



**Estudo de Caso de Sistemas  
Meteorológicos em Altos Níveis Sobre a América do Sul: Análise Sinótica**  
Case Study of Upper Tropospheric Meteorological Systems on South America: Synoptic Analysis

André Becker Nunes

*Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia.  
Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas- Rio Grande do Sul, Brasil  
Email: beckernunes@gmail.com*

Recebido em: 24/11/2016      Aprovado em: 20/01/2017

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_1\\_70\\_82](http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_70_82)

## Resumo

O Vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre o nordeste brasileiro (NeB) e a Alta da Bolívia (AB) são os típicos sistemas de pressão em altos níveis (250 hPa) da América do Sul, especialmente nas estações mais quentes. Somados a eles, também pode-se considerar o VCAN extratropical, de característica transiente e encontrado o ano todo. Neste trabalho, é apresentada uma análise sinótica, baseada na literatura especializada, de um caso observado em 01 de fevereiro de 2005 em que os três sistemas ocorreram simultaneamente. Algumas características encontradas na literatura foram observadas nos sistemas deste caso. O campo de temperatura mais associado ao sistema extratropical foi o de 500 hPa, e não o de 250 hPa. Os movimentos verticais mais relevantes foram encontrados somente no sistema extratropical: intensos movimentos ascendentes à sotavento do eixo do cavado em altos níveis. Não se encontrou um sistema em superfície especificamente associado ao VCAN do NeB, enquanto que se observou a baixa continental (ou Baixa do Chaco) associada à Alta da Bolívia e um intenso ciclone extratropical associado ao VCAN extratropical. Tal ciclone em superfície acarretou em vento sul e consequente resfriamento da camada, o que pôde ser observado pela amplitude do cavado em altos níveis, o que é raro para esta época do ano.

**Palavras-chave:** vórtices ciclônicos de altos níveis; Alta da Bolívia; vento térmico; Palmén; Palmer

## Abstract

The upper tropospheric cyclonic vortex (VCAN) over northeastern Brazil (NeB) and the Bolivian High (AB) are the South America typical upper level (250 hPa) pressure systems, especially in warmer seasons. Besides these, one can also consider the extratropical VCAN, which has transient feature and is found throughout the year. In this work is presented a synoptic analysis, based on the specialized literature, of a case observed in February 01, 2005, when the three systems occurred simultaneously. Some features found in literature were noted in the systems of this case. The temperature field most associated to the extratropical system was 500 hPa and not 250 hPa. The most significant vertical movements were only found in extratropical system: intense upward movements in the lee of the upper tropospheric trough axis. It has found no system specifically associated to VCAN of NeB, while it was observed the association between the continental low (or Chaco Low) and the Bolivian High and an intense extratropical cyclone associated to extratropical VCAN. Such surface cyclone carries on a southerly and consequent cooling of the layer, what could be observed by the amplitude of the upper tropospheric trough, which is unusual in this season.

**Keywords:** upper tropospheric cyclonic vortex; Bolivian High; thermal wind; Palmén; Palmer

## 1 Introdução

Pode-se dizer que o objetivo inicial dos estudos de dinâmica dos fluidos em grande escala, ou meteorologia sinótica, é o melhoramento da previsão do tempo por meio de um entendimento mais completo dos fenômenos meteorológicos. Entendendo-se que tais fenômenos iniciam-se a partir de pequenas perturbações atmosféricas na corrente zonal básica e que estas tendem a perturbar o meio fluido, a atmosfera, torna-se obrigatória a análise dos fenômenos – resumindo, aqui, aos sistemas de pressão (ciclones, anticiclones, cristas e cavados) – em vários níveis da troposfera.

Com relação à previsão de sistemas precipitantes, é comum a meteorologia operacional dedicar mais atenção aos campos superficiais, em especial ao campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM), haja vista que os centros de pressão diretamente associados à instabilidades, no caso, centros de baixa pressão, são observados em baixos níveis. Contudo, como exposto acima, é fundamental a análise dos níveis superiores (acima de 500 hPa) pois esta pode indicar a fase do desenvolvimento do ciclo de vida do sistema em baixos níveis. Sistemas de pressão em altos níveis podem ser facilmente identificados pelos campos de linha de corrente, dado que em grandes altitudes o escoamento torna-se geostrófico, i.e., paralelo às isóbaras, e também pelo campo de altura geopotencial dada a relação direta entre esta variável e a pressão atmosférica devido à aproximação hidrostática (Bluestein, 1993). Com relação aos sistemas de baixa pressão em altos níveis, ou seja, vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), podemos dividir em dois tipos principais de acordo com a origem: Tipo Palmer, de origem tropical, e tipo Palmén, de origem extratropical (Palmén & Nagler, 1949; Lourenço *et al.*, 1996). Além destes, observa-se a existência de um terceiro tipo de VCAN, de origem subtropical, com características intermediárias entre os dois supracitados (Seluchi & Marengo, 2000).

Basicamente, a climatologia sinótica indica três sistemas de pressão em altos níveis típicos sobre a América do Sul: VCAN de origem extratropical, a Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste Brasileiro (Satyamurty *et al.*, 1998). São várias as referências bibliográficas que abordam estes sistemas, sejam de forma isolada ou em conjunto – especialmente com relação a Alta da Bolívia e o cavado do nordeste

brasileiro, que juntos compõem a climatologia de verão em altos níveis na América do Sul (Virji, 1981; Gan & Kousky, 1986). A Alta da Bolívia é um sistema de alta pressão em altos níveis que ocorre preferencialmente no verão sobre a região aproximada da Bolívia. O sistema é associado com intenso aquecimento superficial, fluxos de calor sensível e latente (principalmente), e grandes precipitações (Silva Dias *et al.*, 1983; DeMaria 1985; Jones & Horel, 1990). Esta associação do sistema em altos níveis, no caso, a Alta da Bolívia, e o aquecimento superficial, remete ao sistema em superfície – a Baixa do Chaco. A Baixa do Chaco é um sistema de baixa pressão localizado na planície do Chaco, entre a Bolívia, norte da Argentina e Paraguai, oriunda do forte aquecimento superficial típico das estações mais quentes e do escoamento de norte em baixos níveis, sendo muitas vezes considerada uma extensão da baixa equatorial. Não deve ser confundida com a Baixa do Noroeste Argentino (BNOA), que é mais dependente da orografia e dos sistemas transientes (Seluchi *et al.*, 2003; Seluchi & Saulo, 2012; Escobar & Seluchi, 2012). Assim, podemos dizer que a BNOA é uma baixa termo-orográfica, enquanto que a Baixa do Chaco é uma baixa térmica. Como consequência do aquecimento superficial, a liberação do fluxo de calor latente da convecção tende a aumentar a espessura da camada entre 1000 e 250 hPa, explicando o desenvolvimento simultâneo da Baixa do Chaco e da Alta da Bolívia (Lenters & Cook, 1999; Seluchi & Saulo, 2010). Devido à conservação de vorticidade absoluta, é esperado que corrente abaixo da Alta da Bolívia surja o Cavado do Nordeste Brasileiro (Satyamurty *et al.* 1998). E no caso da intensificação deste cavado, a ponto das linhas de corrente fecharem uma circulação ciclônica, surge o VCAN do Nordeste Brasileiro (VCAN do NeB), com sua borda (especialmente a norte) composta de nebulosidade convectiva e o centro relativamente frio com céu limpo (Kousky & Gan, 1981; Rao & Bonatti, 1987). O sistema pode ocorrer o ano todo, sendo mais preponderante e duradouro no verão devido à sua relação com a Alta da Bolívia (Chen *et al.* 1999). Forma-se preferencialmente no oceano Atlântico, podendo se deslocar em direção ao continente (Ramirez *et al.*, 1999). É comum a associação não somente com a Alta da Bolívia, mas também com uma crista alongada zonalmente em níveis superiores, associada a liberação de calor latente proveniente da ZCAS –

Zona de Convergência do Atlântico Sul (Kodama, 1992; Ramirez *et al.* 1999; Mishra *et al.*, 2001).

Desta forma, tem-se a Alta da Bolívia e o VCAN do NeB como os sistemas tipicamente tropicais. Analisando os sistemas de latitude ligeiramente maior, 20° - 30°S, observa-se a ocorrência dos VCANs subtropicais, cujas principais diferenças para os de origem tropical são: i) o nível de máxima vortacidade, 300 hPa, enquanto que no caso tropical situa-se em 200 hPa; ii) preponderância da advecção de vortacidade relativa sobre a advecção de vortacidade planetária; iii) mais comum no inverno, enquanto que o tropical é mais comum no verão; iv) núcleo frio próximo ao nível de 500 hPa, enquanto que no caso tropical é em 200 hPa (Seluchi & Satyamurty, 2000). Por estas características, tais vórtices também são considerados de médios níveis, e não serão analisados neste trabalho – maiores informações sobre este fenômeno são encontradas em Fedorova & Silva (2016). Na literatura internacional se encontra uma boa quantidade de estudos sobre VCAN tanto extratropical tipo Palmén – também chamado de baixa despreendida – quanto que sobre os VCAN tropicais. Ambos sistemas também são chamados de baixa fria devido ao seu núcleo frio (Carlson, 1967). Várias referências em todo o globo indicam que estes sistemas podem produzir desde precipitação de neve a tempestades severas (Singleton & Reason, 2007 e Godoy *et al.*, 2011, por exemplo). Quanto ao movimento vertical, espera-se ar subsidente no seu centro, com ar ascendente ao redor – sendo tal comportamento observado independente da latitude do sistema. Trabalhos como Funatsu *et al.* (2004), entre outros, mostram a influência da Cordilheira dos Andes no desenvolvimento deste tipo de sistema. Por meio de modelagem numérica, Garreaud & Fuenzalida (2007) indicam que a liberação de calor latente devido a concentração de nuvens ao redor do VCAN (especialmente no flanco leste onde se encontra o ramo ascendente) é um dos principais mecanismos de dissipação do sistema. Por possuir um núcleo frio a coluna no seu interior fica menos espessa, acarretando em anomalia da tropopausa e fazendo com que seja identificado como um centro de vortacidade potencial ciclônica (Hoskins *et al.*, 1985).

O objetivo deste trabalho é contribuir com a literatura sobre os principais sistemas sinóticos da troposfera superior por meio da comparação

das características físicas de tais sistemas sobre a América do Sul. Especificamente, será apresentada a análise sinótica do ciclo de vida dos três sistemas que ocorreram simultaneamente no dia 01 de fevereiro de 2005.

## 2 Dados

Neste trabalho, o estudo do caso envolvendo os três sistemas sinóticos será feito por meio de análise 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. Serão usados dados de diversas variáveis, para 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 Quadro *et al.* (2012), Wei *et al.* (2013), Avila *et al.* (2015) 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). A nebulosidade associada aos sistemas é observada por meio de imagens de satélite obtidas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

## 3 O Caso

Cartas sinóticas e dados de reanálise indicaram que no dia 01 de fevereiro de 2005 ocorreram, simultaneamente, os três principais sistemas sinóticos de altos níveis sobre a América do Sul: VCAN extratropical, VCAN tropical e a Alta da Bolívia (Figura 1D). A ocorrência simultânea destes três eventos não é tão comum, haja vista que na América do Sul o VCAN extratropical é mais comum no inverno (Garreaud & Fuenzalida, 2007), bem como o cavado – que se estende desde níveis médios (ver campo de espessura na Figura 4) no qual o mesmo está inserido (Piva *et al.*, 2008).

A Figura 1 mostra o campo de linha de corrente e magnitude do vento em 250 hPa para três dias antes e dois dias depois do dia 01/02 (Figura 1d),

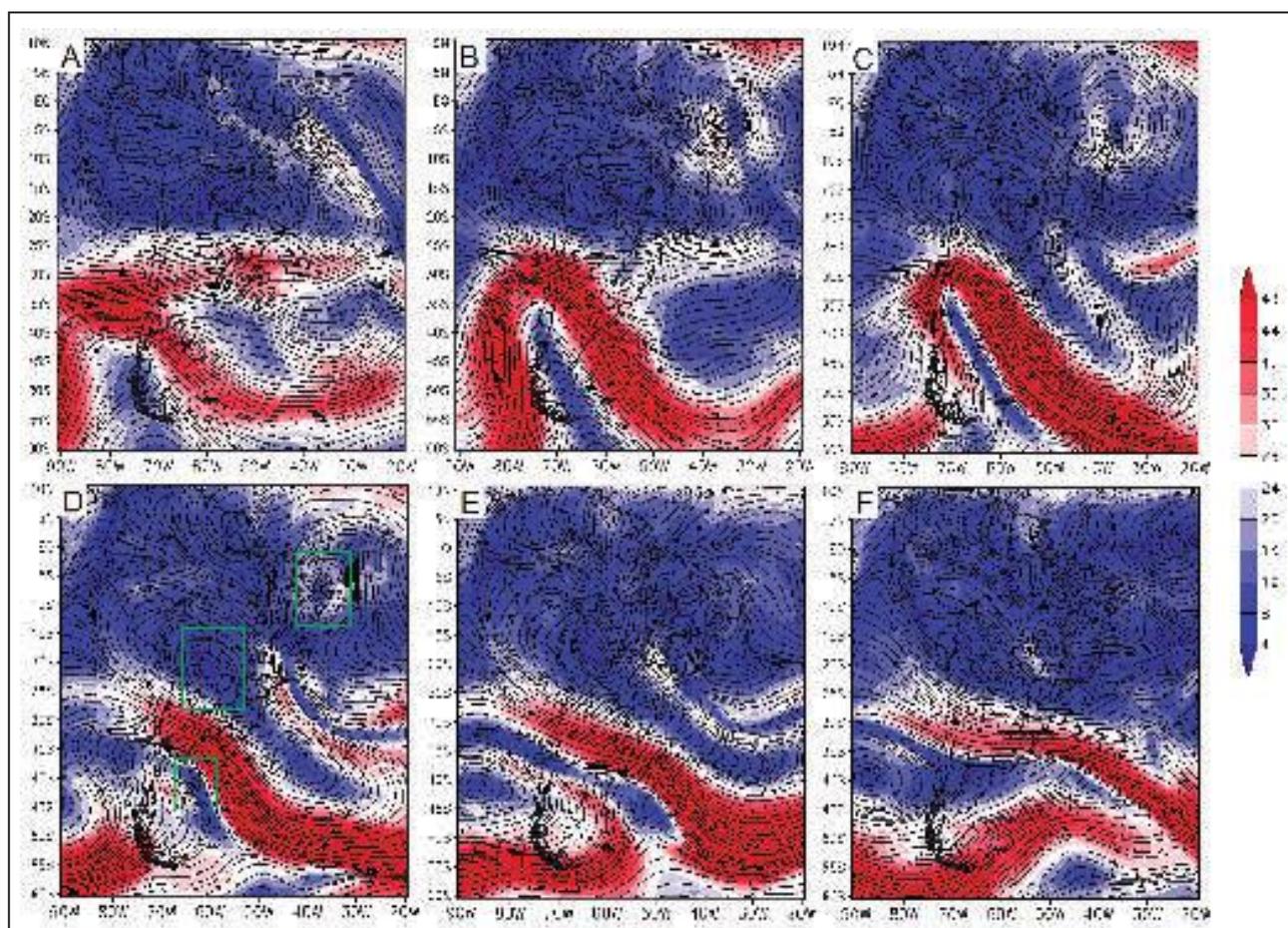


Figura 1 Campo de linha de corrente (contorno) e magnitude do vento (sombreado) em  $m\ s^{-1}$  em 250 hPa. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z. Em (d), o polígono verde mais ao sul indica o VCAN extratropical, o polígono no centro indica a Alta da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

para que se observe o desenvolvimento e dissipação dos sistemas. Na Figura 1D observa-se os sistemas destacados pelos polígonos em verde no campo de linha de corrente e magnitude do vento em 250 hPa, para as 00 UTC do dia 01/02/2005, obtidos dos dados de reanálise do MERRA. Observa-se o VCAN extratropical com seu centro em  $41^{\circ}S-62^{\circ}W$ , que é uma faixa latitudinal esperada para este evento, bem como a longitude, pois encontra-se à leste dos Andes – região propícia para a ocorrência de ciclogêneses tanto em altos como em baixos níveis (Gan & Rao, 1991 e 1994; Vera *et al.*, 2002; Evans & Braun, 2012). A Alta da Bolívia é observada com seu centro em  $20^{\circ}S-60^{\circ}W$ , posição que concorda com a literatura (Lenters & Cook, 1999, por exemplo). O VCAN do NeB também é observado em sua posição típica (Chen *et al.*, 1999), sobre o Nordeste Brasileiro, em  $5^{\circ}S-35^{\circ}W$ . Outra característica esperada é a magnitude do vento menor no centro dos sistemas do que ao redor.

### Análise Sinótica

Observa-se que três dias antes, dia 29/01 (Figura 1A) o VCAN do NeB já estava se despreendendo do cavado do NeB. A Alta da Bolívia é notada, mas não apresenta um formato simétrico e seu centro não está bem definido. Já o VCAN extratropical ainda estava na sua fase de cavado, com grande amplitude – compondo uma onda curta baroclínica de oeste, típica de sistemas transientes (maiores discussões sobre ondas baroclínicas de oeste em altos níveis são facilmente encontradas na literatura, como por exemplo em Keyser & Shapiro (1986) e Bluestein & Spehger (1995)). Nota-se que o cavado é difluente, o que tende a estar associado à instabilidades em superfície (Bluestein, 1993), e possui inclinação horizontal do seu eixo para oeste, o que concorda com a literatura, como pode ser visto em Satyamurty *et al.* (1998). Esta inclinação positiva está associada à valores menores

de velocidade vertical, de acordo com Macdonald (1976) e Glickman *et al.* (1977) em trabalhos para os Estados Unidos. Estudos de casos para a América do Sul, como em Cossetin *et al.* (2016), também verificaram que este tipo de inclinação horizontal esteve relacionada com instabilidades de menor magnitude do que os cavados com inclinação horizontal negativa. No dia seguinte (Figura 1B) o VCAN do NeB já estava formado. Observa-se a presença do núcleo da corrente de jato circundando completamente o cavado extratropical, situação igualmente típica para este sistema baroclínico, como discutido em vários trabalhos (por exemplo, Sanders *et al.*, 1991 e Pyle *et al.*, 2004). Comparando a Figura 1C com a Figura 1B, nota-se o deslocamento do VCAN do NeB para dentro do continente, assim como observado por Ramirez *et al.* (1999) e Mishra *et al.* (2001), por exemplo. Observa-se a Alta da Bolívia mais simétrica que no dia anterior. Deste sistema se estende uma crista sobre a região sul do Brasil, corrente abaixo do cavado extratropical. Este cavado, que por sua vez apresenta um formato mais alongado e estreito, deslocou-se para leste e o núcleo da corrente de jato agora ocupa mais o setor leste do que o oeste deste cavado. Pode-se dizer que a principal diferença em 24 h foi o surgimento de uma crista e consequente cavado (de menor amplitude) corrente abaixo do cavado extratropical. Observando a imagem de satélite para este horário (Figura 3C), nota-se nebulosidade sobre o Rio Grande do Sul, estendendo-se sobre o Atlântico sul. Esta nebulosidade provoca liberação de calor latente que, por sua vez, aquece a camada, acarretando em uma crista em altos níveis, como verificado na Figura 1C.

No dia 01 (Figura 1D) os três sistemas estão formados. A crista corrente abaixo do cavado extratropical deslocou-se para nordeste e no dia seguinte (Figura 1E) tornou-se mais zonal. Nota-se que o VCAN extratropical não é mais observado no dia 02/02 (Figura 1E), ao contrário do VCAN do NeB, que continua bem ativo. Isto é esperado, uma vez que o VCAN do NeB muitas vezes está associado a sistemas estacionários, como a ZCAS, conforme previamente discutido. Além disso, normalmente baixas desprendidas, transientes, não tem ciclo de vida tão duradouro quanto os dos VCANs tropicais (Nieto *et al.*, 2005). Do dia 01 (Figura 1D) ao dia 03 (Figura 1F) notou-se que o VCAN do NeB deslocou-se levemente para o sul, enquanto que a

Alta da Bolívia deslocou-se para oeste. Já o cavado extratropical que originou o VCAN extratropical seguiu a corrente zonal básica de oeste. Nesse período (Figuras 1E e 1F), verificou-se que a parte mais ao sul deste cavado se desprendeu da parte mais tropical, que ficou estacionária à oeste dos Andes. No último dia de análise, o cavado zonal e alongado em latitudes médias intensificou-se, formando um novo centro de baixa: um pequeno VCAN com centro em 15°S-50°W.

Os sistemas sinóticos de altos níveis tropicais estudados aqui tendem a ser confinados em altos níveis, propagando-se, no máximo, até médios níveis, com raras exceções (Virji 1981; Ramirez *et al.*, 1999), enquanto que as baixas desprendidas frequentemente são associadas à frontogênese ou ciclogênese em superfície (Carlson, 1967; Garreaud & Fuenzalida, 2007, entre outros). A Figura 2 apresenta o mesmo campo de linha de corrente em 250 hPa juntamente com o campo de altura geopotencial em 500 hPa. Observa-se, ao longo dos dias estudados, que os sistemas tropicais, VCAN do NeB e Alta da Bolívia, nem sempre são identificados no campo de altura geopotencial em 500 hPa (nem mesmo no campo de linha de corrente, não apresentados aqui), em parte devido à ausência de gradiente térmico nessas latitudes. Contudo, também deve-se levar em conta o intervalo de dados do campo, 50 metros geopotenciais (mgs); ideal para a análise dos sistemas extratropicais, mas que pode esconder alguma informação dos trópicos. Nota-se que o cavado extratropical em 500 hPa esteve quase todo o período praticamente em fase com o cavado em 250 hPa. O centro do VCAN em 500 hPa – que podemos chamar de Vórtice Ciclônico de Médios Níveis (VCMN) (Fedorova & Silva, 2016) – nos dias 01 e 02/02 (Figuras 2D e 2E) esteve levemente deslocado para leste comparado ao eixo do cavado extratropical em 250 hPa, como indica a literatura.

Com umidade suficiente em baixos níveis, locais sob regiões de advecção de vortacidade ciclônica são propícias à ocorrência de nebulosidade. A Figura 3 mostra imagens de satélite do canal infravermelho para o período, onde se observa a nebulosidade ao redor do VCAN do NeB nos seis dias. A partir do dia 30/01 (Figura 1B), quando o cavado extratropical em altos níveis se intensificou, intensificando também os centros de baixa pressão continentais (discutidos a seguir) e o sistema

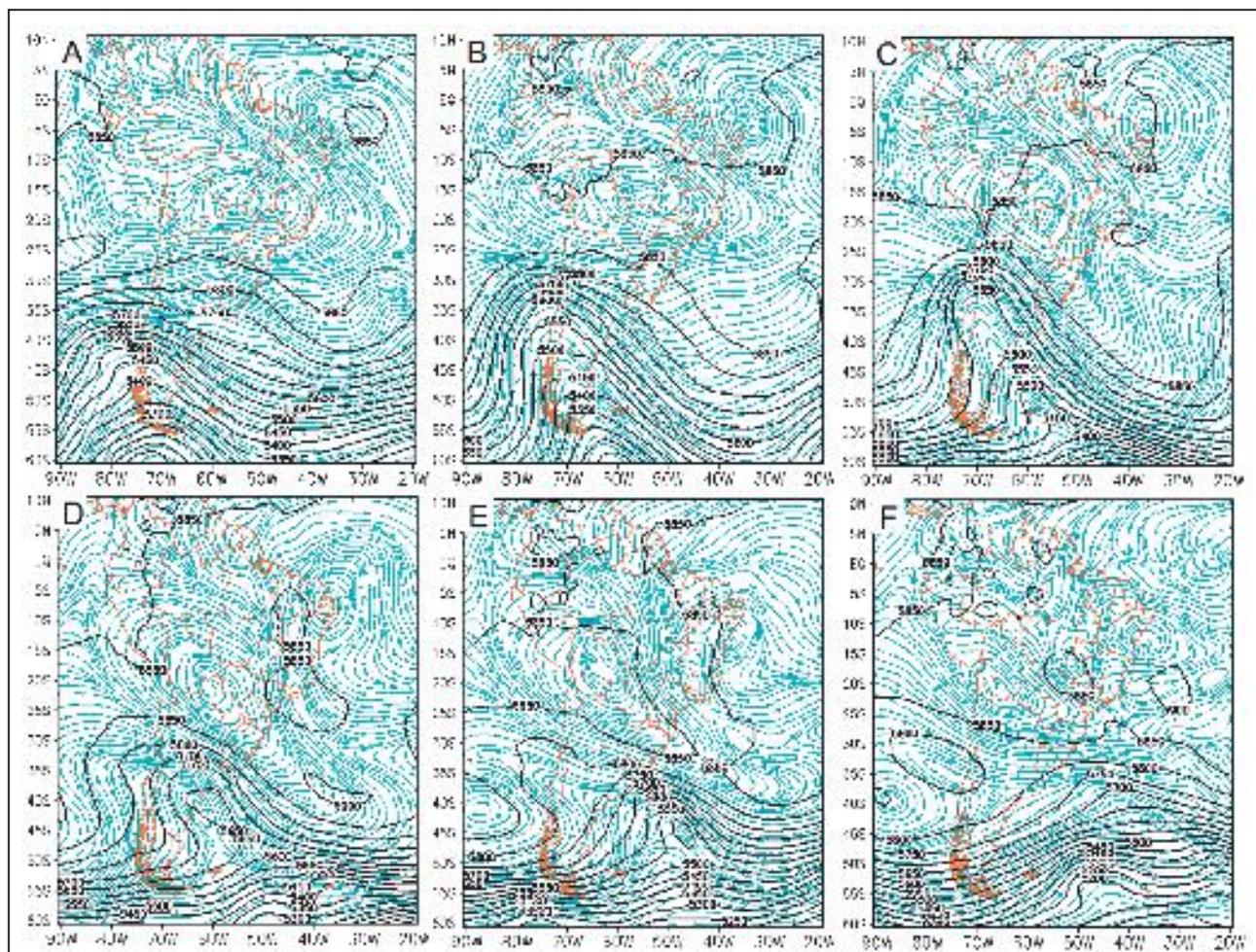


Figura 2 Campo de linha de corrente em 250 hPa (azul claro) e altura geopotencial em 500 hPa (contorno em preto, em mgp). (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

frontal no sudeste do continente (Figura 4B), houve aumento da nebulosidade sobre a Argentina. Com a evolução dos sistemas em altos e baixos níveis, a nebulosidade cresceu sobre a Argentina associada à atividade convectiva pré-frontal (Figuras 3B e 4B). Este sistema frontal se encontra à leste do cavado em altos níveis que, quando extratropical (baroclínico), também é chamado de frente fria de altos níveis (Shapiro, 1970; Keyser & Shapiro, 1986), estando muitas vezes – como é o caso aqui, associado com a Corrente de Jato (Palmén, 1948).

A nebulosidade da borda sul do VCAN do NeB (Figura 3D-F) também está relacionada com o cavado zonal subtropical em altos níveis que intensificou-se (Figuras 4D-F). Deste processo resulta no cavado invertido (Keshishian *et al.*, 1994) subtropical em 25°S-45°W, que começou dia 01 (Figura 4D) intensificando-se com o tempo. Na Figura 4, como

esperado, observa-se a região de menor espessura associada com o cavado extratropical em altos níveis (ver Figura 1), indicando uma região de advecção fria. Em superfície (Figura 4B), nota-se um intenso centro de baixa pressão sobre o noroeste da Argentina – no caso, a BNOA (Escobar & Seluchi, 2012), que pode ser intensificada dinamicamente pela presença do cavado em altos níveis e termicamente pelo escoamento de norte, que transporta calor e umidade para a região, como observado no campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 850 hPa (Figuras 5A-C). O principal agente deste transporte é o jato de baixos níveis (JBN), que seguindo os critérios de Bonner (1968) pode ser observado nas Figuras 5A e 5B no norte da Argentina. O JBN é comum nesta região e nesta época do ano (Satyamurty *et al.*, 1998; Vernekar *et al.*, 2003; Marengo *et al.*, 2002, 2004) e frequentemente está associado à formação de sistemas convectivos de mesoescala sobre a

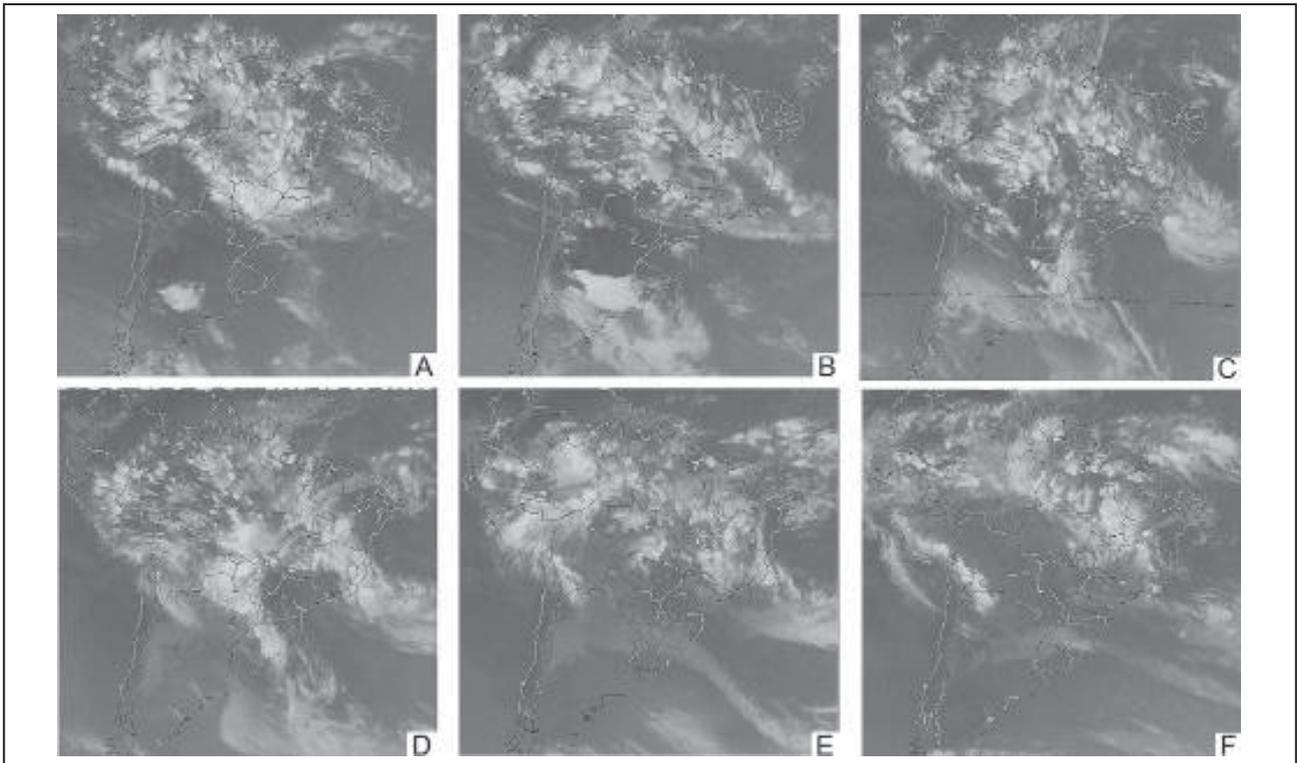


Figura 3 Imagens de satélite do canal infravermelho. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

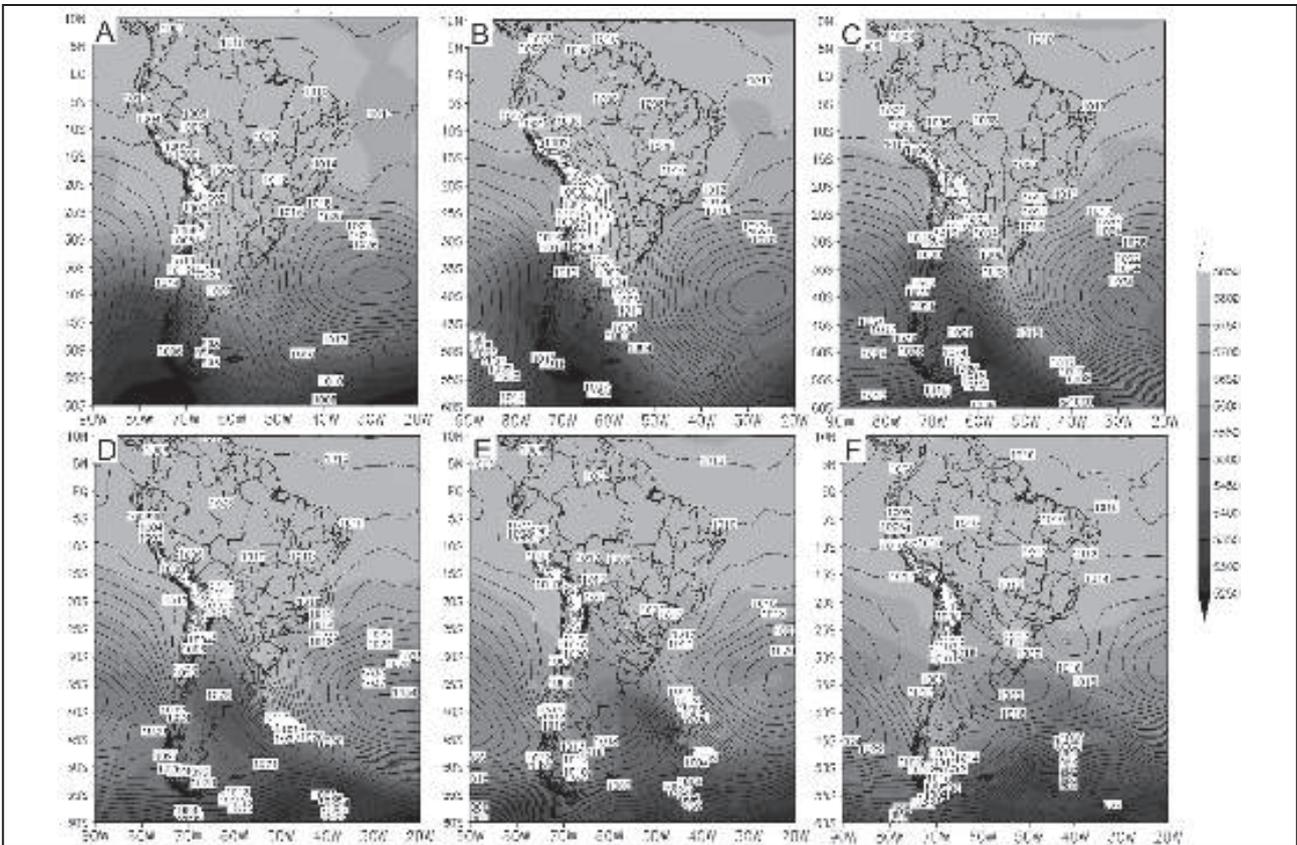


Figura 4 Campo de pressão ao nível médio do mar (contorno em hPa) e espessura entre 500 e 1000 hPa (sombreado, em m). (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

planície do Chaco (Seluchi & Marengo, 2000; Vera *et al.*, 2006; Salio *et al.*, 2007). A Figura 4c mostra que a frente fria intensificou-se e deslocou-se para nordeste, ficando em contato com o centro de baixa pressão continental. Este, comparando com a Figura 4B, indica uma divisão do seu centro, no que podemos dizer que o centro mais ao sul seria a BNOA enquanto que o mais ao norte, sobre a Bolívia, seria a Baixa do Chaco. É comum, especialmente nesta época do ano, a conjunção entre o sistema frontal e a baixa continental, formando uma zona de nebulosidade no sentido noroeste-sudeste (Kousky & Ferreira, 1981; Garreaud & Wallace, 1998). Também neste dia iniciou-se uma ciclogênese extratropical em superfície, aproximadamente em 45°S, que intensificou-se no dia seguinte (Figura 4D), à sotavento do cavado (ou VCAN), conforme indica a literatura (Palmén & Newton, 1969, entre outros). Pettersen & Smebye (1971) identificaram a existência do ciclone extratropical (chamado então de tipo A) como sendo aquele que se forma primeiramente em superfície quando não existe forçante dinâmica (cavado) em altos níveis, entretanto, para o Hemisfério Sul, alguns trabalhos indicam que a presença do cavado em altos níveis é fundamental para a ciclogênese extratropical em superfície (Piva *et al.*, 2010).

Assim como indica o campo de PNMM, o campo de linha de corrente em 850 hPa mostra a ciclogênese extratropical em superfície durando mais que em altitude, ao menos até o dia 02 (Figura 5E). Durante o ciclo de vida deste sistema (Figs. 5c-e), observa-se, como esperado, grande magnitude do vento em torno deste ciclone extratropical, haja vista o gradiente de pressão do sistema (Figura 4C-E). No dia 31 (Figura 5C) observa-se ao extremo sul do continente a influência do anticiclone do Pacífico que ao adentrar no continente provoca uma circulação anti-horária no sul da Argentina e Chile – circulação esta que provoca um escoamento de leste em direção aos Andes, sendo, portanto, uma forçante anticiclogênética devido ao resfriamento adiabático. A circulação anticiclônica provoca um intenso escoamento de sul sobre o leste e centro da Argentina, reforçado pela circulação ciclônica a leste (Figuras 5C-D). Este escoamento normalmente está relacionado à ondas frias (Pezza & Ambrizzi, 2005), não sendo tão frequentes nesta estação. Contudo, haja vista a amplitude do cavado extratropical em altos níveis, é esperado alguma advecção fria na região.

Da teoria quase-geostrófica, espera-se movimento ascendente na região de advecção de vorticidade ciclônica, i.e., corrente abaixo do eixo do cavado em altos níveis (Djuric, 1969). A Figura 6 apresenta o campo de velocidade vertical ômega em 500 hPa e linha de corrente em 250 hPa. As características observadas no dia 29 (Figura 6A), movimento ascendente a sotavento do eixo do cavado extratropical em altos níveis, se intensificaram no dia seguinte (Figura 6B), haja vista que o próprio cavado se intensificou. No dia 30 (Figura 6B), na latitude de 40°S, aproximadamente, também nota-se um local de movimento subsidente, associado ao ramo pós-frontal. Quanto aos outros sistemas em estudo, Alta da Bolívia e VCAN do NeB, onde as principais forçantes quase-geostróficas (advecções de vorticidade relativa e de temperatura), mais adequadas para análise em latitudes médias, são menores, não se observou movimentos ascendentes relevantes neste nível. Esta característica acompanhou estes sistemas tropicais durante todo o ciclo de vida, exceção feita ao VCAN do NeB, quando surgiram regiões de movimento ascendente entre a sua borda sul e o cavado subtropical (Figura 6D). No geral, em baixas latitudes observam-se pontos isolados de movimento ascendente relacionados com atividade convectiva. No último dia de análise (Figura 6F), quando o VCAN extratropical já dissipou, nenhum movimento vertical relevante foi observado.

Conforme discutido na literatura, como por exemplo em Hsieh (1949) ou Lenters & Cook (1999), espera-se que no nível de 250 hPa a Alta da Bolívia possua núcleo quente, ao contrário do VCAN do NeB e do VCAN extratropical. A Figura 7 mostra o campo de linha de corrente e temperatura para este nível. No segundo dia (Figura 7B), somente o VCAN do NeB encontra-se bem desenvolvido, e nota-se sobre ele um núcleo levemente mais frio que a vizinhança. Já quanto ao cavado extratropical, nota-se uma variação meridional de temperatura, inclusive com núcleo quente em direção ao polo. Com o passar dos dias, este núcleo quente acompanhou o cavado extratropical. No dia em que o VCAN extratropical se formou, observou-se um setor quente à nordeste e um frio à sudoeste do seu centro. Tal comportamento térmico do VCAN extratropical não é o mais esperado, o que provavelmente se deve ao fato de que neste nível o campo de temperatura sofre mais influência da circulação estratosférica. Nota-se que a Alta da Bolívia não apresentou uma temperatura diferenciada

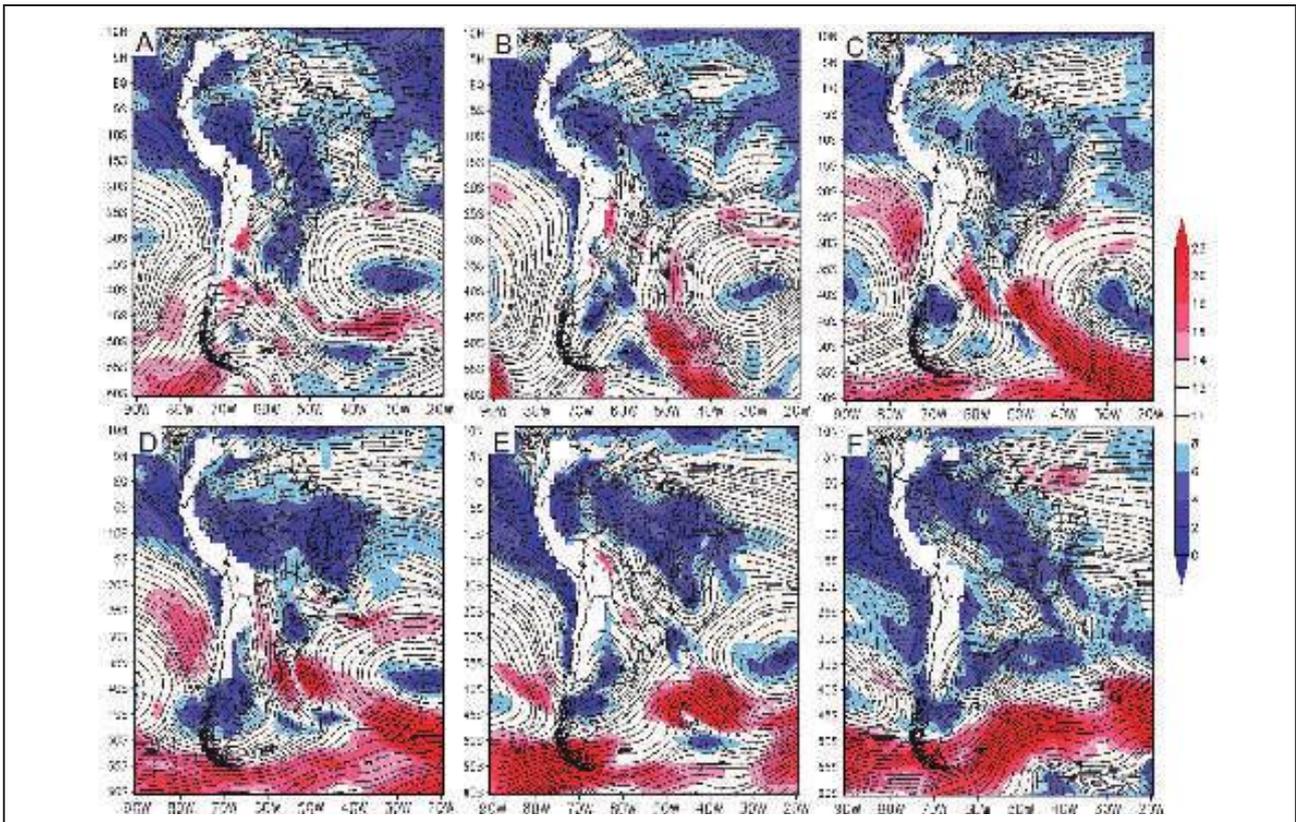


Figura 5 Campo de linha de corrente (contorno) e magnitude do vento (sombreado) em  $\text{m s}^{-1}$  em 850 hPa. (a) 29/01 00z, (b) 30/01 00z, (c) 31/01 00z, (d) 01/02 00z, (e) 02/02 00z, (f) 03/02 00z.

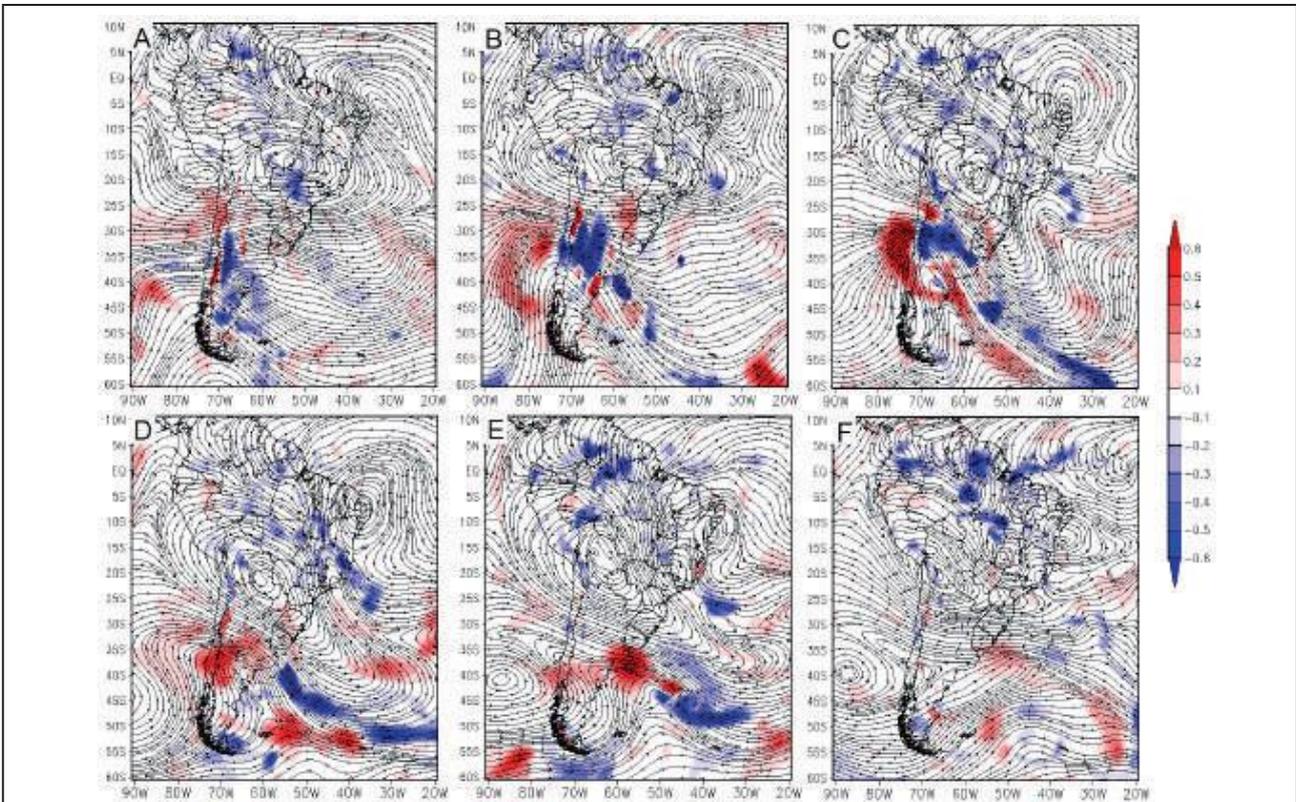


Figura 6 Campo de linha de corrente em 250 hPa (contorno) e ômega em 500 hPa (sombreado, em  $\text{m s}^{-1}$ ). (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

da sua vizinhança. Contudo, especialmente com relação às baixas desprendidas, alguns trabalhos caracterizam o fenômeno termicamente analisando níveis mais baixos (Garreaud & Fuenzalida, 2007, por exemplo). Nesse sentido, a Figura 8 apresenta o campo de linha de corrente em 250 hPa mas com o campo de temperatura em 500 hPa.

Comparando as Figuras 7 e 8, nota-se que o núcleo frio do cavado extratropical foi melhor observado em níveis médios, enquanto que o VCAN do NeB é observado em ambos níveis, embora sem concordância exata entre o núcleo frio e o centro do vórtice. Em ambos níveis, observa-se que a crista subtropical que se estende da Alta Bolívia apresenta temperaturas bem maiores do que a vizinhança, indicando a importância do fator térmico na sua manutenção. Ou seja, observou-se por este campo os centros de alta mais quentes e os de baixa mais frios, de acordo o vento térmico (Bluestein, 1993).

## Discussões Finais

O presente trabalho apresenta uma análise sinótica de três sistemas meteorológicos de altos níveis (250 hPa) típicos da América do Sul que ocorreram simultaneamente no dia 01 de fevereiro de 2005. Como esperado para um sistema transiente, o VCAN extratropical apresentou um ciclo de vida menor que a Alta da Bolívia e o VCAN do NeB. Após a dissipação do VCAN extratropical, observou-se a formação de um novo VCAN, desta vez de características subtropicais. Ao longo do ciclo de vida dos sistemas, observou-se grande associação do sistema extratropical em 250 hPa e em 500 hPa, ao contrário dos sistemas tropicais. Já em superfície, notou-se a associação do VCAN extratropical com ciclogênese e da Alta da Bolívia com a Baixa do Chaco, como mostra a literatura. A grande amplitude do cavado extratropical em altos níveis indica uma camada atmosférica mais fria, não tão comum para esta época do ano, mas que concorda com o campo

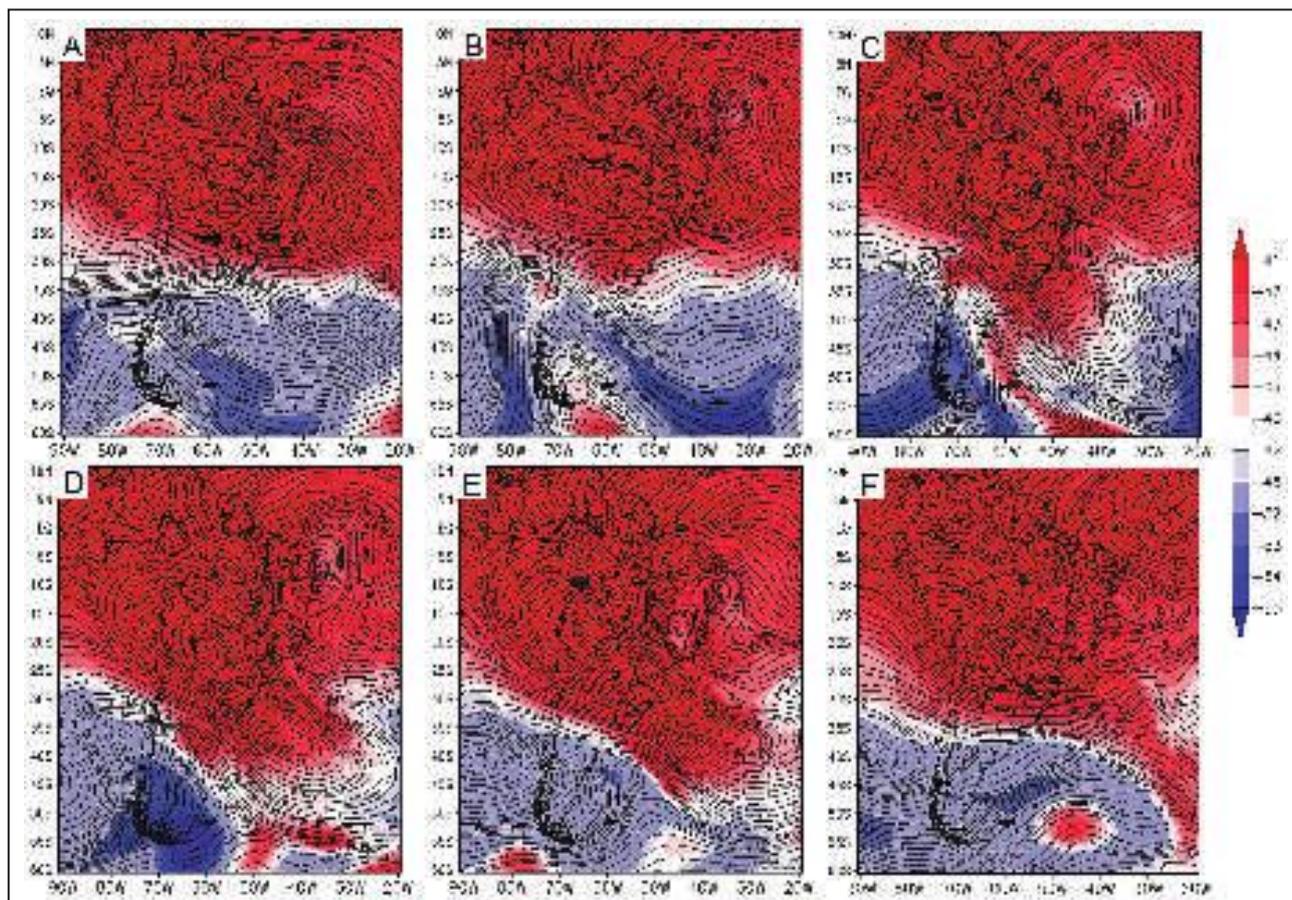


Figura 7 Campo de linha de corrente (contorno) e temperatura (sombreado em °C) em 250 hPa. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

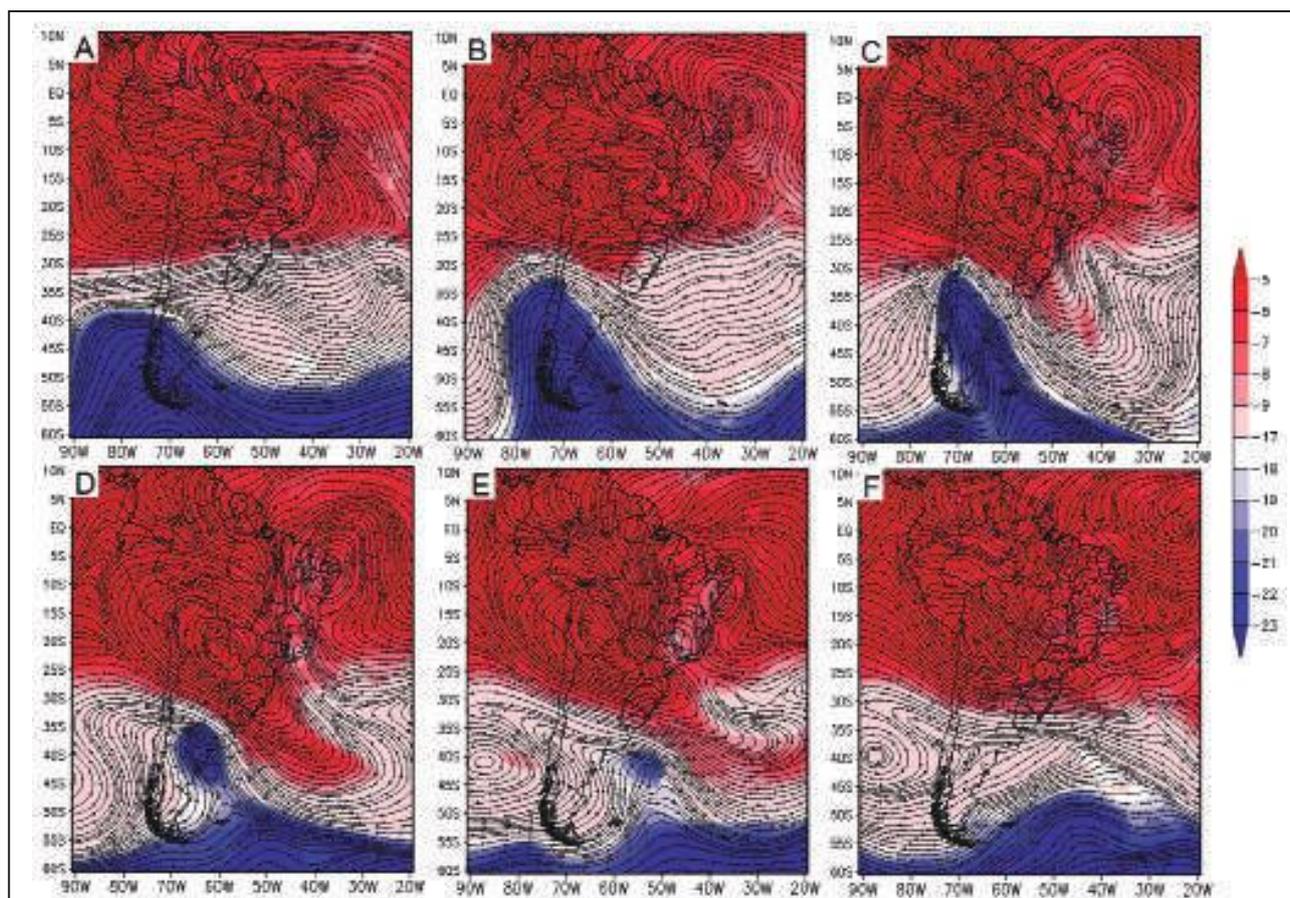


Figura 8 Campo de linha de corrente em 250 hPa (contorno) e temperatura (sombreado em °C) em 500 hPa. (A) 29/01 00z, (B) 30/01 00z, (C) 31/01 00z, (D) 01/02 00z, (E) 02/02 00z, (F) 03/02 00z.

de linhas de corrente em 850 hpa, onde se observa intenso escoamento de sul sobre o leste da Argentina. Observou-se, em acordo com a literatura, que dentre estes três sistemas em estudo o que apresentou movimento ascendente relevante foi o cavado extratropical, com intensos movimentos ascendentes à sotavento do eixo, na região de ciclogênese em superfície. A verificação da temperatura dos centros dos sistemas – principalmente do sistema extratropical – foi muito mais facilmente observada por meio do campo de temperatura em 500 hPa do que no campo de temperatura em 250 hPa, provavelmente devido à este último sofrer influência da circulação estratosférica. Tanto com relação aos sistemas tropicais quanto extratropicais, este campo de altos níveis mostrou centros de alta pressão mais quentes e centros de baixa pressão mais frios, como indica a teoria do vento térmico.

Conclui-se que, apesar de este caso não ser tão comum devido ao fato dos três sistemas ocorrerem simultaneamente, a análise do ciclo de vida dos

mesmos foi, no geral, concordou com a literatura especializada, e que a comparação entre os sistemas aprimora o entendimento dos mesmos.

## Referências

- Avila, V.D.; Nunes, A.B.; Alves, R.C.M. & Rodrigues, B.D. 2015. Analysis of a bombogenesis in South Atlantic summer using Ertel potential vorticity. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 6, 2015, Natal-RN *Proceedings*. Natal: SBMet, 2015.
- Bluestein, H.B. 1993. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. Volume II: Observations and theory of weather systems. Oxford University Press. Oxford. 594p.
- Bluestein, H.B. & Spehger, D.A. 1995. The dynamics of an upper-level trough in the baroclinic westerlies: Analysis based upon data from a wind profiler network. *Monthly Weather Review*, 123: 2369-2383.
- Bonner, W.D. 1968. Climatology of the low level jet. *Monthly Weather Review*, 96: 833-850.
- Carlson, T.N. 1967. Structure of a steady-state cold low. *Monthly Weather Review*, 95: 763-777.
- 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.
- DeMaria M. 1985. Linear response of a stratified tropical atmosphere to convective forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42: 1944-1959.
- Djuric D. 1969. Note on estimation of vertical motion by the omega equation. *Monthly Weather Review*, 97: 902-904.
- Escobar, G.C.J. & Seluchi, M.E. 2012. Classificação sinótica dos campos de pressão atmosférica na América do Sul e sua relação com as baixas do Chaco e do noroeste argentino. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27: 365-375.
- Evans, J.L.; Braun, A. 2012. A climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. *Journal of Climate*, 25: 7328-7340.
- Fedorova, N. & Silva, T.G. 2016. Vórtice ciclônico de médios níveis e sua influência no tempo do nordeste brasileiro. In: NUNES, A.B. & MARIANO, G.L. (Orgs.). *Meteorologia em Tópicos: Volume 3. Clube dos Autores*, p. 133-178.
- 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.
- Gan, M.A. & Rao, V.B. 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119: 1293-1302.
- Gan, M.A. & Rao, V.B. 1994. The influence of the Andes Cordillera on transient disturbances. *Monthly Weather Review*, 122: 1141-1157.
- Garreaud, R.D. & Wallace, J.M. 1998. Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America. *Monthly Weather Review*, 126: 2713-2733.
- Garreaud, R.D. & Fuenzalida, H.A. 2007. The influence of the Andes on cutoff lows: a modeling study. *Monthly Weather Review*, 135: 1596-1613.
- Glickman, T.S.; Macdonald, N.J.; Sanders, F. 1977. New findings on the apparent relationship between convective activity and the shape of 500 mb troughs. *Monthly Weather Review*, 105: 1060-1061.
- Godoy, A.A.; Possia, N.E.; Campetella, C.M. & Skabar, Y.G. 2011. A cut-off low in southern South America: Dynamic and thermodynamic processes. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26: 503-514.
- 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.
- Hsieh, Y-P. 1949. An investigation of a selected cold vortex over North America. *Journal of Meteorology*, 6: 401-410.
- Jones, C. & Horel, J.D. 1990. A circulação da Alta da Bolívia e a atividade convectiva sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 5: 379-387.
- 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.
- Keshishian, L.G.; Bosart, L.F.; Bracken, W.E. 1994. Inverted troughs and cyclogenesis over interior North America: A limited regional climatology and case studies. *Monthly Weather Review*, 122:565-607.
- Keyser, D. & Shapiro, M.A. 1986. A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. *Monthly Weather Review*, 114: 452-499.
- Kodama, Y. 1992. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (The Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 70: 813-835.
- Kousky, V.E. & Ferreira, N.J. 1981. Interdiurnal surface pressure variations in Brazil: Their spatial distributions, origins and effects. *Monthly Weather Review*, 109: 1999-2008.
- 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.
- Lourenço, M.C.M.; Ferreira, N.J. & Gan, M.A. 1996. Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical. In: CPTEC (ed.) *Climanálise Especial 10 anos*. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/vociclo.html>. Último acesso em 02/10/2015.
- Macdonald, N.J. 1976. On the apparent relationship between convective activity and the shape of 500 mb troughs. *Monthly Weather Review*, 104: 1618-1622.
- Marengo, J.A.; Douglas, M.W. & Silva Dias, P.L. 2002. The South American low-level jet east of the Andes during 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign. *Journal of Geophysical Research*, 107: D20.
- Marengo, J.A.; Soares, W.R.; Saulo, C. & Nicolini, M. 2004. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *Journal of Climate*, 17: 2261-2280.
- 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.
- 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.
- Nieto, R.; Gimeno, L.; De La Torre, L.; Ribera, P.; Gallego, D.; García-Herrera, R.; García, J.A.; Nuñez, M.; Redaño, A. & Lorente, J. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 18: 3085-3103.
- Palmén, E. 1948. On the distribution of temperature and wind in the upper westerlies. *Journal of Meteorology*, 5: 20-27.
- Palmén, E. & Nagler, K.M. 1949. The formation and structure of a large-scale disturbance in the westerlies. *Journal of Meteorology*, 6: 228-242.
- Palmén, E. & Newton, C.W. 1969. *Atmospheric Circulation Systems*. Academic Press. London. 603p.
- Pettersen, S. & Smebye, S.J. 1971. On the development of extratropical cyclones. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 97: 457-482.
- Pezza, A.B. & Ambrizzi, T. 2005. Cold waves in South America and freezing temperatures in São Paulo: Historical background (1888-2003) and cases studies of cyclone and anticyclone tracks. *Revista Brasileira de*

- Meteorologia*, 20: 141-158.
- Piva, E.D.; Gan, M.A. & Rao, V.B. 2008. An objective study of 500-hPa moving troughs in the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 136: 2186-2200.
- Piva, E.D.; Gan, M.A. & Rao, V.B. 2010. Energetics of winter troughs entering South America. 2010. *Monthly Weather Review*, 138: 1084-1103.
- 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.
- Pyle, M.E.; Keyser, D. & Bosart, L.F. 2004. A diagnostic study of jet streaks: Kinematic signatures and relationship to coherent tropopause disturbances. *Monthly Weather Review*, 132: 297-319.
- 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.
- 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.
- Salio, P.; Nicolini, M. & Zipser, E.J. 2007. Mesoscale convective systems over South America and their relationship with the South American low-level jet. *Monthly Weather Review*, 135: 1290-1309.
- Sanders, F.; Bosart, L.F. & Lai, C-C. 1991. Initiation and evolution of an intense upper-level front. *Monthly Weather Review*, 119: 1337-1367.
- 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.
- Seluchi, M.E. & Marengo, J.A. 2000. Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and extreme events. *International Journal of Climatology*, 20: 1167-1190.
- Seluchi, M.E. & Satyamurty, P. 2000. A case study of a midtropospheric cold vortex in the subtropics of South America. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, *Anais*. Rio de Janeiro, 2000, CD-ROM.
- Seluchi, M.E.; Saulo, A.C.; Nicolini, M. & Satyamurty, P. 2003. The Northwestern Argentinean Low: A study of two typical events. *Monthly Weather Review*, 131: 2361-2378.
- Seluchi, M.E. & Saulo, A.C. 2010. Mecanismos físicos associados à formação da Baixa do Chaco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, *Proceedings*. Belém, 2010, 1 CD-ROM.
- Seluchi, M.E. & Saulo, A.C. 2012. Baixa do noroeste argentino e Baixa do Chaco: Características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27: 49-60.
- Shapiro, M.A. 1970. On the applicability of the geostrophic approximation of upper-level frontal-scale motions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27: 408–420.
- 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.
- Vera, C.S.; Vighiarolo, P.K. & Berbery, E. 2002. Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130: 684–699.
- Vera, C.S.; Baez, J.; Douglas, M.; Emmanuel, C.B.; Marengo, J.A.; Meitin, J.; Nicolini, M.; Nogues-Peagle, J.; Peagle, J.; Penalba, O.; Salio, P.; Saulo, C.; Silva Dias, M.A.; Silva Dias, P. & Zipser, E. 2006. The South American low-Level Jet Experiment. *Bulletin of American Meteorological Society*, 87: 63-77.
- Vernekar, A.D.; Kirtman, B.P. & Fennessy, M.J. 2003. Low-level jet and their effects on the South American summer climate as simulated by the NCEP Eta model. *Journal of Climate*, 16: 297-311.
- Virji, H. 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Monthly Weather Review*, 109: 599–610.
- 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.