



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Análise de um caso de ciclogênese explosiva ocorrido em 03/01/2014 no sul do Oceano Atlântico

Vilson Dias de Avila¹; André Becker Nunes²; Rita de Cássia Marques Alves³

¹ Doutorando em sensoriamento remoto no PPGSR/UFRGS, Autor corresponde: e-mail: vilsonavila@yahoo.com. Endereço: Av. Bento Gonçalves 9500, Campus do Vale, Porto Alegre-RS, 91501-970; ² Professor do Departamento de Meteorologia, UFPEL, beckernunes@gmail.com, Campus Capão do Leão; ³ Professora do PPGSR/CEPSRM/UFRGS, rita.cma@terra.com.br, Campus do Vale.

Artigo recebido em 04/04/2016 e aceito em 02/08/2016

RESUMO

A região sul do Brasil está próxima de uma das regiões identificadas como ciclogênicas com alta frequência de ciclones extratropicais. Há um tipo de ciclone extratropical que é caracterizado por um aprofundamento muito rápido no campo de pressão a superfície, gerando um forte gradiente horizontal de pressão que produz grandes quantidades de precipitação, ventos muito fortes e ondas altas. Este tipo de ciclone é chamado de ciclone explosivo e normalmente se forma sobre o mar e atinge as cidades da costa leste que são densamente povoadas causando prejuízos consideráveis. É um fenômeno de difícil previsão devido a rapidez com que se forma e à escassez de dados observacionais sobre o mar. Este trabalho faz parte de um esforço no sentido de obter um maior conhecimento da sua estrutura dinâmica e termodinâmica. O ciclone estudado se formou a partir das 00Z do dia 03/01/2014 e apresentou uma queda de 42 hPa em 24 horas classificando-se como ciclogênese explosiva forte, o que é raro na região, e mais ainda no verão. A análise dos campos mostrou um desenvolvimento explosivo bem de acordo com a literatura no que se refere à anomalia da tropopausa dinâmica, com sua distribuição de vortacidade potencial, umidade relativa, movimentos verticais e tendência do Ozônio, enquanto os valores de calor latente e sensível foram surpreendentemente insignificantes. Pela região onde se iniciou, na confluência entre as correntes quente do Brasil e fria das Malvinas, o mecanismo que mais influenciou a formação foi a instabilidade baroclínica.

Palavras-chave: vortacidade potencial, tropopausa dinâmica.

Analysis of an explosive cyclogenesis case occurred in 03/01/2014 on the south of the Atlantic Ocean

ABSTRACT

The south region of Brazil is near one of the regions identified as cyclogenetic, with a high frequency of extratropical cyclones. There is a kind of extratropical cyclone characterized by a very rapid deepening in the field of surface pressure generating a strong horizontal pressure gradient producing great amounts of precipitation, strong winds and high waves. This type of cyclone is called explosive cyclone and usually forms on the sea surface attaining the densely populated cities of the east coast and causing considerably losses. It is a phenomenon of difficult prediction due to the rapid formation and the scarceness of observational data over the sea. This work is part of an effort to acquire a better knowledge of its dynamic and thermodynamic structure. The studied cyclone formed since 00Z of 01/03/2014 and presented a drop of 42 hPa in the following 24 hours classifying as strong explosive cyclogenesis, rare in that region and even more in the summer. The fields analysis showed an explosive development according well with the literature respecting the dynamic tropopause anomaly with its potential vorticity, relative humidity, vertical velocity and Ozone tendency distributions, while the values of latent and sensible heat were surprisingly insignificant. By the initial region

in the confluence of the hot Brazilian Current and the cold Malvinas Current, the mechanism more influent to the formation of the cyclone was the baroclinic instability.

Keywords: potential vorticity, dynamic tropopause

Introdução

Um dos sistemas meteorológicos transientes que mais atingem o Sul da América do Sul, e que, portanto, influenciam diretamente o clima da região, são os ciclones extratropicais.

Ciclogênese é um termo que geralmente se refere ao desenvolvimento de perturbações do tempo em escala sinótica, e enfatiza o papel da vortacidade relativa no desenvolvimento de sistemas desta escala (Holton, 1992). Por exemplo, ciclones tropicais formam-se devido ao calor latente conduzido por atividades convectivas e são de núcleo quente, enquanto ciclones extratropicais formam-se como ondas ao longo de frentes ou então a partir de um cavado pré-existente a sotavento de montanhas antes de se ocluir mais tarde como ciclones de núcleo frio (Pettersen e Smebye, 1971).

No hemisfério Norte foram realizados muitos estudos sobre a ciclogênese e o movimento dos ciclones, sendo que o primeiro modelo conceitual foi concebido por Bjerknæs e Solberg (1922), seguido de trabalhos como os de Sutcliffe (1947), Pettersen (1956), Palmen e Newton (1969), e muitos outros.

Na América do Sul poucos estudos tinham sido realizados até 1990 (e.g. Talajaard, 1967; Necco, 1982; Satyamurty et al., 1990), os quais apresentaram conclusões discrepantes devido ao fato de que Necco (1982) utilizou apenas um ano de dados enquanto Satyamurty et al. (1990) utilizaram dois anos de dados de superfície, baseando-se principalmente em imagens de satélite, as quais não permitem o delineamento do nível da ciclogênese.

A fim de elucidar o verdadeiro comportamento da ciclogênese, Gan e Rao (1991) realizaram um cálculo da frequência da ciclogênese em superfície sobre a América do Sul utilizando dez anos de dados (1979-1988). Da observação dos 1091 casos ocorridos neste período, eles descobriram que a frequência da ciclogênese é maior no inverno, concordando com Necco (1982) e discordando de Satyamurty et al. (1990), sendo esta frequência máxima no mês de maio e mínima no mês de dezembro. Além da variação sazonal da frequência da ciclogênese, eles encontraram variação interanual, com as maiores frequências em anos de El Niño, nos quais a atmosfera inferior apresenta um número de Richardson menor favorecendo a instabilidade baroclínica, e também

variação espacial com destaque para duas regiões de preferência para a ocorrência de ciclogênese.

Das duas regiões ciclogênicas identificadas por Gan e Rao (1991), uma está localizada aproximadamente no Uruguai, onde a frequência é maior no inverno, associada a influência dos Andes e a instabilidade baroclínica, e a outra próximo do Golfo de São Matias na Argentina, onde a frequência é maior no verão, associada a instabilidade baroclínica do escoamento de oeste.

Na última década do século XX, foram desenvolvidos esquemas automáticos para detecção e rastreamento de ciclones e anticiclones extratropicais, cujos algoritmos servem para detectar mínimos e máximos em campos de pressão ou geopotencial próximo da superfície, utilizando dados oriundos de reanálises com diferentes resoluções temporais e espaciais. Neste tipo de abordagem, é válido mencionar os trabalhos de Murray e Simmonds (1991), Sinclair (1995), Blender et al. (1997), Trigo et al. (1999) e Mendes et al. (2010).

Sinclair (1995), utilizando 15 anos de dados de reanálises do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) e Simmonds e Keay (2000) utilizando dados de reanálises do NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), obtiveram resultados que confirmaram aqueles obtidos por Gan e Rao (1991).

Posteriormente, outros estudos mostraram a existência de regiões ciclogênicas na América do Sul, sendo que Hoskins e Hodges (2005) e Reboita et al. (2005, 2010) descobriram uma terceira região ciclogênica abrangendo a costa leste ao sul e sudeste do Brasil, com maior frequência de eventos no verão, cujas causas precisam ainda ser investigadas. Allen et al. (2010) encontraram também uma outra região ciclogênica no extremo sul da América do Sul.

Pinto (2010) analisou os aspectos dinâmicos da formação de ciclones sobre as regiões ciclogênicas da costa leste da América do Sul, através do ciclo de energia de Lorenz. Concluiu que as ciclogêneses da América do Sul podem apresentar características variadas. Por exemplo: dos casos estudados, a ciclogênese formada na região sul/sudeste do Brasil teve como mecanismo principal de crescimento a instabilidade barotrópica, enquanto a que se formou na região da

foz do Rio da Prata tornou-se um ciclone explosivo com rápida intensificação e o que se formou na costa sul da Argentina foi o que apresentou mais as características de ciclone extratropical, sendo que estes dois últimos tiveram como mecanismo principal de crescimento a instabilidade baroclínica. Este estudo apontou para o fato de o ciclone formado na região sul/sudeste do Brasil apresentar características híbridas não devendo ser considerado estritamente como ciclone extratropical.

Oda (2005) estudou a influência da distribuição espacial da TSM (Temperatura da Superfície do Mar) sobre a ciclogênese, através de simulações numéricas, impondo campos de TSM idealizado e retirando os campos de fluxos de calor latente e sensível a superfície do mar. Seu estudo mostrou que os ciclones não seriam favorecidos em seu desenvolvimento por gradientes intensificados de TSM (e.g. confluência das correntes do Brasil e Malvinas), mas que podem ter sua intensificação relacionada com transferência de baroclinia do oceano para a atmosfera em escalas maiores de tempo. Por outro lado, mostrou que em um ambiente baroclínico, os efeitos adiabáticos respondiam pelo desenvolvimento da ciclogênese e os fluxos de calor não tinham importância, enquanto que nos casos em que as forçantes adiabáticas não eram tão acentuadas os fluxos de calor tiveram papel importante no desenvolvimento da ciclogênese.

Dentre os ciclones extratropicais destaca-se um tipo de ciclone que é caracterizado por um aprofundamento muito rápido da pressão a superfície, o que lhe confere gradiente horizontal de pressão intenso, dando origem a tempo muito severo. Este processo, chamado de “Bombogênese”, “Ciclogênese Explosiva”, ou ainda “Ciclogênese de Costa Leste” é caracterizado por um aprofundamento da pressão a superfície de 1 Bergeron (queda de 1mb/hora, em um período de 24 horas, para uma latitude de 60°)¹. Segundo Sanders e Gyakum (1980), os ciclones explosivos (CE) produzem grandes quantidades de precipitação, gerando ventos fortes, ondas altas e pouca visibilidade. Estão incluídos entre os eventos mais severos que afetam regiões costeiras com altas densidades demográficas e também oceanos abertos, constituindo um problema de previsão do tempo cuja importância é fundamental, sendo que a capacidade de prever estes eventos é ainda limitada pela escassez de dados meteorológicos

sobre os oceanos e pelo quanto falta entender sobre a física destes fenômenos.

A instabilidade baroclínica é citada frequentemente como sendo um dos principais mecanismos para o desenvolvimento da maioria dos ciclones explosivos. Embora os papéis da instabilidade baroclínica e dos processos diabáticos no aprofundamento explosivo de ciclones extratropicais sejam objetos de debate há muito tempo, outros fatores incluem a posição de um cavado em 500 hPa e padrões de espessura, processos frontogenéticos profundos que ocorrem tanto corrente acima como corrente abaixo da baixa em superfície, a influência da interação atmosfera-oceano e liberação de calor latente.

Dois casos muito famosos foram estudados por Uccellini et al. (1985) e Uccellini (1986). Um ocorreu entre 9 e 11 de setembro de 1978 no Atlântico Norte, próximo a Corrente do Golfo e foi denominado de “Queen Elisabeth II Cyclone” (Gyakum, 1983a, 1983b), cujo desenvolvimento pode ser documentado em dois estágios: O primeiro consistindo do surgimento da baixa ao longo de uma outra baixa rasa pré-existente em uma zona hiperbaroclínica em fase de intensificação e o segundo estágio foi a ciclogênese explosiva que consistiu da interação de um cavado transiente da alta troposfera com a camada limite rica em vortacidade. O outro caso muito famoso ocorreu entre 17 e 19 de fevereiro de 1979 na costa leste dos Estados Unidos e foi chamado de “President’s Day Cyclone” (Bosart, 1981; Bosart e Lin, 1984; Whitaker et al., 1988), no qual a baixa desenvolveu-se ao longo de uma forte frente em intensificação na superfície, a qual apresentava convecção cumulus significativa associada com ela.

Black e Pezza (2013), de forma pioneira, analisaram o ciclo energético de Lorenz associado com a ciclogênese explosiva para quatro regiões do globo com maior atividade explosiva (o nordeste do Pacífico, o norte do Atlântico, o sudoeste do Pacífico e o sul do Atlântico). Eles observaram uma robusta assinatura no referido ciclo de energia, no qual conversões anômalas de energia começam 48 horas antes do desenvolvimento explosivo e permanecem fortes por 120 horas, ocorrendo de forma idêntica para as regiões analisadas. E que, embora estas conversões impliquem em crescimento baroclínico clássico, elas não são observadas em ciclones regulares, nos quais estes autores propõem que o ciclo baroclínico não é suficientemente vigoroso para deixar uma trilha

¹ De forma mais geral, B depende da latitude: $1 B = \{24 \text{ hPa} [\text{sen}(\varphi)/\text{sen}(60^\circ)]\} / \text{dia}$, onde φ corresponde a latitude)

distinguível na energética ambiental. Eles acreditam que esta descoberta abre uma nova via de exploração do comportamento de tempestades explosivas baseadas no ambiente de grande escala, podendo proporcionar sua previsão.

Para a América do Sul foram feitos alguns estudos, principalmente, da climatologia dos ciclones explosivos (e.g. Mendes et al., 2010; Bittencourt et al., 2013), além do estudo sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associados a ciclogênese explosiva (Piva, 2001 e Piva et al., 2008 e 2011) e alguns abordando certas características dinâmicas (Iwabe e Rocha, 2009).

Bittencourt et al. (2013) apresentaram uma climatologia para os ciclones explosivos na região ciclogênica da América do Sul, utilizando dados de reanálises do NCEP/NCAR de 1957 à 2010 e o esquema automático para detecção e monitoramento de ciclones desenvolvido na Universidade de Melbourne, Austrália (Murray e Simmonds, 1991). Todos os ciclones extratropicais identificados pelo esquema foram submetidos ao método proposto por Sanders e Gyakum (1980) para obter a Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central (TNA), através da qual os ciclones são classificados como explosivos quando esta taxa excede uma unidade (1 Bergeron). A TNA foi calculada de duas maneiras: Primeiro, utilizando o valor da variação da pressão central (TNA_c); Segundo, utilizando a variação da pressão central relativa (TNA_r), a qual é obtida subtraindo-se da pressão central o valor climatológico diário (Lin e Simmonds, 2002). Comparando os resultados obtidos com os dois métodos, Bittencourt et al., (2013) observaram que, dentre os 3483 ciclones extratropicais detectados através do esquema automático, foram classificados como explosivos 144 eventos usando TNA_c e 85 usando TNA_r.

Segundo Bittencourt et al. (2013), o Ciclone Explosivo na América do Sul é um fenômeno raro, com cerca de 4,1 % (utilizando TNA_c) e 2,4 % (utilizando TNA_r) de frequência dentre todos os ciclones que se formam nessa área. Apesar da raridade, a área ciclogênica da América do Sul é considerada a de maior frequência de Ciclones Explosivos do Hemisfério Sul (Allen et al., 2010). Os resultados encontrados nesse estudo concordam com aqueles encontrados por Lim e Simmonds (2002), que utilizaram outra base de dados. A maior frequência de Ciclones Explosivos acontece nos meses mais frios (Junho, Julho e Agosto), com 47,1 % dos casos. Na área deste estudo, os Ciclones Explosivos se formam apenas ao sul de 27 °S e a maioria dos sistemas, 72,9 %, apresentam início da trajetória com

desenvolvimento explosivo sobre o oceano. Quase todos os Ciclones Explosivos tem deslocamento para sudeste e a velocidade média desse deslocamento foi de 13,8 m s⁻¹, enquanto a velocidade encontrada por Reboita (2008), utilizando outra metodologia e base de dados, foi de 9 m s⁻¹.

Vários trabalhos, como por exemplo, Hoskins (1985), Uccellini et al. (1985), Wang e Rogers (2001), indicam a associação entre as variações da altura da tropopausa com a ocorrência de ciclogênese explosiva em superfície. Na literatura, como por exemplo em Santurette e Georgiev (2005), tem-se que a superfície de 1.5 PVU (potential vorticity unit) é representativa da tropopausa dinâmica, embora alguns trabalhos considerem o valor de 1.0 PVU (Bithell et al. 1999) ou 2.0 PVU (Cau et al. 2007), lembrando que no Hemisfério Sul valores negativos de vorticidade potencial representam vorticidade ciclônica. Na meteorologia, é comum a análise de vorticidade potencial através dos campos de vorticidade potencial de Ertel (Schubert, 2004; Hoskins, 1985). É esperado, portanto, que em condições neutras, i.e., sem a presença de cavados em altos níveis, que nos extratropicais a tropopausa (1.5 PVU, em que 1 PVU = 1 x 10⁻⁶ K kg⁻¹ m² s⁻¹) situe-se aproximadamente no nível de 200 hPa. Desta forma, espera-se que em algum estágio do ciclo de vida do ciclone explosivo, valores de 1.5 PVU sejam encontrados em níveis inferiores. Já trabalhos como Giordani e Caniaux (2001) e Piva et al. (2008) salientam a influência dos fluxos de calor de superfície na ocorrência de ciclogênese explosiva.

Dentre os trabalhos que estudaram a climatologia das ciclogêneses explosivas na América do Sul, Bittencourt et al. (2013) apontaram para a falta de conhecimento de sua estrutura dinâmica e termodinâmica.

Como parte de um esforço para obter tal conhecimento, foi feito um estudo preliminar de um caso, bastante notável, de ciclogênese explosiva ocorrido em 03/01/2014 no sul do Oceano Atlântico.

A frente fria associada a este ciclone causou transtornos no estado de Santa Catarina. Por volta das 15h40 desta data, as regiões de Blumenau e Rio do Sul, no Vale, já enfrentavam problemas de falta de energia. Por causa da chuva e dos ventos fortes houve queda de árvores e raios. Em Blumenau, seis mil unidades consumidoras ficaram sem luz e na região de Rio do Sul foram 19 mil. As maiores ocorrências foram nas cidades de Camboriú, Gaspar, Luis Alves, Ituporanga, Ibirama e Pouso Redondo.

Material e métodos

Foram utilizados os dados de reanálise com resolução de 0.66° de longitude e 0.5° de latitude do Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA) desenvolvido no Goddard Space Flight Center da National Aeronautics and Space Administration (GSFC/NASA) (Rienecker et al. 2011) com intervalo de tempo de 6 horas. As reanálises do MERRA são empregadas em vários trabalhos, como por exemplo em Quadro et al. 2012, Wei et al. 2013 e Cossetin et al. 2016, sendo, também, comparadas com outras reanálises (Kennedy et al. 2011, Hodges et al. 2011, entre outros) ou comparadas com dados de satélite (Posselt et al. 2012, Naud et al. 2014, entre outros). Aqui foram usados dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM), altura geopotencial, vento (componentes u , v , ω), temperatura do ar, fluxos de calor latente e sensível à superfície, vorticidade potencial de Ertel (EPV), tendência do Ozônio e umidade relativa para o período de 03-04/01/2014, os quais foram visualizados no software GRADS.

Foram utilizadas também imagens do satélite GOES-13 (Geostationary Operational Environmental Satellite), no Canal 3 do Vapor d'água, obtidas da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

Resultados e discussão

O caso de ciclogênese explosiva que causou sérios transtornos no Estado de Santa Catarina foi confirmado das Análises Mensais do CPTEC/INPE para o mês de janeiro de 2014, através das quais foi possível detectar a queda de pressão maior do que 1 Bergeron no ciclone que se formou no dia 03/01/2014..

Detectada a ocorrência do caso de ciclogênese explosiva, foi procedida a análise do mesmo através dos dados de reanálises do MERRA, os quais foram visualizados no software do GRADS.

Pelas análises da pressão ao nível médio do mar (Figura 1) observa-se às 00Z de 03/01/2014 o início do ciclone em 40°S , 47°W , com pressão central de 996 hPa, deslocando-se para sudeste até 52°S , 35°W às 00Z de 04/01/2014, com pressão central de 954 hPa. Assim, a pressão à superfície diminuiu em 42 hPa durante as 24 horas do dia 03/01/2014, o que para a latitude média do deslocamento (46°) corresponde a 2,1 Bergeron, classificando esta ciclogênese como explosiva forte (Sanders, 1986). A pressão ainda diminuiu em mais 8 hPa até às 12Z de 04/01/2014.

Pode se ver nos contornos em 500 hPa um cavado frontal entre a Argentina e o Atlântico, cuja circulação ciclônica promove a entrada de ar frio originado da Antártida no sul do continente.

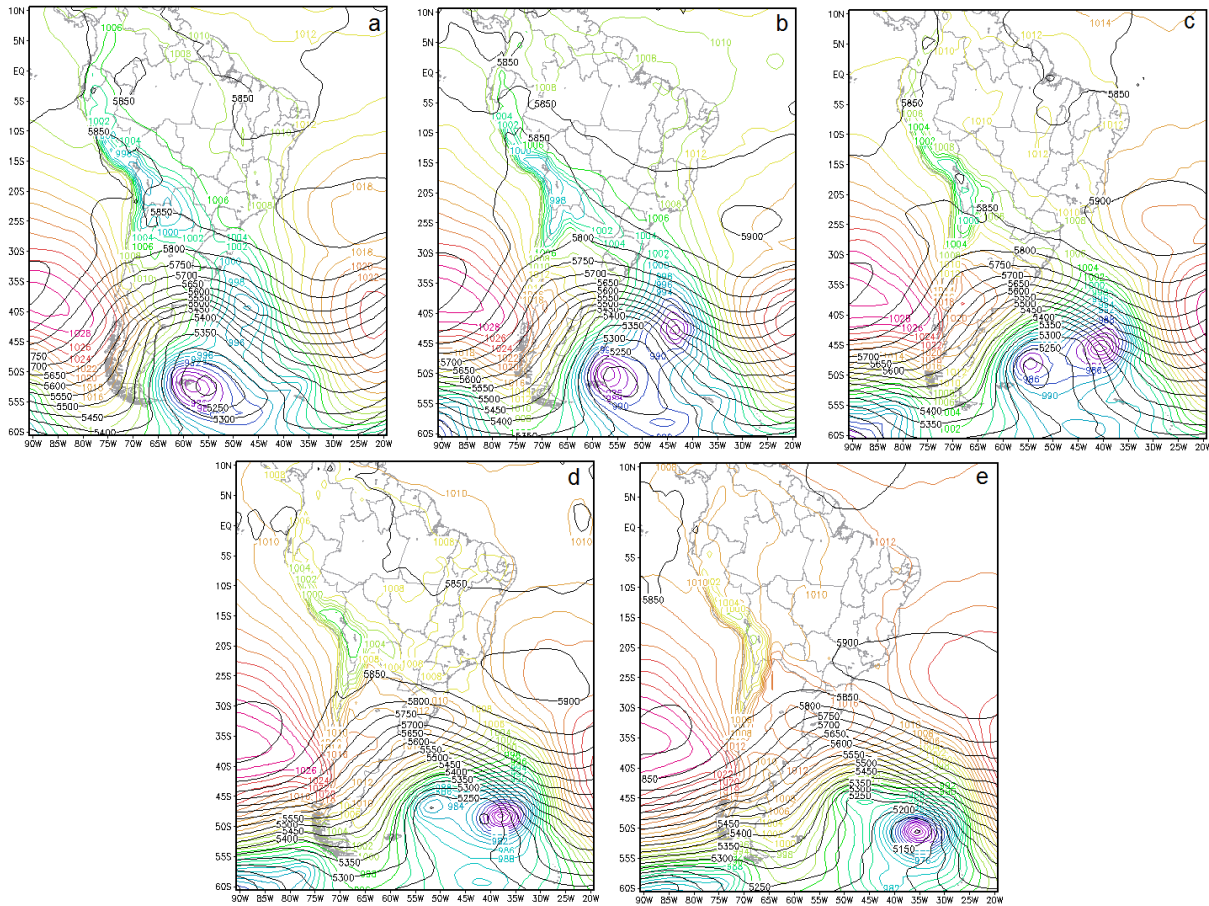


Figura 1. Pressão ao nível médio do mar (contornos coloridos) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em preto). a) 03/01 00Z, b) 03/01 06Z, c) 03/01 12Z, d) 03/01 18Z, e) 04/01 00Z.

Desde o início, se observa, por meio de seção vertical da latitude em que se situava o sistema (Figura 2), valores de Vorticidade Potencial de Ertel (EPV) maiores (em módulo) do que 1,5 Unidades de Vorticidade Potencial (UPV), representativo da Tropopausa Dinâmica (TD) (Santurette e Georgiev, 2005), apresentando uma dobra ou Anomalia da Tropopausa Dinâmica (ATD) defasada para oeste em relação ao centro do CE em superfície, onde já se pode ver um máximo

de EPV incipiente, o qual coincide com o centro de baixa, se intensificando à medida que o CE evolui para sudeste, estendendo-se na vertical e alcançando -4,5 UPV em 24 horas. Lembrando: $1UPV=10^{-6} m^2s^{-1}K kg^{-1}$ (Hoskins et al., 1985) e os valores de EPV são negativos no hemisfério sul. Esta ATD começou 18 horas antes do início da ciclogênese concordando com as observações de Uccellini et al. (1985).

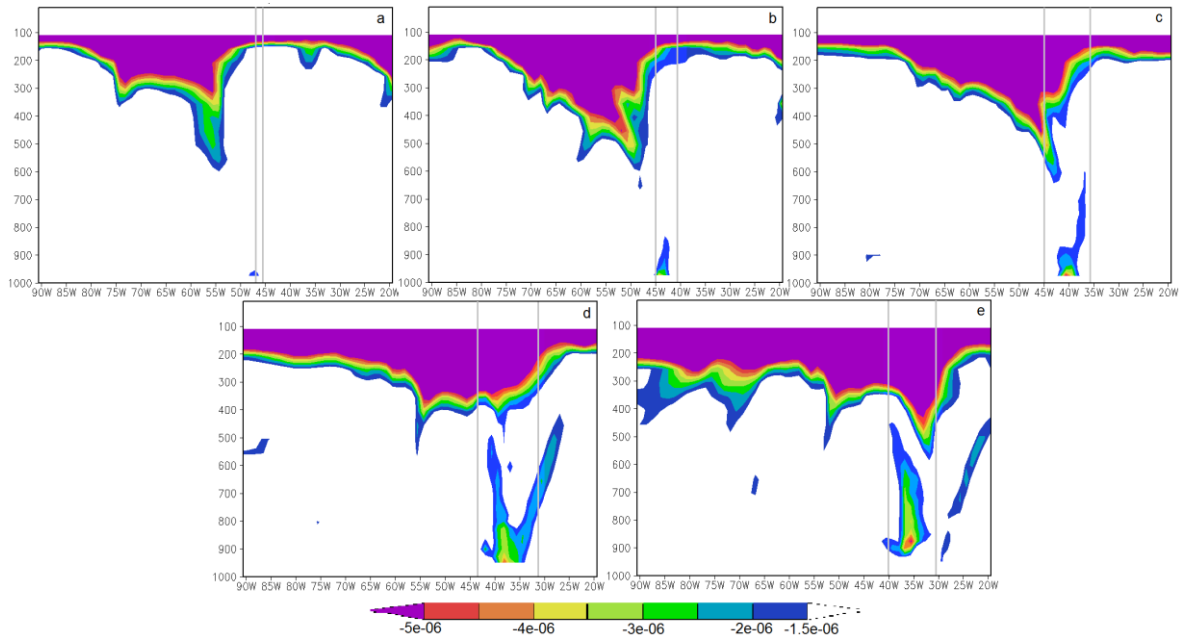


Figura 2. Seções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual em módulo a -1.5 PVU. As linhas verticais em cinza indicam o domínio zonal do ciclone em superfície. a) -40°S , 03/01 00z; b) -42°S , 03/01 06Z; c) -45°S , 03/01 12Z; d) -48°S , 03/01 18Z, e) -50°S , 04/01 00Z.

Na Figura 3 são apresentadas as imagens do satélite GOES 13, no canal do vapor d'água, e ao lado a EPV (cores) com a PNMM (contornos), correspondentes aos horários entre 06Z do dia 03 às 00Z do dia 04/01/2014, mostrando que a intrusão de ar seco e frio proveniente da estratosfera, visível na imagem de satélite, coincide perfeitamente com a posição da intersecção da ATD com o nível de 500 hPa, concordando com Santurette e Georgiev (2005) e Vaughan et al. (1994).

O campo de EPV em 500 hPa (Figura 3-e,f,g,h) mostra que a ATD localiza-se atrás da frente fria, tendendo a ficar paralela a frente à medida que o sistema se aprofunda enquanto ar seco e frio da estratosfera é introduzido e converge para o centro do CE até a oclusão.

Na figura 4, os altos valores de Tendência do Ozônio coincidem com a vanguarda da Anomalia da TD, o que em acordo com as imagens de satélite no canal do vapor d'água, confirma que através desta dobra da tropopausa ocorre a intrusão

de ar de origem estratosférica na troposfera. Sendo que a oeste da dobra o ar introduzido é seco e frio originado da baixa estratosfera, e a leste o ar introduzido é rico em ozônio, proveniente da camada de ozônio pouco mais acima na estratosfera.

Este caso apresenta um comportamento muito condizente com a literatura científica no que se refere aos padrões de movimento vertical descendente de ar seco da estratosfera à oeste da Anomalia da TD e movimento ascendente de ar úmido à leste (Figura 5).

Observou-se também que valores de umidade relativa entre 10 e 20% coincidem exatamente com a EPV de $-1,5$ UPV, servindo como um contorno da TD durante a maior parte do tempo em que o sistema se aprofunda (Figura 6). Por outro lado, é notável a ausência de valores significativos de calor latente e sensível (Figuras 7 e 8, respectivamente).

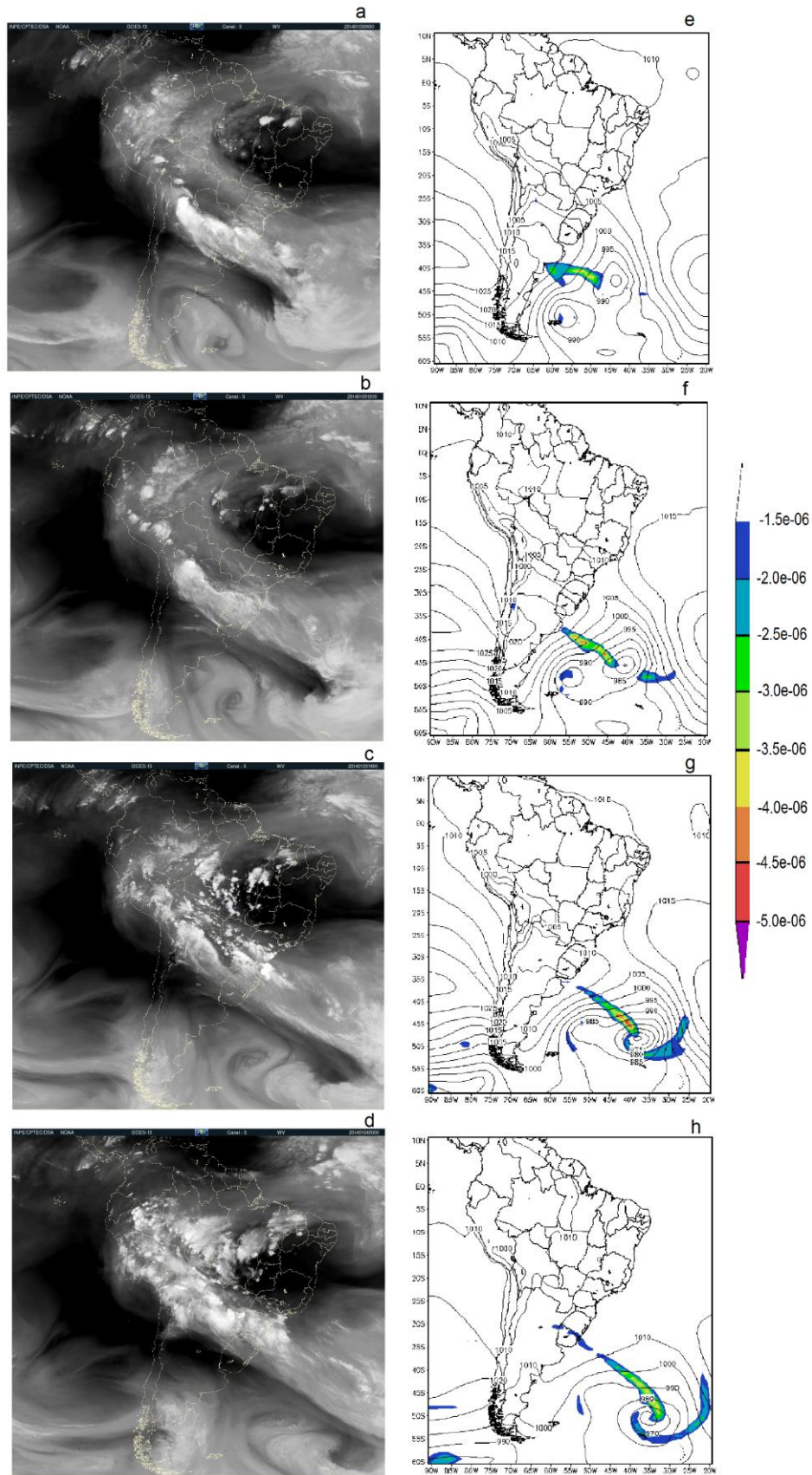


Figura 3. Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 03/01 06Z, (b) 03/01 12Z, (c) 03/01 18Z, (d) 04/01 00Z, campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado) em: (e) 03/01 06Z, (f) 03/01 12Z, (g) 03/01 18Z, (h) 04/01 00Z.

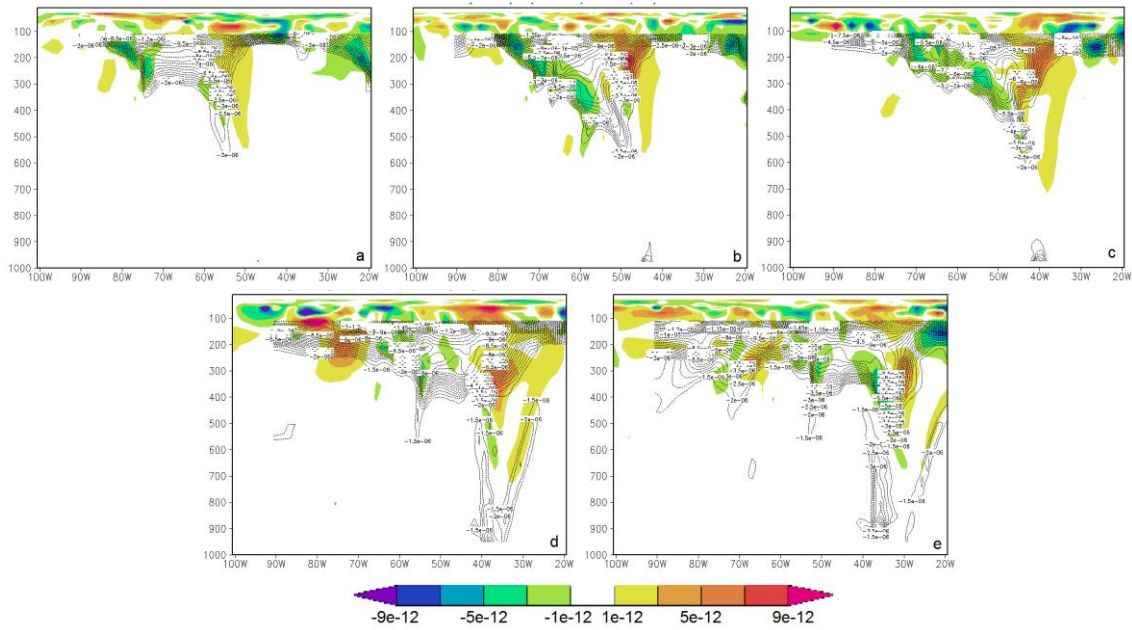


Figura 4. Seções verticais de EPV maior ou igual em módulo a $-1,5$ UPV (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: Dia 03/01/2014: a)00Z, b)06Z, c)12Z, d)18Z, e dia 04/01/2014: e)00Z.

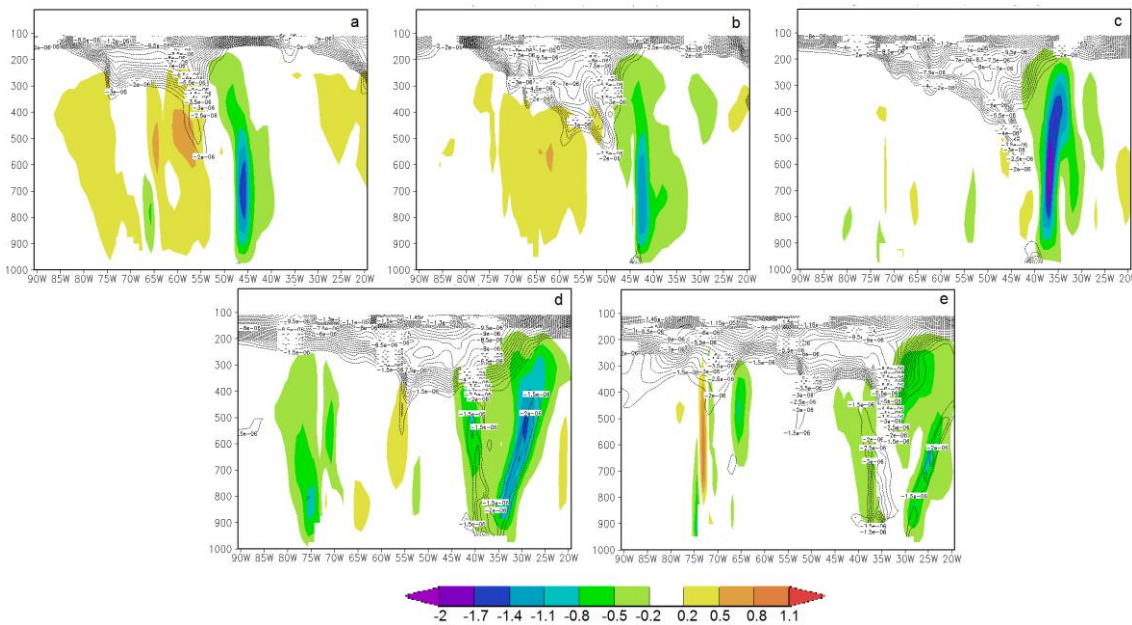


Figura 5. Seção vertical, EPV maior ou igual em módulo a $-1,5$ UPV (contornos) e Velocidade Vertical Omega (cores). Dia 03/01/2014: a)00Z, b)06Z, c)12Z, d)18Z, e dia 04/01/2014: e)00Z.

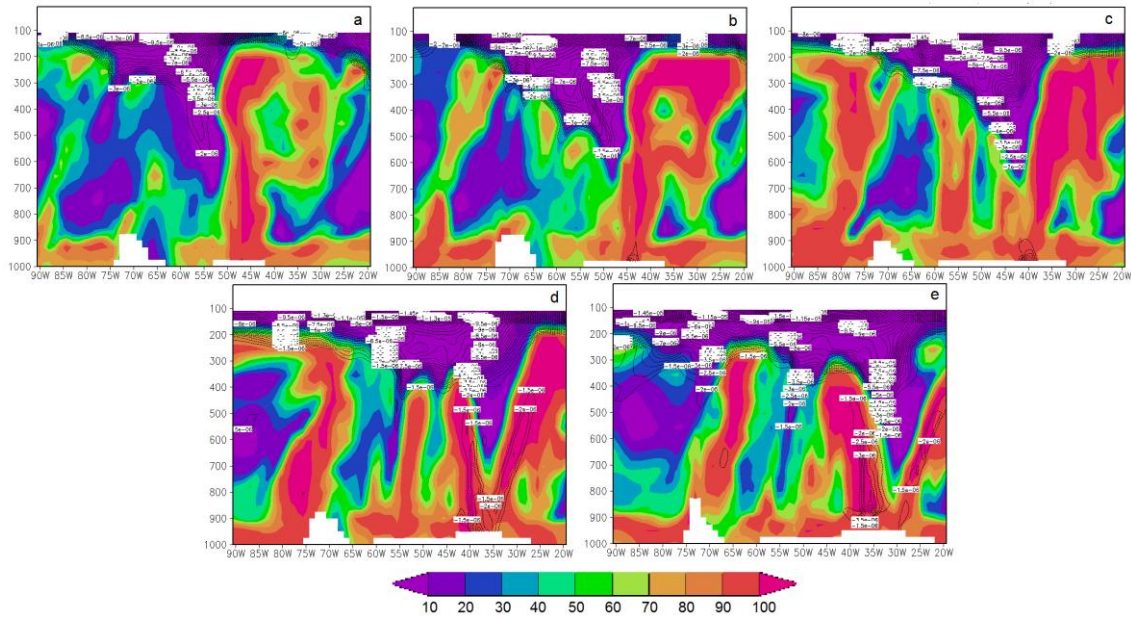


Figura 6. Seção vertical, EPV maior ou igual em módulo a -1,5 UPV (contornos) e Umidade relativa (cores). Dia 03/01/2014: a)00Z, b)06Z, c)12Z, d)18Z, e dia 04/01/2014: e)00Z.

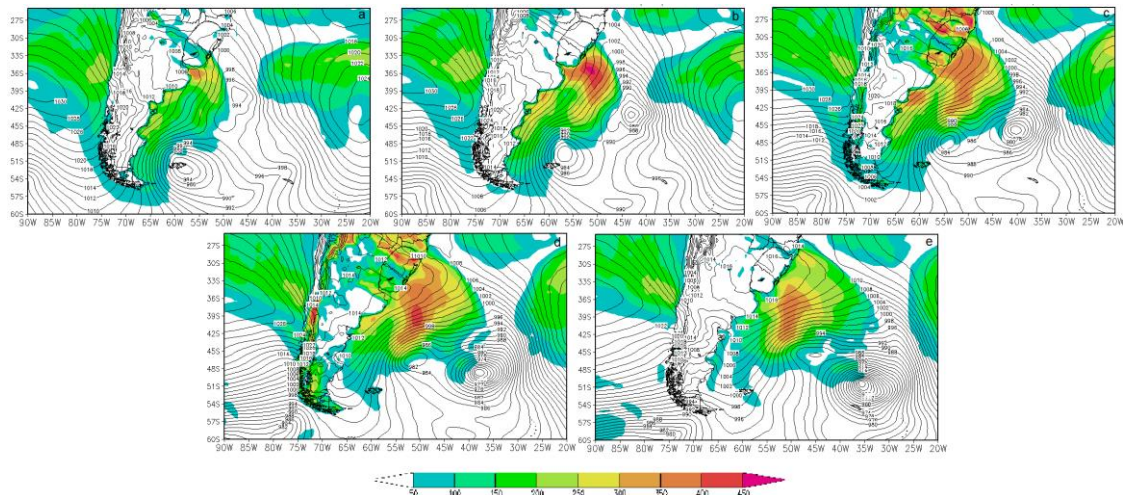


Figura 7. Campo de PNMM em hPa (contornos) e fluxo de calor latente em $W m^{-2}$ (sombreado). (a) 03/01 00Z, (b) 03/01 06Z, (c) 03/01 12Z, (d) 03/01 18Z, (e) 04/01 00Z.

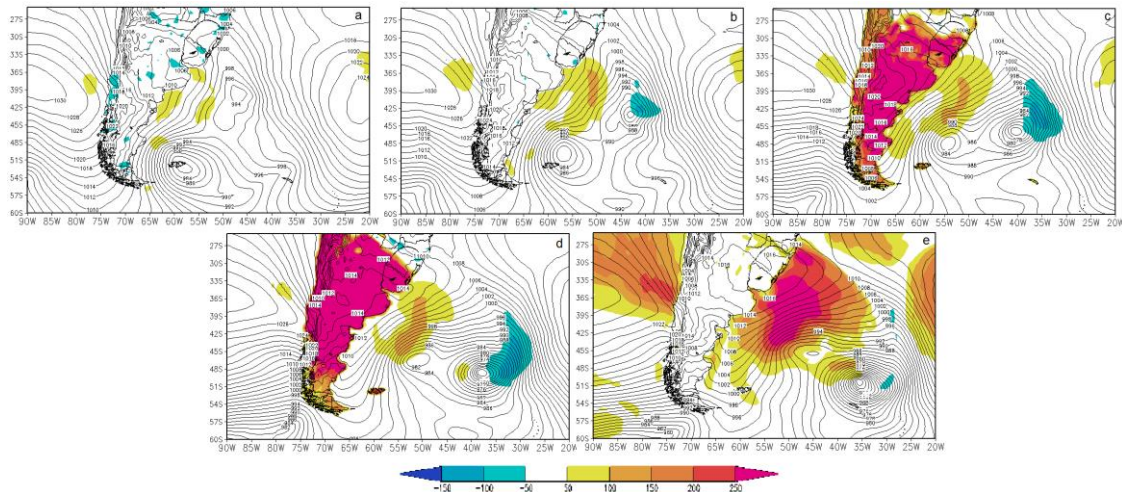


Figura 8. Campo de PNMM em hPa (contornos) e fluxo de calor sensível em $W m^{-2}$ (sombreado). (a) 03/01 00Z, (b) 03/01 06Z, (c) 03/01 12Z, (d) 03/01 18Z, (e) 04/01 00Z.

Conclusões

Com base nos resultados apresentados chegamos as seguintes conclusões:

1. Que, neste caso, pela localização inicial na região da confluência entre a corrente quente do Brasil e a corrente fria das Malvinas, o mecanismo mais influente para a ciclogênese foi a instabilidade baroclínica;

2. Que, embora clássico do ponto de vista descritivo, este caso é surpreendente pela sua intensidade, por ter ocorrido em janeiro, mês em que a média climatológica é de apenas um caso, e pela ausência de fluxos de calor latente e sensível significativos, os quais foram apontados por Piva et al. (2011) como fatores que influenciam no desenvolvimento de CE's.

Referências

- Allen, J. T.; Pezza, A. B.; Black, M. T. 2010. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalysis. *Journal of Climate* 23, 6468-6484.
- Bitencourt, D.P.; Fuentes, M.V.; Cardoso, C.S. 2013. Climatologia de Ciclones Explosivos Para a Área Ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28, 43-56.
- Bithell, M.; Gray, L.J.; Cox B.D. 1999. A three-dimensional view of the evolution of midlatitude stratospheric intrusions. *Journal of the Atmospheric Sciences* 56, 673-688.
- Bjerknes, J.; Solberg, H. 1922. Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. *Geophysical* 3, 325p.
- Black, M.T.; Pezza, A.B. 2013. A universal, broad-environment energy conversion signature of explosive cyclones. *Geophysical Research Letters* 40, 452-457. doi:10.1002/grl.50114.
- Blender, R.; Fraedrich, K.; Lunkeit, F. 1997. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* Allen, J. T.; Pezza, A. B.; Black, M. T. 2010. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalysis. *Journal of Climate* 23 6468-6484., 123, 727-741.
- Bosart, L. F. 1981. The Presidents' Day Snowstorm of 18-19 February 1979: A Subsynoptic-Scale Event. *Monthly Weather Review* 109, 1542-1566.
- Bosart, L. F.; Lin, S.C. 1984. A diagnostic analysis of the Presidents' Day storm of February 1979. *Monthly Weather Review* 112, 2148-2177.
- Cau, P.; Methven, J.; Hoskins, B. 2007. Origins of dry air in the tropics and subtropics. *Journal of Climate*. 20, 2745-2759.
- Cossetin, F.; Nunes, A.B.; Teixeira M. 2016. Análise do movimento vertical sob duas configurações de altos níveis da troposfera. *Ciência e Natura*. (in press).
- CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Síntese Sinótica Janeiro 2014. Disponível: http://www.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/sintese_janeiro2014.pdf. Acesso: 28 mar. 2016.
- Gan, M.A.; Rao, V.B.; 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review* 119, 1293-1302.
- Giordani, H.; Caniaux, G.; 2001. Sensitivity of cyclogenesis to sea surface temperature in the northwestern Atlantic. *Monthly Weather Review* 129, 1273-1295.
- Gyakum, J. R.. 1983a. On the Evolution of the QE II Storm. I: Synoptic Aspects. *Monthly Weather Review* 111, 1137-1155.
- Gyakum, J. R.. 1983b. On the Evolution of the QE II Storm. II: Dynamic and Thermodynamic Structure. *Monthly Weather Review* 111, 1156-1173.

- Hodges, K.I.; Lee, R.W.; Bengtsson, L. 2011. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *Journal of Climate* 24, 4888-4906.
- Holton, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology, 3 ed. Academic Press, San Diego.
- Hoskins, B. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111, 877-946.
- Hoskins, B. J.; Hodges, K. I. 2005. A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate* 18, 4108-4129.
- Iwabe, C.M.N.; Rocha, R.P. 2009. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean *Journal of Geophysical Research* 114, doi:10.1029/2008JD011119.
- Kennedy, A.D.; Dong, X.; Xi, B.; Xie, S.; Zhang, Y.; Chen, J. 2011. A comparison of MERRA and NARR reanalyses with the DOE ARM SGP data. *Journal of Climate* 24, 4541-4557.
- Lim, E. P.; Simmonds, I. 2002. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere Events. *Monthly Weather Review* 130, 2188-2209.
- Mendes, D.; Souza, E.P.; Marengo, J.A.; Mendes, M.C.D. 2010. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. *Theoretical and Applied Climatology* 100,239-250.
- Murray, R.J.; Simmonds, I. 1991. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Australian Meteorological Magazine* 39, 155-166.
- Naud, C.M.; Booth, J.F.; Del Genio, A.D. 2014. Evaluation of ERA-Interim and MERRA cloudiness in the Southern Ocean. *Journal of Climate* 27, 2109-2124.
- Necco, G. 1982. Comportamiento de vortices ciclónicos en el area Sudamericana durante el FGGE : Ciclogenesis. *Meteorologica* 13, .7-19.
- Oda, T. O. 2005. Efeitos da Distribuição Espaço-Temporal da Temperatura do Mar no Desenvolvimento de Ciclones Extratropicais. Tese (Doutorado em Meteorologia). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Palmen, E.; and Newton, C.M. 1969. Atmospheric Circulation Systems. Academic Press, London.
- Petterssen, S.; 1956, Motion and Motion Systems, vol. I. McGraw Hill, New York.
- Pettersen, S.; Smebye, S.J. 1971. On the development of extratropical cyclones. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society* 97, 457-482.
- Pinto, J. R. D. 2010. Estudo da estrutura e energética dos distúrbios de escala sinótica na costa leste da América do Sul. (Mestrado). São Paulo, USP.
- Piva, E.D. 2001. Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. 2001. (Doutorado) - São José dos Campos, INPE.
- Piva, E.D.; Moscati, M.C.L.; Gan M.A. 2008. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* 23, 450-476.
- Piva, E.; Gan, M. A.; Moscati, M. C. L. 2011. The role of latent and sensible heat fluxes in an explosive cyclogenesis over South America. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 89, 1-27.
- Posselt, D. J., Jongeward, A.R.; Hsu, C-Y; Potter, G.L. 2012. Object-based evaluation of MERRA cloud physical properties and radiative fluxes during the 1998 El Niño-La Niña transition. *Journal of Climate* 25, 7313-7327.
- Quadro, M.F.L.; Silva Dias, M.A.; Herdies, D.L. & Gonçalves, L.G.G. 2012. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 152-162.
- Reboita, M. S., R. P. Rocha e T. Ambrizzi, 2005. Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In: IX Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, AR: Anais. Buenos Aires: CONGREMET.
- Reboita M.S.; Gan M. A.; da Rocha R. P.; Ambrizzi T. 2010a. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204.
- Reboita, M.S. 2008. Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.
- Reed, R. J. 1955. A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. *Journal of Meteorology* 12, 226-237.
- Rienecker, M.M.; Suarez, M.J.; Gelaro, R.; Todling, R.; Bacmeister, J.; Liu, E.; Bosilovich, M.G.; Schubert, S.D.; Takacs, L.; Gi-Kong, K.; Bloom, S.; Chen, J.; Collins, D.; Conaty, A.; Silva, A.; Gu, W.; Joiner, J.; Koster, R.D.; Lucchesi, R.; Molod, A.; Owens, T.; Pawson, S.; Pegion, P.; Redder, C.R.; Reichle, R.; Robertson, F.R.; Ruddick, A.G.; Sienkiewiks, M. & Woollen, J. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for

- Research and Applications. *Journal of Climate* 24, 3624-3648.
- Sanders, F.; Gyakum, J.R. 1980. Synoptic–dynamic climatology of the “Bomb”. *Monthly Weather Review* 108, 1589–1606.
- Sanders, F. 1986. Explosive cyclogenesis in the West-Central North Atlantic Ocean, 1981–84. Part I: Composite structure and mean behavior. *Monthly Weather Review* 114, 1781-1794.
- Santurette, P.; Georgiev, C.G. 2005. Weather analysis and forecasting: Applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis. Academic Press. Amsterdam.
- Satyamurty, P.; Ferreira, C. C.; Gan, M. A. 1990. Cyclonic vortices over South America. *Tellus A*. 42A, 194-201.
- Schubert, W. H.; Ruprecht, E.; Hertenstein, R.; Ferreira, R.N.; Taft, R.; Rozoff, C.; Ciesielski, P.; and Kuo, H.-C. 2004: English translations of twenty-one of Ertel's papers on geophysical fluid dynamics. *Meteor. Zeit.* 13, 527-576.
- Simmonds, I.; Keay, K. 2000. Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis, *Journal of Climate* 13, 873-885.
- Sinclair, M. R. 1995. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review* 123, 1601-1619.
- Sutcliffe, R. C. 1947. A contribution to the problem of development. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 73, 370–383.
- Taljaard, J. J.; 1967. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. *Journal of Applied Meteorology* 6, 973-987.
- Trigo, I. F.; Davies, T. D.; Bigg, G. R. 1999. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of Climate* 12, 1685-1696.
- Uccellini, L.W.; Keyser, D.; Brill, K.F.; Wash, C.H. 1985. The President's Day Cyclone of 18-19 February 1979: Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Monthly Weather Review* 113, 962-988.
- Uccellini, L. W. 1986. The Possible Influence of Upstream Upper-Level Baroclinic Processes on the Development of the QE II Storm. *Monthly Weather Review* 114, 1019-1027.
- UNIMELB – University of Melbourne. Automatic Cyclone Tracking Home Page, 2016. Disponível: <http://legacy.earthsci.unimelb.edu.au/tracks/cyhome.htm>. Acesso: 28 mar. 2016.
- Vaughan, G.; Price, J. D.; e Howells, A.; 1994: Transport into the troposphere in a tropopause fold. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 1085-1103.
- Wang, C-C; Rogers, J.C. 2001. A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: Cyclone structure and evolution. *Monthly Weather Review* 129, 1481–1499.
- Wei, J.; Dirmeyer, P. A.; Wisser, D.; Bosilovich, M.G.; Mocko, D. M. 2013. Where does the irrigation water go? An estimate of the contribution of irrigation to precipitation using MERRA. *Journal of Hydrometeorology* 14, 275-289.
- Whitacker, J. S.; Uccellini, L. W.; Brill, K. F. 1988. A Model-Based Diagnostic Study of the Rapid Development Phase of the Presidents's Day Cyclone. *Monthly Weather Review* 116, 2337-2365.