ESTUDO DE CASO DE UMA NUVEM VÍRGULA INVERTIDA ORIGINADA EM MASSA DE AR POLAR E A SUBSEQÜENTE OCORRÊNCIA DE VENTOS FORTES NA BACIA DE CAMPOS

Claudine Pereira Dereczynski, Nelson Jesus Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, C.P. 515 12201-970 São José dos Campos-SP, Brasil

RESUMO

Um estudo de caso de uma nuvem vírgula invertida associada a forte advecção fria de latitudes subantárticas e a subsequente ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos (litoral do Rio de Janeiro), foi realizado com o objetivo de diagnosticar as principais características sinóticas de sua evolução temporal. O caso ocorrido no período 09 a 13/06/89, foi estudado através de análises isobáricas utilizando-se dados do European Centre for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF), dados meteorológicos convencionais e imagens de satélite. Os resultados mostram que o sistema se formou nas proximidades do Paraguai, em baixos níveis (850 a 700 hPa), na retaguarda de um sistema frontal frio, com suporte dinâmico em altos níveis. No estágio nascente desse distúrbio observou-se nos baixos níveis uma forte advecção de ar polar que contribuiu para a formação do vórtice. No estágio maduro houve intensa convergência de umidade e advecção de ar quente nos baixos níveis. Finalmente, no estágio de dissipação, o forte influxo de vapor d'água oriundo do Oceano Atlântico contribuiu para a formação de chuvas abundantes no litoral da região sudeste e ventos intensos (mais de 20 $m.s^{-1}$) na Bacia de Campos.

INTRODUÇÃO

Vórtices ciclônicos encontrados em massas de ar polar têm recebido especial atenção pelos meteorologistas devido as grandes tempestades que causam, principalmente em regiões oceânicas. Como o assunto é relativamente recente não existe unanimidade na denominação e classificação desses tipos de distúrbios. Businger e Reed (1989) após reexaminarem vários tipos de vórtices ciclônicos em massas de ar frio utilizam o termo "baixa polar" em referência a qualquer tipo de ciclone de escala subsinótica (500 - 1000 km) que se forme numa massa de ar frio, no lado polar de uma corrente de jato ou zona frontal, cuja nebulosidade é

largamente do tipo convectiva. Eles definem três tipos de baixa polar em ordem decrescente de tamanho: i) onda curta/vento máximo, ii) frente Ártica e iii) baixa fria. Dentro desta classificação de Businger e Reed o sistema em estudo aparece como tipo (i) onda curta/vento máximo, que também é denominado por outros pesquisadores como nuvem vírgula invertida.

O termo nuvem vírgula (invertida no hemisfério sul) foi introduzido pelos meteorologistas para denotar os vórtices ciclônicos vistos em imagens de satélite, dentro de massas de ar frio com aparência de uma vírgula. Os vórtices ciclônicos em massas de ar frio apresentam-se em diferentes características, formas e tamanhos dependendo de como são formados. Rasmussen (1981), Reed e Blier (1986) chamam de "nuvem vírgula" os sistemas com padrão de nebulosidade em forma de vírgula, com diâmetro superior a 500 km que se desenvolvem nas proximidades dos limites frontais, onde a ascensão baroclínica inclinada é o fator dominante e "baixa polar" a sistemas menores, com padrão de nebulosidade em forma espiral e com aparência semelhante a pequenos ciclones tropicais que se formam no ar frio, longe da profunda baroclinicidade associada com a frente polar. Assim, de acordo com essas definições anteriores deve existir uma região comum entre esses distúrbios em que os sistemas podem ser chamados tanto de baixa polar como de nuvem vírgula invertida, Locatelli et alii (1982) refere-se a ambos os tipos como "vórtices em correntes de ar polar".

Nuvens vírgula ou baixas polares são vórtices ciclônicos frios que se formam em geral no inverno sobre regiões oceânicas (Reed (1979) e Businger (1987)), onde exista acentuada baroclinicidade troposférica, usualmente próximo a limites frontais pré-existentes e no lado do forte cisalhamento ciclônico das correntes de jato troposféricas superiores (Mullen (1979) e Locatelli e outros (1982)). Tais distúrbios se formam nos níveis médios e inferiores e apresentam velocidade de deslocamento em torno de 8 $m.s^{-1}$ (Bonatti e Rao (1987)). O estágio incipiente é associado com acentuada convecção, que freqüentemente assume um caráter em forma de bandas, a medida que o distúrbio atinge a maturidade (Businger, 1986). Nos últimos estágios de desenvolvimento o padrão nuvem vírgula visto nas imagens de satélite é primariamente composto por nuvens estratiformes (associado com ascensão baroclínica), coincidindo também com uma região de advecção diferencial de vorticidade ciclônica (Reed, 1979).

Com relação aos mecanismos propostos para explicar a formação das nuvens vírgula, Harrold e Browning (1969), sugerem que seja um fenômeno

baroclínico. Reed (1979), comenta que Rasmussen (1977) e Okland (1977) propõe que seja uma manifestação da Instabilidade Condicional do Segundo Tipo (CISK), uma interação cooperativa entre convecção de pequenos cumulus e um distúrbio de grande escala, na qual convergência de grande escala organiza a convecção de cumulus e o aquecimento de condensação das nuvens fornece energia ao sistema de grande escala. Reed (1979), considera nuvens vírgula como fenômenos baroclínicos, sem contudo, descartar o CISK como um fator contribuinte na formação e intensificação dos distúrbios.

Existem poucos trabalhos sobre o assunto para o hemisfério sul. Dall' Antonia (1991) estudou a formação de uma nuvem vírgula invertida sobre o Paraguai e nordeste da Argentina em agosto de 1989. Ele observou entre outros fatores, uma esteira transportadora quente paralela à frente fria onde o ar quente se eleva e ao atingir a frente quente gira anticiclonicamente adiante do setor frio. Esta idéia de um fluxo de ar tridimensional visualizado a partir de análises isentrópicas, ou seja, análises em superfícies de temperatura potencial ou temperatura potencial do bulbo úmido constantes, já havia sido proposta por Green, Ludlam e McIlveen (1966), Browning e Harrold (1969) e outros.

Outra referência para estudos deste tipo de distúrbio no hemisfério sul é a de Bonatti e Rao (1987), que pesquisaram um caso de nuvem vírgula invertida ocorrido em abril de 1979 sobre o Uruguai e concluíram que a instabilidade baroclínica modificada pela liberação de calor latente foi o mecanismo gerador do vórtice ciclônico. De acordo com estes pesquisadores nuvens vírgula invertidas se formam na América do Sul, sobre as vizinhanças do Paraguai, norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil. Eles encontraram que em geral tais sistemas ocorrem nas estações intermediárias, possuem escala horizontal da ordem de 1500 km e propagam-se de oeste para leste, dissipando-se em aproximadamente dois dias.

Com intuito de aprimorar o conhecimento da dinâmica dos sistemas em forma de vírgula invertida que afetam a região sul/sudeste do Brasil, este trabalho investiga as principais características sinóticas de um episódio associado a ventos fortes ocorrido na Bacia de Campos em junho de 1989. A Bacia de Campos, região oceânica localizada no litoral do Rio de Janeiro (22° a 23° S e 40° a 41° W) é a maior região produtora da Petrobrás. Ventos fortes nesta bacia impedem a realização de diversas operações de alto risco e custo como por exemplo, a recuperação e lançamento de dutos no oceano. Outras operações de

rotina que dependem de aluguéis de navios sondas também são canceladas quando o vento torna-se intenso, o que implica em enorme prejuízo.

METODOLOGIA E DADOS

A seleção do caso para estudo foi feita a partir dos dados de velocidade do vento à superfície medida na região da Bacia de Campos. Esses dados pertencem ao Sistema de Informações Meteorológicas e Oceanográficas (SIMO) da Petrobrás e foram coletados em campanhas distintas, com diferentes metodologias, no período de abril de 87 a novembro de 92 (ver tabela 1).

Tabela 1 - Estações de coleta de dados meteorológicos de superfície na Bacia de Campos com respectivas localizações geográficas, altura dos anemômetros e períodos de dados disponíveis.

ESTAÇÃO	LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)	ALT. ANEM. (m)	PERÍODO DADOS
Enchova	22° 40' 36"	40° 36' 20"	34.0	01/06/87 31/05/92
P-XV	22° 40' 36"	40° 36' 20"	84.0	01/05/89 31/01/91
Garoupa	22° 26' 13"	40° 25' 33"	45.0	01/05/89 31/05/92
P-XII	22° 45" 31"	40° 49' 01"	84.0	24/06/91 09/08/91
Orion I	22° 11' 00"	39° 55' 00"	10.0	04/04/87 19/03/88
Orion II	22° 12' 00"	39° 56' 00"	10.0	06/06/88 02/11/88
Marlim	22° 32' 00"	40° 00' 00"	4.5	03/04/91 26/11/92
Marlim	22° 32' 00"	40° 00' 00"	4.0	03/04/91 26/11/92

Diagramas de dispersão de velocidade do vento ao longo do ano foram construídos para cada uma das estações de coleta listadas na tabela 1. Os resultados indicaram que os meses de maio a setembro foram os que apresentaram maior freqüência de ocorrência de ventos fortes (velocidade igual ou superior a 16 m. s^{-1}). A partir daí selecionou-se os períodos com ventos superiores a 16 m. s^{-1} compreendido entre os meses de maio a setembro. Assim, foram selecionados 11 casos caracterizados como períodos de ventos fortes na região (ver tabela 2).

Tabela 2 - Casos de ventos extremos na Bacia de Campos.

ESTUDO DE CASO	PERÍODO	VEL MÁXIMA (m/s)
frente fria	13/09/88 a 15/09/88	16
ciclone extratropical	27/05/89 a 29/05/89	28
baixa polar	09/06/89 a 13/06/89	23
frente fria	06/07/89 a 07/07/89	17
ciclone extratropical	28/07/89 a 30/07/89	22
frente fria	28/08/89 a 29/08/89	17
indeterminado **	03/09/89 a 04/09/89	23
ciclone extratropical	16/09/89 a 18/09/89	18
indeterminado ##	11/06/90 a 12/06/90	20
baixa polar	21/06/90 a 22/06/90	18
indeterminado ##	11/07/90 a 13/07/90	18

** - não foi possível distinguir o tipo de distúrbio na imagem de satélite.
- não foi possível obter as imagens de satélite.

A tabela 2, baseada em imagens de satélites meteorológicos, mostra que foram observadas três classes de distúrbios associados aos casos de ventos fortes na Bacia de Campos: sistemas frontais frios, ciclones extratropicais e nuvens vírgula invertidas. Decidiu-se por estudar um dos casos de nuvem vírgula invertida já que existe pouca informação no Brasil sobre este tipo de sistema. Assim, optou-se pelo caso ocorrido no período 09 a 13/06/89 por ter apresentado ventos mais intensos do que o caso ocorrido em junho de 1990.

DADOS

O estudo de caso foi feito utilizando-se dados meteorológicos convencionais, imagens de satélites meteorológicos e dados gerados por modelos de previsão numérica de tempo.

DADOS METEOROLÓGICOS CONVENCIONAIS

Os dados meteorológicos convencionais utilizados nas análises foram: dados horários de velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e temperatura do ar coletados na Bacia de Campos, análise das cartas de superfície de 12 TMG, análise das cartas de altitude de 12 TMG nos níveis 850, 700, 500 e 250 hPa e análise de radiossondagens de 12 TMG da estação do Galeão (Rio de Janeiro).

As imagens de satélites meteorológicos disponíveis para os estudos de casos foram: imagens do satélite Geostatinary Operational Environmental Satellite-7 (GOES-7) no canal infravermelho e imagens do satélite National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA-11) (mosaicos) no canal infravermelho, fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Foram utilizados dados gerados pelo ECMWF. Estes dados, análises inicializadas, estão arquivados na fitoteca do Centro de Computação Eletrônica da Universidade de São Paulo (CCE-USP). As matrizes com dados das 12 TMG, de temperatura do ar (°C), altura geopotencial (mgp), componentes do vento horizontal (ms^{-1}), umidade relativa do ar (%) e velocidade vertical (Pa. s^{-1}), compreendem 7 níveis isobáricos (1000, 850, 700, 500, 300, 200 e 100 hPa) com resolução de 2.5° de latitude e longitude.

Análises isobáricas da advecção térmica e divergência do fluxo de vapor d'água, foram construídos utilizando-se o programa Grid Analysis and Display System (GRADS), desenvolvido no Departamento de Meteorologia da Universidade de Maryland (USA) - Center for Ocean-Land Atmosphere Interactions. Tal programa computacional é executado em ambiente WINDOWS e está instalado na estação de trabalho SUN do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da USP.

METODOLOGIA

A metodologia para obtenção dos campos de advecção de temperatura e divergência do fluxo de vapor d'água é descrita a seguir:

A advecção horizontal de temperatura é obtida a partir da equação da energia termodinâmica, expressa por:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\vec{\nabla}T + w\frac{\partial T}{\partial z}$$

onde o primeiro termo do lado direito representa a variação local da temperatura, o segundo a advecção horizontal de temperatura ($-\vec{V}\vec{\nabla}T$) e o terceiro a expansão ou compressão adiabática.

A divergência horizontal do fluxo do vapor d'água é obtida utilizando-se a expressão:

$$D = \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}$$

onde:

$$\vec{Q} = \frac{1}{g}\int_{300}^{1000} q\,\vec{V}\,dP \qquad \text{e}$$

q = umidade específica.

RESULTADOS

As análises descritas a seguir têm como objetivo responder a seguinte pergunta: - "Qual o mecanismo responsável pela formação da nuvem vírgula invertida e em que níveis ocorreram os processos físicos mais importantes para o desenvolvimento do fenômeno? "

Observou-se nas imagens dos satélites GOES-7 e NOAA-11 (mosaicos), canal infravermelho, a evolução de um sistema com padrão de nebulosidade tipo vírgula invertida (vórtice ciclônico nos níveis médios). As fotos obtidas durante o período estão apresentadas nas figs. 1a - f. A partir do dia 10/96 - 09 TMG, o sistema foi detectado como um pequeno aglomerado de nebulosidade convectiva sobre o nordeste do Paraguai (C1), a oeste de uma faixa de nebulosidade (C2), atingindo seu estágio maduro em menos de 42 horas (como mostra o esquema da fig. 2). Este sistema (nuvem vírgula invertida), indicado por C1+C2 na fig. 1c, foi o responsável pelos ventos fortes que ocorreram na Bacia de Campos, durante aquele período.

A análise da carta sinótica de superfície (fig. 3a-e) mostra uma frente fria entre o norte do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo. A frente se deslocou de Santa Catarina, onde estava posicionada no dia anterior, para a região sudeste rapidamente e sem causar precipitação em sua trajetória. Na região C1 onde formou-se posteriormente o pequeno núcleo de nebulosidade da vírgula invertida, observou-se um cavado numa região relativamente quente, acompanhado de alguma chuva, trovoada, cumulonimbus, cirrus e altocumulus. Os gráficos da fig. 4 mostram que a passagem do sistema frontal pela Bacia de Campos, no dia 09/06 entre 12 e 15 TMG, foi registrada apenas pelos ventos que giraram progressivamente do quadrante norte para sul, não havendo grandes alterações nos campos de pressão e temperatura do ar.

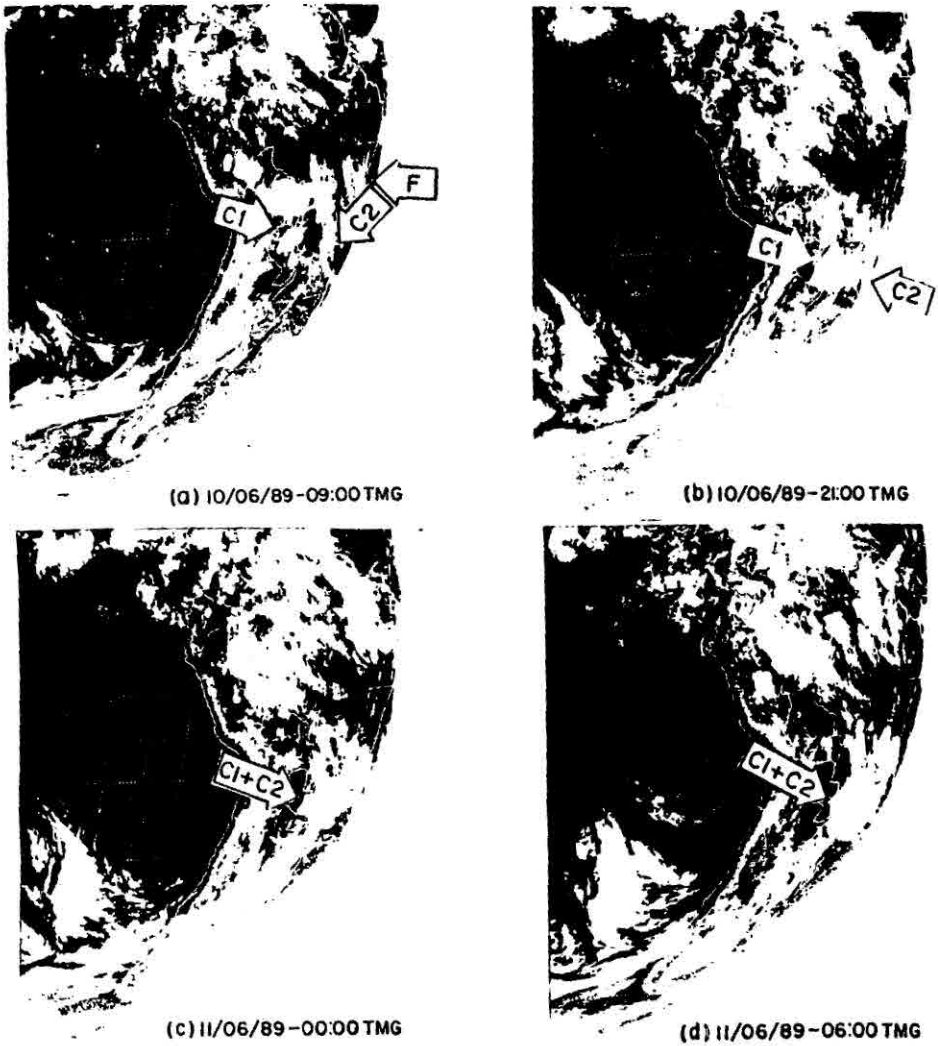


Figura 1 - Seqüência de imagens do satélite GOES-7 (canal infravermelho) mostrando a formação da nuvem vírgula invertida sobre a região sudeste do Brasil e Oceano Atlântico para (a) 10/06 - 09 TMG, (b) 10/06 - 21 TMG, (c) 11/06 - 00 TMG, (d) 11/06 - 06 TMG, (e) 11/06 - 09 TMG e (f) 12/06 - 00 TMG.

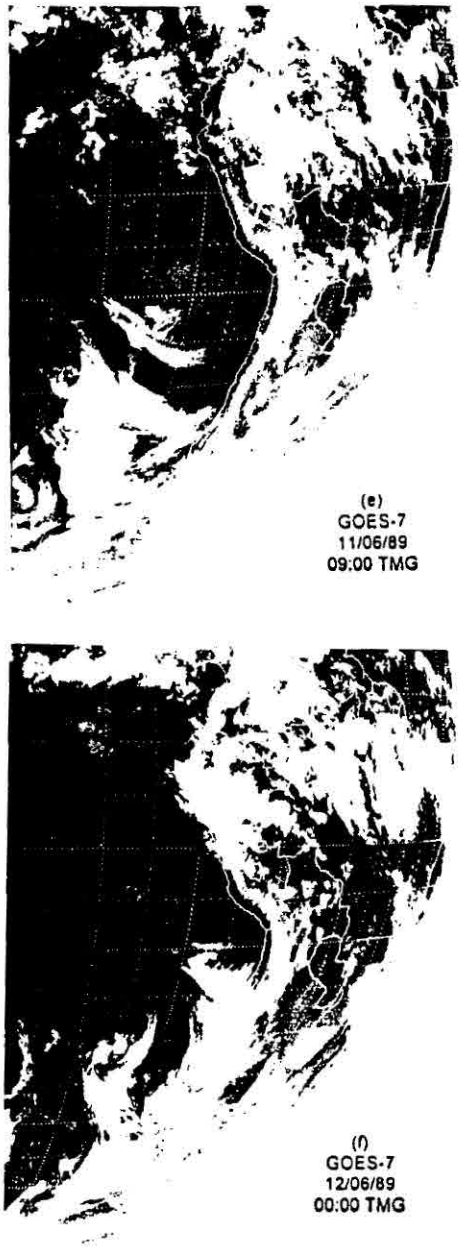


Figura 1 - continuação.

No dia seguinte (10/06), a frente fria se deslocou para o sul da Bahia. Na foto de satélite apenas um pequeno rastro deste sistema pôde ser identificado, aparecendo indicado por "F" na fig. 1a. O cavado C1 desintensificou-se, havendo uma elevação na pressão atmosférica de aproximadamente 5 hPa em relação ao dia anterior. Alguma chuva e nebulosidade tipo altocumulus e stratocumulus foi observada na região sul do Mato Grosso do Sul e norte do Paraguai, porém as temperaturas sofreram declínio de cerca de 4° C em C1. A nebulosidade em C2 (fig. 1a) era do tipo estratiforme e cumuliforme, chuvas e trovoadas acompanhavam o cavado que se estendia desde a região central de Minas Gerais até o Paraná. Da mesma forma que em C1, e em C2 também ocorreu elevação na pressão atmosférica em relação ao dia anterior (cerca de 2 hPa).

No dia 11/06 a frente fria já não era mais detectada na carta de superfície e tão pouco na foto de satélite. A nebulosidade do tipo stratus, altocumulus e cumulus, associada a um cavado em altos níveis, desde a Amazônia até o sul do Brasil, atingia quase todas as áreas nas regiões sudeste e sul do Brasil e as chuvas caíam na parte central do sistema. Observa-se que a nuvem vírgula invertida se manifestou em superfície, nos meandros do anticiclone migratório, onde foram formados pequenos cavados e não em ciclones bem formados, fechados, como em casos intensos de nuvens vírgula (Businger e Reed, 1989). Em C1+C2 a temperatura continuou em declínio, cerca de 1° C em relação ao dia anterior (10/06). Na Bacia de Campos houve precipitação (chuva e chuvisco) e aumento na intensidade dos ventos. A temperatura do ar sofreu um declínio de 5° C entre os dias 11 e 12/06, o que parece ter sido provocado pela penetração do anticiclone polar.

No dia 12/06, quando a nuvem vírgula invertida começou a se dissipar, o centro do anticiclone polar (1028 hPa) encontrava-se instalado sobre o Oceano Atlântico. As pressões atmosféricas na região sudeste do Brasil sofreram elevação de aproximadamente 2 hPa, mas o cavado (C1+C2) pôde ser observado sobre a região. Em algumas estações meteorológicas do sudeste do Brasil (sob este cavado) persistiram as condições de céu encoberto, chuvas e nebulosidade tipo cumuliforme. A temperatura do ar à superfície nesta região apresentou um declínio de aproximadamente 2° C, enquanto que a precipitação acumulada desde o dia anterior (11/06) foi a maior do período, totalizando-se 106 mm no Rio de Janeiro, 135 mm em Ubatuba e 80 mm em Santos. Os ventos na Bacia de Campos, provenientes do quadrante sul, sofreram intensificação, atingindo neste dia os mais altos valores do período (23 m/s).

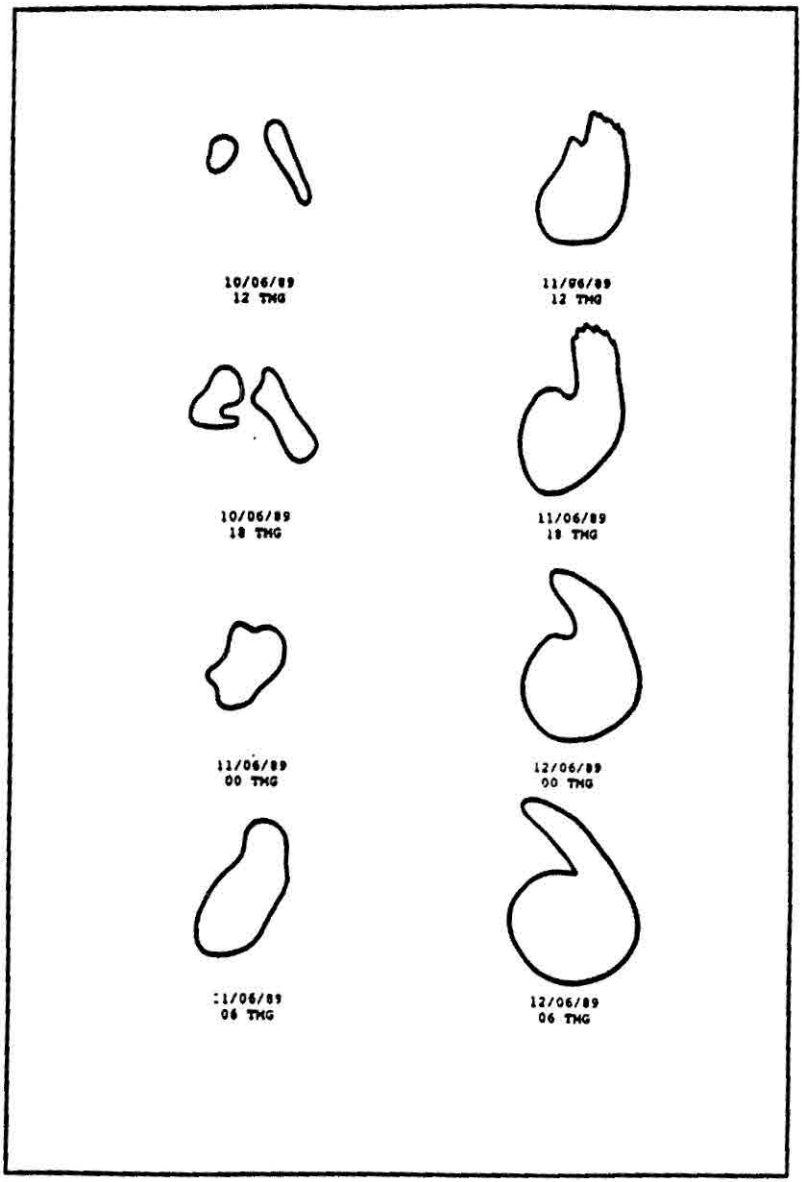


Figura 2 - Diagrama esquemático da evolução da nuvem vírgula invertida, durante o período 10 a 12/06/89.

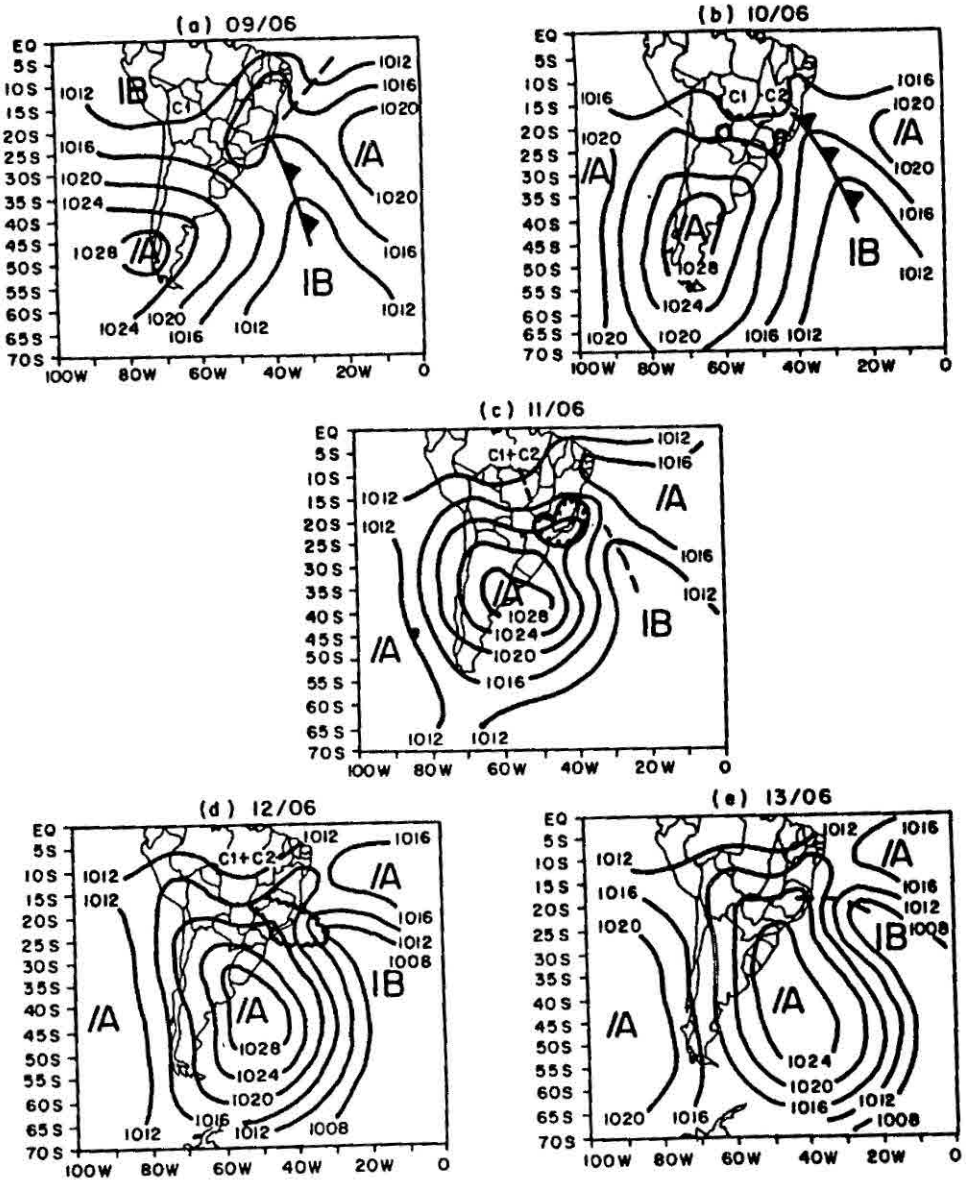
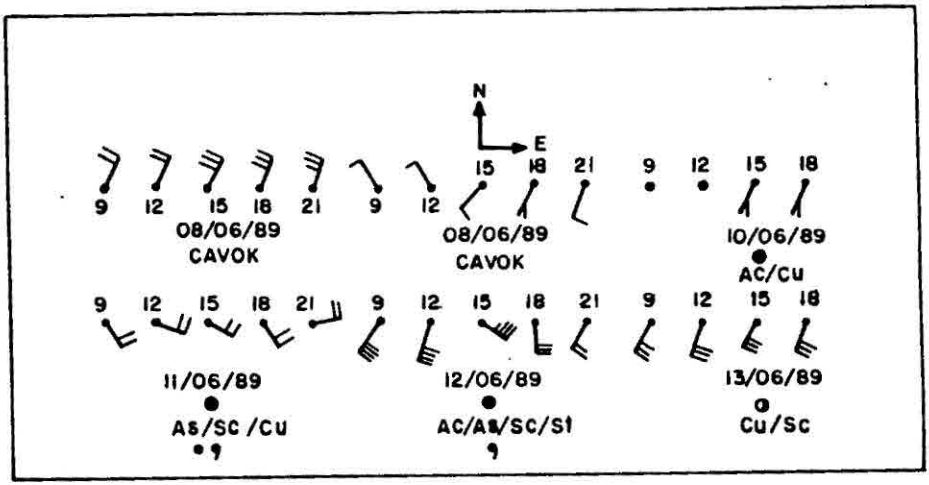


Figura 3 - Mapas de superfície - 12 TMG para (a) 09/06, (b) 10/06, (c) 11/06, (d) 12/06 e (e) 13/06. Linhas sólidas são isóbaras a cada 4 hPa. Linhas tracejadas são cavados, C1 e C2 indicam as posições dos cavados 1 e 2. Áreas em linha de vieira representam regiões onde havia nebulosidade, assim como observada nas cartas de superfície e imagens de satélite. Os demais símbolos são usados convencionalmente em meteorologia.



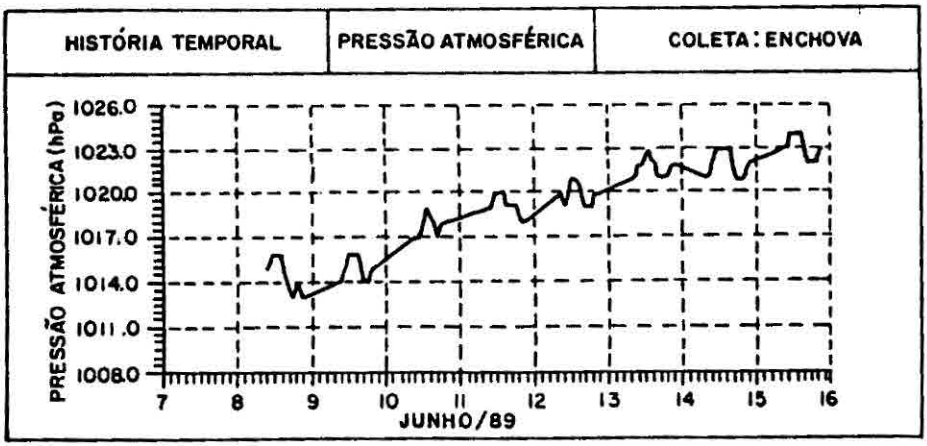


Figura 3 - continuação.

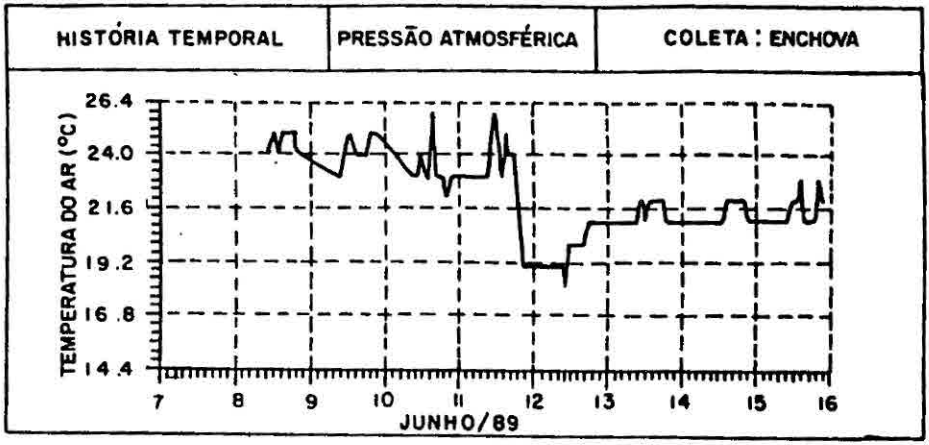


Figura 4 - Séries temporais de dados sinóticos coletados na estação Enchova (Bacia de Campos), operada pela TASA no período de 09-21 TMG. Horas em TMG a) ventos a cada 3 horas (barbela inteira representa vel=5m/s, meia barbela vel=2.5 m/s; nebulosidade predominante no dia, total (em oitavos) e tipos; tempo presente predominante no dia (chuva representada por ponto, chuvisco por vírgula e CAVOK significa ceiling and visibility OK, b) pressão atmosférica e c) temperatura do ar.

A análise da carta sinótica do dia 12/06 (fig. 3e) mostra que o anticiclone polar (com centro de 1026 hPa) permaneceu estacionário sobre o Oceano Atlântico. A nuvem vírgula invertida foi observada bem afastada do continente (imagem do NOAA-11 não mostrada). Nesta foto um rastro de nebulosidade se estendia desde o continente a aproximadamente 15° S até o centro do distúrbio. A maior parte das estações sob a influência do anticiclone polar apresentaram céu claro ou pouca nebulosidade tipo cumulus de bom tempo. As regiões por onde passou o rastro de nebulosidade deixado pela cauda da vírgula, que são as áreas do litoral baiano, apresentaram céu encoberto por nuvens cumulus congestus, stratocumulus, altocumulus e alguma chuva. Na estação Enchova ventos fortes (15 m/s) foram registrados até o final do dia.

As análises isobáricas nas proximidades da Bacia de Campos, apresentadas na fig. 3, foram bastante prejudicadas devido à ausência de dados na região oceânica. Além disso, no continente, a rede sinótica convencional não era suficientemente densa para detectar a presença deste sistema de escala subsinótica que se deslocou rapidamente.

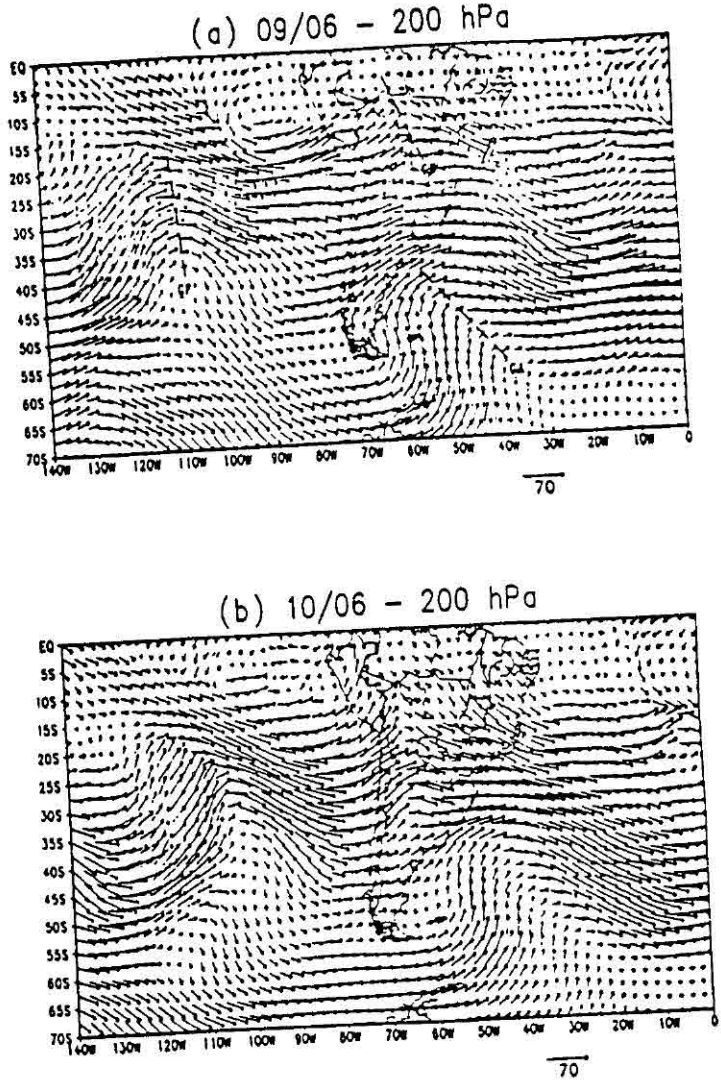
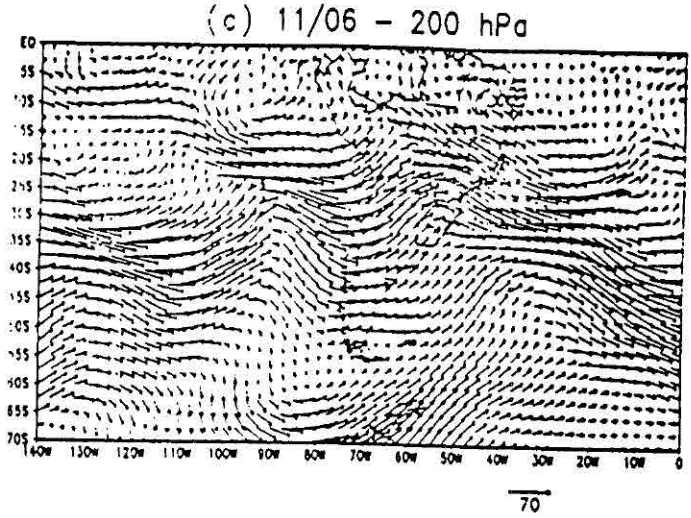


Figura 5 - Ventos (m/s) em 200 hPa - 12 TMG para (a) 09/06, (b) 10/06, (c) 11/06, e (d) 12/96. CA, CB e CP indicam as posições dos cavados do Atlântico, do Brasil e do Pacífico, respectivamente.



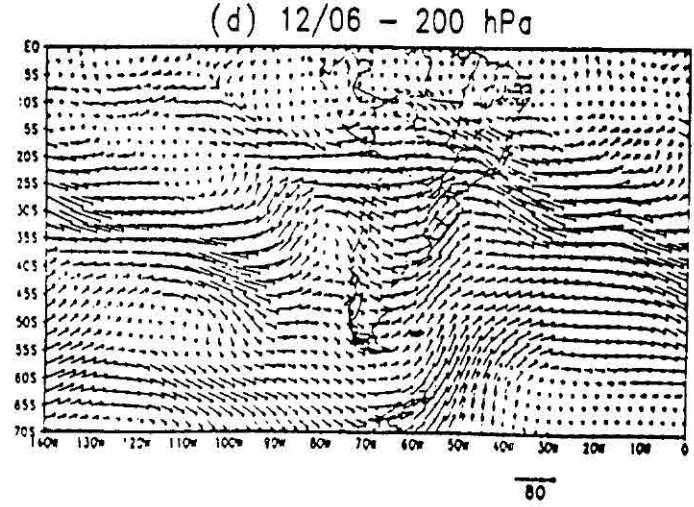


Figura 5 - continuação.

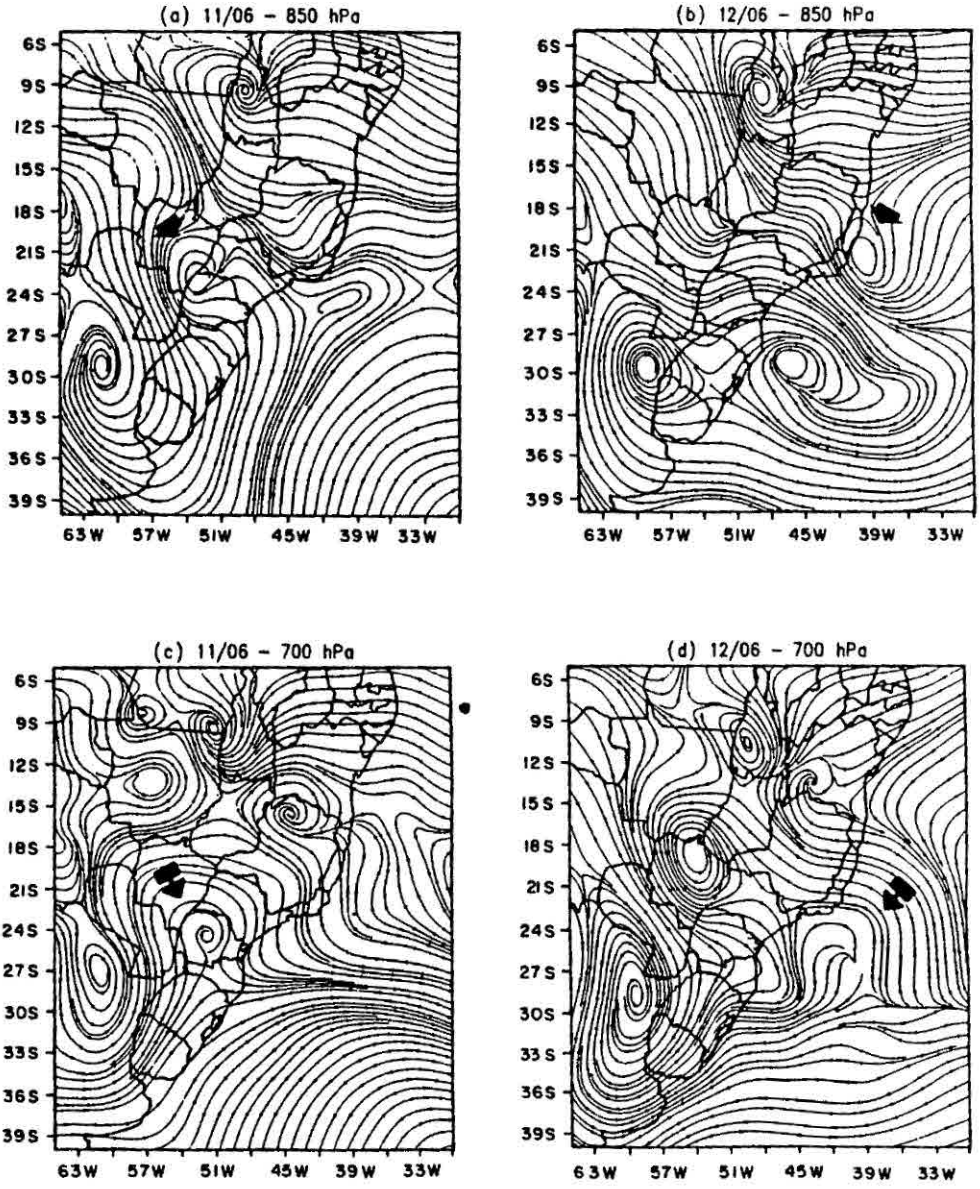


Figura 6 - Linhas de corrente - 12 TMG para (a) 11/06 - 850 hPa, (b) 12/06 - 850 hPa, (c) 11/06 - 700 hPa e (d) 12/06 - 700 hPa. Setas indicam posição do vórtice ciclônico.

Com o objetivo de se obter uma visão tridimensional da estrutura do vórtice foram analisados os campos de vento nos níveis superiores (200 hPa), mostrados na fig. 5; e linhas de corrente em níveis inferiores (850 e 700 hPa) na fig. 6.

As análises das linhas de corrente permitiram identificar a região de circulação ciclônica fechada (vórtice ciclônico) nos níveis inferiores. Na fig. 6a - d o vórtice em 850 hPa e vórtice e cavado em 700 hPa nos dias 11 e 12/06, respectivamente, estão indicados por setas.

Inicialmente, nos dias 09/06 o quadro em níveis superiores (200 hPa) indicava a existência de dois cavados de grande amplitude, um localizado sobre o Oceano Pacífico (CP) com eixo entre 15° e 40° S e 110° a 120° W e o outro estendendo-se sobre o Oceano Atlântico sudoeste (CA), desde o leste da Argentina, com eixo entre 40° e 65° S e 30° a 70° W. Um terceiro cavado na região de formação do distúrbio estendia-se do oeste da Amazônia até o sul do Brasil (CB). Este cavado amplificou-se e deslocou-se de oeste para leste com orientação NW/SE, mantendo-se inclinado em direção ao ar frio durante todo o período de estudo e em todos os níveis.

A sequência de cartas em 200 hPa sugere que a intensificação do CB foi precedida pela amplificação do CP. Este tipo de situação, que envolve a intensificação de sistemas corrente abaixo da amplificação de uma crista devido a propagação de energia das ondas, tem sido demonstrada por diversos pesquisadores (Rossby, 1945; Namias e Clapp, 1949 e Fortune e Kousky, 1983).

Os níveis médios (não mostrado), parcialmente refletiam a situação de ar superior e não revelavam a presença do vórtice ciclônico. Contudo, uma característica marcante observada tanto em 500 hPa como nos demais níveis inferiores foi o forte fluxo de sul e sudoeste devido a bifurcação do escoamento no Oceano Pacífico. Este tipo de circulação favorece a penetração de ar frio de latitudes subantártica para o continente sul-americano.

A evolução do campo do vento nos níveis inferiores (850 hPa) mostrou o deslocamento do vórtice associado ao CB. Inicialmente, no dia 09/06 nível de 850 hPa, a perturbação surgiu como um pequeno cavado também inclinado na direção NW/SE sobre o Paraguai, atingiu Santa Catarina no dia 10/06 e apareceu como um vórtice ciclônico sobre a região sudeste do Brasil, a aproximadamente 23° S e 53° W no

dia 11/06 (ver fig. 6a) e em aproximadamente 21.5° S e 40° W no dia 12/06 (ver fig. 6b), dissipando-se nos dias subsequentes. Em 700 hPa também foi observado o pequeno cavado no dia 09/06, inclinando-se desde o Paraguai até o Rio Grande do Sul no dia 10/06, fechando-se em um vórtice em aproximadamente 24.5° S e 52° W no dia 11/06 (ver fig. 6c) e apresentando-se outra vez como um cavado em aproximadamente 24° S e 42° W no dia 12/06 (ver fig. 6d). Essas análises mostraram que o vórtice em níveis inferiores estava posicionado abaixo do CB em altitude.

A fig. 7 apresenta o campo de advecção térmica nos níveis inferiores (700 hPa) para o período 09 a 12/06. No dia 09/06 observou-se a língua de advecção fria inclinada para oeste, penetrando pelo Rio Grande do Sul e Argentina, com centro no Oceano Atlântico. Próximo à região de formação da nuvem vírgula invertida (Paraguai), existia um certo gradiente de advecção térmica. Nos níveis inferiores e médios a análise do campo de advecção térmica mostrou o deslocamento de uma língua de advecção fria sobre a região em estudo. Esta estrutura foi mais intensa próximo à superfície e apresentou-se pronunciada no dia 10/06.

Nos dias 10 e 11/06 a língua de advecção fria continuou seu deslocamento em direção ao Oceano Atlântico, bifurcando-se sobre o sul do Brasil, com um dos ramos sobre o nordeste da Argentina e sul do Brasil e o outro um pouco mais ao norte. O primeiro atingiu intensidade máxima no dia 10/06, desintensificando-se a partir do dia 11/06. As análises para o dia 11/06 mostram que com a desintensificação da advecção fria que acompanhava o cavado do Atlântico, a região da nuvem vírgula invertida passou a ser afetada por advecção quente, o que contribuiu para a ciclogênese.

Observou-se nos dias 12 e 13/06 que o ramo de advecção fria localizado anteriormente mais à norte deslocou-se para leste, em direção ao Atlântico, afastando-se bastante do continente. O outro se desintensificou dando lugar à fraca advecção fria, praticamente nula, sobre o continente e advecção quente sobre a nuvem vírgula invertida.

Em síntese, precedendo a formação do distúrbio havia advecção fria que se bifurcou e posteriormente (dia11/06) deu lugar a advecção quente sobre o vórtice, favorecendo a ciclogênese na região.

Como esperado, os níveis inferiores foram os que apresentaram maiores valores de divergência do fluxo de vapor d'água. As análises foram elaboradas para o nível de 1000 hPa. No dia 09/06 existia uma região razoavelmente extensa de convergência do fluxo de vapor d'água associada com a frente fria. Essa faixa se deslocou para o Oceano Atlântico no dia 10/06.

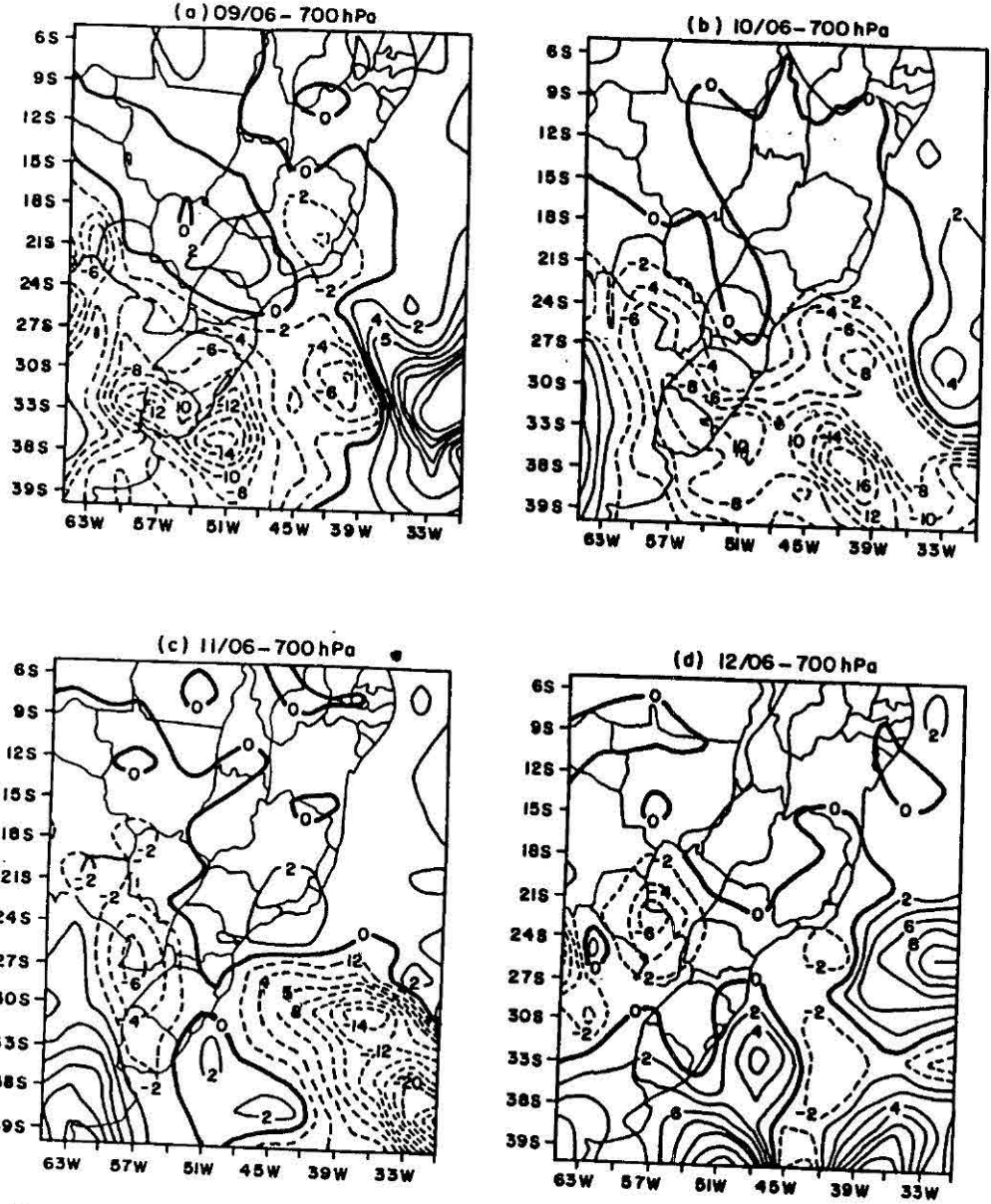


Figura 7 - Advecção térmica (contornos a cada 2° C/dia) ao nível de 700 hPa - 12 TMG para (a) 09/06, (b) 10/06, (c) 11/06 e (d) 12/06.

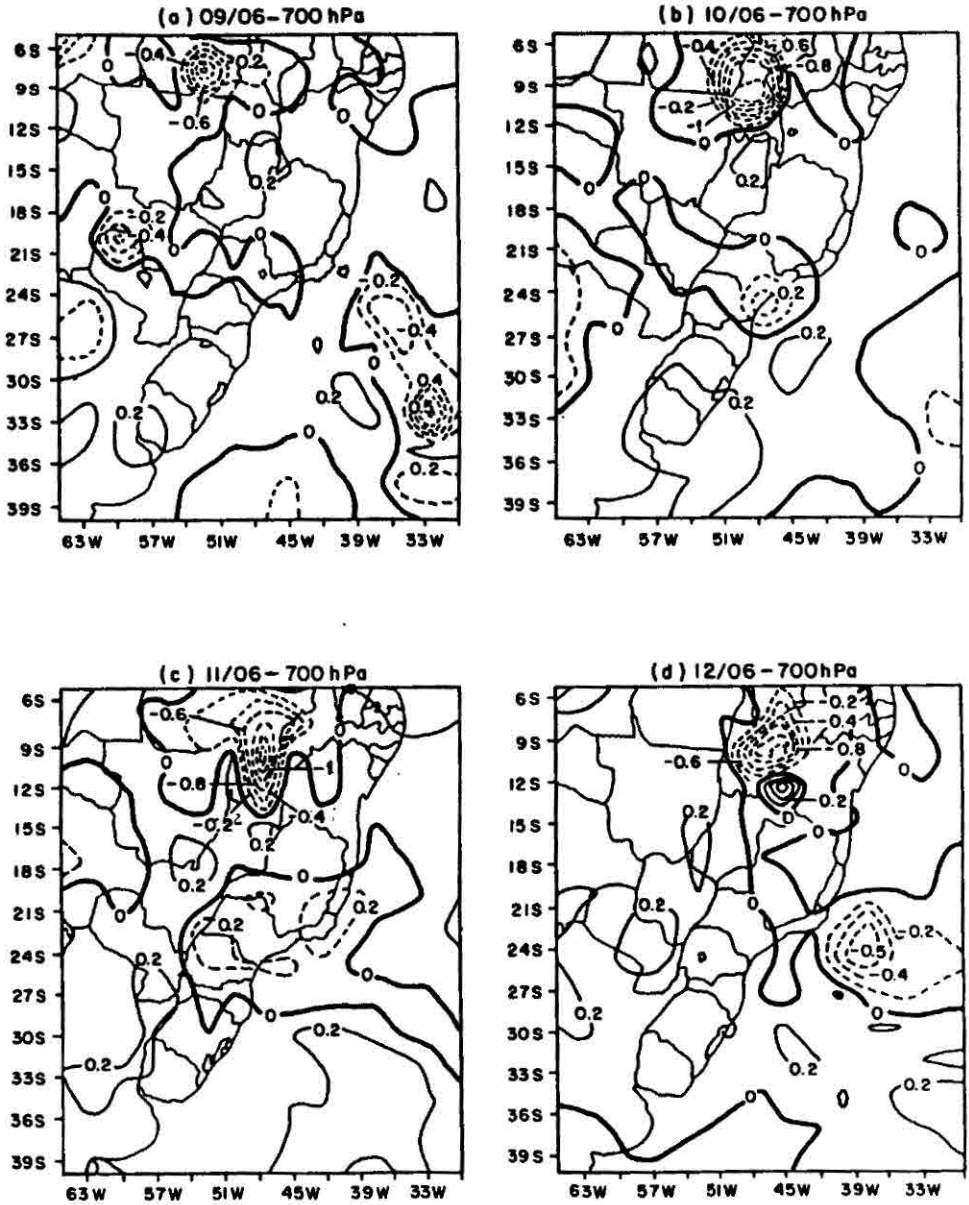


Figura 8 - Movimento vertical (contornos a cada 0.2 Pa/s) ao nível de 700 hPa - 12 TMG para (a) 09/06, (b) 10/06, (c) 11/06 e (d) 12/06.

No dia 11/06 formou-se um núcleo de convergência do fluxo de vapor d'água associado à nuvem vírgula invertida, englobando as regiões do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais. O escoamento em 1000 hPa, proveniente de regiões localizadas no Oceano Atlântico, ao sul e leste do distúrbio, convergia para a região sudeste do Brasil. Ao mesmo tempo uma língua úmida (razão de mistura de 16 $g.kg^{-1}$), proveniente de regiões próximas à Tocantins, penetrou na nuvem vírgula invertida onde surgiu um núcleo extremante elevado de umidade. O deslocamento de tal célula para leste, avançado sobre o Oceano Atlântico permaneceu até o final do período.

Durante o período observou-se a presença de dois núcleos de movimento vertical ascendente um sobre o Paraguai, que estava diretamente associado com a nuvem vírgula invertida e outro com a frente fria. No dia 09/06 (ver fig. 8), esses dois núcleos se estendiam desde 850 até 200 hPa, sendo mais intensos em 850 hPa com valores de -0.2 $Pa.s^{-1}$ e menos intensos em 200 hPa com -0.1 $Pa.s^{-1}$. No dia seguinte (10/06), surgiu um núcleo de movimento ascendente em 700 hPa, sobre a latitude 25° S, ao longo da costa. No dia 11/06 este núcleo se espalhou entre as latitudes 17.5° e 25° S, também ao longo da costa, desde 1000 até 200 hPa, sendo mais intenso entre 850 e 500 hPa. A carta do dia 12/06 apresentou os mais altos valores (em módulo) de ω durante o período, que assim como a convergência de vapor d'água foram extremamente altos (-0.6 $Pa.s^{-1}$ em 700 hPa). No dia 13/06 o núcleo apareceu deslocado para leste, avançado sobre o Oceano Atlântico.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam que a ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos no período 09 a 13/06/89 foi precedida pela formação de um sistema de nuvens do tipo nuvem vírgula invertida na região do Paraguai. Esse sistema que se formou na retaguarda de uma frente fria, foi fortemente influenciado pela advecção fria proveniente de latitudes subantárticas. Embora o distúrbio tenha se formado nos níveis troposféricos inferiores, existia suporte dinâmico nos altos níveis.

A estrutura do campo de vento na troposfera inferior possibilitou forte advecção fria inicialmente, porém no decorrer do período a região do distúrbio foi afetada por forte advecção quente, com máximo sobre o vórtice ciclônico. A convergência de umidade em níveis inferiores, assim como a convergência de massa, foram bastante intensas, principalmente no dia 11/06/1989. O influxo de grandes quantidades de vapor d'água, necessário para

produzir os altos índices pluviométricos registrados, ocorreu devido a convergência do fluxo proveniente das regiões oceânicas, ao sul e a leste do distúrbio, com a língua úmida proveniente da região de Tocantins. Com relação ao movimento vertical, altos valores foram detectados em níveis inferiores nos dias 11 e 12/06.

Retornando à pergunta inicial: "Qual o mecanismo responsável pela formação da nuvem vírgula invertida e em que níveis ocorreram os processos físicos mais importantes para o desenvolvimento do fenômeno", pode-se dizer que: 1) Associado ao vórtice ocorreu forte subsidência nos níveis troposféricos superiores, estabelecendo-se uma circulação térmica direta, com subida de ar quente a leste e descida de ar frio a oeste do sistema, típico da instabilidade baroclínica. Além disso, outro fator importante foi o acoplamento entre o vórtice ciclônico dos níveis inferiores e a forte convergência do fluxo de vapor d'água proveniente do Oceano Atlântico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao revisor anônimo pelas valiosas sugestões, ao Dr. Rene A. Medrano Balboa pelo apoio e a Márcia Maria dos Santos pela organização do trabalho. Este trabalho faz parte da dissertação de mestrado do primeiro autor no Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, defendida em fevereiro de 1995.

REFERÊNCIAS

Bonatti, J.P. and V.B. Rao, Moist baroclinic instability of North Pacific and South American intermediate-scale disturbances, *J. Atmos. Sci., 44*, 2657-2667, 1987.

Browning, J.A. e T.W. Harrold, Air motion and precipitation growth in a wave depression, *Quart. J.R. Met. Soc., 95*, 288-309, 1969.

Businger, S., Cyclonic vortices in polar air masses, *Ph.D. Thesis*, University of Washington, 1986.

Businger, S., The synoptic climatology of polar low outbreaks over the Gulf of Alaska and Bering Sea, *Tellus, 39*, 307-325, 1987.

Businger, S. and R.J. Reed, Cyclogenesis in cold air masses, *Weather and Forecasting, 4*, 133-156, 1989.

Dall'Antonia Jr., A.M., Vórtice de ar frio na América do Sul - Análise diagnóstica. *Dissertação de mestrado*, IAG/USP, 116 pp, 1991.

Fortune, M.A. e Kousky, V.E., Two severe freezes in Brazil: Precursors and synoptic evolution, *Mon. Wea. Rev., 111*, 181-196, 1983.

Green, J.S.A., F.H. Ludlam e J..F.R. McIlveen, Isentropic relative-flow analysis and the parcel theory, *Quart. J.R. Met. Soc., 92*, 210-219, 1966.

Harrold, T.W. e K.A. Browning, The polar low as a baroclinic disturbance, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 95*, 710-723, 1969.

Locatelli, J.D., P.V. Hobbs e J.A. Wirth, Mesoscale structures of vortices in polar air streams, *Mon. Wea. Rev., 110*, 1417-1433, 1982.

Mansfield, D.A., Polar lows: The development of baroclinic disturbances in cold air outbreaks, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 100*, 541-554, 1974.

Mullen, S.L., An investigation of small synoptic-scale cyclones in polar air stream, *Mon. Wea. Rev., 107*, 1636-1647, 1979.

Namias, J. e P.F. Clapp, Confluence theory of the high tropospheric jet stream, *J. Meteor., 6,* 330-336, 1949.

Okland, H., On the intensification of small-scale cyclones formed in very cold air masses heated over the ocean, *Inst. Rep. Ser. No. 26*, Institut for Geofysikk, Universitet i Oslo, 25 pp, 1977.

Rasmussen, E., The polar low as a CISK-phenomeno, Rep. No. 6, Inst. Teoret. Meteor., Kobenhavns Universitet, Copenhagen, 77 pp, 1977.

Rasmussen, E., An investigation of a polar low with a spiral cloud structure, *J. Atmos. Sci., 38*, 1785-1792, 1981.

Reed, R.J., Cylcogenesis in polar air streams, *Mon. Wea. Rev., 107*, 38-107, 1979.

Reed, R.J. e W. Blier, A case study of comma cloud development in the Eastern Pacific, *Mon. Wea. Rev., 114*, 1681-1695, 1986.

Rossby, C.G., On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves, *Journal of Meteorology, (2)*: 187-204, 1945.