

DUAS GEADAS CRÍTICAS NO BRASIL: PRECURSORES NO OCEANO
PACÍFICO E EVOLUÇÃO NA AMÉRICA DO SUL

MICHAEL A. FORTUNE
VERNON E. KOUSKY
NELSON J. FERREIRA

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPq
12.200 - São José dos Campos - SP

RESUMO

Duas geadas com grande repercussão nos mercados mundiais de café ocorreram no Brasil em 1979 e em 1981. Foram analisados dados de satélite e bóias à deriva, para detectar evidências de futura ocorrência dessas duas geadas. Dois importantes precursores foram descobertos: (a) Uma configuração de ondas longas, deslocando-se lentamente no Pacífico, amplificou-se entre quatro e cinco dias antes das geadas no Brasil. (b) A crista da onda longa, quando estava com sua maior amplitude, situava-se perto dos Andes; e o próximo cavado estava localizado na longitude do Brasil no Oceano Atlântico Sul. Esta configuração canalizou o ar frio subantártico para latitudes subtropicais, em uma trajetória totalmente sobre o continente. A primeira evidência de amplificação de ondas foi a frontogênese no centro do Pacífico. Em 1979, a frontogênese subsequente na Argentina foi acelerada pela aproximação oportuna do cavado de uma onda curta, um dia antes de o cavado da onda longa no sul do Brasil, chegar à sua amplitude máxima. O ar polar empurrou vigorosamente a frente fria até o Equador. Enquanto o cavado da onda longa saía do Brasil, uma forte geada atingiu quatro estados, ao leste do anticiclone polar. Em 1981, as ondas longas no Pacífico amplificaram como em 1979, mas a parte norte do cavado no Atlântico desprende-se do resto da onda longa. Enquanto o vórtice desprendido (com núcleo frio) passava pelo sul do Brasil três dias mais tarde, uma geada intensa abateu uma extensa área ao norte do Trópico de Capricórnio, onde geadas são raras. Em ambos os casos, registraram-se prejuízos somente nas áreas sob céu limpo. A intensificação das ondas longas, no caso de 1979, propagou-se com a velocidade de grupo dada pela teoria de Rossby. A energia de perturbação, propagando-se com esta velocidade, foi importante no desenvolvimento de frentes e na intensidade do frio no Brasil. A detecção por meio de satélites de uma perturbação tão grande de ondas longas no Pacífico possibilita uma previsão de geadas no Brasil com 4 ou 5 dias de antecedência.

1 - INTRODUÇÃO

Ocasionalmente, as regiões agrícolas do sul do Brasil são afetadas por geadas que destroem parte da colheita de trigo, cana de açúcar e café. Esses eventos geralmente ocorrem a partir da segunda quinzena de junho até o final de julho, o período mais frio do ano (Rummey, 1968, p. 290). Obviamente é de grande interesse econômico a detecção de evidências que possam fornecer antecipadamente informações sobre a ocorrência de geadas severas.

Devido ao efeito que as geadas no Brasil têm nos preços do café no mercado mundial, vários estudos focalizaram as condições sinóticas antes e durante tais eventos. Parmenter (1975) analisou a geada de 1975, talvez a mais severa do século, usando imagens transmitidas por satélite meteorológico, enquanto Tarifa et alii (1977) discutiu as razões para a distribuição dos danos naquele ano.

Hamilton e Tarifa (1978) analisaram as condições sinóticas associadas à geada severa de julho de 1972. Eles enfatizaram o papel do centro frio de um anticiclone nos baixos níveis, que seguiu uma trajetória continental do sul da Argentina até o trópico de Capricórnio. A ciclogênese ocorreu no setor nordeste do anticiclone no sul do Brasil; subsequentemente o ciclone moveu-se para sudeste sobre o Atlântico. A área em que ocorreram os danos localizou-se a leste do centro de alta pressão. Um estudo feito pelo Instituto Brasileiro do Café (1975) mostrou que em cinco geadas, durante 1957-1975, as características sinóticas eram semelhantes.

A análise feita por Hamilton e Tarifa foi limitada ao continente da América do Sul, onde havia poucas observações a oeste de 60° W e a norte de 20° S, e nenhuma informação acima de 400 mb.

Apresenta-se neste trabalho uma análise mais extensa das condições sinóticas antes e no decorrer das duas mais recentes geadas no Brasil, que tiveram repercussão no mercado mundial de café.

2 - BASE DOS DADOS E ANÁLISES

Desde 1975 a geada mais severa do Brasil ocorreu oportunamente durante o período especial de observação do Experimento Global do Tempo (FGGE¹) em 1979. Nessa ocasião coletou-se no Hemisfério Sul uma quantidade de informações meteorológicas sem precedentes. Foram colocadas nos oceanos Pacífico e Atlântico Sul 50 bóias à deriva dentro da área analisada. As informações colhidas pelas bóias (Garrett, 1980; Gummier and Le Marshall, 1980) permitiram a reconstrução do campo de pressão ao nível do mar, o qual serviu de nível de referência na construção dos campos de espessura e altura nos níveis superiores. Foi necessário consultar a procedência dos dados e fazer um controle de qualidade do monitoramento das bóias (World Meteorological Organization, 1980) para eliminar os dados daquelas que estavam consistentemente erradas.

As sondagens de temperatura foram obtidas pelo satélite TIROS-N, que fornece em média uma sondagem por dia em uma dada região. Usaram-se imagens no infravermelho do satélite SMS-Leste, processadas a cada 90 minutos pela estação de recepção do INPE, São José dos Campos, SP, exceto durante quatro períodos (que totalizaram 35 horas num período de 7 dias de análises), quando o satélite estava no modo de varredura rápida e, portanto, não monitorava o Hemisfério Sul. Os vetores vento obtidos a partir do movimento de nuvens foram produzidos pelo National Earth Satellite Service, EUA, para os níveis de cirrus e de cumulus. Consultou-se também um filme de 16 mm com imagens em animação correspondentes aos períodos especiais de observação do "FGGE", produzido pelo U.S. GARP Office².

Os dados convencionais coletados da América do Sul estavam melhor do que o normal durante o Experimento Global do Tempo; em média 25 estações de radiossondagem transmitiram uma vez por dia às 12:00 T.M.G. As alturas e temperaturas reportadas foram recalculadas a partir dos dados dos níveis significativos. Usaram-se também as observações da superfície de uma densa rede de estações na América do Sul e cerca de seis ilhas. Foi consultada a análise tropical em pontos de grade feita rotineiramente pelo Centro Meteorológico Nacional dos Estados Unidos³. Essa análise consiste em valores do vento e temperatura em todas as superfícies isobáricas padrões, em pontos de grade espaçados de 50. A consistência e continuidade das análises do NMC implementaram significativamente as análises nas áreas oceânicas, onde os dados geralmente são esparsos, mas apresentaram três desvantagens. A análise não se estendeu ao sul de 48° S, não foi duplamente corrigida por um analista em termos de consistência com imagens de satélites e as observações de bóias à deriva não foram incluídas por chegarem atrasadas. Para estender a análise mais ao sul (e tornar os dados do NMC de consistente com as imagens de satélite em duas das quatorze análises), foram consultadas fotos de satélite a fim de aplicar um procedimento de análise em uso operacional no Bureau Australiano de Meteorologia. Kelly (1978) e Gyummer (1978) descreveram os detalhes desse procedimento, enquanto Trenberth (1979) e Streten (1980) consideram os produtos australianos apropriados para estudos diagnósticos.

¹"FGGE" é a sigla de "First Garp Global Experiment", e "GARP", de "Global Atmospheric Research Program".

²"The Global Weather Experiment Special Observing Period II-GOES-West/Goes East Infrared Images": Filme de 16 mm do U.S. Global Atmospheric Research Program, National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA, Rockville, Maryland, USA.

As análises de superfície foram preparadas a cada 12 horas (em intervalos de 6 horas para os dias críticos: 28, 29 e 30 de maio de 1979). O campo de espessura para a camada 1000-500 mb, foi somado graficamente com o campo de geopotencial de 1000mb para produzir o da superfície de 500 mb. O campo de temperatura em 700 mb foi obtido principalmente a partir das sondagens do TIROS-N. Os dados do NMC foram usados para preparar cartas de linhas de escoamento e vortacidade em 250 mb; a trajetória e a intensidade dos centros de vortacidade neste nível também foram mapeadas.

Para o caso de 1981 o procedimento foi similar, mas a análise do NMC não continha dados de temperatura não havia imagens de satélites ao sul de 42° S (devido a problemas com o satélite SMS-2), e o número de observações de superfície nas áreas oceânicas era bem menor. As análises à superfície foram feitas somente para a região continental da América do Sul e para o Oceano Atlântico.

Em ambos os casos, as imagens no infravermelho das regiões afetadas pela geada foram realçadas para destacar com precisão de 1° C as temperaturas na vizinhança de 0° C. A distribuição da temperatura assim obtida foi comparada com as observações da rede de estações agrometeorológicas em três estados do Brasil.

3 -A GEADA DE MAIO DE 1979: CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS

Nas manhãs de 31 de maio e 1° de junho de 1979 quatro estados do Brasil experimentaram temperaturas abaixo de 0°C. Esta geada, a mais severa desde 1975, ocorreu antes do período em que normalmente ocorre, o qual se estende da 2ª quinzena de junho até o final de julho. A análise da situação sinótica que levou a esse evento pode ser convenientemente dividida em 3 fases: a *fase de alerta preliminar*, definida como os dias 26 e 27 de maio que precederam a formação de frentes na América do Sul (nesta fase concentrou-se mais atenção às condições no Oceano Pacífico, a oeste do Chile, até 140° W); a *fase de frontogênese*, que inclui a formação de uma frente fria na Argentina e seu subsequente avanço para o Brasil nos dias 28 e 29 de maio; e finalmente a *fase da invasão de ar frio*, na qual focalizam-se as áreas onde temperaturas de congelamento ocorreram no sul do Brasil.

³ "NMC Tropical Grid Analyses" estão disponíveis em fitas magnéticas no National Center for Atmospheric Research-NCAR, Boulder, Colorado USA., ou no National Climatic Center, Asheville, North Carolina, USA.

3.1 - ALERTA PRELIMINAR

De 21 a 27 de maio de 1979 dois cavados de ondas longas estavam presentes nas longitudes de 50° W (no Atlântico) e 120° W (no Pacífico Central). Em associação com valores baixos de espessura ao longo de 50° W, ocorreram no sul do Brasil temperaturas próximas a do ponto de congelamento nos dias 24 e 25 de maio.

A primeira evidência de que o cavado existente no Oceano Pacífico estava começando a se aprofundar foi o seu alargamento e prolongamento para sudeste da massa de cirrus "A" (Figura 1) entre as longitudes 100°-125° W. Em torno das 00:00 TMG do dia 27 de maio era evidente que A estava se expandindo muito rapidamente de modo não comum para um sistema extratropical. Nesse dia, o escudo de cirrus assumiu uma configuração do tipo S invertido evidenciando o desenvolvimento de uma frente na zona baroclínica, corrente abaixo do cavado T em 120° W e corrente acima da crista R em 95° W (As posições dos vários cavados e cristas, determinadas nas análises de 500 mb das figuras 2 e 5, estão marcadas por pares de setas identificados por "T" e "R" nas fotos de satélites).

No primeiro dia (26 de maio) do período de análise, o escoamento em 500 mb era de poste-noroeste sobre o Pacífico leste, com uma crista sobre o Chile (Figura 2 a). A única evidência de desenvolvimento em A (Figura 1), ao nível do mar, foi um fraco cavado de pressão, no lado superior esquerdo da Figura 2 b.

Um ciclone formou-se em 33° S, 115° W, no dia 27 de maio, e o anticiclone próximo da costa do Chile começou a alongar-se na direção polar (Figura 2d). Essas características estavam associadas com o desenvolvimento de um cavado e de uma crista (Figura 2c). Um cavado de onda curta, marcado com "V" na Figura 1 e localizado em 75° W na Figura 2c, penetrou no sul do Chile e deslocou-se para o Brasil. A trajetória da onda curta "V" está plotada na Figura 3. A medida que ela se moveu para as latitudes mais baixas, passando da curta para o cavado da onda longa, a vorticidade relativa decresceu, isto é, a circulação tornou-se mais ciclônica, conforme esperado pelo "princípio de conservação de vorticidade absoluta".

3.2 - FRONTOGÊNESE

No dia 28 de maio a onda continuou amplificando-se e, por volta das 12:00 TMG, o escudo de cirrus e o associado estendeu-se de 15° S a 65° S de latitude, numa distinta forma de S invertido (Figura 4). Nesse horário o cavado atingiu a máxima intensidade. O centro de alta pressão à superfície desenvolveu-se numa grande célula orientada paralela à costa do Chile, a leste da crista em intensificação no nível de 500 mb (Figura 5 a,b).

Mais a leste, o cavado V, agora na Argentina, estava unindo-se a um cavado de onda longa no Atlântico (ver linha tracejada em 70° W, 30° S na Figura 5 a). Com a aproximação do cavado V, formou-se uma frente em superfície no norte da Argentina (Figura 5b).

Às 12:00 TMG do dia 28 de maio o sistema frontal ainda não tinha provocado nenhuma precipitação, e a única evidência dele nas imagens de satélite era a camada de nuvens médias e altas (em E na figura 4), que se assemelha à *folha baroclínica*: configuração de nuvens associada com frontogênese nos níveis superiores (Weldon, 1979, pp. 62-79).

Outras características da frontogênese do dia 28 de maio estão representadas na análise de múltiplos níveis na Figura 6a. A compactação de isotermas no nível de 700 mb (linhas tracejadas) indicam uma zona altamente baroclínica na área de frontogênese. Uma "língua" de ventos máximos em 250 mb (acima de 100 knots, *sombreada*) sobre o Chile estava propícia para advectar vorticidade ciclônica do eixo do cavado para a região acima da zona baroclínica; não somente neste dia como também nos dois dias seguintes.

No Pacífico a crista atingiu a máxima intensidade no dia 29 de maio (Figura 5 c). Os valores de espessura no sul do Chile na latitude de 55° S eram tão altas quanto os valores típicos para a latitude de 30° S. Uma configuração persistente do escoamento em 500 mb estabeleceu-se: a corrente de jato contornou a crista no extremo sul do Chile, continuou para o norte sobre o continente cerca de 2500 km, seguiu o lado leste da Cordilheira dos Andes, curvando-se então em torno do cavado e penetrando no Brasil pelo noroeste. Essa configuração manteve-se por 3 dias. Em superfície (Figura 5 d), o anticiclone que estava no Pacífico cruzou o sul dos Andes. O gradiente de pressão entre o anticiclone e os ciclones velho e novo ao longo de 50° W aumentou consideravelmente em 24 horas, tal que fortes ventos advectaram ar frio para o norte. No Brasil (Figura 6 b) a frente fria foi submetida a um desenvolvimento rápido. Imagens de satélite em intervalos de 6 horas (Figura 7) ilustram o quão rápido o sistema de nuvens frontais expandiu e avançou para nordeste. Associados com a frontogênese, originaram-se diversas linhas de trovoadas na frente e atrás do sistema frontal das 00:00 TMG às 18:00 TMG. A sudoeste formou-se um domo de ar frio que avançou para norte, conforme pode ser visto nas isotermas em 700 mb (Figura 6 b).

Durante as primeiras 36 horas de sua vida, a frente fria avançou para norte e leste, numa taxa de 700 km/dia (Figura 8). Depois das 00:00 TMG do dia 30 de maio, ela diminuiu consideravelmente sua velocidade. Entretanto uma análise temporal dos dados das estações localizadas a oeste da Bacia Amazônica demonstrou que essa frente chegou a 60 km do equador. O fato um tanto surpreendente de frentes frias poderem cruzar o equador em direção ao Hemisfério Norte foi documentado por Myers (1964), Kousky e Ferreira (1981) através de dados de superfície, e por Parmenter (1976) através de imagens de satélites. As trajetórias e intensidades dos correspondentes ciclones e anticiclones também estão plotados na Figura 8.

3.3 - INVASÃO DO AR FRIO

A configuração ondulatória que permitiu a advecção de ar frio para o norte, inteiramente sobre o continente, das latitudes subantárticas para as tropicais, persistiu por mais de dois dias. Durante esse período, o sul do Brasil foi atingido por ar muito frio. Na carta do dia 30 de maio (Figura 9a) o cavado sobre o Atlântico estava no seu estágio mais intenso. Os valores de espessura no cavado na latitude de 30° S eram típicos dos encontrados em maio em Cabo Horno (latitude 55° S). No nível de 250 mb, a vorticidade relativa caiu para um valor não comum para aquela latitude, ou seja, cerca de $-13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. A área hachurada na Argentina e Chile indica onde as temperaturas mínimas atingiram 0° C ou menos em 30 de maio. A ampla cobertura de nuvens baixas atrás da frente pode ter impedido a ocorrência de frio similar, mais a norte.

Temperaturas abaixo de zero ocorreram no Brasil em duas manhãs. No dia 31 de maio a área hachurada (Figura 9b), proveniente do norte da Argentina, estendeu-se para o sul do Brasil. O eixo do cavado em 500 mb passava então pela área cafeeira no Estado de São Paulo, e o anticiclone à superfície localizava-se na borda Brasil-Paraguai. O céu estava claro (ao sul de 20° S e a oeste de 45° W) e os ventos em superfície eram de sudoeste com 5 a 10 nós. As temperaturas mínimas (no abrigo meteorológico) em 20 estações nos estados do sul variavam de -20° C a +20° C, e a maioria estava abaixo de zero. Na manhã de 1 de junho, o anticiclone posicionou-se sobre o estado de São Paulo. Condições calmas possibilitaram alguns recordes da temperatura mínima abaixo de -20° C, mas foram registrados mais valores acima do que abaixo de 0° C. Imagens no infravermelho realçadas (não mostradas) demonstraram que a geada foi menos ampla e intensa em 1 de junho do que em 31 de maio.

4 - A GEADA DE JULHO DE 1981

Nos dias 20 e 21 de julho de 1981 o Brasil foi afetado por uma outra geada severa, desta vez numa extensa região ao norte do Trópico de Capricórnio, onde as geadas são raras. Em certos aspectos, os estágios iniciais dessa geada assemelhavam-se à fase de alerta preliminar do caso de 1979. Entretanto durante os dois dias que precederam a geada de 1981, a configuração do escoamento em ar superior evoluiu de modo diferente da do caso de 1979.

Um cavado penetrou ao sul da América do Sul nos dias 14 e 15 de julho de 1981, quando temperaturas abaixo de 0° C foram observadas na vizinhança do eixo do cavado, área sombreada na Figura 10 a,b. Esse mesmo cavado ou parte dele permaneceu nas longitudes da América do Sul durante uma semana. Uma onda curta foi observada em 16 de julho, com um cavado em 125° W e uma crista em 105° W (Figura 10 c), entre os quais era evidente nas imagens de satélite (não mostradas) uma banda de nuvens frontais. No dia

seguinte (Figura 10 d), a crista em 80°W ampliou-se consideravelmente e a zona frontal a oeste dela estendeu-se para sudoeste. Corrente abaixo, o escoamento de sul estabeleceu-se em 500mb., ao longo da Argentina. Nos dias 16 e 17 de julho o escoamento de sul guiou o anticiclone em superfície para norte, fazendo com que a frente fria se deslocasse rapidamente para o extremo oeste do Brasil. O ar polar deslocou-se para latitudes tropicais por mais 3 dias (Figura 10 e,f) conseqüentemente em torno das 18:00 TMG do dia 19 de julho a frente fria cruzou o Equador.

Temperaturas na vizinhança de 0° C confinaram-se nas regiões continentais a oeste de 55° W, distante das áreas agrícolas economicamente importantes. A frente permaneceu inativa e com ar não muito frio em sua retaguarda, na região leste do Brasil. No dia 18 de maio o escoamento começou a meandrar em torno do sistema crista-cavado (Fig 10e) cujo eixo passou a ter orientação quase leste-oeste. O centro de vortacidade ciclônica (X nas Figuras 10 e, f), propagando-se perpendicularmente ao eixo do cavado, deslocou-se para o sul do Brasil. Talvez em resposta a essa trajetória a circulação no cavado tenha se intensificado até cerca das 18:00 TMG do dia 19 de julho, quando se formou um vórtice fechado que se desprende do resto do cavado. Uma imagem de satélite no espectro visível, para aquele horário (Figura 11) forneceu a primeira evidência observacional da existência do vórtice, o qual apresentava em "Q" forma de espiral. Durante os três dias posteriores, a medida que o ciclone se deslocava para nordeste e a seguir para sudeste, a nebulosidade em sua vanguarda, especialmente na zona frontal velha, desenvolvia-se em convecção profunda (topos mais frios) e organizava-se em espiral, conforme pode ser visto nas imagens no infravermelho (Figura 12). No dia 19 de julho a medida que a língua de ar seco girava pelos lados oeste, norte e nordeste do vórtice, o céu claro possibilitava grande perda radiativa durante o período noturno. De fato, em 20 de julho a área com temperaturas abaixo do ponto de congelamento proveniente de noroeste, estendeu-se para o Brasil (Figura 10 g). Ao contrário do que supunha, essas temperaturas baixas ocorreram no lado equatorial do vórtice.

De acordo com as análises em 500 mb, o ciclone atingiu sua intensidade máxima, quando deixou o continente às 00:00 TMG de 21 de junho. Imediatamente à retaguarda do centro, as regiões cafeeiras do Brasil, estavam sob céu limpo e nas vizinhanças do anticiclone em superfície (Figura 10 h). Temperaturas próximas de 0° C foram observadas numa ampla área entre 0300 HL e 0700 HL (06:00 TMG e 10:00 TMG) no dia 21 de julho de 1981.

A extensão da área onde a temperatura em superfície atingiu 0° C ou menos, foi documentada com imagens no infravermelho, realizadas, a cada hora. Um exemplo disso é mostrado para às 0600 HL na Figura 13. A área com tonalidade escura, circundada por cinza claro na parte superior da imagem representa superfície com temperatura radiométrica em 0° C ou menos. A área afetada estendeu-se 1200km de leste para oeste, e na direção norte chegou até 17° S. As áreas mais atingidas localizavam-se ao norte do Trópi

co de Capricórnio onde geada é considerada um evento raro. A cultura de café foi recentemente expandida nessas áreas, parcialmente em resposta às geadas de 1975 e 1979. Foram essas as áreas mais atingidas pela geada em 1981.

É instrutivo comparar as condições precedente às geadas de 1979 e 1981. Analogamente ao evento de 1979, a geada de 20-21 de julho de 1981 foi precedida por:

- a) Frontogênese no Oceano Pacífico, corrente abaixo de um cavado em amplificação em torno de 120° W e cerca de 4 a 5 dias antes da geada.
- b) Uma crista em amplificação que se estendeu para sudeste, no sul do Chile, 3 dias antes.
- c) Um período de dois dias ou mais, durante os quais as linhas de corrente nos altos níveis seguiram um longo caminho para o norte, sobre a Argentina.
- d) Formação ou intensificação de uma frente fria no norte da Argentina ou sul do Brasil, 1-2 dias antes.

A geada de 1981 diferiu da de 1979 em dois aspectos importantes: Primeiro, as sucessivas cristas e cavados atingiram a amplificação máxima cerca de 10° em longitude mais a oeste. O efeito foi introduzir ar mais frio inicialmente no oeste do Brasil em vez de no leste. Segundo, depois da amplificação a porção norte do cavado fechou-se sobre a Argentina, formando um ciclone com núcleo frio que seguiu uma trajetória diferente da parte sul. Associada com o ciclone fechado, a massa de ar frio deslocou-se para o Brasil mais lentamente do que em 1979. Do momento em que surgiu o anticiclone polar na Argentina até a noite em que ocorreram geadas severas no Brasil decorreram seis dias em 1981 e apenas dois em 1979.

5 - PROPAGAÇÃO DE ENERGIA DE ONDAS COMO UM FATOR CONTRIBUINTE A PERÍODOS ANOMALAMENTE FRIOS

Mostrou-se na seção 3 que a amplificação de uma configuração quase estacionária de ondas, com um comprimento de 60° a 70° de longitude e uma fase correta em relação à América do Sul, levou a uma invasão de ar frio no Brasil em 1979. Uma amplificação semelhante ocorreu em 1981, mas a relação de fase era menos favorável à entrada direta de ar frio no leste do Brasil. Contudo, depois de algum atraso, o ar polar eventualmente atingiu o Brasil, em associação com um ciclone fechado em ar superior. A amplificação da circulação sobre o Oceano Pacífico, antes da amplificação sobre a América do Sul, sugere uma propagação para leste da energia de ondas. Parry and Roe (1952) investigaram a propagação de energia de ondas que pode ter causado uma grande invasão de ar frio no leste dos Estados Unidos. A primeira amplificação observada ocorreu quando um cavado em 700 mb intensificou-se no leste da Sibéria. As cristas e cavados corrente abaixo amplificaram sucessivamente como se houvesse uma cascata, até que finalmente

uma crista sobre o oeste dos Estados Unidos e um cavado mais a leste provocaram a entrada de ar muito frio no leste dos Estados Unidos. O fator responsável foi atribuído à transferência de energia pelas ondas dispersivas, de acordo com Rossby (1945). Desde que a energia das ondas pode propagar-se mais rapidamente do que as suas fases individuais, os efeitos de uma grande perturbação puderam espalhar-se rapidamente corrente abaixo nos ventos de oeste.

Para ilustrar a propagação de energia e de fase de ondas, Hovmöller (1949) construiu diagramas nas quais o geopotencial foi plotado para uma certa latitude fixa, tendo longitude como abscissa e tempo como ordenada. De modo similar, plotaram-se valores de espessura para a camada 1000-500mb (Figura 14) correspondentes à semana em que ocorreu a geada em 1979. (Tanto o geopotencial como a espessura apresentaram configurações similares). Como salientado por Parry e Roe, os diagramas do Hovmöller para uma latitude específica não revelam tudo sobre o comportamento das cristas e cavados. Os ventos de oeste tendem a impulsionar as perturbações de ondas curtas ao longo das trajetórias ondulatórias terminadas pelas ondas longas (Figura 3). Como as ondas longas e curtas interferem-se construtivamente, qualquer que seja o local onde as fases similares superpõem-se, as maiores anomalias negativas de espessura são encontradas em latitudes baixas no eixo do cavado da onda longa, e as maiores anomalias positivas em latitudes altas no eixo da crista. Por essa razão escolheram-se duas latitudes (28°S e 48°S) para as análises em questão.

As características apresentadas na Figura 14 são as seguintes:

- a) Dois cavados frios que se movem lentamente estão situados ao longo de 120°W e 50°W , conforme indicado pelas zonas verticais claras e centros sombreados, que representam as anomalias mais frias dentro dos cavados. A área hachurada em diagonal ao longo de 80°W indica uma crista quente.
- b) Os centros com anomalias maiores, indicados pela posição das letras, A, B, C e D, são bem definidos em longitude e tempo. Os cavados A e B atingem intensidade máxima em 120°W e 55°W respectivamente, na latitude de 28°S (Figura 14 a). As cristas C e D atingem picos de intensidade em 80°W e 10°W , na latitude de 48°S (Figura 14b).
- c) Os centros das anomalias A, C, B e D caem aproximadamente numa linha reta quando se transferem as localizações de C e D da Figura 14 b para a Figura 14 a.

O notável alinhamento dos centros de anomalia A, C, B e D sugere que a energia estava propagando-se ao longo dessa linha, com uma velocidade de grupo C_g de 35 a 40 graus de longitude por dia, que corresponde à inclinação da linha. Isto é consideravelmente maior que a velocidade de fase obtida da Figura 14, que variou de 1 a 3 graus por dia até 29 de maio, e posteriormente de 6 a 9 graus por dia. Parece que a propagação para leste da ener

gia de ondas pode realmente contribuir para a amplificação de um cavado responsável pela introdução de ar anormalmente frio nas latitudes subtropicais, incluindo o Brasil.

6 - SUMÁRIO

Observações de ondas longas e de desenvolvimento frontal na região central do Oceano Pacífico Sul podem fornecer alertas preliminares sobre a ocorrência de geadas severas no Brasil. Em 1979, a amplificação de uma configuração de cavados e cristas entre 150° W e 90° W e sua clara manifestação numa banda de nuvens frontais, que se estendeu de modo anormal de latitudes baixas a altas, precederam um desenvolvimento similar de uma frente na América do Sul dois dias depois. As geadas ocorreram no Brasil cinco dias depois dos eventos no Pacífico. Em 1981, a amplificação de um cavado em 120° W, de uma crista em 80° W e de uma frente existente entre estes precedeu a formação de um ciclone desprendido na América do Sul por 3 dias e a ocorrência de geadas no Brasil por 4 a 5 dias. Igualmente importante em ambos os casos foi a relação da fase das ondas longas com respeito à posição geográfica da América do Sul, que favoreceu a entrada de ar frio no sul da Argentina, de onde este foi advectado para as latitudes subtropicais. A presença de uma crista no sul do Chile e de um cavado nas longitudes do Brasil, no momento em que ocorria a amplificação, favoreceu a canalização de ar frio para o norte em especial devido à orientação de noroeste para sudeste das fases.

A história sinótica da geada de 1979 pode exemplificar os processos que precedem invasões de ar frio nos subtrópicos. Frontogênese, conforme visto em imagens de satélite, ocorreu na região central do Pacífico Sul entre 20°S e 30°S de latitude. A banda de nuvens frontais alongou-se até atingir o intervalo de latitude entre 15° S e 65° S, enquanto uma crista com pressões altas intensificou-se próximo da costa do Chile. Posteriormente, formou-se uma frente fria no norte da Argentina, que avançou rapidamente para o Brasil, adiante de um cavado de onda curta vindo do Pacífico. Ao sul o anticiclone à superfície cruzou os Andes e moveu-se imediatamente para o norte. Durante 3 dias, o escoamento em ar superior guiou o ar polar nos baixos níveis ao longo do flanco leste dos Andes para as latitudes baixas até o Equador. Logo após o cavado no Atlântico ter atingido o seu máximo desenvolvimento e, ter começado a sair do Brasil, o céu ficou limpo e uma geada severa ocorreu até cerca de 20° S, a leste do anticiclone polar.

Similarmente em 1981 ocorreu no Pacífico a amplificação de uma onda longa que apresentava uma relação de fase favorável cerca de 4 a 5 dias antes da geada severa no Brasil. Entretanto, a amplificação dos cavados e cristas ocorreu um pouco mais a oeste do que em 1979. As geadas foram observadas somente nas áreas subtropicais a oeste do continente, até que o cavado no Atlântico amplificou-se ao ponto de parte dela ficar para trás como ciclone desprendido. Este ciclone com núcleo frio, propagando-se lentamente

te na direção equatorial, provocou geadas severas 2 dias depois numa faixa de terra onde a cultura de café tinha sido expandida recentemente.

Nas duas situações, a aproximação oportuna de um cavado de onda curta, quando o cavado da onda longa no Atlântico aproximava-se do pico de máximo desenvolvimento, foi um fator importante para a introdução de ar anormalmente frio nos subtrópicos. Outro fator importante no caso de 1979 foi identificado usando os diagramas de Hovmöller. A propagação de energia de ondas com uma velocidade de grupo de 35 graus de longitude por dia parece ter contribuído para a amplitude anormal do cavado frio. Essa velocidade excedeu tanto a velocidade observada da fase das cristas e cavados, como também a de todas as ondas curtas identificadas pelos centros de máximo e mínimo de vortacidade.

As condições sob as quais vários precursores podem ocorrer no inverno, sem a subsequente ocorrência de geadas nas latitudes subtropicais, é um tópico que merece mais investigações. Além disso, as diferentes evoluções dos dois casos apresentados sugerem que geadas podem ocorrer sob diferentes circunstâncias, embora seja necessário o crescimento de ondas em escala sinótica, cerca de 3 a 5 dias antes. O fato de não ocorrerem geadas severas todos os anos no Brasil também de os dados em áreas oceânicas existirem são recentemente complicam o estudo sobre geadas nos subtropicais. Observações em tempo real de uma rápida intensificação de ondas longas no Pacífico Sul podem, contudo, fornecer uma alerta preliminar sobre a entrada de ar anormalmente frio no Brasil com 3 a 5 dias de antecedência, desde que a relação de fase com respeito ao continente esteja favorável.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a John Garrett (Canadá), David Halpern (EUA) e à Marinha Argentina por terem fornecido os dados de bóia à deriva; a Andrew Horowitz (NESS- Washington) por ter fornecido os dados de ventos e temperaturas medidas por satélites; a N.A. Streten por ter fornecido o material sobre os métodos de análise na Austrália; a Terri Gregory da Universidade de Wisconsin (EUA), por ter cedido fotos do satélite DMSP; e a Hassan Virji por ter cedido o filme das imagens GOES durante o experimento FGGE. Foi extremamente importante o envio de observações de temperaturas nas noites com geada, pelas seguintes instituições: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), e Instituto de Pesquisas Agronômicas do Rio Grande do Sul (IPAGRO). Luiz C.B. Molion, Merrit W. Stevenson e Darci P. Casarin contribuíram com discussões sobre os métodos de análise. Sérgio R. Calbete Rocha ajudou a plotar os dados; José Moreira contribuiu para o processamento especial da Figura 13; Manoel C. Ribeiro da Silva e Celso L. de Faria processaram as fotografias deste trabalho, sob rígido controle de qualidade. A Força Aérea Brasileira (FAB) e Telecomunicações Aeronáuticas S.A. (TASA) suplementaram o nosso banco de dados. Finalmente agradecemos a Iracé

ma F.A. Cavalcanti a revisão do texto e a Sueli Ferreira a sua datilografia. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Convênio CNPq/INPE/FINEP - B/54-81/042/00/00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GARRETT, J.F. Availability of the FGGE drifting buoy system data set. *Deep-Sea Research*, London, 27A: 1083-1086, 1980.
- GUYMER, L.B. *Operational application of satellite imagery to synoptic analysis in the Southern Hemisphere*. Melbourne, Australia, Bureau of Meteorology, Apr. 1978, 90 p., il. (Technical Report, 29). Dept. of Science, P.O. Box 1289k, Melbourne.
- GUYMER, L.B.; LE MARSHALL, J.F. Impact of FGGE buoy data on Southern Hemisphere analysis. *Australian Meteorol. Magazine*, 28(1): 19-42, Mar. 1980. Republicado em *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Boston, 62(1): 38-47. Jan. 1981.
- HAMILTON, M.G.; TARIFA, J.R. Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July, 1972. *Monthly Weather Review*, Boston, 106(11): 1545-1556, Nov. 1978.
- HOVMÖLLER, E. The trough and ridge diagram. *Tellus*, Stockholm, 1(1): 62-66, Feb. 1949.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, INFORMATIVO. Geadas de um século. Brasília, Depto. de Assistência à Cafeicultura, n.7, 1975.11p. Instituto Brasileiro do Café, SCS Ed. Central SBL, CEP 70300, Brasília D.F.
- KELLY, G.A.M. Interpretation of satellite cloud mosaics for southern hemisphere analysis and reference level specification. *Monthly Weather Review*, Boston, 106(6):879-889, June 1978.
- KOUSKY, V.E.; FERREIRA, N.J. Interdiurnal surface pressure variations in Brazil: Their spatial distributions, origins and effects. *Monthly Weather Review*, Boston, 109(9): 1999-2008, Sept. 1981.
- MYERS, V.A. A cold front invasion of southern Venezuela. *Monthly Weather Review*, Boston, 92(11): 513-521, Nov. 1964.
- PARMENTER, F.C. A southern hemisphere cold front passage at the equator. *Bulletin of American Meteorological Society*, Boston 57(12): 1435-1440, Dec. 1976.
- PARRY, H.D.; ROE, C. Record low temperature in the Mid-Atlantic and East Central States, October 20-22, 1952. *Monthly Weather Review*, Boston, 80(10): 195-202, Oct. 1952.
- ROSBY, C.G. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves. *Journal of Meteorology*, Boston, 2(4):187-204, Dec. 1945.

RUMNEY, G.R. *Climatology and the world's climates*. London, MacMillan Collier-MacMillan, 1968, 656 p.

STRETEN, N.A. Some synoptic indices of the Southern Hemisphere mean sea level circulation 1972-77. *Monthly Weather Review*, Boston, 108(1): 18-36, Jan. 1980.

TARIFA, J. R. et alii. A gênese dos episódios meteorológicos de julho de 1975 e a variação espacial dos danos causados pelas geadas à cafeicultura no Estado de São Paulo. *Ciência e Cultura*, São Paulo, 29(12): 1362-1374, Dex. 1977.

TRENBERTH, K.E. Interannual variability of the 500 mb zonal mean flow in the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, Boston, 107(11): 1515-1523, Nov. 1979.

WELDON, R. *Cloud patterns and the upper air wind field*. Washington, D.C., Application-Division, National Earth Satellite Service - NESS, National Oceanographic and Atmospheric Administration - NOAA, Mar. 1979. 80p. (Satellite Training Course Notes, part 4). (U.S. Government Printing Office, n. 1979-281-067/214). Disponível de: Supt. of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *FGGE drifting buoy system* Summaries of individual buoy histories. Geneva, Suíça, FGGE Buoy Data Control Centre, 1980. 812 p.

ABSTRACT

TWO SEVERE FREEZES IN BRAZIL: PRECURSORS IN THE PACIFIC OCEAN AND SYNOPTIC EVOLUTION IN SOUTH AMERICA

Two freezes with repercussions on world coffee markets struck Brazil in recent years, one during FGGE (First Garp Global Experiment) in 1979, the other in 1981. Data from multiple sources including satellites and drifting buoys were analyzed for early warning signs and synoptic evolution of the freeze events. Two important precursors were found: (a) A slowly moving long wave pattern in the Central South Pacific Ocean amplified greatly one to two days before frontogenesis in South America and four to five days before the freezes in Brazil; (b) The long wave ridge, when at maximum amplitude, was located near the southern Andes, and the next long wave trough downstream was located in the South Atlantic at the longitude of Brazil. This configuration channelled subantarctic air northward entirely over

land into subtropical latitudes. Frontogenesis in low latitudes in the mid-Pacific was the first sign of wave amplification in the 1979 case. Subsequent frontogenesis in northern Argentina was accelerated by the opportune approach of a short wave trough one day before the downstream long wave trough reached greatest amplitude in southern Brazil. Vigorous entry of polar air impelled the cold front as far as the equator. As the long wave trough left Brazil, a hard freeze occurred in four states, east of the polar anticyclone. In 1981 the long wave pattern in the Pacific amplified as in 1979, but with a phase relationship displaced some 10° west relative to the first case. Freezes did not occur in eastern Brazil until after the northern portion of the Atlantic trough became cutoff. On the passage of the cold-core vortex through Brazil, freezing temperatures struck a large swath of land north of the Tropic of Capricorn, where a freeze is rare. Analysis of Hovmöller ridge-trough diagrams suggests that group-velocity propagation of wave energy from the unusual amplification of the cold trough in South America.

The opportune superposition of short and long wave troughs also contributed to the strong cold air invasion.

C.D.U. - 551.509.324(81)

ABSTRACT

TWO SEVERE FREEZES IN BRAZIL: PRECURSORS IN THE PACIFIC OCEAN AND SYNOPSIS EVOLUTION IN SOUTH AMERICA

Two freezes with repercussions on world coffee struck Brazil in recent years, one during 1980 (first case) and another in 1981 (second case). The other in 1981. Data from meteorological stations and drifting buoys were analyzed for early warning signs and synoptic evolution of the events. Two important precursors were found: (a) A strong long wave pattern in the Central South Pacific Ocean amplified greatly one to two days before frontogenesis in South America and four to five days before the freeze in Brazil; (b) A strong wave ridge, when at maximum amplitude, was located near the equator and the next long wave trough downstream was in the South Atlantic at the longitude of Brazil. This configuration channelled subantarctic air northward entirely over

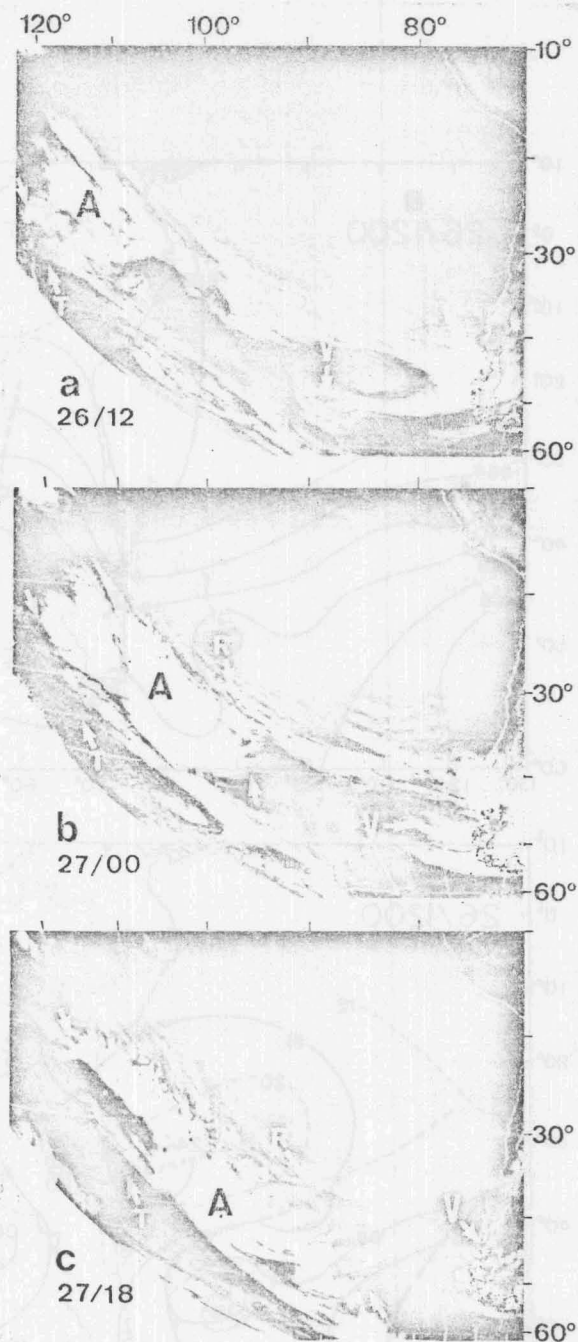


Fig. 1

Imagens no infravermelho do satélite GOES, do setor sudeste do Oceano Pacífico, quando as ondas longas amplificaram corrente acima da América do Sul. (a) 1200 TMC-26 de maio de 1979; (b) 0000 TMC-27 de maio de 1979; (c) 1800 TMC-27 de maio de 1979. Os pares de setas em T indicam o eixo de um cavado; em R, o eixo de uma crista; e em V, o centro de vorticidade do cavado de uma onda curta. A letra A indica uma camada extensa de cirrus e nuvens frontais que se desenvolveram rapidamente.

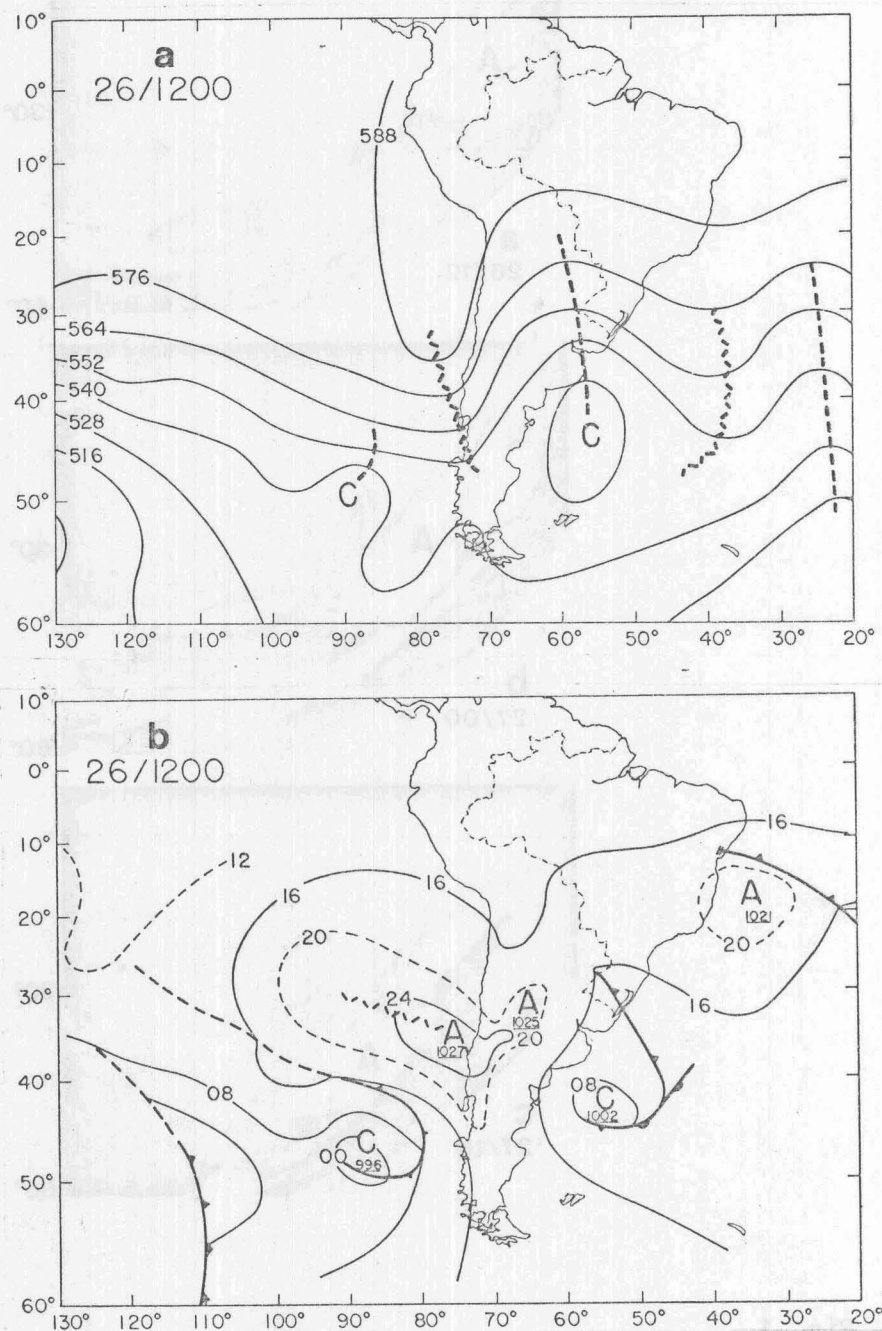
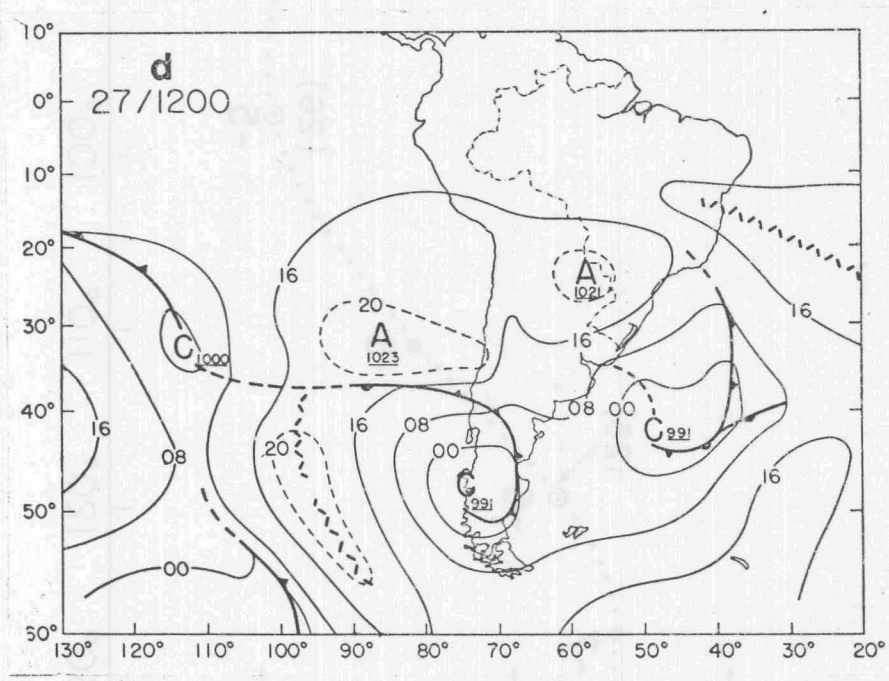
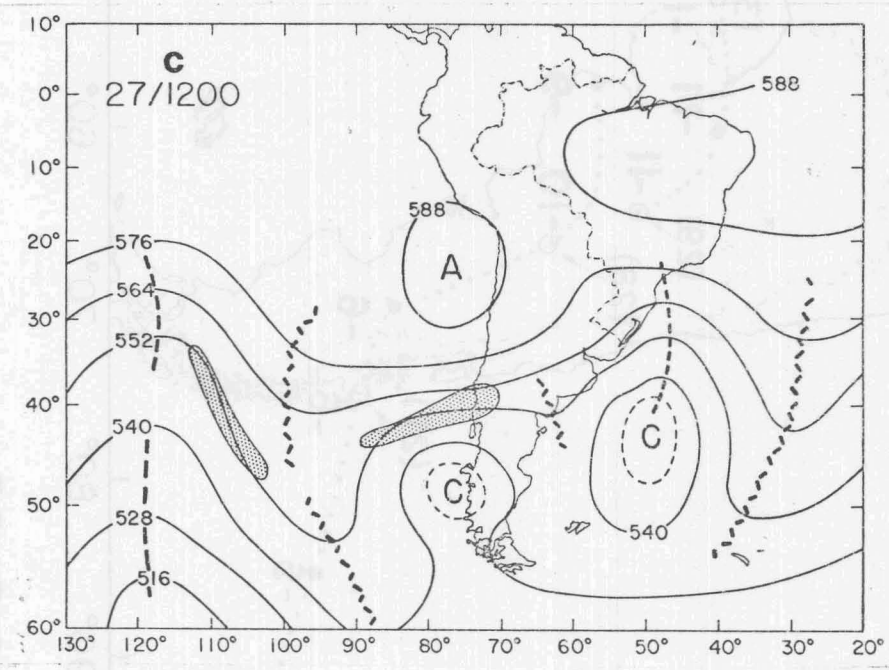


Fig. 2

Análises sinóticas em: (a) 26 de maio de 1979 em 500 mb, (b) 26 de maio de 1979 à superfície, (c) 27 de maio de 1979 em 500 mb, e (d) 27 de maio de 1979 à superfície. Em (a) e (c), traçaram-se contornos de geopotencial em intervalos de 12 decâmetros, e sombrearam-se as regiões onde os ventos excedem 100 nós ao nível de 250 mb. Em (b) e (d) traçaram-se as frentes, cristas e cavados com os símbolos padronizados; o campo de pressão ao nível do mar com isóbaros em intervalos de 8 mb; e os anticiclones (A) e ciclones (C) com os seus valores de pressão sublinhados.



Continuação Fig. 2

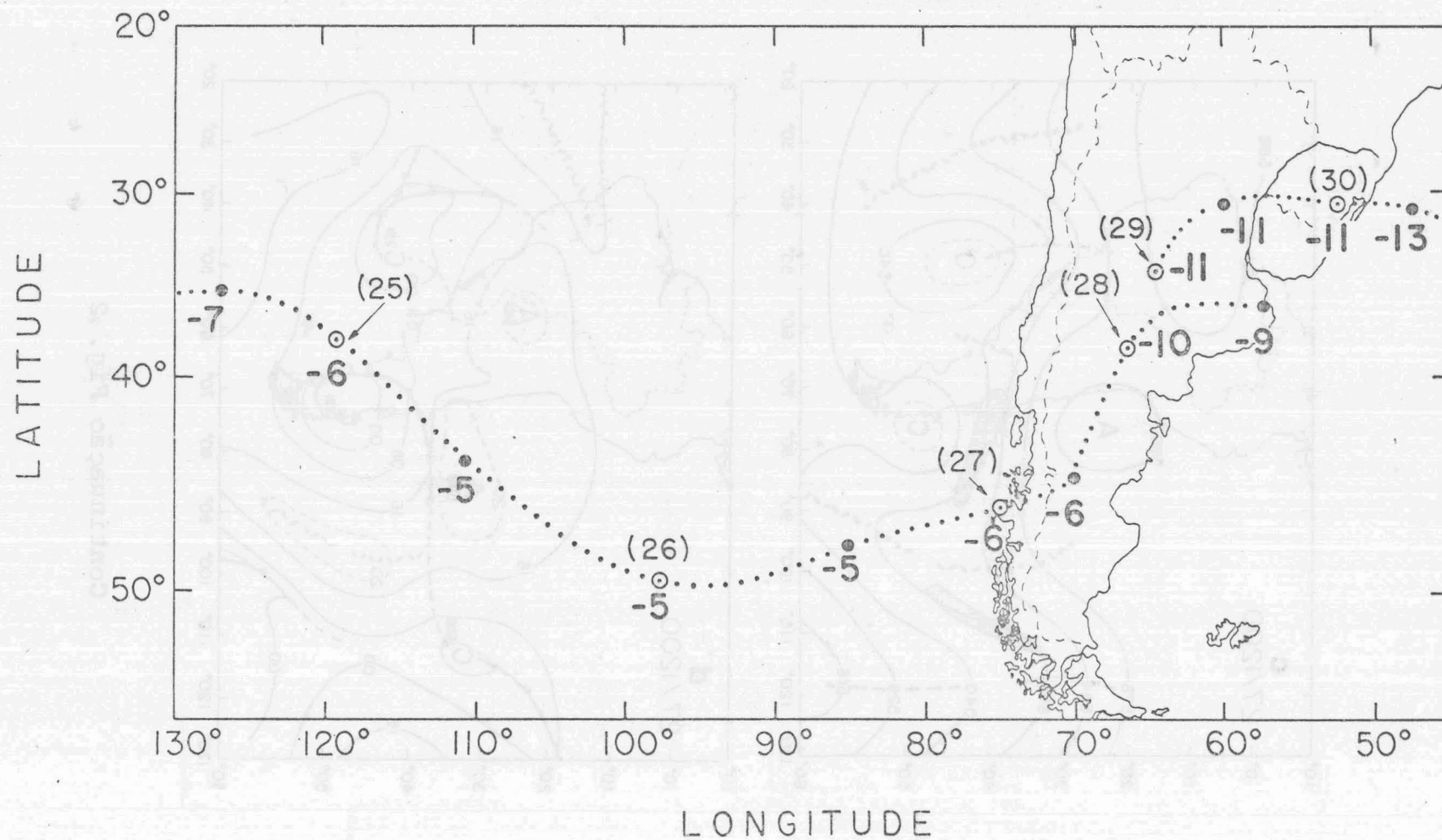


Fig. 3 - Trajetória (linha pontilhada) do centro de vorticidade V de uma onda curta. Os círculos em negrito e os círculos com pontos representam as posições de V em 0000 e 1200 h TMG, respectivamente. Os dias do mês de maio são dados pelos números em parênteses, e os valores de vorticidade (em unidades de 10^{-5} s^{-1}) pelos números negativos.

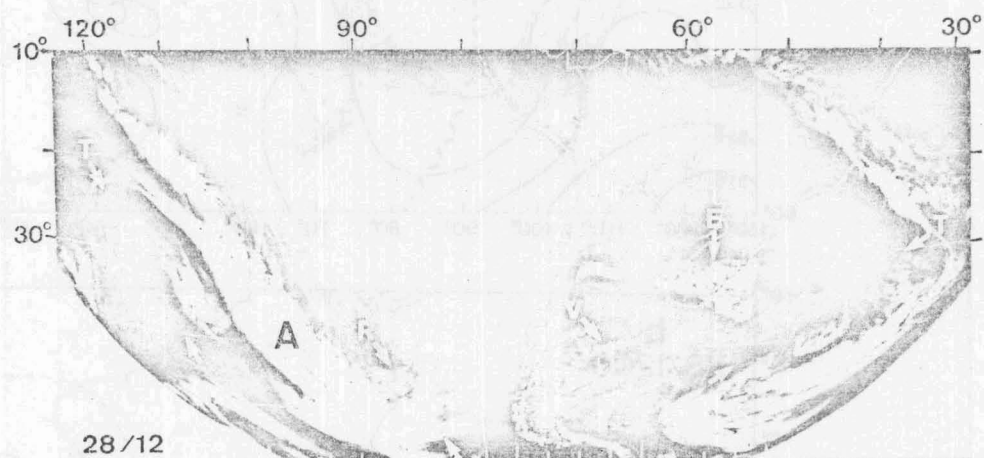


Fig. 4 - Imagem no infravermelho em 1200 TMG de 28 de maio de 1979, que inclui a América do Sul. As letras T, R e V são usadas como na Figura 1. A letra E indica uma formação triangular de nuvens associadas com a primeira fase de ciclogênese. Outro cavado $\bar{T}$ no Atlântico também é indicado.

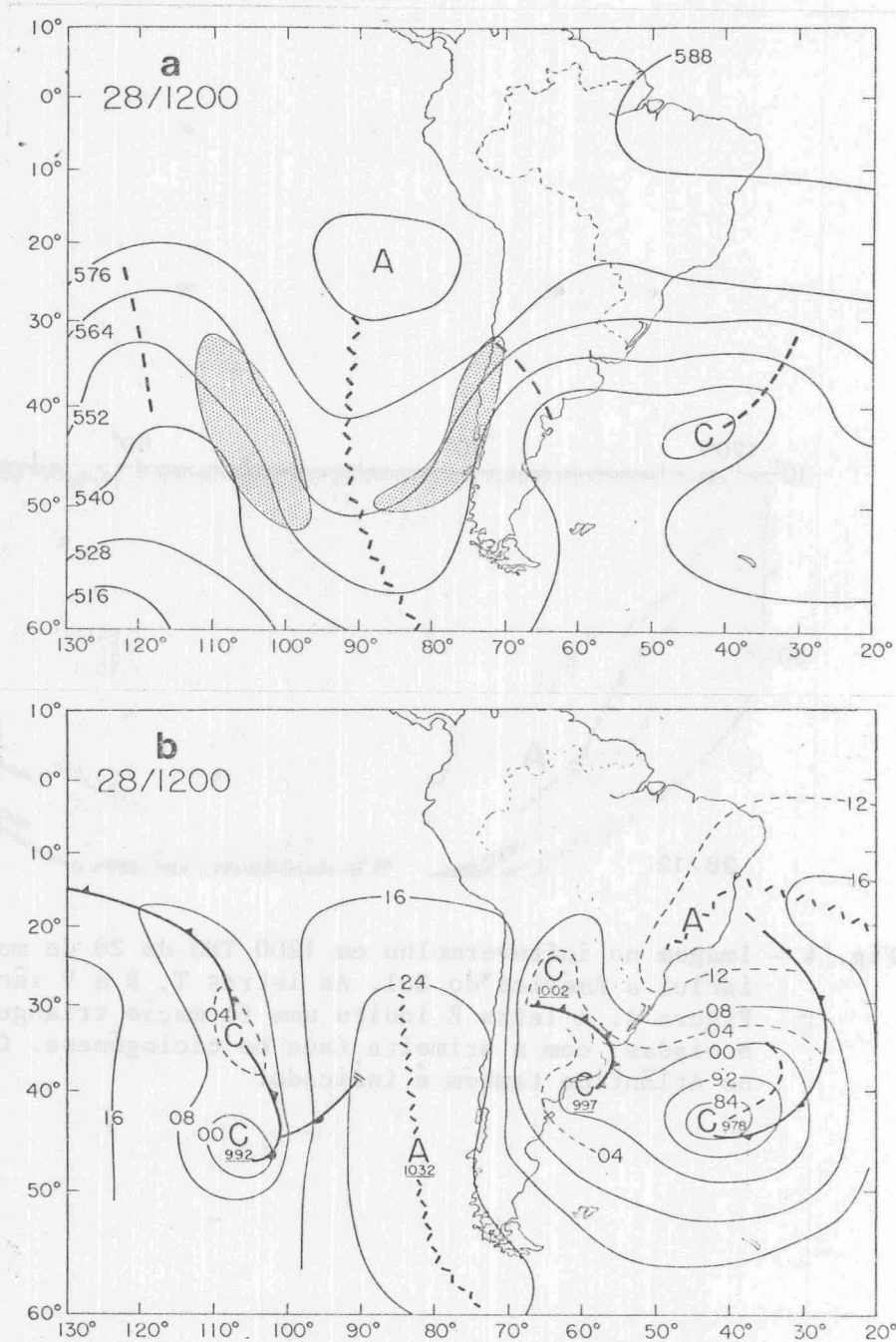
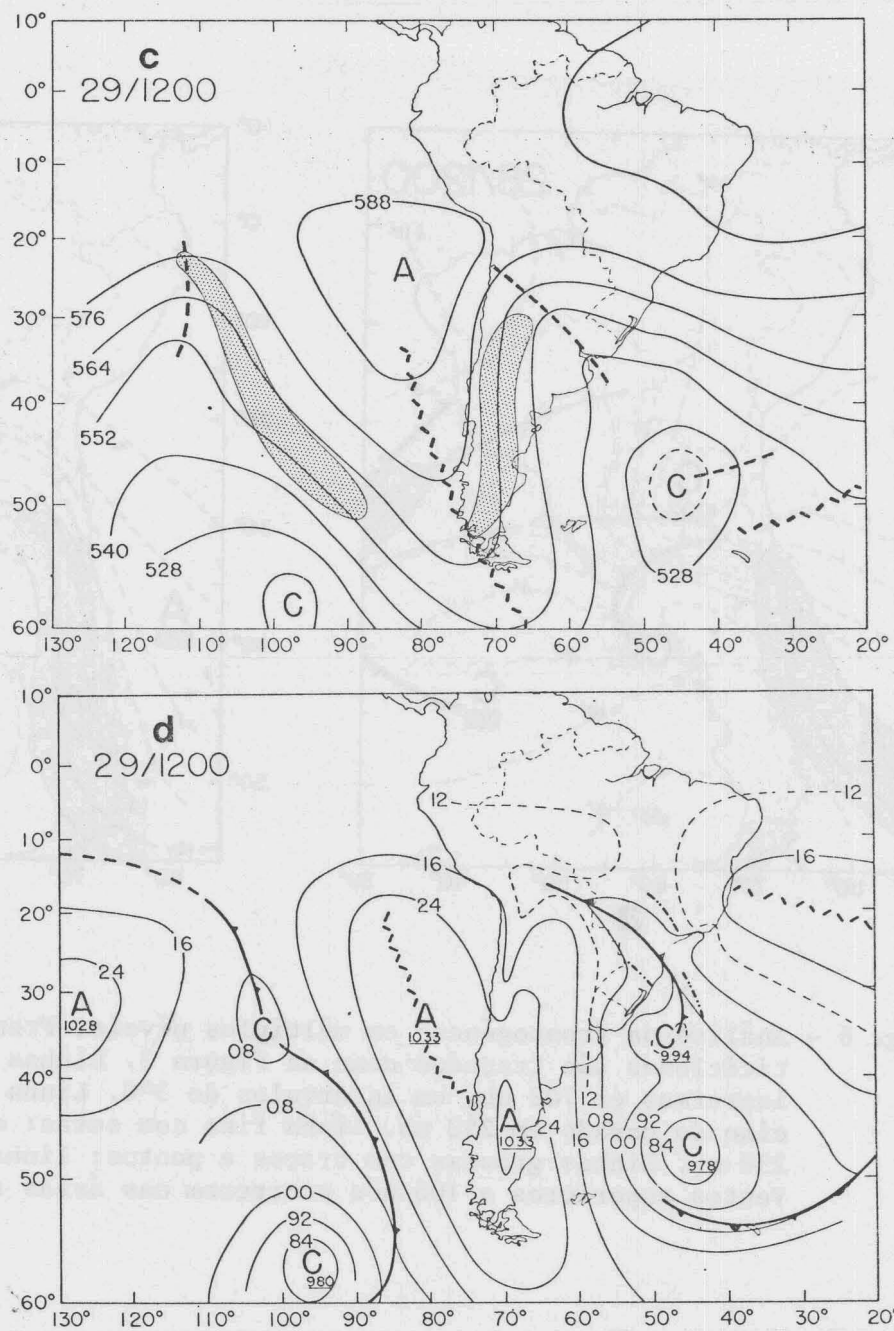


Fig. 5 - Análises sinóticas em (a) 28 de maio de 1979 em 500 mb, (b) 28 de maio de 1979 à superfície, (c) 29 de maio de 1979 em 500mb, e (d) 29 de maio de 1979 à superfície. Os símbolos são os mesmos da Figura 2.



Continuação Fig. 5

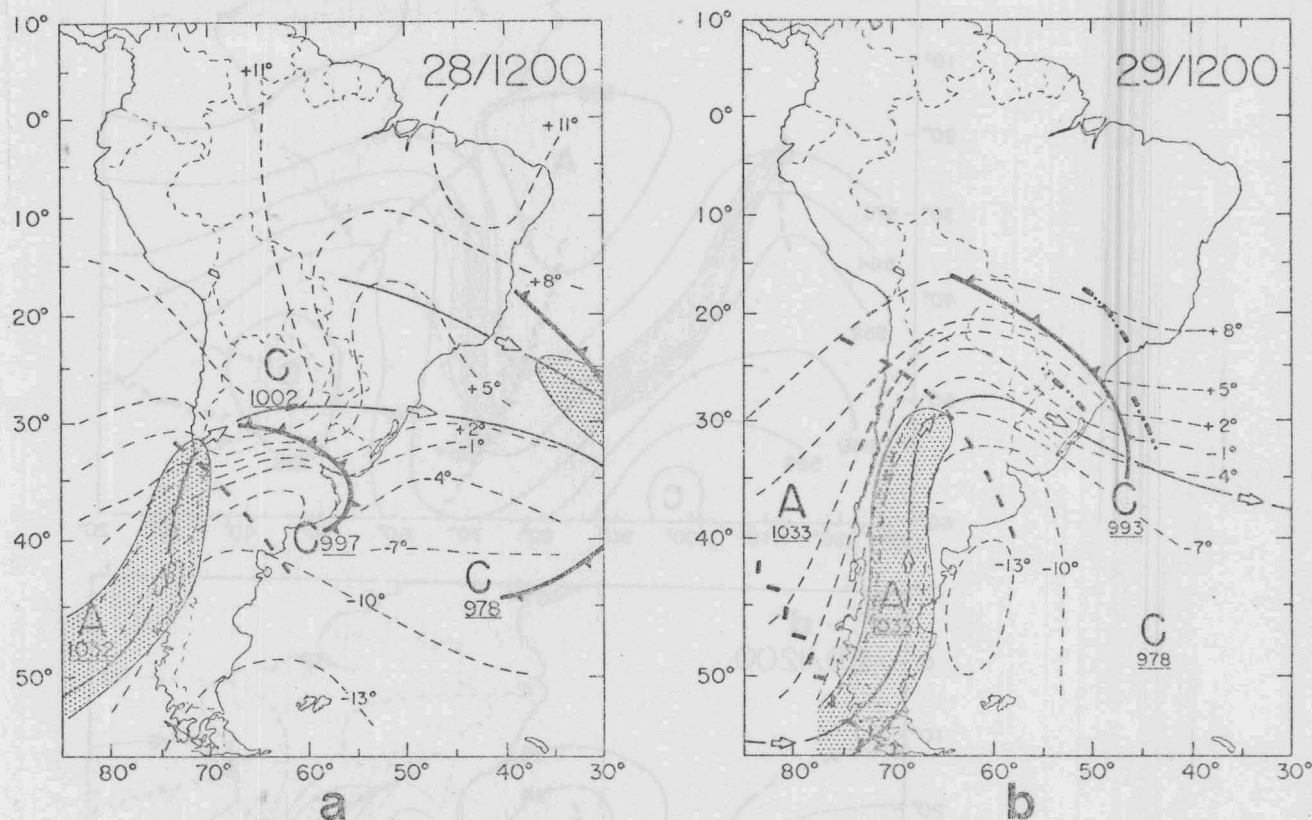


Fig. 6 - Análise da frontogênese em múltiplos níveis. Frentes, ciclones e anticiclones são traçados como na Figura 2. Linhas finas tracejadas: isotermas em 700 mb, em intervalos de 3°C. Linha grossa tracejada: eixo do cavado em 250 mb. Linha fina com setas: corrente de jato em 250 mb. Linhas grossas com traços e pontos: linhas de trovoadas. Ventos superiores a 100 nós ocorreram nas áreas sombreadas.

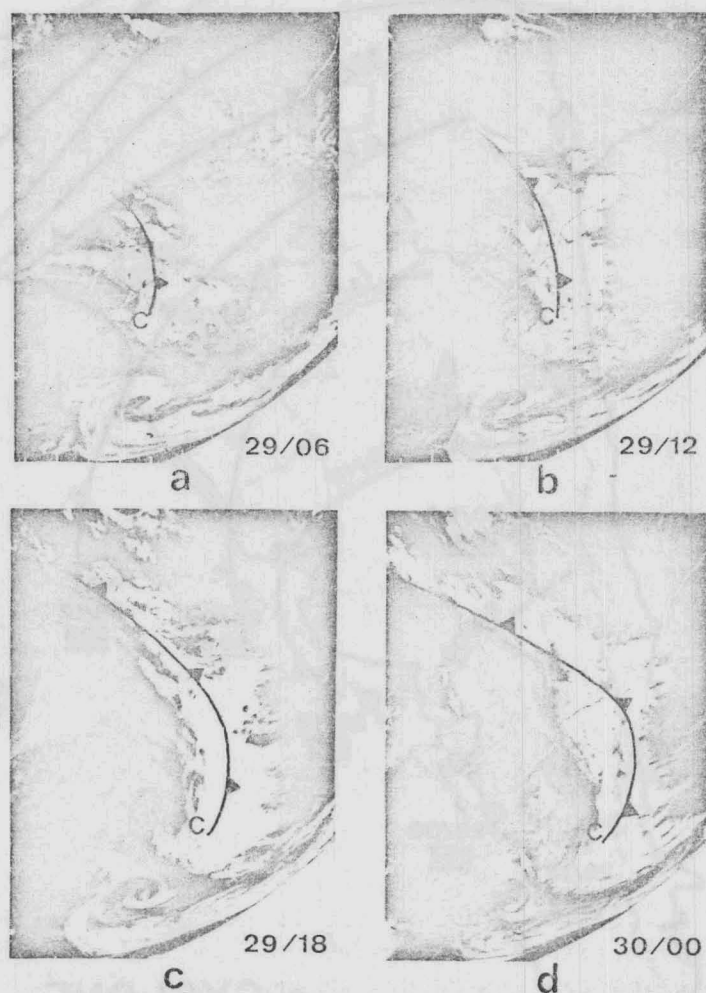


Fig. 7 - Imagens no infravermelho, em intervalos de seis horas, em 29 de maio de 1979 nos horários: (a) 0600 TMG, (b) 1200 TMG, (c) 1800 TMG, e em 30 de maio de 1979 no horário: (d) 0000 TMG. O avanço da frente fria e das linhas de trovoadas é documentado.

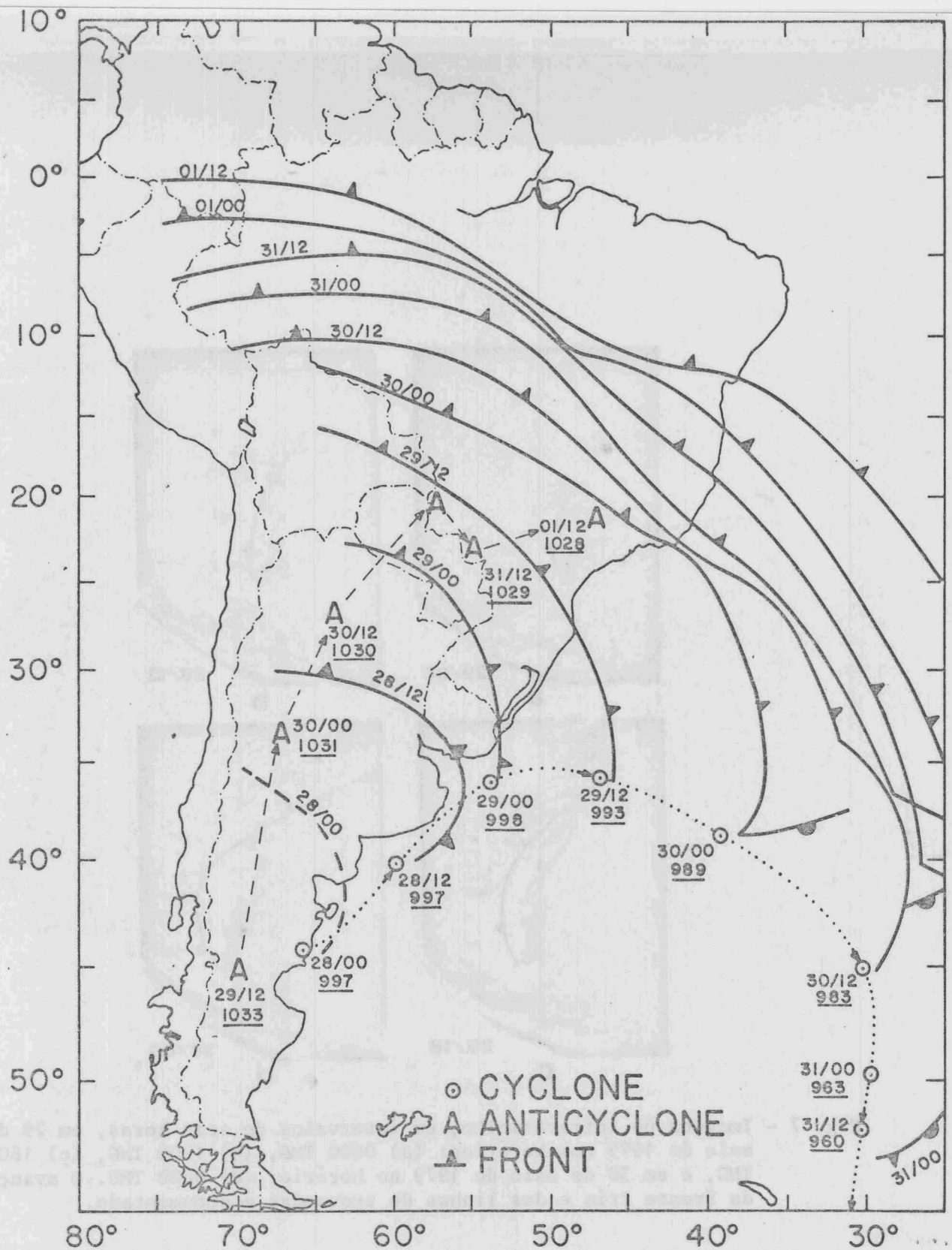


Fig. 8 - Avanço de frente fria desde a sua formação até a sua dissipação. O dia e horário da posição são escritas à esquerda. Linha pontilhada: trajetória do ciclone associado com sua posição e distribuição de pressão (em mb), indicadas a cada 12 horas. Linha tracejada com letras A: trajetória do anticiclone polar, também com a sua posição e pressão indicadas a cada 12 horas.

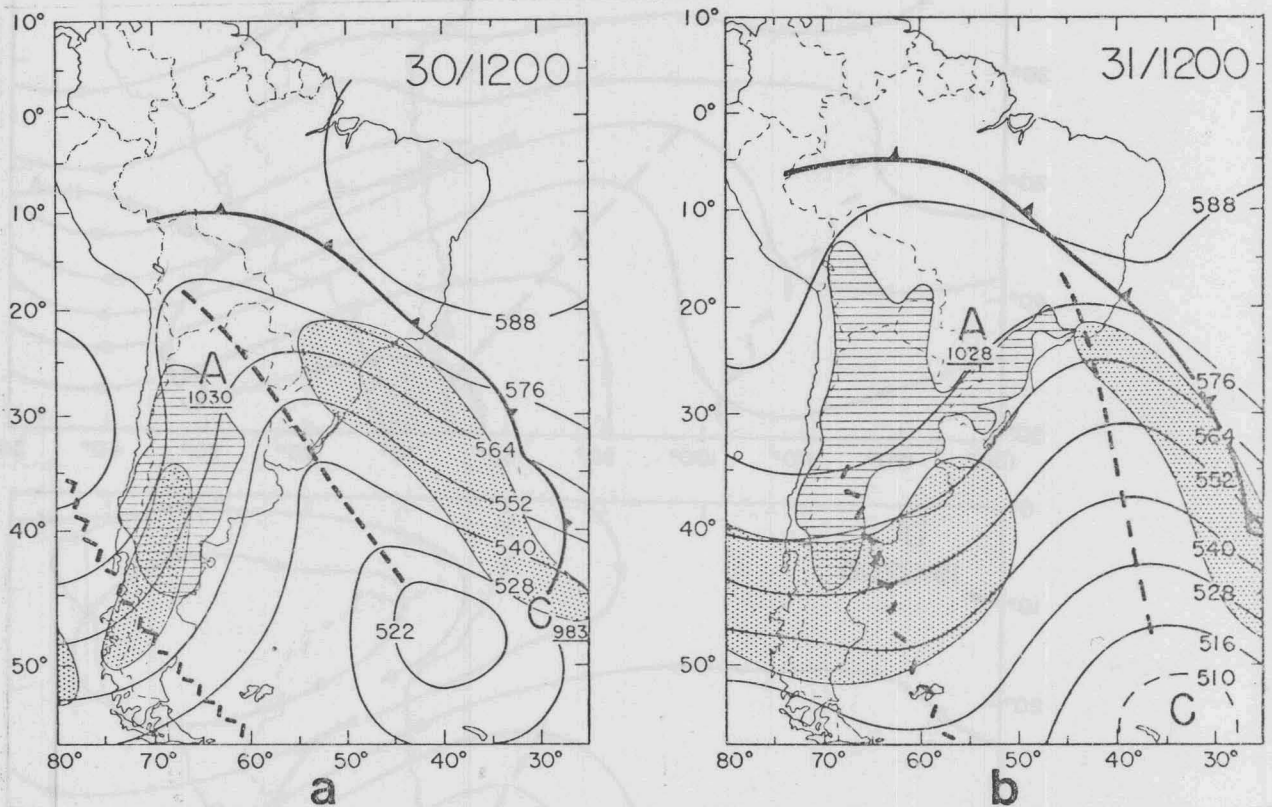


Fig. 9

Análises em múltiplos níveis para 1200 TMG, (a) 30 de maio de 1979 e (b) 31 de maio de 1979. Símbolos para cavados, cristas e contornos de geopotencial em 500mb como os da Figura 2a. Símbolos para frentes, ciclones e anticiclones à superfície como os da Figura 6. Área sombreada: ventos superiores a 100 nós em 250mb. Área hachurada: regiões onde as temperaturas da superfície terrestre caíram abaixo de 0°C na noite prévia.

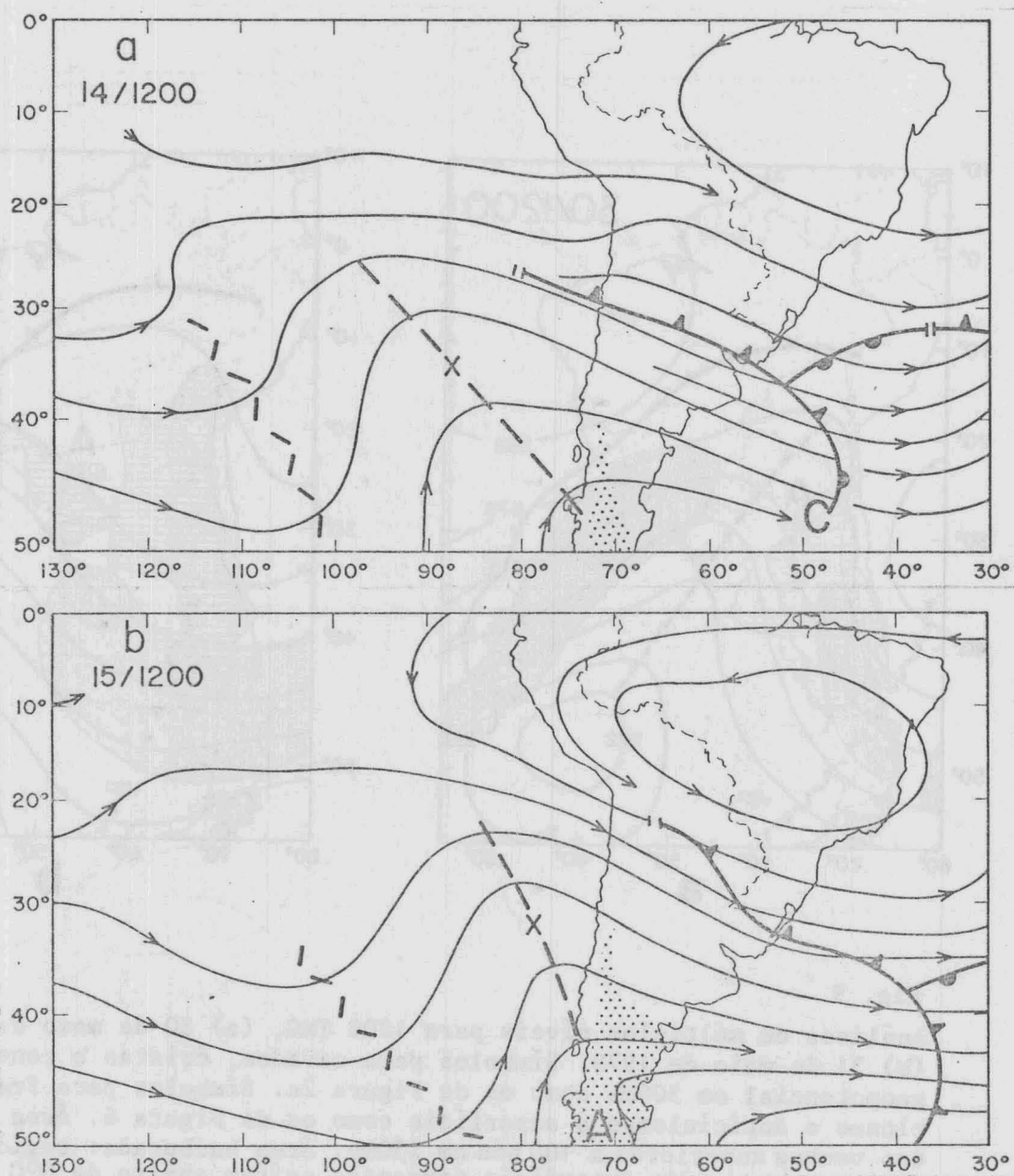
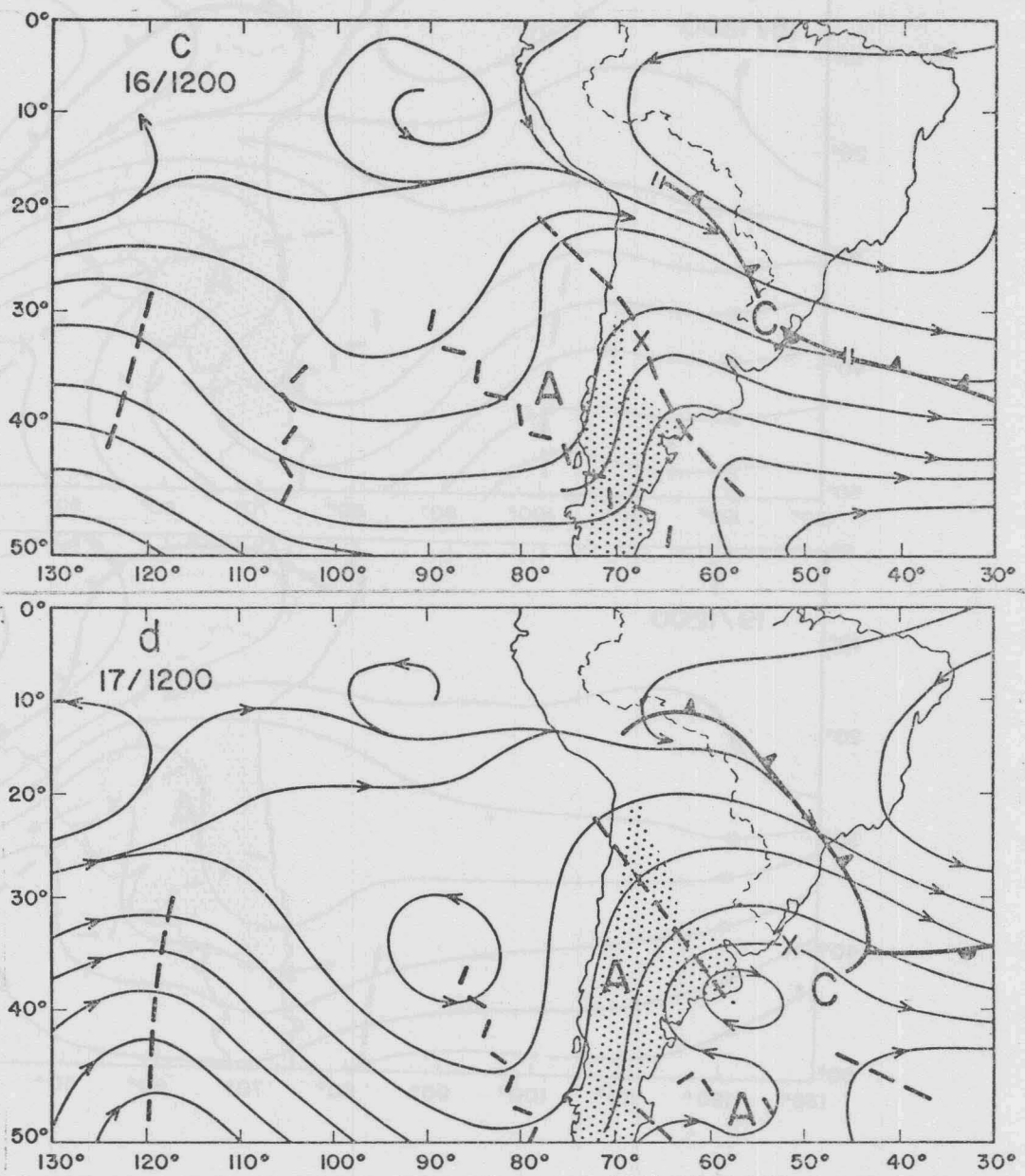
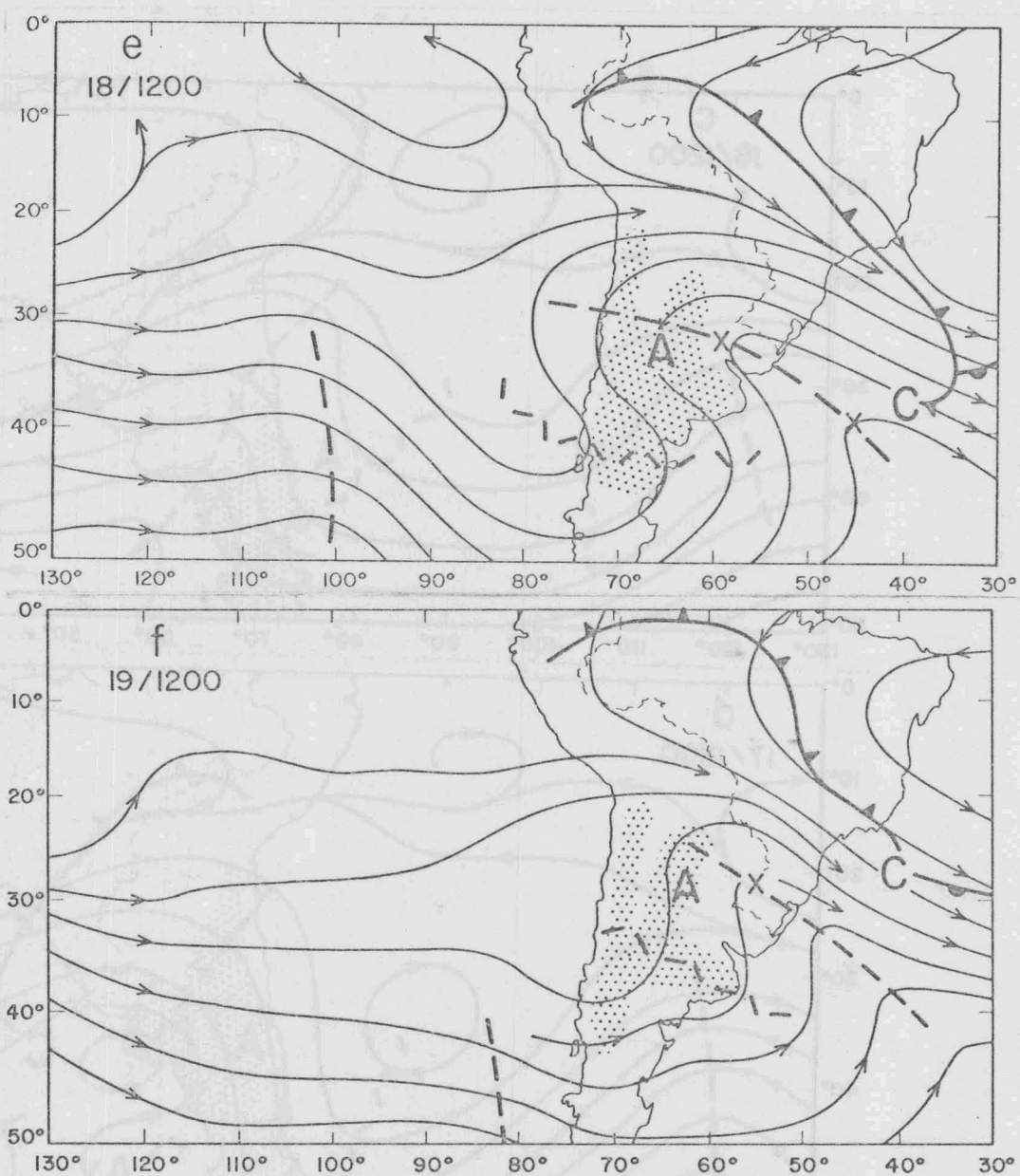


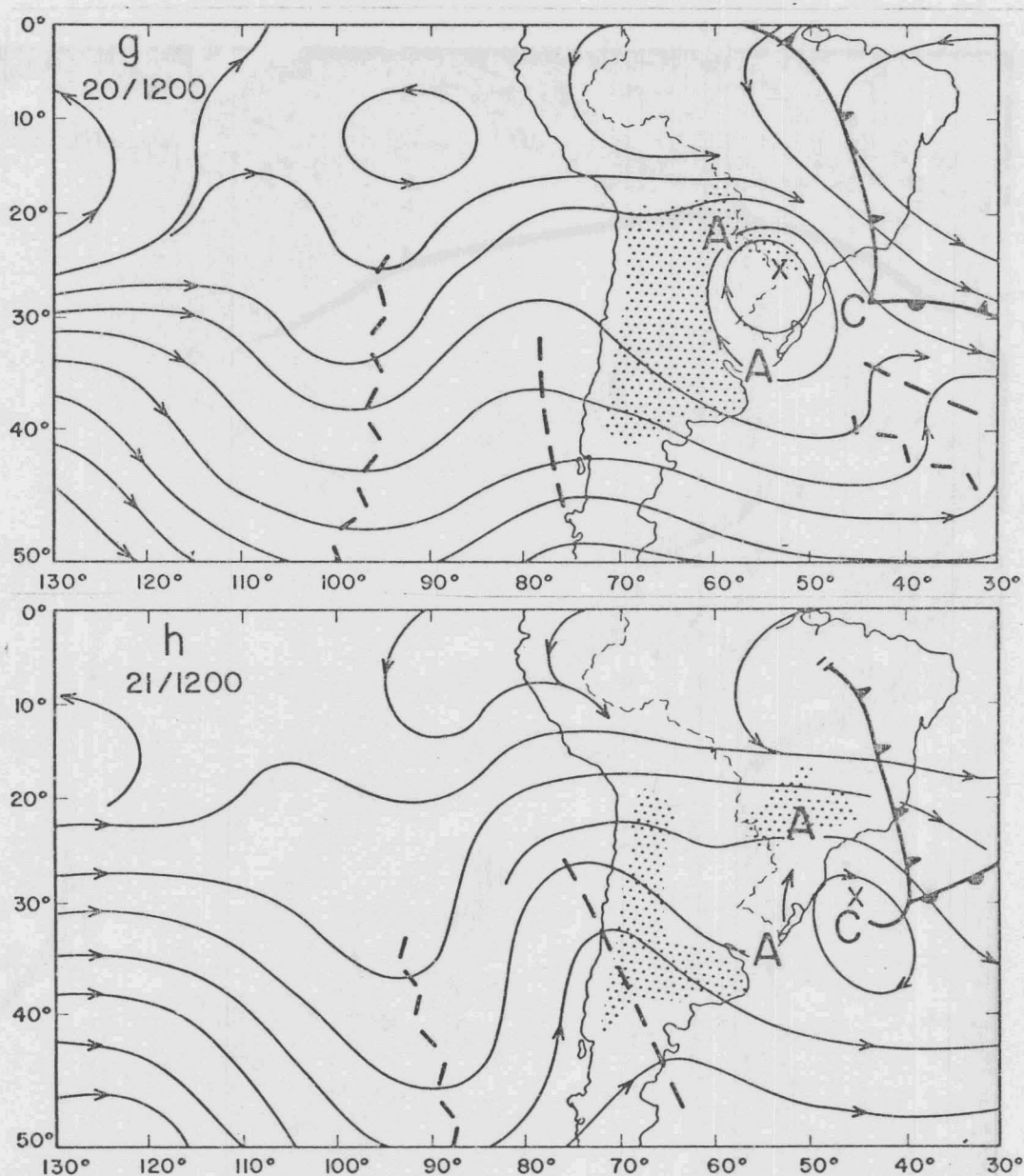
Fig. 10 - Análises sinóticas em 1200 TMG para os dias de 14 a 21 de julho de 1982. Dia e horário da análise situam-se no canto esquerdo superior de cada carta. Curvas com setas: linhas de corrente em 500mb. Símbolos para cavados e cristas em 500mb e frentes e ciclones à superfície, como os da Figura 2. Letra X: centro de vorticidade do cavado em 500mb. Áreas sombreadas: regiões onde a temperatura mínima ficou abaixo de 0°C na noite prévia.



Continuação Fig. 10



Continuação Fig. 10



Continuação Fig. 10



Fig. 11 - Imagem no visível da América do Sul em 1800 TMG do dia 19 de julho de 1981. As nuvens em espiral em Q localizam um ciclone que se desprendeu neste horário. A posição da frente fria aqui traçada foi determinada pela análise à superfície.



Fig. 12 - Imagens no infravermelho do ciclone desprendido Q, quando cruzava o sul do Brasil, em 1200 TMG dos dias 19,20,21, e 22 de julho de 1981.



Fig. 13 - Imagem realçada no infravermelho da área atingida pela geada, às 0600 HL do dia 21 de julho de 1981. A escala de cinza corresponde às temperaturas da superfície terrestre entre -4°C e $+4^{\circ}\text{C}$, em intervalos de 1°C . O contorno nítido preto/branco representa a isoterma de 0°C . Tons escuros representam temperaturas negativas; tons claros, positivas.

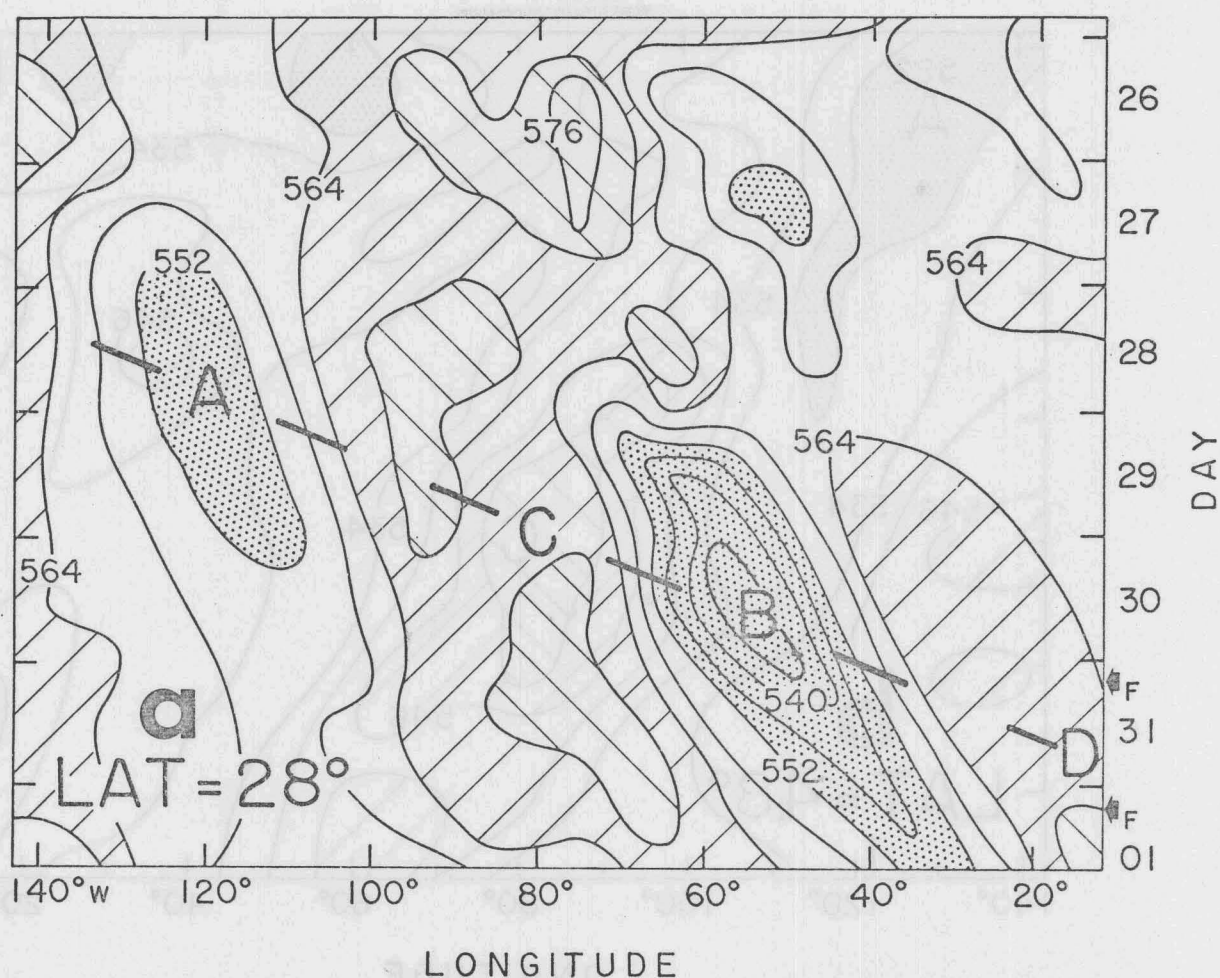
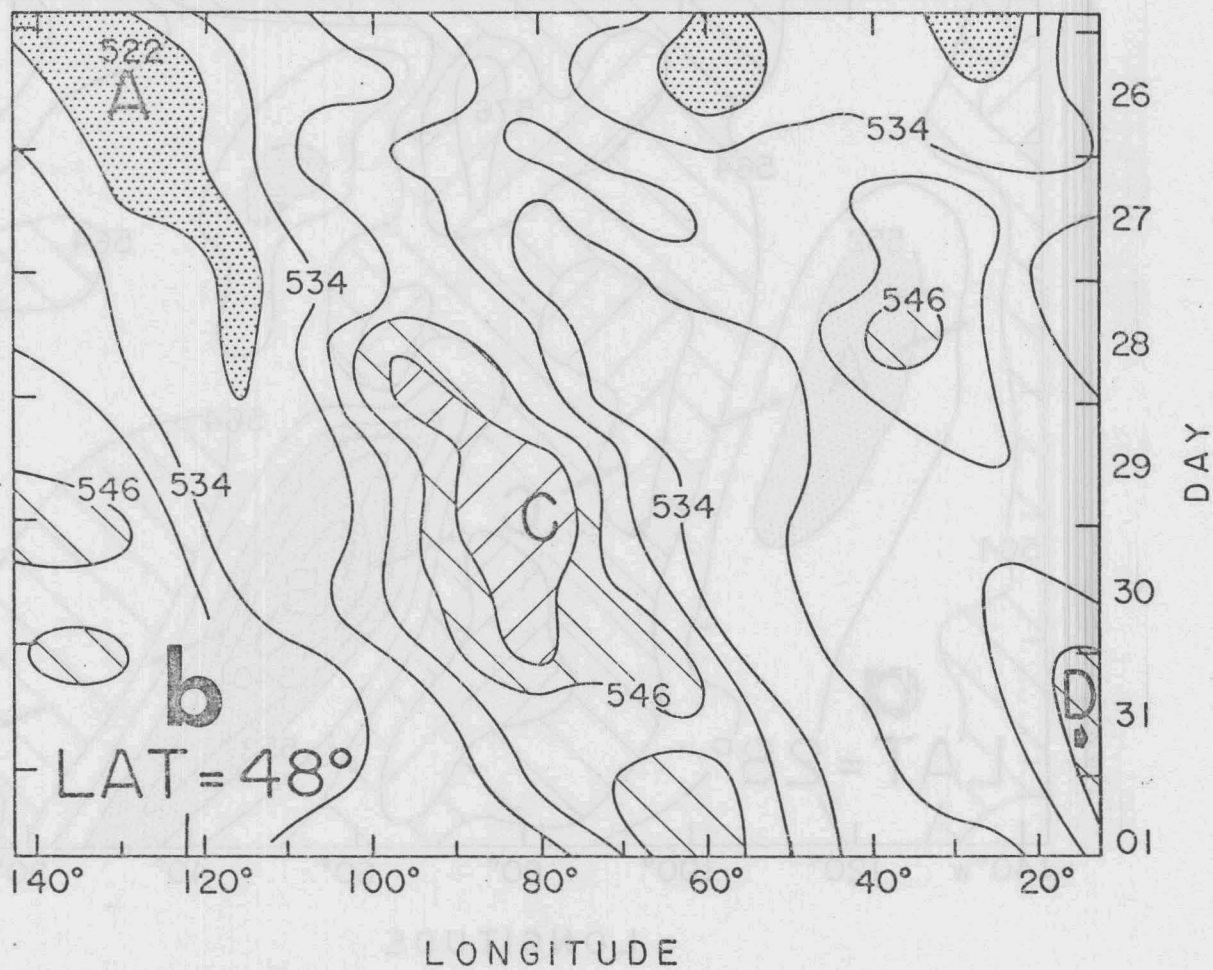


Fig. 14

Diagramas de Hovmöller para o campo de espessura 1000-500 mb em função da longitude (da direita para esquerda) e do dia (de cima para baixo), em duas latitudes fixas: (a) 28°S e (b) 48°S. Valores são dados em decâmetros. Áreas sombreadas: anomalias positivas. A linha grossa tracejada representa propagação de energia das ondas de uma fase para outra. As letras F na margem direita em (a) indicam os horários nos quais geou no Brasil.



Continuação Fig. 14