

MODELO CONCEITUAL DE FRONTOGÊNESE NA AMÉRICA DO SUL

Luiz Fernando De Mattos

MCT-INPE-CPTEC

Rodovia Presidente Dutra Km 40

12650-000 Cachoeira Paulista SP

mattos@cptec.inpe.br

RESUMO

Idéias clássicas e recentes: Teoria de Frente Polar e esteiras transportadoras não satisfazem para América do Sul onde Frente e Sistema Ciclônico (SC) ocorrem durante o ano; geada, neve fora do inverno; enchentes, seca fora do verão, necessitando modelo conceitual frontogenético.. Frente comporta quatro tipos diferentes, conforme padrão convectivo, advecção fria e SC associado desde o Oceano Pacífico Sul em latitudes médias; relacionando tropopausa dinâmica isentrópica com regiões de reservatório estratosférico, acompanhando “stormtrack”, durante passagem para Atlântico Subtropical Sul. Vetor Q e temperatura potencial equivalente na função frontogenética são de grande valia no diagnóstico para toda a camada troposférica.

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho objetiva mostrar resumidamente como as observações de zonas frontais, associadas ou não a ciclogêneses, confirmam a importância de se elaborar um modelo conceitual de frontogênese para a América do Sul. Função frontogenética (F), por meio de vetor Q com uso de temperatura potencial equivalente (θ_E) e Vorticidade Potencial Isentrópica (VPI), para analisar tropopausa dinâmica (descontinuidade vertical de isolinhas de θ) e reservatório de ar estratosférico, servem como sinais precursores em toda a espessura troposférica. Esses campos auxiliam diagnoses de “cold air outbreak” e também de precipitação intensa sobre a Região Sudeste do Brasil. Essa é a linha de pesquisa, com perspectivas para estudos futuros, no desenvolvimento dos trabalhos de prognose em Meteorologia.

Idéia clássica de ciclone e sistema ciclônico (SC): frentes fria e quente, advecção térmica; evolução e dissipação: instabilidades baroclínica e barotrópica, influência do atrito; energética: transferência e conversão de energia até dissipação por atrito; ciclone explosivo, baixas polar e térmica, altas transiente e subtropical semi-permanente; classificação por tipo de deslocamento, frente: estrutura e movimento; Idéia recente de esteira transportadora, vórtice de altos níveis; estrutura horizontal e vertical do ciclone extratropical; regiões de ciclogênese e ciclólise observadas e “stormtracks”, ciclone e frente sobre a América do Sul são assuntos abordados que dão uma evolução histórica dos conceitos sobre o modelo de frontogênese. Sobre a América do Sul em particular, tenta-se evoluir um pouco mais o assunto em pauta, nas próximas seções.

2 OBSERVAÇÕES DE FRENTES

Durante sua existência de 15 anos, a revista Climanálise registra eventos mensais de frente, sua trajetória, número e efeito imediato no clima do Brasil; como friagem, geada e neve. Frente estacionária causa precipitações intensas sobre as Regiões Sudeste e Sul.

O clima da América do Sul se caracteriza também pela ocorrência desses eventos, fora dos padrões sazonais normais; por exemplo ocorre neve e geada fora do inverno do Hemisfério Sul (HS); enchente e seca, fora do verão do HS.

Tendo esses fatos em mente, pode-se separar eventos frontais em quatro categorias distintas, a saber:

- i) Frente de outono, inverno e primavera - causa friagem (< 4 C no abrigo), havendo geada ao nível do solo e podendo causar precipitação intensa na Região Sul, quando estacionária;

- ii) Frente dissipando-se (frontólise) sobre a Região Sul do Brasil não ultrapassando latitude de Paranaguá - PR;
- iii) Frente afetando a costa leste da Região Nordeste do Brasil, ultrapassando latitude de Salvador - BA, atravessando todo o Atlântico Sul e
- iv) Frente de primavera, verão e outono causando precipitação intensa sobre a Região Sudeste do Brasil e menos freqüentemente nas outras Regiões quando estacionária ou quando o número de frentes convectivas é maior que o normal.

Independentemente do tipo em que se enquadra nas categorias acima, há frente desenvolvendo pouca ou muita convecção. Neste caso, prefere o tipo iv, conforme Oliveira (1986), ao estudar interação com convecção na Amazônia, induzida por sistema Alta da Bolívia - Baixa de alta troposfera no Nordeste (ABBN) e pela presença da Baixa Térmica do Chaco (BC).

Efeitos de frente do tipo iii mostra Kousky (1979):

- a) Influência no clima diferenciado do leste da Região Nordeste em relação ao sertão;
- b) Penetra a parte sul do Nordeste durante todo o ano, sendo no sertão sul da Bahia responsável por máximo de precipitação mensal em dez/jan;
- c) Associa-se a aumento de precipitação ao longo da costa, da Bahia ao Rio Grande do Norte, durante outono/inverno do HS e
- d) Às vezes afeta precipitação no Estado do Ceará e responde pelo declínio isobárico superficial a baixa latitude, quando favorece o movimento para sul da zona de cavado equatorial.

A frente de tipo ii pode causar tanto eventos de precipitação quanto de declínio de temperatura para a Região Sul, independentemente da época do ano, antes de desaparecer sobre o Atlântico Sul Subtropical.

A de tipo i desenvolve severos efeitos de geada e friagem. Também causa precipitação sobre a Região Sul, principalmente quando precedida por complexo convectivo de mesoescala causado pela presença de jato de baixos níveis (JBN) sobre o Paraguai [Mattos et al. (2000)].

3 FREQUÊNCIA MÉDIA DE FRENTE NO BRASIL

Série histórica de frentes (1986-2001) elaborada pela revista Climanálise permite definir frequência média de frente no Brasil, subdividida em quatro tipos padrões, como definidos na seção anterior. Figura 1 mostra cinco curvas mês versus frequência média, elaboradas a partir de tabela, contendo totais por tipo de frente, mensais, anuais em 15 anos, conforme as seguintes descrições:

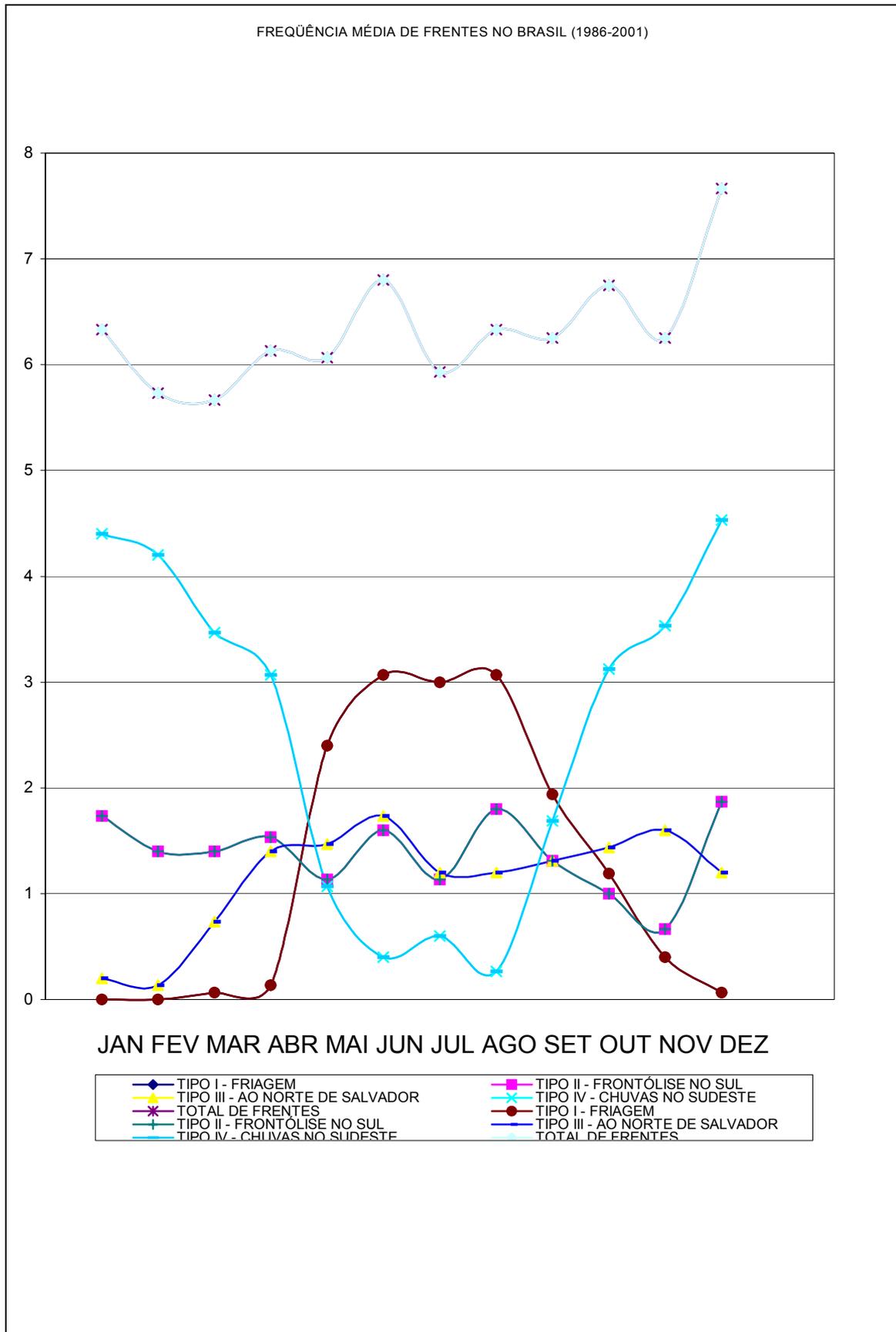


Figura 1: Frequência média de frentes no Brasil (1986-2001) (fonte: Climanálise).

Tipo I - possui uma marcha anual em forma de sino de Gauss, com extremidade esquerda quase paralela ao eixo horizontal, com valores próximos a zero de jan. a abr.; sua extremidade direita descreve uma inclinação suave de ago. a dez., do valor 3 ao valor nulo; o seu máximo ocorre no patamar de 3, regularmente distribuído nos meses jun.-jul.-ago.;

Tipo II - varia pouco anualmente, com uma oscilação maior entre ago. e dez., com um mínimo em nov. e um máximo em dez. ;

Tipo III - dois patamares distintos, sendo um mínimo curto em jan.-fev. e um outro máximo longo de abr. a dez., com dois máximos em jun. e nov. ;

Tipo IV - o número de frentes com convecção aumenta entre os meses de ago. e mai. e decresce de mai. a ago., desde o valor < 1 até o máximo de dez. a jan.;

Soma total - somando todas as curvas, o valor mensal oscila absolutamente entre o mínimo em mar. e o máximo em dez.. Os outros máximos e mínimos são relativos e oscilam em jun. e out. e em jul, respectivamente.

Calbete (2001) forneceu alguns dados referentes a essa série da Climanálise e Lemos (2001) mostrou que obteve gráfico semelhante de frequência média frontal, ao analisar série histórica de total de precipitação mensal e anual da estação climatológica de Ubatuba - SP.

4 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA MÉDIA

Interessante observar padrões opostos de distribuição anual entre curvas de tipo I e de tipo IV; o quase paralelismo entre curvas de tipo II e total; e a pequena contribuição da frente de tipo III em jan.-fev. e maior contribuição em jun. e nov., refletindo nos máximos secundários de jun. e out. na curva total.

Distribuição de tipo IV é semelhante à marcha anual de precipitação pluviométrica observada na maioria das estações climatológicas da Região Sudeste. A de tipo II mostra um padrão semelhante ao de distribuição pluviométrica para grande parte das estações do Estado do Rio Grande do Sul, mostrando que mesmo ao se enfraquecer e dissipando-se no oceano, desenvolve convecção significativa na Região Sul.

Distribuição anual do regime de chuva em várias estações do litoral leste da Região Nordeste reflete o padrão de tipo III.

Portanto, é relevante definir modelo conceitual de frontogênese continental, não só por causa da frente tipo I, mas também pelos outros tipos de frequência, ou seja, também por causa do total acumulado de precipitação induzido por total de frentes atingindo o território continental e brasileiro.

Mattos (1988), Satyamurty e Mattos (1989) descrevem uma distribuição global climatológica sazonal e anual de F de Petterssen na baixa troposfera (850 hPa) devida à deformação horizontal e convergência, em termos de temperatura do ar (T). Mattos e Satyamurty (2001) mostram que F climatológica global pode ser também por vetor Q obtida em termos de θ_{E_s} , usando dados diários de reanálises do ECMWF(1982-93), NCEP/NCAR(1982-94) e CPTEC/COLA(1985-96) e isto justifica-se por causa do efeito da umidade na distribuição da densidade do ar na baixa troposfera, uma vez que o ar seco torna-se mais denso que o úmido. Figuras 2-6 mostram resultado sazonal e anual de frontogênese ($F>0$) sobre a América do Sul.

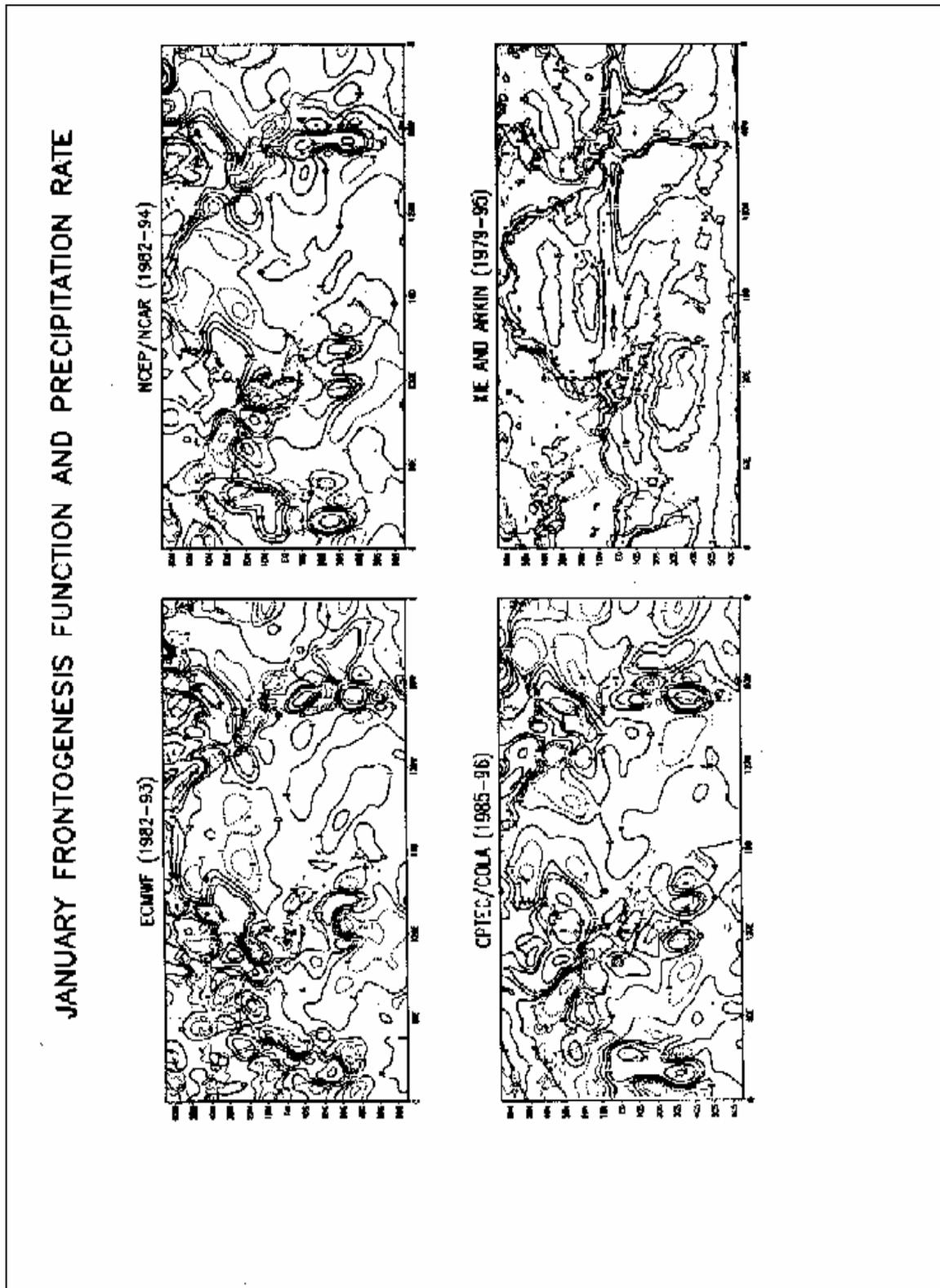


Figura 2: Campos globais de janeiro: função frontogenética (F) pelo vetor Q, em termos de temperatura potencial equivalente θ_E , em $10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ S}^{-1}$, a 850 hPa e taxa diária de precipitação (R) em mm/dia (fonte: Mattos e Satyamurty, 2001).

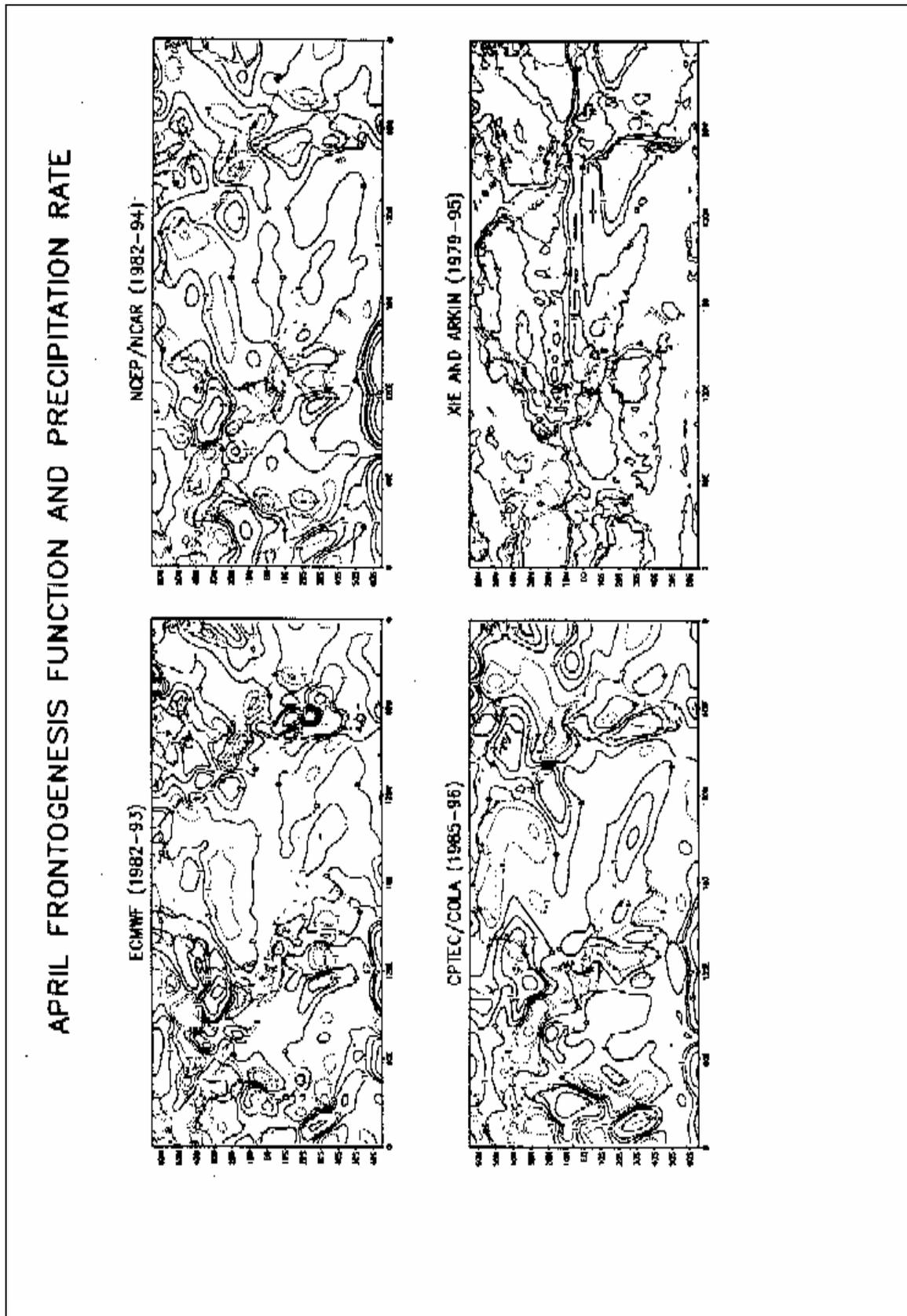


Figura 3: Como na figura 2, mas para abril.

JULY FRONTOGENESIS FUNCTION AND PRECIPITATION RATE

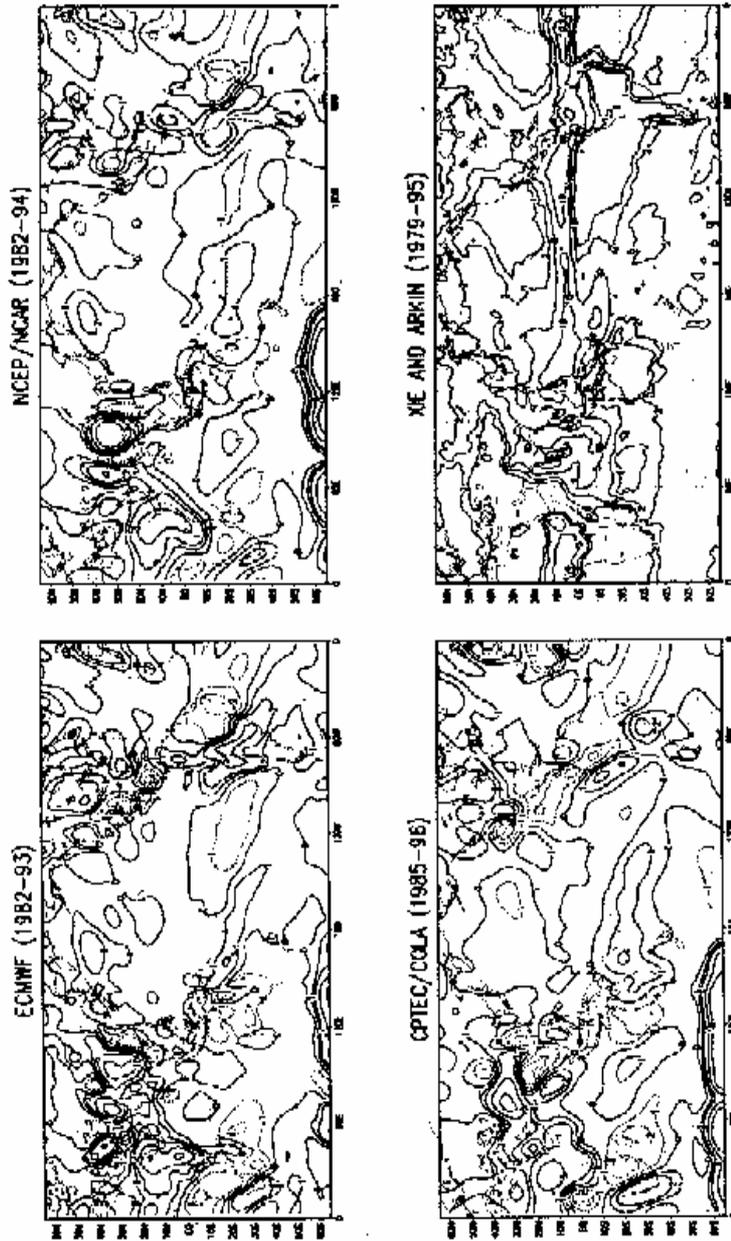


Figura 4: Como na figura 2, mas para julho.

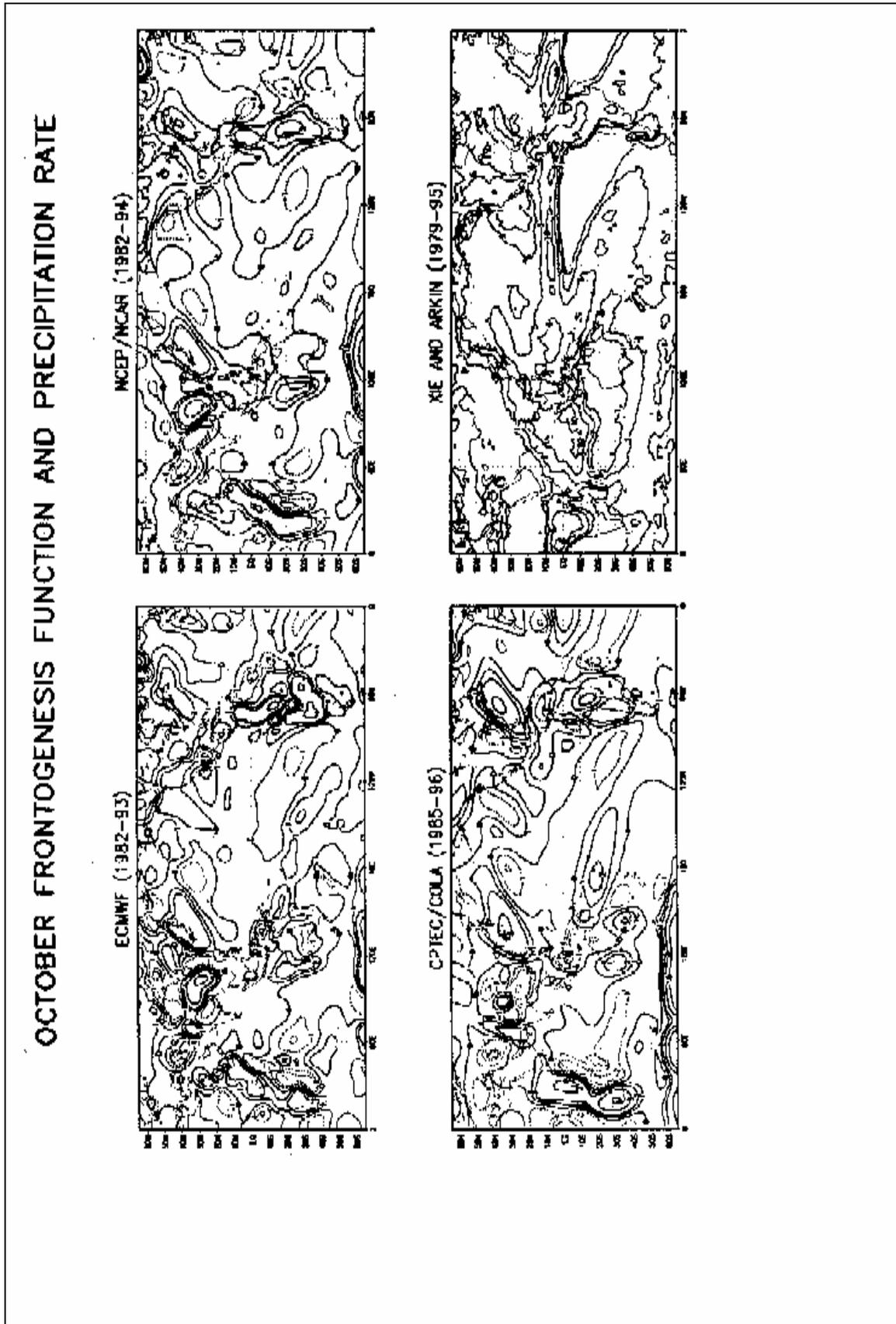


Figura 5: Como na figura 2, mas para outubro.

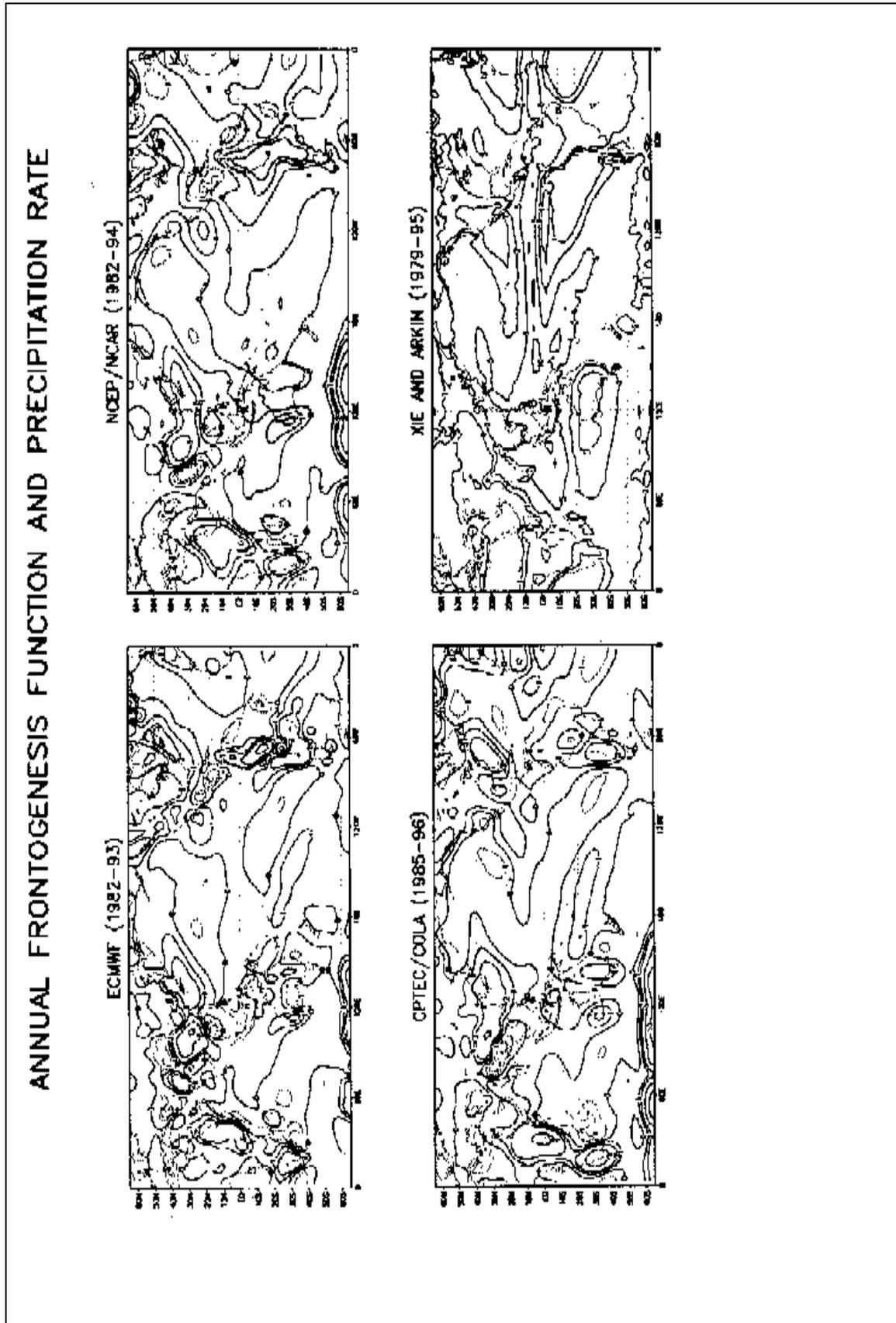


Figura 6: Como na figura 2, mas para média anual.

- a) Para jan. (verão do HS), todas as reanálises apresentam máximo sobre a Patagônia ($F > 5 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$) e sobre a Região Sudeste do Brasil ($F > 2 \cdot 10^{-9} \text{ K/ms}$); sendo esta coincidente ao máximo de taxa de precipitação (R) sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ($R > 5 \text{ mm/dia}$), conforme Xie e Arkin (1979-95);
- b) Em abr (outono do HS), o ECMWF mostra $F > 5 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ sobre a Região Sul do Brasil, correspondendo à $R > 5 \text{ mm/dia}$;
- c) Todas as reanálises posicionam em jul. (inverno do HS) $F > 2 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K/ms}$ na mesma Região e a $R > 2 \text{ mm/dia}$ correspondente estende-se a leste das Regiões Sudeste e Nordeste, demonstrando gradiente zonal de θ_z entre o continente frio e o oceano aquecido pela Corrente do Brasil, favorecendo o desenvolvimento de SC na Região Sul e de células convectivas a leste das Regiões Sudeste e Nordeste;
- d) O aumento significativo de F no mês de out. (primavera do HS), no interior do continente ($F > 5 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$) nas reanálises do NCEP/NCAR e do ECMWF) acarreta condições propícias ao retorno do padrão ZCAS de $R > 5 \text{ mm/dia}$, em Xie e Arkin;
- e) Linhas de contorno de $F > 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e de $R > 2 \text{ mm/dia}$ na média anual sobre o Brasil, concordantes entre si, deduz efeito de aumento em R pela presença de frontogênese em uma região largamente estendida do noroeste da América do Sul para o Atlântico Sul, segundo um eixo NW-SE.

5 DINÂMICA DE FRENTE OBSERVADA DO TIPO I

Satyamurty et al. (2001) examinaram um evento de friagem precoce ocorrido no sul do Brasil, inclusive ocorrendo queda de neve no planalto catarinense/gaúcho no dia 17/abr./1999. Gráfico descrito em seção anterior dá frequência para abril de frente (causadora de friagem) de tipo I aumentando bruscamente. Intensa advecção fria para norte não pode ser explicada somente por entrada de um anticiclone migratório frio em trajetória continental; mas também por simultânea ciclogênese sobre o Atlântico Sul Subtropical, nas imediações do litoral da Região Sul. Decorre daí intensificação do gradiente zonal de pressão ao nível médio do mar, aumento na velocidade de deslocamento da massa de ar frio, por meio do vento meridional geostrófico, na área entre anticiclone e ciclone extratropical em formação.

A situação sinótica favorece desenvolvimento de SC (baroclinia causada por ar frio situado a oeste do ar aquecido por Corrente do Brasil). Divergência do vetor Q equivale a velocidade vertical quasegeostrófica (ω) e portanto, F e ω em latitude média/alta são intimamente relacionadas. Este mecanismo explica a existência da circulação térmica direta em região de $F > 0$ e da indireta onde $F < 0$. Em uma atmosfera estavelmente estratificada (θ aumentando com a altura) a circulação vertical térmica direta é frontolítica e portanto a frontogênese pelo campo cinemático horizontal afeta mais as regiões onde não há esse efeito frontolítico.

6 DINÂMICA DE FRENTE OBSERVADA DO TIPO IV

Houve uma série de frentes ocorrida na América do Sul, no início de dez/2001. O ritmo de chegada de novas frentes confirma aumento de frequência frontal para dez., conforme a Figura 1. As Figuras 7-9 objetivam mostrar como uma mesma série de frentes descrita nas imagens de satélite GOES (não mostradas) pode ser analisada com o auxílio de VPI, para diagnosticar SC, em toda a espessura da troposfera, desde que se escolha a camada isentrópica mais adequada (307 a 330 K). Esse cuidado requerido para o campo isobárico mostra também onde a tropopausa dinâmica permite criar reservatório de ar estratosférico, dentro da troposfera. Este é o local de onde se origina advecção fria pelo vento geostrófico meridional nas latitudes médias.

Erthel Isentropic Potential Vorticity (PVU) and Isobars (hPa).

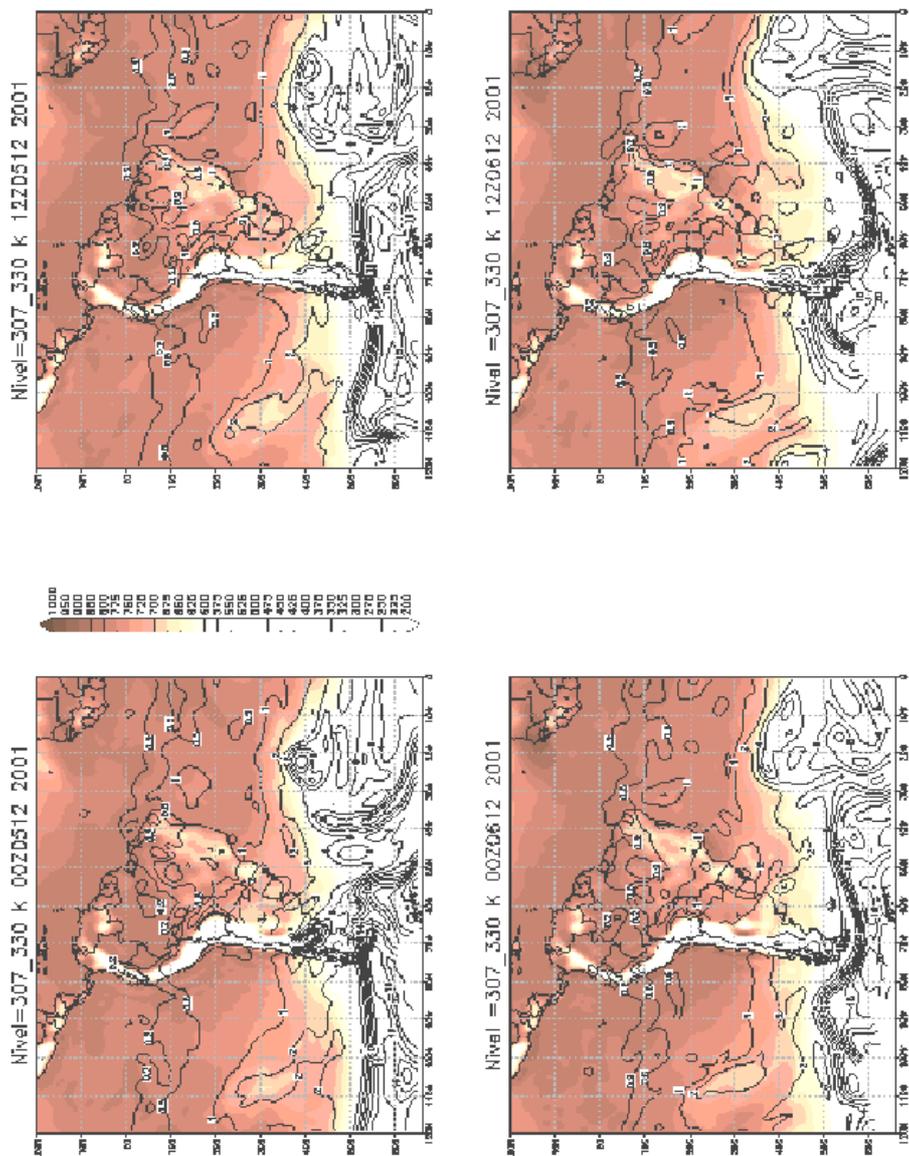


Figura 9: Como na Figura 7, mas de 00Z05122001 a 12Z06122001.

A VPI em $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ S}^{-1} \text{ K Kg}^{-1} \text{ UPV}$ de intervalo de contorno, descreve "stormtrack" do SC no verão do HS na seqüência. As Figuras 10-12 mostram a mesma seqüência nos campos frontogenético e frontolítico, correspondentes ao "stormtrack" do SC no período.

Isentropic Frontogenetic Function by Q-vector ($K/ms \ 1e-9$).

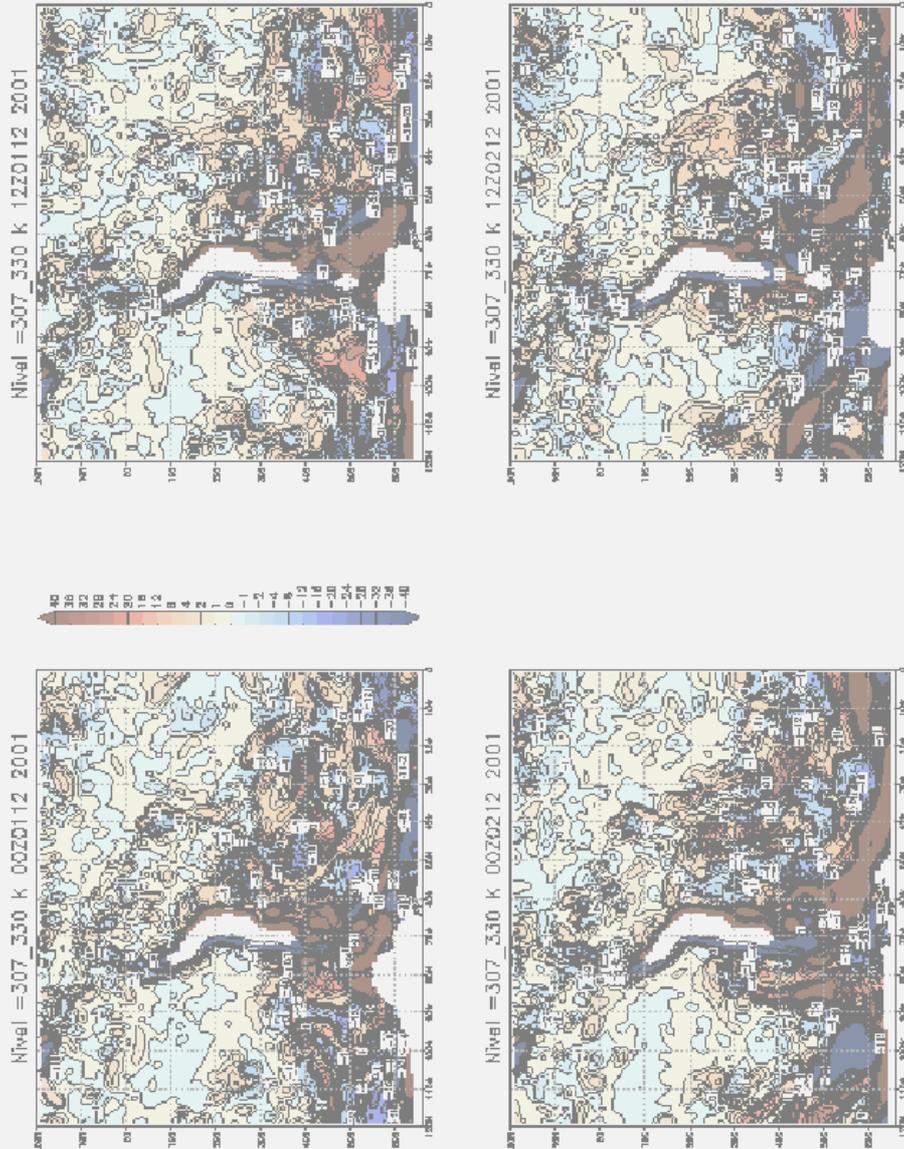


Figura 10: Campo função frontogenética pelo vetor Q , camada isentrópica 307-330 K, entre os dias 00Z01122001 e 12Z02122001.

Isentropic Frontogenetic Function by Q-vector ($K/ms \ 1e-9$).

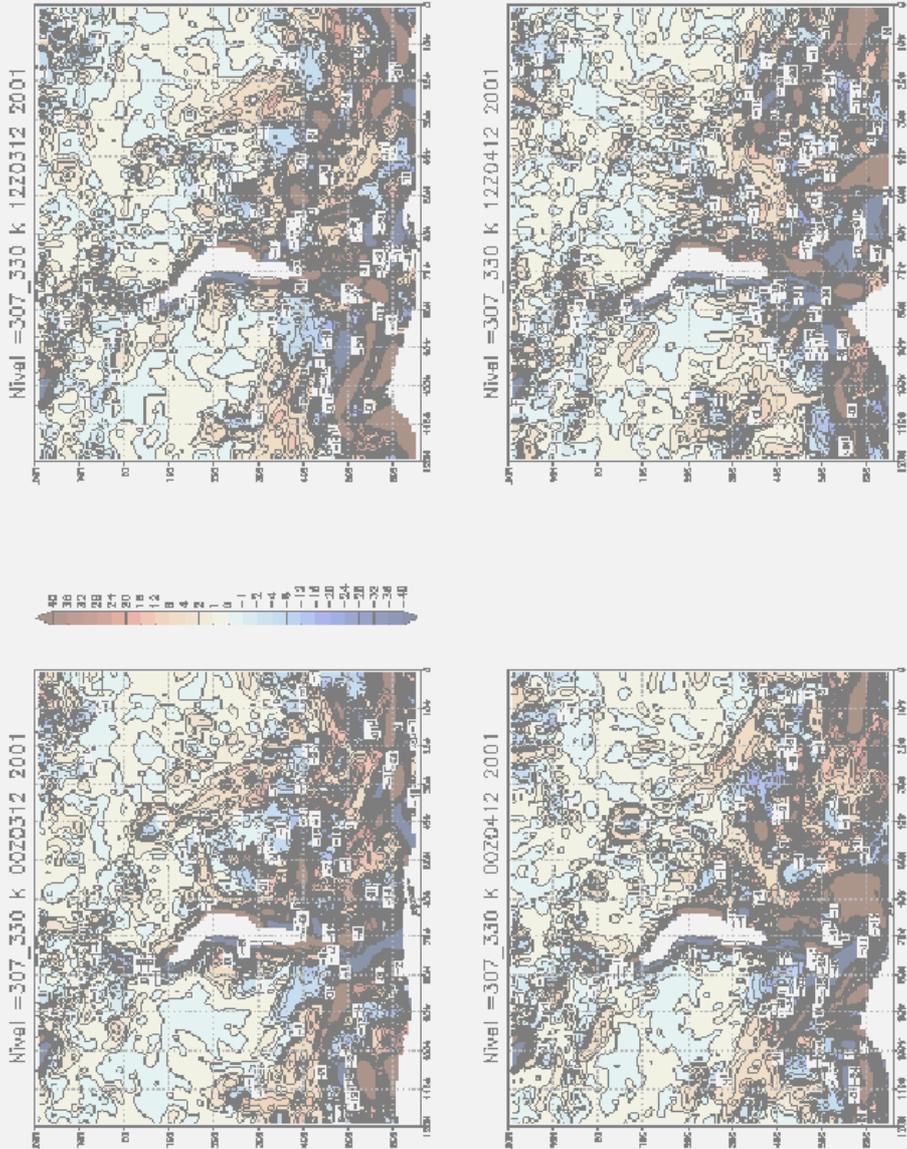


Figura 11: Como na Figura 10, mas para os dias de 00Z03122001 a 12Z04122001.

Isentropic Frontogenetic Function by Q-vector ($K/ms \ 1e-9$).

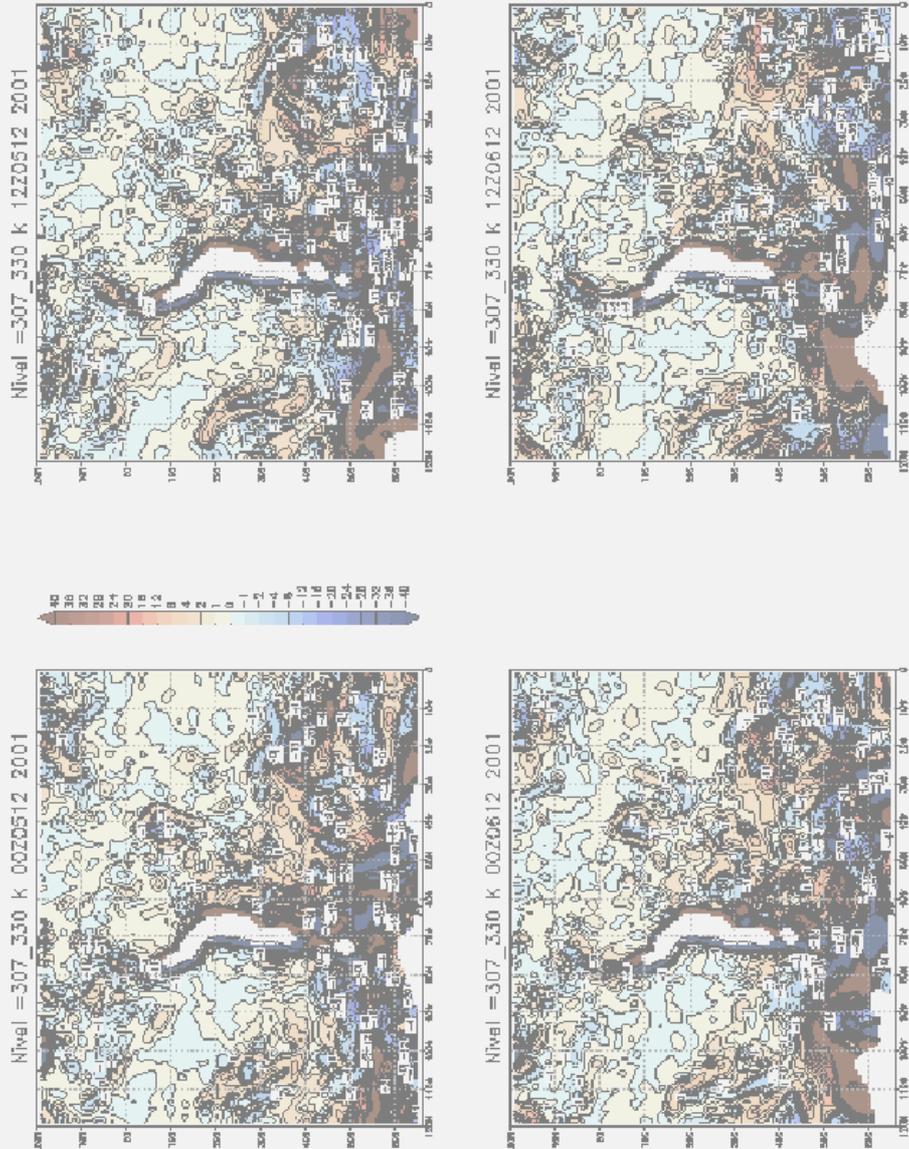


Figura 12: Como na Figura 10, mas para os dias de 00Z05122001 a 12Z06122001.

7 CONCLUSÕES

Relação causa-efeito de frente com SC pôde ser verificada comparando-se a VPI através de toda a troposfera, com F em função do vetor Q e da temperatura potencial equivalente. VPI e tropopausa dinâmica são relacionadas entre si conforme mostra o campo isobárico das Figuras 7-9. F isentrópica nas latitudes médias descreve o papel frontogenético das bandas definidas pelo “ stormtrack” do SC.

Rastreamento dos sistemas ciclônicos e das frentes, desde o oceano Pacífico Sul central e leste, em consequência, permite prognosticar entrada de frente e de SC no continente Sul Americano. Permite até mesmo diagnosticar se a frente é do tipo I, II, III ou IV; como definida na Figura 1.

8 REFERÊNCIAS

- Bergeron T.. 1928. Uber die dreidimensional verknupfende wetteranalyse. Geofys. Publik., 5(6), 1-111.
- Bluestein H. B.. 1993. Synoptic-Dynamic Meteorology Vol 1 and II Oxford University Press, New York, 431pp and 594pp.
- Boyle J. S.; Bosart L. F.. 1986. Cyclone-anticyclone couplets over North América. Part II: Analysis of a major cyclone event over the eastern United States. Mon. Wca. Rev., 114, 2432-2465.
- Browning K. A.. 1985. Conceptual models of precipitation systems. Meteor. Mag., 114, 293-319.
- Browning K. A.; Roberts N. M.; Illingworth A. J. 1987. Mesoscale analysis of the activation of a cold front during cyclogenesis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123, 2349-2375.
- Browning K. A.. 1997. Mesoscale aspects of extratropical cyclones: an observational perspective. In: Bergen post-conference book. Ed. M. Shapiro., AMS, Boston, Mass. (In press).
- Caibete N. O.. 2001. Comunicação pessoal.
- Charney J. G.. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. J. Meteor., 4, 135-162.
- 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. J. Atmos. Sci., 56, 2081-2100.
- Eady E. T.. 1949. Long waves and cyclone waves. Tellus, 1, 33-52.
- Eiiassen A.. 1962. On the vertical circulation in frontal zones. V. Bjerknæs Cent. Vol. Geofys. Publikasjoner, Norske Videnskaps-Akad., Oslo, 24, 147-160.
- Emanuel K. A.; Rotunno R.. 1989. Polar lows as Arctic hurricanes. Tellus, 41A, 1-17.
- Fox A. D.. 1982. vertical structure and dynamics of mesoscale wave disturbance (MWD) inferred from COES satellite imagery and ground truth data. 9th Conference weather forecasting and analysis, Seattle, Wash., Am. Meteorol. Soc. Boston, Mass., 152-159.
- Garreaud R. D.; Wallace J. M.. 1997. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. Mon. Wea. Rev., 125, 3157-3171.
- Garreaud R. D.. 1999. Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. Mon. Wea. Rev., 127, 901-921.
- Glickman et al., 1977; Goddard J. W. F.; Eastment J. D.; Thurai M.. 1994. The Chilbolton advanced meteorological radar: a tool for multi-disciplinary research. Electronics and Communications Engineering J., 6, 77-86.
- Holton J. R.. 1979. An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, New York, (first edition) 391pp.
- Holton J. R.. 1992. An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, New York, (third edition) 511pp.
- Hoskins B. J.; Draghichi I.; Davies H. C.. 1978. A new look at the omega equation. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 104, 31-38.

- Kousky V. E.. 1979. Frontal influences on Northeast Brazil. *Mon. Wea. Rev.*, 107(9), 1140-1153.
- Kreitzberg C. W.; Brown H. A.. 1970. Mesoscale weather systems within an occlusion. *J. Appl. Meteor.*, 9, 417-432.
- Krishnamurty T. N.; Tewari I.W.; Chakraborty D. R.; Marengo J., Silva Dias P. L.; Satyamurty P.. 1999. Downstream amplification: a possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. *Wea. Forec.*, 14(4), 242-270.
- Kuo H. L. 1949. Dynamic instability of a two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. *J. Meteor.*, 6, 105-22.
- Lemos C. F.. 2001. Comunicação pessoal.
- Mattos L. F.. 1988. O papel de deformação horizontal na frontogênese na região Sul brasileira. INPE-4469- TDL/322, São José dos Campos, INPE
- Mattos L. F.; Veiga J. A. P.; Mendonça R. W. B.; Ferreira N. J.. 2000. Estudo de caso de precipitação intensa no Paraguai em 28/04/2000. Submitted.
- Mattos L. F.; Satyamurty P.. 2001. Climatological low level frontogenesis as seen from the reanalysis data. Submitted.
- Pesquero J. F.. 2001. Um estudo de avaliação estatística do modelo global do CPTEC com relação ao número, trajetória e intensidade de ciclones e anticiclones para o Hemisfério Sul. in press, São José dos Campos INPE.
- Petterssen S.. 1956. *Weather Analysis and Forecasting Vol I, motion and motion systems*. McCraw-Hill, New York.
- Rasmussen E.. 1985. A case study of a polar low development over the Barents Sea. *Tellus*, 37A, 407-18.
- Robertson A. W.; Mechoso O. R.. 2000. Interannual and interdecadal variability of the South Atlantic Convergence Zone. *Mon. Wea. Rev.*, 128(8), 2947-2957.
- Saarikivi P.; Puhakka T.. 1990. The structure and evolution of a wintertime occluded front. *Tellus*. 47A, 122-139.
- Sanders, F.. 1971. Analytic solutions of the non-linear omega and vorticity equation for a structurally simple model of disturbances in the baroclinic westerlies. *Mon. Wea. Rev.*, 99, 393-407.
- Sanders F.; Gyakum J.R.. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the 'bomb'. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1589-1606.
- Satyamurty P.; Mattos L. F.. 1989. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 117(6), 1355-1364.
- Satyamurty P.; Fonseca J. F. B.; Bottino M. J.; Seluchi M. E.; Lourenço M. C. M.; Gonçalves L. G. G.. 2001. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. *Meteorol. Appl.*, 8, 1-16.
- Shapiro M. A.; Keyser D.. 1990. Fronts, jet streams and the tropopause. in *Extratropical cyclones*. Eds. C. W. Newton and E. O. Holopainen. *Am. Meteorol. Soc.*, Boston, Mass., 167-191.
- Simmonds I.; Keay K.. 2000. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis. *J. Clim.*, 13, 873-885.
- Starr V. P.. 1968. *The Physics of Negative Viscosity Phenomena*. McGraw-Hill, New York.
- Trenberth K. E.. 1978. On the interpretation of the diagnostic quasigeostrophic omega equation. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 131-137.
- Vera C. S.; Vighiarolo P. K.. 2000. A Diagnostic Study of Cold-Air Outbreaks over South America. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3-24.
- Zishka K. M.; Smith P. J.. 1980. The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July 1950-1957. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 387-401.