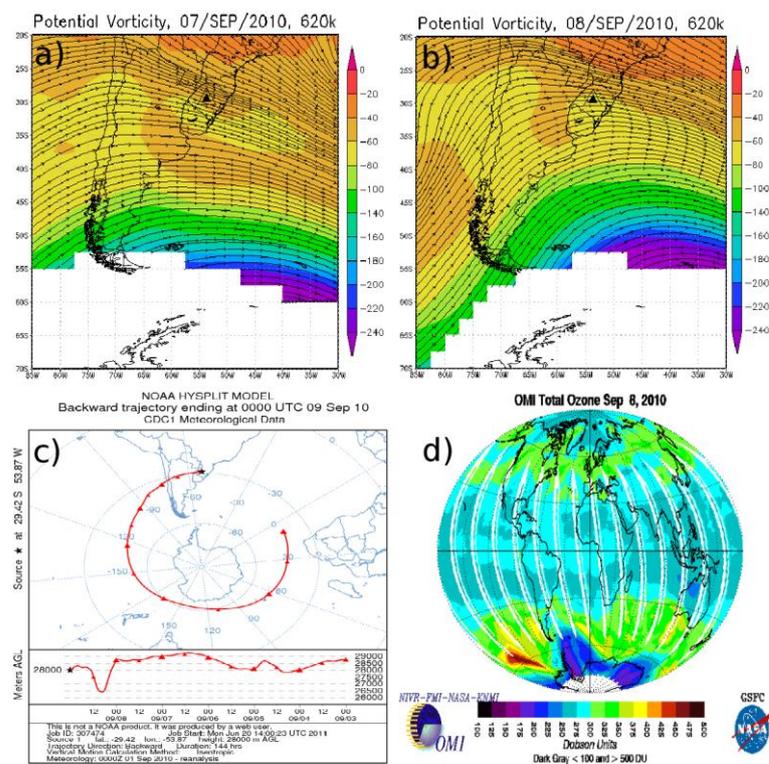


Figura A.57: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 08 de setembro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 07 (a) e 08 (b) de setembro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 09 e 08 de setembro de 2010 respectivamente.

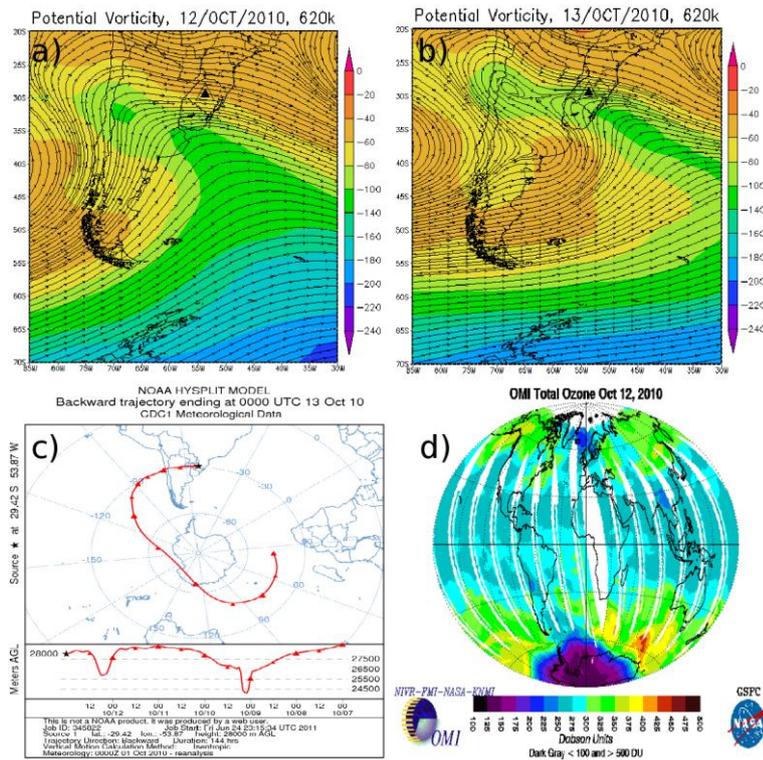


Figura A.58: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 13 de outubro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 12 (a) e 13 (b) de outubro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 13 e 12 de outubro de 2010 respectivamente.

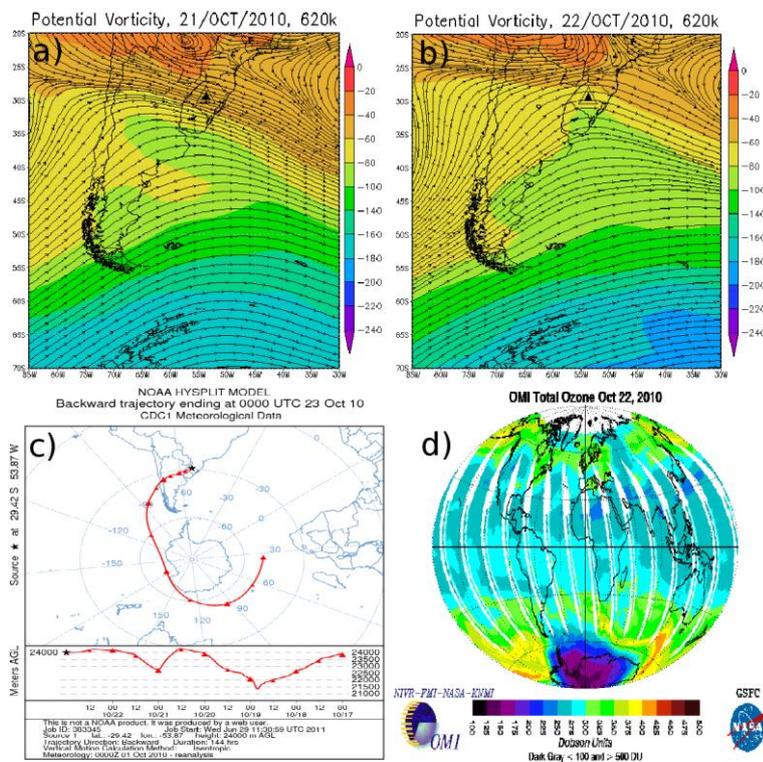


Figura A.59: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 22 de outubro de 2010. Vorticidade Potencial e vento para 21 (a) e 22 (b) de outubro de 2010 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 23 e 22 de outubro de 2010 respectivamente.

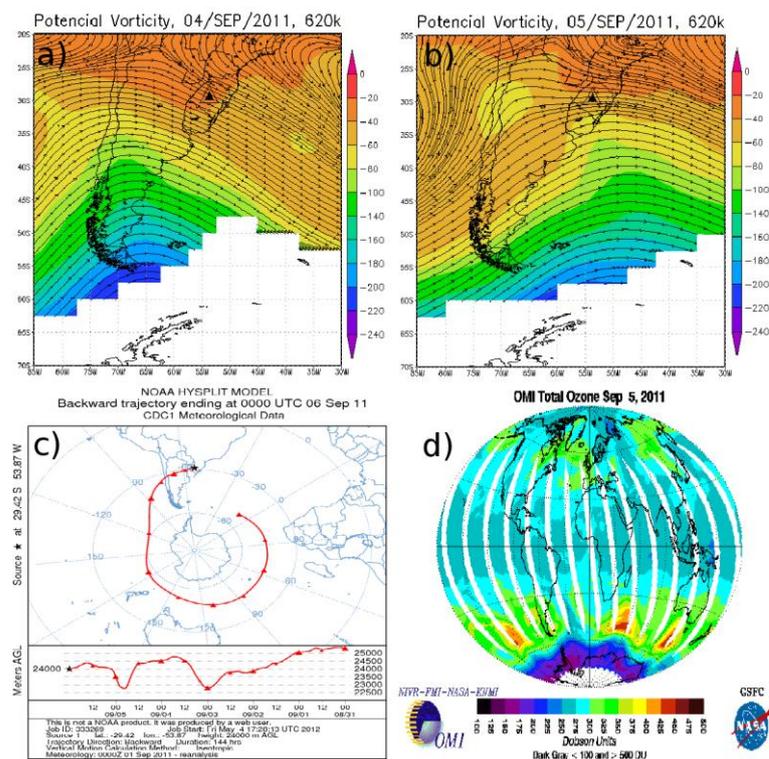


Figura A.60: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 05 de setembro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 04 (a) e 05 (b) de setembro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 06 e 05 de setembro de 2011 respectivamente.

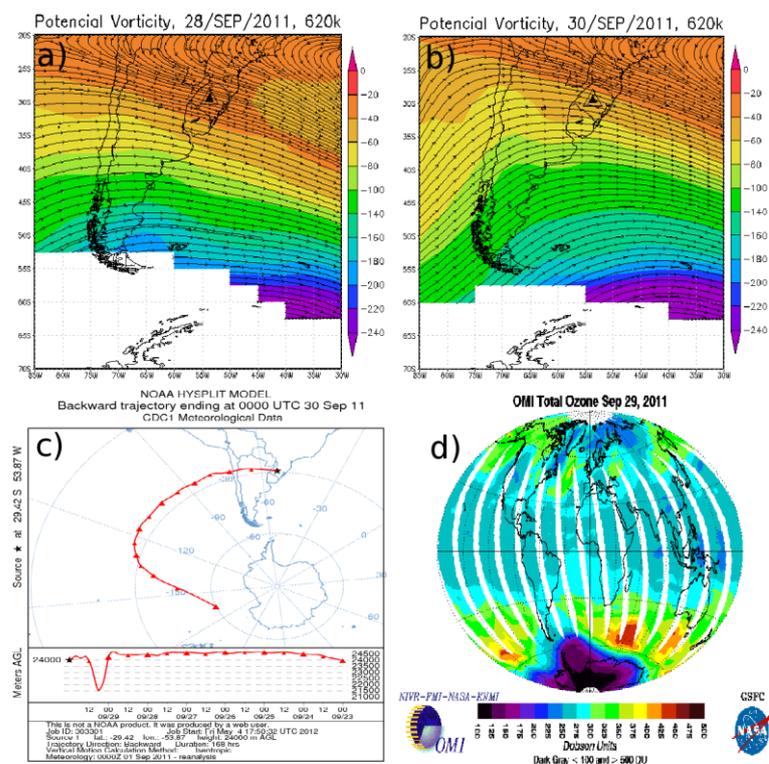


Figura A.61: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 29 de setembro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 28 (a) e 30 (b) de setembro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 30 e 29 de setembro de 2011 respectivamente.

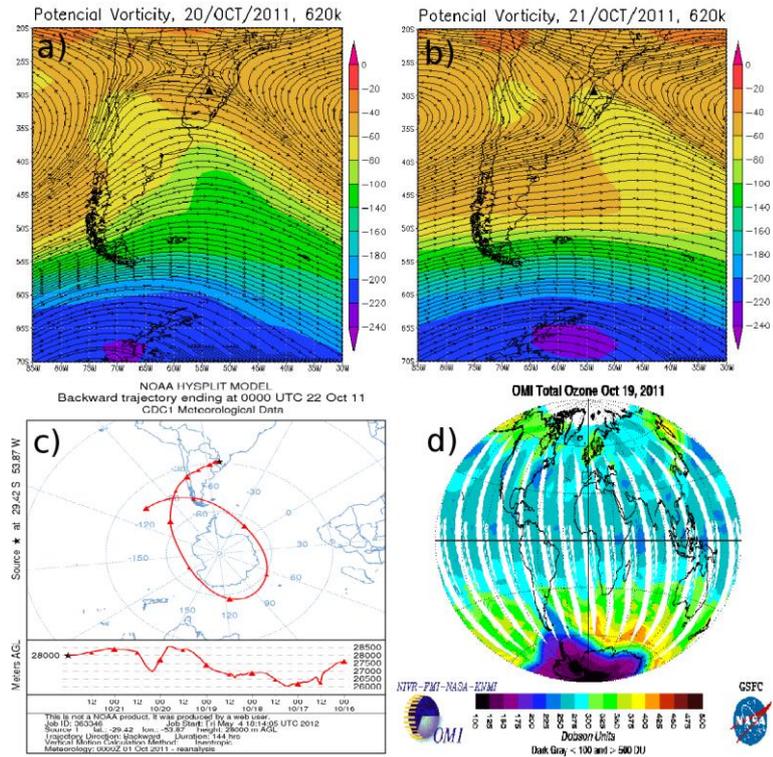


Figura A.62: Evento de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil do dia 21 de outubro de 2011. Vorticidade Potencial e vento para 20 (a) e 21 (b) de outubro de 2011 a 620K. Trajetória retroativa da massa de ar confeccionada pelo modelo Hysplit da NOAA (c) e imagem do satélite OMI (d) para os dias 22 e 19 de outubro de 2011 respectivamente.