



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE – 5682 – TDI / 568

**ESTUDO DE CASOS DE CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DE
SANTA CATARINA.**

Dirceu Luís Severo

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, orientada pelos Drs. Manoel Alonso Gan e Nelson de Jesus Ferreira, aprovada em setembro de 1994.

INPE
São José dos Campos
1994

551.5(816.4)

SEVERO, D.L.

Estudo de casos de chuvas intensas no Estado de Santa Catarina
/ D.L. Severo. - São José dos Campos : INPE, 1994. 118p. -
(INPE-5682-TDI/568)

1. Chuvas. 2. Vale do Itajaí. 3. Meteorologia. I. Título

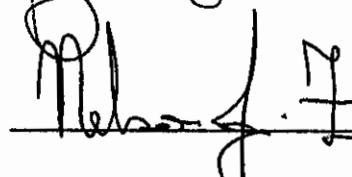
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Meteorologia

Dra. Mary Toshie Kayano



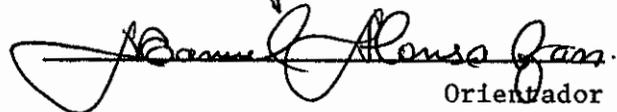
Presidente

Dr. Nelson Jesus Ferreira



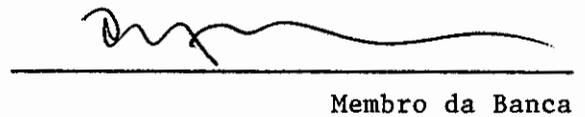
Orientador

Dr. Manoel Alonso Gan



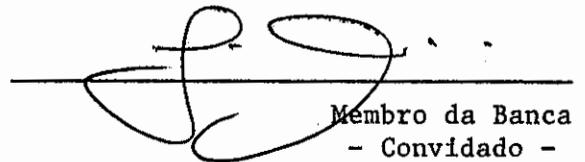
Orientador

Dr. Prakky Satyamurty



Membro da Banca

Dr. Tércio Ambrizzi



Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Dirceu Luis Severo

São José dos Campos, 05 de setembro de 1994

À minha querida esposa Ivone,
pela paciência e incentivo nas
horas mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos Drs. Manoel Alonso Gan e Nelson de Jesus Ferreira, pela valiosa orientação e presença constante durante toda a realização deste trabalho;

Aos membros da banca examinadora pelas críticas e sugestões;

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela oportunidade de realização deste trabalho;

À Universidade Regional de Blumenau, pela liberação de minhas atividades para efetuar este Curso;

Aos amigos de todas as horas e a todos aqueles que de alguma forma estiveram presentes.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xxi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Aspectos Teóricos.....	6
2.1.1 - A importância das correntes de jato.....	7
2.1.2 - Instabilidades Explosivas (IEs).....	10
2.2 - Aspectos Observacionais.....	12
CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA.....	23
3.1 - Dados.....	23
3.1.1 - Critério de escolha dos episódios.....	27
3.2 - Metodologia.....	27
3.2.1 - Velocidade Vertical.....	28
3.2.2 - Vorticidade.....	30
3.2.3 - Advecção de Temperatura.....	30
3.2.4 - Temperatura Potencial Equivalente (Teta-E)...	31
CAPÍTULO 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS EPISÓDIOS.....	33
4.1 - Grupo 1 - Sistema Frontal Estacionário na região Sul com vórtice ciclônico no Nordeste do Brasil.....	34
4.2 - Grupo 2 - Vórtice ciclônico nos altos níveis próximo da região Sul do Brasil.....	39

4.3 - Grupo 3 - Corrente de jato com curvatura anti-ciclônica.....	43
4.4 - Grupo 4 - Difluência no escoamento zonal nos altos níveis.....	46
4.5 - Grupo 5 - Sistema frontal retrocedendo para a região Sul como frente quente.....	50
4.6 - Comentários Gerais	54
CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASOS.....	57
5.1 - Primeiro caso: 19 a 21 de dezembro de 1980.....	57
5.1.1 - Principais aspectos sinóticos.....	59
5.1.2 - Comentários Gerais.....	75
5.2 - Segundo Caso: 22 a 24 de setembro de 1983.....	75
5.2.1 - Principais aspectos sinóticos.....	77
5.2.2 - Comentários Gerais.....	87
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Esquema do início de uma tempestade severa na região Sul dos E.U.A.....	6
2.2 - (a) Esquema da circulação em torno de um jato no plano horizontal na alta troposfera. (b) e (c) esquema das circulações verticais direta e indireta nas regiões de entrada (corte BB') e saída (corte AA') de um c.v.m	9
2.3 - Configuração de estabilidade que inicia a intensa precipitação em SCEs.....	12
2.4 - Circulação em uma célula de tempestade em seu estágio maduro.....	13
2.5 - Configuração típica em superfície (a), 850 hPa (b) e 500 hPa (c) para o episódio do tipo meso-alta.....	16
2.6 - Configuração típica em superfície (a), 850 hPa (b) e 500 hPa (c) para o episódio do tipo frontal.....	18
3.1 - Localização dos postos pluviométricos dentro da bacia do rio Itajaí-Açú.....	24
3.2 - Mapa da Região Sul do Brasil com a localização da bacia do rio Itajaí-Açú.....	25
4.1 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 1.....	35
4.2 - Idem à Figura 4.1 só que para a fase madura....	35
4.3 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 2.....	40
4.4 - Idem à Figura 4.3 só que para a fase madura....	40
4.5 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 3.....	43
4.6 - Idem à Figura 4.5 só que para a fase madura....	44

4.7 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 4.....	47
4.8 - Idem à Figura 4.7 só que para a fase madura....	47
4.9 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 5.....	51
4.10 - Idem à Figura 4.9 só que para a fase madura...	51
4.11- Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial do caso 11.....	55
4.12 - Idem à Figura 4.11 só que para a fase madura..	55
5.1 - Mapa de isoietas referente aos dias 19 a 21 de dezembro de 1980.....	58
5.2 - Imagens do satélite GOES no canal infravermelho	60
5.3 - Escoamento horizontal e isotacas, Teta-e, Divergência e Advecção de temperatura para 850 hPa em 19 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	64
5.4 - Escoamento horizontal e isotacas e Divergência para 300 hPa e Advecção de temperatura e de vorticidade para 500 hPa em 19 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	66
5.5 - Escoamento horizontal e isotacas, Teta-e, Divergência e Advecção de temperatura para 850 hPa em 20 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	68
5.6 - Escoamento horizontal e isotacas e Divergência para 300 hPa e Advecção de temperatura e de vorticidade para 500 hPa em 20 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	70
5.7 - Escoamento horizontal e isotacas, Teta-e, Divergência e Advecção de temperatura para 850 hPa em 21 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	72
5.8 - Escoamento horizontal e isotacas e Divergência para 300 hPa e Advecção de temperatura e de vorticidade para 500 hPa em 21 de dezembro de 1980 - 12:00 TMG.....	74
5.9 - Mapa de isoietas referente aos dias 23 e 24 de setembro de 1983.....	76
5.10 -Imagens do satélite GOES no canal infravermelho.	78

5.11-	Escoamento horizontal e isotacas, Teta-e, Advecção de temperatura e Movimento vertical para 850 hPa em 22 de setembro de 1983 às 12:00 TMG.....	81
5.12-	Escoamento horizontal e isotacas e Movimento vertical para 300 hPa e Advecção de temperatura e de vorticidade para 500 hPa em 22 de setembro de 1983 às 12:00 TMG.....	83
5.13-	Escoamento horizontal e isotacas, Teta-e, Advecção de temperatura e Movimento vertical para 850 hPa em 23 de setembro de 1983 às 12:00 TMG.....	85
5.14-	Escoamento horizontal e isotacas e Movimento vertical para 300 hPa e Advecção de temperatura e de vorticidade para 500 hPa em 23 de setembro de 1983 às 12:00 TMG.....	87



LISTA DE TABELAS

	Pág.
3.1 - Episódios de chuvas intensas e precipitação média na região do Vale do Itajaí.....	26
4.1 - Resumo das características sinóticas em superfície e em 850 hPa para o Grupo 1.....	37
4.2 - Resumo das características sinóticas em 300 hPa para o Grupo 1.....	38
4.3 - Resumo das características sinóticas em superfície e em 850 hPa para o Grupo 2.....	42
4.4 - Resumo das características sinóticas em 300 hPa para o Grupo 2.....	42
4.5 - Resumo das características sinóticas em superfície e em 850 hPa para o Grupo 3.....	45
4.6 - Resumo das características sinóticas em 300 hPa para o Grupo 3.....	46
4.7 - Resumo das características sinóticas em superfície e em 850 hPa para o Grupo 4.....	49
4.8 - Resumo das características sinóticas em 300 hPa para o Grupo 4.....	50
4.9 - Resumo das características sinóticas em superfície e em 850 hPa para o Grupo 5.....	53
4.10 - Resumo das características sinóticas em 300 hPa para o Grupo 5.....	53

LISTA DE SIMBOLOS

a	- raio médio da Terra = 6.365E+6 m
hPa	- hecto Pascal = 10 ² Pascal
K	- Índice de Instabilidade
r	- Razão de Mistura, g.kg ⁻¹
Re	- Resíduo, hPa.s ⁻¹
T	- Temperatura, °C
T _K	- Temperatura Absoluta, K
T _L	- Temperatura do Nível de Condensação por Levantamento, K
T _d	- Temperatura do Ponto de Orvalho, K
t	- tempo, s
u	- Componente Zonal do Vento , m.s ⁻¹
v	- Componente Meridional do Vento, m.s ⁻¹
W	- Vetor Vento
x	- Eixo de Coordenadas Retilíneas
y	- Eixo de Coordenadas Retilíneas
z	- Eixo de Coordenadas Retilíneas
θ _e	- Temperatura Potencial Equivalente, °C
ω	- Velocidade Vertical, hPa.s ⁻¹
φ	- Latitude, graus
λ	- Longitude, graus
ζ	- Componente Vertical da Vorticidade, s ⁻¹
Δp _{total}	- Variação da Pressão entre 1000 e 200 hPa, hPa
∇.V _i	- Divergência em um nível de pressão i, s ⁻¹
∇.V _i [*]	- Divergência Ajustada ao Nível de Pressão i, s ⁻¹ .

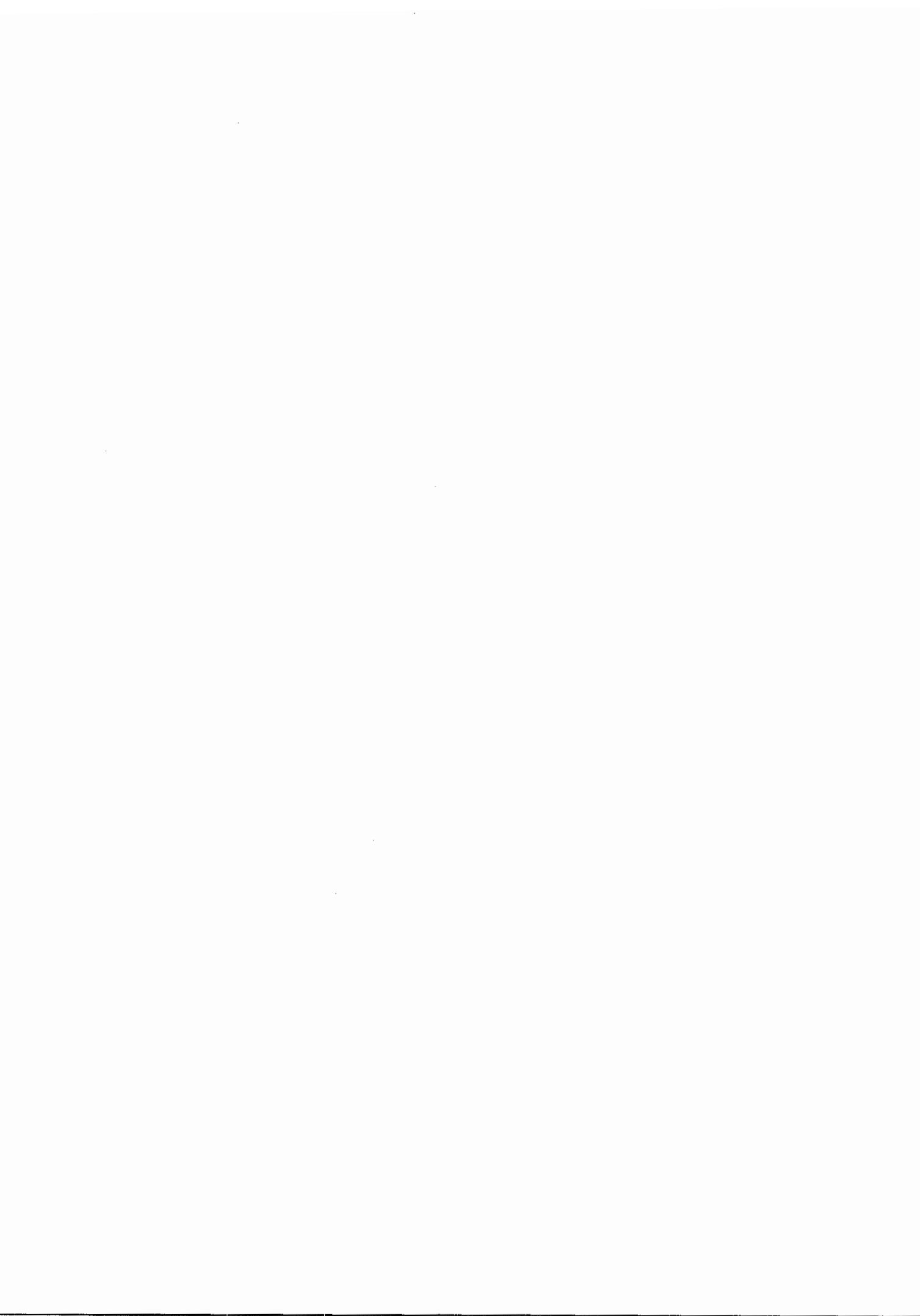


LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

B1, B2	- Sistemas de Baixa Pressão
BA	- Bahia
C1	- Cavado em 300 hPa
C3	- Vórtice Ciclônico em 300 hPa
C8	- Vórtice Ciclônico em 850 hPa
CB	- Cumulonimbus
CCM	- Complexo Convectivo de Mesoescala
CELESC	- Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.
CVM	- Centro de Velocidades Máximas
DNAEE	- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EUA	- Estados Unidos da América
ES	- Espírito Santo
FURB	- Fundação Universidade Regional de Blumenau
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
GO	- Goiás
JAN	- Jato nos Altos Níveis
JBN	- Jato nos Baixos Níveis
HN	- Hemisfério Norte
HS	- Hemisfério Sul
IAE	- Instituto de Atividades Espaciais
IE	- Instabilidade Explosiva
INPE	- Instituto de Pesquisas Espaciais
INEMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
IPA	- Instituto de Pesquisas Ambientais
NCAR	- National Center for Atmospheric Research
MG	- Minas Gerais
MS	- Mato Grosso do Sul
MT	- Mato Grosso
NMC	- National Meteorological Center
PR	- Paraná
RS	- Rio Grande do Sul
SC	- Santa Catarina
SCE	- Sistema de Ciclones Extratropicais
SCM	- Sistema Convectivo de Mesoescala

RESUMO

A finalidade deste estudo é identificar e determinar as características dos sistemas meteorológicos que produzem chuvas intensas no Vale do Itajaí (SC), as quais eventualmente provocam enchentes. É realizado um estudo de 21 casos, selecionados a partir da precipitação diária registrada na bacia do rio Itajaí. São utilizadas cartas de superfície, imagens de satélite e dados de altitude em pontos de grade. Cada um dos casos é dividido em fase inicial e madura de acordo com o desenvolvimento do sistema sinótico. Com estes dados e outros parâmetros derivados, são identificados os sistemas sinóticos na baixa e alta troposfera. Esses sistemas são agrupados de acordo com configurações comuns, resultando em cinco grupos com situações diferentes que podem produzir chuvas intensas. O grupo 1, apresenta um sistema frontal estacionário sobre a Região Sul, às vezes ondulando no oeste de Santa Catarina. A permanência deste sistema frontal sobre a Região Sul está associada à presença de um vórtice ciclônico nos altos níveis da Região Nordeste que parece bloquear o seu deslocamento. No grupo 2, um vórtice ciclônico nos altos níveis cruza os Andes e aproxima-se da Região Sul, gerando as chuvas, principalmente à noite. No grupo 3 observou-se uma corrente de jato com curvatura anticiclônica passando sobre o Rio Grande do Sul. Esta corrente de jato induz movimentos verticais nas regiões de entrada e saída do centro de velocidades máximas nos altos níveis, onde são criadas circulações transversais que favorecem o desenvolvimento convectivo. No grupo 4, ocorre intensa difluência no escoamento zonal dos altos níveis durante a fase madura de desenvolvimento dos episódios. No grupo 5, um sistema frontal passa pela Região Sul e retrocede como frente quente, estacionando sobre Santa Catarina e Paraná. Conforme a frente quente aproxima-se, a convecção é intensificada podendo haver frontogênese. Nos baixos níveis, para a maioria dos episódios, a presença de um fluxo de ar úmido que se origina no Brasil Central, é a fonte alimentadora da convecção que é disparada quando mecanismos dinâmicos, tais como sistemas frontais e vórtices ciclônicos aproximam-se da Região Sul do Brasil.



CASE STUDY OF INTENSE RAINS IN THE SANTA CATARINA STATE

ABSTRACT

The objective of this study is to identify the characteristics of the meteorological systems which are responsible for the intense rains in the Valley of Itajaí (SC). In total 21 cases were selected using daily precipitation values, surface charts, satellite imagery and altitude date. Each case was divided into initial and mature stage according to its synoptic development. The identification of the synoptic systems at lower and upper troposphere was done using surface charts, wind fields, temperature, humidity and geopotential altitude along with some other derived meteorological parameters. These synoptic systems were classified according to their common characteristics giving rise to five different groups. Group 1, shows a stationary frontal system over Santa Catarina and Rio Grande do Sul states, sometimes oscillating on the west of Santa Catarina. The permanence of this frontal system over the Southern Brazil is related with a cyclonic vortex at upper levels in the Northeast Brazil. Apparently, this vortex seems to block the frontal system. Group 2 shows a cyclonic vortex at upper levels in the vicinity of Southern Brazil, producing rains, principally at night. In Group 3, a jet stream was observed with an anticyclonic curvature passing south of Southern Brazil. This jet induces vertical movement in the regions of entrance and exit of a jet streak at upper levels where transverse circulation is created. In Group 4, an intense diffluence occurs in the zonal flow at upper levels during the mature stage. In Group 5, a frontal system passes through Southern Brazil and returns as a warm front e remains stationed over Santa Catarina e Paraná states. As this front approximate of Southern Brazil, the convection becomes enhanced and in some cases develop frontogenesys. At lower levels, in most of the cases, the presence of a flux of air warm and humid originating in Central Brazil, is a feeding font for convection which is triggering when some dynamic mechanisms, such as frontal systems end cyclonic vortex approach of Southern Brazil.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Frequentemente, a região do Vale do Itajaí em Santa Catarina, é afetada por sistemas de tempo que geram chuvas intensas. Em tais situações, diversos setores da economia e da sociedade em geral sofrem prejuízos incalculáveis.

O Vale do Itajaí é um dos pólos econômicos da Região Sul do Brasil e o maior do estado de Santa Catarina. Ele está situado dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí, cuja distribuição pluviométrica concentra a maior parte da precipitação nos meses de verão (cerca de 33 % do acumulado anual). Porém, mesmo em outras épocas do ano, esta região é atingida por sistemas meteorológicos adversos que produzem grandes quantidades de precipitação.

Diversos estudos têm sido realizados para investigar os sistemas meteorológicos que atuam na Região Sul e Sudeste do Brasil, tais como: linhas de instabilidade (Cavalcanti et al, 1982), vórtices ciclônicos dos altos e médios níveis (Sakuragy, 1992; Dall'Antonio Jr. e Silva Dias, 1990), sistemas convectivos de mesoescala (Guedes e Silva Dias, 1984 ; Sclar e Figueiredo, 1990), ciclones extratropicais (Ferreira, 1988; Gan e Rao, 1991), nuvens do tipo vírgula invertida (Bonatti e Rao, 1987) e sistemas frontais (Bertolossi, 1989). Entretanto, regionalmente pouco se sabe sobre os mecanismos físicos responsáveis pelas chuvas associadas a enchentes.

De acordo com Rockwood e Maddox (1988), um sistema de tempo que produz intensa precipitação, sempre está relacionado à atividade convectiva e é o resultado da

interação de mecanismos físicos de diferentes escalas. A evolução ou intensificação das tempestades convectivas é resultado da ação dos processos de escala sinótica. Já o início do seu desenvolvimento parece estar mais relacionado a processos de mesoescala. Desta forma, se as condições de grande escala não forem favoráveis à convecção intensa, mesmo assim ela pode ocorrer como resultado da ação de mecanismos de mesoescala. Porém, dificilmente esta convecção se transformará em um grande sistema de tempestades. Por outro lado, se a configuração de escala sinótica é favorável ao desenvolvimento convectivo, esta convecção provavelmente terá maior duração e estará envolvida em um sistema mais organizado e complexo.

Em suma, a formação de um ambiente favorável ao desenvolvimento de um sistema que gere chuvas intensas depende principalmente dos processos de escala sinótica que contribuem para desestabilizar o ambiente local, e de processos de escala menor, que fornecem as condições para o levantamento inicial. Desta forma, o conhecimento dos sistemas meteorológicos de escala sinótica e, se possível, de escala menor, atuantes sobre uma região durante a ocorrência de chuvas intensas e suas interações, é fundamental para a previsão de eventos futuros.

A principal motivação para a realização deste trabalho foi o pequeno número de estudos sobre os sistemas de tempo que atuam na Região Sul do Brasil e sua influência sobre a precipitação, principalmente no estado de Santa Catarina, e a necessidade de se aprimorar o conhecimento sobre estes tipos de sistemas.

Assim, este estudo tem por objetivo principal identificar os vários sistemas de escala sinótica e, quando possível, de escala menor, através do

estudo de casos de chuvas intensas na região do Vale do Itajaí. A partir deste estudo de casos são construídos modelos conceituais.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão de alguns estudos teóricos e observacionais realizados para os dois hemisférios que tenham relação com os objetivos deste trabalho. A metodologia adotada e os dados utilizados são descritos no capítulo 3. No capítulo 4 são apresentados os esquemas simplificados para os cinco tipos de configuração sinótica relacionada com chuvas intensas, observados no estudo de casos. No capítulo 5 são apresentados dois estudo de casos pertencentes a dois dos tipos de configuração obtidos no capítulo 4. Finalmente, no capítulo 6 são discutidos os resultados e apresentadas algumas propostas para a realização de estudos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das consequências mais dramáticas da ocorrência de chuvas intensas sobre uma determinada região são as inundações.

De acordo com o sistema sinótico presente na área atingida, as enchentes podem ter características diferentes. Se o sistema é de escala subsinótica e desloca-se rapidamente, a precipitação associada geralmente ocorre em grande intensidade e pode ocasionar as chamadas enchentes urbanas. Neste tipo de enchente, há um rápido crescimento do nível das águas pouco tempo após a ocorrência da precipitação. A gravidade das consequências depende principalmente da atuação do sistema de drenagem local.

Quando o sistema sinótico desloca-se mais lentamente, a precipitação associada geralmente não é muito intensa, porém contínua durante um período de tempo relativamente grande (até vários dias), embora possam ocorrer eventuais pancadas de chuvas. Neste caso, quando as características físicas (topográficas) da região permitirem, pode haver extravasamento da calha dos rios e, como consequência, a inundação de grandes áreas. O retorno dos rios aos seus níveis normais irá depender de vários fatores físicos da bacia hidrográfica, tais como o tempo e velocidade do escoamento das águas (Maddox e Chappel, 1978).

O objetivo deste capítulo é revisar alguns estudos relacionados aos aspectos teóricos e observacionais da origem e manutenção dos sistemas de

tempo responsáveis pelas chuvas que geram as enchentes descritas acima.

2.1 - ASPECTOS TEÓRICOS

Newton (1967), esquematizou as principais características de grande escala que, associadas a um ambiente favorável, podem desencadear tempestades severas com muita precipitação na região sul dos Estados Unidos da América (EUA). Este esquema é apresentado na Figura 2.1.

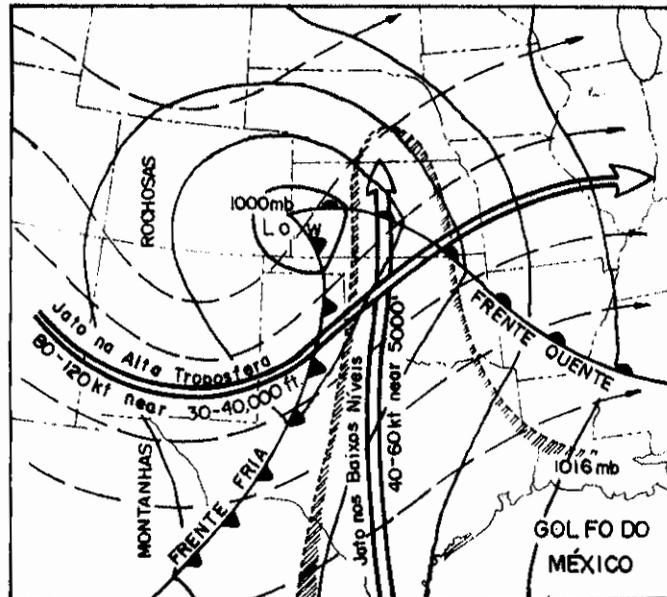


Fig. 2.1 - Esquema do início de uma tempestade severa na região sul dos EUA. Linhas sólidas são isóbaras; linhas tracejadas são isoípsas nos altos níveis. A área sombreada designa a língua de umidade nos baixos níveis. Adaptada de Newton (1967), p. 271.

A corrente de jato nos baixos níveis transporta ar quente e úmido água desde o Golfo do México até a região centro-sul dos EUA. Nos altos e médios níveis, fortes ventos provenientes da região oeste advectam ar frio e seco, por sobre o ar úmido, criando uma

camada de inversão que aumenta a instabilidade potencial. A região mais provável para o desenvolvimento de uma tempestade severa por este modelo, está na intersecção das duas correntes de jato e próximo ao lado oeste da língua de ar úmido. Dois fatores contribuem para o desenvolvimento convectivo nesta região: a instabilidade potencial e o forte cisalhamento vertical.

2.1.1 - A IMPORTÂNCIA DAS CORRENTES DE JATO

A estrutura das correntes de jato nos altos níveis (JAN) e, especialmente um centro de velocidades máximas (CVM), é extremamente importante para o desenvolvimento e a manutenção da convecção.

Funk (1991), revendo estudos de Beebe e Bates (1955), mostrou que a divergência nos altos níveis associada a um CVM em uma corrente de jato, produz movimento vertical ascendente nos quadrantes dianteiro esquerdo e traseiro direito do CVM, para o Hemisfério Norte (HN).

Uccellini e Johnson (1979) mostraram como a intensificação do jato nos baixos níveis (JBN) está acoplada pelo ajuste de massa à região de saída de um CVM nos altos níveis. Este acoplamento fornece uma explicação de como a variação na direção do vento com a altura pode desestabilizar convectivamente o ambiente pré-convectivo e forçar o transporte de umidade dos baixos níveis em direção à região de aumento da divergência nos altos níveis.

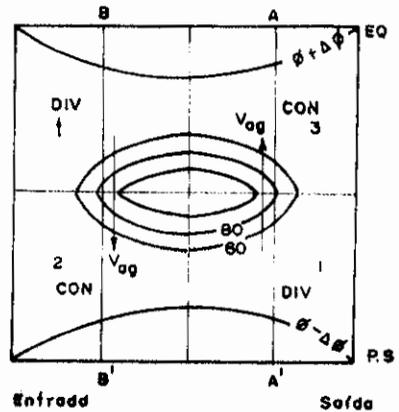
A principal função do JBN é transportar calor e umidade para a região favorável ao desenvolvimento das tempestades como por exemplo, a região central dos EUA (Uccellini, 1992). Este mecanismo também favorece o

desenvolvimento de sistemas convectivos de mesoescala na Região Sul da América do Sul (Guedes e Silva Dias, 1984).

O papel do JAN é advectar ar frio e seco para dentro da média e alta troposfera aumentando a divergência nos altos níveis, e transportar calor sensível para baixo a partir da região de atividade convectiva.

Fisicamente, a atuação de um JAN retílineo pode melhor ser entendida examinando-se a Figura 2.2. Aplicando a equação da energia cinética às regiões de aceleração e desaceleração, associadas respectivamente à entrada e saída do CVM, pode-se deduzir que deve surgir uma componente ageostrófica meridional, conforme indicado na Figura 2.2a. Na região de entrada do JAN, a confluência e o aumento do vento geostrófico (u_g) estão associados a uma componente ageostrófica dirigida para o lado ciclônico do CVM. Na região de saída, a difluência e a diminuição de u_g estão associadas a uma componente ageostrófica dirigida para o lado anticiclônico.

Abaixo da região de entrada do CVM, o transporte de massa nos altos níveis força o surgimento de uma componente ageostrófica dirigida para a direita da corrente (Figura 2.2b). Abaixo da região de saída do CVM, o mesmo transporte de massa provoca o aparecimento de uma componente ageostrófica dirigida para a esquerda da corrente. Essas componentes, na alta e baixa troposfera, representam as componentes transversais das circulações direta e indireta. Embebido no ramo inferior da circulação indireta, abaixo da região de saída pode surgir um JBN (Uccellini e Johnson, 1979).



(a)

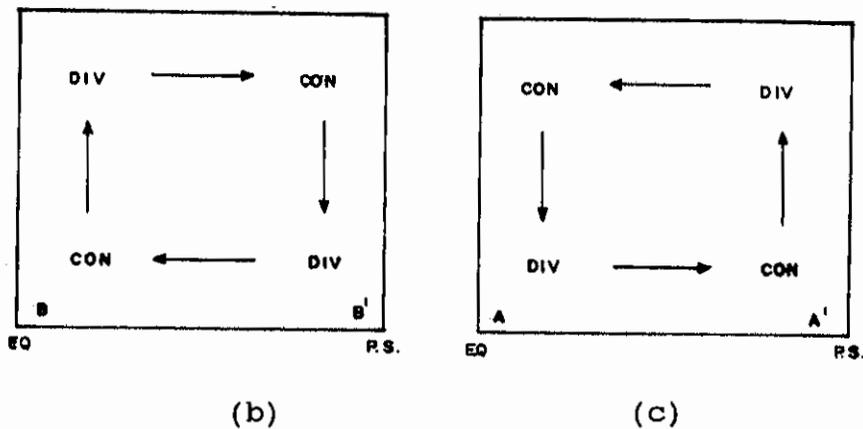


Fig. 2.2 - (a) Esquema de circulação em torno de um jato no plano horizontal na alta troposfera. (b) e (c) esquemas de circulações vertical direta e indireta nas regiões de entrada (corte BB') e saída (corte AA') de um c.v.m.. Adaptada de Uccellini (1992), p. 6.

Porém, para um JAN com curvatura os efeitos de divergência e convergência modificam-se. Se o CVM estiver na ponta de um cavado com muita curvatura os efeitos da difluência superam os da aceleração e há um aumento na divergência na dianteira direita e na convergência na traseira direita. Analogamente, se o CVM está na ponta de uma crista, a convergência e a divergência são mais desenvolvidas no lado equatorial do JAN (ambas as situações são para o Hemisfério Sul (HS)).

Em um estudo de casos de desenvolvimento de JBN na região central dos EUA, Uccellini (1980) encontrou que na maioria deles, a situação sinótica é caracterizada por jatos com CVM nos altos níveis, propagando-se das Montanhas Rochosas em direção às Grandes Planícies. Juntamente com o CVM há um aumento dos gradientes de pressão na superfície associados à ciclogênese ou com a formação de um cavado a sotavento das montanhas. Para estes casos foi observado que os JBNS, na maioria das vezes localizados na região de saída do JAN, estão dirigidos para o lado ciclônico do JAN e são bem definidos, persistentes e estendem-se além da camada limite planetária.

2.1.2 - INSTABILIDADES EXPLOSIVAS (IEs)

Seguindo uma linha um pouco diferente no estudo dos mecanismos geradores de chuvas intensas, Scofield (1990) definiu as chamadas "Instabilidades Explosivas" (IEs). As IEs são consideradas as principais responsáveis pela intensa precipitação que ocorre associada a sistemas de ciclones extratropicais (SCEs), porém também são observadas associadas a outros sistemas. Este fenômeno ocorre quando um forte escoamento em 850 hPa passa por sobre uma região com altos valores de temperatura potencial equivalente (Teta-e) ou quando um distúrbio nos altos níveis (ou uma corrente de jato) passa por sobre uma massa de ar instável.

As imagens de satélite, ilustram os padrões de nebulosidade de escala subsinótica ou de mesoescala, que se formam ou desenvolvem rapidamente e produzem intensa precipitação localizada (chuva ou neve), quando a massa de ar se desestabiliza rapidamente. Nestas imagens, as IEs aparecem como padrões de onda de escala sinótica,

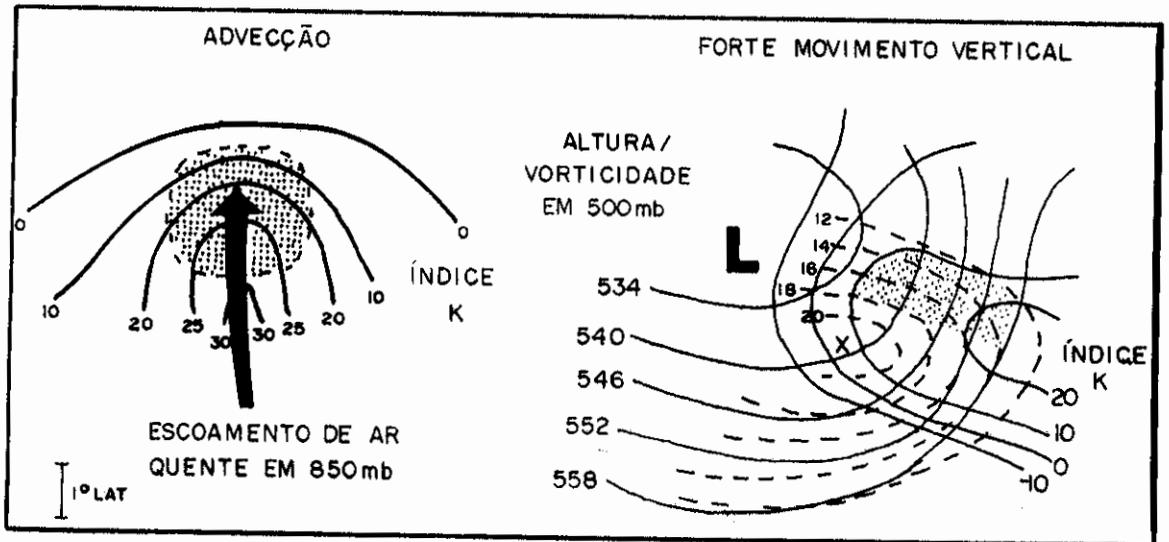
do tipo baroclínico ou em bandas de nuvens convectivas inseridas no conjunto da nebulosidade de um SCE. Normalmente estas nuvens convectivas crescem rapidamente e a temperatura no seu topo torna-se progressivamente mais fria, quando observada em uma imagem no canal do infravermelho. Essas características parecem surgir repentinamente ou "explodir" originando sistemas convectivos de mesoescala (SCM).

Em suma, as condições dinâmicas e termodinâmicas para a ocorrência de IEs em uma determinada região são as seguintes:

- 1) que haja advecção positiva de temperatura potencial equivalente ($T_{\theta-E}$), especialmente em 850 hPa;
- 2) que o máximo escoamento em 850 hPa seja dos maiores aos menores valores do índice de instabilidade K (Reap e Foster, 1975);
- 3) que ocorra forte movimento vertical ascendente sobre uma massa de ar úmida e bastante instável

Duas destas condições estão representadas na Figura 2.3.

Em 850 hPa o forte escoamento de ar quente dirige-se dos maiores aos menores valores do índice K (Figura 2.3a), enquanto que nos níveis médios (Figura 2.3b), há um intenso movimento vertical ascendente sobre a massa de ar instável.



(a)

(b)

Fig. 2.3 - Configuração de estabilidade que inicia as chuvas intensas em SCEs; as áreas pontilhadas representam a área de precipitação convectiva. Adaptada de Scofield (1990), p. 7.

2.2 - ASPECTOS OBSERVACIONAIS

Como discutido na seção anterior, o desenvolvimento de tempestades é o produto final de um conjunto de processos físicos, que assumem variados graus de importância. Diferentes tipos de tempestades podem se desenvolver sob diferentes condições ambientais. Desde células convectivas individuais de curta duração que se formam quase aleatoriamente, até sistemas de tempestades altamente organizados e de longa duração.

O ciclo de vida de uma célula individual é da ordem de 1h a 2h. No estágio de desenvolvimento, a nuvem está mais quente que o ar do ambiente, ou seja o ar da nuvem tem grande flutuabilidade. A corrente ascendente

(updraft) cresce com a altura, e a nuvem aumenta rapidamente até alturas onde a temperatura está abaixo do ponto de congelamento. Nesse meio tempo, grandes quantidades de gotículas, gotas de chuva e flocos de neve acumulam-se na nuvem. Eventualmente, a quantidade de água acumulada é tão grande que os elementos mais pesados não são mais suportados pelas correntes ascendentes e começam a cair.

A força de atrito exercida pela água que cai torna a corrente ascendente em descendente (downdraft), e uma forte precipitação indica o início do estágio maduro. Esta situação está apresentada na Figura 2.4.

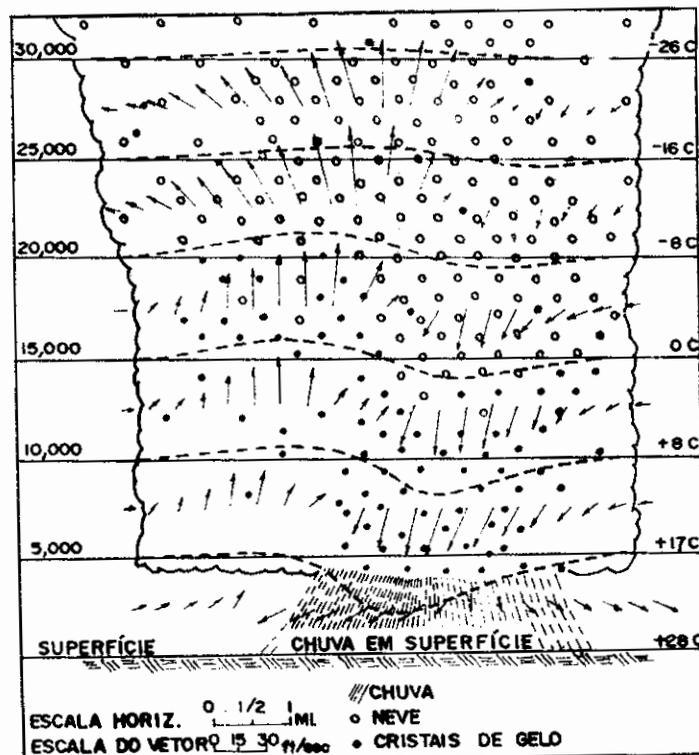


Fig. 2.4 - Circulação em uma célula de tempestade em seu estágio maduro.
 Adaptada de Newton (1967), p. 260.

Nesta fase, correntes ascendentes e descendentes coexistem lado a lado. A precipitação, vinda

da região de ar mais frio, esfria a corrente descendente que se espalha horizontalmente como uma massa de ar frio e úmido. A chegada da corrente descendente ao chão, geralmente é marcada por rajadas curtas e fortes de ventos.

Muitas tempestades são compostas por várias células, em diferentes estágios de desenvolvimento. Observações de radar mostram que o ciclo de vida de uma célula convectiva individual é da ordem de meia a uma hora (Newton, 1967). Sabe-se também que as novas células tendem a se formar nas vizinhanças de outras pré-existentes, produzidas pelas correntes descendentes que convergem com o ar ambiente à frente das células antigas.

Grosh (1978) mostrou que a probabilidade de tempestades severas de origem convectiva aumenta com a altura das nuvens. Segundo ele, na região central de Illinois (EUA) em dias em que a altura do topo das nuvens é maior ou igual a 18 Km, a probabilidade de chuvas com quantidades iguais a 100 mm, é de cerca de 50%. Entretanto, algumas tempestades onde as nuvens atinjam apenas uma altura moderada podem produzir até mais do que 100 mm/dia sob outras condições (como intensidade, persistência e trajetória das células de precipitação).

Embora as enchentes urbanas possam ocorrer em determinado local devido a precipitação intensa produzida por uma única célula, os valores ocasionalmente observados de acumulações extremas de 200 a 300 mm de chuva, são o resultado de repetidas passagens de um determinado número de tempestades sobre a mesma área (Newton, 1967). Se uma linha de instabilidade está orientada perpendicularmente ao escoamento, sua passagem será breve. Se por outro lado, sua orientação for quase

paralela à direção do escoamento, vários Cbs podem passar sobre um mesmo local e produzir uma quantidade maior de precipitação.

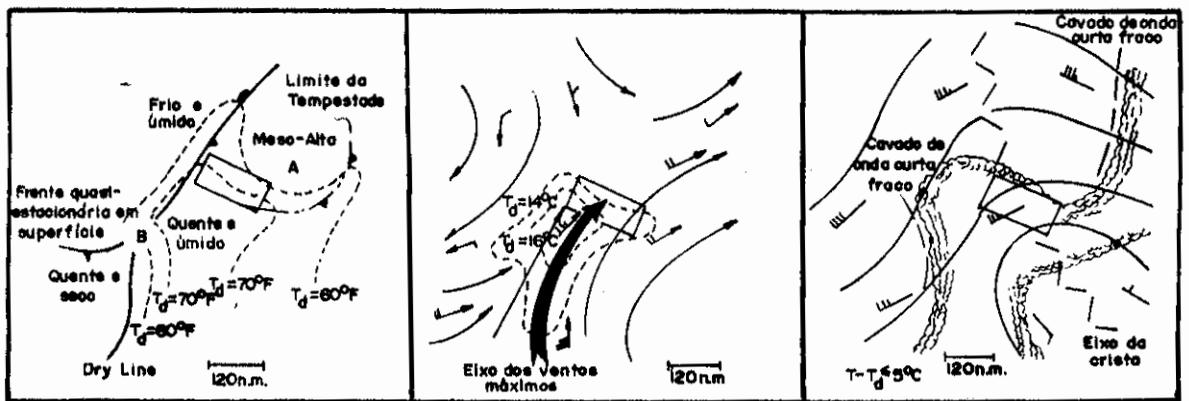
Analisando 21 casos de enchentes urbanas nas regiões oeste e sul dos Estados Unidos, Maddox e Chappel (1978) observaram que em 15 deles, a precipitação mais intensa ocorreu durante a noite. Estes casos estavam razoavelmente bem distribuídos espacialmente e aconteceram entre os meses de abril e outubro sendo que 33% do total ocorreu no mês de julho.

As configurações de grande escala e de mesoescala comuns a vários dos casos estudados por Maddox e Chappell (1978), foram usadas na identificação de cinco tipos básicos de sistemas geradores de chuvas intensas que foram classificados como: meso-alta, escoamento de oeste, frontal, com inclinação para leste e sinótico.

As características sinóticas típicas para um episódio do tipo meso-alta são mostradas na Figura 2.5. Na superfície existe normalmente um fraco sistema frontal ao norte e a oeste da área onde ocorrem as máximas precipitações, com uma região de baixa pressão fraca a sudoeste. Uma banda de ar muito úmido estende-se para o norte. Mas o fator mais importante é o sistema de pressão meso-alta produzida pelo ar frio descendente que se origina na convecção que precede o sistema frontal.

Em 850 hPa um escoamento de sul-sudeste transporta o ar com alto teor de umidade e alta instabilidade condicional para a área da máxima precipitação, invadindo a região de ar frio em superfície. O desenvolvimento dos Cbs é iniciado ao longo ou ao norte da região de saída deste JBN.

Em 500 hPa os ventos sugerem um movimento para leste da linha de tempestades, ou aproximadamente paralelo à região de saída; isto permite que novos Cbs repetidamente passem a cruzar a mesma região. A linha da crista está próxima da área de máximas precipitações (retângulo) mas a aproximação do cavado de onda curta ajuda a desestabilizar a atmosfera e aumentar o escoamento nos baixos níveis para a região de desenvolvimento dos Cbs.



(a)

(b)

(c)

Fig. 2.5 - Configuração típica na superfície (a), 850 hPa (b) e 500 hPa (c) para um episódio do tipo meso-alta. Os retângulos indicam a localização mais provável da máxima precipitação.

Adaptada de Maddox e Chappell (1978), p. 6.

Um caso semelhante ao tipo meso-alta foi descrito por Schwartz et al (1990) para a enchente de 23 de julho de 1987, em Minneapolis (EUA). Os sistemas sinóticos relacionados ao episódio incluíram uma frente fria movendo-se lentamente, precedida por uma linha de instabilidade e um sistema de alta pressão do tipo meso-alta.

Para um episódio do tipo frontal (mostrado na Figura 2.6), Maddox e Chappel (1978) identificaram o seguinte quadro:

a) na superfície: a banda frontal está orientada zonalmente ao sul da área sujeita às chuvas intensas (retângulo); as pressões são baixas e as condições mais secas e mais quentes aparecem a oeste. Uma língua de ar úmido estende-se para o norte em direção à área onde se desenvolve a convecção;

b) em 850 hPa: a banda de ventos mais fortes de sul a sudoeste transporta a massa de ar úmido e instável para o norte invadindo a região frontal;

c) em 500 hPa: a fraca onda curta ajuda a desestabilizar a atmosfera e intensifica a entrada de ar quente ao norte da região frontal, o que eventualmente dispara a atividade convectiva. O escoamento de oeste dirige os núcleos convectivos para leste, paralelo à frente fria em superfície, permitindo repetidas passagens de vários Cbs pela mesma região.

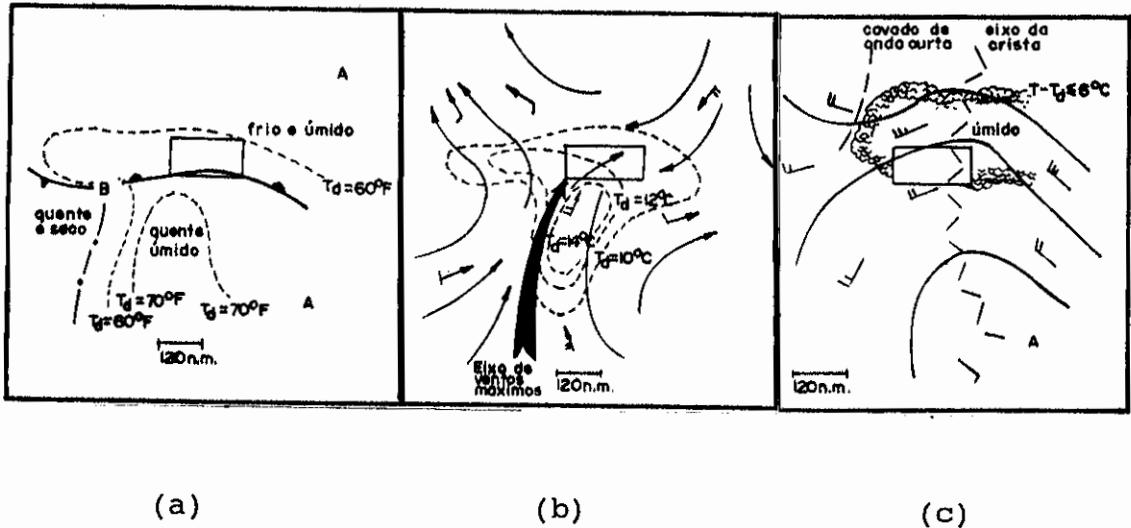


Fig. 2.6 - Configuração típica na superfície (a), 850 hPa (b) e 500 hPa (c) para um episódio do tipo frontal. Os retângulos indicam a localização mais provável da máxima precipitação. Adaptada de Maddox e Chappell (1978), p. 8.

Fleming e Spayd Jr.(1986) levantaram as características dinâmicas relacionadas a episódios de enchentes na região oeste dos EUA provocadas pela atividade convectiva (principalmente SCMs) e por sistemas de ciclones extratropicais (SCEs). Foram analisados 137 casos de precipitação intensa associados a SCMs. Estes episódios foram classificados de acordo com a época do ano, hora do dia de máxima precipitação, temperatura mínima do topo da nuvem no horário da máxima precipitação e tipo de sistema convectivo identificado através das imagens de satélite. Estes sistemas foram classificados em 10 tipos: sistemas convectivos tropicais de escala sinótica (2 casos), linhas de instabilidade (2 casos), aglomerados simples (28 casos), SCM- α (13 casos), SCM- β circular (32 casos), SCM- β linear (41 casos), sistemas

convectivos originados na circulação ciclônica de escala sinótica (10 casos), "overrunning" de grande escala (4 casos) e uma combinação de dois ou mais sistemas que passaram pela mesma área em 24 horas (4 casos).

As análises de 45 dos maiores e mais duradouros casos de SCMs resultaram na classificação de quatro tipos de configuração de mesoescala e escala sinótica. Estes tipos são os seguintes: anticiclone de bloqueio (15 ocorrências), zona de deformação (17 ocorrências), cavado de onda curta no escoamento de norte (6 ocorrências) e cavado de onda curta no escoamento zonal (7 ocorrências). Já as análises de 24 episódios de enchentes produzidas por SCEs, produziram três tipos básicos que são: banda de nuvem quase-estacionária (10 casos), cavado meridional profundo (7 casos) e com corrente de jato zonal ativo (7 casos).

Em outro estudo efetuado por Juying e Scofield (1989) foram analisados 38 casos de precipitação produzida por Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) responsáveis por enchentes na região central dos EUA. Foram utilizadas imagens de satélite no canal do infravermelho realçadas, para estimar a precipitação em superfície. Também foram usados dados de radar, de altitude e de superfície. Para examinar e definir os padrões sinóticos associados com a propagação dos CCMS foram usadas cartas da espessura da camada 1000-500 hPa, ventos em 850 hPa, frentes em superfície, centros de vortacidade e altura geopotencial para 500 hPa e jatos em 300 hPa. O estudo de casos mostrou que 85% das chuvas intensas foram produzidas por CCMS que propagavam-se para trás, em relação à fase inicial do seu desenvolvimento.

Bosart et al. (1992), estudaram um caso de intensa precipitação no sul do Texas (EUA) associada a uma

fraca ciclogênese no noroeste do Golfo do México que produziu uma precipitação total acima de 500 mm. Uma condição antecedente muito importante para a formação da tempestade foi a geração de uma zona baroclínica nos baixos níveis no noroeste do Golfo do México devido ao avanço para o sul de ar mais seco e ligeiramente mais frio atrás de uma frente fria que penetrou no noroeste do México.

Para o HS existem poucos estudos dando ênfase a sistemas de tempo que produzem precipitação intensa.

Guedes e Silva Dias (1984) analisaram 8 casos de formação de CCMS na região norte da Argentina, Paraguai e Sul do Brasil e os efeitos que favorecem sua gênese e manutenção. Eles utilizaram cartas de altitude, dados de radiossondagem obtidos de estações da Argentina Chile e Brasil, além de imagens de satélite. As características sinóticas mais importantes encontradas neste estudo foram as seguintes: a) advecção quente nos baixos níveis; b) convergência de massa e de umidade nos baixos níveis; c) jato em baixos níveis (na corrente de norte); d) cizalhamento vertical pouco intenso e e) a formação deste tipo de sistemas ocorre no lado equatorial do JAN.

A formação e o desenvolvimento de uma perturbação do tipo vírgula invertida no sul do Brasil em abril de 1979, foi estudada por Bonatti e Rao (1987). Através de um estudo de imagens de satélite de 1979 a 1980, os autores notaram que as perturbações possuem uma escala que varia de 1000 a 2000 km (escala intermediária), e se formam na região sudeste da América do Sul, preferencialmente nas estações de transição (primavera e outono). Este tipo de fenômeno é responsável por chuvas

intensas sobre as regiões sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina. Usando um modelo numérico (linear quase geostrófico com parametrização de liberação de calor latente e 18 camadas na vertical), Bonatti e Rao (1987) concluíram que a instabilidade baroclínica úmida parece ser a principal responsável pela geração das nuvens em vírgula invertida.

Outro tipo de fenômeno meteorológico que costuma produzir muita precipitação na região sul da América do Sul são os vórtices de ar frio nos altos níveis, que normalmente desenvolvem-se no ar que segue o sistema frontal. Dall'Antonio Jr. e Silva Dias (1990) apresentaram um estudo de caso de desenvolvimento de vórtice de ar frio sobre o Paraguai, entre os dias 21 e 22 de agosto de 1989, através de análises sobre superfícies isentrópicas. Segundo os autores, este tipo de análise é de grande valor pois permite acompanhar os fluxos nas esteiras transportadoras.

Scolar e Figueiredo (1990) analisaram 5 casos de CCM e concluíram que as tempestades inicialmente desenvolvem-se em uma região de convergência de massa e umidade e onde o levantamento do ar é feito principalmente pela advecção de temperatura quente nos baixos níveis. As características observacionais mais importantes encontradas no estudo foram o núcleo fechado de advecção quente e, no campo dos ventos, a presença de um jato no escoamento de norte em baixos níveis.

As conclusões da maioria dos estudos relativos à ocorrência de tempestades severas mostram que: a configuração de grande escala produz as condições necessárias para a formação de um ambiente favorável ao desenvolvimento das tempestades e, diversas características de escala menor atuam principalmente no

início do desenvolvimento das tempestades. Efeitos do aquecimento diferencial, topografia e outras forçantes locais, sem dúvida tem um papel importante na ocorrência de cada episódio de precipitação intensa.

O impacto de uma tempestade com chuvas intensas depende muito da densidade da população e do desenvolvimento da região atingida. As chuvas intensas interagem com as características hidrológicas e orográficas locais, determinando a ordem de grandeza dos prejuízos. Se a área afetada é isolada, os prejuízos podem ser pequenos. Entretanto, se a área atingida é desenvolvida e densamente povoada, os efeitos podem ser trágicos.

CAPITULO 3

DADOS E METODOLOGIA

3.1 - DADOS

As imagens utilizadas para o período de 1978 a 1984 são do satélite GOES-E nos canais espectrais do visível, infravermelho e vapor de água e estão disponíveis no arquivo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As cartas sinóticas de superfície para a América do Sul foram obtidas junto à Força Aérea Brasileira no Instituto de Atividades Espaciais (IAE) nos horários das 00:00 TMG e 12:00 TMG, de 1978 a 1984. Para alguns casos também foram utilizadas as cartas regionais das 12:00 ou 18:00 TMG fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e arquivadas no INPE.

Os dados globais de temperatura, geopotencial, componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, umidade relativa e pressão na superfície, distribuídos em 11 níveis de pressão padrão (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 e 50 hPa), com resolução espacial horizontal de 2,5 graus de latitude e longitude, pertencentes ao arquivo de dados do INPE foram fornecidos pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR) e são oriundos do National Meteorological Center (NMC). Estes dados estão disponíveis nos horários das 00:00 e 12:00 TMG e para o período de 1976 a 1984.

Os dados de precipitação diária coletados pelas estações pluviométricas pertencentes ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e às Centrais Elétricas do Estado de Santa Catarina (CELESC), foram

cedidos pela Universidade Regional de Blumenau (FURB) cujo arquivo tem início em 1936 e término em 1994. Para alguns dos casos estudados também foram utilizadas as precipitações de algumas estações do Rio Grande do Sul e Paraná obtidos nas cartas de superfície das 12:00 TMG fornecidas pelo INMET e arquivadas no INPE.

O mapa da bacia do rio Itajaí com a localização dos postos pluviométricos para os quais foram usados os dados de precipitação, é mostrada na Figura 3.1.

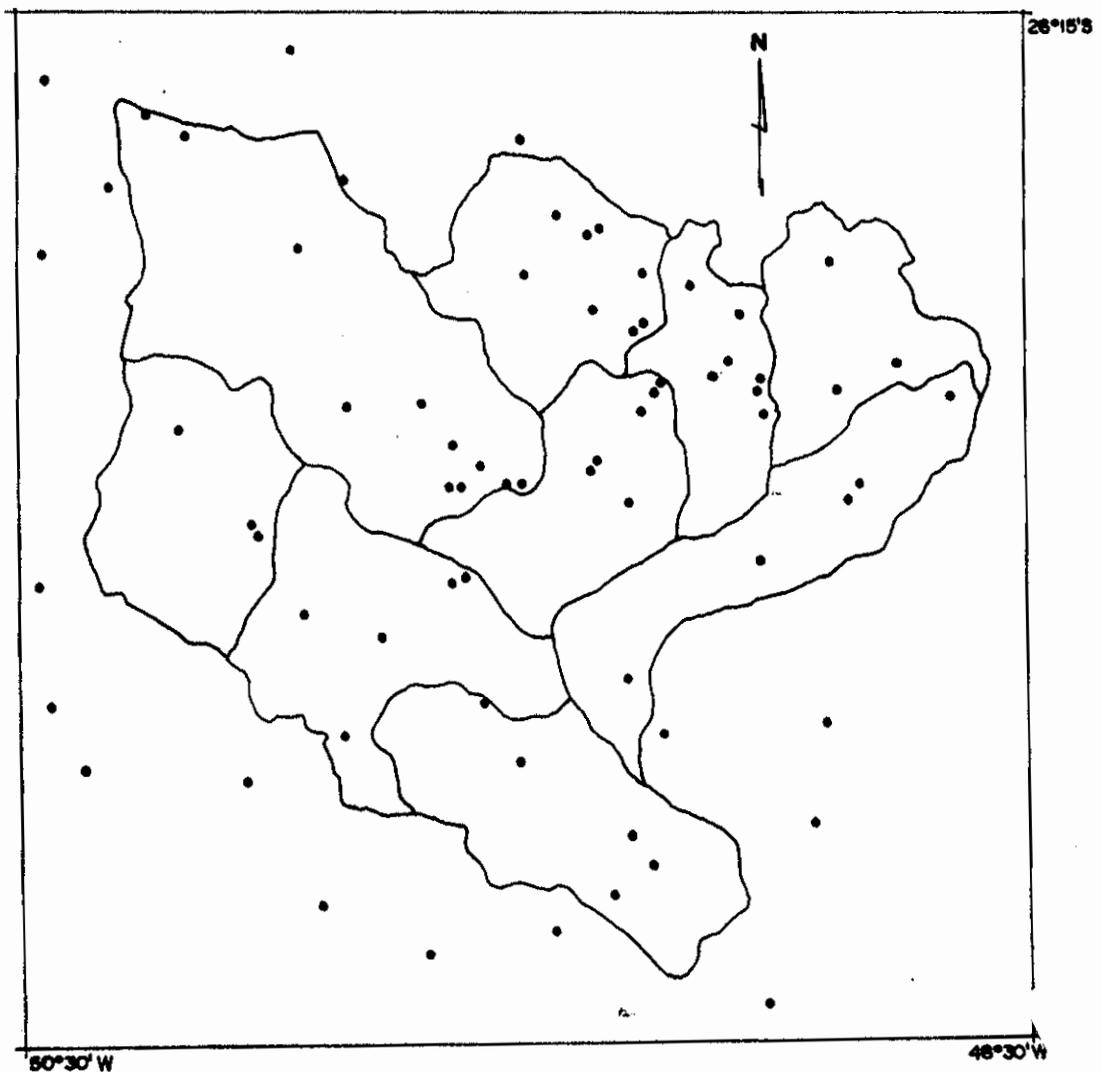


Fig. 3.1 - Localização dos postos pluviométricos dentro da bacia do rio Itajaí.

A área de interesse do estudo está apresentada na figura 3.2. Em destaque aparece a localização da bacia do rio Itajaí.

LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO ITAJAÍ

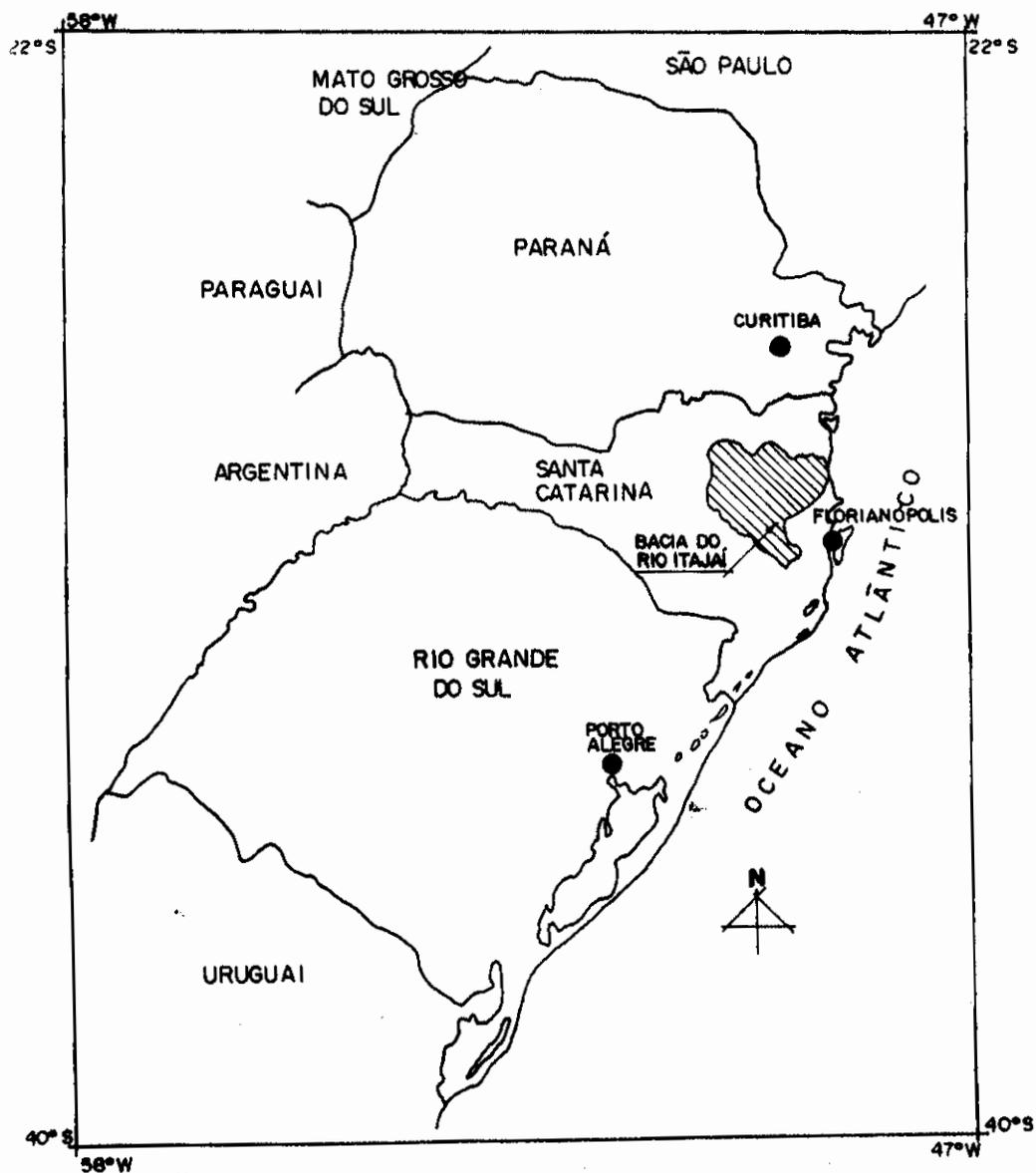


Fig. 3.2 - Mapa da Região Sul do Brasil com a localização da bacia do rio Itajaí.

Os episódios de chuvas intensas selecionados para este estudo são apresentados na tabela 3.1, juntamente com a média do total acumulado da precipitação para o episódio, tomada sobre os postos pluviométricos do Vale do Itajaí.

TABELA 3.1 - EPISÓDIOS DE CHUVAS INTENSAS E PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA REGIÃO DO VALE DO ITAJAÍ

No.	Período	Média do total da Precipitação (mm)
* 1	(25-27)/12/78	100.3
2	(02-05)/04/79	88.1
* 3	(07-10)/05/79	101.3
* 4	(05-08)/10/79	83.6
5	(01-04)/07/80	71.7
6	(30-31)/07/80	95.8
7	(19-26)/08/80	159.8
8	(01-03)/09/80	59.5
9	(02-06)/12/80	81.7
* 10	(18-22)/12/80	138.0
11	(26-30)/03/81	58.6
12	(25-26)/07/81	67.3
13	(21-23)/12/81	104.0
14	(04-06)/02/82	81.5
15	(03-06)/11/82	80.1
16	(05-07)/01/83	98.4
* 17	(17-21)/05/83	99.9
* 18	(06-12)/07/83	329.4
* 19	(22-24)/09/83	90.5
20	(20-21)/03/84	76.8
* 21	(05-08)/08/84	187.9

O asterisco (*) denota episódios associados a enchentes na região do Vale do Itajaí (SC).

3.1.1 - CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS EPISÓDIOS

Um dos critérios para a escolha dos episódios foi o registro de ocorrência de enchentes na bacia do rio Itajaí, para o período de disponibilidade dos dados do NMC. Com este critério foram selecionados apenas 8 casos. Por isso, foram escolhidos também aqueles episódios em que a média da precipitação diária, em alguns postos pluviométricos, foi acima de 50 mm.

3.2 - METODOLOGIA

De forma a identificar as condições que precedem o desenvolvimento dos sistemas sinóticos que produzem chuvas intensas, dividiu-se cada episódio em duas fases. O período de dois dias antes da ocorrência da máxima precipitação foi definido como a fase inicial. Assim, pode-se observar as características sinóticas do desenvolvimento e propagação dos sistemas meteorológicos. A fase madura foi definida como o período em que o sistema sinótico atinge o máximo desenvolvimento, isto ocorre quando são registradas as máximas precipitações.

Em cada uma das fases, os sistemas sinóticos são identificados através da análise das cartas sinóticas em superfície juntamente com as imagens de satélite, campos de altura geopotencial, temperatura, umidade e vento. Com as cartas sinóticas são identificados os sistemas em superfície (se frontal, não-frontal, ciclones, etc.) que estão nas proximidades da região Sul do Brasil. Com o campo de vento em 300 e 850 hPa são identificados os sistemas sinóticos na alta e baixa troposfera tais como vórtices, cavados, cristas ou correntes de jato.

Além das análises acima, foram calculados outros parâmetros derivados, tais como: vorticidade, divergência, advecção de vorticidade absoluta e advecção horizontal de temperatura, movimento vertical, temperatura potencial equivalente (Teta-E) e advecção de Teta-E. Estes parâmetros foram utilizados para agrupar os episódios de acordo com suas características dinâmicas e termodinâmicas comuns.

Os métodos utilizados para o cálculo destes parâmetros são descritos a seguir.

3.2.1 - VELOCIDADE VERTICAL

O cálculo do movimento vertical, ω , é feito pelo método cinemático através da equação da continuidade. É feito um ajuste de massa de acordo com O'Brien (1970), para corrigir os valores da divergência, considerando-se que existam erros no cálculo do vento. O ajuste de massa é feito, inicialmente, calculando-se a divergência em cada nível de pressão através da seguinte equação:

$$\nabla \cdot W = \frac{\partial u}{a \cos \phi \partial \lambda} + \frac{\partial v}{a \partial \phi} - \frac{v \tan \phi}{a} \quad (3.1)$$

Depois, a divergência é suavizada através de um filtro que concentra o maior peso no valor do ponto a ser suavizado, da seguinte maneira:

$$\nabla \cdot W_{1,j} = \frac{1}{8} \left(\nabla \cdot W_{1+1,j} + \nabla \cdot W_{1-1,j} + \nabla \cdot W_{1,j+1} + \nabla \cdot W_{1,j-1} + 4\nabla \cdot W_{1,j} \right) \quad (3.2)$$

Após a suavização, calcula-se

$$\int_{1000\text{hPa}}^{200\text{hPa}} \nabla \cdot \mathbf{V} \, dp \quad (3.3)$$

que resulta em um certo resíduo. Esse resíduo, é subtraído dos valores da divergência em cada nível pela seguinte equação:

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_i^* = \nabla \cdot \mathbf{V}_i - \frac{\text{Re}}{\Delta p_{\text{total}}} \quad (3.4)$$

onde $\nabla \cdot \mathbf{V}_i^*$ é a divergência ajustada no nível de pressão i , Re é o resíduo e $\Delta p_{\text{total}} = 800 \text{ hPa}$. Com esses novos valores para a divergência, pode-se calcular o movimento vertical, usando-se a equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_i + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = - \nabla \cdot \mathbf{V} \quad (3.6)$$

Integrando-se esta equação em dp tem-se:

$$\int_{\omega_0}^{\omega_2} d\omega = - \int_{p_0}^{p_1} \nabla \cdot \mathbf{V}^* \, dp \quad (3.7)$$

onde: $\omega_2 = 0$ é a velocidade vertical ($\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) em 200 hPa
 $\omega_0 = 0$ é a velocidade vertical ($\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) em 1000 hPa.

3.2.2 - VORTICIDADE

Matematicamente, a vorticidade é definida como o rotacional da velocidade W

$$\zeta = \nabla \times W = i \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} + j \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} + k \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.8)$$

Para a Meteorologia, a componente da vorticidade de maior importância é a vertical, que em coordenadas esféricas é definida como

$$\zeta = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{u \tan \phi}{a} \quad (3.9)$$

Regiões de vorticidade ciclônica em 500 hPa são favoráveis à precipitação pois implicam em movimento ascendente, uma vez que a rotação horária de uma coluna de ar provoca o esticamento vertical na coluna, com divergência no topo. Por outro lado, a rotação anticiclônica provoca um alargamento da coluna atmosférica e movimento descendente, com divergência na base.

3.2.3 - ADVECCÃO DE TEMPERATURA

A variação total da temperatura em um dado local é igual à sua variação local seguindo o movimento da massa de ar mais a advecção de temperatura. Matematicamente, a taxa de variação total da temperatura na horizontal é definida como:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + W \cdot \nabla T \quad (3.10)$$

A advecção horizontal de temperatura é um parâmetro que pode ser utilizado para identificar regiões de intensificação de sistemas sinóticos. A advecção

horizontal de ar quente para um dado local implica em um aumento da temperatura. Se esta elevação de temperatura for observada em uma camada de ar profunda haverá diminuição da pressão na superfície, uma vez que o ar quente é mais leve que o ar frio. Se no local houver um sistema de baixa pressão, este sistema será intensificado. Do mesmo modo acontecerá a intensificação de um anticiclone onde há advecção fria.

3.2.4 - TEMPERATURA POTENCIAL EQUIVALENTE (Teta-e)

A temperatura potencial equivalente (Teta-E ou θ_e) é uma propriedade termodinâmica dependente da umidade e temperatura, onde os valores mais altos representam uma massa de ar mais quente e/ou mais úmida que contribuem mais para o desenvolvimento convectivo. Juying e Scofield (1989) e Shi e Scofield (1987) mostraram que a convecção no setor quente frequentemente se desenvolve ao longo ou próximo do eixo da crista de teta-e em 850 hPa na presença de ar instável e de um mecanismo de levantamento. Assumindo que a instabilidade corrente acima e o escoamento nos baixos níveis dirigidos para o sistema convectivo são mantidos, a convecção pode assim :

1) ou propagar-se corrente acima ao longo do eixo da crista na direção dos valores maiores de teta-e, ou

2) propagar-se corrente abaixo dentro do escoamento nos níveis médios com ventos moderados a fortes, mas com possíveis células regenerativas desenvolvendo-se dentro da massa de ar com maiores valores de teta-e vento acima do sistema convectivo.

Neste estudo o cálculo de teta-e segue o método proposto por Bolton (1980):

$$\theta_e = T_K \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.2845(1-0.28 \cdot 10^{-3} r)} \exp \left[\frac{3.376}{T_L} - 0.00254 r(1 + 0.81 \cdot 10^{-3} r) \right] \quad (3.11)$$

onde:

T_K : Temperatura Absoluta (em graus Kelvin)

r : razão de mistura (g.Kg^{-1})

T_L : Temperatura do nível de condensação por levantamento (em graus Kelvin).

A temperatura do nível de condensação por levantamento (T_L) foi calculada da seguinte forma:

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_d - 56} + \frac{\ln(T_k - T_d)}{800}} + 56$$

onde

T_d : Temperatura do ponto de orvalho (em graus Kelvin).

CAPÍTULO 4

CLASSIFICAÇÃO DOS EPISÓDIOS

Neste capítulo é apresentada a classificação obtida pelo agrupamento dos episódios de acordo com o tipo de sistema de escala sinótica que se encontrava próximo da Região Sul do Brasil e que ocasionou chuvas intensas no Vale do Itajaí (SC). O desenvolvimento destes sistemas sinóticos foi dividido em duas fases: a situação sinótica antes da ocorrência da máxima precipitação foi definida como a fase inicial e aquela no dia da máxima precipitação como a fase madura.

Pela natureza não-linear da atmosfera, era esperado que, apesar de alguns casos serem muito semelhantes em termos de distribuição temporal da precipitação, suas características físicas fossem diferentes. Para analisar estas características, se fez uso das cartas sinóticas, para identificar os sistemas em superfície tais como frentes ou ciclones. Com as análises no nível de 850 hPa foram localizadas as regiões com escoamento mais intenso, bem como zonas de deformação e confluência no campo de vento, etc. Da mesma forma, foram identificados os sistemas sinóticos em 300 hPa, tais como cavados, vórtices ciclônicos, difluência, etc. Com isso, foi possível formar cinco grupos de casos com características dinâmicas e termodinâmicas comuns.

A descrição destes grupos e os esquemas com suas características principais são apresentados a seguir.

4.1 - GRUPO 1 - SISTEMA FRONTAL ESTACIONÁRIO NA REGIÃO SUL COM VÓRTICE CICLÔNICO NO NORDESTE DO BRASIL

Uma situação com um sistema frontal estacionário sobre a Região Sul e um vórtice na Região Nordeste do Brasil foi encontrada em meses de verão (casos 1, 10, 13, e 14), primavera (casos 8 e 15) e outono (caso 2). Nos casos 1 e 10 ocorreram enchentes no Vale do Itajaí com chuvas contínuas por mais de três dias. Esta característica temporal da precipitação, está associada à permanência do sistema frontal sobre Santa Catarina ou nas suas proximidades.

O sistema frontal estacionário sobre a Região Sul, parece estar relacionado à presença do vórtice ciclônico na Região Nordeste, o qual atua bloqueando o deslocamento deste sistema. Este vórtice apareceu fechado em quatro dos sete casos.

Os esquemas simplificados da situação sinótica sobre a América do Sul durante as fases inicial e madura são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Os símbolos nas figuras tem o seu significado usual em meteorologia tais como frentes, centros de baixa pressão, eixo de cavados e cristas.

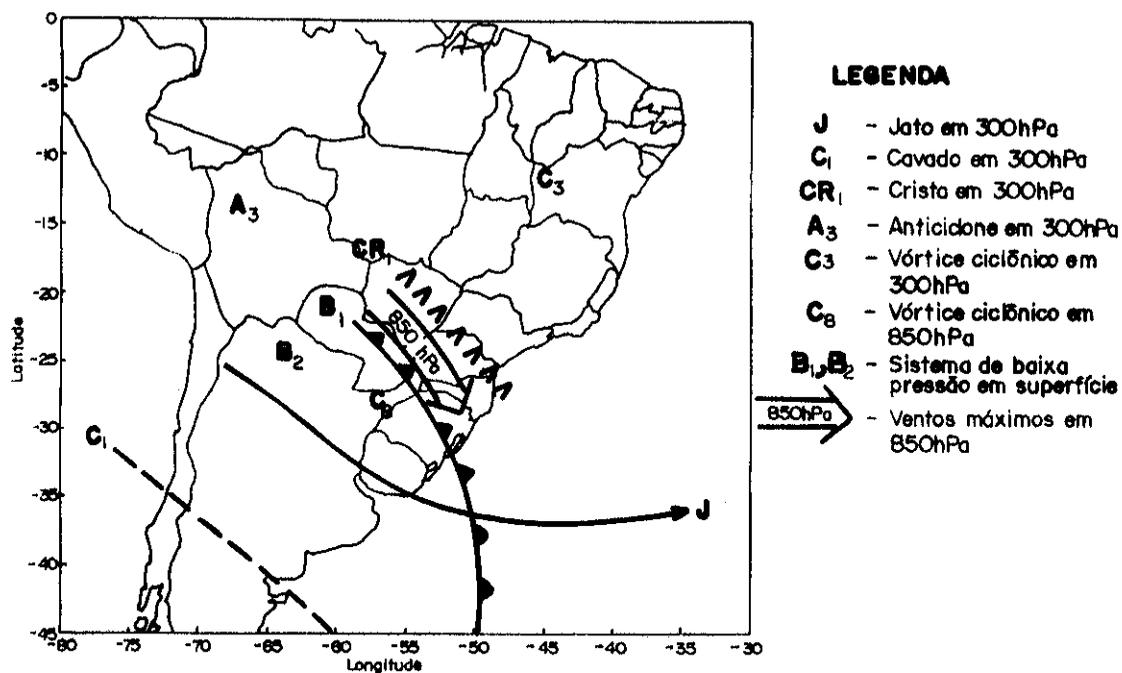


Fig. 4.1 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do Grupo 1.

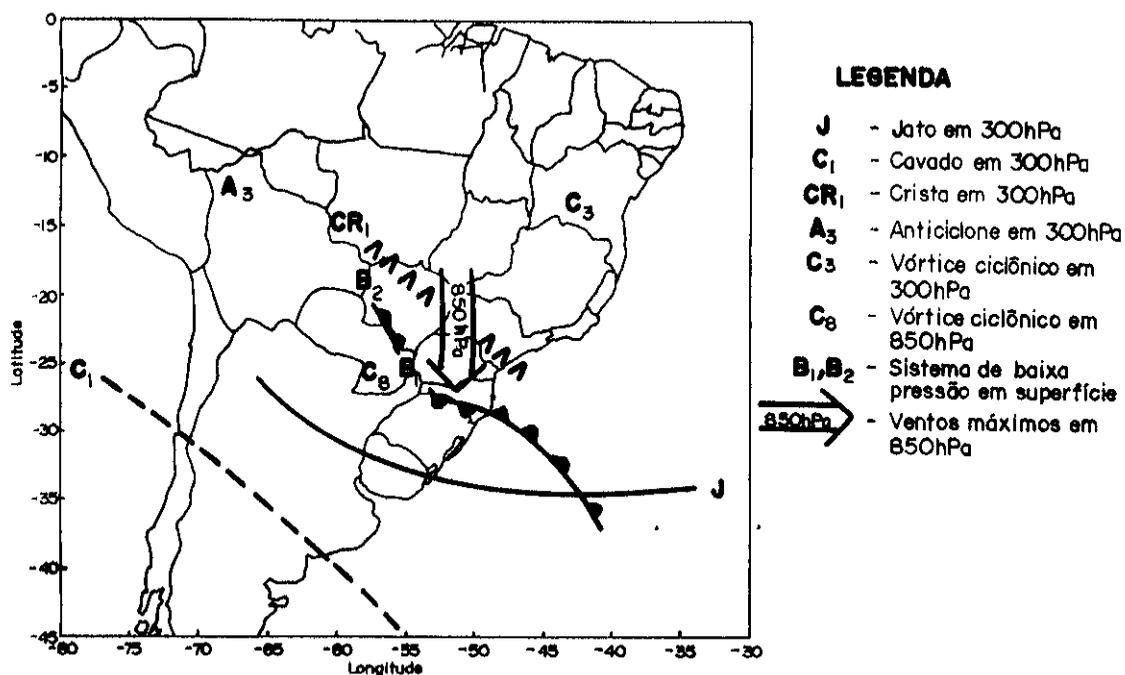


Fig. 4.2 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase madura de um caso do Grupo 1.

A principal característica sinótica deste grupo é um sistema frontal que avança até o Rio Grande do Sul ou Santa Catarina, estacionando sobre estes estados. Às vezes, este sistema frontal ondula no oeste de Santa Catarina, formando ali, ou no norte do Paraná, um sistema de baixa pressão. Quando isto ocorre, o ramo frio do sistema frontal avança para o norte do Paraguai ou Mato Grosso do Sul e o ramo quente permanece no norte do Rio Grande do Sul ou Santa Catarina.

Nos baixos níveis, o escoamento dos ventos mantém-se paralelo ao ramo frio do sistema frontal e, após à ondulação torna-se quase perpendicular ao ramo quente. Esta configuração do escoamento nos baixos níveis é semelhante a uma esteira transportadora quente como definida por Browning (1985). Este escoamento de noroeste passa por sobre uma região com altos valores de $teta-e$ e portanto transporta um ar com alto teor de umidade e calor desde a região amazônica até a Região Sul do Brasil. Ao aproximar-se do sistema frontal, este ar úmido e quente é levantado o suficiente para iniciar o processo de desenvolvimento convectivo e gerar precipitações. Às vezes, pode resultar em uma instabilidade explosiva (IE) como definida por Scofield (1990).

Nos altos níveis, vários mecanismos interagem e intensificam as condições para o desenvolvimento convectivo. O principal destes mecanismos é um vórtice ciclônico (C3) na Região Nordeste do Brasil. Na fase inicial, este vórtice está localizado no oeste da Região Nordeste ou sobre o oceano Atlântico. Conforme se move para o sul, produz um aumento na divergência dos ventos sobre as regiões Sul e Sudeste, intensificando a crista (CR1). Esta é uma situação que também foi observada por Gan e Kousky (1986) durante um caso de formação de um vórtice ciclônico. A intensificação da

crista é justificada pela forte advecção de ar quente no seu lado leste, quando há a aproximação de uma frente fria. A divergência provocada pelo vórtice atua como um bloqueio ao deslocamento para o norte do sistema frontal em superfície.

Como a crista em 300 hPa sobre a Região Sudeste é intensificada, o cavado da onda (C1) sobre a Argentina se aprofunda, mantendo a corrente de jato oscilando sobre o Uruguai e sul do Rio Grande do Sul.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as principais características sinóticas para os casos do grupo 1.

TABELA 4.1 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM SUPERFÍCIE E EM 850 hPa PARA O GRUPO 1

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Sistema Frontal em Superfície	Norte ou centro do RS	Ondulando no oeste de SC ou sobre o PR
Sistema de Baixa Pressão B1	Norte do Paraguai ou sul do MS	Leste do Paraguai ou oeste do PR
Sistema de Baixa Pressão B2	Norte da Argentina	Oeste do MS ou no centro da Bolívia
Vórtice Ciclônico C8 em 850 hPa	Oeste do RS ou no sul do Paraguai	Norte da Argentina ou no centro e sul do Paraguai
Escoamento máximo em 850 hPa	Paralelo ao sistema frontal em superfície	Perpendicular ao sistema frontal em superfície
Campo de Teta-E em 850 hPa	Altos valores no Sul do Brasil ou no norte da Argentina e Paraguai	Altos valores do centro do Brasil até o centro da Argentina

TABELA 4.2 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM 300 hPa PARA O GRUPO 1

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Vórtice Ciclônico C3	Noroeste da Bahia	Sul da Bahia
Eixo da Crista CR1	de NW-SE no MS e norte do PR ou no sul de SP	de NW-SE no MS e norte do PR ou no sul de SP
Centro de Circulação Anticiclônica A3	Sobre o Acre ou Leste da Bolívia	Sobre o Acre ou Leste da Bolívia
Eixo do Cavado C1	NW-SE no centro da Argentina	NW-SE no centro da Argentina
Corrente de Jato	no Uruguai com curvatura anticiclônica	no Uruguai ou sul do RS c/ curvatura anticiclônica

4.2 - GRUPO 2 - VÓRTICE CICLÔNICO NOS ALTOS NÍVEIS, PRÓXIMO DA REGIÃO SUL DO BRASIL

Três episódios apresentaram um vórtice ciclônico nos altos níveis nas proximidades da Região Sul do Brasil. Este tipo de situação meteorológica foi encontrada no verão (casos 9 e 12) e no inverno (caso 16). A precipitação, ocorrida em um intervalo de tempo relativamente curto, demonstra o rápido desenvolvimento do sistema que a gerou. Em nenhum dos casos deste grupo houveram enchentes no Vale do Itajaí, porém a quantidade de chuva registrada foi suficiente para que isso ocorresse.

Os esquemas para as fases inicial e madura são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

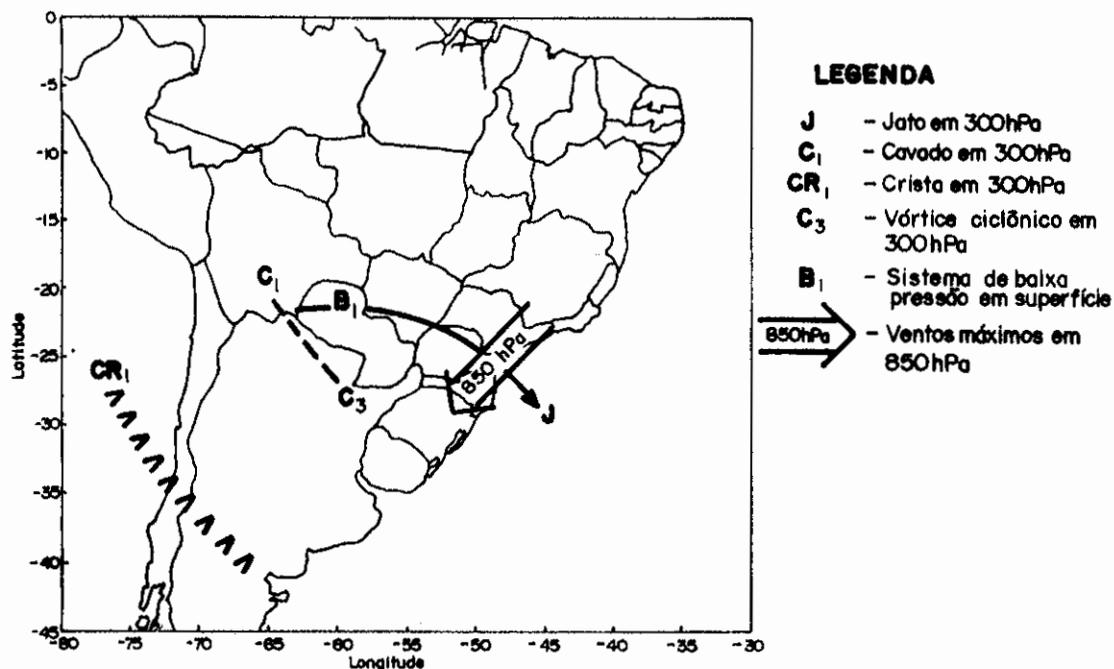


Fig. 4.3 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do grupo 2.

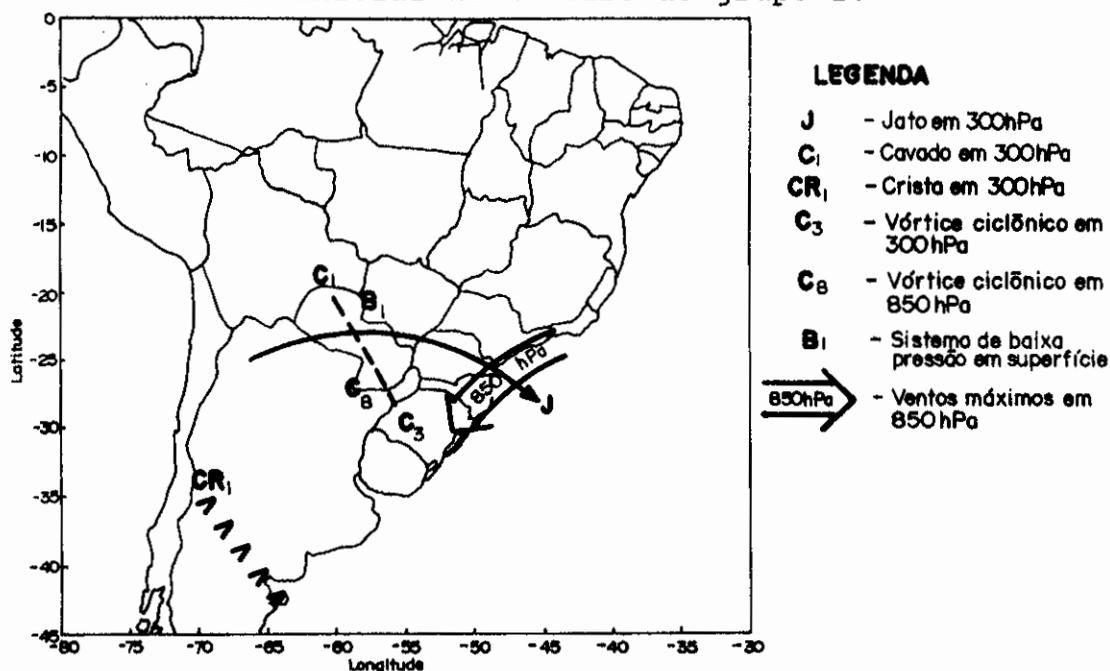


Fig. 4.4 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase madura de um caso do Grupo 2.

Para um caso deste tipo, as características nos baixos níveis variam bastante da fase inicial para a fase madura. Inicialmente, nota-se apenas um sistema de baixa pressão no norte do Paraguai e o escoamento de nordeste sobre a Região Sul, associado à circulação do anticiclone do Atlântico. Na fase madura, estas condições são deslocadas para leste, de forma que o escoamento torna-se quase paralelo ao litoral das Regiões Sul e Sudeste. Da mesma forma, as condições de umidade (no campo de teta-e) são altas apenas no norte do Paraguai e oeste da Região Sul, deslocando-se para leste na fase madura.

Nos altos níveis, um vórtice ciclônico desloca-se para leste, aprofundando-se até os baixos níveis, na fase madura. Observa-se nas imagens de satélite, que no centro do vórtice desenvolve-se a atividade convectiva em células individuais ou em linhas de Cbs, principalmente à noite, evidenciando os efeitos do ciclo diário.

A Tabela 4.3 apresenta as características sinóticas em superfície e em 850 hPa e a Tabela 4.4 as características em 300 hPa para um caso deste grupo.

TABELA 4.3 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM SUPERFÍCIE E EM 850 hPa PARA O GRUPO 2

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Centro de Baixa Pressão B1	Norte do Paraguai	Norte do Paraguai ou norte da Argentina
Vórtice Ciclônico em 850 hPa		Nordeste da Argentina ou no litoral da Região Sul
Escoamento máximo em 850 hPa	De Nordeste sobre Região Sul mas pouco intenso	De Nordeste no leste da Região Sul
Campo de Teta-E em 850 hPa	Altos valores no norte do Paraguai	Altos valores no centro do Brasil ou no litoral da Região Sul

TABELA 4.4 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM 300 hPa PARA O GRUPO 2

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Eixo da Crista CR1	Noroeste-Sudeste no centro da Argentina	Noroeste-Sudeste no sudeste da Argentina
Eixo do Cavado C1	Noroeste-Sudeste no norte da Argentina	Noroeste-Sudeste no NE da Argentina ou norte do Uruguai
Corrente de Jato	Norte do Paraguai, e norte do PR com curvatura ciclônica	Norte do PR com curvatura ciclônica
Vórtice Ciclônico C3	Oeste do RS ou NE da Argentina	Sobre o RS

4.3 - GRUPO 3 - CORRENTE DE JATO COM CURVATURA ANTICICLÔNICA

Uma corrente de jato curvada anticiclonicamente sobre a Região Sul do Brasil foi observada no inverno (casos 6 e 21), primavera (caso 19) e outono (caso 20). A precipitação em dois destes casos (19 e 21) provocou enchentes na região do Vale do Itajaí. A característica temporal da precipitação para este grupo é o curto intervalo de tempo em que ela ocorre (em torno de dois dias). O desenvolvimento muito rápido dos sistemas que geram as chuvas nestas situações é um dos maiores problemas para a sua previsão.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados os esquemas simplificados para as fases inicial e madura de um caso do grupo 3.

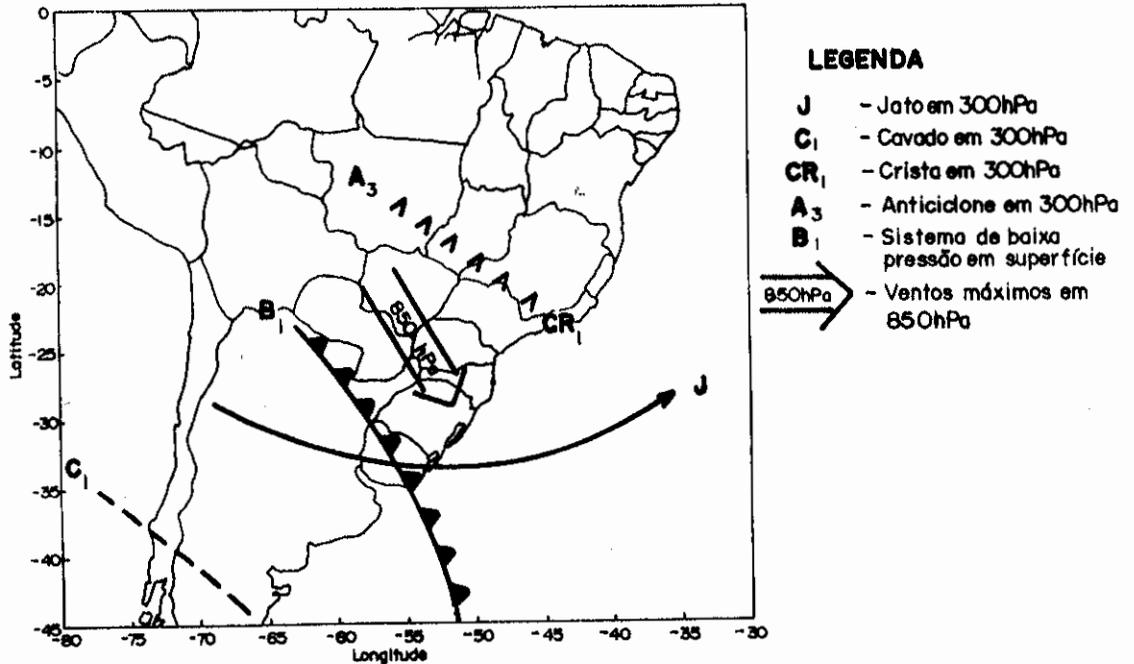


Fig. 4.5 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do Grupo 3.

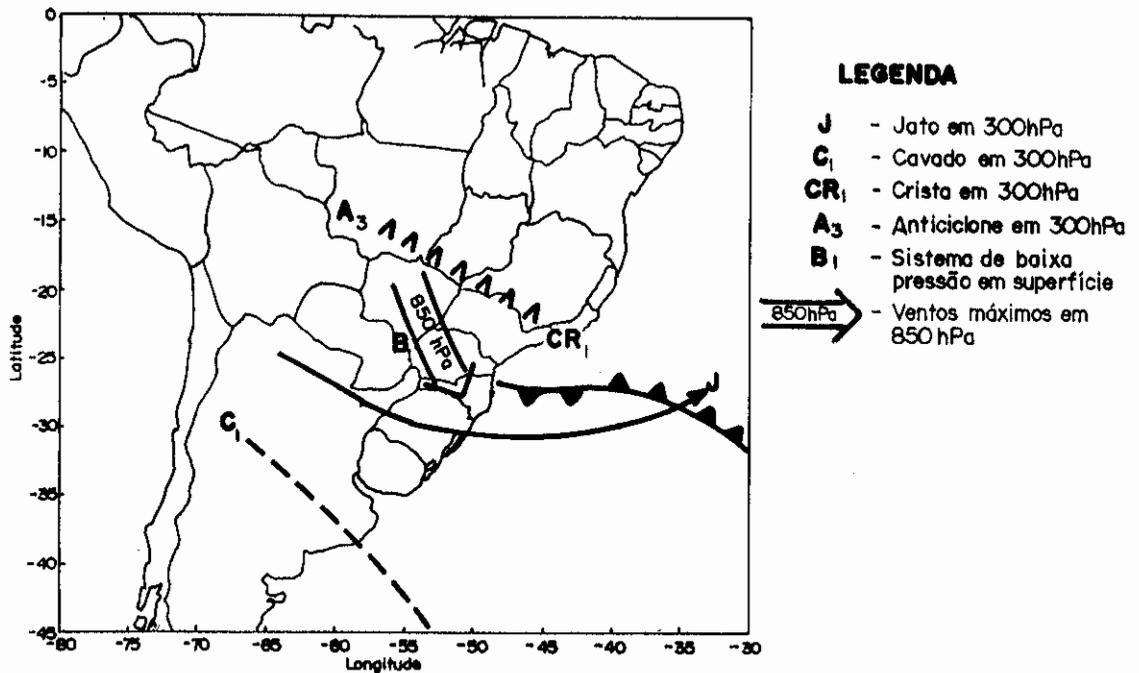


Fig. 4.6 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase madura de um caso do Grupo 3.

Em situações deste tipo, um sistema frontal avança rapidamente do sul do Rio Grande do Sul até o norte do Paraná ou desloca-se para o oceano a leste de Santa Catarina. O sistema de baixa pressão (B₁) no norte da Argentina, acompanha o movimento da frente fria.

Nos baixos níveis, o escoamento de noroeste é bastante intenso, vindo do Paraguai e Bolívia onde os valores de teta-e indicam grandes quantidades de umidade e calor. Na fase madura há um rápido movimento para o norte com o escoamento passando pelo oeste do Mato Grosso do Sul e Paraguai, onde está concentrada a maior quantidade de umidade. Esta situação também é propícia ao desenvolvimento de uma IE.

Nos altos níveis, a curvatura anticiclônica da corrente de jato favorece o surgimento de circulações transversais verticais nas regiões de entrada e saída de um CVM. De acordo com Moore e Vanknowe (1992), a curvatura anticiclônica gera divergência a leste do eixo da crista nos altos níveis e convergência a oeste (HS). Esta divergência nos altos níveis provoca movimento vertical ascendente, pois há convergência de massa nos baixos níveis. Quando os ventos nos baixos níveis, transportam umidade e calor para a região de movimento ascendente, reúnem-se as condições ideais para o desenvolvimento convectivo e chuvas intensas.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as características sinóticas para a superfície e 850 hPa e na Tabela 4.6 para 300 hPa.

TABELA 4.5 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM SUPERFÍCIE E EM 850 hPa PARA O GRUPO 3

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Sistema Frontal em Superfície	Sul do RS ou no Norte do Uruguai	Norte do PR ou no litoral de SC
Sistema de Baixa Pressão B1	Norte da Argentina ou Oeste do Paraguai	Norte do Paraguai ou Oeste do PR
Escoamento máximo em 850 hPa	de Noroeste sobre a Região Sul vindo da reg. amazônica	de Noroeste desde o MT e MS passando sobre SC e PR
Campo de Teta-E em 850 hPa	Altos valores no Paraguai, oeste da Região Sul e norte da Argentina	Altos valores desde o centro do Brasil até a Região Sul

TABELA 4.6 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM 300 hPa PARA O GRUPO 3

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Eixo da Crista CR1	de NW-SE no sul de GO, sul de MG ou norte de SP	de NW-SE no MT e sul de GO, norte de SP ou sul de MG
Centro de Circulação Anticiclônica A3	no MT ou no nordeste da Bolívia	no oeste do MT ou no norte da Bolívia
Eixo do Cavado C1	de NW-SE no centro-sul da Argentina	de NW-SE no centro da Argentina
Corrente de Jato	no Uruguai ou sul do RS c/ curvatura anticiclônica	Sobre o RS com curvatura anticiclônica

4.4 - GRUPO 4 - DIFLUÊNCIA NO ESCOAMENTO ZONAL NOS ALTOS NÍVEIS

Situações com difluência no escoamento zonal nos altos níveis foram observadas no inverno (casos 5 e 18) e primavera (caso 4). Esta situação sinótica caracteriza-se por um desenvolvimento convectivo muito intenso, com grandes quantidades de precipitação. Em dois episódios deste grupo foram registradas enchentes no Vale do Itajaí. Apesar da situação sinótica ser semelhante, houve uma variação grande na distribuição temporal da precipitação para os casos de enchentes. Destaca-se o caso 18 ocorrido em um ano de episódio El Niño, durante o qual tipicamente a Região Sul do Brasil registra índices de precipitação anômalos (Kousky et al, 1984).

Os esquemas simplificados para as fases inicial e madura são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

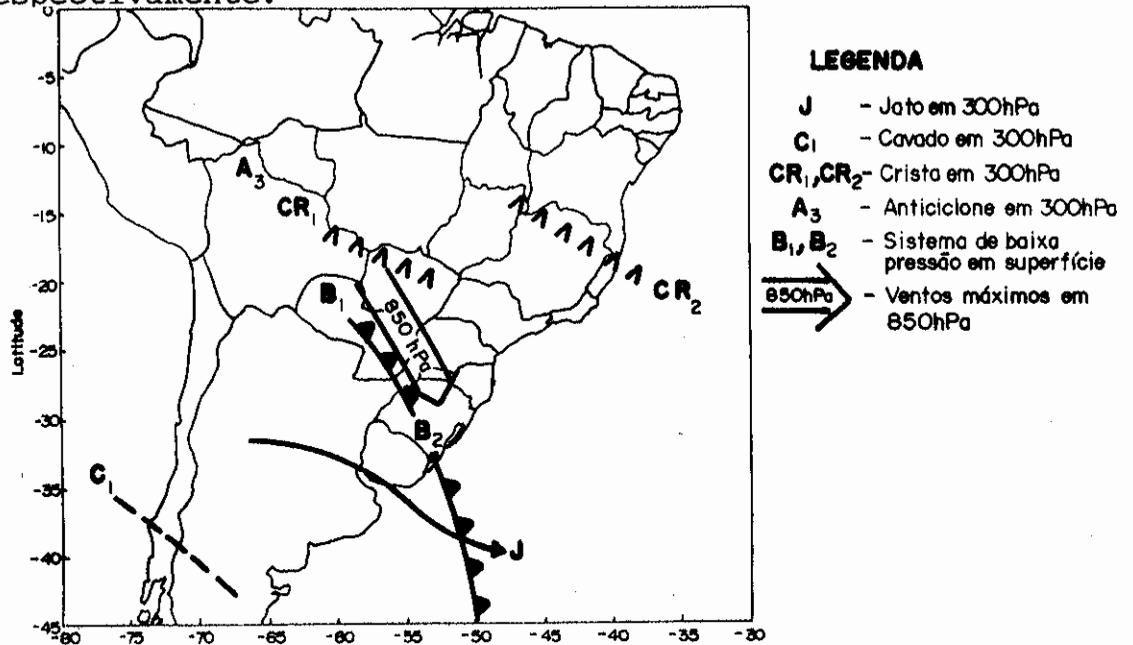


Fig. 4.7 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um caso do Grupo 4.

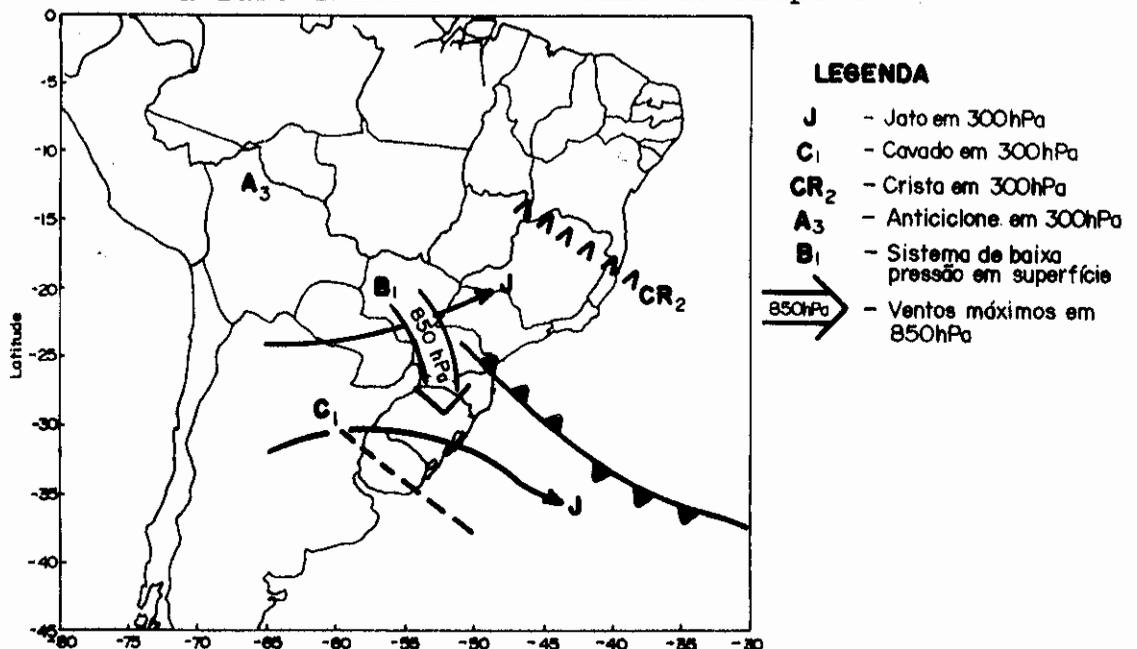


Fig. 4.8 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase madura de um caso do Grupo 4.

Em superfície, um caso do tipo descrito acima pode apresentar ciclogênese no centro do Rio Grande do Sul (com a formação da baixa B2), uma baixa (B1) no norte do Paraguai ou sul da Bolívia e um sistema frontal no sul do Rio Grande do Sul. Na fase madura a baixa B2 desintensifica e a B1 desloca-se para Mato Grosso do Sul ou Bolívia, enquanto o sistema frontal avança do sul do Rio Grande do Sul até o norte de Santa Catarina ou Paraná.

Nos baixos níveis, um escoamento de noroeste com ventos muito fortes, mantém-se paralelo ao sistema frontal durante todo o desenvolvimento. Inicialmente este escoamento vindo do Paraguai transporta umidade e calor para o oeste de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Na fase madura, há um pequeno desvio com este escoamento tornando-se mais meridional sobre o Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Nos altos níveis, a difluência no escoamento zonal durante a fase madura de desenvolvimento, é a característica que mais influi na precipitação. A difluência no escoamento gera uma região de deformação no escoamento zonal que provoca divergência e movimento vertical ascendente em toda a camada da atmosfera. Como nos baixos níveis há transporte de umidade para a região de movimento ascendente, as condições para o desenvolvimento da convecção são intensificadas.

Além da difluência, uma corrente de jato curvada ciclonicamente fica oscilando entre o Uruguai e o Rio Grande do Sul e um cavado, ao aproximar-se da região de difluência aumenta a instabilidade criando regiões de convergência e divergência. A função deste cavado é justamente aumentar a instabilidade disparando o processo convectivo, como observado por Rockwood e Maddox (1988).

Na Tabela 4.7 é apresentado o quadro resumo com as características sinóticas para a superfície e 850 hPa e na Tabela 4.8 para 300 hPa.

TABELA 4.7 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM SUPERFÍCIE E EM 850 hPa PARA O GRUPO 4

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Sistema Frontal em Superfície	Desde o Paraguai até o sul do RS	Sobre o PR ou norte de SC
Sistema de Baixa Pressão B1	no Norte do Paraguai	Leste da Bolívia ou oeste do MS
Sistema de Baixa Pressão B2	no Sul do RS	
Escoamento máximo em 850 hPa	de Noroeste no oeste de SC e RS vindo do Paraguai	de Noroeste no PR, SC e RS vindo do Paraguai
Campo de Teta-E em 850 hPa	Altos valores no centro do Brasil, oeste do Paraguai e sul da Bolívia	Altos valores no Paraguai e centro do Brasil

**TABELA 4.8 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
SINÓTICAS EM 300 hPa PARA O GRUPO 4**

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Eixo da Crista CR1	de NW-SE no norte da Bolívia	
Eixo da Crista CR2	de NW-SE no norte de MG	de NW-SE no norte de MG
Centro de Circulação Anticiclônica A3	no Norte da Bolívia ou sobre o Acre	no Norte da Bolívia ou sobre o Acre
Eixo do Cavado C1	de NW-SE no centro-sul da Argentina	de NW-SE no Uruguai ou sul do RS
Corrente de Jato	Sobre o Uruguai ou sul do RS com curvatura ciclônica	Difluência com um ramo sobre o Uruguai ou RS e o outro no Paraguai e centro do Brasil

4.5 - GRUPO 5 - SISTEMA FRONTAL RETROCEDENDO PARA A REGIÃO SUL COMO FRENTE QUENTE

A situação sinótica onde um sistema frontal passou pela Região Sul do Brasil e depois retrocedeu como frente quente, foi encontrada no outono (casos 3 e 17) e inverno (caso 7). Nos episódios 3 e 17 que ocorreram no mês de maio a precipitação provocou enchentes no Vale do Itajaí. A distribuição temporal da precipitação indica que os mecanismos responsáveis pelas chuvas permaneceram próximos do Vale do Itajaí por um período de tempo relativamente longo (mais de três dias).

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentados os esquemas simplificados para as fases inicial e madura do grupo 5.

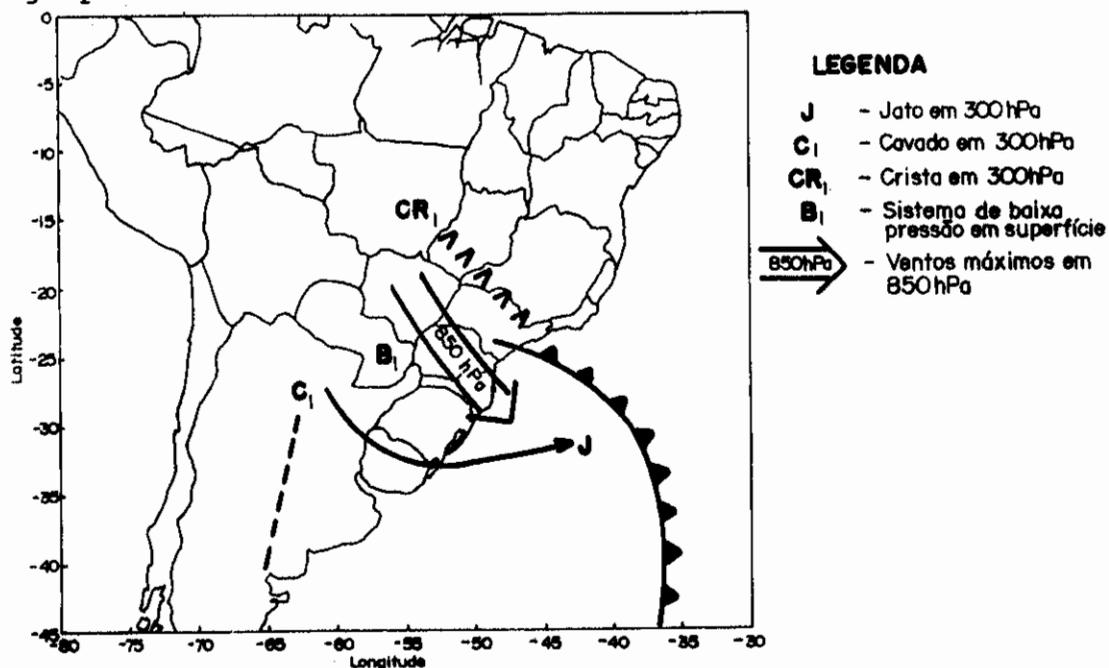


Fig. 4.9 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase inicial de um episódio do Grupo 5.

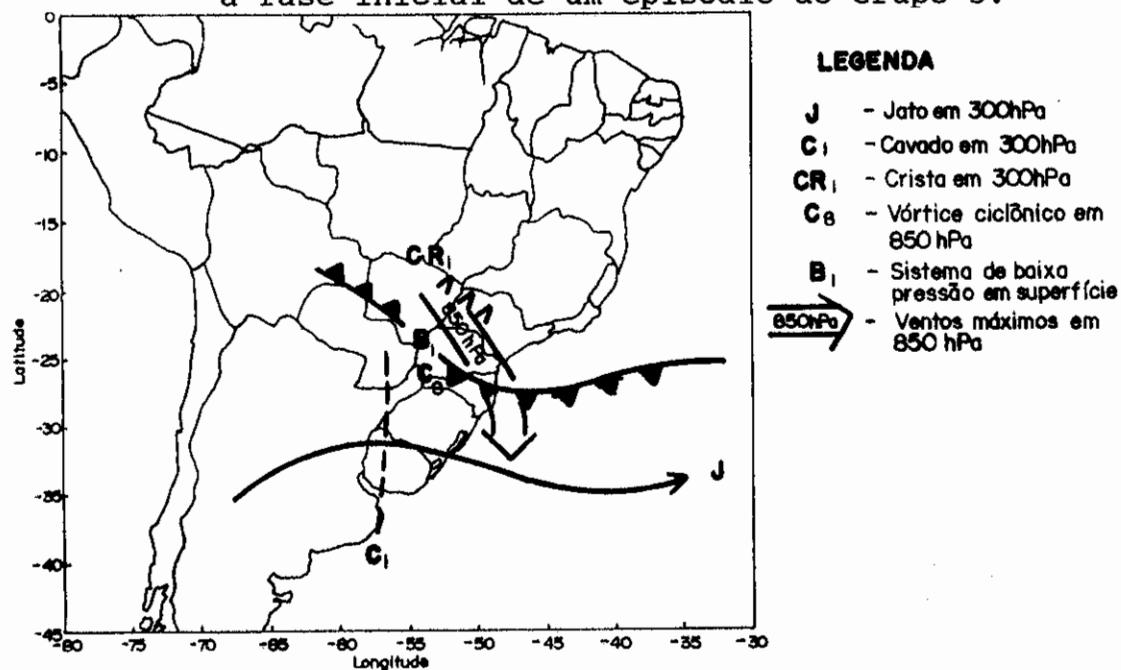


Fig. 4.10 - Esquema simplificado da situação sinótica para a fase madura de um caso do Grupo 5.

Numa situação deste tipo, observa-se um sistema frontal que passa pela Região Sul do Brasil e depois retorna como frente quente até Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul, ondulando no oeste de Santa Catarina, onde desenvolve-se o sistema de baixa pressão B1. Esta frente quente permanece sobre a Região Sul por vários dias, favorecendo a ocorrência de precipitações.

Nos baixos níveis, o escoamento de noroeste vindo do MS transporta ar úmido e quente da região central e oeste da América do Sul, para a Região Sul do Brasil. Na fase madura desenvolve-se um vórtice ciclônico (C8) no oeste da Região Sul, relacionado ao sistema de baixa pressão (B1) em superfície.

Nos altos níveis, observa-se a rápida aproximação de um cavado (C1) que aumenta a instabilidade e intensifica a convecção que gera as fortes chuvas. A corrente de jato inicialmente com curvatura anticiclônica, curva-se ciclonicamente com o deslocamento do cavado.

Na Tabela 4.9 é apresentado o quadro resumo com as características sinóticas para a superfície e 850 hPa e na Tabela 4.10 para 300 hPa.

TABELA 4.9 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM SUPERFÍCIE E EM 850 hPa PARA O GRUPO 5

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Sistema Frontal em Superfície	No litoral de SP ou do PR	Sobre SC e sul do PR, ondulando no oeste de SC
Sistema de Baixa Pressão B1	No sul do Paraguai	No noroeste do PR
Vórtice Ciclônico C8 em 850 hPa		No oeste do PR ou centro do Paraguai
Escoamento máximo em 850 hPa	De Noroeste sobre SC e leste do RS vindo do MS	De noroeste no PR curvando-se para o sul no Oceano
Campo de Teta-E em 850 hPa	Altos valores no MS e próximo do oeste da Região Sul do Brasil	Altos valores no Paraguai e oeste da Região Sul do Brasil

TABELA 4.10 - RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SINÓTICAS EM 300 hPa PARA O GRUPO 5

Sistema Sinótico	Posicionamento e Características Dinâmicas e Termodinâmicas	
	Fase Inicial	Fase Madura
Eixo da Crista CR1	Desde GO, passando por SP até o Oceano Atlântico	Sobre o leste do MS e oeste de SP
Eixo do Cavado C1	Meridional no centro da Argentina	Meridional no centro ou oeste do Uruguai
Corrente de Jato	Sobre o Uruguai ou sul do RS com curvatura anticiclônica	No sul do Uruguai com curvatura ciclônica

4.6 - COMENTÁRIOS GERAIS

Dos 21 episódios analisados neste estudo, apenas o caso ocorrido entre 26 e 30 de março de 1981 (caso 11) não apresentou nenhuma das características dos cinco grupos acima.

Na sua fase inicial, este episódio apresentava duas cristas em 300 hPa, uma com inclinação quase meridional no centro da Argentina (CR1) e outra no sul da Bahia (CR2). Também em 300 hPa, eram observados dois cavados, com inclinação para leste, no Mato Grosso do Sul (C1) e no noroeste da Argentina (C2). Além disso, a região de ventos máximos estava localizada sobre o oceano Atlântico, a leste da Argentina. Em 850 hPa, o máximo no escoamento de nordeste estava passando pelo centro do Paraná e oeste de Santa Catarina, vindo da Região Sudeste.

Na fase madura, a crista CR1 deslocou-se para o oceano Atlântico, a leste do Uruguai, e a crista CR2 inclinou-se para oeste no norte de Minas Gerais. O cavado C1, que se encontrava sobre o Mato Grosso do Sul dissipou-se, enquanto que o cavado C2 tornou-se mais profundo. Nesta fase, surgiu uma região de ventos mais intensos desde o oeste dos Andes até o noroeste da Argentina. Em 850 hPa, o escoamento quase não sofreu alterações e em superfície surgiu um sistema frontal sobre a Argentina.

Neste episódio, provavelmente os mecanismos associados à precipitação intensa, foram de escala menor que a sinótica, uma vez que o sistema frontal encontrava-se bastante distante da região onde ela ocorreu.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentados os esquemas simplificados da situação sinótica para o caso 11.

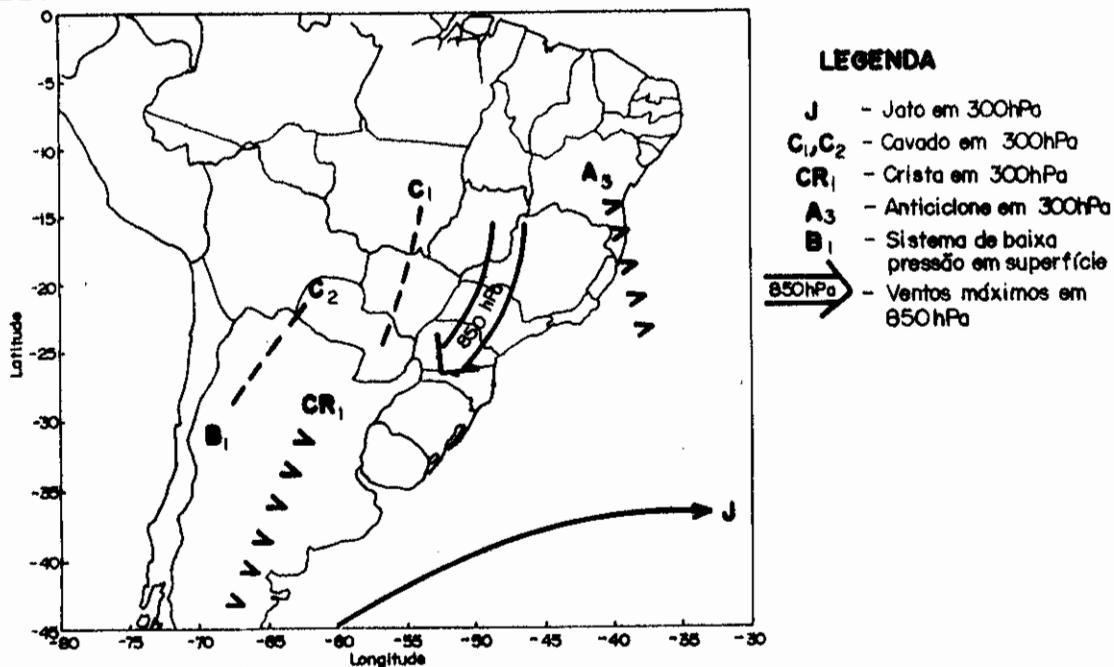


Fig. 4.11 - Esquema da situação do tempo sobre a América do Sul para a fase inicial do caso 11.

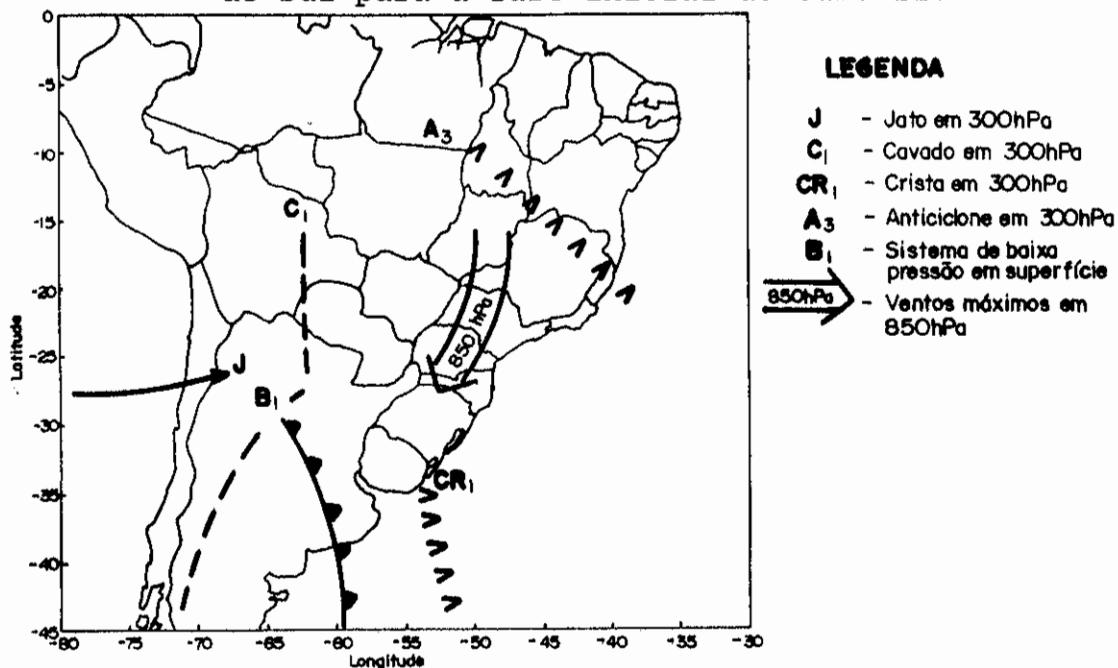


Fig. 4.12 - Esquema da situação do tempo sobre a América do Sul para a fase madura do caso 11.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASOS

Neste capítulo são apresentados dois estudos de caso de chuvas intensas ocorridos na região do Vale do Itajaí. Estes dois casos representam situações bastante diferentes e exemplificam a complexidade dos mecanismos que geram as chuvas intensas.

O primeiro dos casos, aconteceu entre os dias 19 a 21 de dezembro de 1980 e está classificado entre os do grupo 1, apresentado no capítulo anterior. A precipitação ocorrida neste episódio esteve associada a um sistema frontal estacionário sobre o estado de Santa Catarina que provocou enchentes, com grandes prejuízos, principalmente nas cidades do Vale do Itajaí.

O segundo caso aconteceu entre os dias 22 a 24 de setembro de 1983, e está classificado no grupo 3. Neste caso a precipitação máxima que ocorreu no dia 23 foi produzida pela interação entre sistemas de escalas diferentes. Também neste episódio as chuvas causaram inundações em várias cidades do Vale do Itajaí.

5.1 - PRIMEIRO CASO: 19 A 21 DE DEZEMBRO DE 1980

As chuvas intensas na Região Sul neste episódio ocorreram entre os dias 19 a 21 de dezembro de 1980. Neste período, a Região Sul do Brasil sofreu enormes prejuízos em decorrência da intensa precipitação, principalmente o Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina. No dia 22 de dezembro de 1980, o nível do rio Itajaí-Açú, no centro da cidade de Blumenau, atingiu a cota de 13,27 m (a cota crítica para o início de uma

enchente é cerca de 8,5 m). Grande parte das ruas do centro da cidade ficaram encobertas pelas águas, diversos estabelecimentos comerciais foram alagados e parte da distribuição de água e energia elétrica foi interrompida, causando muitos transtornos à população.

A Figura 5.1 apresenta o mapa de isoietas com o total acumulado no período de 19 a 21 de dezembro, na região da bacia do rio Itajaí. Observa-se uma distribuição bastante homogênea exceto em dois pontos, o que pode evidenciar efeitos da topografia.

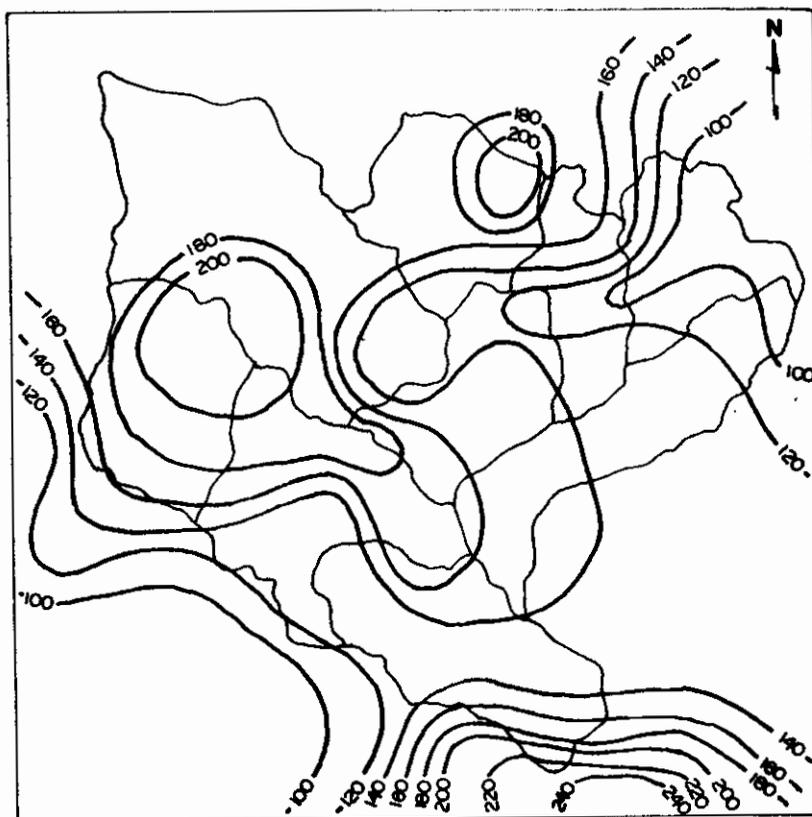


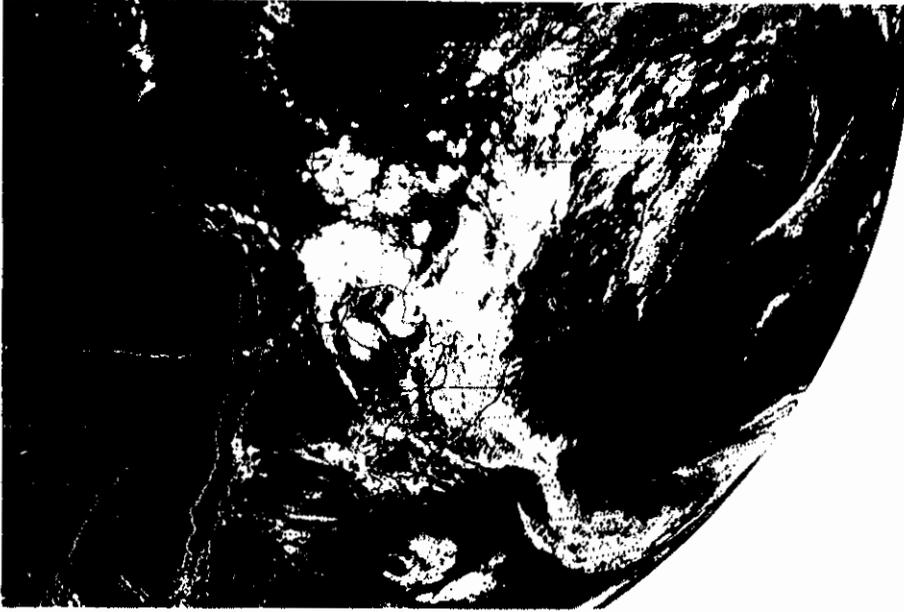
Fig. 5.1 - Mapa de isoietas (mm) referente aos dias 19 a 21 de dezembro de 1980, para a bacia do rio Itajaí.

5.1.1 - PRINCIPAIS ASPECTOS SINÓTICOS

Na sequência de imagens de satélite no canal espectral infravermelho apresentada na Figura 5.2, observa-se a evolução da situação sinótica a partir do dia 19 às 18:16 TMG. Nota-se um sistema frontal desorganizado e fraco sobre a Região Sul, a convecção no centro do continente, associada à presença deste sistema frontal e a configuração típica de um vórtice ciclônico nos altos níveis, situado sobre o oceano Atlântico, na costa da Região Nordeste (Figura 5.2a). No horário seguinte a banda de nebulosidade associada ao sistema frontal é mais evidente (Figura 5.2b). No centro do continente a nebulosidade mais intensa está associada a um centro de baixa pressão à superfície (baixa do Chaco), localizado no sudeste da Bolívia, mais nítido na imagem das 15:46 TMG (Figura 5.2c).

No dia 21 de dezembro às 06:16 TMG (Figura 5.2d) o sistema frontal continua atuante sobre grande parte da Região Sul do Brasil e o vórtice ciclônico, já bem próximo da Bahia, tem a nebulosidade mais intensa ao norte do seu centro. O deslocamento do sistema frontal, a diminuição da atividade convectiva no centro do continente, e inúmeras células convectivas (denotando o ciclo diário) na região próxima ao centro do vórtice sobre a Bahia podem ser observados no dia 21, às 21:16 TMG.

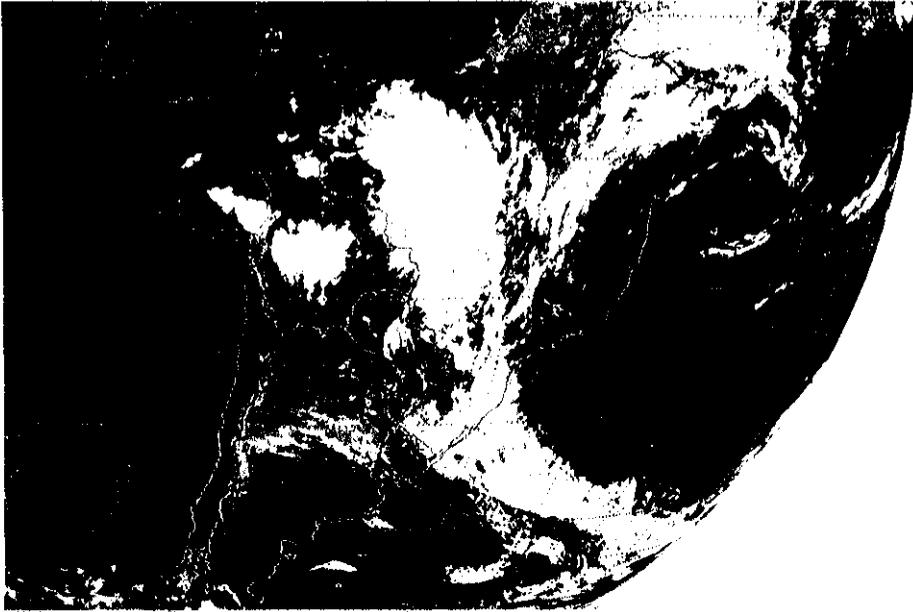
No dia 22 o sistema frontal deslocou-se para a Região Sudeste do Brasil produzindo intensa atividade convectiva sobre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Sobre a Região Sul, a presença de um centro de alta pressão sobre o Uruguai diminuiu bastante a nebulosidade.



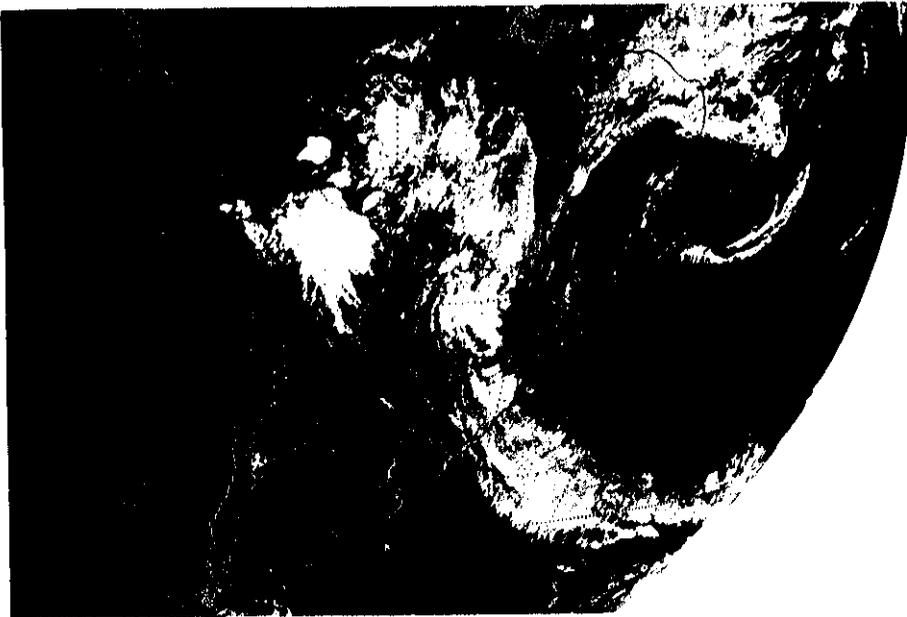
(a)

Fig. 5.2 - Imagem do satélite GOES no canal infravermelho para: (a) dia 19 às 18:16 TMG (b) dia 20 às 06:16 TMG, (c) dia 20 às 15:46TMG, (d) dia 21 às 06:16 TMG, (e) dia 21 às 21:16 TMG.

(continua)



(b)



(c)

Fig. 5.2 - Continuação.



(d)



(e)

Fig. 5.2 - Conclusão.

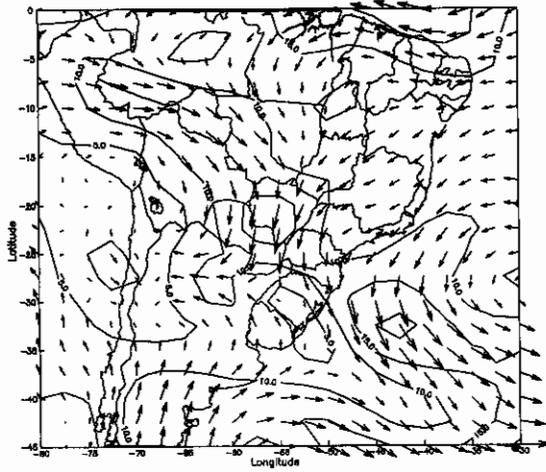
A Figura 5.3 apresenta os campos de vento, temperatura potencial equivalente (Teta-e), divergência e

advecção horizontal de temperatura no dia 19 de dezembro, às 12:00 TMG para 850 hPa.

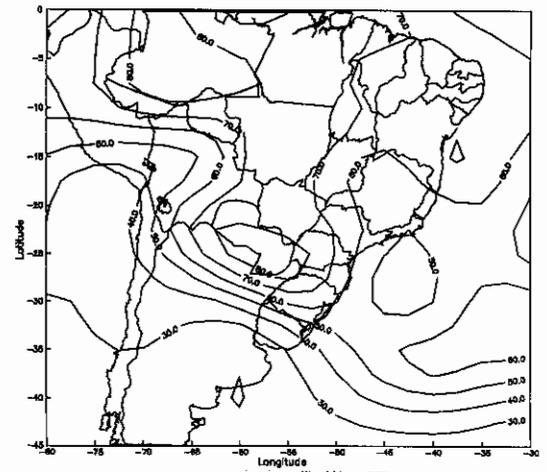
Na Figura 5.3a nota-se uma deformação no escoamento sobre o Rio Grande do Sul e nordeste da Argentina. Esta deformação é um dos mecanismos que contribuem para a formação ou dissipação de frentes, dependendo da orientação das isotermas (Peterssen, 1956). Analisando-se o campo de vento junto com o mapa de Teta-e (Figura 5.3b) observa-se que sobre o norte da Argentina e Paraguai existe um máximo de teta-e o qual propicia o desenvolvimento convectivo pois há um intenso fluxo meridional de umidade proveniente da Amazônia. Conforme mencionado na seção 3.2.4, vários estudos mostraram a tendência da atividade convectiva posicionar-se próxima do eixo da crista de Teta-e, o que acontece sobre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

No campo de divergência de massa (Figura 5.3c) observa-se convergência sobre toda a Região Sul do Brasil, Argentina e Paraguai, com um máximo no oeste da Argentina, em torno de 30°S .

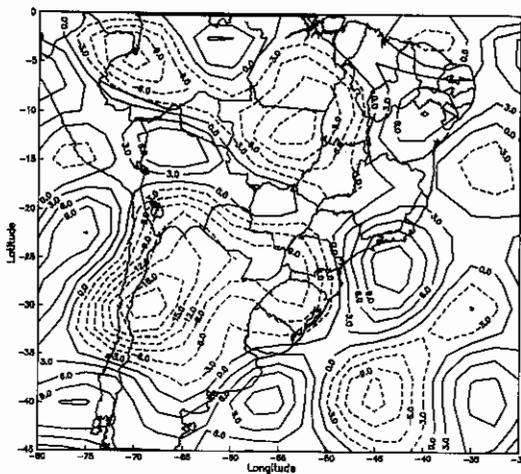
No mapa de advecção de temperatura observa-se um núcleo de advecção quente próximo de Santa Catarina e outro no norte da Argentina (Figura 5.5d). Esta configuração favorece o desenvolvimento convectivo através da diminuição da pressão em superfície e produz movimento vertical ascendente. Junto com o transporte de umidade desde a região central e norte do Brasil, a advecção quente favorece o desenvolvimento convectivo e a ocorrência de chuvas fortes.



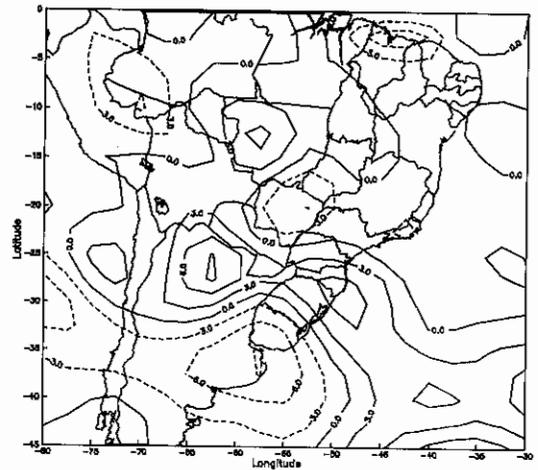
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.3 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s), (b) Temperatura Potencial Equivalente ($^{\circ}\text{C}$), (c) Divergência (10^{-6}s^{-1}), (d) Advecção de Temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) para 850 hPa em 19 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

Os campos de vento e divergência para 300 hPa e das advecções de temperatura e vorticidade para 500 hPa às 12:00 TMG do dia 19 são mostrados na Figura 5.4.

No campo de vento destaca-se uma corrente de jato no sul do Uruguai, cuja curvatura torna-se anticiclônica sobre o oceano Atlântico (Figura 5.4a). Segundo Moore e Vanknowe (1992), o efeito da curvatura anticiclônica sobre um escoamento uniforme no H.S., é intensificar a divergência no lado esquerdo da região de entrada de um centro de velocidades máximas (c.v.m.) e a convergência na região de saída. Isto é confirmado no mapa da divergência mostrado na Figura 5.4b. Além do jato, a presença de um vórtice ciclônico no leste da BA também provoca difluência no escoamento zonal. Este vórtice parece também contribuir para o lento deslocamento do sistema frontal, uma vez que perturba o escoamento nos altos níveis.

A advecção de temperatura em 500 hPa (Figura 5.4c) apresenta núcleos positivos no centro-oeste da Argentina e no Oceano Atlântico a sudeste do Uruguai. Na Região Sul e no centro da Argentina havia advecção quente também em 850 hPa, portanto toda a camada 500-850 hPa está se tornando mais quente, diminuindo assim a pressão em superfície. Esta configuração favorece à intensificação de um sistema de baixa pressão em superfície e o desenvolvimento convectivo, pois há transporte de umidade nos baixos níveis em direção à região de advecção quente.

No mapa da advecção de vorticidade absoluta em 500 hPa observam-se um núcleo negativo (ciclônico) no centro da Argentina e outro positivo (anticiclônico) no Uruguai e Região Sul do Brasil (Figura 5.4d).

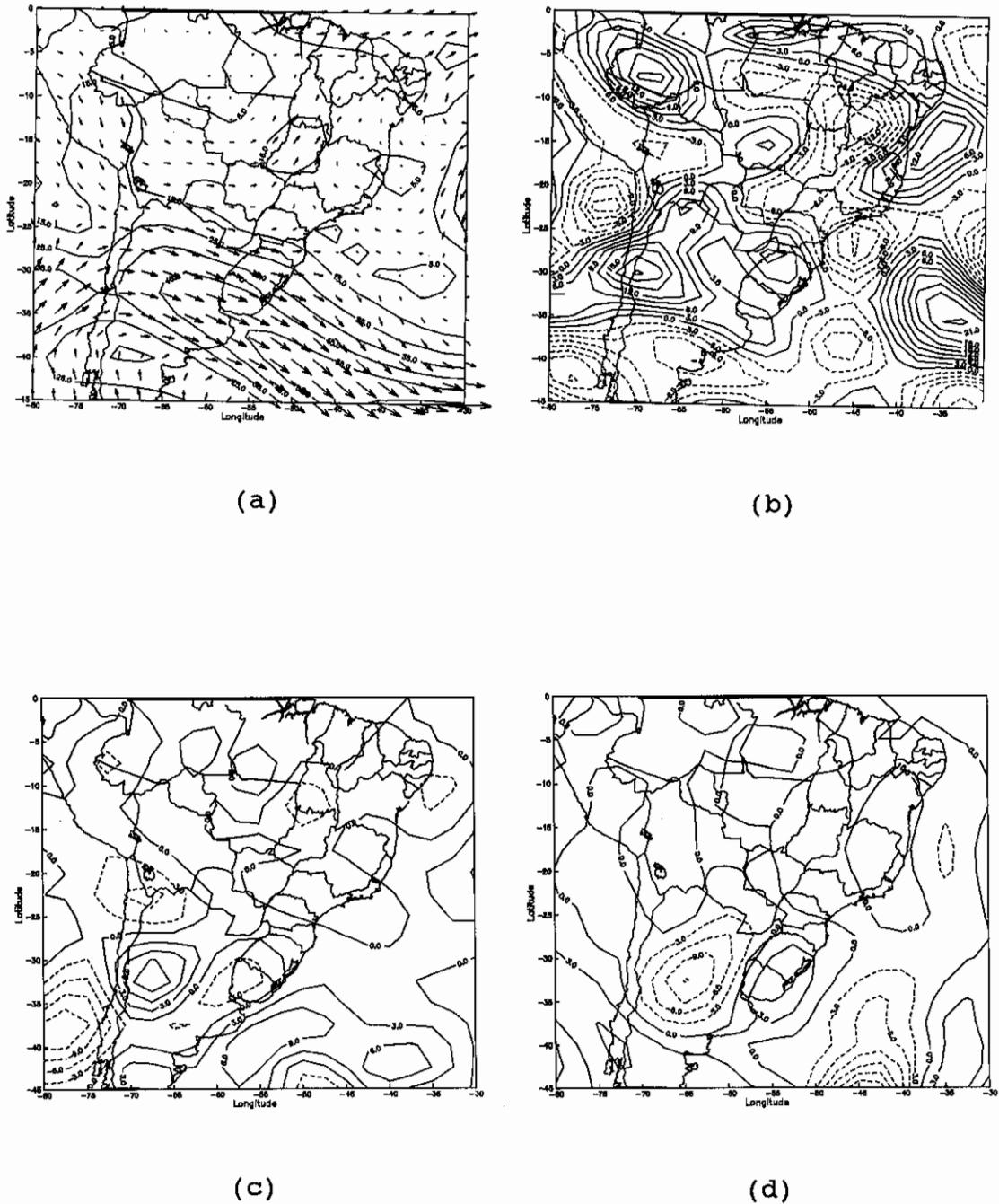


Fig.5.4 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s) e (b) Divergência (10^{-6} s^{-1}) para 300 hPa; (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) e (d) Advecção de Vorticidade Absoluta (10^{-13} s^{-2}) para 500 hPa em 19 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

Na Figura 5.5, são apresentados os campos de vento, Teta-e, divergência de massa e advecção horizontal

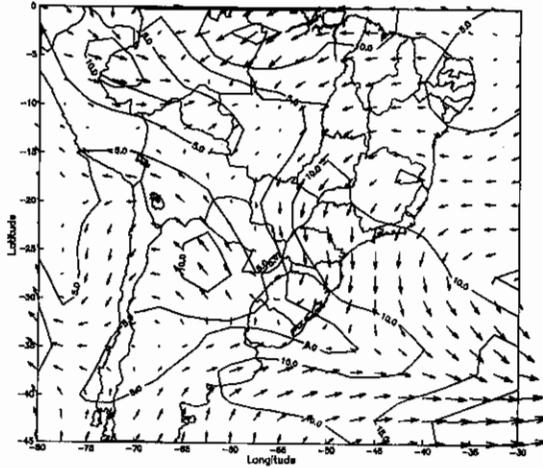
de temperatura para 850 hPa às 12:00 TMG do dia 20 de dezembro.

No campo de vento (Figura 5.5a) notam-se algumas mudanças em relação ao horário anterior . Onde predominavam ventos de noroeste (Mato Grosso e Bolívia) e de nordeste (Paraguai), são observados ventos de sul, sugerindo um avanço do sistema frontal nessa região, como de fato é verificado nas cartas de superfície (não mostradas). Por outro lado, a deformação no sul do Rio Grande do Sul indica que o deslocamento foi mais lento nesta região.

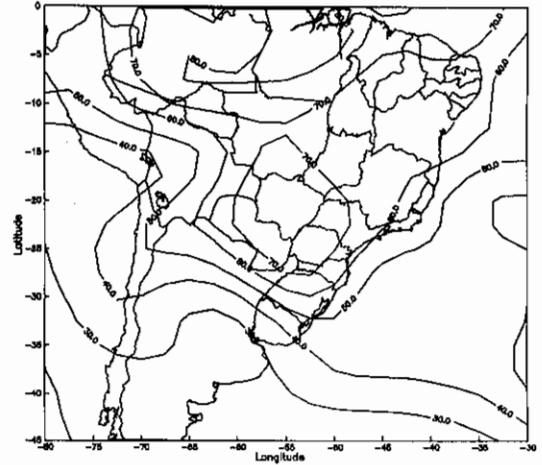
No campo de Teta-e (Figura 5.5b) observa-se que a crista adquiriu uma orientação mais meridional acompanhando a nova orientação da banda de nebulosidade e do sistema frontal. Também aqui, quando são comparados os campos de vento e de Teta-e percebe-se o transporte de umidade pelo escoamento vindo da região central e sudeste do Brasil, em direção à Região Sul.

O lento movimento da atividade convectiva próximo da Região Sul também pode ser deduzido pelo mapa da divergência (Figura 5.5c) onde observa-se a intensa convergência de massa sobre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

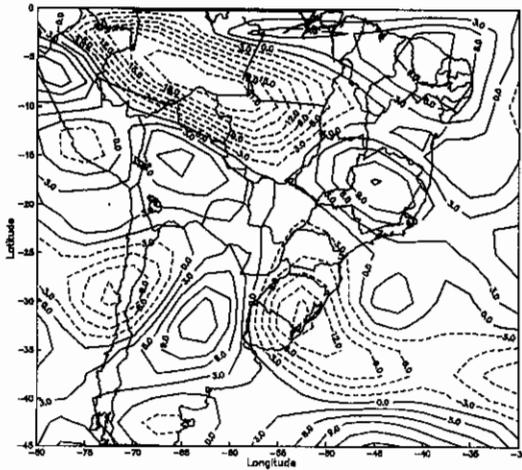
No mapa da advecção de temperatura o núcleo de máximo está localizado sobre o leste de Santa Catarina (Figura 5.5d). Embora a configuração deste campo tenha variado um pouco em relação ao dia anterior, a situação mantém-se favorável ao abaixamento da pressão em superfície.



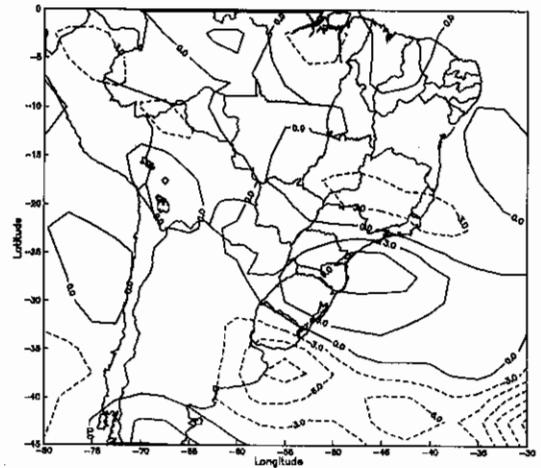
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.5 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s), (b) Temperatura Potencial Equivalente ($^{\circ}\text{C}$), (c) Divergência (10^{-6}s^{-1}) e (d) Advecção de Temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) para 850 hPa em 20 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

Na Figura 5.6 apresentam-se os campos de vento e divergência para 300 hPa e das advecções de

temperatura e vorticidade para 500 hPa, às 12:00 TMG do dia 20 de dezembro.

No campo de vento observa-se que houve uma intensificação da crista sobre o Mato Grosso do Sul (Figura 5.6a). Esta é uma das causas do aumento da divergência de massa observada na Figura 5.6b. A penetração do vórtice sobre a Região Nordeste do Brasil foi outro fator que contribuiu para a divergência na Região Sul, pois a difluência no escoamento zonal intensificou a ponto de se ter ventos de sul sobre São Paulo, Goiás e Tocantins. A corrente de jato subtropical permaneceu quase na mesma posição que no dia anterior porém diminuiu sua curvatura anticiclônica, talvez em função do aprofundamento do cavado no centro da Argentina ou do deslocamento da crista.

Neste dia os mapas de advecção de temperatura e vorticidade apresentam condições para a intensificação de um sistema de baixa pressão na superfície. A advecção de temperatura tem um máximo de advecção quente no leste do Uruguai e sudeste do Rio Grande do Sul (Figura 5.6c), e há um máximo de advecção ciclônica nesta mesma região (Figura 5.6d). Portanto, neste dia os dois parâmetros colaboram para a diminuição da pressão na superfície, principalmente no leste da Região Sul do Brasil. Esta configuração associada ao alto teor de umidade nos baixos níveis, resulta na condição ideal para o desenvolvimento convectivo e a ocorrência de precipitações.

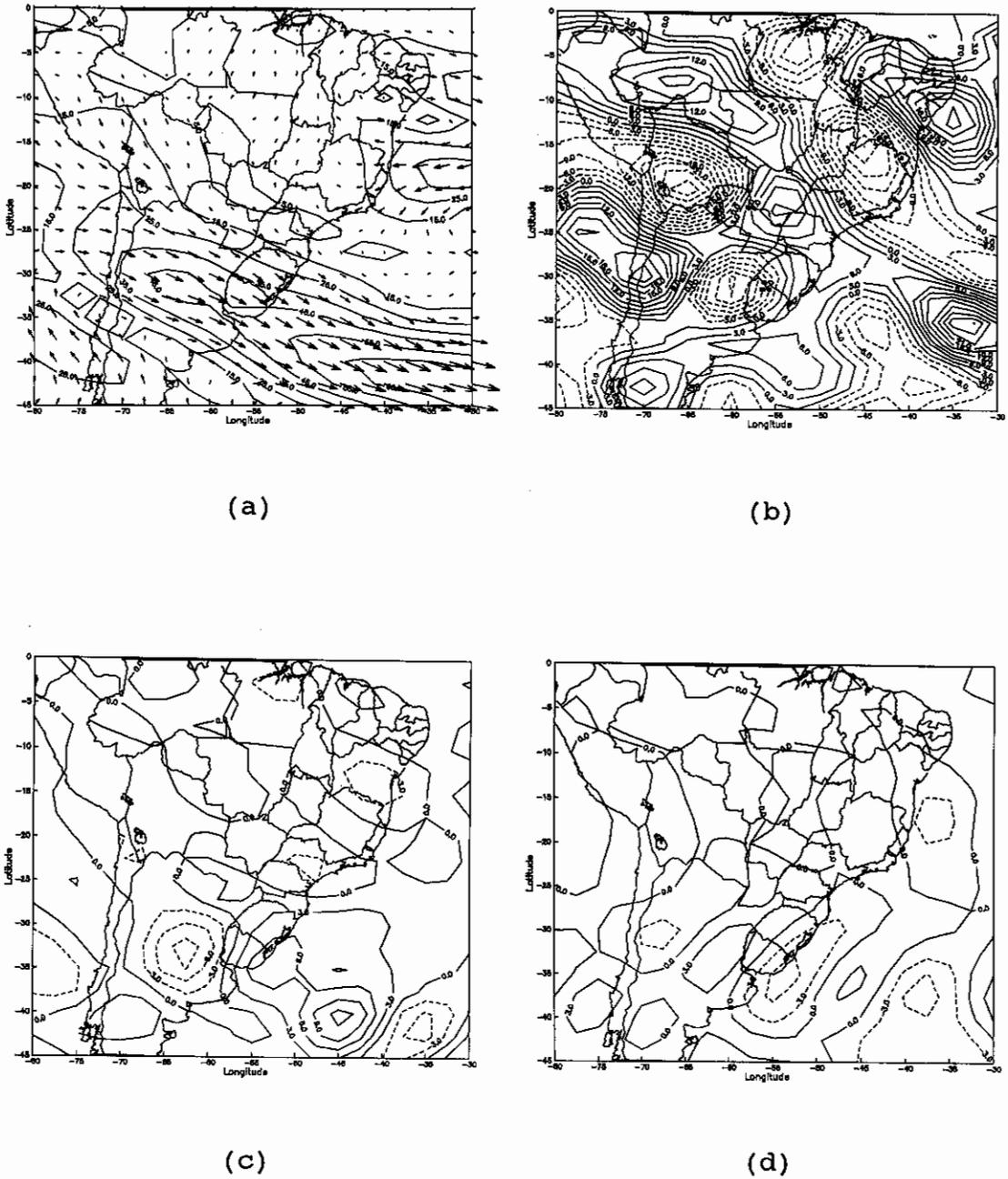


Fig.5.6 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s) e (b) Divergência ($10^{-6} s^{-1}$) para 300 hPa, (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}C/dia$) e (d) Advecção de Vorticidade Absoluta ($10^{-13} s^{-2}$) para 500 hPa em 20 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

Na Figura 5.7 são apresentados os campos de vento, Teta-e, divergência de massa e advecção de temperatura para 850 hPa às 12:00 TMG do dia 21 de dezembro.

No campo de vento (Figura 5.7a), observa-se claramente a canalização do fluxo meridional, quase na forma de um jato que passa pela Região Sul e curva-se ciclonicamente no Rio Grande do Sul e Uruguai. Pela direção do escoamento e pelos altos valores de Teta-e (Figura 5.7b) nota-se o transporte de umidade desde o Brasil Central em direção à Região Sul. Este escoamento, bem mais definido que nos dias anteriores, foi um dos fatores que contribuíram para a ocorrência de grandes quantidades de precipitação nesse dia.

No campo de divergência (Figura 5.7c) observa-se que o máximo de convergência de massa está localizado no sul do Uruguai, em uma região próxima da circulação anticiclônica. Esta situação é semelhante à discutida por Sakamoto e Silva Dias (1990), sobre a influência da convergência de massa sobre a precipitação em sistemas frontais estacionários. Os autores observaram em um caso de sistema frontal semi-estacionário, que a precipitação não é necessariamente influenciada por uma convergência de massa muito elevada, e sim por um escoamento meridional úmido vindo do Brasil Central.

No mapa da advecção de temperatura (Figura 5.7d) observa-se que o máximo de advecção quente está localizado no sudeste do Rio Grande do Sul. Esta configuração mantém as condições para movimento vertical ascendente o qual, junto com o intenso transporte de umidade pode desenvolver convecção profunda e provocar chuvas intensas.

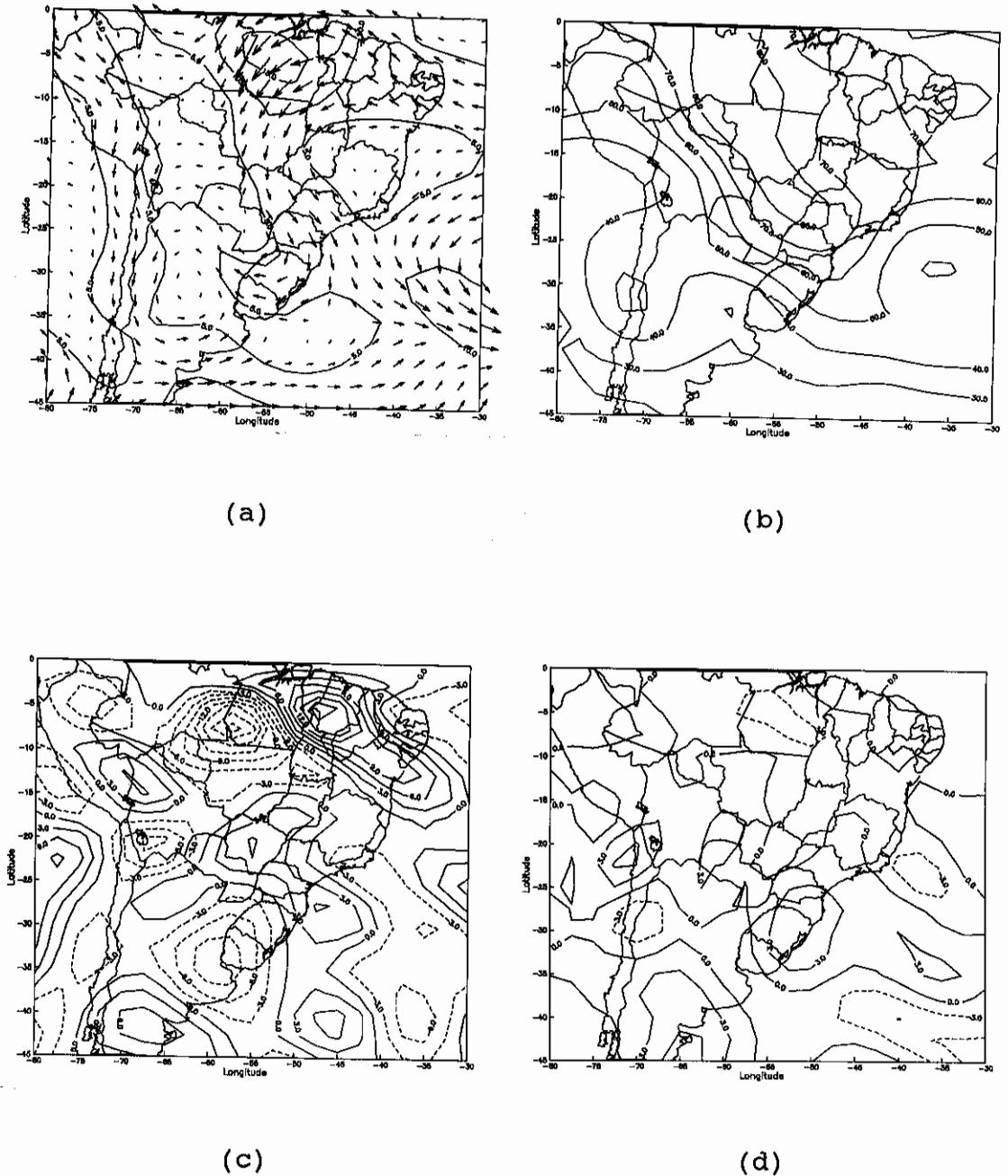


Fig. 5.7 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s), (b) Temperatura Potencial Equivalente ($^{\circ}\text{C}$), (c) Divergência (10^{-6}s^{-1}), (d) Advecção de Temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) para 850 hPa em 21 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

A Figura 5.8 apresenta o campo de vento e de divergência para 300 hPa, além da advecção de temperatura

e de vorticidade absoluta em 500 hPa no dia 21 às 12:00 TMG.

Neste último dia do episódio (fase madura), o cavado sobre a Argentina deslocou-se para nordeste e a corrente de jato subtropical associada a ele adquiriu curvatura anticiclônica, com um c.v.m. localizado no Uruguai e Oceano Atlântico com mais de 55 m/s (Figura 5.8a). Nestas situações, os padrões de divergência e convergência associados ao c.v.m., apresentam divergência na região de entrada do c.v.m. e convergência na saída como é comprovado no mapa da divergência na Figura 5.8b. Além disso, a divergência observada sobre o Paraná e Santa Catarina, também foi influenciada pelo deslocamento para o sul do vórtice ciclônico sobre a Bahia.

No mapa da advecção de temperatura observa-se advecção fria sobre a grande parte da Região Sul do Brasil. Como em 850 hPa predomina a advecção quente, o suporte vertical para a intensificação de uma baixa em superfície é reduzido. Por outro lado a advecção de ar frio (pesado) por sobre um ar mais quente (leve) gera um potencial de instabilidade que pode resultar em movimentos verticais intensos.

No mapa de advecção de vorticidade absoluta, nota-se um máximo de advecção anticiclônica sobre o Rio Grande do Sul e valores positivos também no restante da Região Sul do Brasil. Da análise isolada deste parâmetro conclui-se que a tendência é de aumento da pressão em superfície, portanto este termo está colaborando para a dissipação dos sistemas que geram as chuvas.

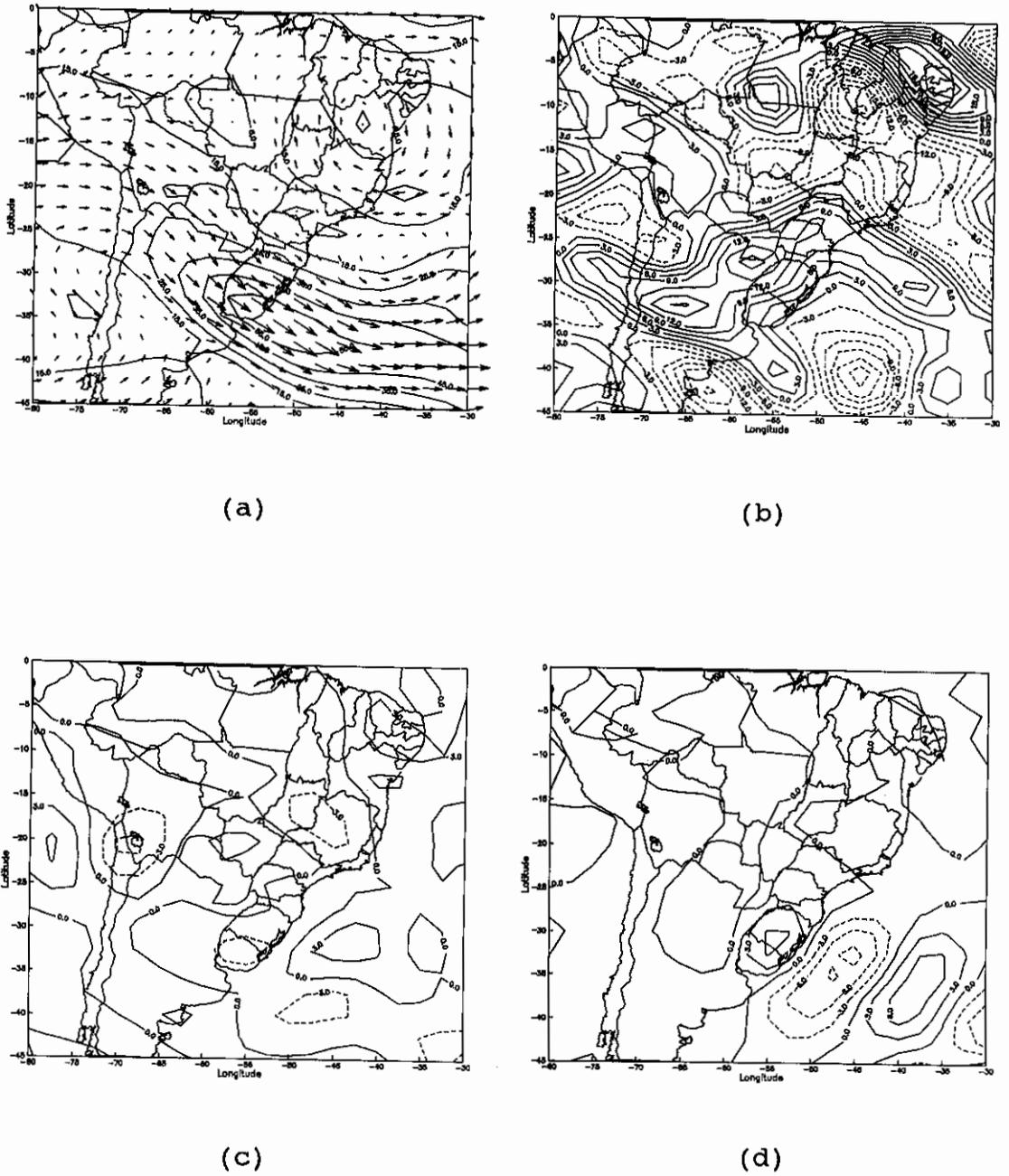


Fig.5.8 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s) e (b) Divergência ($10^{-6} s^{-1}$) para 300 hPa, (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}C/dia$) e (d) Advecção de Vorticidade Absoluta ($10^{-13} s^{-2}$) para 500 hPa em 20 de dezembro de 1980 às 12:00 TMG.

5.1.2 - COMENTÁRIOS GERAIS

Este episódio foi caracterizado por uma interação entre vários sistemas de escala sinótica. Em superfície o principal mecanismo de escala sinótica presente na região onde ocorreram as fortes chuvas, foi um sistema frontal estacionário sobre o norte do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Nos baixos níveis, um escoamento meridional provavelmente transportou ar quente e grandes quantidades de vapor de água desde o Brasil Central até a Região Sul. Este ar úmido, ao ser levantado na dianteira do sistema frontal, esfriou e liberou calor latente de condensação, desenvolvendo a convecção e produzindo chuvas.

Nos altos níveis, a penetração do vórtice ciclônico deformou o campo de escoamento, aumentou a difluência no escoamento zonal e, como consequência, diminuiu a velocidade de deslocamento do sistema frontal em superfície. Na Argentina, o cavado quase-estacionário manteve a corrente de jato sobre o Uruguai. A permanência do cavado sobre a Argentina esteve relacionado a própria estacionaridade da onda, cuja crista permaneceu sobre o sudeste do Brasil, durante todo o episódio.

5.2 - SEGUNDO CASO: 22 A 24 DE SETEMBRO DE 1983

Este caso representa uma situação onde as chuvas ocorrem num intervalo de tempo muito pequeno e em grande intensidade. As chuvas iniciaram no dia 23 e cessaram no dia 24, evidenciando o rápido desenvolvimento do sistema meteorológico responsável pela sua geração. O mapa de isoietas para a região da bacia do rio Itajaí-Açú referente aos dias 23 e 24, é mostrado na Figura 5.9. Esta situação provocou enchentes na cidade de Blumenau

onde a cota máxima do rio Itajaí-Açú, no centro da cidade, atingiu 11,75 m no dia 24.

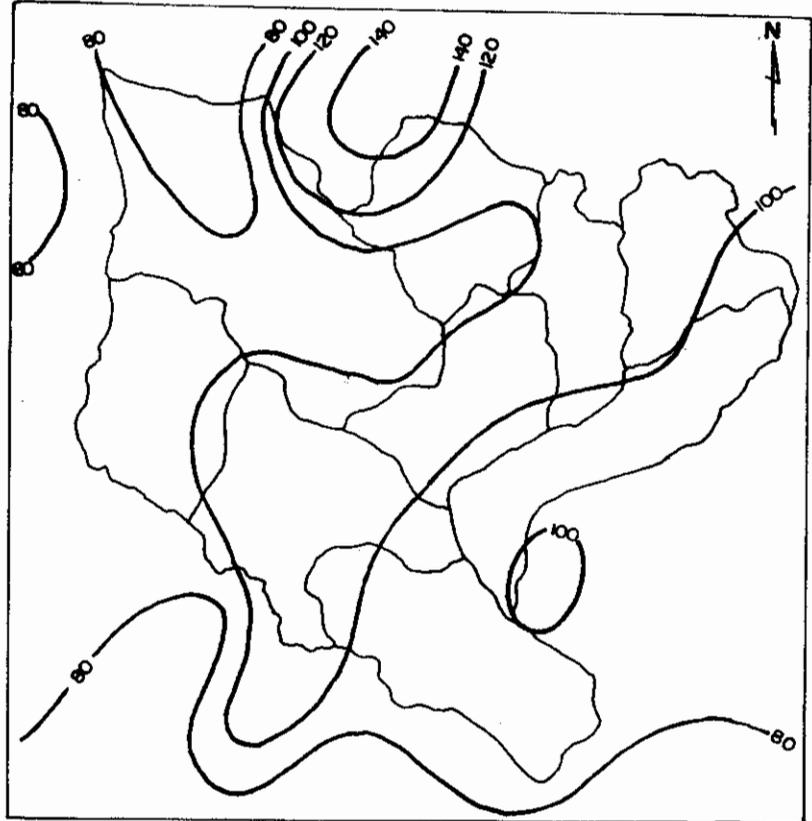
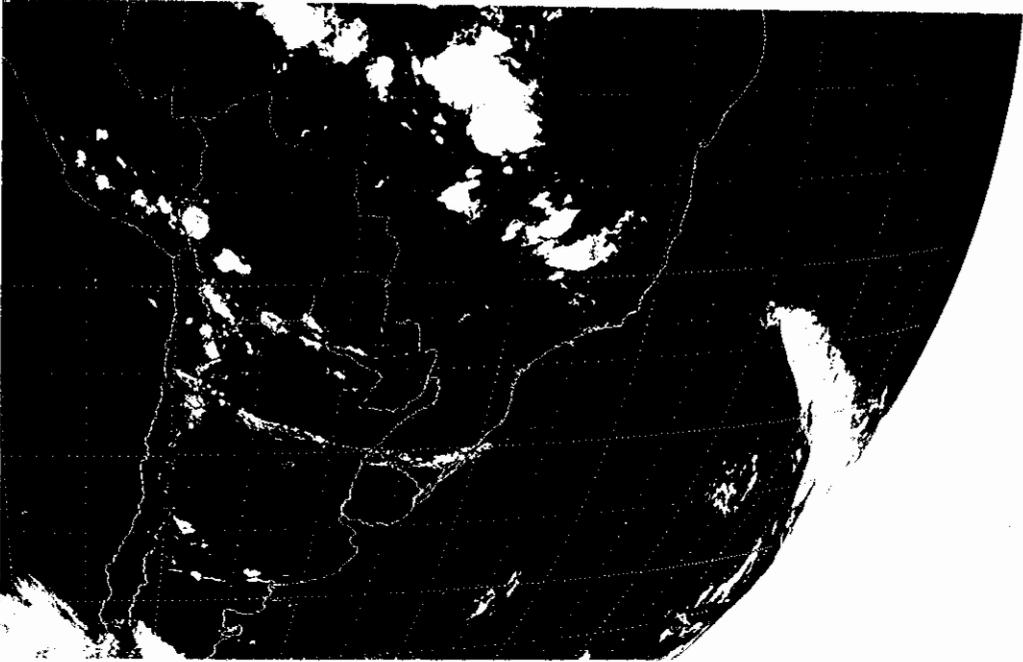


Fig.5.9 - Mapa de isoietas (mm) referente aos dias 23 e 24 de setembro de 1983, para a bacia do rio Itajaí.

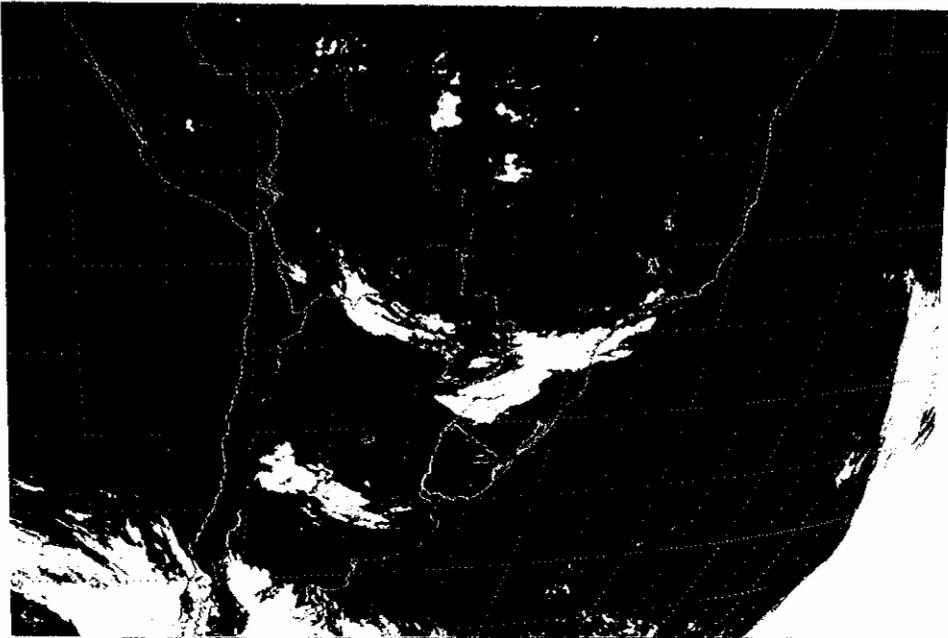
Na discussão a seguir, apresentam-se evidências da presença de um cavado de onda curta interagindo com uma corrente de jato curvada anticiclonicamente nos altos níveis, os quais provavelmente foram os mecanismos de altitude que mais contribuíram para a intensificação da precipitação.

5.2.1 - PRINCIPAIS ASPECTOS DE ESCALA SINÓTICA

A sequência de imagens de satélite (Figura 5.10) mostra a evolução da situação sinótica sobre a América do Sul a partir das 00:17 TMG do dia 22 de setembro de 1983. Nota-se a presença de uma corrente de jato curvada anticiclonicamente no sul do Rio Grande do Sul e um sistema frontal bastante fraco sobre o oceano Atlântico no litoral do Espírito Santo (Figura 5.10 a). Com o passar do tempo, a nebulosidade aumenta sobre o Sul e Sudeste do Brasil atingindo o seu máximo às 12:17 TMG do dia 23 de setembro (Figura 5.10d). Na imagem no canal espectral do vapor de água às 17:47 TMG do dia 23 (não mostrada) observa-se um vórtice ciclônico (nos níveis médios) no sudeste do Rio Grande do Sul, que deve ter contribuído para o desenvolvimento convectivo que gerou as intensas chuvas. Nas imagens para o dia 24 (não mostradas), observa-se que a atividade convectiva mais intensa está no Oceano Atlântico e em dissipação.



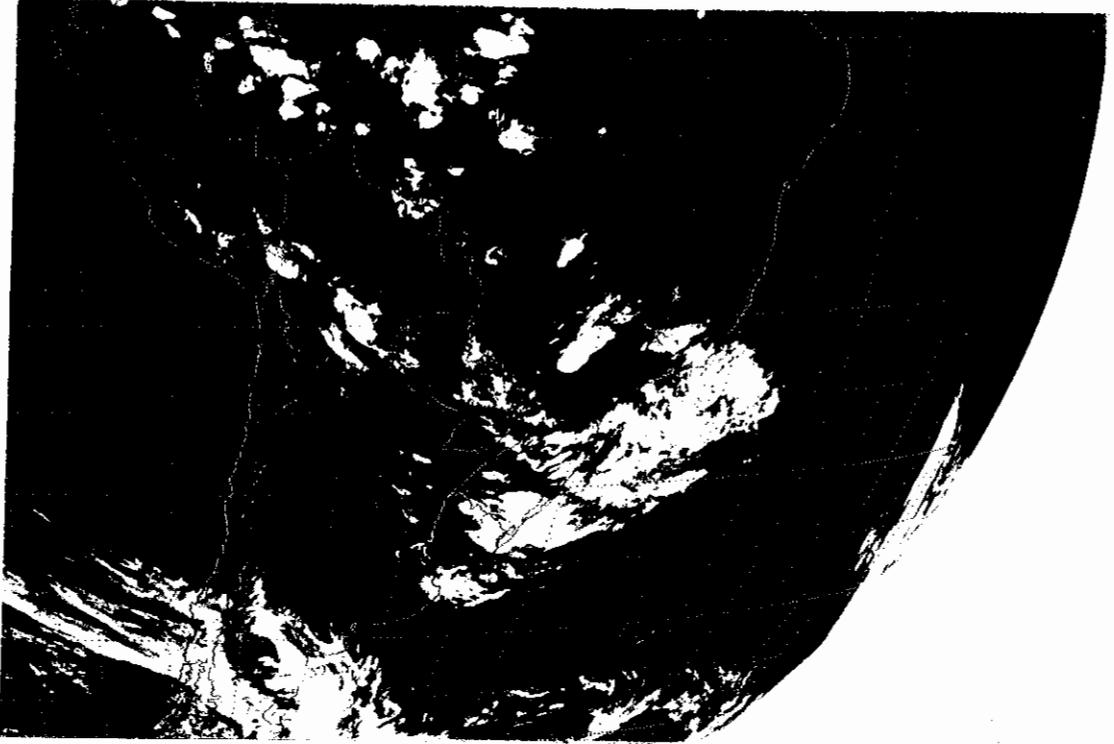
(a)



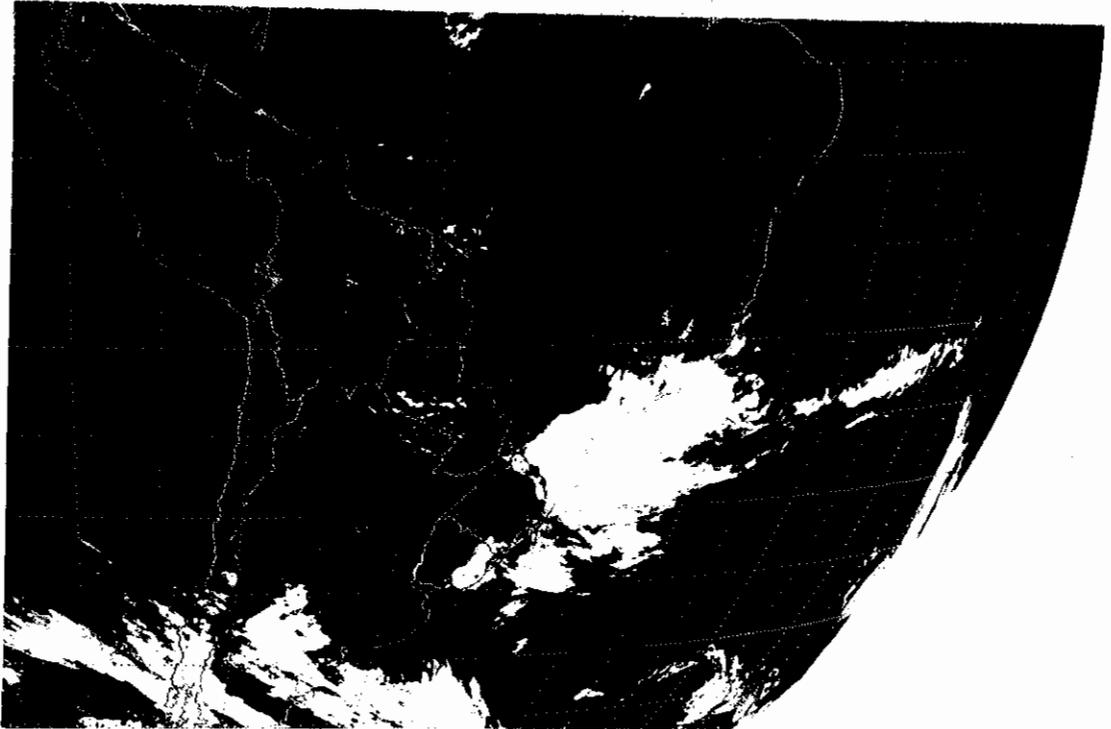
(b)

Fig. 5.10 - Imagem do satélite GOES no canal infravermelho para: (a) dia 22 às 00:17 TMG, (b) dia 22 às 12:17 TMG, (c) dia 23 às 00:17 TMG, (d) dia 23 às 12:17 TMG.

(continua)



(c)



(d)

Fig. 5.10 - Conclusão.

Na Figura 5.11 são apresentados os campos do escoamento horizontal, teta-e, advecção de temperatura e movimento vertical para o nível de 850 hPa às 12:00 TMG do dia 22.

O escoamento horizontal na Figura 5.11a, mostra um centro anticiclônico no oceano Atlântico em 37°W , 28°S mantendo os ventos do quadrante norte e transportando umidade marítima para a Região Sul. No centro da Argentina o desenvolvimento de um vórtice ciclônico, com ventos de norte de mais de 15 m/s, está deslocado para o sul em relação à posição da baixa em superfície (não mostrada). Este escoamento junto com os altos valores de Teta-e, visto na Figura 5.11b, caracteriza o transporte de ar úmido desde o sul da Bolívia e Paraguai para o nordeste da Argentina e oeste da Região Sul. Esta configuração é semelhante à descrita por Scofield (1990) para uma IE, que produz precipitação intensa, como mencionado no capítulo 2.

A advecção de temperatura (Figura 5.11c), também fornece indícios para o desenvolvimento convectivo sobre toda a Região Sul e vizinhanças. Dois núcleos mais intensos de advecção quente estão localizados no leste de Santa Catarina e Paraná e no nordeste da Argentina (em 60°W , 31°S). Esta configuração contribui para a queda da pressão em superfície e produz o movimento vertical ascendente observado no oeste da Região Sul (Figura 5.11d). Portanto, todos os campos analisados apresentam evidências de ocorrência de chuvas no oeste da Região Sul, pois há umidade, e levantamento para o desenvolvimento da convecção.

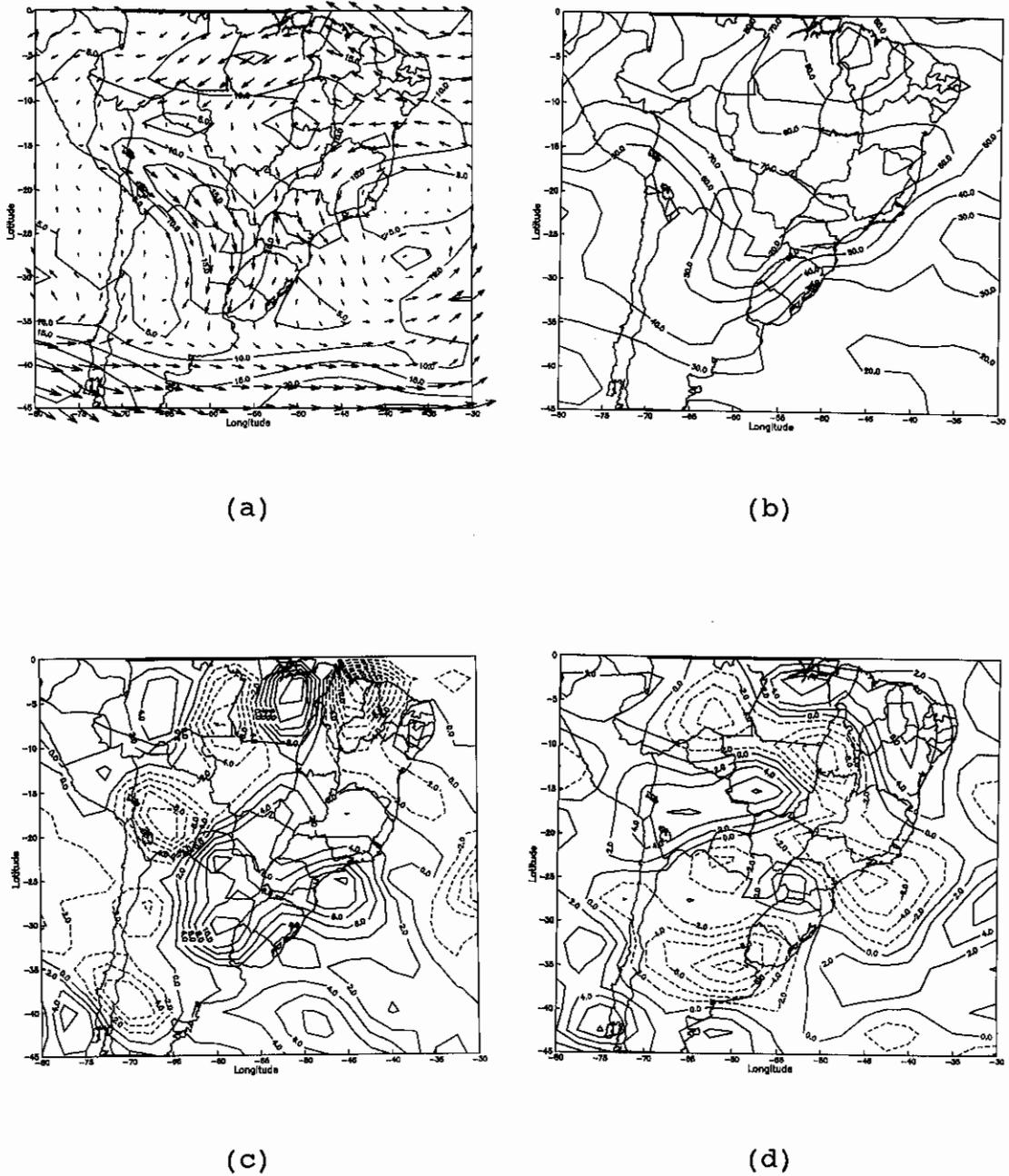


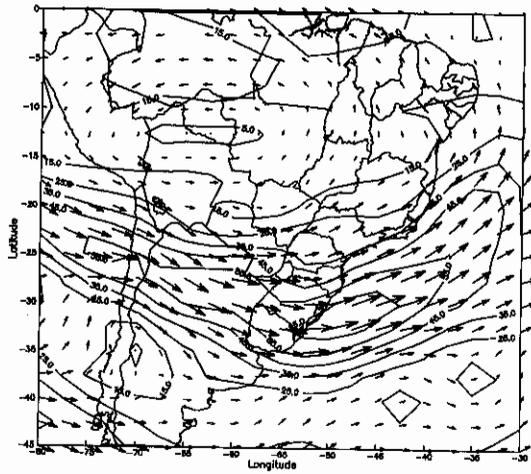
Fig. 5.11 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s), (b) Teta-E (°C), (c) Advecção de Temperatura (°C/dia) e (d) Movimento Vertical (10^{-3} hPa/s) para 850 hPa em 22 de setembro às 12:00 TMG.

Nas Figuras 5.12 (a,b) são apresentados, os mapas do escoamento horizontal e movimento vertical em 300 hPa e nas Figuras 5.12 (c,d) os mapas das advecções de temperatura e vorticidade absoluta em 500 hPa para o dia 22 às 12:00 TMG.

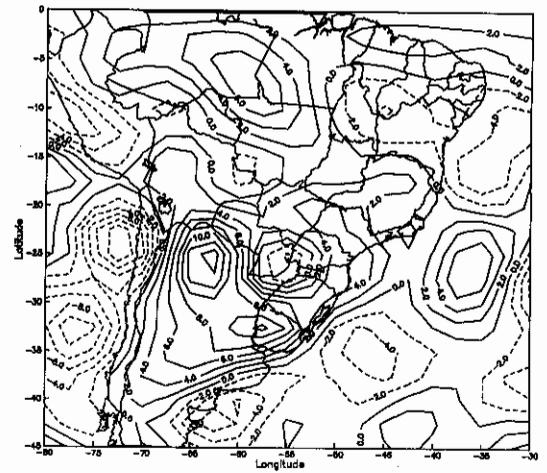
No campo de vento mostrado na Figura 5.12a, nota-se o escoamento curvado anticiclonicamente com uma corrente de jato passando pelo norte do Uruguai e um CVM de mais de 65 m/s no leste do Rio Grande do Sul. Um cavado de onda curta, provavelmente associado ao vórtice nos níveis mais baixos (500 hPa, não mostrado), está cruzando os Andes em torno de 35°S. De acordo com Moore e VanKnowe (1992), o efeito de um CVM posicionado na extremidade de uma crista nos altos níveis é o de produzir intensa divergência a oeste, e convergência a leste do eixo da crista. Esta configuração é parcialmente observada no mapa do movimento vertical apresentado na Figura 5.12b.

No mapa da advecção de temperatura (Figura 5.12c) observam-se vários núcleos de advecção quente nas proximidades da Região Sul do Brasil. Esta configuração associada àquela em 850 hPa, provoca aumento de temperatura em toda a camada 500-850 hPa, dando suporte vertical ao desenvolvimento convectivo através da queda de pressão que provoca na superfície.

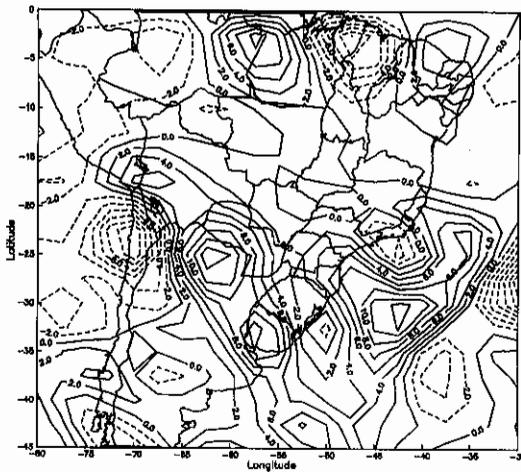
O campo da advecção de vorticidade absoluta é visto na Figura 5.12d. Nesta Figura notam-se dois núcleos de advecção ciclônica sobre a Argentina, relacionados à entrada do cavado e contribuem para a intensificação do sistema de baixa pressão em superfície, no norte da Argentina. No sudeste do Rio Grande do Sul, o máximo de advecção anticiclônica está relacionado à posição da crista, a qual em 500 hPa está mais para oeste.



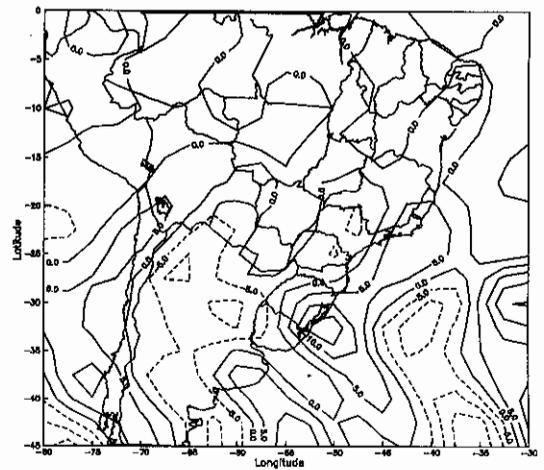
(a)



(b)



(c)



(d)

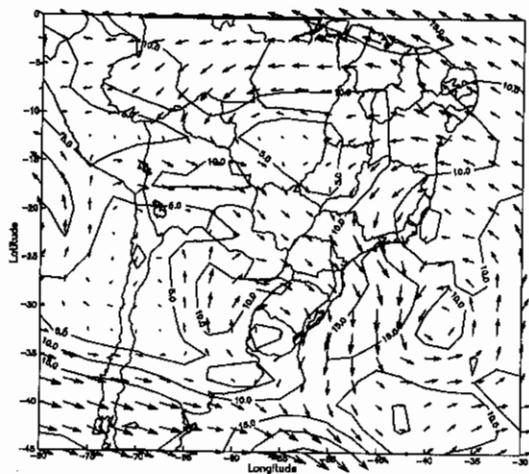
Fig. 5.12 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s) e (b) Movimento Vertical (10^{-3} hPa/s) em 300 hPa, (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}$ C/dia) e (d) Advecção de Vorticidade Absoluta (10^{-13} s $^{-2}$) para 500 hPa em 22 de setembro às 12:00 TMG.

A Figura 5.13 apresenta os campos do escoamento horizontal, teta-e, advecção de temperatura e movimento vertical para 850 hPa às 12:00 TMG do dia 23.

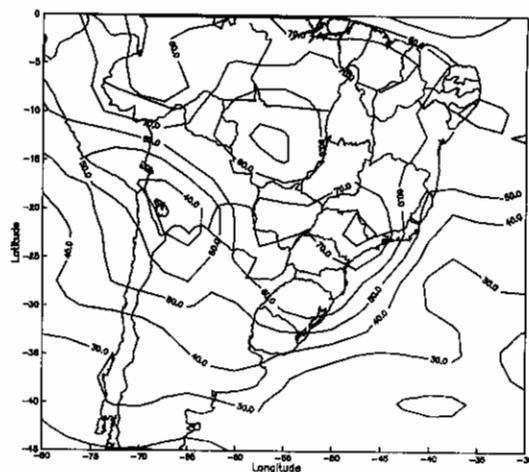
O campo de vento na Figura 5.13a, mostra o deslocamento para 39°W e 32°S do centro anticiclônico, enquanto que o vórtice ciclônico intensificou e deslocou-se para o nordeste do Uruguai, produzindo ventos de oeste sobre a Região Sul. Da mesma forma, houve um deslocamento para leste da crista de Teta-e (Figura 5.13b) e com isso as condições para o desenvolvimento de uma IE foram movidas para o litoral das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Também no mapa da advecção de temperatura (Figura 5.13c) nota-se que a área com advecção quente intensificou a leste de Santa Catarina, com o núcleo em $45^{\circ}\text{W}, 27^{\circ}\text{S}$. Esta configuração produz movimento vertical ascendente sobre o oceano, a leste do núcleo de advecção quente.

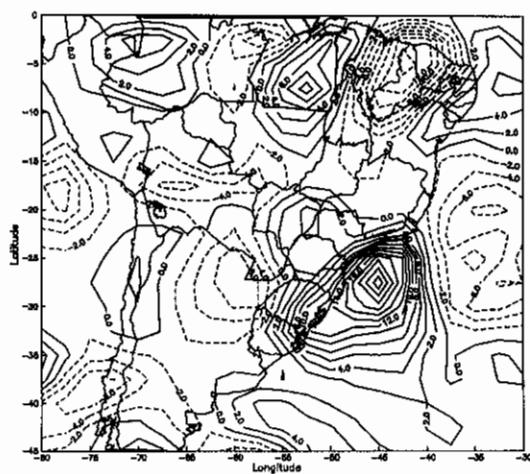
Neste dia as condições para o desenvolvimento de intensa convecção deslocaram-se para leste em relação ao dia anterior, o que também é observado nas imagens de satélite. A advecção quente favorece a ascensão de ar úmido que são transportados para a região da convecção pelos ventos associados ao anticiclone no oceano Atlântico e ao ciclone no oeste do Uruguai.



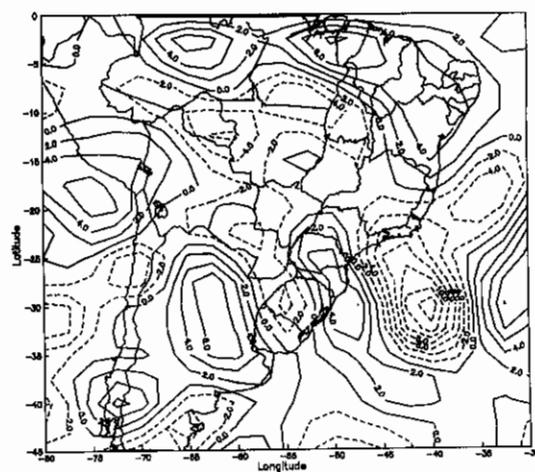
(a)



(b)



(c)



(d)

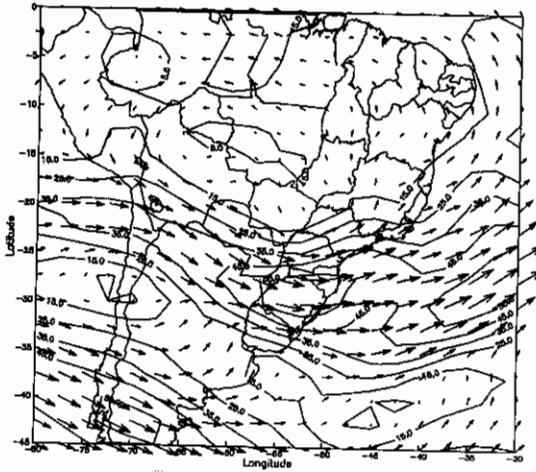
Fig. 5.13 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s), (b) Teta-E ($^{\circ}$ C), (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}$ C/dia) e (d) Movimento Vertical (10^{-3} hPa/s) para 850 hPa em 23 de setembro às 12:00 TMG.

Na Figura 5.14 são apresentados os campos do escoamento horizontal e movimento vertical para 300 hPa e das advecções de vorticidade absoluta e da temperatura em 500 hPa, para às 12:00 TMG do dia 23.

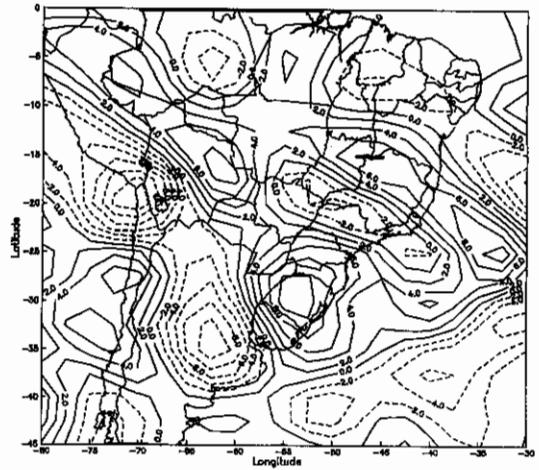
No campo de vento observa-se o escoamento continua curvado anticiclonicamente com a corrente de jato posicionada no norte do Rio Grande do Sul com um c.v.m. com mais de 55 m/s (Figura 5.14a). Portanto em relação ao dia 22, o jato deslocou-se para o norte, provavelmente em função da aproximação do cavado de onda curta cujo eixo é observado no sul do Uruguai orientado no sentido NW-SE. A posição do CVM exatamente sobre o eixo da crista pode explicar a configuração do campo de movimento vertical da Figura 5.14b, se forem levados em conta os resultados de Moore e Vanknowe (1992), comentados anteriormente.

No mapa da advecção de temperatura (Figura 5.14c) observa-se um núcleo de advecção quente muito intenso sobre Santa Catarina, o qual juntamente com a advecção quente em 850 hPa continua dando suporte vertical para a intensificação de um sistema de baixa pressão em superfície.

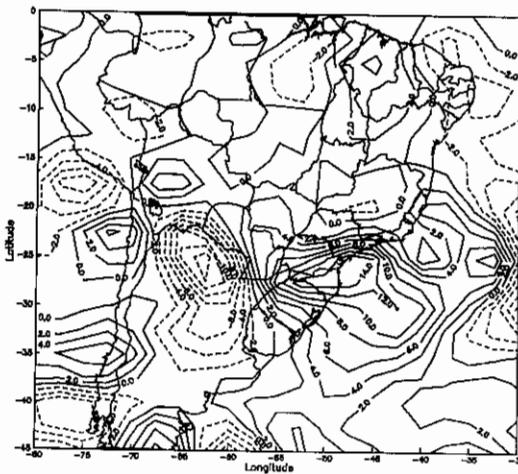
No mapa da advecção de vorticidade (Figura 5.14d) nota-se um máximo de advecção ciclônica no sul do Paraguai e um máximo de advecção anticiclônica sobre Santa Catarina. Este máximo anticiclônico favorece o aumento da pressão em superfície e portanto, atua se opondo ao desenvolvimento convectivo.



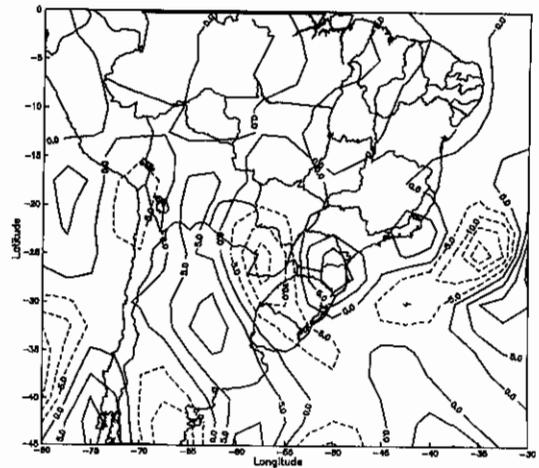
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.14 - (a) Escoamento horizontal e isotacas (m/s) e (b) Movimento Vertical (10^{-3} hPa/s) em 300 hPa, (c) Advecção de Temperatura ($^{\circ}$ C/dia) e (d) Advecção de Vorticidade Absoluta (10^{-13} s $^{-2}$) para 500 hPa em 23 de setembro às 12:00 TMG.

5.2.2 - COMENTÁRIOS GERAIS

Na fase inicial, o escoamento de noroeste nos baixos níveis, passando por uma área com altos valores de $teta-e$, fornece condições para o desenvolvimento de IEs, como definida por Scofield (1990). Na fase madura, o desenvolvimento e intensificação de um vórtice, próximo do Rio Grande do Sul e o seu deslocamento para leste deslocou a convecção para sobre as regiões Sul de Sudeste do Brasil.

Nos altos níveis, a curvatura anticiclônica da corrente de jato foi a principal característica na fase inicial, com o eixo da crista sobre a Região Sul. A convecção nesta fase desenvolveu-se principalmente em função do movimento vertical ascendente a leste do eixo da crista. O rápido deslocamento de um cavado, possivelmente associado a um vórtice nos níveis médios e baixos, aumentou a instabilidade na região próxima do CVM da corrente de jato.

Portanto, o forte escoamento de ar úmido nos baixos níveis, a curvatura anticiclônica de uma corrente de jato que deslocou-se para o norte e a aproximação de um cavado de onda curta, foram os mecanismos que interagiram e produziram as condições para a ocorrência das fortes chuvas sobre Santa Catarina.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Este estudo teve como objetivo principal identificar e estudar os mecanismos dinâmicos que estavam relacionados com a ocorrência de chuvas intensas no Vale do Itajaí (SC). Além disso, estes casos foram agrupados de acordo com suas principais características sinóticas nos baixos e altos níveis, gerando esquemas simplificados para cada uma das situações encontradas.

Para estudar os mecanismos dinâmicos envolvidos na geração de chuvas intensas foram selecionados 21 episódios no período de 1978 a 1984, oito dos quais relacionados a enchentes no Vale do Itajaí. Cada um destes episódios foi dividido em duas fases. A situação sinótica que antecedeu à ocorrência da máxima precipitação foi definida como fase inicial, enquanto que a fase madura foi definida como a situação sinótica no dia da máxima precipitação.

Para cada uma das fases, os sistemas sinóticos foram identificados através da análise de mapas de superfície, imagens de satélite, altura geopotencial, temperatura, umidade e vento. Em superfície, foram identificados sistemas frontais e centros de alta e baixa pressão. Em altitude foram analisados vórtices ciclônicos, posição dos cavados e cristas e das correntes de jato.

Através das análises descritas acima, foram obtidos cinco tipos diferentes de configurações sinóticas. Devido a natureza bastante complexa dos fenômenos meteorológicos, é evidente que cada caso não possui todas as características do grupo ao qual pertence.

No grupo 1, no qual foram classificados 7 casos, o principal sistema sinótico observado, foi um sistema frontal estacionário sobre a Região Sul. Em alguns destes casos o sistema frontal sofreu uma ondulação com a formação de uma baixa no oeste da Região Sul ou sobre o Paraguai. Para a maioria dos casos deste grupo, o escoamento em 850 hPa manteve-se paralelo ao setor frio do sistema frontal e quando este ondulou, tornou-se quase perpendicular ao setor quente. O transporte de umidade e calor por este escoamento para a região do sistema frontal, que forneceu as condições para o levantamento, parece ser o principal mecanismo para a alimentação da convecção e geração das chuvas. Nos altos níveis, um vórtice ciclônico sobre a Região Nordeste bloqueou o deslocamento do sistema frontal (Gan e Kousky, 1986).

No grupo 2, onde foram classificados 3 casos, o principal sistema meteorológico observado, foi um vórtice ciclônico nos altos níveis que cruzou a Cordilheira dos Andes e aproximou-se da Região Sul do Brasil. Em dois destes casos, o vórtice aprofundou-se até a superfície, gerando ciclogênese, enquanto que no terceiro caso havia um anticiclone sobre o continente.

No grupo 3 foram classificados 4 casos, e o mais importante mecanismo dinâmico de escala sinótica observado foi uma corrente de jato curvada anticiclonicamente, passando no sul da Região Sul do Brasil. Esta corrente de jato nos altos níveis, quando posicionada na ponta de uma crista com bastante curvatura anticiclônica, gera regiões de divergência a oeste do eixo e convergência a leste.

No grupo 4 onde foram classificados 3 casos, observou-se como característica mais importante a difluência no escoamento zonal nos altos níveis, durante a fase madura de desenvolvimento. Neste grupo destacou-se o caso ocorrido no inverno do episódio El Niño de 1983, que teve chuvas acima da média em toda a Região Sul do Brasil.

No grupo 5 foram classificados 3 casos. Nestes, observou-se que um sistema frontal passou pela Região Sul e atingiu a Região Sudeste. Após um dia, este sistema frontal aparentemente retrocedeu como frente quente, estacionando sobre os estados de Santa Catarina e Paraná.

Na maioria dos 21 episódios, foi observado que uma característica nos baixos níveis muito importante, é a presença de um fluxo de ar úmido transportado desde o Brasil Central, até a área onde ocorrem as chuvas intensas. Este escoamento úmido torna-se a fonte alimentadora da convecção que tem início quando mecanismos dinâmicos, tais como sistemas frontais e vórtices aproximam-se da Região Sul do Brasil.

Pelo número de casos estudados, estas conclusões podem carecer de consistência estatística, porém pode-se argumentar o seguinte: para o período utilizado (1978 a 1984), o número de episódios de chuvas intensas ocorrido na região da bacia do rio Itajaí, é aproximadamente o deste estudo; os dados de precipitação diária utilizados foram exclusivamente de postos localizados dentro da região citada acima. Portanto, provavelmente muitos outros sistemas semelhantes aos encontrados nesta pesquisa percorrem a Região Sul do Brasil mas nem sempre produzem chuvas intensas, ou podem produzi-las em outras áreas, até mesmo do próprio estado de Santa Catarina. Por isso, fazem-se necessárias outras

pesquisas, que levem em conta outras áreas como referência.

Diante disso, algumas sugestões de temas para outras pesquisas são as seguintes:

1) Estudar a influência de sistemas meteorológicos, tais como os vórtices ciclônicos que cruzam os Andes nos altos e médios níveis, sobre a distribuição de precipitação na Região Sul do Brasil.

2) Verificar quantitativamente qual é o papel dos vórtices ciclônicos na Região Nordeste do Brasil, no bloqueio de sistemas frontais sobre as regiões Sul e Sudeste.

3) Modelar a influência das correntes de jato sobre as condições do tempo no Sul do Brasil.

Finalmente, espera-se que este trabalho possa contribuir para um maior entendimento dos sistemas sinóticos que atuam na Região Sul do Brasil e que os modelos conceituais apresentados possam de alguma forma ser utilizados na previsão do tempo para aquela região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTOLOSSI, R. Um estudo comparativo entre a velocidade vertical e o vetor Q de Hoskins, com aplicação em sistemas sinóticos típicos do Sul e Sudeste do Brasil. (Dissertação de Mestrado)-INPE, São José dos Campos, novembro de 1989 (INPE - 4786-TDL/352).
- BEEBE, R.G.; BATES, F.C. A Mechanism for Assisting in the Release of Convective Instability. *Monthly Weather Review*, 83:1-10, 1955.
- BOSART, L.F.; LAI, C.; WEISMAN, R.A. A Case Study of Heavy Rainfall Associated with Weak Cyclogenesis in the Northwest Gulf of Mexico. *Monthly Weather Review*, 120:2469-2500, Nov. 1992.
- BOLTON, D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 108:1046-1053, July, 1980.
- BONATTI, J.P.; RAO, V.B. Moist Baroclinic Instability in the Development of North Pacific and South American Intermediate-Scale Disturbances. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(18):2657-2667, Sep. 1987.
- BROWNING, K.A. Conceptual Models of Precipitation Systems. *The Meteorological Magazine*, 114(1359):293-319, Oct. 1985.
- CAVALCANTI, I.F.A. Um estudo sobre as interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e escala local. (Dissertação de Mestrado) - INPE, São José dos Campos, 1982 (INPE-2494-TDL/097).

- CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; KOUSKY, V.E. Análise de um caso de atividade convectiva associada a linhas de instabilidade na Região Sul e Sudeste do Brasil. São José dos Campos, novembro de 1982 (INPE-2574-PRE/222).
- DALL'ANTONIO Jr., A.M.; SILVA DIAS, M.A.F. Vórtices de ar frio na América do Sul: análise diagnóstica. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6. Salvador, 1990. Anais. Salvador, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990, v. 2, p. 457-461.
- FERREIRA, C. DA C. Ciclogeneses e Ciclones Extratropicais na Região Sul-Sudeste do Brasil e suas influências no tempo. (Dissertação de Mestrado) - INPE, São José dos Campos, 1988. (INPE-4812-TDL/359).
- FLEMING, E.L.; SPAYD Jr., L.E. Characteristics of Western Region Flash Flood Events in Goes Imagery and Conventional Data. NOAA Technical Memorandum NESDIS 13. Satellite Applications Laboratory. Washington, D.C. 20233. Mar. 1986.
- FUNK, T.W. Forecasting Techniques utilized by Forecast Branch of the National Meteorological Center during the Major Convective Rainfall Event. *Weather and Forecasting*, 6:548-564, Dec. 1991.
- GAN, M.A.; KOUSKY, V.E. Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera no Oceano Atlântico Sul; *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1(1):19-28, Jun. 1986.
- GAN, M.A.; RAO, V.B. Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119:1893-1302, May 1991.
- GROSH, R.C. Operational Prediction of Severe Weather. State Water Survey. Technical Letter 28, 1978.

- GUEDES, R.L.; SILVA DIAS, M.A.F. Estudo de Tempestades Severas associadas com o jato Subtropical na América do Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 3, Belo Horizonte, 1984. Anais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1984, v. 2, p. 289-296.
- JUYING, X.; SCOFIELD, R.A. Satellite-Derived Rainfall Estimates and Propagation Characteristics Associated with Mesoscale Convective Systems (MCSs). NOAA Technical Memorandum NESDIS 25. Satellite Applications Laboratory. Washington D.C., May 1989.
- KOUSKY, V.E.; KAGANO, M.T.; CAVALCANTI, I.F.A. A Review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulations changes and related rainfall anomalies. Tellus, 36A:490-504, 1984.
- MADDOX, R.A.; CHAPPELL, C.F. Meteorological Aspects of Twenty Significant Flash Flood Events. Reprints. Conference on Flash Floods: Hidrometeorological Aspects and Human Aspects. AMS, Boston, 1978, p. 1-9.
- MOORE, J.T.; VANKNOWE, G.E. The Effect of Jet-Streak on Kinematic Fields. Monthly Weather Review, 120:2429-2441, Nov. 1992.
- NEWTON, C.W. Severe Convective Storms. Advances in Geophysics, 12:257-303, 1967.
- O'BRIEN, J.J. Alternative solutions to classical vertical velocity problem. Journal of Applied Meteorology, 9(2):197-203, Apr. 1970.
- PETTERSEN, S. Weather Analysis and Forecasting. New York, NY, McGraw-Hill Book Company, 2a.Ed., 1956, 427 pp.

- REAP, R.M.; FOSTER, D.S. New operational thunderstorm and severe storm probability forecasts based on MOS. Pp 9th Conf. Sev. Local Storms (A.M.S.): Boston, Mass. 1975.
- ROCKWOOD, A.A.; MADDOX, R.A. Mesoscale and Synoptic Scale Interactions Leading to Intense Convection: The Case of 7 June 1982. *Weather and Forecasting*, 3(1):51-68, Mar. 1988.
- SAKAMOTO, M.S.; SILVA DIAS, M.A.F. Análise da variação temporal da Convergência de Massa em Mesoescala num Período Chuvoso. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6., Salvador, 1990. *Anais. Salvador, Sociedade Brasileira de Meteorologia*, 1990, v. 2, 305-309.
- SAKURAGY, J. Sondagens TOVS: Impacto na Análise Sinótica entre 18 e 19 de março de 1991 na Região Sul e Sudeste do Brasil. (Dissertação de Mestrado). INPE, São José dos Campos, novembro 1992, (INPE-5497-TDI/512).
- SCHWARTZ, B.E.; CHAPPEL, C.F.; TOGSTAD, W.E.; ZHONG, X.P. The Minneapolis Flash Flood: Meteorological Analysis and Operational Response. *Weather and Forecasting*, 5(1):3-21; Mar.1990.
- SCOFIELD, R.A.; SPAYD Jr., L.E. A Technical that uses Satellite, Radar, and Conventional Data for Analysing and Short-Range Forecasting of Precipitation from Extratropical Cyclones. NOAA Technical Memorandum NESDIS 8. Satellite Applications Laboratory. Washington, D.C. Nov. 1984.
- SCOFIELD, R.A. Instability Bursts Associated with Extratropical Cyclone Systems (ECSs) and a Forecast Index of 3-12 hour Heavy Precipitation. NOAA Technical Memorandum NESDIS 30. Washington, D.C. July 1990.

SCOLAR, J.; FIGUEIREDO, J.C. Análise das condições sinóticas associadas à formação de complexos convectivos de mesoescala. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6. Salvador, 1990. Anais. Salvador, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990, v. 2, p. 457-461.

SHI, J.; SCOFIELD, R.A. Satellite-Observed Meso-scale Convective Systems (MCSs) propagation characteristics and a 3-12 hour heavy precipitation forecast index. NOAA Technical Memorandum NESDIS 20. U.S. Dept. of Commerce, Washington, D. C., 43 pp. 1987.

UCCELLINI, L.W.; JOHNSON, D.R. The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms. Monthly Weather Review, 107:682-703; June 1979.

UCCELLINI, L.W. On the role of upper tropospheric jet streaks and leeside cyclogenesis in the development of low-level jets in the Great Plains. Monthly Weather Review, 108:1689-1696, 1980.

———, The Influence of Jet Streaks on the Development of Severe Convective Storm Systems in the United States. WMO. Regional Training Seminar for National Instructors of RA III and RA IV. San Jose, Costa Rica, 16-27, Nov. 1992.