



Análise da Tropopausa Dinâmica: Estudo de Caso na América do Sul Dynamic Tropopause Analysis: Case Study in South America

André Becker Nunes¹ & Vilson Dias de Avila²

¹Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia.
Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.
Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus Vale. 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
E-mails: beckernunes@gmail.com, vilson.ufrgs@gmail.com

Recebido em: 24/11/2016 Aprovado em: 23/01/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_83_92

Resumo

Neste trabalho foi observada a relação da tropopausa dinâmica (TD) com as variáveis, obtidas das Reanálises do MERRA, que descreveram o ciclo de vida dos três principais sistemas meteorológicos que atuam em altos níveis sobre a América do Sul, a saber: a Alta da Bolívia (AB), os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) do Nordeste Brasileiro (NeB) e os VCAN extratropicais, os quais ocorreram simultaneamente em 01 de fevereiro de 2005. As diferenças mais marcantes observadas entre os referidos sistemas foram que o VCAN extratropical apresentou o comportamento clássico com anomalia da TD pronunciada e com movimento subsidente a oeste e movimento ascendente a leste, enquanto o VCAN do NeB apresentou anomalia da TD menos profunda com algum movimento ascendente e ausência de movimento subsidente, enquanto a AB não apresentou anomalia da TD, embora apresente movimentos verticais ascendentes e subsidentes. Apesar do aprofundamento da TD no VCAN do NeB, não se observou tendência de concentração de O₃, provavelmente devido à baixa concentração nos trópicos, ao contrário do VCAN extratropical, cuja anomalia de TD apresentou grande tendência de concentração de O₃.

Palavras-chave: vórtice ciclônico de altos níveis; Alta da Bolívia; ozônio; EPV

Abstract

For this work, it was observed the relationship between the dynamic tropopause (TD) and the variables obtained from MERRA reanalysis datasets which described the life cycle of the three main meteorological systems acting in upper levels of the atmosphere over South America, as to say: the Bolivian High (AB), the upper tropospheric cyclonic vortices (VCAN) of Northeast Brazilian (NeB) and the extratropical VCANs, which occurred simultaneously in February 01, 2005. The remarkable differences observed between the referred systems were that the extratropical VCAN presented a classic behavior with an enhanced TD anomaly and subsident vertical movement west of the anomaly and ascendant vertical movement in the east, while the VCAN of NeB presented a less profound TD anomaly with some ascending movement and absence of subsident movement and the AB has not presented TD anomaly although ascending and subsident vertical movements were present. Despite the TD folding in the VCAN of NeB no ozone concentration tendency was observed probably because of the low ozone concentration in the tropics in contrast with the extratropical VCAN that presented a higher ozone tendency in its TD anomaly.

Keywords: upper tropospheric cyclonic vortex; Bolivian High; ozone; EPV

1 Introdução

Um estudo mais completo dos sistemas meteorológicos em altos níveis requer a análise da tropopausa – e vice-versa. Baixas desprendidas, ou mesmo cavados em altos níveis, tendem a “aprofundar” a tropopausa, rebaixando localmente sua altitude (Reed, 1955; Staley, 1960). Tal “aprofundamento” está relacionado com a entrada de ar estratosférico, acarretando neste um máximo local de vorticidade potencial (Danielsen, 1968; Shapiro, 1980; Sprenger *et al.*, 2007). Estas ondulações da tropopausa estão diretamente associadas à ciclogênese em superfície (Hirschberg & Fritsch, 1991) ou, ainda, ciclogênese explosiva (Hoskins *et al.*, 1985; Uccellini *et al.*, 1985; Wang & Rogers, 2001; Avila *et al.*, 2016). Na literatura, como por exemplo em Santurette & Georgiev (2005), tem-se que a superfície de 1.5 PVU (potential vorticity unit) é representativa da tropopausa dinâmica (TD), 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 (EPV) (Hoskins, 1985). É esperado, portanto, que em condições neutras, i.e., sem a presença de cavados em altos níveis, que nos extratropicos a tropopausa (identificada pelo valor de 1.5 PVU, em que $1 \text{ PVU} = 1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) situe-se aproximadamente no nível de 200 hPa. Ou seja, na presença de um cavado, valores de 1.5 PVU podem ser encontrados em níveis inferiores, podendo chegar até 600 hPa no caso de ciclones explosivos (Bluestein, 1993). Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da tropopausa associado a três sistemas em altos níveis típicos da América do Sul (Satyamurty *et al.*, 1998): Vórtice Ciclônico de Altos Níveis do Nordeste Brasileiro (VCAN do NeB) (Kousky & Gan, 1981; Gan & Kousky, 1986; Rao & Bonatti, 1987; Ramirez *et al.* 1999; Mishra *et al.* 2001), Alta da Bolívia (AB) (Virji, 1981; Silva Dias *et al.*, 1983; DeMaria, 1985; Chen *et al.*, 1999; Lenters & Cook, 1999; Seluchi & Saulo, 2010) e VCAN extratropical (Funatsu *et al.*, 2004; Singleton & Reason, 2007),

que ocorreram simultaneamente – o que não é tão comum – no dia 01 de fevereiro de 2005.

2 Dados e Metodologia

A relação da TD com as variáveis que descrevem o ciclo e vida dos sistemas sinóticos em estudo foi observada por meio de campos meteorológicos, obtidos de 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. Foram usados dados de diversas variáveis, em diferentes níveis verticais, para que se observe a estrutura vertical dos sistemas. As reanálises do MERRA são empregadas em vários trabalhos, como por exemplo em Kennedy *et al.*, 2011; Hodges *et al.*, 2011; Posselt *et al.*, 2012; Quadro *et al.* (2012), Wei *et al.* (2013) e Cossetin *et al.* (2016). Foi analisado também o campo de tendência de concentração de ozônio, para diferentes níveis verticais, haja vista que é esperada intrusão de ar estratosférico associado com anomalias de TD (Storebo, 1960). Aqui foi usada a tendência de concentração dinâmica, de acordo com a convergência da razão de mistura do gás.

Os sistemas também foram observados por meio de imagens de satélite geoestacionário (não mostradas aqui) obtidas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE). Foi analisado o período referente a três dias antes e dois dias depois ao dia em que os sistemas ocorreram simultaneamente, ou seja, o período entre 29 de janeiro e 03 de fevereiro de 2005.

3 Resultados

Sabendo que quando associada a sistemas de baixa pressão a tropopausa alcança níveis de pressão mais baixos, a Figura 1 mostra o desenvolvimento dos sistemas em estudo (destacados pelos polígonos verdes em 1d) por meio do campo de EPV em 500 hPa e linha de corrente em 250 hPa. Primeiramente, observa-se o VCAN extratropical bem definido somente no dia 01/02 (1d), ao contrário do VCAN do NeB e da AB, além do cavado extratropical que

gerou o VCAN extratropical, presentes durante todo o período de análise. Podemos observar valores significativos de EPV já no dia 29/01 (Figura 1A), no centro da baixa que originou o cavado extratropical. Com o desenvolvimento do sistema, os valores de EPV se intensificaram. Um dia antes da baixa se desprender (Figura 1C), duas regiões de EPV foram observadas: à sotavento do eixo do cavado, mas no setor polar, sobre o sistema frontal em superfície (Figura 1C), e em latitudes menores, à barlavento do eixo, oeste dos Andes. No dia seguinte (Figura 1D), a região de EPV em latitudes menores agora está à sotavento do VCAN extratropical, enquanto que a região que estava no setor polar deslocou-se para leste. No dia seguinte (Figura 1E), com o desaparecimento da baixa despreendida, observa-se somente uma região de EPV à sotavento do cavado, vindo a mesma a se dissipar no dia seguinte. Observou-se que tais locais de EPV significativa mostrados na Figura 1C-E estiveram sempre associados com a corrente

de jato (melhor observada no campo de magnitude do vento, não mostrado aqui), o que é esperado haja vista que a posição da corrente de jato representa a “quebra” da tropopausa (Santurette & Georgiev, 2005). Nenhum valor significativo de EPV em 500 hPa foi encontrado relacionado ao VCAN tropical. Desta forma, podemos dizer que o afundamento da tropopausa ocorreu associado ao cavado extratropical baroclínico, porém não situada no centro do VCAN, e sim normalmente a sotavento do eixo. A Figura 2 mostra o campo de EPV em 500 hPa e o de pressão ao nível médio do mar (pnmm), para se verificar a influência do afundamento da tropopausa na formação ou intensificação do ciclone em superfície, conforme indica a literatura. Nota-se que as regiões de EPV encontram-se a oeste do centro de baixa em superfície, e esta defasagem vai diminuindo à medida que o sistema se intensifica em superfície.

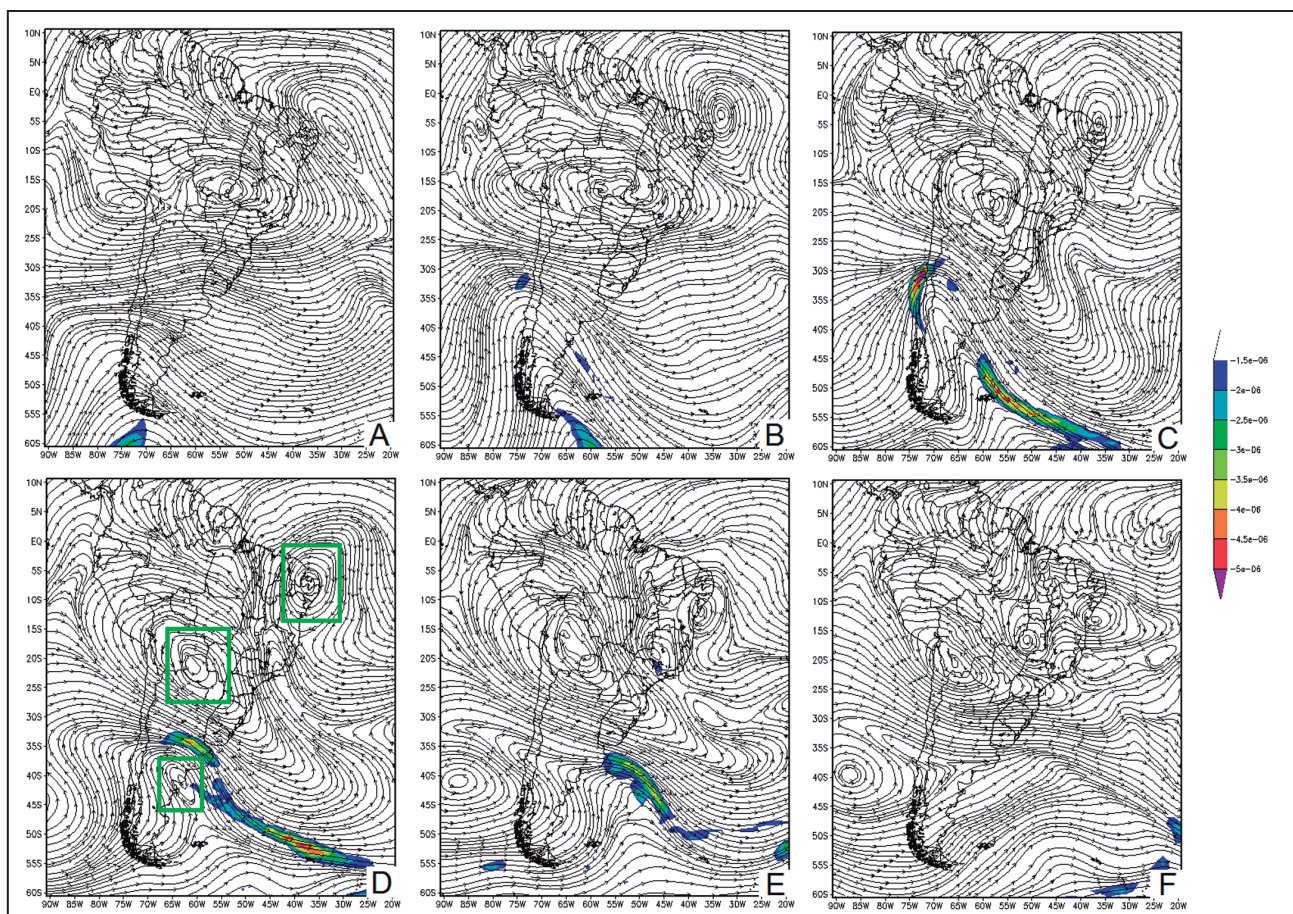


Figura 1 Campo de linha de corrente em 250 hPa (contorno) e EPV (sombreado em $1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) em 500 hPa. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z. O polígono verde mais ao sul indica o VCAN extratropical, o polígono no centro indica a Alta da Bolívia e o mais ao norte indica o VCAN do NeB.

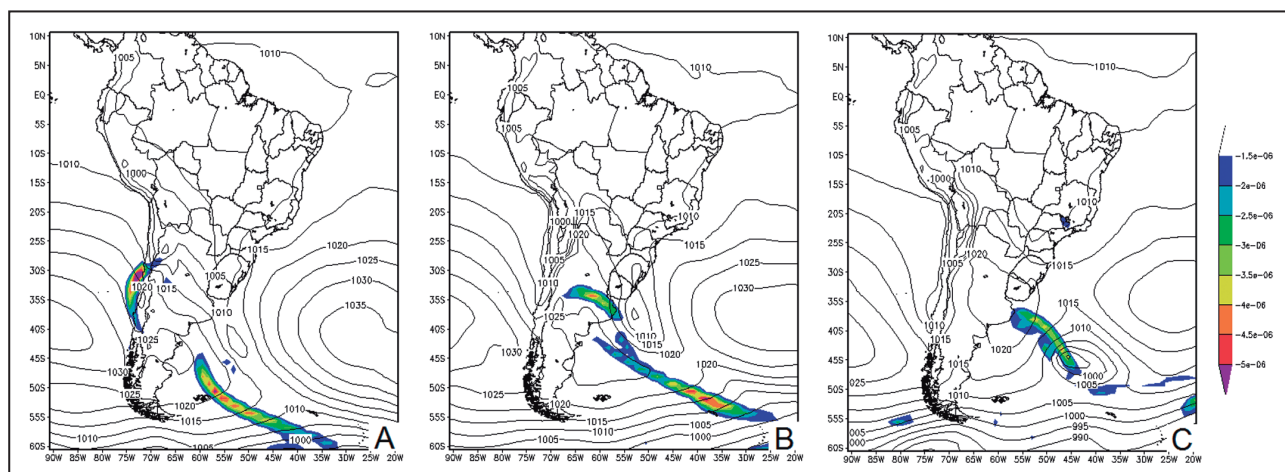


Figura 2 Campo de pnm (contorno, em hPa) e EPV (sombreado em $1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) em 500 hPa. (A) 31/01 00z, (B) 01/02 00z, (C) 02/02 00z.

A literatura especializada indica a ocorrência de troca de ar entre troposfera e estratosfera e, tal troca, normalmente está relacionada com a existência de um sistema de baixa pressão em altos níveis. A intrusão de ar estratosférico pode ser verificada por meio de dados de tendência de concentração de ozônio (O_3) em níveis inferiores à tropopausa. Para visualizar a tendência de concentração de ozônio em níveis médios (500 hPa), na Figura 3 esta variável é apresentada junto com o campo de EPV no mesmo nível e de altura geopotencial em 250 hPa, para identificarmos a posição dos sistemas em altos níveis (aqui, optou-se por este campo ao invés do campo de linha de corrente, para melhor visualização das outras variáveis). Primeiramente, observa-se do campo de altura geopotencial em 250 hPa que os sistemas tropicais, Alta da Bolívia e VCAN do NeB, são bem mais facilmente identificáveis do que o cavado extratropical – o que explica a utilidade do campo de linha de corrente na observação dos sistemas tropicais. Nota-se que não foram encontrados valores de tendência de ozônio associados ao VCAN do NeB, o que é esperado haja vista a circulação Brewer-Dobson que promove a maior concentração deste gás em latitudes maiores (Newel, 1963). A partir do dia 31/01 (Figura 3C), quando o cavado extratropical está bem desenvolvido, observa-se valores consideráveis de tendência de O_3 associados aos afundamentos da tropopausa, principalmente a sotavento destas regiões. Este comportamento segue até a dissipação do VCAN extratropical. É necessário ter em mente que se trata de tendência de O_3 , i.e., define as regiões onde O_3 deverá se concentrar.

Comparando agora a tendência de O_3 com a pnm (Figura 4), podemos notar a relação direta da intrusão de ar estratosférico com a ciclogênese em superfície, primeiramente no setor oeste (Figura 4A), depois sul (Figura 4B) e por fim em torno do ciclone (Figura 4C). Também destacam-se os valores altos observados no cavado em altas latitudes no dia 01/02 (Figura 4B), concordando com os altos valores de EPV (Figura 2B).

Uma análise mais precisa da estrutura vertical dos sistemas é obtida por meio de seções verticais. A seguir serão analisadas as seções verticais dos três sistemas em estudo variando a latitude da posição dos mesmos a cada dia, de acordo com a Figura 3. As Figuras 5 a 7 mostram as estruturas verticais dos três sistemas em estudo por meio do campo de movimento vertical ômega e EPV. Na Figura 5, referente ao VCAN do NeB, podemos notar os valores de EPV indicando a dobra, ou rebaixamento, da tropopausa na posição do sistema (entre -30° e -40° W) especialmente nos dias 01 e 02/02, quando chegou quase ao nível de 400 hPa. O campo ômega mostra valores intensos de movimento vertical em diferentes níveis verticais sobre o continente (longitudes maiores que 40° W), associados com forte aquecimento superficial. Mais diretamente relacionados ao VCAN do NeB, observa-se valores relevantes em baixos níveis somente no dia 01/02, devido à nebulosidade convectiva (observada na imagem de satélite, não mostrada aqui) esperada na borda do sistema, conforme a literatura especializada anteriormente mencionada. Apesar da convergência em altos níveis natural do VCAN, não se observou

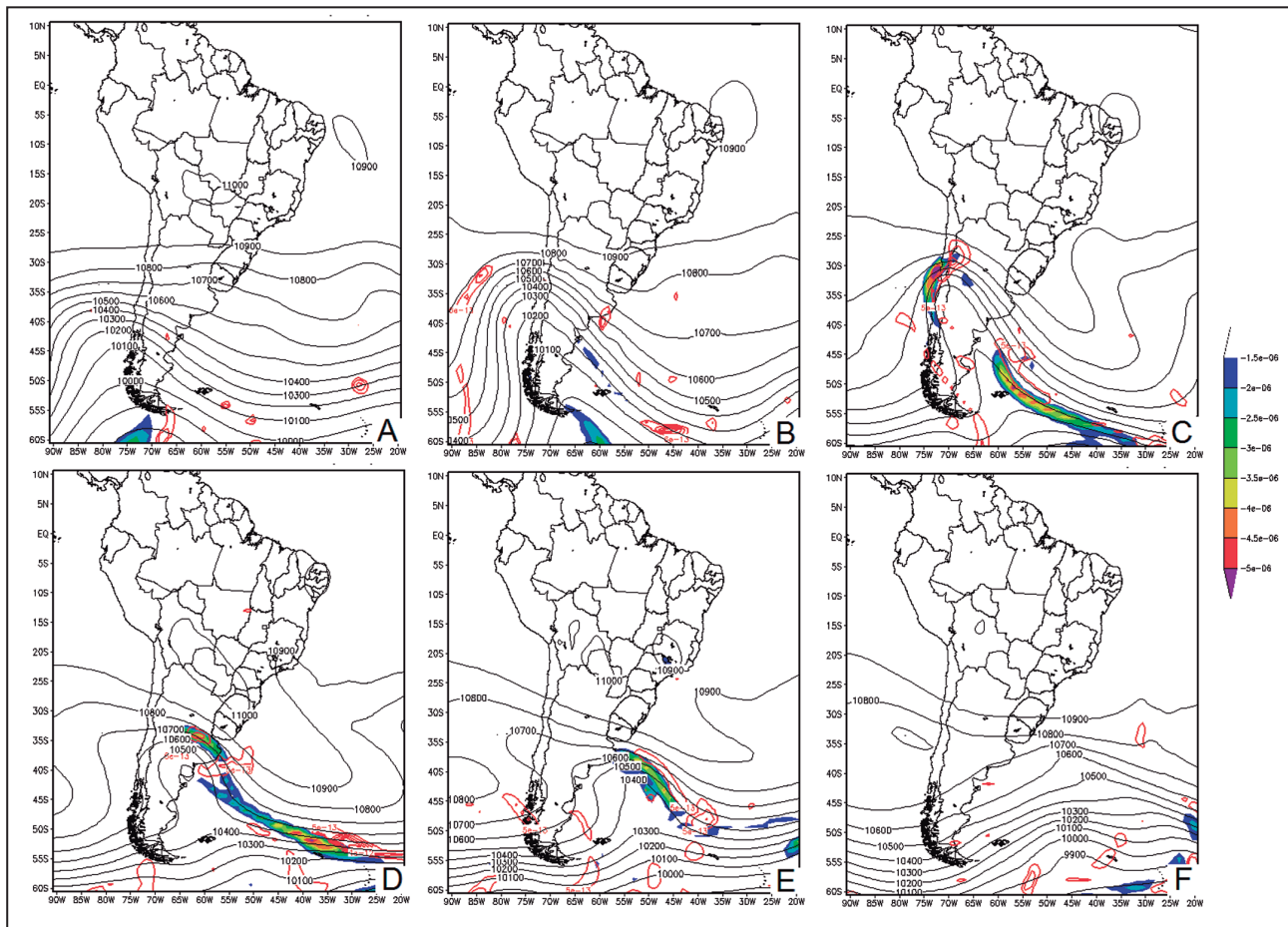


Figura 3 Campo de altura geopotencial em 250 hPa (contorno em preto, em mvp), tendência de concentração de ozônio (contorno em vermelho, somente para valores acima de $5 \times 10^{-13} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e EPV (sombreado, valores menores que -1.5 PVU , em $1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) em 500 hPa. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

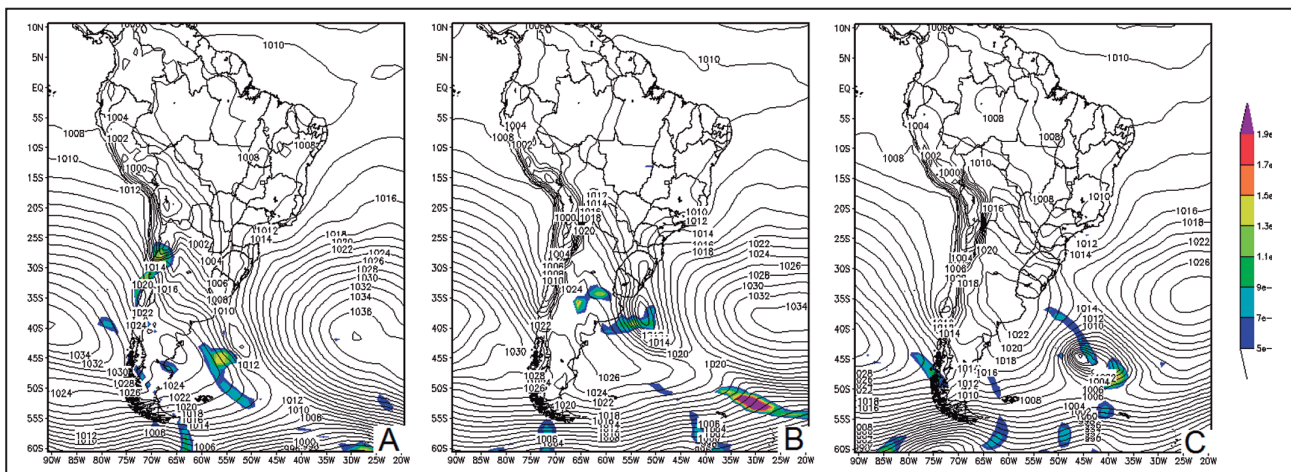


Figura 4 Campo de pmm (contorno em hPa) e tendência de concentração de ozônio (sombreado $\text{kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) em 500 hPa. (A) 31/01 00z, (B) 01/02 00z, (C) 02/02 00z.

movimento subsidente. A Figura 6 é referente à AB, cuja posição variou de 70° a 55° W . Haja vista que se trata de um centro de alta pressão, não se observou rebaixamento da tropopausa associado

ao sistema. Como já mencionado, espera-se a associação entre a AB e a Baixa do Chaco, contudo, como se pode observar da Figura 4, a Baixa do Chaco descaracterizou-se a partir do dia 01/02

(Figura 6B), evoluindo para um ciclone extratropical com deslocamento para sudeste - comportamento observado, por exemplo, em Satyamurty *et al.* (1990) - dando lugar para uma região de transição entre a baixa equatorial (continental) e um anticiclone vindo do sul. Tal transição é observada no campo ômega (Figura 6), onde nas longitudes referentes à posição do centro da AB (aproximadamente entre 70 e 55°W) observam-se regiões de movimentos ascendentes, subsidentes e de movimento vertical desprezível.

Com relação ao VCAN extratropical (Figura 7) observa-se o esperado - de acordo com a literatura: comportamento anômalo da TD. Tal rebaixamento pode ser observado já no dia 30/01 (Figura 7B), com movimento subsidente na coluna do rebaixamento e movimento ascendente a leste do mesmo. Na véspera da formação do VCAN, dia 31/01 (Figura 7C) nota-se o aprofundamento da dobra, fazendo com que a tropopausa atinja 500 hPa. Nesse momento, nota-se o surgimento de anomalia de EPV em superfície (aproximadamente em 55°W), o que também é esperado quando se inicia uma ciclogênese intensa em superfície (mostrada na Figura 4A). No dia da formação do VCAN (Figura 7D) a anomalia em superfície se acoplou à da tropopausa, ambas associadas ao intenso movimento ascendente devido à ciclogênese em superfície. Tal comportamento continuou no dia seguinte (Figura 7E), com o esperado deslocamento do sistema baroclínico para leste, vindo a dissipar-se no dia seguinte, 03/02 (Figura 7F), quando prevalece o movimento subsidente fraco devido à entrada do anticiclone em superfície.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de caso, ocorrido no verão de 2005, do comportamento da tropopausa dinâmica no ciclo de vida dos três principais sistemas sinóticos atuantes na América do Sul: vórtice ciclônico de altos níveis do Nordeste do Brasil, Alta da Bolívia e vórtice ciclônico de altos níveis extratropical. O estudo foi realizado por meio de dados de reanálise do MERRA, sendo a TD analisada de acordo com os dados de EPV. Observou-se um aprofundamento da tropopausa bem mais acentuado no caso do VCAN extratropical - cuja anomalia de EPV da TD confundiu-se com a anomalia do ciclone em superfície - do que no

VCAN do NeB, quando atingiu a profundidade máxima de 400 hPa. A AB não apresentou variação significativa da TD, quando se esperava uma tropopausa consideravelmente mais alta. Quanto aos movimentos verticais, a AB não apresentou movimento ascendente intenso como se esperava devido à descaracterização rápida da Baixa do Chaco. O VCAN extratropical, associado com o ciclone em superfície corrente abaixo, apresentou fortes movimentos verticais - movimentos ascendentes a leste do aprofundamento da tropopausa e subsidentes a oeste, em acordo com a literatura. Já o VCAN do NEB apresentou movimentos ascendentes relevantes somente no dia 01 (embora tenham sido observados movimentos ascendentes, não necessariamente relacionados ao VCAN, à oeste do sistema em outros dias), e sem movimentos subsidentes consideráveis. Esta diferença entre o VCAN extratropical e o tropical indica que a forçante baroclínica tem papel importante na intensificação dos sistemas. Quanto à tendência de concentração de O₃, notou-se grande relação com o aprofundamento da tropopausa devido ao VCAN extratropical, ao contrário do VCAN do NeB, onde tal tendência de O₃ não foi observada.

Conclui-se que o estudo de caso apresentado aqui teve comportamento em parte concordante com os relatados nos poucos trabalhos sobre tropopausa dinâmica. Nesse sentido, o campo de EPV mostrou-se relevante como diferença física entre os sistemas extratropicais e tropicais, especialmente por ter apresentado grande associação com o desenvolvimento da ciclogênese em superfície. Sugere-se, portanto, trabalhos futuros a respeito de tropopausa dinâmica sobre a América do Sul, principalmente associados a sistemas meteorológicos de diferentes origens.

5 Referências

- Avila, V.D.; Nunes, A.B. & Alves, R.C.M. 2016. Análise de um caso de ciclogênese explosiva ocorrido em 03/01/2014 no sul do oceano Atlântico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(4): 1088-1099.
- 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.
- Bluestein, H.B. 1993. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and theory of weather systems*. Oxford. Oxford University Press. 594p.

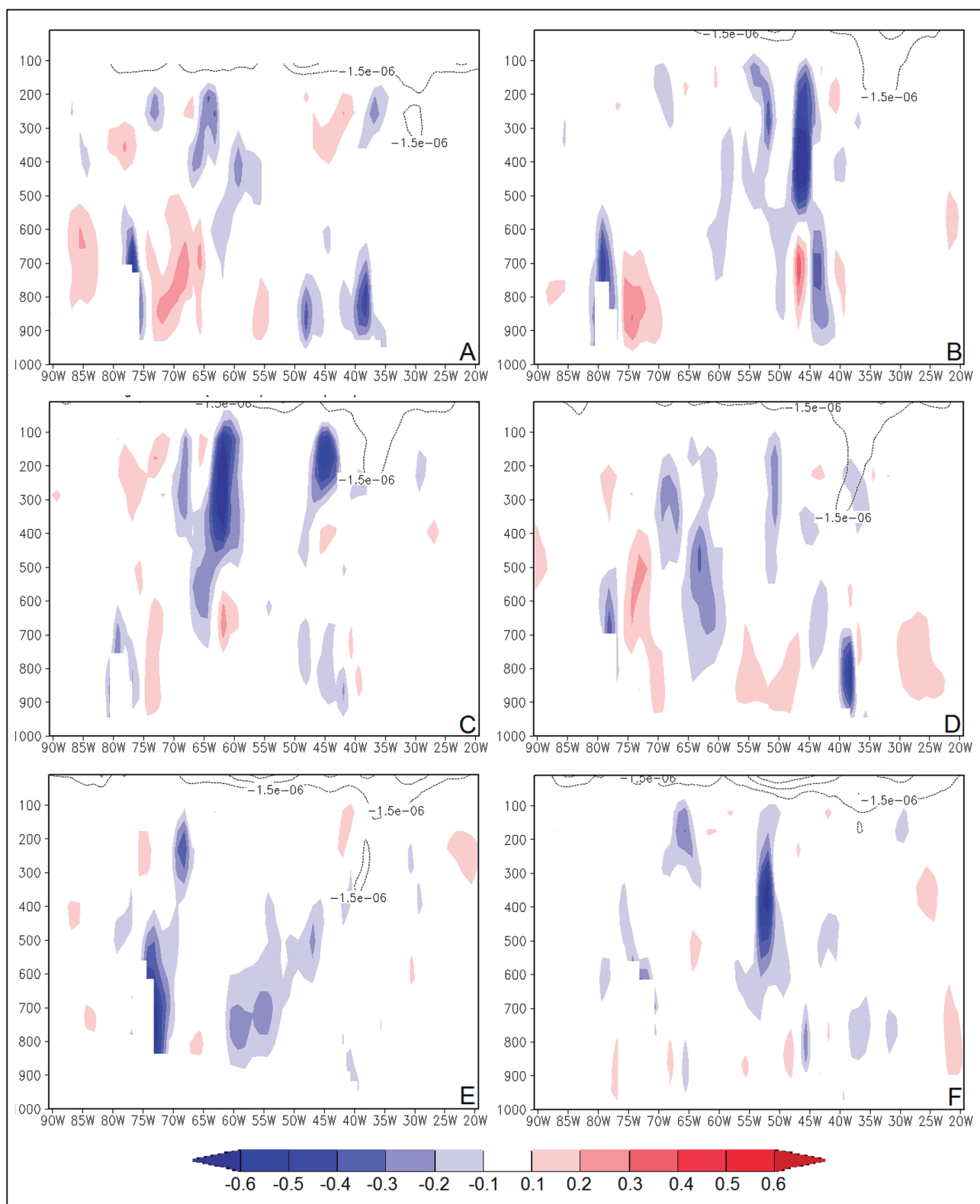


Figura 5 Seções verticais relacionadas ao VCAN do NeB dos campos de ômega (sombreado em m s^{-1}) e EPV (contorno, valores menores que -1.5 PVU , em $1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). (A) Corte em 8°S, em 29/01 00z, (B) em 4°S, em 30/01 00z, (C) em 5°S, em 31/01 00z, (D) em 7°S, em 01/02 00z, (E) em 12°S, em 02/02 00z, (F) em 13°S, em 03/02 00z.

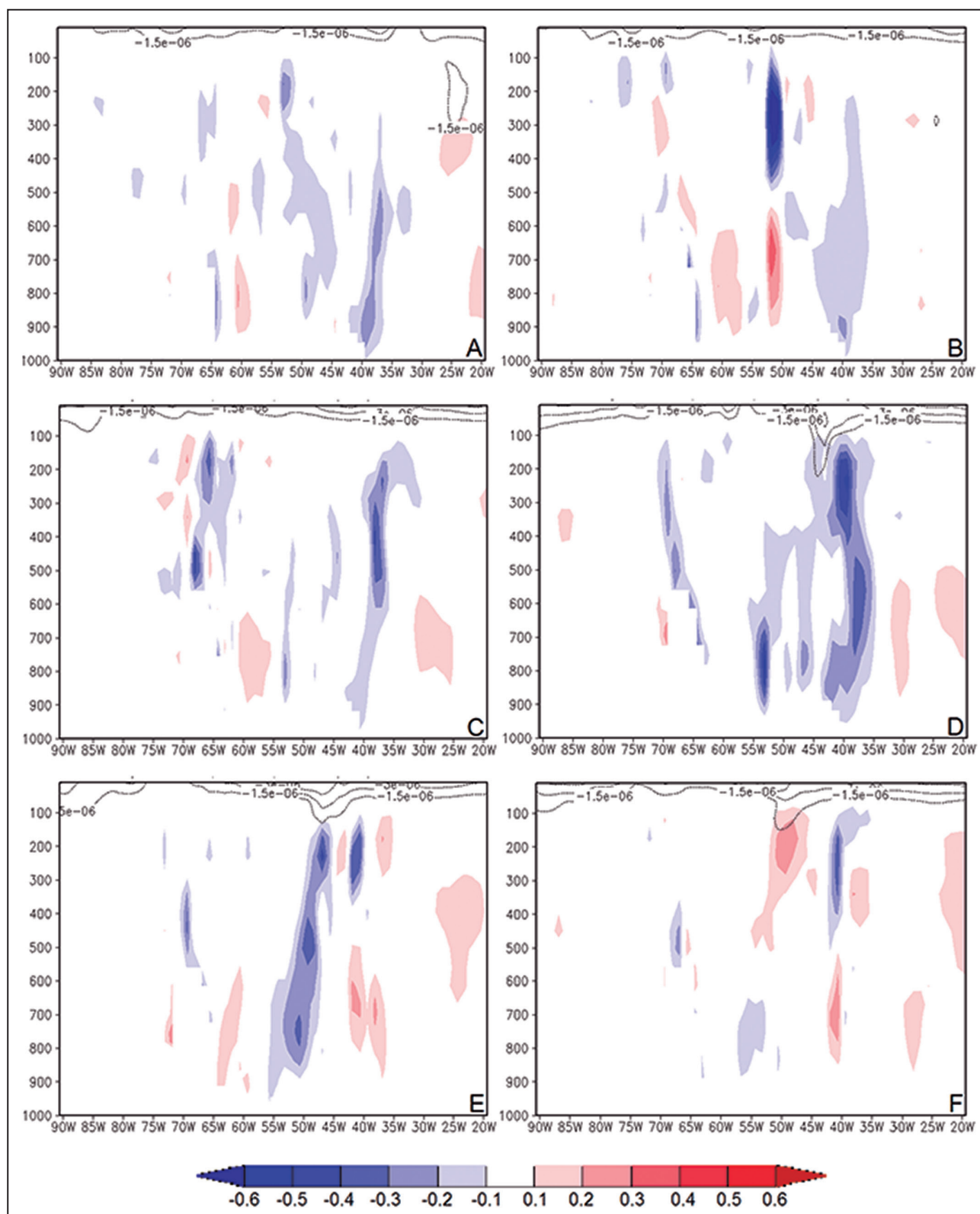


Figura 6 Seções verticais relacionadas a AB sendo (A) 17°S no dia 29/01 as 00z, (B) 17°S no dia 30/01 as 00z, (C) 18°S no dia 31/01 as 00z, (D) 21°S no dia 01/02 as 00z, (E) 17°S no dia 02/02 as 00z e (F) 20°S no dia 03/02 as 00z.

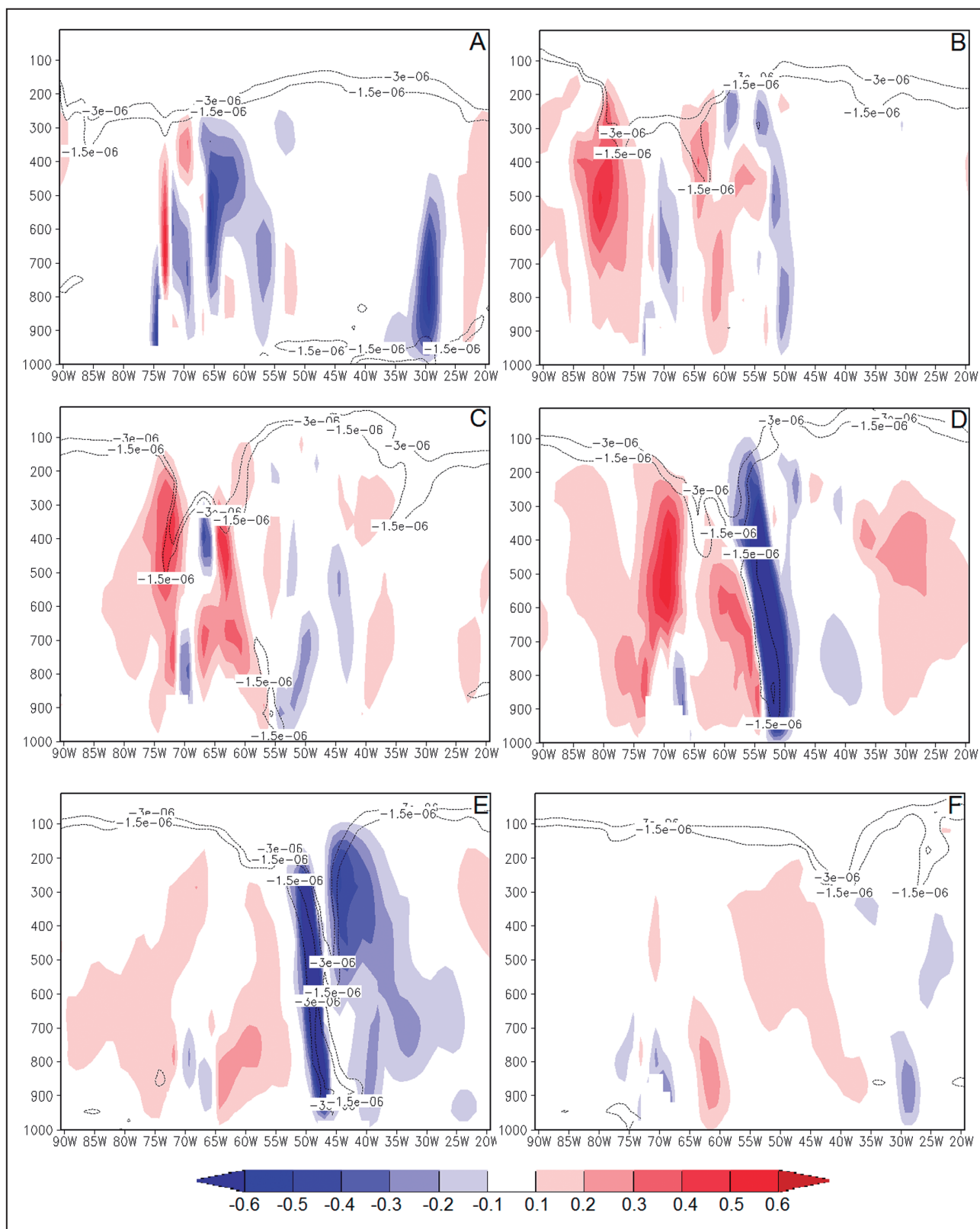


Figura 7 Seções verticais relacionadas ao VCAN extratropical, em que (A) 50°S no dia 29/01 as 00z, (B) 45°S no dia 30/01 as 00z, (C) 40°S no dia 31/01 as 00z, (D) 41°S no dia 01/02 as 00z, (E) 45°S no dia 02/02 as 00z e (F) 40°S no dia 03/02 as 00z.

- Cau, P.; Methven, J. & Hoskins, B. 2007. Origins of dry air in the tropics and subtropics. *Journal of Climate*, 20: 2745-2759.
- Chen, T.-C.; Weng, S.-P. & Schubert, S. 1999. Maintenance of austral summertime upper-tropospheric circulation over tropical South America: The Bolivian High-Nordeste low system. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56: 2081-2100.
- Cossetin, F.; Nunes, A.B. & Teixeira, M.S. 2016. Análise do movimento vertical sob duas configurações de altos níveis da troposfera. *Ciência e Natura*, 38: 484-490.
- Danielsen, E.F. 1968. Stratospheric-Tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25:502-518.
- DeMaria M. 1985. Linear response of a stratified tropical atmosphere to convective forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42: 1944-1959.
- Funatsu, N.M.; Gan, M.A. & Caetano, E. 2004. A case study of orographic cyclogenesis over South America. *Atmosfera*, 17: 91-113.
- Gan, M.A. & Kousky, V.E. 1986. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1: 19-28.
- Hirschberg, P.A. & Fritsch, J.M. 1991. Tropopause undulations and the development of extratropical cyclones. Part I: Overview and observations from a cyclone event. *Monthly Weather Review*, 119: 496-517.
- 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.
- Hoskins, B.J.; McIntyre, M.E. & Robertson, A.W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 111: 877-946.
- 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.
- Kousky, V.E. & Gan, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclone vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, 33: 538-551.
- Lenters, J.D. & Cook, K.H. 1999. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale Circulation. *Monthly Weather Review*, 127: 409-431.
- Mishra, S.K.; Rao, V.B. & Gan, M.A. 2001. Structure and evolution of the large-scale flow and an embedded upper-tropospheric cyclonic vortex over Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 129: 1673-1688.
- Newel, R.E. 1963. Transfer through the tropopause and within the stratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89: 167-204.
- 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.
- Ramirez, M.C.V.; Kayano, M.T. & Ferreira, N.J. 1999. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989 period. *Atmosfera*, 12: 75-88.
- Rao, V.B. & Bonatti, J.P. 1987. On the origin of upper tropospheric cyclonic vortices in the South Atlantic Ocean and adjoining Brazil during the summer. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 37: 11-16.
- 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.; Sienkiewicz, M. & Woollen, J. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *Journal of Climate*, 24: 3624-3648.
- Santurette, P. & Georgiev, C.G. 2005. *Weather analysis and forecasting: Applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis*. Amsterdam. Academic Press. 179p.
- Satyamurty, P.; Ferreira, C.C. & Gan, M.A. 1990. Cyclonic vortices over South America. *Tellus*, 42: 194-201.
- Satyamurty, P.; Nobre, C.A. & Silva Dias, P.L. 1998. Meteorology of the tropics: South America. In: KAROLY, D.J. & VINCENT, D.G. (eds.). *Meteorology of Southern Hemisphere. Meteorological Monographs*, 27(49), chapter 3A.
- Shapiro, M.A. 1980. The turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37: 994-1004.
- Silva Dias, P.L.; Schubert, W.H. & DeMaria, M. 1983. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40: 2689-2707.
- Singleton, A.T. & Reason, C.J.C. 2007. A numerical model study of an intense cutoff low pressure system over South Africa. *Monthly Weather Review*, 135: 1128-1150.
- Sprenger, M.; Wernli, H. & Bourqui, M. 2007. Stratosphere-Troposphere Exchange and its relation to potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64: 1587-1602.
- Staley, D.O. 1960. Evaluation of potential-vorticity changes near the tropopause and the related vertical motions, vertical advection of vorticity, and transfer of radioactive debris from stratosphere to troposphere. *Journal of Meteorology*, 17: 591-620.
- Storebo, P.B. 1960. The exchange of air between stratosphere and troposphere. *Journal of Meteorology*, 17: 547-553.
- 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.
- Virji, H. 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Monthly Weather Review*, 109: 599-610.
- 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.