



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-13065-TDI/1024**

**ESTUDOS OBSERVACIONAIS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E  
DE PARTIÇÃO E INTERAÇÃO DE ENERGIA DE NUVEM  
VÍRGULA INVERTIDA SOBRE A AMÉRICA DO SUL**

Gilberto Ricardo Bonatti

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos  
Drs. José Paulo Bonatti e Vladamudi Brahmananda Rao, aprovada em  
28 de maio de 2004.

551.511.61

BONATTI, R. B.

Estudos Observacionais de simulação numérica e de  
partição e interação de energia de nuvem vírgula invertida  
sobre a América do Sul / G. R. Bonatti. – São José dos  
Campos: INPE, 2004.

285p. – (INPE-13065-TDI/1024).

1.Nuvem vírgula. 2.Instabilidade baroclínica. 3.Modos  
normais. 4.Modelo global. 5.Energia potencial disponível.  
I.Título.

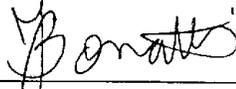
Aprovado(a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Meteorologia**.

Dr. Prakki Satyamurty



Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr. José Paulo Bonatti



Orientador/INPE, C. Paulista-SP

Dr. Vadlamudi Brahmananda Rao



Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Antonio Divino Moura



Membro da Banca/Convidado – INMET - DF

**Aluno: Gilberto Ricardo Bonatti**

São José dos Campos, 28 de maio de 2004.



*A minha querida esposa,*  
**VANESSA BERNARDES CRUZ BONATTI**



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus, autor e Senhor da minha vida, que em meio às dificuldades e longe da minha família, sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Dr. José Paulo Bonatti e Dr. Vladeamudi Brahmananda Rao, por sua atenção, dedicação, incentivo, disponibilidade e principalmente, pela valiosa orientação até a revisão final deste trabalho.

Em especial, a minha irmã e a meus queridos pais José Norberto e Maria Lúcia, pelas orações, carinho, incentivo, sacrifício e por não terem medido esforços para que eu alcançasse esta meta. Também pela ajuda financeira em momento tão difícil para todos nós, para que eu pudesse terminar este trabalho.

A meus avós e tios (de sangue e coração) que também acompanharam meus esforços e cuidaram de mim.

À tia Ana Lúcia pelas sugestões e correções ortográficas.

À minha sogra Vilma e ao meu sogro Elmar, por terem cuidado do maior presente da minha vida, minha querida esposa Vanessa.

Ao Dr. Prakki Satyamurty pela ajuda e incentivo.

À Isabel, por sua coragem, determinação e por nunca desistir, mesmo diante de dificuldades aparentemente maiores e quase impossíveis de se resolver.

Aos membros da Banca Examinadora, pela disponibilidade, atenção e valiosas sugestões.

A amizade de todos do curso de pós-graduação em Meteorologia, por compartilharem momentos de dificuldades e êxitos juntos, em especial aos amigos Alessandro, Luiz André, Daniele, Everson (Bento), Kelen, Mateus, Marcos Yoshida e Paulo, por esclarecimentos e / ou fornecimento de ferramentas utilizadas neste trabalho.

Ao suporte financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Finalmente, ao INPE e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, pela oportunidade e instalações oferecidas e, aos docentes pelos cursos ministrados.

## RESUMO

Foram estudados quatro casos de nuvem vírgula invertida que ocorreram no continente Sul Americano nos dias: 15/04/1979, 22/08/1989, 06/10/1991 e 20/09/2003. Os dias referem-se aos estágios maduros desses sistemas. O estudo abordou dois aspectos: o primeiro observacional e de simulação numérica, onde se verificou a capacidade do modelo global do CPTEC em simular a nuvem vírgula, e o efeito da resolução; e o segundo a partição e interação de energia, onde se enfatizou a análise energética, tanto no que se refere às trocas verticais de energia como para as interferências entre os modos horizontais de oscilação (ondas de Rossby, Kelvin, Mista e Gravidade Oeste e Leste) e suas interações. Para os três primeiros casos, foi utilizado o esquema de convecção tipo Kuo para as resoluções T126L28 e T170L42, onde foram comparados com as reanálises do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) na resolução T106K17, verificando-se a habilidade do modelo global em simular os casos de nuvem vírgula invertida. Para o caso ocorrido em 20/09/2003, foi incluído o esquema de convecção tipo RAS (Relaxed Arakawa-Schubert), não somente para o estágio maduro, mas também para o estágio inicial e de dissipação do sistema. Para os outros três casos, o modelo foi capaz de reproduzir com boa concordância as principais características observadas nas reanálises, com ligeira melhora na representatividade para a resolução do T170L42. Para os estudos da partição e interação da energia entre os modos horizontais e verticais, a maior concentração da porcentagem de energia esteve para as duas primeiras categorias (modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6); onde um maior número de modos verticais (maior número de modos mais internos), podem ter um papel relevante na partição de energia. Os modos horizontais que mais detiveram energia para as duas primeiras categorias são: Rossby e Kelvin. Os modos horizontais Misto Rossby-Gravidade, Gravidade propagando-se para Leste e Oeste para as duas primeiras categorias, também obtiveram resultados expressivos, mas pequenos se comparados aos modos horizontais Rossby e Kelvin. Para as interações entre os modos horizontais, para as duas primeiras categorias, verificou-se destruição de energia na maioria das interações. Os produtos cruzados entre os modos horizontais Rossby e Kelvin com os demais modos detiveram a maior porcentagem de energia na região do estágio maduro da nuvem vírgula invertida, bem reproduzida pelo modelo global do CPTEC para ambos os casos e resolução. Para as interações entre os modos verticais, verificou-se na região da nuvem vírgula, construção de energia para os níveis médios (800 hPa até 300 hPa - região de convecção) e destruição para a Estratosfera (150 hPa até Topo) para os modos de 0 a 2.



# **OBSERVATIONAL STUDIES, OF NUMERIC SIMULATION AND PARTITION AND INTERACTION OF ENERGY OF INVERTED COMMA CLOUD OVER SOUTH AMERICA**

## **ABSTRACT**

We studied four cases of inverted comma clouds which occurred in the South American continent, in: 4/15/1979, 8/22/1989, 10/6/1991 and 9/20/2003. These dates refer to the mature stages of these systems. The study had two main aspects: the first observational and numerical simulation, where we evaluated the capability of the global model in simulating the comma cloud, and the effect of resolution; and the second aspect on the partition and energy interaction, where we emphasized the energetic analysis, regarding both the vertical energy exchanges, as well as the interferences between the horizontal modes of oscillation (Rossby, Kelvin, Mixed-Rossby and West and East waves) and their interactions. For the first three cases, we used the convection scheme by Kuo for the resolutions T126L28 and T170L42, and compared with the reanalysis of the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) in T106K17 resolution, where the ability of the global model in the simulation of cases of inverted comma clouds was evaluated. For the 9/20/2003 case, we included the convection scheme type RAS (Relaxed Arakawa-Schubert), not only for the mature stage, but also for the initial stage and the dissipation of the system. For the three other cases, the model was capable of adequately reproducing the main observed characteristics in the reanalysis, with a slightly better representativity for the resolution of T170L42. For the studies of energy partitioning and energy interaction between the horizontal and vertical modes, the greatest concentration of energy (in %) was observed for the first two categories (vertical modes of 0 to 2 and 3 to 6); and due to a bigger number in vertical modes (bigger number of more internal modes), can have a relevant role in the energy partition. The horizontal modes with greatest energy retention for these two categories are: Rossby and Kelvin. The horizontal modes: Mixed-Rossby-Gravity and Gravity propagating eastward and westward for the first two categories, also obtained good results, but small when compared to the horizontal modes of Rossby and Kelvin. For the interactions between the horizontal modes, for the first two categories we observed the destruction of energy in most of the interactions. The crossed products between the Rossby and Kelvin horizontal modes with other modes showed the largest percentage of energy in the region of the mature stage of the inverted comma cloud, well reproduced by the global model of CPTec for both cases and resolution. For the interactions between the vertical modes, we verified, in the region of the comma cloud, construction of energy for the middle levels (800 hPa up to 300 hPa - convection region) and destruction in the Stratosphere (150 hPa until Top) for the modes of 0 to 2.



## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E/ OU ABREVIATURAS</b>	
<b>1</b>	
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>37</b>
1.1 – Considerações Gerais.....	37
1.2 – Objetivo Geral.....	40
1.3 – Objetivos Específicos.....	41
<b>2</b>	
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>43</b>
2.1 – Introdução.....	43
2.2 – Aspectos Teóricos e Observacionais sobre Nuvens Vírgula.....	43
2.2.1 – Considerações Gerais.....	43
2.2.2 – Formação de Nuvem Vírgula.....	45
2.2.3 – Formação da Nuvem Vírgula Invertida no Hemisfério Sul.....	47
2.3 – Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC.....	49
2.3.1 – MGCPTEC.....	50
<b>3</b>	
<b>DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1 – Dados.....	53
3.2 – Metodologia.....	54
3.2.1 – Episódios Seleccionados.....	54
3.3 – Decomposição em Modos Normais.....	57
3.3.1 – Equações Primitivas Baroclínicas.....	57

3.3.2	– A Transformada Vertical.....	61
3.3.3	– Análise da Partição de Energia entre os Modos Verticais e Horizontais.....	65
3.3.4	– Partição de Energia no MGCPTEC.....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM.....</b>	<b>73</b>
4.1	– Análise das Imagens do Satélite Goes para os Quatro Casos de SSMNVI.....	73
4.2	– Avaliação do MGCPTEC Em Simular SSMNVI.....	78
4.2.1	– Experimento EXC1, EXP5 e EXP6.....	79
4.2.2	– Campos Observados EXC1, EXP5 e EXP6.....	79
4.2.3	– Campos Observados EXC2, EXC3, EXC4, EXP7, EXP8 e EXP9.....	109
4.3	– Estudo da Performance do MGCPTEC para as Resoluções T126L28 e T170L42 para os Dois Esquemas de Convecção...	144
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DA PARTIÇÃO DE ENERGIA: MODOS VERTICAIS E HORIZONTAIS.....</b>	<b>149</b>
5.1	– Partição a Energia Total entre os Modos Verticais.....	149
5.2	– Partição da Energia Total entre os Modos Horizontais.....	162
5.3	– Interações entre os Modos Horizontais.....	187
5.4	– Interação da Energia Total entre os Modos Verticais em Diferentes Níveis de Pressão.....	216
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS ESTUDOS.....</b>	<b>225</b>
6.1	– Considerações Gerais.....	225
6.2	– Análise Observacional e Simulação Numérica.....	226
6.3	– Análise da Partição e Interação de Energia entre os Modos Horizontais e Verticais e suas Interações.....	228

6.4	– Sugestões para Futuros Estudos.....	232
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>235</b>
<b>A</b>	<b>APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM NUMÉRICA PARA A PREVISÃO DE TEMPO.....</b>	<b>243</b>
<b>A.1</b>	– Introdução.....	243
<b>B</b>	<b>APÊNDICE B – FORMA DISCRETA DAS EQUAÇÕES PARA O MGCPTC.....</b>	<b>247</b>
B.1	– Discretização das Equações.....	247
B.2	– Harmônicos Esféricos.....	254
<b>C</b>	<b>APÊNDICE C – MODELO DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO ESPECTRAL, GLOBAL, EM COORDENADAS VERTICAIS SIGMA E HORIZONTAIS ESFÉRICAS.....</b>	<b>259</b>
<b>D</b>	<b>APÊNDICE D – APÊNDICE DE FIGURAS REFERENTE AO CASO OCORRIDO EM SETEMBRO DE 2003 (EXC1, EXP5 E EXP6).....</b>	<b>273</b>
<b>E</b>	<b>APÊNDICE E – CÁLCULO DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO E ERRO MÉDIO PREVISTO REFERENTE AOS ESTÁGIOS MADUROS DOS CASOS DE SSMNVI: ABRIL DE 1979, AGOSTO DE 1989 E OUTUBRO DE 1991.....</b>	<b>287</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1.1 - Representação esquemática de uma nuvem vírgula invertida e uma banda frontal principal (adaptada para o Hemisfério Sul). Os contornos finos são linhas de corrente em 500 hPa. Setas representam a corrente de jato nos altos níveis. Sinal positivo indica máximo de vorticidade ciclônica em altos níveis, que ficam situados na região da saída do jato, à direita (H.S). Demais símbolos como usados convencionalmente em meteorologia.....	39
2.1 - Ilustração esquemática da nuvem vírgula como observada por satélite no canal infravermelho: a) Hemisfério Norte e b) Hemisfério Sul.....	44
4.1 - Seqüência de imagens do satélite GOES no canal infravermelho para 19/09/2003 – 12Z (a); 20/09/2003 – 00Z (b), 12Z (c) e 21/09/2003 – 00Z (d).....	74
4.2 - Seqüência de imagens infravermelha do satélite GOES Oeste para o período de 14-16 de Abril de 1979. (a) 14/04/1979 – 12Z; (b) 15/04/1979 – 00Z; (c) 15/04/1979 – 12Z e (d) 16/04/1979 – 00Z.....	75
4.3 - Seqüência de imagens do satélite GOES-7 no canal infravermelho para 21-23 de Agosto de 1989. (a) 21/08/1989 – 12Z; (b) 22/08/1989 – 12Z e (c) 23/08/1989 – 00Z.....	76
4.4 - Seqüência de imagens do satélite GOES-7 no canal infravermelho para 05-07 de Outubro de 1991. (a) 05/10/1991 – 12Z; (b) 06/10/1991 – 12Z e (c) 07/10/1991 – 00Z.....	78

4.5	- Precipitação acumulada em 6 horas para o dia 19 de Setembro de 2003, 12Z. (a) T126L28 e (b) T170L42 Esquema de convecção tipo Kuo; (c) T126L28 e (d) T170L42 com esquema de convecção RAS. O quadrículo representa a localização do SSMNVI.....	82
4.6	- Precipitação acumulada em 24 horas para o dia 20 de Setembro de 2003, 00Z. (a) T126L28 e (b) T170L42 Kuo; (c) T126L28 e (d) T170L42 RAS; e (e) Análise GPCP.....	83
4.7	- Idem Figura 4.6, exceto que para o dia 21 de Setembro de 2003, 00Z. ....	84
4.8	- Água precipitável para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	87
4.9	- Idem Figura 4.8, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.....	88
4.10	- Idem Figura 4.8, exceto que para o dia 21 de Setembro de 2003, 00Z.....	90
4.11	- Temperatura (°C) em 850 hPa para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	92
4.12	- Idem Figura 4.11, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.....	93
4.13	- Altura Geopotencial (m) em 1000 hPa para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo;	

	(e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	96
4.14	- Idem Figura 4.13, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.....	98
4.15	- Convergência de umidade (g/Kg/dia) para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	100
4.16	- Idem Figura 4.15, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.....	102
4.17	- Vorticidade em 850 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	104
4.18	- Linhas de fluxo do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. ....	106
4.19	- Magnitude do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS.....	107
4.20	- Precipitação acumulada em 6 horas para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c)	

	Reanálise ECMWF – T106K17.....	112
4.21	- Idem Figura 4.20, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	113
4.22	- Idem Figura 4.20, exceto para o dia 07/10/1991 - 12Z.....	114
4.23	- Água precipitável para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	115
4.24	- Idem Figura 4.23, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	116
4.25	- Idem Figura 4.23, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	117
4.26	- Temperatura (°C) em 850 hPa para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	118
4.27	- Idem Figura 4.26, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	119
4.28	- Idem Figura 4.26, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	120
4.29	- Altura Geopotencial (m) em 1000 hPa para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	123
4.30	- Idem Figura 4.29, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	124
4.31	- Idem Figura 4.29, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	125
4.32	- Vorticidade em 850 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	126
4.33	- Idem Figura 4.32, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	127

4.34	- Idem Figura 4.32, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	128
4.35	- Advecção de Temperatura (K/dia) em 850 hPa para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	131
4.36	- Idem Figura 4.35, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	132
4.37	- Idem Figura 4.35, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	133
4.38	- Convergência de umidade (g/Kg/dia) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	134
4.39	- Idem Figura 4.38, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	135
4.40	- Idem Figura 4.38, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	136
4.41	- Linhas de fluxo do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	138
4.42	- Idem Figura 4.41, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	139
4.43	- Idem Figura 4.41, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	140
4.44	- Magnitude do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.....	141
4.45	- Idem Figura 4.44, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.....	142
4.46	- Idem Figura 4.44, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.....	143

5.1	- Estrutura vertical e altura equivalente (m) para uma atmosfera padrão: (a) e (c) modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6 respectivamente para 28 camadas; (b) e (d) modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6 respectivamente para 42 camadas.....	151
5.2	- Secção ao longo do estágio maduro do SSMNVI para os casos: 20/09/2003 - 12Z (a) e (b), 15/04/1979 - 12Z (c) e (d), 22/08/1989 - 12Z (e) e (f) e 06/10/1991 - 12Z (g) e (h) da percentagem de energia para as resoluções T126L28 e T170L42 respectivamente.....	153
5.3	- Porcentagens de energia para os modos verticais de 0 a 2: (a) Análise NCEP, (c) MGCPTEC – Kuo, (e) MGCPTEC – RAS, ambas para a resolução T126L28; (b) Análise NCEP, (d) MGCPTEC – Kuo, (f) MGCPTEC – RAS, ambas para resolução T170L42, referente ao dia 20/09/03, 12Z.....	156
5.4	- Porcentagens de energia para os modos verticais de 3 a 6: (a) e (b) Análise ECMWF; (c) e (d) MGCPTEC para 28 (42) camadas para as resoluções T126L28 e T170L42, referente ao dia 15/04/1979 – 12Z.....	159
5.5	- Idem Figura 5.4, exceto para o dia 22/08/1989 – 12Z.....	160
5.6	- Idem Figura 5.4, exceto para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	161
5.7	- Porcentagem de energia somada para todos os modos horizontais e modos verticais 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	166

5.8	- Energia total (%) do modo Rossby para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.....	169
5.9	- Figura 5.8, exceto que para os modos verticais de 3 a 6.....	170
5.10	- Idem Figura 5.8, exceto que para os modos verticais de 7 a 11(13).....	171
5.11	- Energia total (%) do modo Rossby para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	172
5.12	- Idem Figura 5.11, exceto que para o dia 22/08/1989 – 12Z.....	173
5.13	- Idem Figura 5.11, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	174
5.14	- Energia total (%) do modo Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.....	177
5.15	- Energia total (%) do modo Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	178
5.16	- Idem Figura 5.15, exceto que para o dia 22/08/1989 – 12Z.....	179
5.17	- Idem Figura 5.15, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	180

5.18	- Energia total (%) do modo Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.....	181
5.19	- Energia total (%) do modo Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	182
5.20	- Idem Figura 5.19, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	183
5.21	- Energia total (%) do modo Gravidade Oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.....	184
5.22	- Energia total (%) do modo Gravidade Oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	185
5.23	- Idem Figura 5.22, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	186
5.24	- Energia total (%) para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 - 12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	190

5.25	- Energia total (%) para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 - 12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	191
5.26	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	196
5.27	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	197
5.28	- Idem Figura 5.27, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.....	198
5.29	- Idem Figura 5.27, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	199
5.30	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	200
5.31	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	201

5.32	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	202
5.33	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	203
5.34	- Idem Figura 5.33, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.....	204
5.35	- Idem Figura 5.33, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	205
5.36	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	206
5.37	- Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	207
5.38	- Idem Figura 5.37, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.....	208
5.39	- Idem Figura 5.37, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	209
5.40	- Energia total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f)	

	para a resolução T170L42, respectivamente.....	210
5.41	- Energia total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	211
5.42	- Idem Figura 5.41, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	212
5.43	- Energia total (%) das interações entre os modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	213
5.44	- Energia total (%) das interações entre os modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.....	214
5.45	- Idem Figura 5.44, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.....	215
5.46	- Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	219
5.47	- Idem Figura 5.46, exceto que para a Troposfera (150 hPa até o topo).....	220
5.48	- Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 – 3 a	

	6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	221
5.49	- Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 – 7 a 11(13), referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	222
5.50	- Energia total (%) do resíduo da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 11(13), referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	223
5.51	- Idem Figura 5.50, exceto que para a Troposfera (150 hPa até o topo).....	224
D.1	- Porcentagens de energia para os modos verticais de 3 a 6: (a) Análise NCEP T126L28, (b) Análise NCEP T170L42, (c) MGCPTEC T126L28 – Kuo, (d) MGCPTEC T170L42 – Kuo, (e) MGCPTEC T126L28 – RAS, (f) MGCPTEC T170L42 – RAS, para o dia 20/09/03, 12Z.....	273
D.2	- Idem Figura D.1, exceto para os modos verticais de 7 a 11 (13) para 28 (42) camadas.....	275
D.3	- Porcentagem de energia somada para todas os modos horizontais e modos verticais 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC	

	Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	276
D.4	- Idem Figura D.3, exceto para os modos verticais de 7 a 11 (13) para 28 (42) camadas.....	277
D.5	- Porcentagem de energia do modo Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	278
D.6	- Idem Figura D.5, exceto que para o modo vertical de 7 a 11(13).	279
D.7	- Porcentagem de energia do modo Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	280
D.8	- Idem Figura D.7, exceto que para o modo vertical de 7 a 11(13).	281
D.9	- Porcentagem de energia para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	282
D.10	- Porcentagem de energia das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.....	283

- D.11 - Porcentagem de energia das interações entre os modos Rossby e Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente..... 284
- D.12 - Porcentagem de energia das interações entre os modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente..... 285

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
1.1 - Principais sistemas meteorológicos que afetam a região do Brasil e respectivas escalas horizontais.....	37
2.1 - Principais características comuns da nuvem vírgula.....	49
3.1 - Descrição dos Experimentos: Parte Observacional e Modelagem..	54
4.1 - Cálculo EMP e EMQ para as resoluções T126L28 e T170L42 do caso ocorrido em setembro de 2003 para o esquema de convecção Kuo. O período de 60 horas representa o estágio maduro do SSMNVI.....	145
4.2 - Idem Tabela 4.1, exceto que para o esquema de convecção RAS.	147
E.1 - Cálculo EMP e EMQ para as resoluções T126L28 e T170L42 do caso ocorrido em abril de 1979 para o esquema de convecção Kuo. O período de 60 horas representa o estágio maduro do SSMNVI.....	287
E.2 - Idem Tabela E.1, exceto que para o caso ocorrido em agosto de 1989.....	288
E.3 - Idem Tabela E.1, exceto que para o caso ocorrido em outubro de 1991 e estágio maduro do SSMNVI às 84 horas.....	289



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- Raio médio da Terra ( $6.37 \times 10^6$ m)
$\vec{A}$	- Vetor tridimensional das variáveis de estado (vento e geopotencial)
$c = (gH)^{\frac{1}{2}}$	- Velocidade de fase da onda de gravidade pura ( $\text{ms}^{-1}$ )
$c_p$	- Calor específico do ar seco à pressão constante ( $1005 \text{ m}^2\text{s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$C_{r,n}^{s,l}(t)$	- Coeficiente de expansão no tempo $\vec{A}$
$Ec_n / Ep_n / E_{T_n}$	- Energia cinética/ potencial disponível/ total associada com cada modo vertical $n$
$E_{CZ} / E_{CM}$	- Energia cinética zonal / meridional
$E_{pw}$	- Porcentagem da energia total do modo horizontal $w$ em relação a todos, incluindo as interações entre eles, contida no grupo de modos verticais considerados
$E_{t_n} / E_{w_n}$	- Energias totais do modo horizontal $w$ e de todos os modos horizontais para um dado modo vertical $n$
$f = 2\Omega \sin\varphi$	- Parâmetro de Coriolis ( $\text{s}^{-1}$ )
$f_n(\lambda, \varphi, t)$	- Transformada vertical
$\vec{F}$	- Forçantes dissipativas de momentum
$F_T$	- Termo relativo à dissipação de calor
$g$	- Aceleração da gravidade ( $9.8 \text{ ms}^{-2}$ )
$h_n$	- Coeficiente de expansão da variável $P$
$H_n$	- Profundidade equivalente associada ao modo vertical $n$
$H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi)$	- Harmônico de Hough
$\vec{i}$	- Versor esférico horizontal Oeste-Leste
$\vec{j}$	- Versor esférico horizontal Sul-Norte

$\vec{k}$	- Versor esférico vertical
$l$	- Índice para os modos meridionais
$m$	- Nível de tempo na integração numérica e índice para modo vertical
$n$	- Índice para os modos verticais
$N(m) =  m  + M$	- Truncamento Romboidal
$p$	- Pressão local (hPa)
$p_s$	- Pressão à superfície (hPa)
$\bar{p}_s$	- Média Global da pressão à superfície
$P_n^m(\mu)$	- Função Associada de Legendre
$P$	- Geopotencial generalizado ( $m^2s^{-2}$ )
$q$	- Logarítmo neperiano da razão ( $p_s/\bar{p}_s$ )
$\dot{Q}$	- Taxa de calor (aquecimento adiabático)
$r$	- Índice para o tipo de onda de acordo com a frequência
$R_d$	- Constante do gás para o ar seco ( $287.05 \text{ J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$\tilde{R}_n^u, \tilde{R}_n^v, \tilde{R}_n^h$	- Parte não-linear do sistema de equações primitivas
$s$	- Número de onda zonal
$t$	- Tempo (s)
$T$	- Campo de temperatura total (K)
$T_v$	- Temperatura virtual (K)
$\bar{T}(\sigma)$	- Perfil de temperatura do escoamento básico (K)
$T'$	- Desvio de temperatura em relação à $\bar{T}$ (K)
$u(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Componente zonal do vento ( $ms^{-1}$ )
$\tilde{u}_n(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Coeficiente horizontal de expansão $u$
$U_{RB}, U_{KV}, U_{MX}, U_{GO}, U_{GE}$	- Vento zonal e os índices $RB, KV, MX, GO$ e $GE$ referem-se, respectivamente, aos modos horizontais de Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade,

	Gravidade propagando-se para Oeste e Leste
$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$	- Vento horizontal ( $\text{ms}^{-1}$ )
$v(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Componente meridional do vento ( $\text{ms}^{-1}$ )
$\tilde{v}_n(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Coeficiente horizontal de expansão $v$
$Z(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Altura Geopotencial (m)
$\bar{Z}(\sigma)$	- Altura Geopotencial do estado básico (m)
$Z'(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Desvio da Altura Geopotencial em relação à $\bar{Z}(\sigma)$
$\hat{Z}_n(\varphi)$	- Amplitude adimensional de $h_n$
$z_s(\lambda, \varphi)$	- Topografia (m)
$\chi$	- Velocidade potencial
$\delta$	- Divergência do vento horizontal
$\delta_{nm}$	- Delta de Kronecker
$\phi(\lambda, \varphi, \sigma, t)$	- Geopotencial ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )
$\bar{\phi}(\sigma)$	- Geopotencial hidrostático em relação a $\bar{T}(\sigma)$
$\varphi$	- Seno das latitudes (adimensional)
$\gamma_m$	- Peso na relação de ortonormalidade
$\bar{\Gamma}(\sigma)$	- Estabilidade estática do estado básico em coordenada vertical $\sigma$ ( $\text{Km}^{-1}$ )
$\Psi_n(\sigma)$	- Função da estrutura vertical
$\tilde{\Psi}_j^T$	- Autovetor da matriz adjunta de $\underline{\underline{G}}$ ,
$\Psi_{nk}^T$	- Autovetor da adjunta
$\kappa$	- Constante dada pela razão $R_d / c_p$
$\lambda$	- Longitude ( $^\circ$ )
$\nu$	- Frequência adimensional
$\Theta$	- Temperatura potencial
$\pi$	- Número irracional (3.14159...)

$g_n$	- Constante adimensional, que caracteriza a natureza do escoamento horizontal
$\sigma$	- Coordenada vertical dada pela razão $\frac{p}{p_s}$
$\dot{\sigma}$	- Velocidade vertical em coordenada $\sigma$
$\Sigma$	- Somatório
$\varphi$	- Latitude ( $^\circ$ )
$\omega$	- Velocidade vertical em coordenada de pressão
$\Omega$	- Velocidade angular da Terra ( $7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )
$\zeta$	- Componente vertical da vorticidade ( $\text{s}^{-1}$ )
$\Theta_{r,n}^{s,l}$	- Função vetorial de Hough
$\nabla$	- Operador Nabla
$\nabla^2$	- Laplaciano
$\langle, \rangle$	- Produto vetorial interno

## LISTA DE SIGLAS E / OU ABREVIATURAS

COLA	- Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CISK	- Condition Instability of the Second Kind
CLP	- Camada Limite Planetária
EMP	- Erro Médio da Previsão
EMQ	- Erro Médio Quadrático
ENMWF	- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENIAC	- Electronic Numerical Integrator and Computer
EX1, 2, 3 e 4	- Experimento de Controle 1, 2, 3 e 4
EXP5, 6, 7, 8 e 9	- Experimento 5, 6, 7, 8 e 9
FSU	- Florida State University
GFLD	- Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
GPCP	- Global Precipitation Climatology Project
GrADS	- Grid Analysis and Display System
H.N.	- Hemisfério norte
H.S.	- Hemisfério sul
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LLNL	- Lawrence Livermore National Laboratories
MCGA	- Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MGCPTEC	- Modelo Global do CPTEC
MRF	- Médium Range Forecasting
NCAR	- National Center for Atmospheric Research
NCEP	- National Centers for Environmental Prediction
NMC	- National Meteorological Center
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
PNT	- Previsão Numérica de Tempo
RAS	- Relaxed Arakawa-Schubert
SiB	- Simple Biosphere Model

- SSiB - Simplified SiB
- SSMNVl - Sistema Sinótico Mesoescala Nuvem Vírgula Invertida
- TSM - Temperatura da Superfície do Mar
- UCLA - University of California, Los Angeles

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 – Considerações Gerais

Fenômenos de grande escala e os de escala sinótica têm sido extensivamente estudados e em boa parte entendidos. O desenvolvimento de tecnologias sofisticadas como os radares e os satélites meteorológicos permite a observação e monitoramento mais detalhado da atmosfera; e computadores de alta velocidade tornaram possível lidar com complexos modelos numéricos da atmosfera.

Para isso, é necessário um maior detalhamento dos sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais que pertencem aos regimes de mesoescala, atuantes na América do Sul, levando-nos a uma necessária subdivisão de escalas. Na Tabela 1.1, estão listados os principais fenômenos atmosféricos observados na região sul e sudeste do Brasil, agrupados em três tipos de escalas horizontais, segundo a classificação de Orlanski (1975):

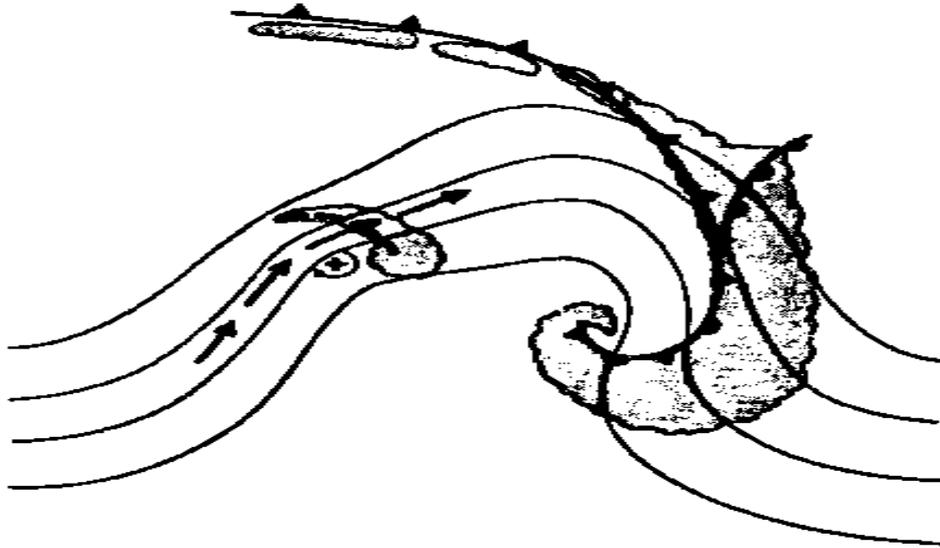
**TABELA 1.1** – Principais sistemas meteorológicos que afetam a região do Brasil e respectivas escalas horizontais.

<b>Sistemas meteorológicos</b>	<b>Escala Orlanski</b>
Sistemas Frontais Ciclones extratropicais Nuvem vírgula (invertida no Hemisfério Sul)	meso $\alpha$ (200 a 2000 Km)
Linhas de instabilidade	meso $\beta$ (20 a 200 Km)
Nuvens cumulonimbus isoladas	meso $\gamma$ (2 a 20 Km)

A importância dos vórtices de ar frio, também chamados nuvens em forma de vírgula (invertida no Hemisfério Sul) ou simplesmente nuvens vírgula, que se formam na massa de ar polar na retaguarda de frentes frias (Reed, 1979), têm crescido entre os serviços meteorológicos (Locatelli, Hobbs e Werth, 1982). Estes sistemas atingem, as regiões sul e sudeste do Brasil, causando quase sempre surpresas desagradáveis, pela dificuldade em prevêê-los.

As nuvens vírgulas são sistemas convectivos de mesoescala com dimensões horizontais entre 200 e 2000 Km, e estas se deslocam para leste com velocidade de aproximadamente 8 m/s. O ciclo de vida de uma nuvem vírgula, desde sua fase nascente até a dissipação, é de aproximadamente dois dias. São encontradas entre as latitudes de 20° e 35° S na América do sul (Silva Dias, 1988). Os vórtices de ar frio são mais freqüentes, no Hemisfério Norte, no inverno, e sobre os oceanos (Reed, 1979) e podem provocar chuvas intensas, mesmo quando se formam sobre o continente. Carlson (1980) ressalta que o formato de uma vírgula na fase madura não deve ser confundido com outros distúrbios de mesmo padrão como os ciclones extratropicais.

Devido às pequenas dimensões espaciais desses sistemas, as imagens de satélites meteorológicos são de grande auxílio na sua localização e rastreamento, principalmente em regiões com poucas observações (Reed, 1979). Alguns sistemas de nuvem vírgula evoluem para ciclogênese de grande escala. Satyamurty et al. (1990) e Gan e Rao (1991) apresentam a climatologia de ciclogênese para a América do Sul baseadas em imagens no canal infravermelho de satélites. Entretanto, um sistema de nuvem vírgula pode ter uma vida muito curta, ao contrário da formação de um ciclone. A Figura 1.1 representa o esquema de uma nuvem vírgula invertida:



**FIGURA 1.1** - Representação esquemática de uma nuvem vírgula invertida e uma banda frontal principal (adaptada para o Hemisfério Sul). Os contornos finos são linhas de corrente em 500 hPa. Setas representam a corrente de jato nos altos níveis. Sinal positivo indica máximo de vorticidade ciclônica em altos níveis, que ficam situados na região da saída do jato, à direita (H.S). Demais símbolos como usados convencionalmente em meteorologia.

FONTE: Businger e Reed (1989, p. 138).

Estudos de casos de nuvem vírgula são escassos na América do sul, pois são fenômenos raros em relação à frequência de penetração, em médias latitudes, de massas de ar com características polares na qual elas ocorrem. Além disso, qualquer sistema de circulação atmosférica, desde uma célula convectiva de pequena escala a um sistema de grande escala, durante seu processo de desenvolvimento é caracterizado por transformações de energia. Nessas regiões, a fonte primária de energia para os distúrbios atmosféricos de grande escala é a energia potencial disponível zonal, associada ao intenso gradiente

meridional de temperatura, tendo como fontes secundárias de energia o aquecimento diabático devido à liberação de calor latente, e o aquecimento radiativo (Bluestein, 1993).

No entanto, com a ausência de dados meteorológicos em mesoescala para a América do Sul e as tentativas de prever e entender como o aquecimento atmosférico, associado à liberação de calor latente, dirige a circulação atmosférica de grande escala, é de extrema importância a utilização de modelos numéricos como ferramentas para a obtenção de uma melhor representação dos fenômenos de escala subsinótica, como as nuvens vírgulas invertidas. Dessa forma, estudar e compreender o comportamento desses sistemas pode ser realizado ao examinar os processos energéticos envolvidos durante os processos de formação, desenvolvimento e dissipação.

Dentre os poucos trabalhos sobre nuvem vírgula invertida, a maioria não enfatiza a análise energética, principalmente no que se refere à partição de energia entre os modos horizontais de oscilação (ondas de Rossby, Kelvin, misto Rossby-gravidade e de gravidade inercial, com propagação para leste e oeste).

Portanto, os principais objetivos desta dissertação são:

## **1.2 – Objetivo Geral**

Estudar os sistemas sinóticos de mesoescala com nuvem vírgula invertida (SSMNVI) sobre o continente Sul-Americano, utilizando análises disponíveis no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e o modelo global do CPTEC (MGCPTEC) para as resoluções T126L28 e T170L42.

### 1.3 – Objetivos Específicos

1.3.1 – Realizar estudo observacional de casos relevantes de SSMNVI, durante períodos pré-selecionados dentre os dados disponíveis no CPTEC.

- Analisar os campos de vento, temperatura, altura geopotencial, advecção de temperatura, água precipitável, convergência de umidade, vorticidade e precipitação / antes, durante e após a ocorrência de SSMNVI.
- Analisar a partição de energia entre os modos horizontais e verticais, e suas interações.

1.3.2 – Realizar estudo de simulação dos casos identificados no item 1.3.1, com o intuito de verificar a capacidade do MGCPTEC em simular o SSMNVI, e o efeito da resolução.

- Comparar os campos simulados com os campos analisados.
- Comparar caso com esquema de convecção profunda, tipo KUO e RAS, opcionais no MGCPTEC.
- Comparar a partição e a interação de energia entre os modos horizontais e verticais simulados com as calculadas a partir de observações.

A revisão bibliográfica sobre SSMNVI e a descrição do MGCPTEC estão no Capítulo 2; a metodologia, os dados e os casos selecionados estão no Capítulo 3; os resultados referentes aos estudos observacionais e de modelagem são apresentados no Capítulo 4; os estudos observacionais e de simulação

numérica da partição e interação de energia entre os modos horizontais e verticais estão no Capítulo 5, e as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são mostrados no Capítulo 6.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

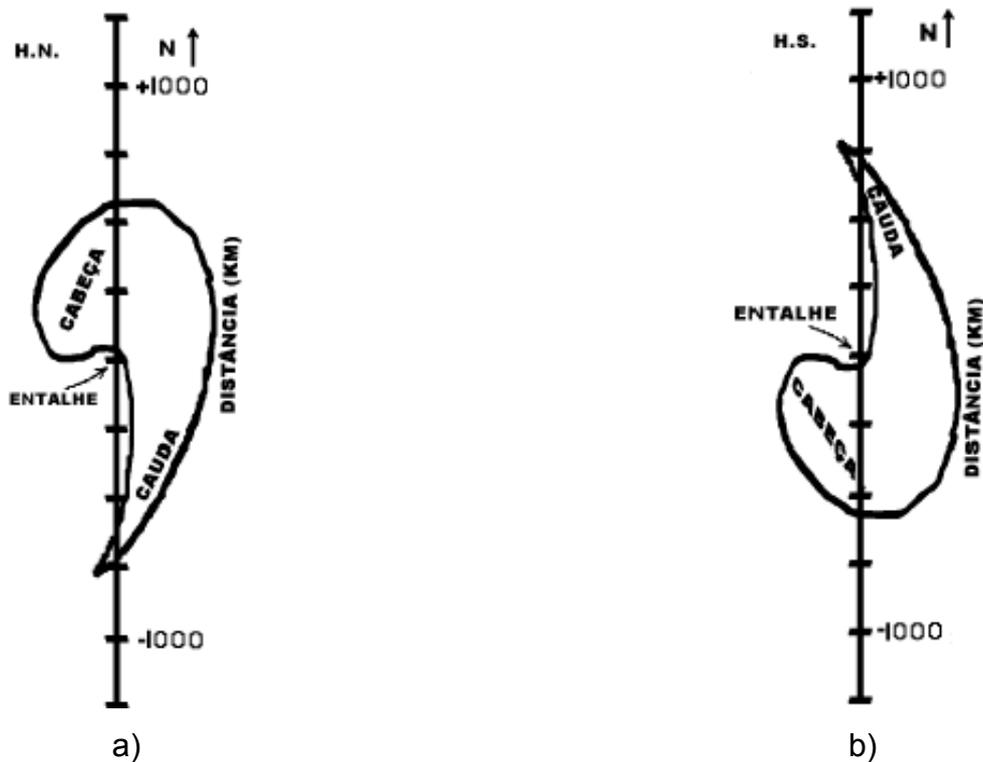
#### **2.1 – Introdução**

Este capítulo será dividido em duas partes principais. A primeira apresenta os aspectos teóricos e observacionais sobre o desenvolvimento de vórtices de ar frio, do tipo nuvem vírgula (invertida no Hemisfério Sul), enquanto que a segunda aborda a Previsão Numérica de Tempo (PNT), o Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA), as leis físicas básicas que governam os movimentos atmosféricos utilizados pelo MCGA, as várias resoluções do modelo, os processos físicos parametrizados e as condições iniciais e de contorno.

#### **2.2 – Aspectos Teóricos e Observacionais sobre Nuvens Vírgula**

##### **2.2.1 – Considerações Gerais**

Na Europa, esses tipos de distúrbios sinóticos de mesoescala, que apresentam dimensões horizontais entre 200 e 2000 Km segundo a classificação Orlanski (1975), são conhecidos como baixas polares (“polar lows”) segundo House e Hobbs (1982), enquanto que nos Estados Unidos são chamados de nuvens vírgula (“comma clouds”), por assumirem o formato de uma vírgula. A Figura 2.1 (Mullen, 1979), mostra o esboço de nuvens vírgula no seu estágio maduro, para o Hemisfério Norte (Figura 2.1a) e para Hemisfério Sul (Figura 2.1b), com a localização e a denominação de suas três principais partes: a cabeça, a cauda e o entalhe:



**FIGURA 2.1** – Ilustração esquemática da nuvem vírgula como observada por satélite no canal infravermelho: a) Hemisfério Norte e b) Hemisfério Sul.

Estudos realizados para o Hemisfério Norte, referentes aos vórtices de ar frio, têm como referências mais antigas: Harley (1960), Meteorological Office (1962), e Harrold e Browning (1969), citadas em quase todas as bibliografias sobre o assunto.

Os vórtices ciclônicos em massas de ar frio apresentam-se em diferentes formas e tamanho, por isso não existe uma denominação universalmente aceita. Rasmussen (1981) e Reed e Blier (1986) chamam de nuvem vírgula os sistemas com padrão de nebulosidade em forma de vírgula, com diâmetro superior a 500 Km, que se desenvolvem nas proximidades dos limites frontais, onde há forte ascensão baroclínica inclinada. Locatelli et al (1982) referem-se a

esses sistemas como vórtices em correntes de ar polar. Businger e Reed (1989), após reexaminarem vários tipos de vórtices ciclônicos em massas de ar frio, preferem utilizar o termo “baixa polar” em referência a qualquer tipo de ciclone de pequena escala sinótica ou de escala subsinótica (500 – 1000 Km de diâmetro), que se forme numa massa de ar frio, no lado polar de uma corrente de jato ou zona frontal, cuja nebulosidade é largamente de origem convectiva.

A denominação nuvem vírgula (invertida no Hemisfério Sul), atribuída para este tipo de baixa polar, é uma abreviação que foi introduzida por meteorologistas que utilizam imagens de satélites, para denotar a forma característica da nuvem vista em massas de ar frio (Anderson et al., 1969).

Neste trabalho, utilizaremos o termo “nuvem vírgula” em lugar de “baixa polar” ou vórtice de ar frio, entretanto deve-se tomar cuidado para não confundir com outros distúrbios, como por exemplo, os ciclones extratropicais, que também adquirem padrão de nebulosidade do tipo vírgula em sua fase madura.

### **2.2.2 – Formação de Nuvem Vírgula**

Vários estudos teóricos e observacionais discutem os mecanismos de desenvolvimento e formação das nuvens vírgulas. Conforme já visto, esses sistemas são, geralmente, de escala subsinótica, com ocorrência entre 1000 e 2000 Km da frente principal. Reed (1979) e Businger (1987) encontraram que a maioria dos vórtices ciclônicos de ar frio desenvolvem-se sobre os oceanos durante o inverno, originando-se em áreas onde haja forte aquecimento em baixos níveis e convecção intensificada, onde exista acentuada baroclinicidade troposférica, usualmente próximo a limites frontais pré-existentes, e no lado de forte cisalhamento ciclônico das correntes de jato troposféricas superiores (Mullen (1979) e Locatelli et al (1982)). Mullen (1979), usando 22 casos de nuvem vírgula que ocorreram no Pacífico norte, construiu a estrutura composta

do vento zonal e da temperatura no início e no estágio maduro. Mullen (1982) notou que ciclones polares, muito similares àqueles formados sobre o oceano, podem formar-se sobre os continentes nos períodos frios. Mullen (1983) apresentou exemplos desses casos. Carleton (1985) usando imagens de satélites, confirmou a existência de nuvens vírgula no Atlântico norte e Pacífico norte.

Existem diversos mecanismos que, combinados ou sozinhos, explicam a formação e/ou desenvolvimento das nuvens vírgulas. Esses mecanismos incluem: a) instabilidade baroclínica úmida, b) instabilidade baroclínica modificada pela liberação de calor latente, b) instabilidade condicional do segundo tipo Conditional Instability of the Second Kind (CISK), e d) esteira transportadora quente.

A presença de baroclinicidade significativa, através de uma considerável profundidade da troposfera na vizinhança da nuvem vírgula, como revelado por um grande número de estudos (Harley 1960; Harrold e Browning 1969; Mullen 1979; Reed 1979; Locatelli et al. 1982), mostram que a instabilidade baroclínica pode realizar um papel importante na formação e intensificação desse tipo de distúrbio. Mansfield (1974) e Duncan (1977) sugeriram instabilidade baroclínica seca, enquanto Rasmussen (1979,1981) propõe que seja uma manifestação da instabilidade condicional do segundo tipo (CISK) como um mecanismo de formação. Reed (1979) e Mullen (1979) propuseram a associação da instabilidade baroclínica com o mecanismo CISK como instrumentos iniciadores dos vórtices de ar frio, enquanto que Bonatti e Rao (1987) mostraram que esses distúrbios, quando formados sobre o continente Sul-Americano, são causados por instabilidade baroclínica úmida; propagam-se de oeste para leste e dissipam-se em cerca de dois dias, apresentando centros relativamente quentes próximos à superfície, embebidos na massa fria.

### **2.2.3 – Formação da Nuvem Vírgula Invertida no Hemisfério Sul**

Como mencionado no Capítulo 1, existem poucos trabalhos sobre o assunto para o Hemisfério Sul. Dentre os estudos desses sistemas no Brasil estão: Bonatti e Rao (1987), que observaram o desenvolvimento de uma nuvem vírgula invertida originada entre o norte da Argentina e Uruguai, em abril de 1979, responsável por um total pluviométrico de 65 mm, sobre Porto Alegre. Eles utilizaram um modelo quase-geostrófico em diferenças finitas com resolução vertical de 20 camadas para reproduzir as principais características do distúrbio e concluíram que a instabilidade baroclínica, modificada pela liberação de calor latente, foi o mecanismo gerador do vórtice ciclônico. Segundo esses pesquisadores, as nuvens vírgula se formam na América do Sul sobre as vizinhanças do Paraguai, norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil, propagando-se de oeste para leste, dissipando-se em aproximadamente dois dias.

Dall' Antonia (1991) estudou a formação de uma nuvem vírgula invertida sobre o Paraguai e nordeste da Argentina, observada em agosto de 1989. Ele observou, entre outros fatores, uma esteira transportadora quente paralela à frente fria, com levantamento inclinado para frente, e uma esteira transportadora fria paralela à frente quente, com levantamento inclinado para trás, interagindo com a primeira.

O conceito de esteira transportadora quente foi introduzido por Harrold (1973) e, em termos gerais, é uma corrente de ar bem definida, que transporta grandes quantidades de calor, umidade (e também momento) para os pólos e para os níveis mais altos. Browning (1986) foi o primeiro a utilizar conceito de esteira transportadora para analisar o fluxo de ar através de sistemas frontais e a desenvolver uma teoria para abordar o problema. Classificou as esteiras transportadoras em frias e quentes com levantamento inclinado para frente e para trás.

Dereczynski (1995) fez um estudo de uma nuvem vírgula invertida e a subsequente ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos (litoral do Rio de Janeiro) e elaborou um modelo conceitual em três estágios para estudar o desenvolvimento de uma nuvem vírgula invertida, originada nas proximidades do Paraguai, em junho de 1989. O estudo foi realizado através de análises isobáricas e isentrópicas, e mostra que o sistema se formou nas proximidades do Paraguai, em níveis inferiores (850 a 700 hPa), na retaguarda de um sistema frontal frio, com suporte dinâmico em altos níveis. No estágio nascente desse distúrbio observou-se, nos baixos níveis, uma esteira transportadora atrás da frente fria, promovendo forte advecção de ar polar para a região sudeste do Brasil, onde apresentou um giro ciclônico na fase madura, contribuindo assim para a formação do vórtice. Hallak e Silva Dias (1994) compararam os dois casos citados anteriormente (junho e agosto de 1989), encontrando importantes diferenças entre eles, descobrindo que, em ambos, o centro do vórtice ciclônico em 700 hPa estava localizado sobre a metade norte do eixo do cavado em 500 hPa, aspecto também ressaltado por Browning (1986). Hallak (2000), através de simulações numéricas efetuadas pelo modelo de área limitada RAMS, estudou o mesmo caso, ocorrido em agosto de 1989, e dentre os resultados alcançados, destacam-se a identificação de uma zona baroclínica na região de desenvolvimento do distúrbio, o papel exercido pelas esteiras transportadoras fria e quentes, e a constatação de altos valores absolutos de vorticidade potencial isentrópica, associados ao movimento descendente de massas de ar frio.

A Tabela 2.1 sintetiza as principais características comuns da nuvem vírgula, obtidas a partir de estudos de casos realizados por pesquisadores mencionados anteriormente (Dereczynski, 1995):

**TABELA 2.1** - Principais características de nuvem vírgula.

<b>Nomenclatura:</b>	- nuvem vírgula (invertida no H.S.) - vórtice de ar frio - vórtice em corrente de ar polar - baixa polar
<b>Regiões de formação na América do Sul:</b>	Paraguai, norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil
<b>Escala Horizontal:</b>	500 a 1500 Km
<b>Tempo de duração:</b>	2 dias
<b>Estação do ano:</b>	inverno
<b>Velocidade de Deslocamento para leste:</b>	8 ms <sup>-1</sup>
<b>Mecanismo Gerador:</b>	- Instabilidade baroclínica úmida - instabilidade baroclínica modificada pela liberação de calor latente - CISK - esteira transportadora quente
<b>Centro do Vórtice:</b>	Frio
<b>Nível de Formação:</b>	Médios e inferiores

### **2.3 – Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC**

Nesta seção, é apresentada uma descrição do MGCPTEC. Um breve resumo sobre o desenvolvimento da Previsão Numérica de Tempo pode ser encontrado no **Apêndice A**.

### 2.3.1 – MGCPTC

No começo dos anos 60, quatro diferentes grupos nos Estados Unidos desenvolveram MCGs (Modelos de Circulação Geral da Atmosfera) de várias camadas, usando as equações primitivas de Bjerknes (1904) e Richardson (1922), são eles: *The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFLD), o Departamento de Meteorologia da *University of Califórnia, Los Angeles* (UCLA), *The Lawrence Livermore National Laboratories* (LLNL), e *The National Center for Atmospheric Research* (NCAR).

O MCGA em uso no CPTEC teve sua origem do modelo usado para previsão de tempo de médio prazo no National Centers for Environmental Prediction (NCEP), e posteriormente transferido ao Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA). O CPTEC adotou a versão 1.7 do COLA, que tem truncamento romboidal. Essa versão foi generalizada para truncamento triangular e foram introduzidas resoluções horizontal e vertical versáteis, adaptações na geração de arquivos de entrada e saída para as necessidades operacionais do CPTEC e a utilização de temperatura da superfície do mar média observada da última semana. Essa versão é chamada de versão 1.0 CPTEC/COLA (Bonatti, 1996).

As leis físicas básicas que governam os movimentos atmosféricos utilizados pelo MGCPTC são: conservação de massa e umidade, de energia e de momentum angular. As equações principais são: equação do movimento, equação da continuidade para o ar seco e vapor d'água e a primeira lei da termodinâmica. Além disso, consideram-se os movimentos em aproximado equilíbrio hidrostático. A geometria utilizada pelo modelo é esférica com coordenada vertical sigma ( $\sigma = p/p_s$ ), que permite a simples introdução da topografia. Do ponto de vista numérico, aplica-se um esquema de diferenças finitas na vertical e no tempo e decomposição espectral na horizontal.

A percepção de John Von Neumann (Charney et al., 1950) de que a Meteorologia seria uma das áreas que mais se beneficiaria com o uso de computadores rápidos e programáveis, contribuiu para que a sociedade se beneficie de previsões de tempo cada vez mais precisas para 24, 48 e até cerca de 168 horas, em escala mundial, contrastando com as precárias previsões de 40 anos atrás, onde a atividade de previsão de tempo mais se aproximava de arte do que ciência, e ainda dependia da destreza de cada previsor, estando longe de realmente ser considerada um ramo da Física aplicada.

Atualmente, o MGCPTEC é rodado operacionalmente com uma resolução de T126L28 (resolução horizontal de 126 harmônicos que equivale a um espaçamento de aproximadamente 100 km e 28 níveis na coordenada vertical sigma) para sete dias, nos horários 00 e 12 UTC, e para previsão de doze horas as 06 e 18 UTC. As rodadas intermediárias são feitas para produzir um ciclo de assimilação de seis horas. Esta resolução indica que os valores numéricos das variáveis meteorológicas, previstas pelo modelo, representam valores médios sobre quadrículos de 100 km x 100 km. Uma descrição mais detalhada das características, parametrizações e equações empregadas no MGCPTEC estão detalhadas nos **Apêndices B e C**.



## CAPÍTULO 3

### DADOS E METODOLOGIA

O trabalho proposto consiste basicamente em duas partes, uma observacional e outra de modelagem. Neste Capítulo são descritos os dados e a metodologia que serão utilizados em seu desenvolvimento.

#### 3.1 - Dados

As ferramentas básicas para a parte observacional e de modelagem desta dissertação são, respectivamente:

- 1) Reanálises do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) para o período de 1979 a 1993, dados diários em 4 horários sinóticos: 00, 06, 12 e 18Z disponíveis no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em resolução T106K17.
- 2) Análises do National Centers for Environmental Predictions (NCEP) com resoluções T062L28, T126L28, T170L42 e T254L64 com períodos variados, do início de 1995 até o presente.

As reanálises do ECMWF contêm campos de geopotencial, temperatura, umidade relativa e componentes horizontal e vertical do vento em 17 níveis isobáricos, entre 1000 e 10 hPa, com resolução horizontal de 1.125 graus.

As análises do NCEP são dados espectrais (harmônicos esféricos) utilizadas nessa dissertação, para as resoluções T126L28 e T170L42, onde  $T_{ttt}$  significa truncamento triangular na onda zonal  $ttt$  e  $L//$  significa  $//$  camadas em coordenadas sigma. Essas análises contêm campos espectrais de topografia, logaritmo natural da pressão à superfície, temperatura virtual, divergência

horizontal do vento, vorticidade e umidade específica. São também utilizadas análises globais diárias de precipitação provenientes do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). Detalhes sobre a geração dos dados de precipitação do GPCP podem ser obtidos em Huffman e Bolvin (2002). Os dados do GPCP foram utilizados somente para o caso de setembro de 2003, pois para os outros casos não há dados disponíveis do GPCP.

### 3.2 – Metodologia

#### 3.2.1 – Episódios Selecionados

Os episódios de SSMNVI foram selecionados de acordo com a disponibilidade dos dados citados anteriormente e descritos na Tabela 3.1 abaixo:

**TABELA 3.1** – Descrição dos Experimentos: Parte Observacional e Modelagem.

<b>Experimentos</b>	<b>Período</b>	<b>Resolução</b>	<b>Esquema de Convecção</b>
Experimento Controle 1 (EXC1)	19 – 21 setembro 2003	Análise NCEP T126L28 e T170L42	-
Experimento Controle 2 (EXC2)	14 – 16 abril 1979	Reanálise ECMWF T106K17	-
Experimento Controle 3 (EXC3)	21 – 23 agosto 1989	Reanálise ECMWF T106K17	-
Experimento Controle 4 (EXC4)	04 – 07 outubro 1991	Reanálise ECMWF T106K17	-

(continua)

**TABELA 3.1 – Conclusão.**

Experimento 5 (EXP5)	19 – 21 setembro 2003	MGCPTEC T126L28 e T170L42	KUO
Experimento 6 (EXP6)	19 – 21 setembro 2003	MGCPTEC T126L28 e T170L42	RAS
Experimento 7 (EXP7)	14 – 16 abril 1979	MGCPTEC T126L28 e T170L42	KUO
Experimento 8 (EXP8)	21 – 23 agosto 1989	MGCPTEC T126L28 e T170L42	KUO
Experimento 9 (EXP9)	04 – 07 outubro 1991	MGCPTEC T126L28 e T170L42	KUO

Os quatro primeiros casos foram usados para a parte observacional deste estudo, e consistem nas seguintes etapas:

- Análise de campos de vento, temperatura absoluta, altura geopotencial, advecção de temperatura, água precipitável, convergência de umidade, vorticidade e precipitação antes, durante e após a ocorrência de SSMNVI.
- Análise da partição de energia em modos horizontais e verticais, e suas interações.

Os experimentos (EXP5-EXP9) fazem parte do estudo de modelagem desta dissertação, e compreendem as seguintes etapas:

- Comparação dos campos simulados e dos campos analisados.

- Comparação da partição e interação de energia simulada com as calculadas a partir de observações.

Estão disponíveis no MGCPTEC dois esquemas de convecção profunda. Os esquemas tipo Kuo (KUO) e Arakawa-Schubert Relaxado (RAS) estão descritos resumidamente no **Apêndice C**. Os experimentos EXP5 e EXP6 simulam o mesmo caso de SSMNVI ocorrido em setembro de 2003 e utilizarão os esquemas de convecção tipo KUO e RAS, respectivamente para questão de comparação com o EXP1.

As condições iniciais do Experimento 1 (EXP1), provenientes do NCEP, estavam na resolução T254L64 e foram transformadas nas resoluções T126L28 e T170L42. Depois foram obtidas as análises do NCEP e as saídas do modelo para fins de comparação.

A recomposição da grade T254L64 para T126L28 e T170L42 utiliza a metodologia adaptada do NCEP Peter Caplan (2003) da seguinte maneira:

- Recomposição espectral dos campos de divergência e vorticidade  $(\delta, \zeta)$  no espaço físico  $[(u, v), T_v, q, z_s]$  na grade nova, onde  $z_s$  é apenas truncado;
- Decomposição espectral dos campos interpolados na grade nova de  $(u, v, T_v, q)$  e cálculo de  $\delta$  e  $\zeta$ ;
- Reconstrução de  $P_s$  hidrosticamente com lapse rate constante da  $T_v$  (abaixo do chão lapse rate  $-6,5$  K/Km);
- Interpolação vertical  $\sigma_{velho} \rightarrow \sigma_{novo}$  coluna a coluna. Cúbica-lagrangeana em  $\log(\text{pressão})$ , com restrição monotônica no centro do domínio. Nos

intervalos extremos é linear em log(pressão) e fora do domínio constantes, exceto para temperatura próxima a superfície  $\rightarrow \gamma = 6,5$  K/Km e umidade específica  $\rightarrow$  umidade relativa constante.

Já para as reanálises do ECMWF (T106K17) em níveis de pressão, são convertidas para condições iniciais T062L28 e T170L42, utilizando a mesma metodologia operacional disponível no CPTEC, nas rodadas da análise JMA (Japan Meteorological Agency), Bonatti, (2003).

### 3.3 – Decomposição em Modos Normais

O estudo das trocas verticais e horizontais de energia será realizado baseado na decomposição em funções modos normais, resumidas a seguir, de acordo com os procedimentos descritos em Kasahara e Puri (1981), Andrade (1994) e Mendonça (2002).

#### 3.3.1 - Equações Primitivas Baroclínicas

Conservando-se os termos não-lineares e forçantes, as equações primitivas baroclínicas em coordenadas esféricas  $(\lambda, \varphi)$  na horizontal, e a coordenada vertical  $\sigma = \frac{p}{p_s}$ , (sendo  $p$  a pressão no nível considerado e  $p_s$  a pressão a superfície) são expressas por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} = R_u, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - fu + \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = R_v, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \nabla \cdot (\vec{V} - \tilde{V}) + (\vec{V} - \tilde{V}) \cdot \nabla q = 0, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \tilde{V} \cdot \nabla q + \nabla \cdot \tilde{V} = 0, \quad (3.4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \kappa T \left( \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + \frac{dq}{dt} \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + F_T, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}, \quad (3.6)$$

O conjunto de equações (3.1-3.6) acima são equações do movimento horizontal, tendência de pressão na superfície, continuidade de massa, termodinâmica e hidrostática, onde:

- u e v são, respectivamente, as componentes zonal e meridional da velocidade horizontal;
- $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$  é a componente vertical da velocidade;
- $q = \ln(p_s/\bar{p}_s)$ ;
- $f = 2\Omega \sin \varphi$  é o parâmetro de Coriolis;
- a é o raio médio da Terra;
- $\lambda, \varphi, \sigma, t$  são, respectivamente, a longitude, a latitude, a coordenada vertical e o tempo;
- $R_u$  e  $R_v$  são as resultantes que compõem a parte não homogênea das equações do movimento zonal e meridional, respectivamente;
- $\kappa = R_d/c_p$ , onde  $R_d$  é a constante do gás para o ar seco e  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante;
- $\dot{Q}$  é a taxa de calor (aquecimento adiabático);
- $F_T$  é o termo relativo à dissipação de calor;
- $\phi$  é o geopotencial;

- -  $P$  é uma variável auxiliar (Kasahara e Puri, 1981), definida por:

$$P = \phi - \bar{\phi}(\sigma) + R_d \bar{T}(\sigma) q, \quad (3.7)$$

onde:  $\bar{\phi}(\sigma)$  é o geopotencial hidrostático em relação a  $\bar{T}(\sigma)$ ;

-  $T$  é a temperatura, definida como:

$$T = \bar{T}(\sigma) + T'(\lambda, \varphi, \sigma, t); \quad (3.8)$$

onde:

-  $T'$  é o desvio de  $T$  em relação à temperatura  $\bar{T}(\sigma)$ ;

-  $\bar{T}$  é o perfil de temperatura da atmosfera básica, e é função apenas da coordenada vertical.

O método das transformadas é empregado para a decomposição das estruturas horizontal e vertical. A estrutura vertical, juntamente com as condições de contorno, forma um problema de Sturm–Liouville, cujos modos verticais normais são os autovetores, e os autovalores associados são proporcionais à velocidade de fase da onda de gravidade pura, conhecidos como a profundidade equivalente (Taylor, 1936, citado por Andrade 1994). Estes autovalores fornecem a estrutura horizontal para cada modo vertical normal, ou seja, cada equação da estrutura horizontal está associada a uma profundidade equivalente (autovalor) e a um modo vertical (autovetor).

Desta forma, uma grandeza arbitrária da atmosfera,  $\vec{A}(\lambda, \varphi, \sigma, t)$ , pode ser representada como uma série de funções através desse conjunto ortonormal e completo de funções:

$$\vec{A}(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_{n,s,r,l} C_{r,n}^{s,l}(t) H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi) \Psi_n, \quad (3.9)$$

com:

$$C_{r,n}^{s,l} = \langle \bar{A}_n(\lambda, \varphi, t), H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi) \rangle$$

$$\bar{A}_n(\lambda, \varphi, t) = \int \bar{A}(\lambda, \varphi, \sigma, t) \Psi_n(\sigma) d\sigma, \quad (3.10)$$

$$H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi) = \Theta_{r,n}^{s,l}(\varphi) \exp(is\lambda) \quad (3.11)$$

onde:

- $\Psi_n(\sigma)$  é a estrutura vertical do conjunto de funções;
- $H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi)$  é a estrutura horizontal do conjunto de funções;
- $\Theta_{r,n}^{s,l}(\varphi)$  é a função de Hough;
- $s$  é o número de onda zonal;
- $l$  é o índice para os modos meridionais de oscilação;
- $n$  é o índice para os modos verticais de oscilação;
- $\langle , \rangle$  indica produto interno; e
- $r$  é o índice para o modo de oscilação de acordo com a sua frequência característica, isto é:

$r = 1$  - onda de Rossby;

$r = 2$  - onda de Kelvin;

$r = 3$  - onda mista de Rossby-Gravidade;

$r = 4$  - onda de gravidade para oeste;

$r = 5$  - onda de gravidade para leste.

As funções de Hough (Hough, 1898), são as autofunções do sistema de equações da água-rasa linearizado na esfera, em torno de um estado básico

em repouso e com altura de referência especificada, e sendo fornecido o perfil de temperatura da atmosfera básica.

Essas autofunções são dependentes do número de onda zonal ( $s$ ), do índice meridional ( $l$ ), conforme indicado na Equação 3.11. Para cada par  $(s, l)$  existem ondas com freqüência características:

- 1) quando  $l = 0$  tem-se a onda de Kelvin que se propaga para leste e a onda Mista de Rossby-Graviade que se dispersam para leste ou para oeste;
- 2) se  $l \geq 1$  têm-se, para cada número de onda zonal, três modos de oscilação no tempo permitidos: dois de alta freqüência, correspondentes às ondas de Gravidade Inerciais que propagam para leste e para oeste e um modo de baixa freqüência para oeste, representado pela onda rotacional de Rossby (Longuet-Higgins, 1968; Silva Dias e Schubert, 1979).

### 3.3.2 – A Transformada Vertical

A transformada vertical finita da função genérica  $f(\lambda, \varphi, t)$  para separação da equação da estrutura vertical, associada às equações primitivas, pode ser definida, genericamente, como:

$$f_n(\lambda, \varphi, t) = \int_0^1 f(\lambda, \varphi, \sigma, t) \Psi_n(\sigma) d\sigma, \quad (3.12)$$

onde  $\Psi_n(\sigma)$  é o núcleo da transformada de peso unitário.

A transformada inversa de (3.11) é expressa por:

$$f(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n f_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.13)$$

onde  $f_n$  é o coeficiente de expansão para a função  $f$  e a função  $\Psi_n$  satisfaz a condição de ortonormalidade:

$$\int_0^1 \Psi_m(\sigma) \Psi_n(\sigma) d\sigma = \delta_{mn} = \begin{cases} 1, m = n \\ 0, m \neq n \end{cases}, \quad (3.14)$$

com  $\delta_{mn}$  indicando o delta de Kronecker.

Neste caso, a função  $f$  pode ser substituída por qualquer uma das variáveis  $u$ ,  $v$  ou  $P$ :

$$u(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n u_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.15)$$

$$v(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n v_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.16)$$

$$P(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n g h_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.17)$$

onde:

$h_n$ ,  $u_n$  e  $v_n$  são os coeficientes de expansão na vertical da função  $P$  e das componentes horizontais da velocidade, respectivamente.

A equação da estrutura vertical é então expressa por:

$$\frac{d}{d\sigma} \left[ \left( \frac{\sigma g}{R\Gamma} \right) \frac{d\Psi_n}{d\sigma} \right] + \frac{\Psi_n}{H_n} = 0, \quad (3.18)$$

com  $H_n = c_n^2/g$  ( $c_n$  é a velocidade de fase da onda de gravidade pura) sendo a profundidade equivalente associada a cada modo vertical  $n$ , satisfazendo as seguintes condições de contorno:

$$\sigma \frac{d\Psi_n}{d\sigma} + \sigma \frac{\bar{\Gamma}_T}{\bar{T}_T} \Psi_n = 0, \quad \sigma = 0 \quad (\text{topo}) \quad (3.19)$$

e

$$\sigma \frac{d\Psi_n}{d\sigma} + \sigma \frac{\bar{\Gamma}_S}{\bar{T}_S} \Psi_n = 0, \quad \sigma = 1 \quad (\text{superfície}) \quad (3.20)$$

Uma vez determinado  $H_n$ , pode-se determinar as equações da estrutura horizontal, definidas por:

$$\frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial \tilde{t}} - \text{sen } \varphi \tilde{v}_n + \frac{\mathcal{G}_n}{\cos \varphi} \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \lambda} = \tilde{R}_n^u, \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}_n}{\partial \tilde{t}} + \text{sen } \varphi \tilde{u}_n + \mathcal{G}_n \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \varphi} = \tilde{R}_n^v, \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \tilde{t}} + \frac{\mathcal{G}_n}{\cos \varphi} \nabla \cdot \vec{V}_n = \tilde{R}_n^h, \quad (3.23)$$

onde:

$$\nabla \cdot \vec{V}_n = \left( \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial \lambda} + \frac{\partial (\tilde{v}_n \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right);$$

$g_n = \frac{(gH_n)^{\frac{1}{2}}}{2\Omega a}$  é uma constante adimensional, que caracteriza a natureza do escoamento horizontal, e representa a razão entre a velocidade de fase da onda de gravidade pura para cada modo vertical  $n$ , e a velocidade linear da superfície terrestre no equador, sendo  $\Omega$  a velocidade angular da Terra;

$$\tilde{u}_n = \frac{u_n}{(gH_n)^{\frac{1}{2}}}; \quad \tilde{v}_n = \frac{v_n}{(gH_n)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{e} \quad \tilde{h}_n = \frac{h_n}{H_n}$$

são as variáveis vento e geopotencial adimensionadas em função da velocidade de fase da onda de gravidade pura e da profundidade equivalente, respectivamente;

- a variável tempo é adimensionada por  $2\Omega$ ;
- os termos não-lineares e forçantes em 3.21-3.23 são expressos por:

$$\tilde{R}_n^u = \frac{R_n^u}{2\Omega}; \quad \tilde{R}_n^v = \frac{R_n^v}{2\Omega} \quad \text{e} \quad \tilde{R}_n^h = \frac{-R_n^h}{2\Omega}.$$

A forma completa destes termos não-lineares pode ser encontrada em Andrade (1994).

Para o caso homogêneo, o valor destas resultantes é nulo, e o sistema de equações governantes torna-se idêntico ao sistema de equações da água rasa linearizadas sobre a esfera, com um estado básico de repouso, cuja solução é  $H_{s,n}^{s,l}(\lambda, \varphi)$  para as auto-funções, e os auto-valores correspondem as frequências associadas aos modos horizontais com  $r$  de 1 a 5. As equações 3.21-3.23 mostram a evolução temporal dos coeficientes de expansão,

enquanto as forçantes (parte não-homogênea) são representadas pelos termos advectivos e pelas contribuições das fontes e sumidouros de energia.

### 3.3.3 – Análise da Partição de Energia entre os Modos Verticais e Horizontais

A análise da partição de energia total entre os modos verticais será realizada para os modos horizontais: Rossby, Kelvin, misto Rossby-gravidade, gravidade leste e oeste, e para todos os modos reunidos. As partes vertical e horizontal desta análise serão baseadas na documentação *NMC Development Division Staff* (1988) e Andrade (1994), respectivamente.

O cálculo da energia cinética ( $Ec_n$ ), da energia potencial disponível ( $Ep_n$ ) e da energia total ( $E_{T_n}$ ), associada a cada modo vertical  $n$ , são obtidas, na forma adimensional, a partir das seguintes equações:

$$Ec_n = \frac{1}{2}(\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2), \quad (3.24)$$

$$Ep_n = \frac{1}{2}(\tilde{h}_n^2), \quad (3.25)$$

$$E_{T_n} = Ec_n + Ep_n, \quad (3.26)$$

As contribuições para a energia total de cada estrutura horizontal, em função do modo vertical, são obtidas por:

$$P_n = \frac{Ec_n + Ep_n}{\sum_{n=0}^N (Ec_n + Ep_n)} \times 100\% \quad (3.27)$$

onde  $N = K - 1$  é o número total de modos verticais considerados, neste caso,  $N = 27$  ou  $N = 41$ .

### 3.3.4 – Partição de Energia no MGCPTEC

Nesta seção são apresentadas as equações da partição de energia entre os modos verticais e horizontais, utilizadas pelo MGCPTEC. A forma discreta das equações do MGCPTEC encontra-se no **Apêndice B**.

#### a) Modos Verticais

Consideremos a função estrutura vertical  $\Psi_{nk}$  e o autovetor da adjunta  $\Psi_{nk}^T$ , para os modos  $n = 1, \dots, N$  e níveis  $k = 1, \dots, K$ , satisfazendo a seguinte relação de ortonormalidade:

$$\sum_{k=1}^K \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m = \delta_{nm}, \quad (3.28)$$

onde  $\gamma_n = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T}$  e  $\delta_{nm}$  é o delta de Kronecker. Essa é a forma discreta da

Equação 3.13 para o modelo do CPTEC (**Apêndice B**). Note que, devido à discretização, surgiu um peso ( $\gamma_m$ ) na relação de ortonormalidade.

A energia cinética para cada nível  $k$  é definida, então, da seguinte forma:

$$Ec_k = \frac{1}{2} \vec{W}_k \cdot \vec{W}_k^T, \quad (3.29)$$

$$\text{com: } \vec{W}_k = \sum_{n=1}^K \vec{W}_n \Psi_{nk} \quad \text{e} \quad \vec{W}_k^T = \sum_{m=1}^K \vec{W}_m \Psi_{mk}^T \gamma_m ,$$

$$\text{onde: } \vec{W}_n = u_n \hat{i} + v_n \hat{j}; \quad u_n = \sqrt{gH_n} \tilde{u}_n; \quad \text{e} \quad v_n = \sqrt{gH_n} \tilde{v}_n .$$

As variáveis  $\tilde{u}_n$  e  $\tilde{v}_n$  são as componentes zonal e meridional do vento adimensionalizadas.

De acordo com as definições acima, a Equação (3.29) pode ser reescrita como:

$$Ec_k = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \sum_{n=1}^K (u_n \hat{i} + v_n \hat{j}) \Psi_{nk} \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^K (u_m \hat{i} + v_m \hat{j}) \Psi_{mk}^T \gamma_m \right] \right\}, \quad (3.30)$$

ou seja,

$$Ec_k = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K g \sqrt{H_n H_m} (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m) \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m , \quad (3.31)$$

A Equação (3.31) acima pode ser decomposta em duas parcelas, uma contendo os termos para o caso em que  $n = m$ , e outra para os termos em que  $n \neq m$ :

$$Ec_k = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K g H_n (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K g \sqrt{H_n H_m} (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m) \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m , \quad (3.32)$$

A Equação (3.32) é a equação da energia cinética dos modos verticais para cada nível  $k$ , composta pela soma da energia cinética de todos os modos verticais  $n$  (1º termo da direita) e pela soma da energia cinética devido às interações entre os diferentes modos verticais (2º termo da direita).

Aplicando-se o somatório em  $k$  à Equação (3.32), temos que a condição de ortonormalidade (3.28) é satisfeita ( $2^{\text{o}}$  membro de (3.32)=0) e obtemos a equação da energia cinética integrada verticalmente para todos os níveis:

$$k \left( Ec = \sum_{k=1}^K Ec_k \right):$$

$$Ec = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K gH_n (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2) = \sum_{n=1}^K Ec_n ,$$

Analogamente, temos que a energia potencial disponível para cada nível  $k$  pode ser definida como:

$$Ep_k = \frac{1}{2} Z_k Z_k^T , \quad (3.34)$$

$$\text{com: } Z_k = \sum_{n=1}^K \frac{gh_n}{\sqrt{gH_n}} \Psi_{nk} \quad \text{e} \quad Z_k^T = \sum_{m=1}^K \frac{gh_m}{\sqrt{gH_m}} \Psi_{mk}^T \gamma_m , \quad (3.35)$$

onde:  $h_n = H_n \tilde{h}_n$  ( $\tilde{h}_n$  é o geopotencial adimensionalizado).

Substituindo (3.35) em (3.34), obtemos:

$$Ep_k = \frac{1}{2} \left[ \left( \sum_{n=1}^K \frac{g\tilde{h}_n}{\sqrt{gH_n}} \Psi_{nk} \right) \left( \sum_{m=1}^K \frac{g\tilde{h}_m}{gH_m} \Psi_{mk}^T \gamma_m \right) \right] , \quad (3.36)$$

ou

$$Ep_k = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K (g \sqrt{H_n H_m} \tilde{h}_n \tilde{h}_m \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m) \quad (3.37)$$

A Equação (3.37) pode, ser decomposta na soma de dois termos, um contendo a soma da energia potencial disponível para todos os modos  $n$ , e outro contendo a soma da energia potencial disponível devido à interação entre os diferentes modos verticais. Assim,

$$Ep_k = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K (gH_n \tilde{h}_n^2) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K (g\sqrt{H_n H_m} \tilde{h}_n \tilde{h}_m) \Psi_{mk} \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.38)$$

Novamente, aplicando-se o somatório em  $k$  à Equação (3.38), temos que a condição de ortonormalidade (3.28) é satisfeita ( $2^{\text{o}}$  membro de (3.38)=0), e obtemos a equação da energia potencial disponível integrada verticalmente para todos os níveis  $k$   $\left( Ep = \sum_{k=1}^K Ep_k \right)$ :

$$Ep = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K (gH_n \tilde{h}_n^2) = \sum_{n=1}^K Ep_n, \quad (3.39)$$

Somando-se as equações (3.32) e (3.38) obtemos a **equação da energia total para os modos verticais em cada nível  $k$**  :

$$E_{T_k} = \sum_{n=1}^K \frac{gH_n}{2} (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2 + \tilde{h}_n^2) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K g\sqrt{H_n H_m} (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m + \tilde{h}_n \tilde{h}_m) \Psi_{mk} \Psi_{mk}^T \gamma_m \quad (3.40)$$

O segundo termo anula-se se somado na vertical e pode ser considerado uma representação da interação local entre os modos verticais.

## b) Modos Horizontais

Para os modos horizontais, a energia cinética é definida para cada modo vertical  $n$  de acordo com a seguinte equação:

$$Ec_n = \frac{gH_n}{2} \vec{W}_n \cdot \vec{W}_n, \quad (3.41)$$

com:

$$\vec{W}_n = \tilde{u}_n \hat{i} + \tilde{v}_n \hat{j} = \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \hat{i} + \tilde{v}_{nr} \hat{j}), \quad (3.42)$$

onde  $r$  descreve os seguintes modos horizontais como citado no item 3.3.1

Desta forma, das equações (3.41) e (3.42) obtemos:

$$Ec_n = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \hat{i} + \tilde{v}_{nr} \hat{j}) \right] \cdot \left[ \sum_{s=1}^5 (\tilde{u}_{ns} \hat{i} + \tilde{v}_{ns} \hat{j}) \right], \quad (3.43)$$

ou

$$Ec_n = \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \sum_{s=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} \tilde{v}_{ns}), \quad (3.44)$$

A Equação (3.44) pode, então, ser decomposta em dois termos, um contendo a soma da energia cinética de todos os modos horizontais  $r$ , para cada nível  $n$ , e outro contendo a soma da energia cinética resultante da interação entre os modos horizontais, para cada nível  $n$ :

$$Ec_n = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} \tilde{v}_{ns}) \right] \quad (3.45)$$

A equação da energia potencial disponível para os modos horizontais é obtida de forma análoga à dedução anterior. Neste caso, temos:

$$Ep_n = \frac{gH_n}{2} \tilde{h}_n^2, \quad (3.46)$$

com:

$$\tilde{h}_n^2 = \sum_{r=1}^5 \tilde{h}_{nr}$$

Segue-se então que:

$$Ep_n = \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \sum_{s=1}^5 (\tilde{h}_{nr} \tilde{h}_{ns}), \quad (3.47)$$

ou

$$Ep_n = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{h}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{h}_{nr} \tilde{h}_{ns}) \right], \quad (3.48)$$

Somando-se as equações (3.45) e (3.48) obtemos a equação da energia total dos modos horizontais para cada modo vertical  $n$ :

$$E_{T_n} = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2 + \tilde{h}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} + \tilde{v}_{ns} + \tilde{h}_{nr} + \tilde{h}_{ns}) \right], \quad (3.49)$$

Considerando a integral sobre a esfera, o segundo termo da Equação (3.49) anula-se, e a equação da energia total torna-se:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{T_n} &= \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E_{T_n} a^2 \cos \varphi d\varphi d\lambda = \\ &= \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2 + \tilde{h}_{nr}^2) a^2 \cos \varphi d\varphi d\lambda = \sum_{r=1}^5 \bar{E}_{T_{nr}} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Então, o segundo termo da equação 3.49 pode ser considerado como a representação da interação local entre os modos horizontais.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**

Serão a seguir avaliados os quatro casos de SSMNVI citados na Tabela 3.1. O caso ocorrido em setembro de 2003 (EXC1), talvez por se tratar de um caso mais recente, foi melhor identificado pelo MGCPTEC, devido à qualidade de dados provenientes do NCEP e de sua maior resolução. Portanto, neste caso, serão analisados todos os estágios de SSMNVI (formação, amadurecimento e dissipação) para os dois esquemas de convecção profunda tipo Kuo e RAS opcionais no MGCPTEC. Nos outros três casos serão analisados somente os estágios maduros, para restringir o grande número de figuras geradas.

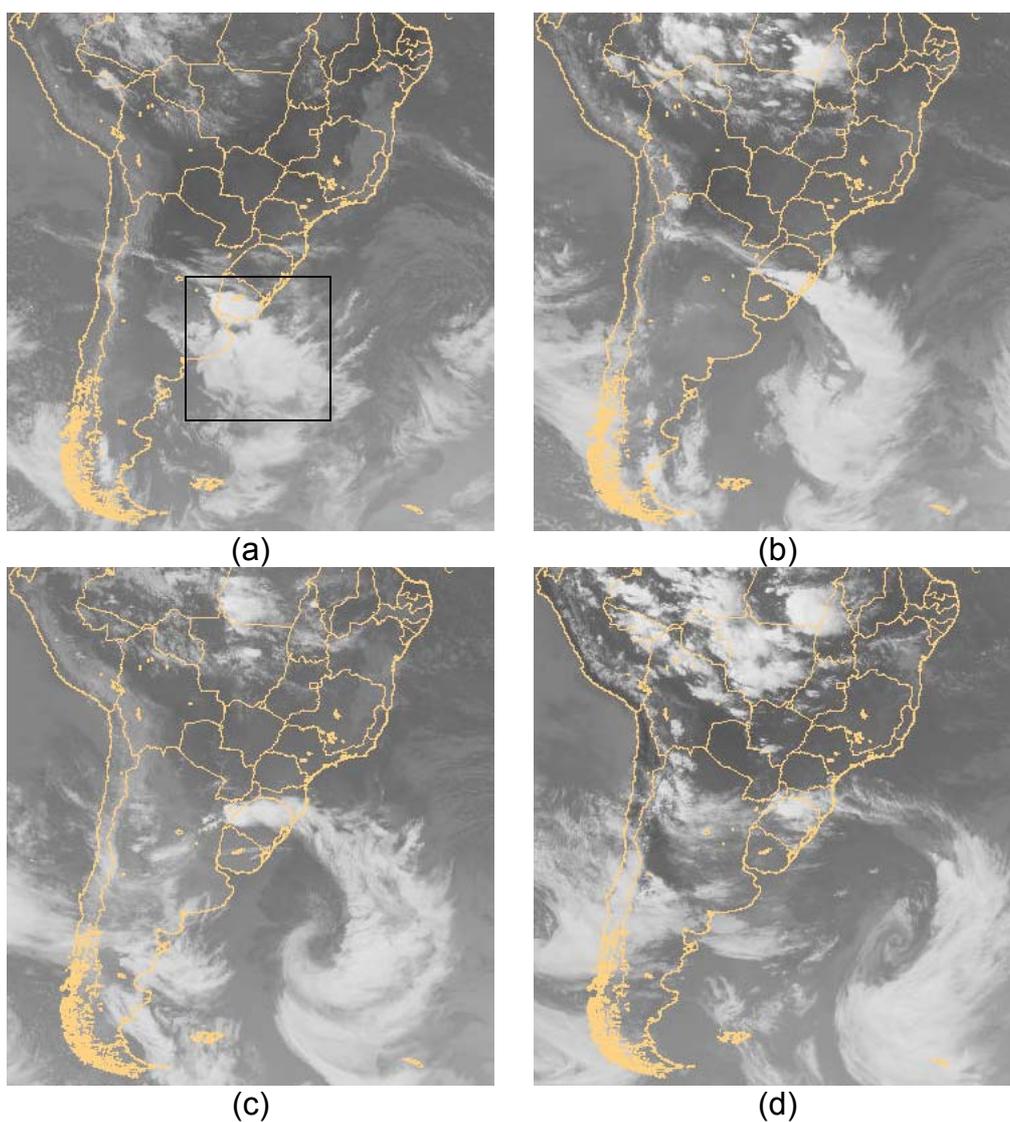
Nas seções seguintes, não será dada muita ênfase a análises profundas sobre ocorrência de SSMNVI. O objetivo principal deste trabalho é verificar a capacidade do MGCPTEC para as resoluções T126L28 e T170L42 em simular esses sistemas e sua partição modal de energia. Existem estudos observacionais realizados mais detalhadamente para os casos ocorridos em abril de 1979 (EC2) e agosto de 1989 (EC3). Maiores informações encontram-se, respectivamente, em Bonatti e Rao (1987) e Hallak (2000).

#### **4.1 – Análise das imagens do satélite GOES para os quatro casos de SSMNVI**

##### **a) Caso setembro de 2003**

A Figura 4.1 expõe a seqüência das imagens do satélite GOES no canal infravermelho, entre 00Z do dia 19 de setembro de 2003 e 00Z de 21 de setembro de 2003. A Figura 4.1 (a) mostra a frente fria sobre o Oceano Atlântico e o estágio inicial de formação de SSMNVI, ao sul do Uruguai e a leste da Argentina. Acompanhando-se as imagens, as Figuras seguintes 4.1 (b)

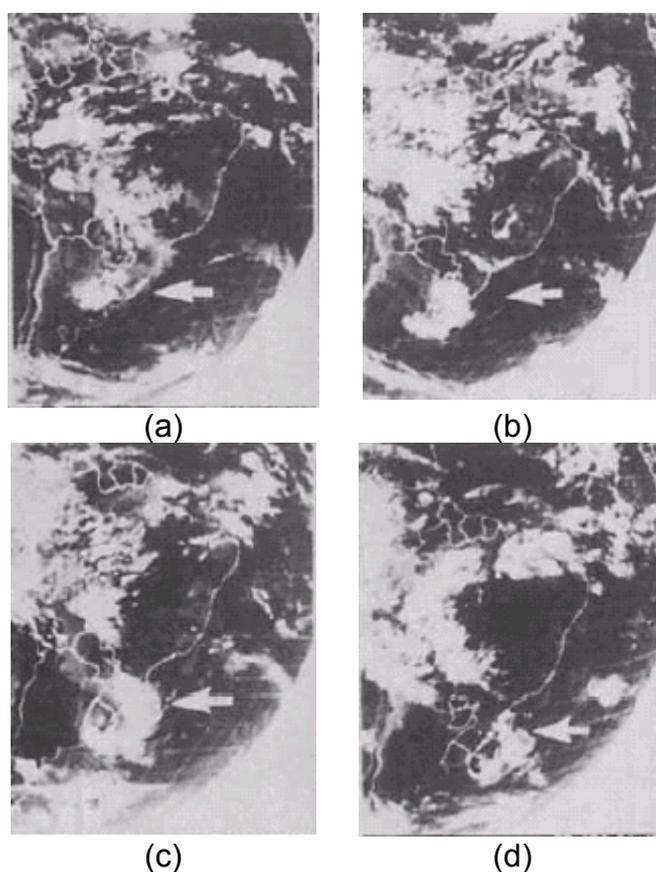
e (c) mostram o amadurecimento e deslocamento desse sistema para o mar, adquirindo o formato de vírgula invertida e, por último, 4.1 (d) exibe o estágio de dissipação desse sistema sobre o oceano, adquirindo características muito semelhantes de uma frente fria.



**FIGURA 4.1** – Seqüência de imagens do satélite GOES no canal infravermelho para 19/09/2003 – 12Z (a); 20/09/2003 – 00Z (b), 12Z (c) e 21/09/2003 – 00Z (d).

## b) Caso abril de 1979

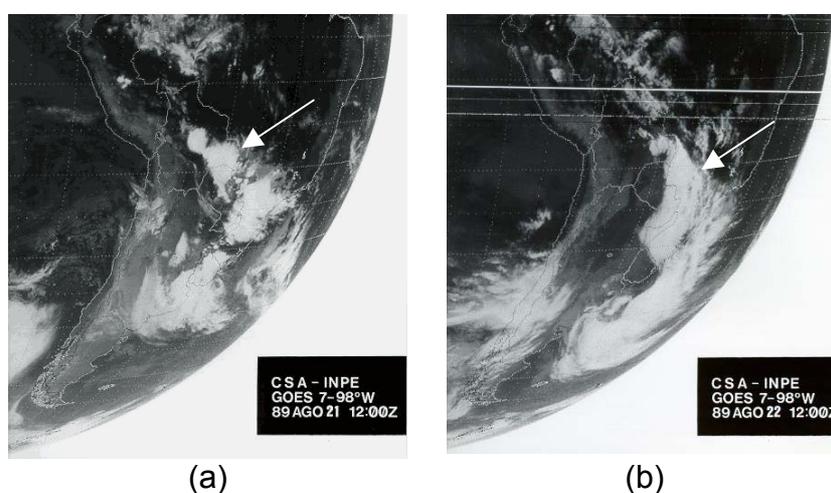
O desenvolvimento de um SSMNVI pode ser observado na Figura 4.2. O sistema teve seu início sobre o Uruguai e nordeste da Argentina, às 12Z do dia 14 de abril de 1979, Figura 4.2 (a). As Figuras 4.2 (b) e (c) mostram que o sistema se deslocou para sudeste da posição inicial em direção ao oceano, e adquiriu o padrão maduro de vírgula invertida, cobrindo o sul do Brasil e do Uruguai, Figura 4.2 (c). Na Figura 4.2 (d), o sistema está se dissipando sobre o oceano.



**FIGURA 4.2** – Seqüência de imagens infravermelhas do satélite GOES oeste para o período de 14-16 de abril de 1979. (a) 14/04/1979 – 12Z; (b) 15/04/1979 – 00Z; (c) 15/04/1979 – 12Z e (d) 16/04/1979 – 00Z.

### c) Caso agosto de 1989

Para o caso ocorrido entre 21-23 de agosto de 1989, a Figura 4.3 (a) mostra dois sistemas de nuvens distintos em latitudes médias. Um deles, em estágio de decaimento no Oceano Atlântico, deixa atrás de si uma área de instabilidade com atividade aparentemente convectiva no Paraguai e sul do Brasil. O segundo sistema apresenta-se em estágio de intensificação sobre o leste da Argentina. Às 12Z do dia 22 de agosto, figura 4.3 (b), um vórtice embebido na massa de ar frio apresenta-se já bem desenvolvido no Paraguai, nordeste da Argentina e sul do Brasil, com características padrão de nuvem vírgula invertida já em seu estágio maduro. A Figura 4.3 (c) exibe um estágio de decaimento do sistema às 00Z do dia 23 de agosto, adquirindo características de uma frente fria bem intensa.



**FIGURA 4.3** – Seqüência de imagens do satélite GOES-7 no canal infravermelho para 21-23 de agosto de 1989. (a) 21/08/1989 – 12Z; (b) 22/08/1989 – 12Z e (c) 23/08/1989 – 00Z.  
(continua)

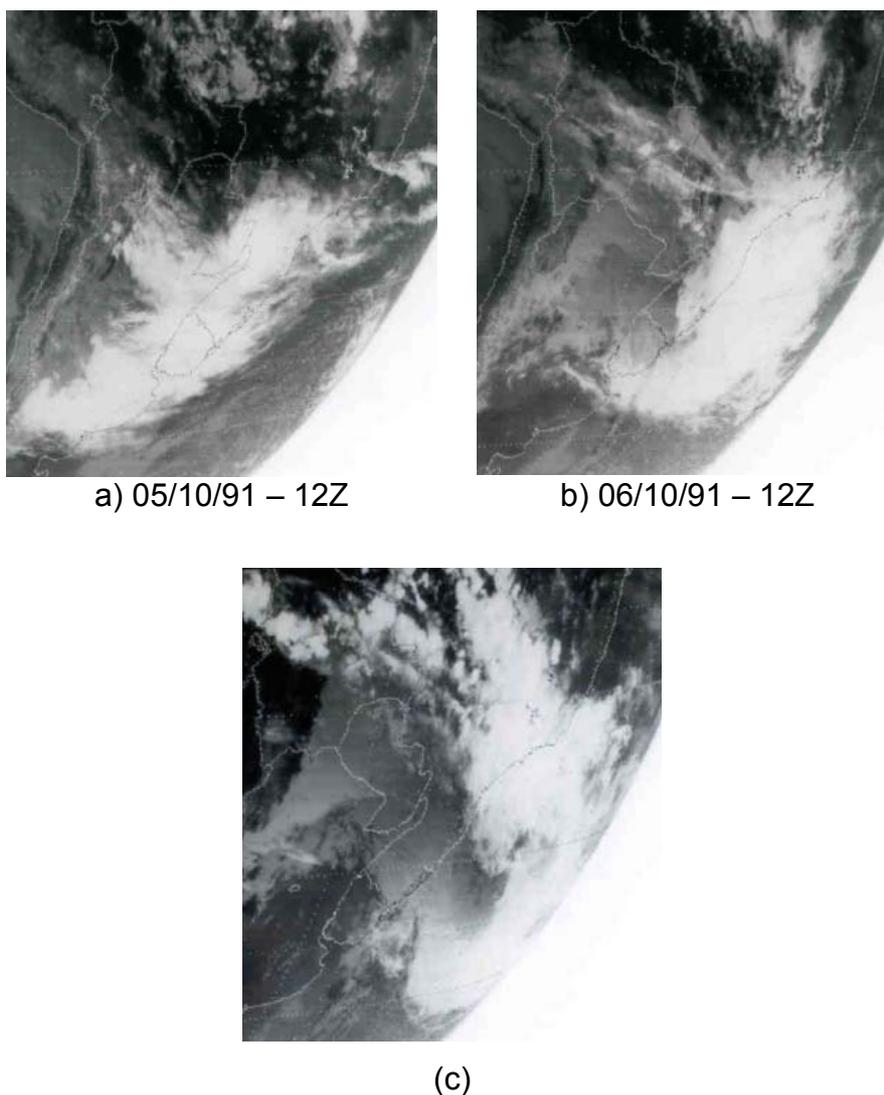


(c)

**FIGURA 4.3 – Conclusão.**

**d) Caso outubro de 1991**

Os estágios de desenvolvimento e amadurecimento de um SSMNVI (Figuras 4.4 (a) e (b)), cobrindo grande parte do sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina, mostram o sistema deslocando-se para sudeste em direção ao oceano. A Figura 4.4 (c) mostra o início de dissipação desse sistema sobre o oceano, adquirindo características de uma frente fria.



**FIGURA 4.4** – Seqüência de imagens do satélite GOES-7 no canal infravermelho para 05-07 de outubro de 1991. (a) 05/10/1991 – 12Z; (b) 06/10/1991 – 12Z e (c) 07/10/1991 – 00Z.

#### **4.2 - Avaliação do MGCPTEC em simular SSMNVI**

Serão analisados alguns resultados utilizando as análises do NCEP (T126L28 e T170L42) e as reanálises do ECMWF (T106K17), para quatro eventos de ocorrência de SSMNVI associada, descritos na Tabela 3.1 com o intuito de verificar a capacidade do MGCPTEC em simular SSMNVI.

#### **4.2.1 – Experimento EXC1, EXP5 e EXP6**

O Experimento de Controle 1 (EXC1) utilizou dados das análises do NCEP, que estavam na resolução T254L64, e foram recompostos na grade correspondente ao T126L28 e T170L42, para questão de comparação com a rodada do MGCPTEC, utilizando o esquema de convecção profunda tipo Kuo (EXP5) e RAS (EXP6). Foi executada uma rodada do MGCPTEC nas resoluções T126L28 e T170L42, a partir do dia 18/09/2003, 00Z até o dia 22/09/2003 - 00Z com condições iniciais derivadas das análises do NCEP para esta data. Todas as Figuras foram geradas no domínio horizontal de 70° W a 25° W e 50° S a 15° S.

#### **4.2.2 – Campos Observados EXC1, EXP5 e EXP6**

São aqui discutidas características observadas obtidas através das análises do NCEP e da rodada do MGCPTEC para as resoluções T126L28 e T170L42. Para o campo de precipitação, será utilizada a análise do GPCP.

As análises do campo de precipitação (GPCP), acumuladas em 24 horas, são válidas somente para as 00Z de cada dia. Como o SSMNVI se inicia às 06Z do dia 19 de setembro e não foi identificada pela análise do GPCP, a Figura 4.5 mostra a precipitação acumulada em 6 horas, simulada pelo MGCPTEC para as resoluções T126L28 (a) e (c), e T170L42 (b) e (d), respectivamente para os esquemas de convecção profunda tipo Kuo e RAS.

Nota-se a existência de uma frente fria (Figura 4.5 (a) a (d)) em concordância com as imagens de satélite da Figura 4.1, estendendo-se para o oceano, melhor definida e localizada pelo modelo que utilizou o esquema de convecção tipo RAS; no norte da Argentina e oeste do Uruguai (a) e (b) (quadrículo) há o início da formação do SSMNVI, identificado por ambas as resoluções que utilizaram o esquema Kuo, mas com maior intensidade pelo modelo T170L42.

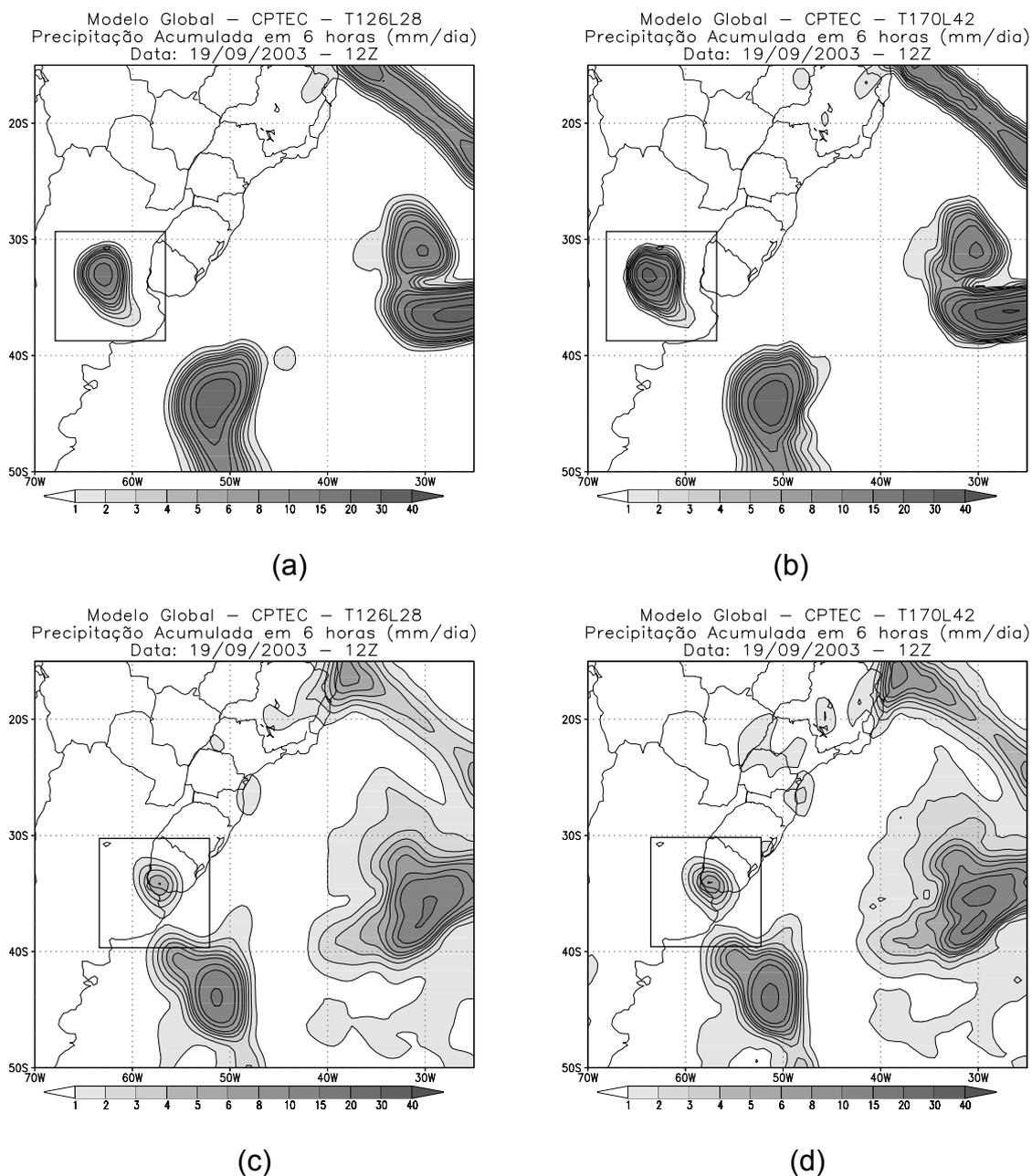
Para o esquema RAS (c) e (d), o modelo identificou a formação do SSMNVI, um pouco mais adiantado (ao sul do Uruguai) em relação ao esquema Kuo, ligeiramente mais intenso e melhor definido para a alta resolução do T170L42, principalmente sobre a grande área do oceano, onde a frente está localizada.

A precipitação acumulada durante 24 horas, válidas para 00Z de cada dia, o que corresponde ao período de assimilação, dos três experimentos (EC1, EXP5 e EXP6) que estão representadas nas Figuras 4.6 (a)-(e) e 4.7 (a)-(e). Para o dia 20/09/2003 - 00Z (Figura 4.6) é possível observar a formação do SSMNVI simulada pelo Modelo para os dois tipos de convecção. Na Figura 4.6 (a) e (b) o esquema de convecção utilizado é do tipo Kuo; (c) e (d) RAS e (e) análise do GPCP.

Pela análise do GPCP (Figura 4.6 (e)), pode-se observar a formação do SSMNVI em seu estágio maduro, com forte precipitação sobre o sul do Brasil e Uruguai, estendendo-se para o oceano. Nas simulações feitas pelo MGCPTec, ambos identificaram o SSMNVI em seu estágio maduro, mas o núcleo de precipitação na região em que ocorre o sistema simulado pelo EXP5 (Figura 4.6 (a) e (b)), localiza-se um pouco mais ao sul do Uruguai, deslocando-se para sudeste de sua posição inicial e ligeiramente mais intenso sobre o Uruguai, um pouco diferente em forma do que mostra a análise do GPCP, mas em boa concordância. No EXP6 (Figura 4.6 (c) e (d)), a região onde ocorre o SSMNVI mostra uma faixa de precipitação que se estende desde o sul do Paraguai, passando pelo sul do Brasil e leste do Uruguai, formando um grande núcleo intenso de precipitação sobre o oceano, para a resolução T126L28 (Figura 4.6 (c)). Já no modelo T170L42 (Figura 4.6 (d)), o núcleo de precipitação se mostra melhor definido e ligeiramente mais intenso, indo desde o sul do Brasil, passando pelo Uruguai e se estendendo ao oceano. Em relação aos esquemas de convecção utilizados pelo modelo, o que usou o esquema de convecção tipo Kuo para ambas resoluções, mas um pouco melhor para o T170L42, mostrou uma melhor concordância com a análise do GPCP para o estágio maduro

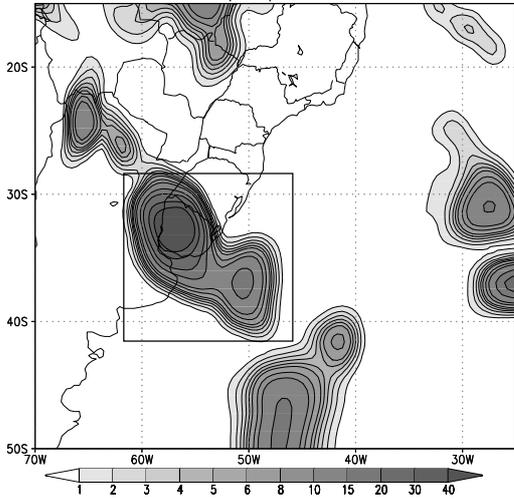
(Figura 4.6), onde o núcleo de precipitação, referente ao estágio maduro do SSMNVI, se encontra um pouco mais ao sul do que a análise.

Para os estágios de dissipação do SSMNVI (Figura 4.7), o sistema deslocou-se para o oceano, diminuindo a precipitação na região de ocorrência. Para os modelos com esquema Kuo (a) - (b) e RAS (c) - (d), o sistema deslocou-se para o sudeste de sua posição inicial, com boa concordância em relação às imagens do Satélite GOES (Figura 4.1). Vale ressaltar, que durante o estágio de dissipação do SSMNVI, o modelo conseguiu identificar núcleos de precipitação nas regiões do Paraná e Santa Catarina (quadrículo), muito bem assimilados e localizados por ambos esquemas de convecção e resolução do MGCPTEC, mas em melhor concordância para a resolução T170L42.



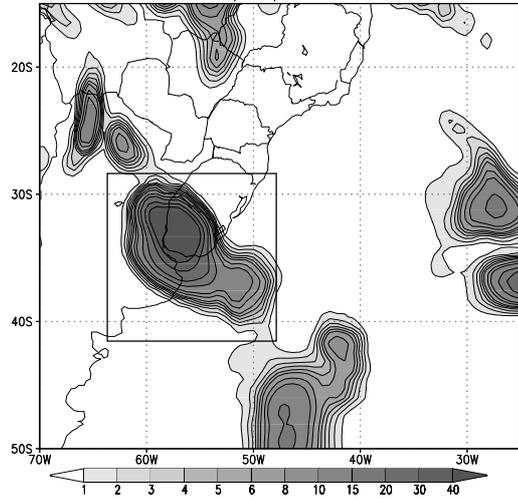
**FIGURA 4.5** – Precipitação acumulada em 6 horas para o dia 19 de setembro de 2003, 12Z. (a) T126L28 e (b) T170L42 Esquema de convecção tipo Kuo; (c) T126L28 e (d) T170L42 com esquema de convecção RAS. O quadrículo representa a localização do SSMNVI.

Modelo Global – CPTEC – T126L28  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 20/09/2003 – 00Z



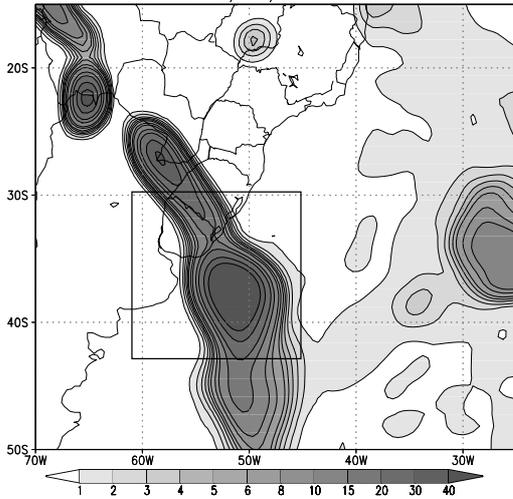
(a)

Modelo Global – CPTEC – T170L42  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 20/09/2003 – 00Z



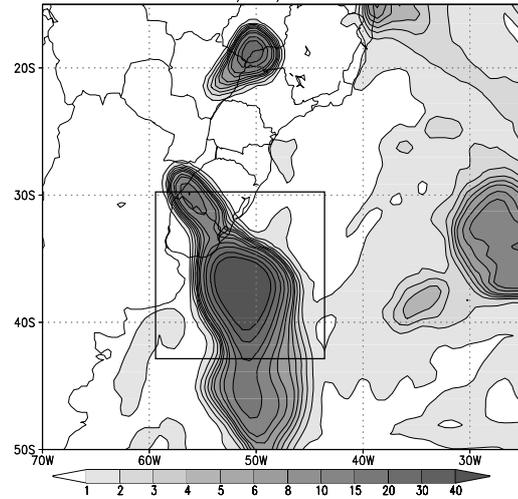
(b)

Modelo Global – CPTEC – T126L28  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 20/09/2003 – 00Z



(c)

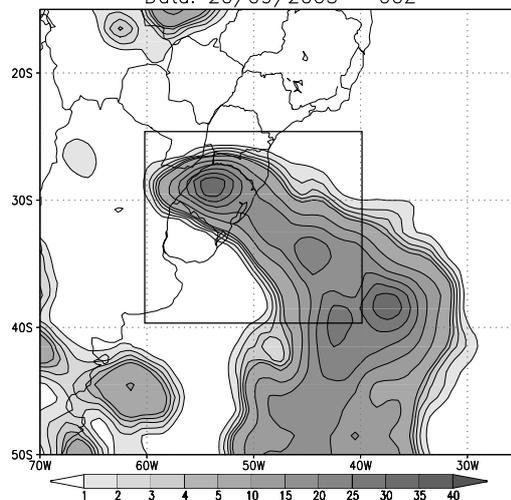
Modelo Global – CPTEC – T170L42  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 20/09/2003 – 00Z



(d)

**FIGURA 4.6** – Precipitação acumulada em 24 horas para o dia 20 de setembro de 2003, 00Z. (a) T126L28 e (b) T170L42 Kuo; (c) T126L28 e (d) T170L42 RAS; e (e) Análise GPCP. (continua)

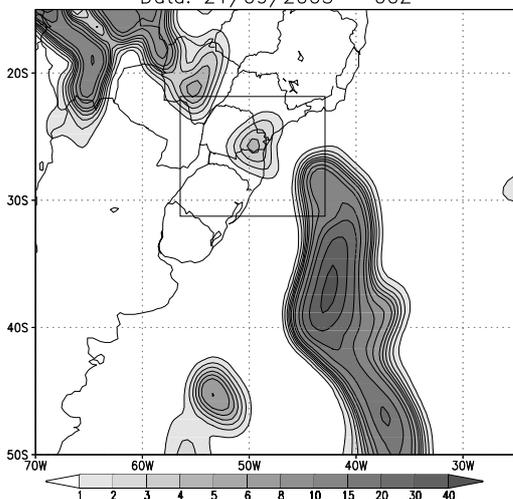
Análise GPCP  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 20/09/2003 - 00Z



(e)

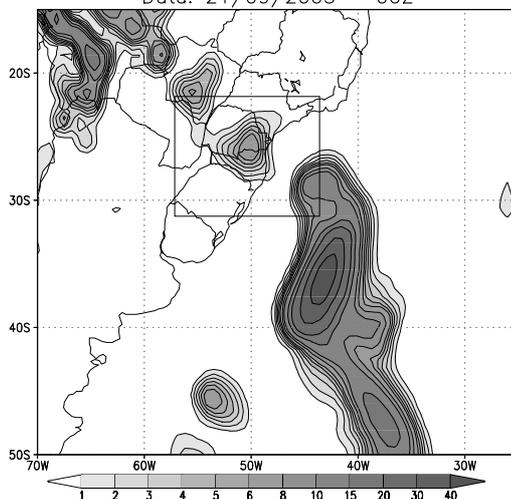
**FIGURA 4.6 – Conclusão.**

Modelo Global – CPTEC – T126L28  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 21/09/2003 - 00Z



(a)

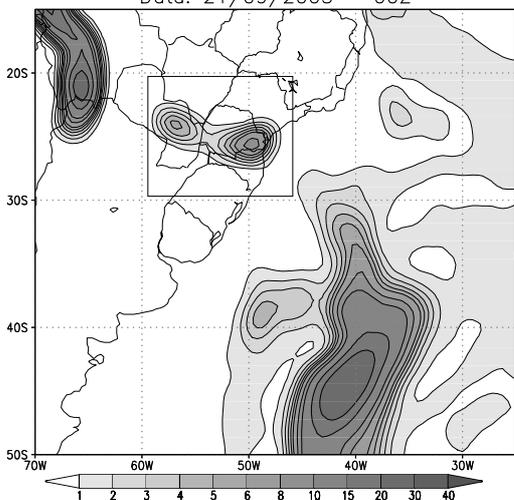
Modelo Global – CPTEC – T170L42  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 21/09/2003 - 00Z



(b)

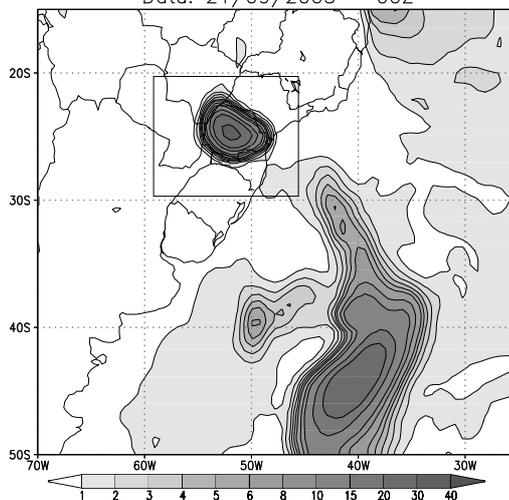
**FIGURA 4.7 – Idem Figura 4.6, exceto que para o dia 21 de setembro de 2003, 00Z. (continua)**

Modelo Global – CPTEC – T126L28  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 21/09/2003 – 00Z



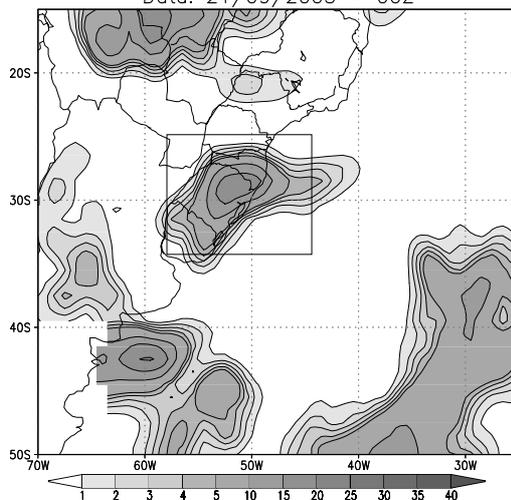
(d)

Modelo Global – CPTEC – T170L42  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 21/09/2003 – 00Z



(e)

Análise GPCP  
Precipitação Acumulada em 24 horas (mm/dia)  
Data: 21/09/2003 – 00Z

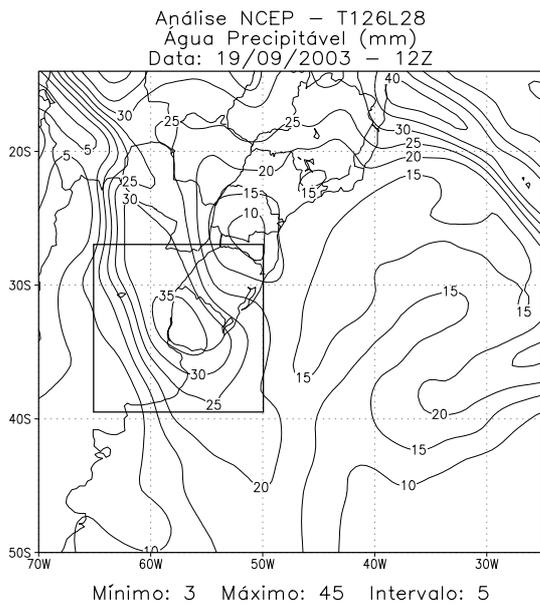


(e)

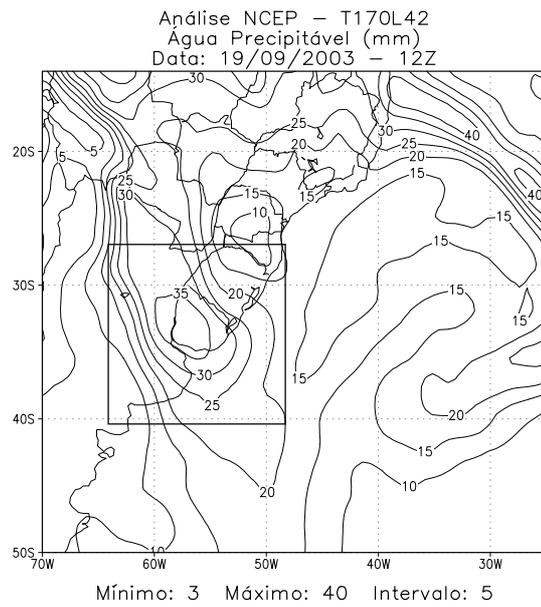
**FIGURA 4.7 – Conclusão.**

Como os dados de análise do NCEP não contêm campos de precipitação, nas Figuras de 4.8 a 4.10 são mostrados os campos de água precipitável para os dias 19 - 21 de setembro de 2003. Em todos os conjuntos das Figuras de 4.8 a 4.10 (a) e (b) da análise do NCEP, não há diferenças significativas, à medida que a resolução aumenta, o que mostra que este campo não é muito influenciado pela resolução vertical, dado que a umidade específica é mais confinada em baixos níveis.

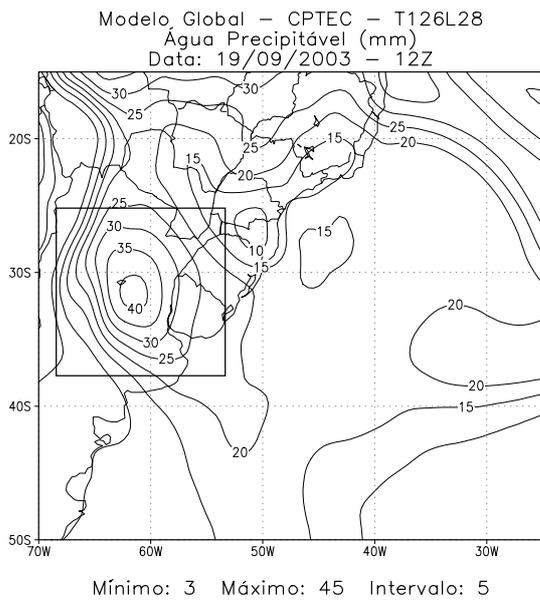
O campo de água precipitável ajuda na definição da localização da frente fria precursora do SSMNVI e são claramente notados núcleos na região de desenvolvimento do SSMNVI (Figura 4.8 (a) e (b)). Essas Figuras mostram que há uma região relativamente úmida na região de origem do SSMNVI. A Figura 4.8 (c) e (d) simulada pelo modelo, consegue localizar muito bem a frente fria precursora do SSMNVI e identifica a região de formação da nuvem vírgula um pouco atrasada (mais ao oeste do Uruguai e sul do Brasil) - comparada com a análise do NCEP. Já a simulação do modelo que usou o esquema de convecção tipo RAS (Figuras 4.8 (e) e (f)), tanto a frente precursora como a região úmida no local da formação do SSMNVI, estão bem mais próximas da análise do que as simuladas pelo esquema de convecção tipo Kuo. As Figuras seguintes, 4.9 a 4.10, mostram os estágios de amadurecimento (deslocando-se para o oceano) e dissipação do SSMNVI, em boa concordância com a análise e bem localizada pelo MGCPTEC, com uma propagação para sudeste um pouco mais lenta, simulada pelo modelo que usou o esquema de convecção tipo Kuo, mas melhor identificada pelo modelo que usou o esquema de convecção RAS.



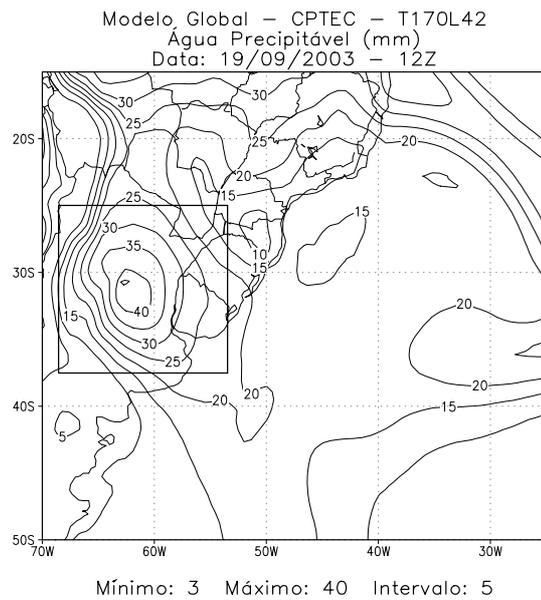
(a)



(b)

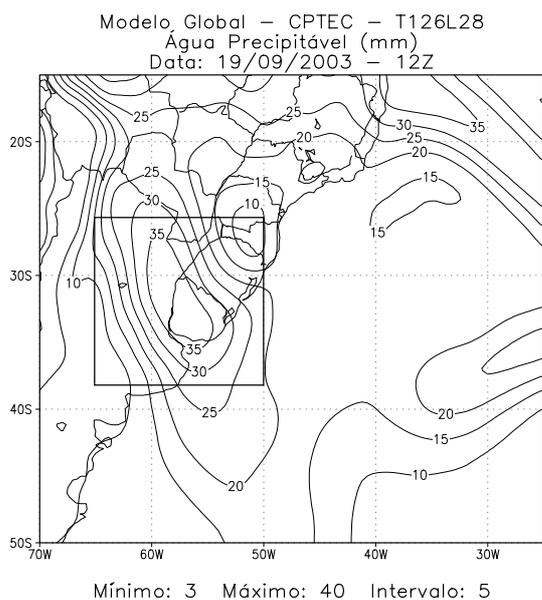


(c)

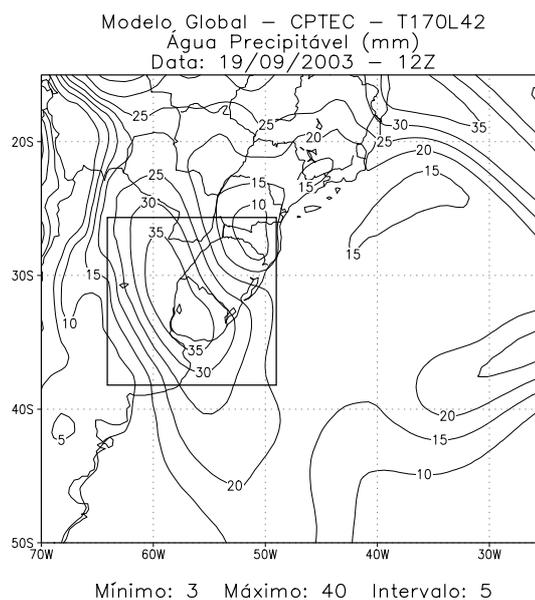


(d)

**FIGURA 4.8** - Água precipitável para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. Intervalos 3 a 45 mm. (continua)

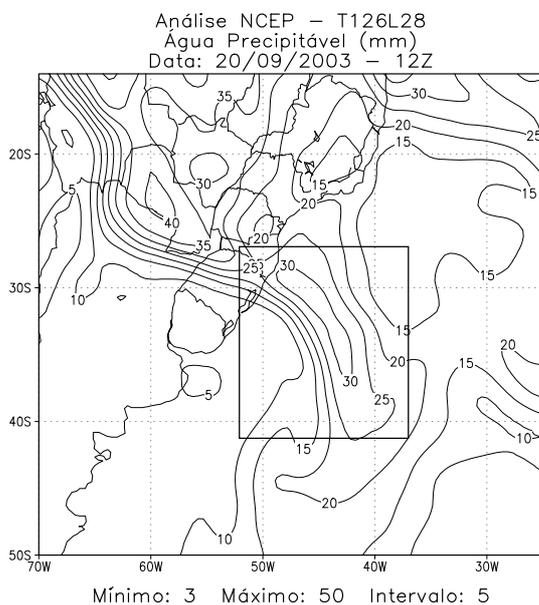


(e)

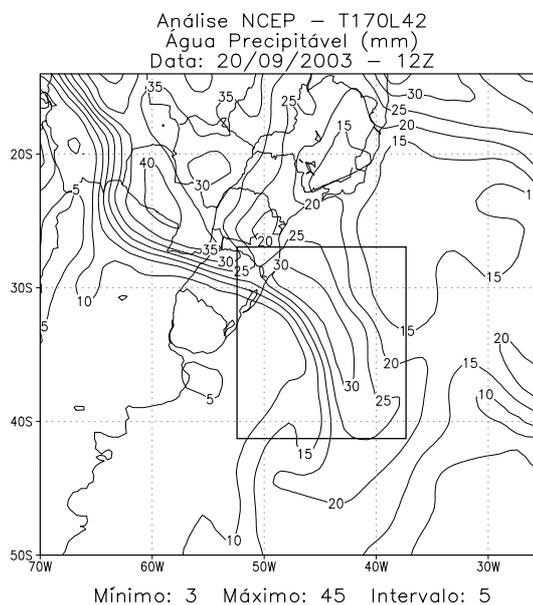


(f)

**FIGURA 4.8 – Conclusão.**



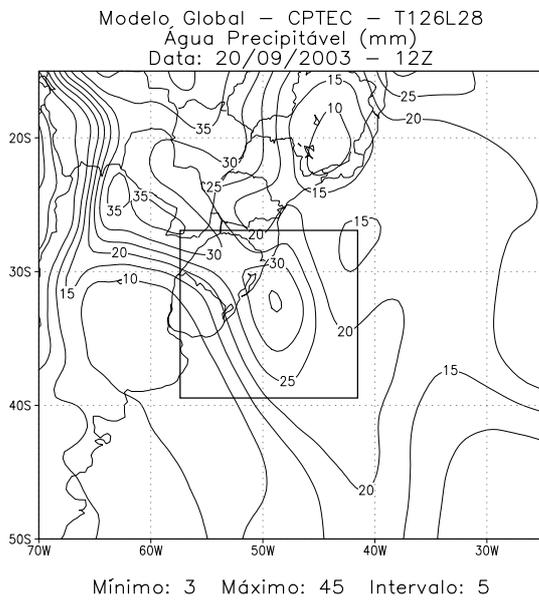
(a)



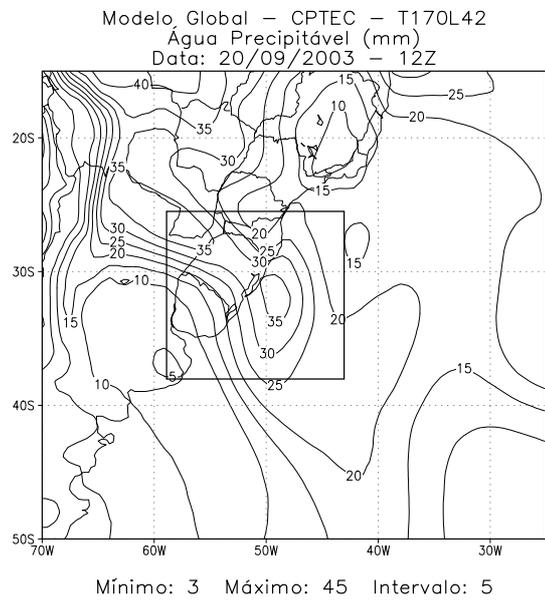
(b)

**FIGURA 4.9 - Idem Figura 4.8, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.**

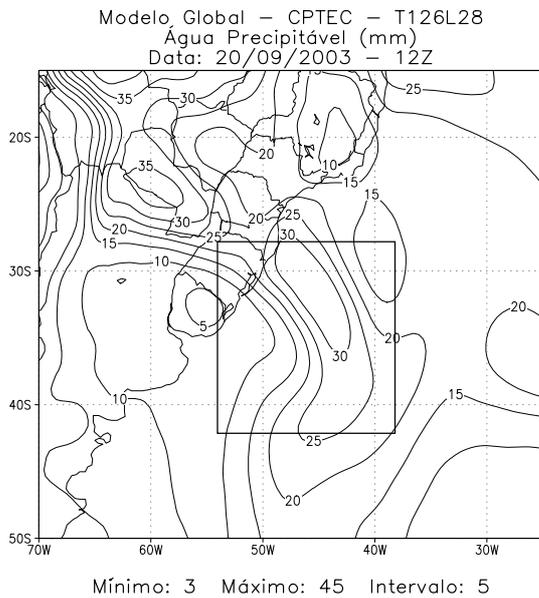
(continua).



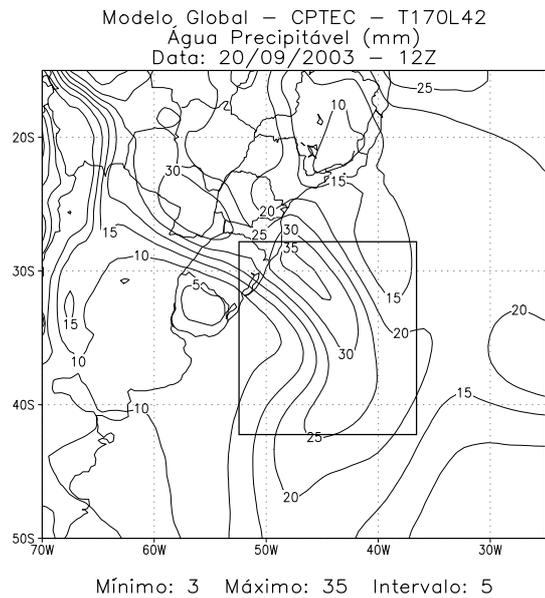
(c)



(d)

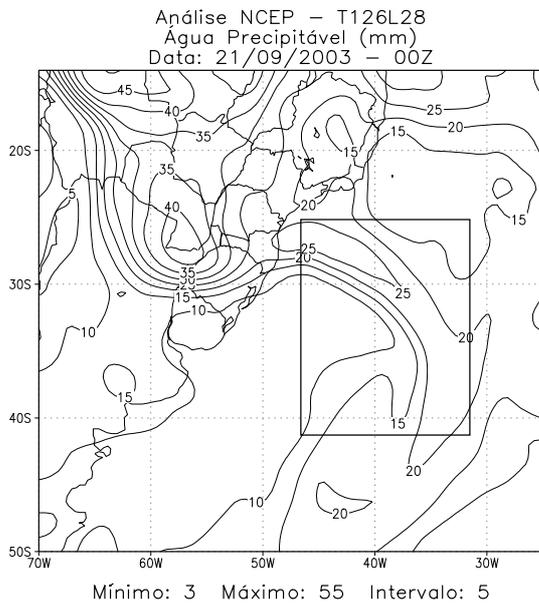


(e)

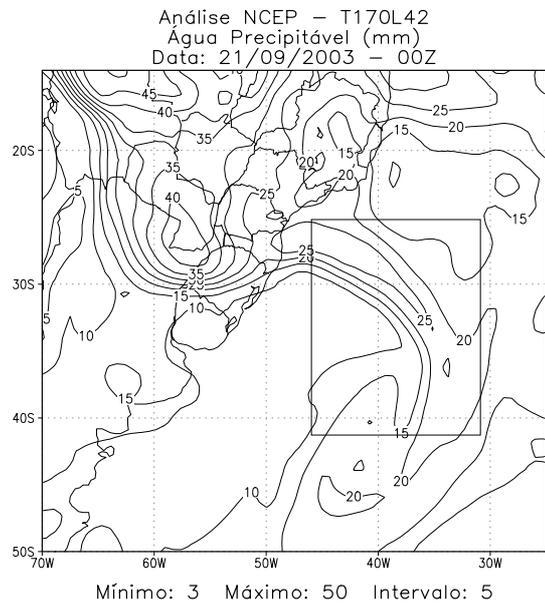


(f)

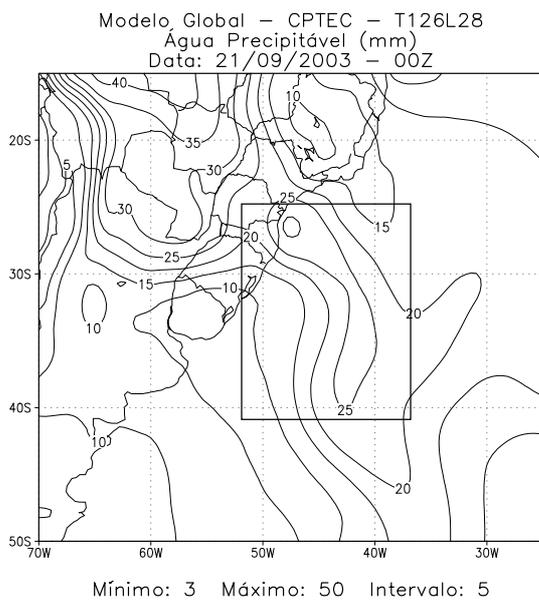
**FIGURA 4.9 – Conclusão.**



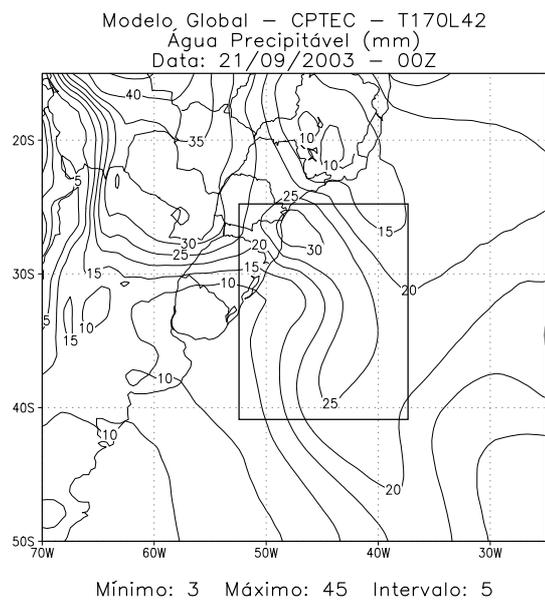
(a)



(b)

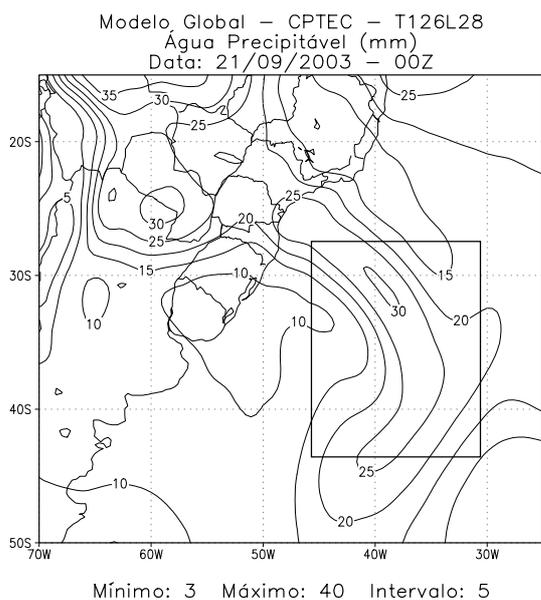


(c)

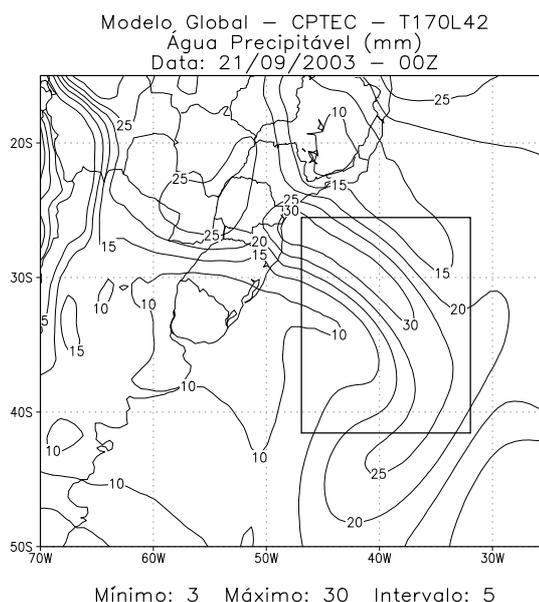


(d)

**FIGURA 4.10** – Idem Figura 4.8, exceto que para o dia 21 de setembro de 2003, 00Z. (continua).



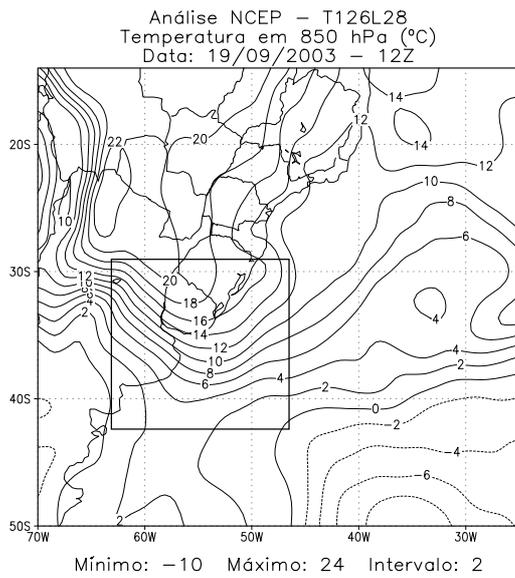
(e)



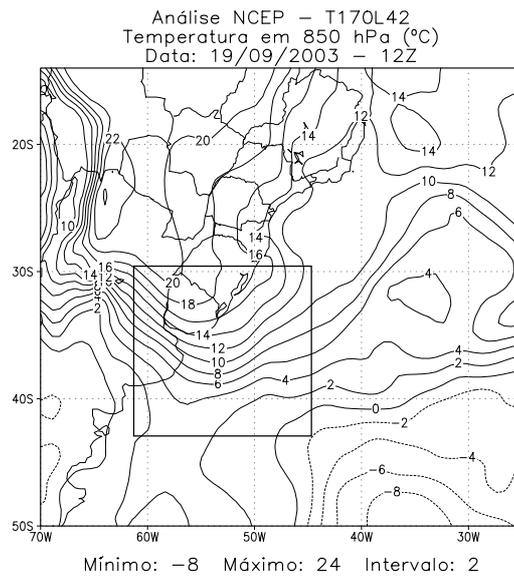
(f)

**FIGURA 4.10 – Conclusão.**

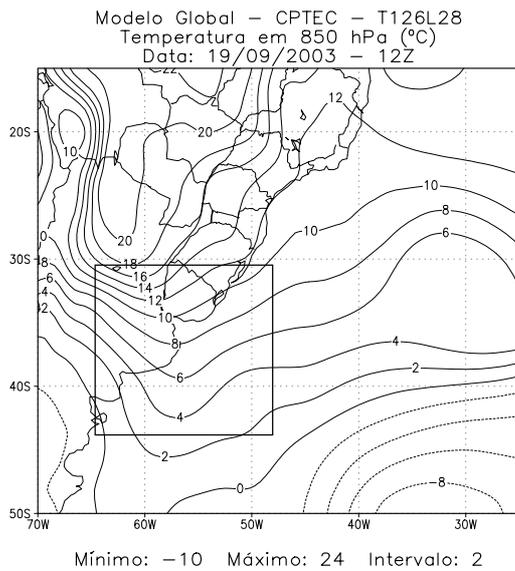
O campo de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), em 850 hPa, é analisado nas Figuras 4.11 e 4.12. Nota-se claramente a frente fria precursora nas figuras 4.11 ((a) e (b)) durante o estágio inicial do SSMNVI (19/09 -12Z), onde a região de formação desse sistema (quadrículo) possui temperaturas relativamente altas. Não há grandes diferenças entre as simulações do modelo, tanto para o T126L28 como para o T170L42, em ambos esquemas de convecção (Figuras 4.11 (c) a (f)). Para o estágio maduro (Figuras 4.12 (a) a (f)), pode-se observar tanto para a análise como para as simulações do modelo, o surgimento de fortes gradientes de temperatura na região do SSMNVI, bem identificadas pelo modelo e sem grandes diferenças para as diferentes resoluções.



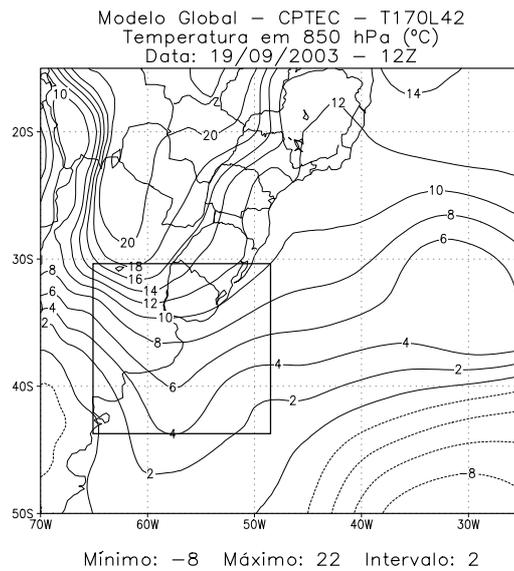
(a)



(b)

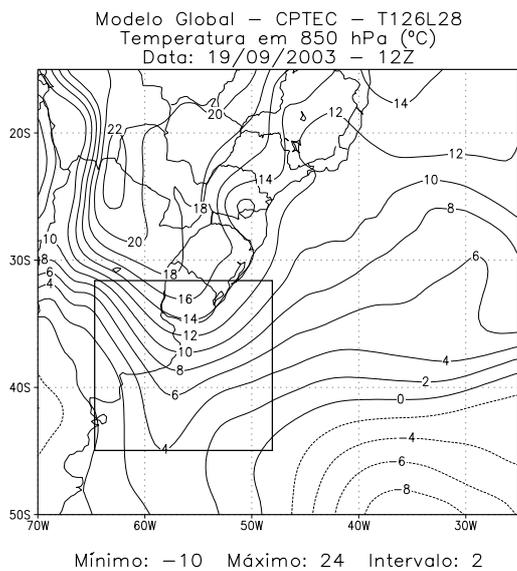


(c)

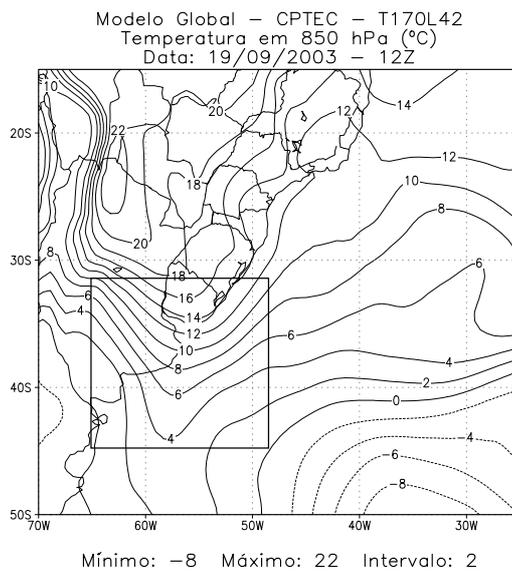


(d)

**FIGURA 4.11** - Temperatura (°C) em 850 hPa para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua).

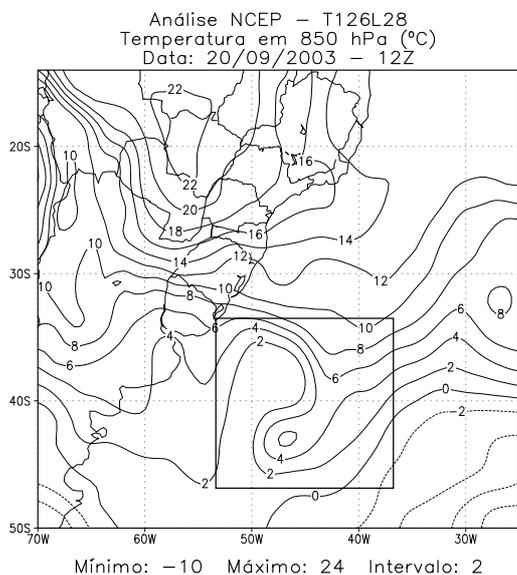


(e)

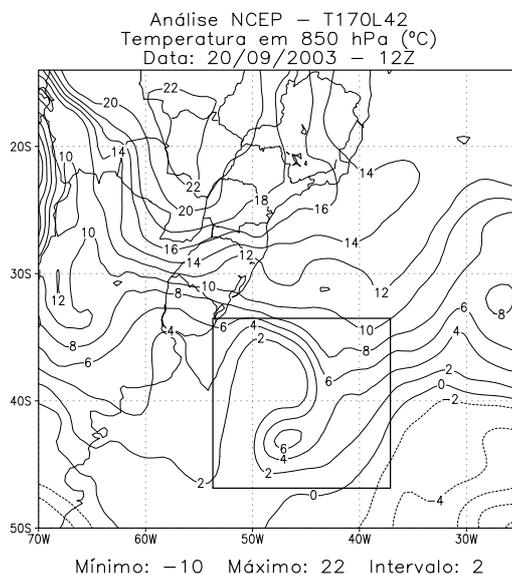


(f)

**FIGURA 4.11 - Conclusão.**



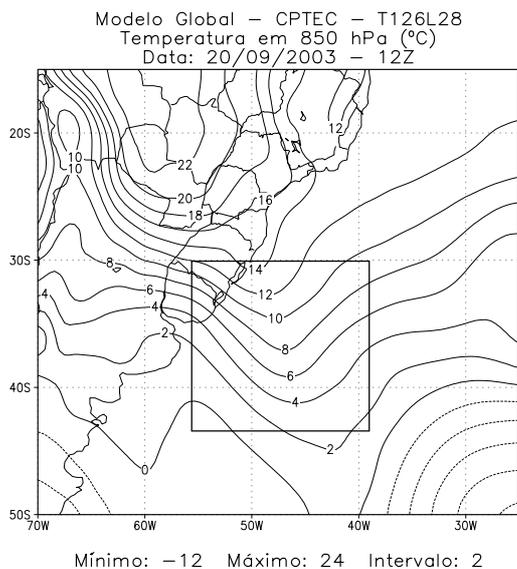
(a)



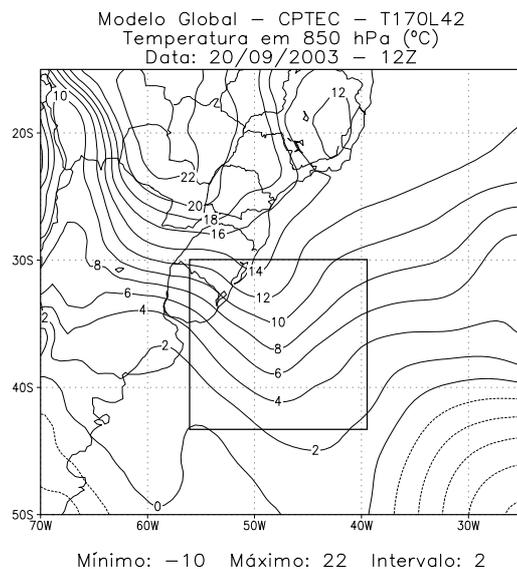
(b)

**FIGURA 4.12 - Idem Figura 4.11, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.**

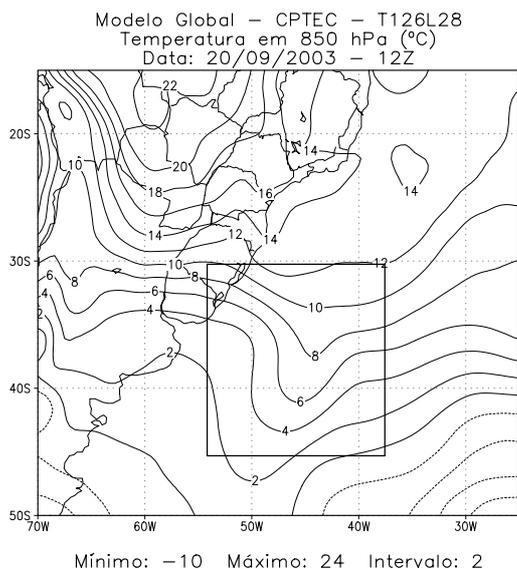
(continua).



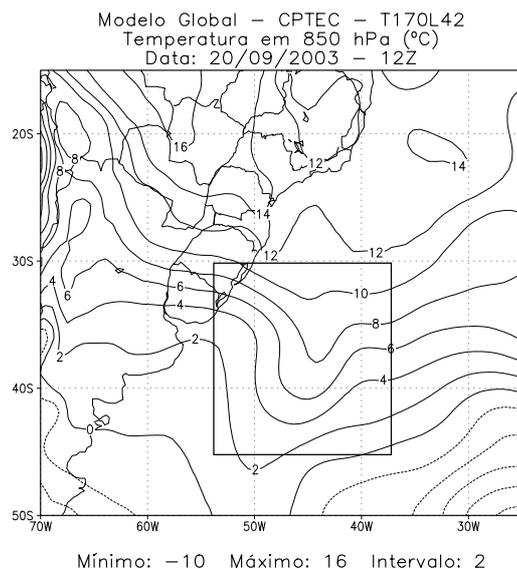
(c)



(d)



(e)

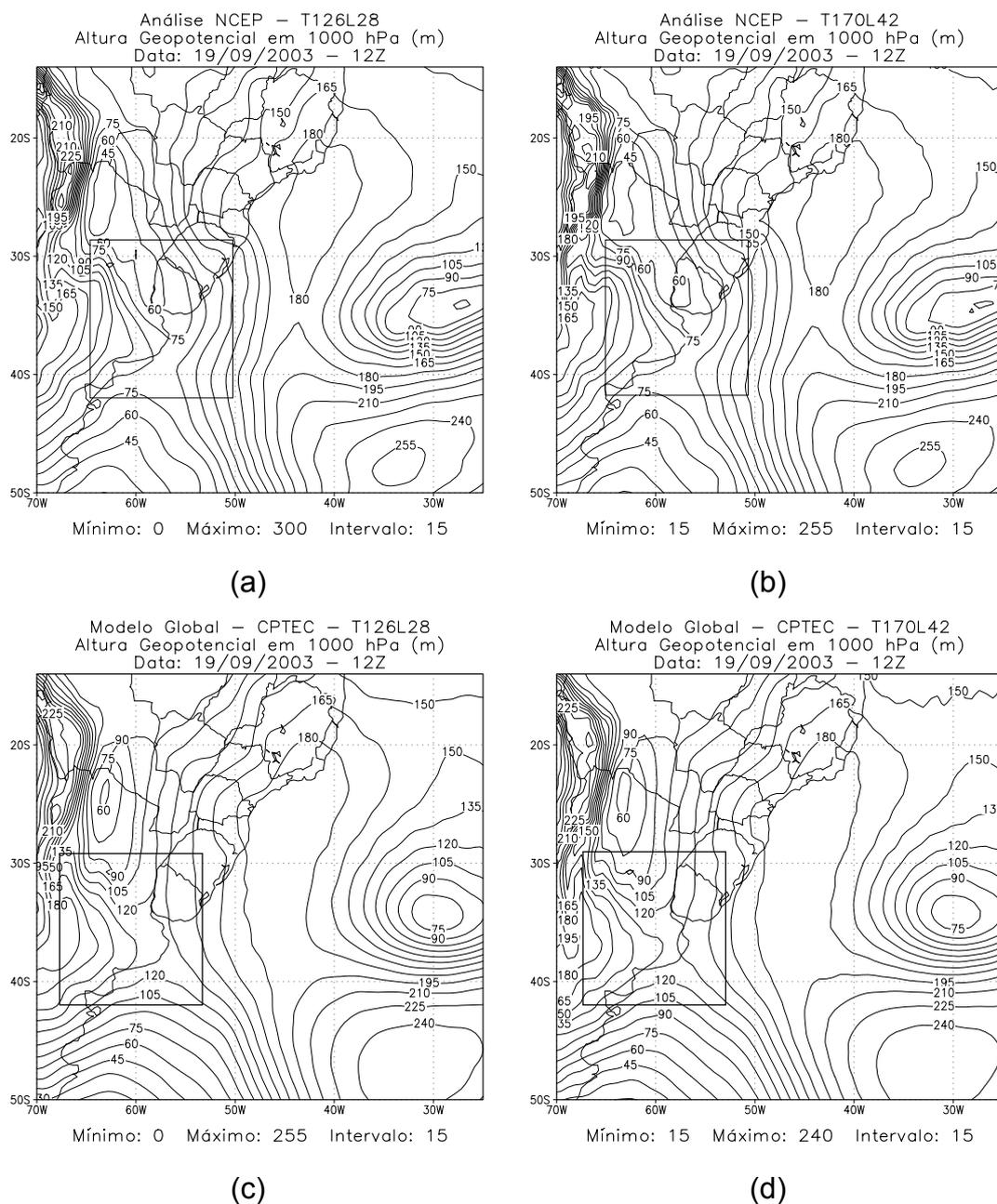


(f)

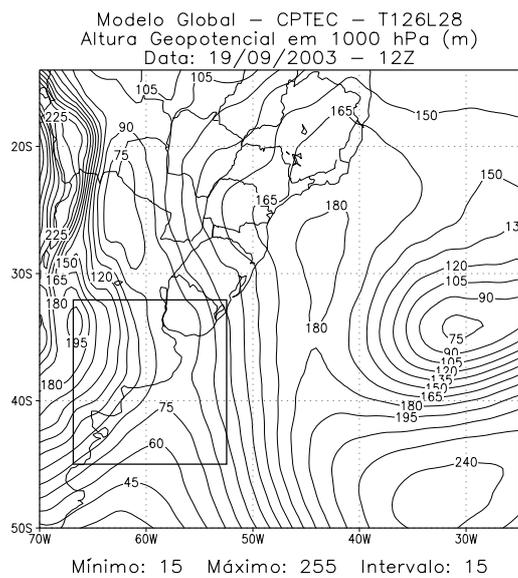
FIGURA 4.12 - Conclusão.

Pela análise do NCEP (Figura 4.13 (a) e (b)), pode-se observar o campo da altura geopotencial em 1000 hPa, para o dia 19 de setembro 12Z (estágio inicial), onde há o surgimento de um cavado de onda curta sobre o cavado de escala sinótica, localizado sobre o Uruguai e deslocando-se para sudeste em direção ao oceano, onde se iniciou a convecção dando origem ao SSMNVI. Para o mesmo período, o modelo que utilizou o esquema de convecção tipo Kuo (Figura 4.13 (c) e (d)), a origem do SSMNVI se encontra mais ao norte da Argentina, próximo ao Paraguai, deslocando-se para sudeste relativamente mais lento que observado pela análise do NCEP. Já para a simulação feita pelo modelo que utilizou o esquema de convecção tipo RAS (Figura 4.13 (e) e (f)), também se pode observar a inclinação para sudoeste do eixo do cavado, próximo à região de formação do SSMNVI. O cavado no litoral do Rio Grande do Sul não foi reproduzido pelo MGCPTEC – Kuo (c e d). O esquema RAS (e e f) produz um cavado muito enfraquecido.

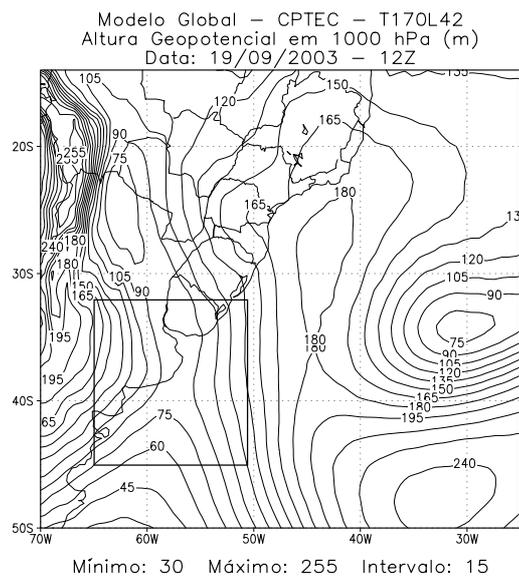
Para o estágio maduro do SSMNVI, que ocorreu às 12Z do dia 20 de setembro (Figura 4.14 (a) e (b)), o SSMVI apresentou uma grande intensificação da baixa de pressão à superfície com o decorrer do tempo. Na Figura 4.14 (c) e (d), a baixa pressão à superfície, referente ao SSMNVI, aparece bem menos intensa e atrasada em comparação com a análise do NCEP (Figura 4.14 (a) e (b)) e um pouco menos inclinada, mas com uma definição melhor simulada pelo modelo T170L42 (4.14 (c)). O estágio maduro do SSMNVI simulado pelo modelo que utilizou o esquema RAS (Figura 4.14 (e) e (f)), foi melhor em comparação com o esquema Kuo, localizando muito bem a região de baixa pressão referente ao SSMNVI.



**FIGURA 4.13** - Altura Geopotencial (m) em 1000 hPa para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua).

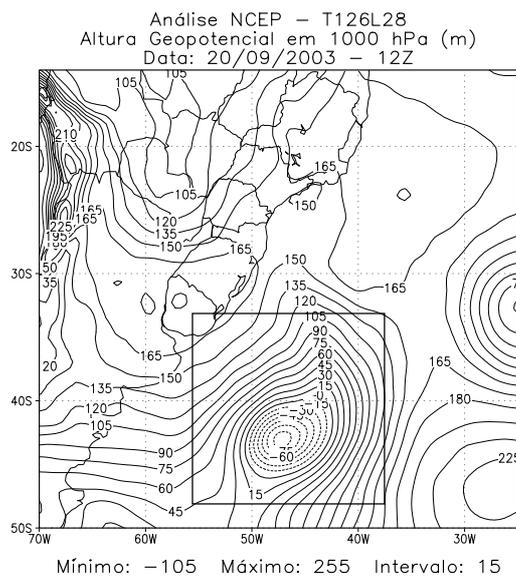


(e)

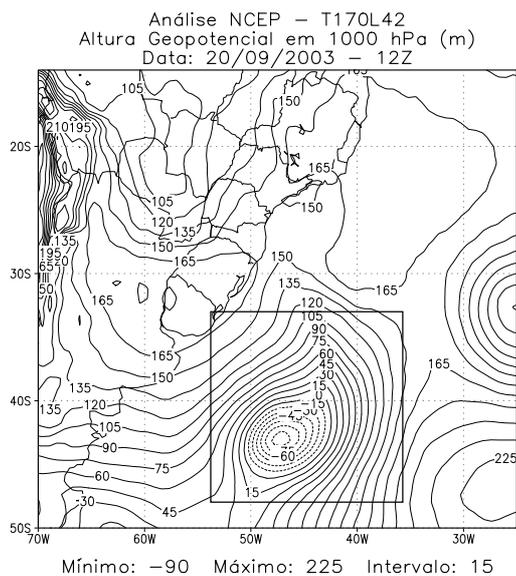


(f)

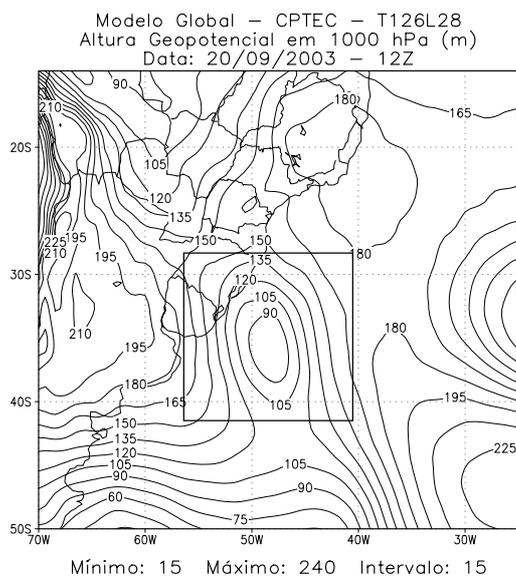
**FIGURA 4.13 - Conclusão.**



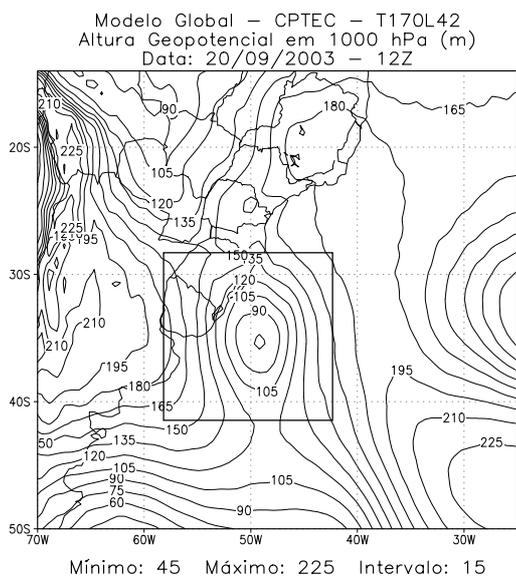
(a)



(b)



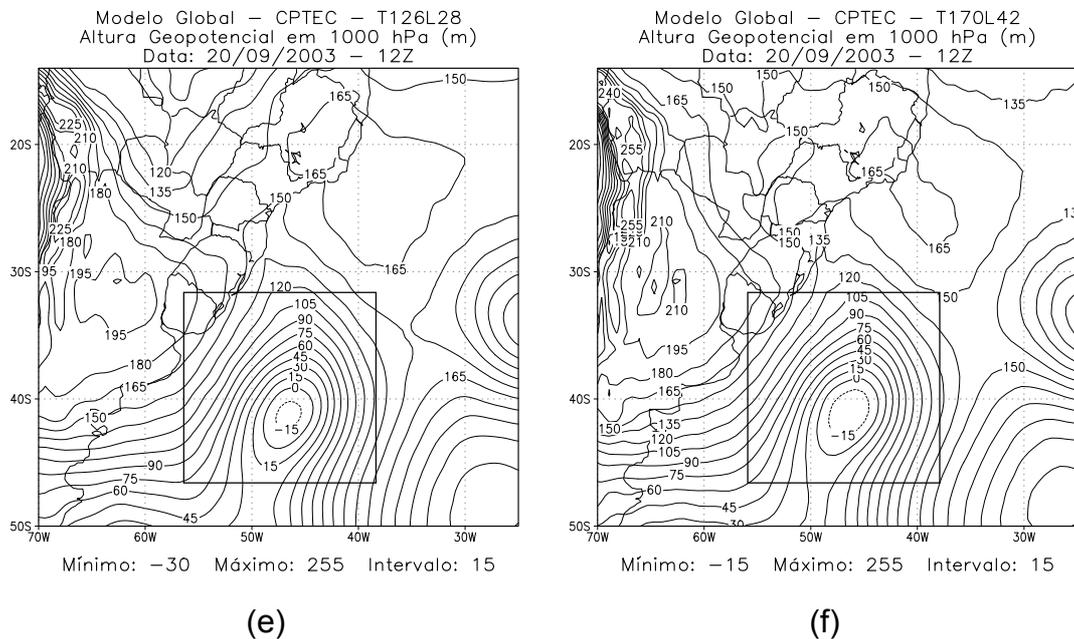
(c)



(d)

**FIGURA 4.14** - Idem Figura 4.13, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.

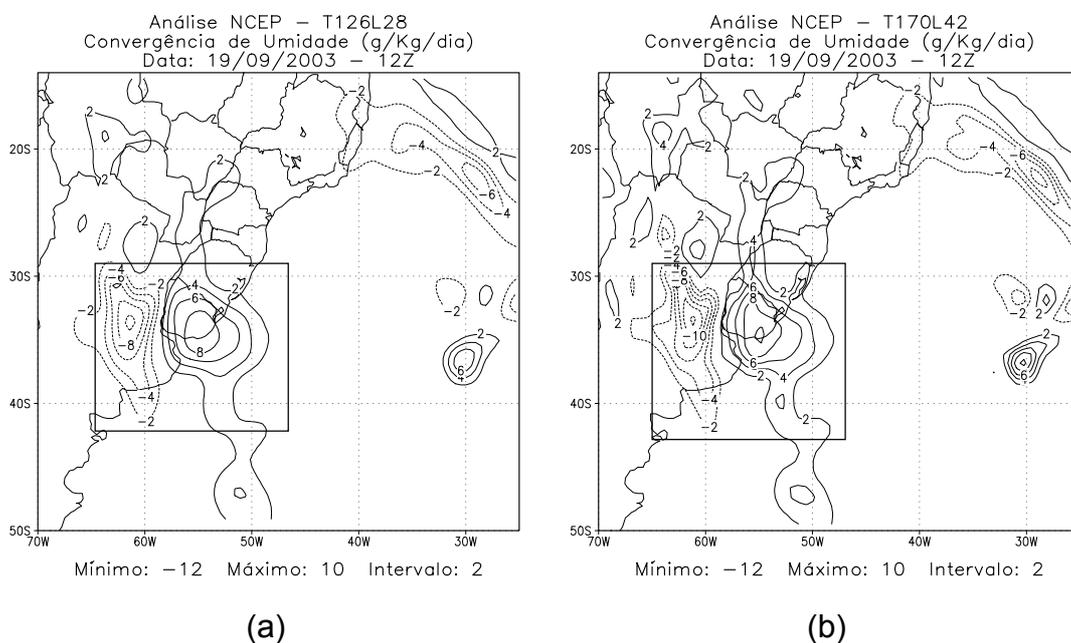
(continua)



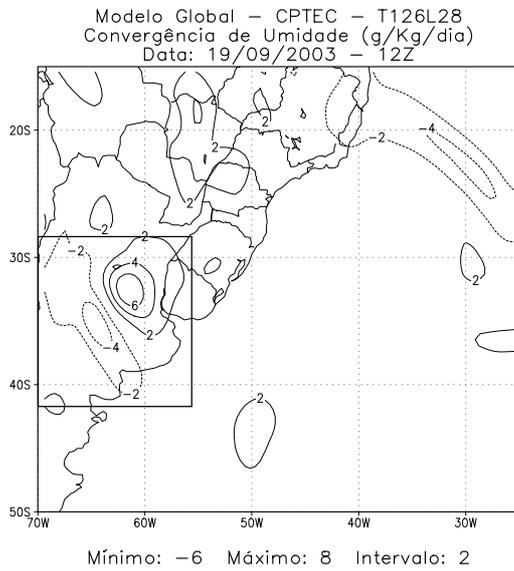
**FIGURA 4.14 - Conclusão.**

A Figura 4.15 (a) a (f) mostra o campo de convergência do fluxo de umidade específica (positivo significa convergência) integrado na vertical. A região de formação do SSMNVI (Figura 4.15 (a) e (b)) mostra uma forte convergência do fluxo de umidade a leste da região de formação do SSMNVI, sobre a região do Uruguai. Pode-se observar também a região da frente fria precursora sobre o oceano. Para o estágio maduro do SSMNVI (Figura 4.16 (a) e (b)), a análise do NCEP mostra forte convergência de umidade ao leste da região do SSMNVI, e divergência ao oeste, adquirindo até o formato de vírgula. Os campos para alta resolução T170L42 da análise mostram-se relativamente mais intensos e com contornos melhores definidos.

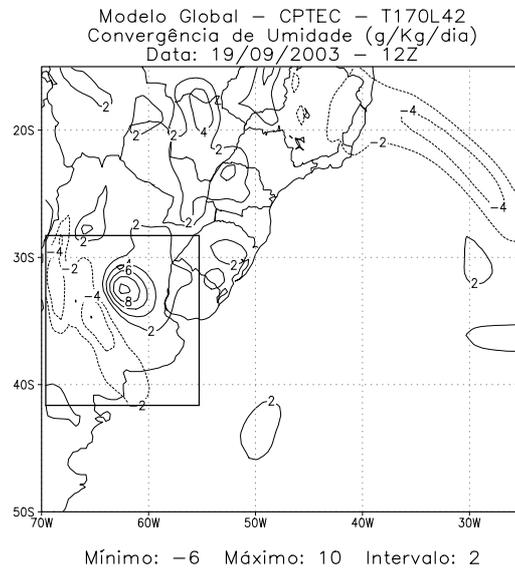
O modelo que utilizou o esquema de convecção RAS, tanto para o estágio inicial como para o estágio maduro (Figuras 4.15 e 4.16 (e) e (f)), mostrou-se muito mais próximo da análise, bem localizado e definido na região de ocorrência do SSMNVI, enquanto que o modelo que utilizou o esquema Kuo (Figuras 4.15 e 4.16 (c) e (d)), mostrou um pequeno atraso na localização e desenvolvimento do SSMVI, e ocupou uma área um pouco menor.



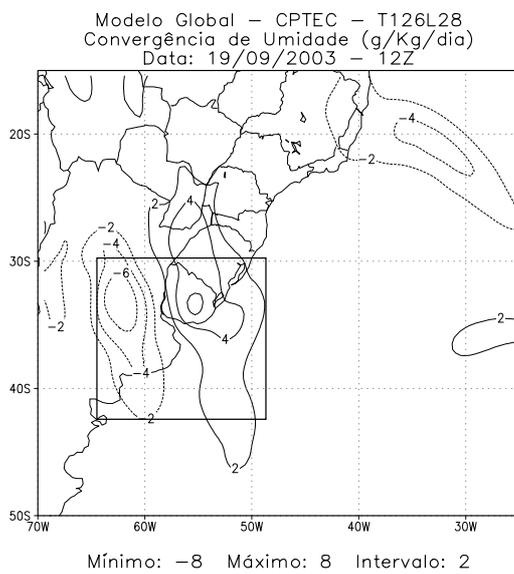
**FIGURA 4.15** – Convergência de umidade (g/Kg/dia) para o dia 19/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua).



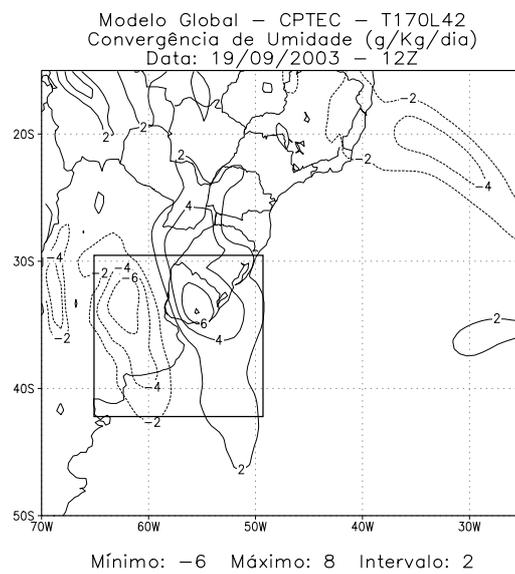
(c)



(d)

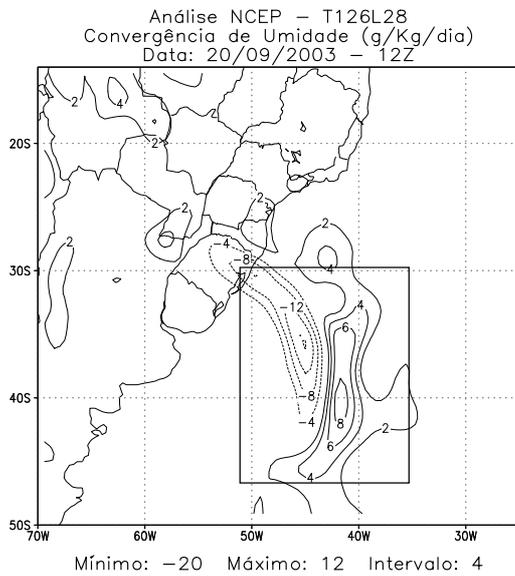


(e)

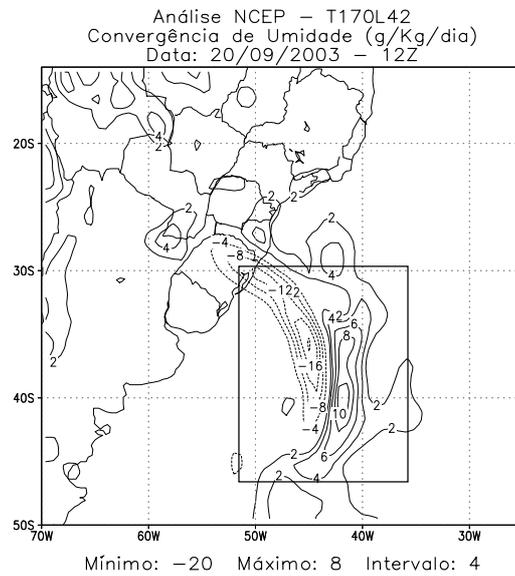


(f)

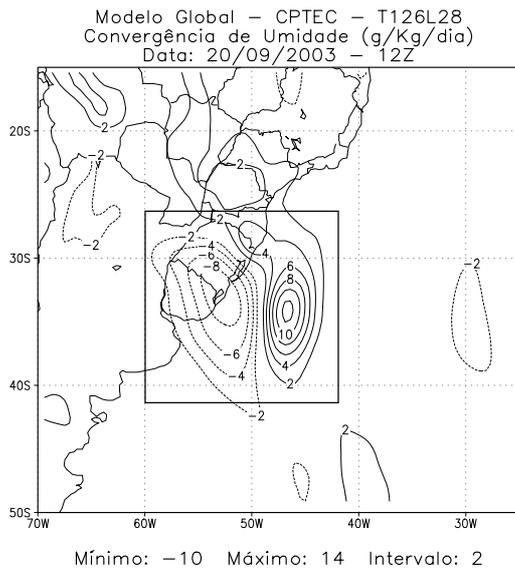
**FIGURA 4.15 – Conclusão.**



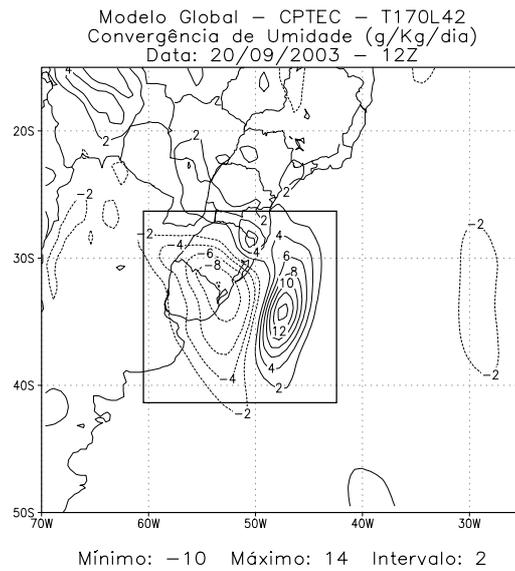
(a)



(b)

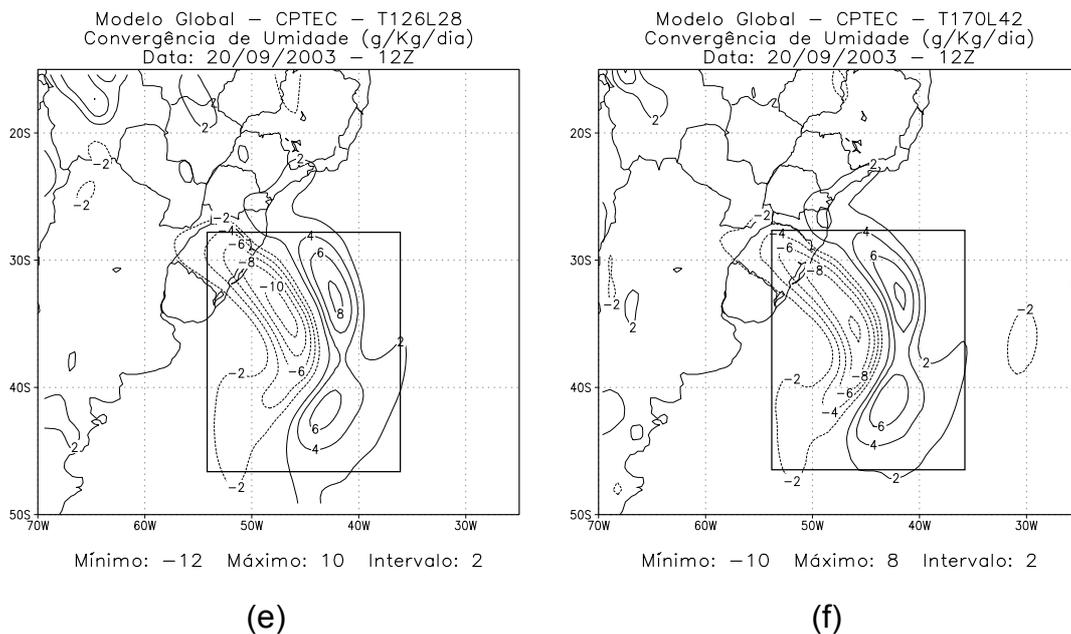


(c)



(d)

**FIGURA 4.16** - Idem Figura 4.15, exceto para o dia 20/09/2003 - 12Z.  
 (continua)

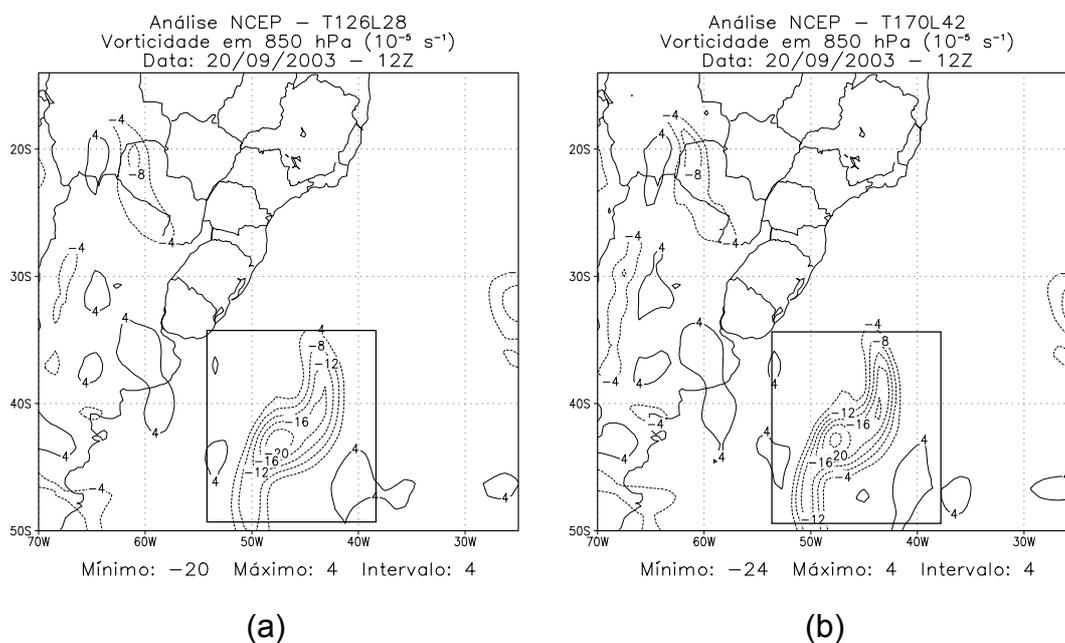


**FIGURA 4.16 – Conclusão.**

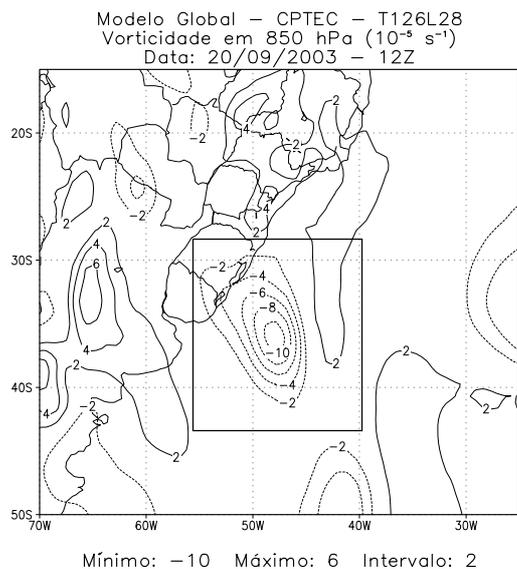
Observando o campo de vorticidade em 850 hPa para o dia 20 de setembro às 12Z (Figura 4.17 (a) e (b)), há um núcleo de atividade ciclônica, denotando a região do estágio maduro do SSMNVI. Na há grandes diferenças entre a média e alta resolução da análise do NCEP, ressaltando apenas valores um pouco maiores nas regiões anti-ciclônicas para o T126L28. Como ocorreu em outros campos, o modelo que utilizou o esquema Kuo (Figura 4.17 (c) e (d)), identificou a região ciclônica do SSMNVI, um pouco mais atrasado e menos intensa do que a análise para ambas resoluções. O modelo com esquema de convecção RAS (Figura 4.17 (e) e (f)) foi o que mais se aproximou, localizando bem a região de atividade ciclônica, mas não obteve valores próximos da análise na região do SSMNVI.

A Figura 4.18 (a) a (f) e 4.19 (a) a (f), mostram respectivamente as linhas de fluxo do vento e a magnitude do vento em 850 hPa, para as 12Z do dia 20 de setembro. Não há grandes diferenças para o campo de linhas de fluxo do vento entre a média (4.18 (a)) e alta resolução (4.18 (b)) da análise comparada com o

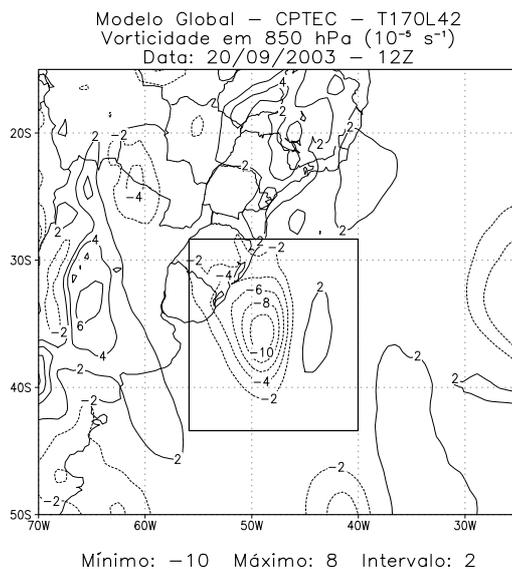
modelo que utilizou o esquema de convecção RAS (Figura 4.18 (e) e (f)). Pela análise notam-se ventos mais intensos na região do SSMNVI do que para as simulações do modelo para ambos esquemas de convecção, entretanto, o esquema RAS do modelo está com uma melhor concordância com a análise e localizou muito bem a região do SSMNVI, mostrando ventos um pouco menos intensos como mostra a Figura (4.19 (e) e (f)). Para o modelo com esquema Kuo, a região do SSMNVI está um pouco mais atrasada, como visto na análise dos outros campos, e ocupa uma área um pouco menor. Observando-se atentamente, podemos notar que a região correspondente ao SSMNVI está melhor definida pelo modelo de alta resolução (T170L42).



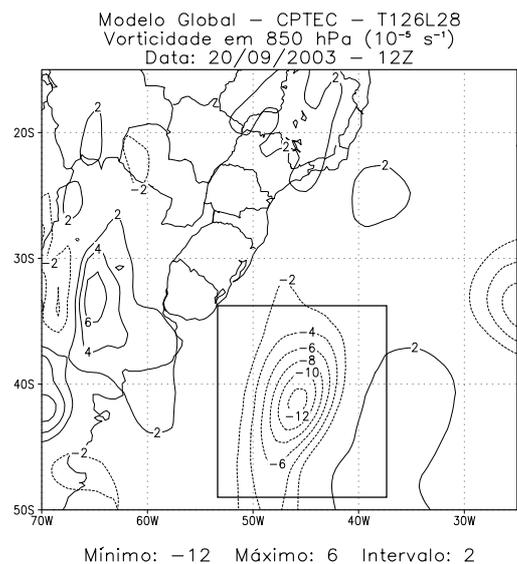
**FIGURA 4.17** – Vorticidade em 850 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua).



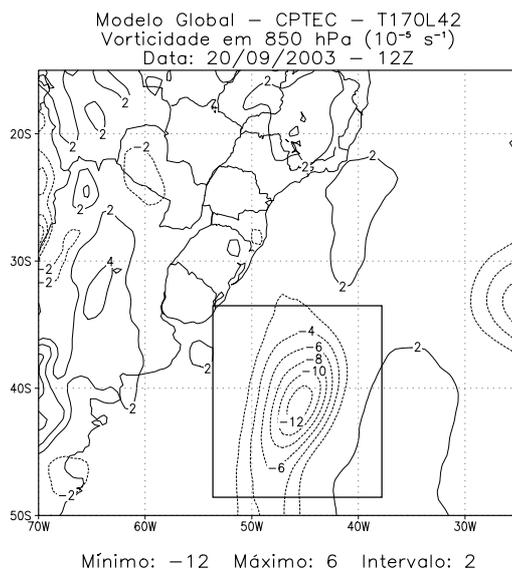
(c)



(d)

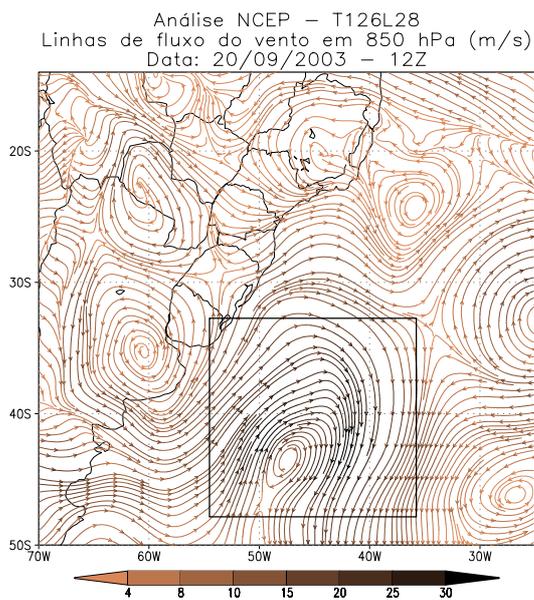


(e)

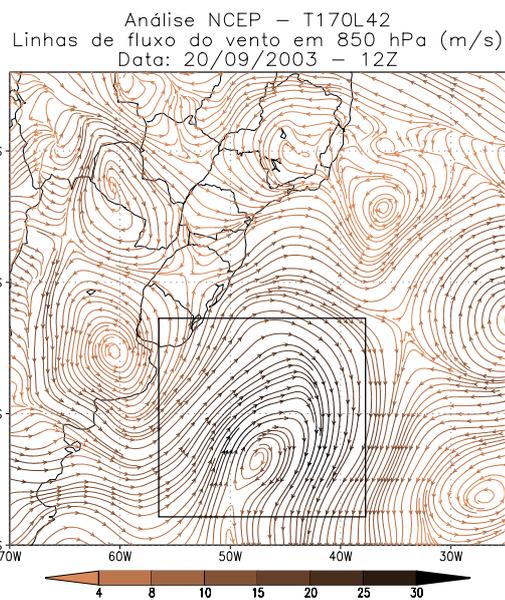


(f)

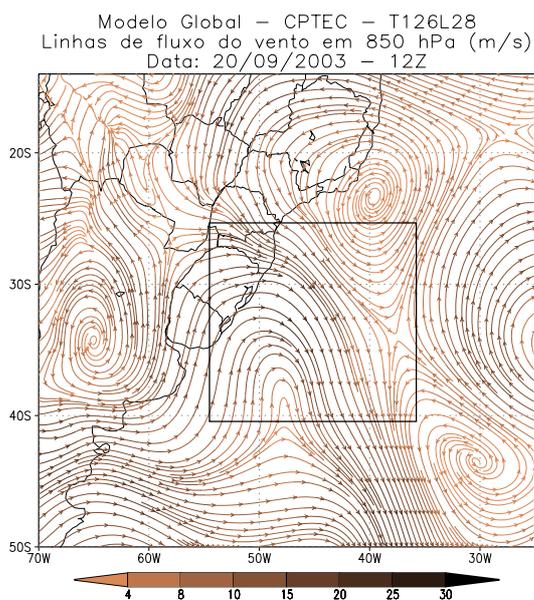
**FIGURA 4.17 – Conclusão.**



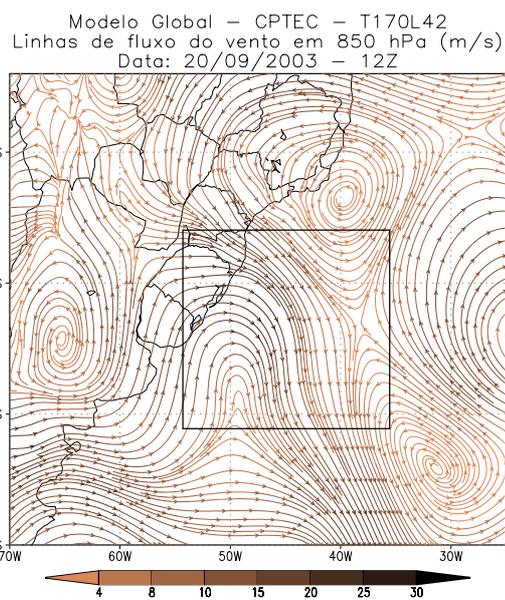
(a)



(b)

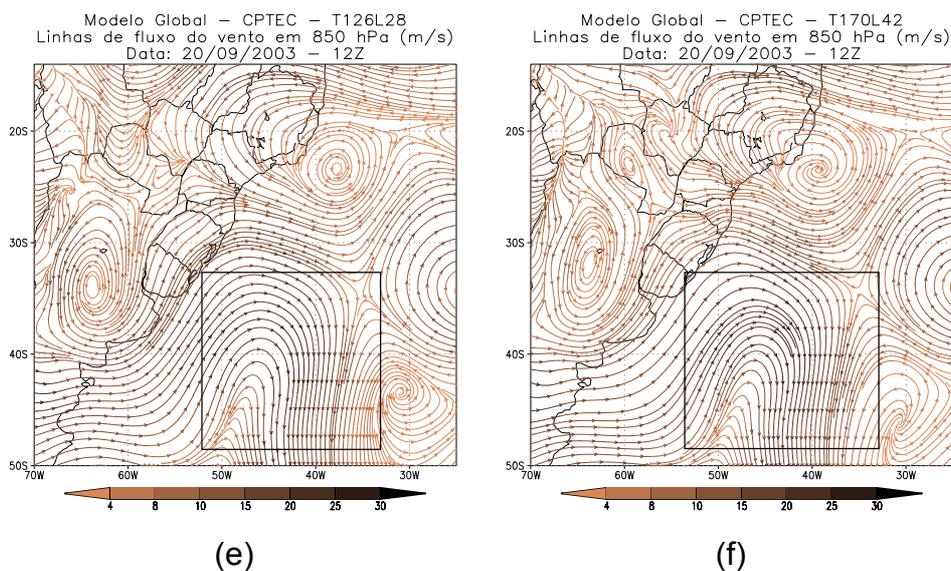


(c)

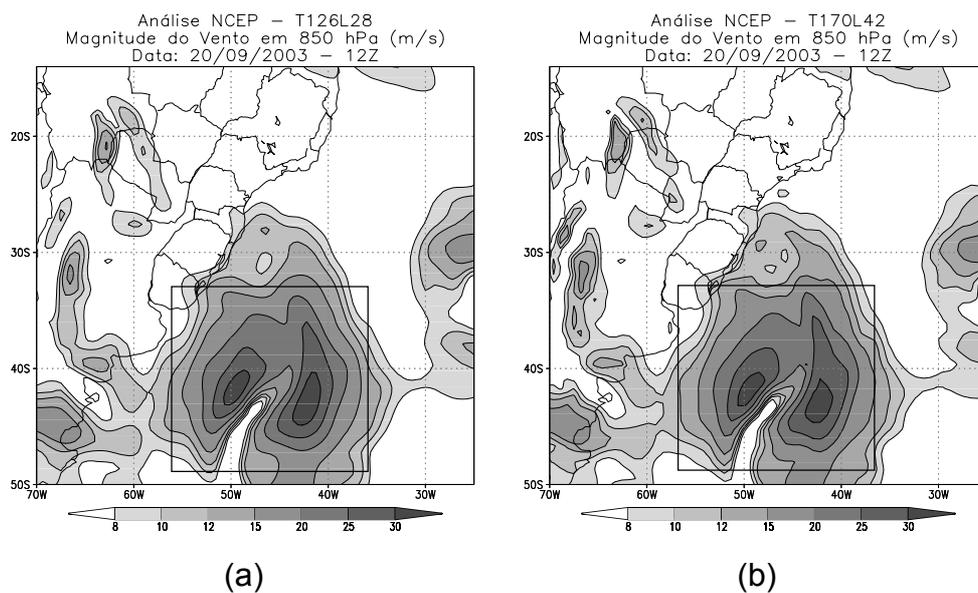


(d)

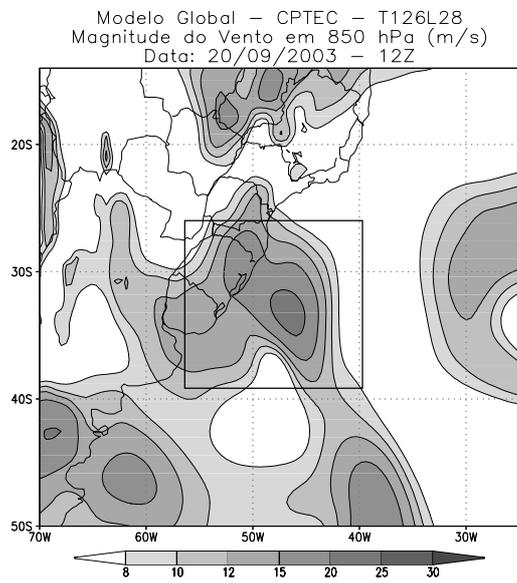
**FIGURA 4.18** – Linhas de fluxo do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua)



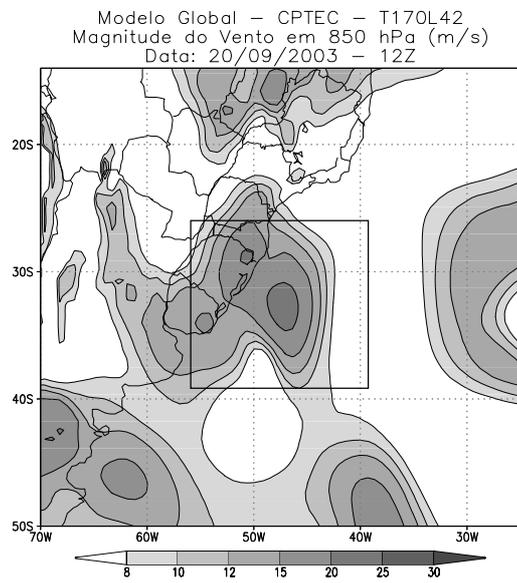
**FIGURA 4.18 – Conclusão.**



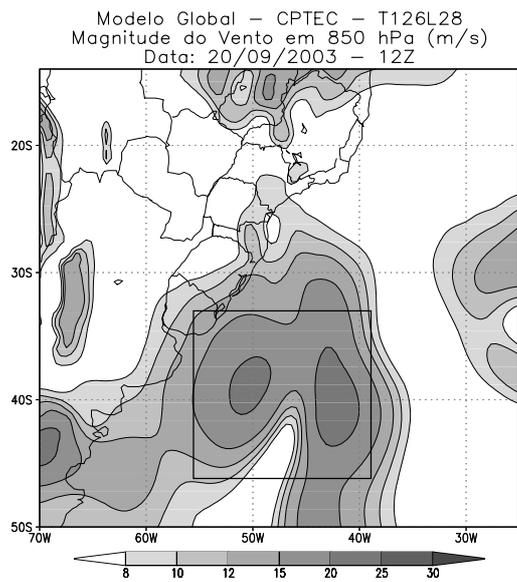
**FIGURA 4.19 – Magnitude do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 20/09/2003 - 12Z. (a) Análise NCEP T126L28; (b) Análise NCEP 170L42; (c) MGCPTEC - T126L28 - Kuo; (d) MGCPTEC - T170L42 - Kuo; (e) MGCPTEC - T126L28 - RAS e (f) MGCPTEC - T170L42 - RAS. (continua)**



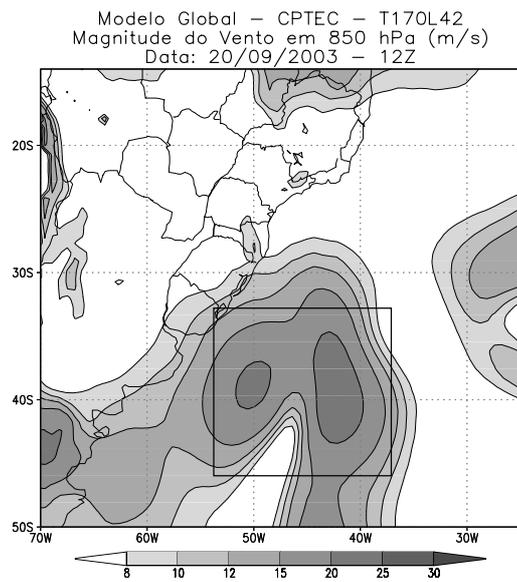
(c)



(d)



(e)



(f)

**FIGURA 4.19 – Conclusão.**

### **4.2.3 – Campos observados EXC2, EXC3, EXC4, EXP7, EXP8 e EXP9**

Os Experimentos de Controle 2, 3 e 4 (EXC2, EXC3 e EXC4) utilizaram dados das reanálises do ECMWF (T106K17). Os dados foram recompostos na grade correspondente ao T106 (320 longitudes por 160 latitudes gaussianas). Foi também rodado o MGCPTEC para as resoluções de T126L28 e T170L42, utilizando o esquema de convecção tipo Kuo (utilizado operacionalmente no CPTEC), a partir dos dias correspondentes aos experimentos de controle descritos na Tabela 3.1, com condições iniciais derivadas das reanálises do ECMWF para aquelas datas.

Nesta seção, serão analisados somente os estágios maduros dos SSMNVI's. Para o EXC2, o estágio maduro ocorreu às 12Z do dia 15 de abril de 1979; para o EXC3 às 12Z do dia 22 de agosto de 1989; e por fim, o EXC4 ocorreu às 12Z do dia 06 de outubro de 1991. Todos os estágios maduros podem ser observados pelas imagens de satélites (Figuras 4.2 – 4.4).

Nas Figuras 4.20 a 4.28 podemos observar os campos de precipitação acumulada (mm) em 6 horas, água precipitável (mm/dia) e temperatura (°C) em 850 hPa, para os experimentos EXC2, EXC3, EXC4 e suas respectivas simulações EXP7, EXP8 e EXP9. Deve-se salientar que os campos de precipitação da reanálise não são analisados, mas sim derivados do próprio modelo utilizado no processo de assimilação de dados.

Para o caso ocorrido em abril de 1979, podemos observar pela reanálise do ECMWF (Figura 4.20 (c)), que o núcleo de precipitação referente ao estágio maduro do SSMNVI atua com grande intensidade sobre a região sul do Brasil, do Uruguai e se estende para o oceano, o que concorda com a localização da imagem de satélite (Figura 4.2 (c)). Pela simulação do MGCPTEC, o T126L28 e o T170L42 (Figura 4.20 (a) e (b) respectivamente), podemos observar a frente fria precursora sobre o oceano e também localização do núcleo de

precipitação referente ao SSMNVI, como aconteceu com o caso anterior, o modelo (para ambas resoluções) simulou a região do SSMNVI um pouco mais deslocada para o noroeste (NO) em comparação com a reanálise do ECMWF. Para o modelo de alta resolução (T170L42) o núcleo referente ao SSMNVI é um pouco menor, mostrando uma melhor definição do núcleo de precipitação referente ao SSMNVI e também vários núcleos em outras regiões, melhorando a observação do domínio em que ocorre a precipitação.

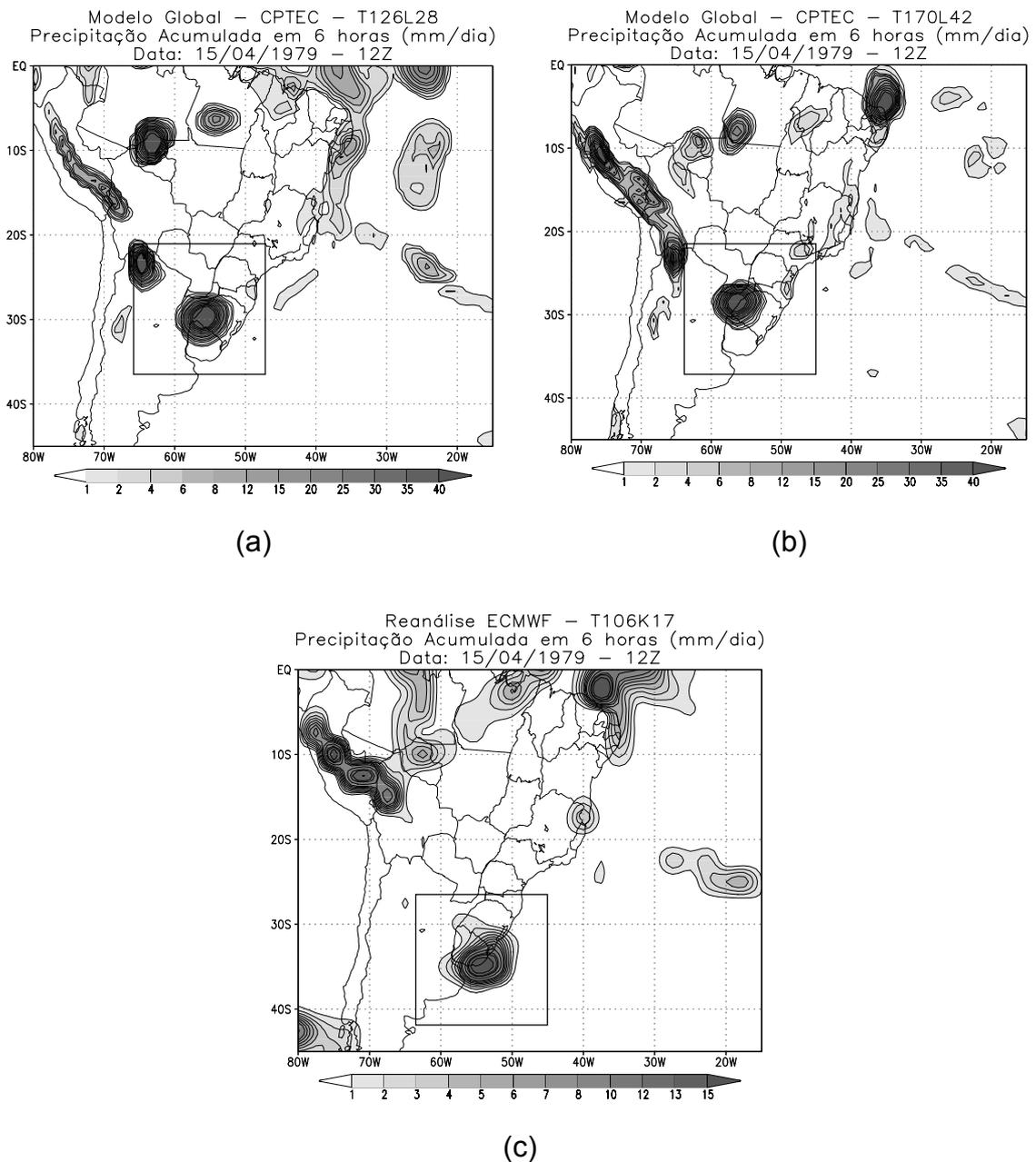
Em concordância com o campo de precipitação está a análise do campo de água precipitável (Figura 4.23 (a) – (c)) para o mesmo período descrito acima. Podemos notar pela simulação do modelo, (Figura 4.23 (a) e (b)) que não há grandes diferenças da média para a alta resolução, já que a umidade está confinada em níveis mais baixos. A escura região sobre o sul do Brasil e o Uruguai, mostra a alta umidade atuante do SSMNVI muito bem localizada, deslocando-se um pouco mais lento para sudeste. Já pela reanálise (Figura 4.23 (c)), podemos ver muito bem a região relativamente úmida atingida pelo SSMNVI, mostrando até o formato de vírgula invertida.

O caso ocorrido em 22 de agosto de 1989 (EXC3), foi muito bem simulado e localizado pelo modelo. Podemos ver claramente pela reanálise através dos campos de precipitação acumulada em 6 horas (Figura 4.21 (c)) e água precipitável (Figura 4.24 (c)), o domínio atingido pelo SSMNVI (estendendo-se desde o norte do Paraguai, passando pelo leste do Paraná, Santa Catarina e atingindo o sul do Brasil), adquirindo até o formato de uma vírgula invertida. Tanto o modelo de média como o de alta resolução, Figuras 4.21 e 4.24 (a) e (b) respectivamente, localizaram muito bem o estágio maduro do SSMNVI, onde o modelo de alta resolução mostra a região de ocorrência relativamente melhor detalhada e um pouco mais intensa. Vale ressaltar que o núcleo de precipitação localizado ao sul do Uruguai, sobre o oceano, mostrado pela reanálise se mostra mais intenso do que simulado pelo modelo. O campo de água precipitável, também está com muito boa concordância com o campo de

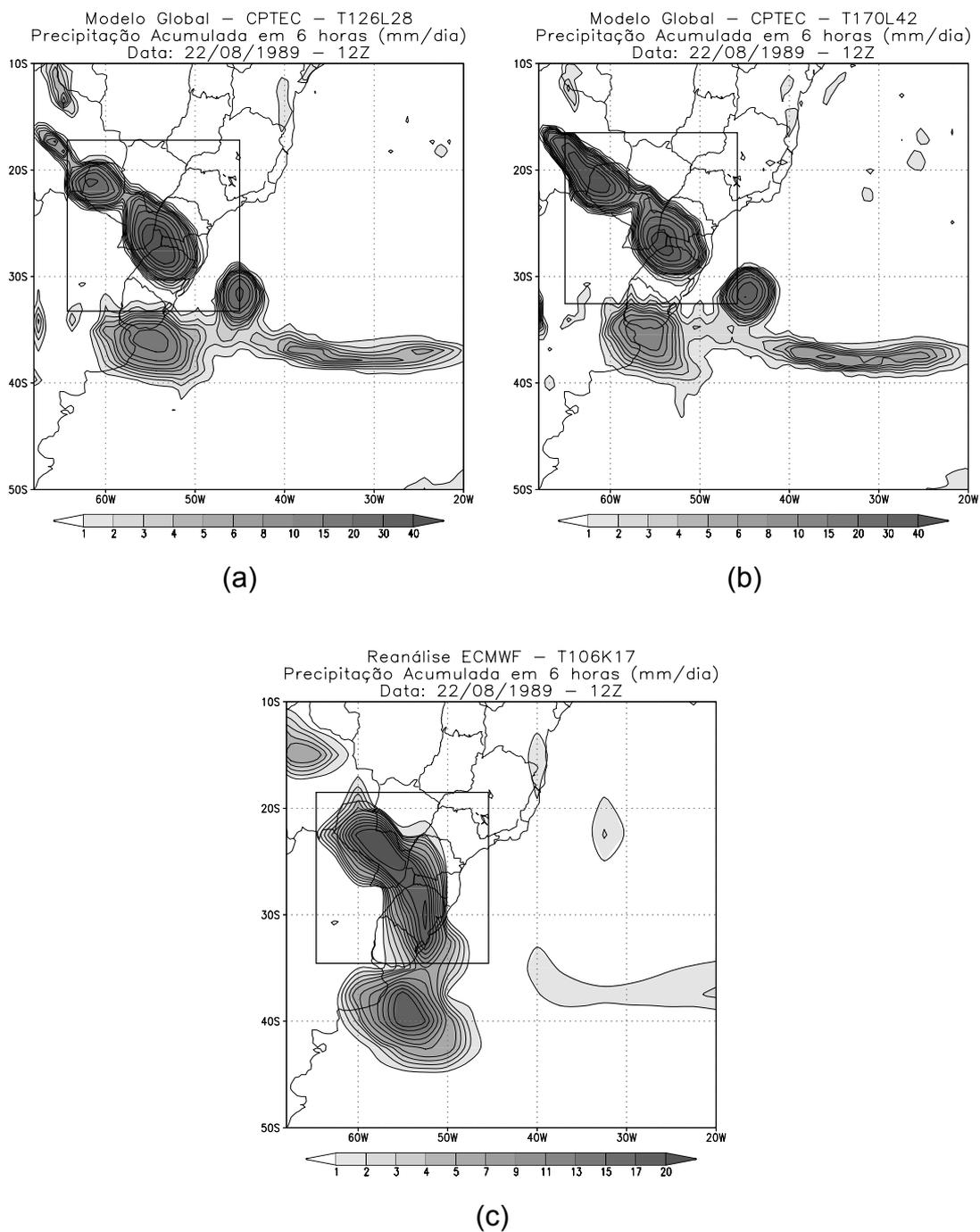
precipitação acumulada em 6 horas, não havendo diferenças muito significativas, e o deslocamento relativamente mais lento é menor para esses dois campos do que os casos anteriores.

Assim como os outros casos, os campos de precipitação acumulada em 6 horas, e água precipitável simulados pelo modelo para o caso de outubro de 1991 (Figuras 4.22 e 4.25) estão em muito boa concordância com a reanálise do ECMWF, apenas com um deslocamento mais lento e com campos mais intensos, simulados pelo modelo, com a alta resolução mostrando melhor a região de ocorrência do SSMNVI.

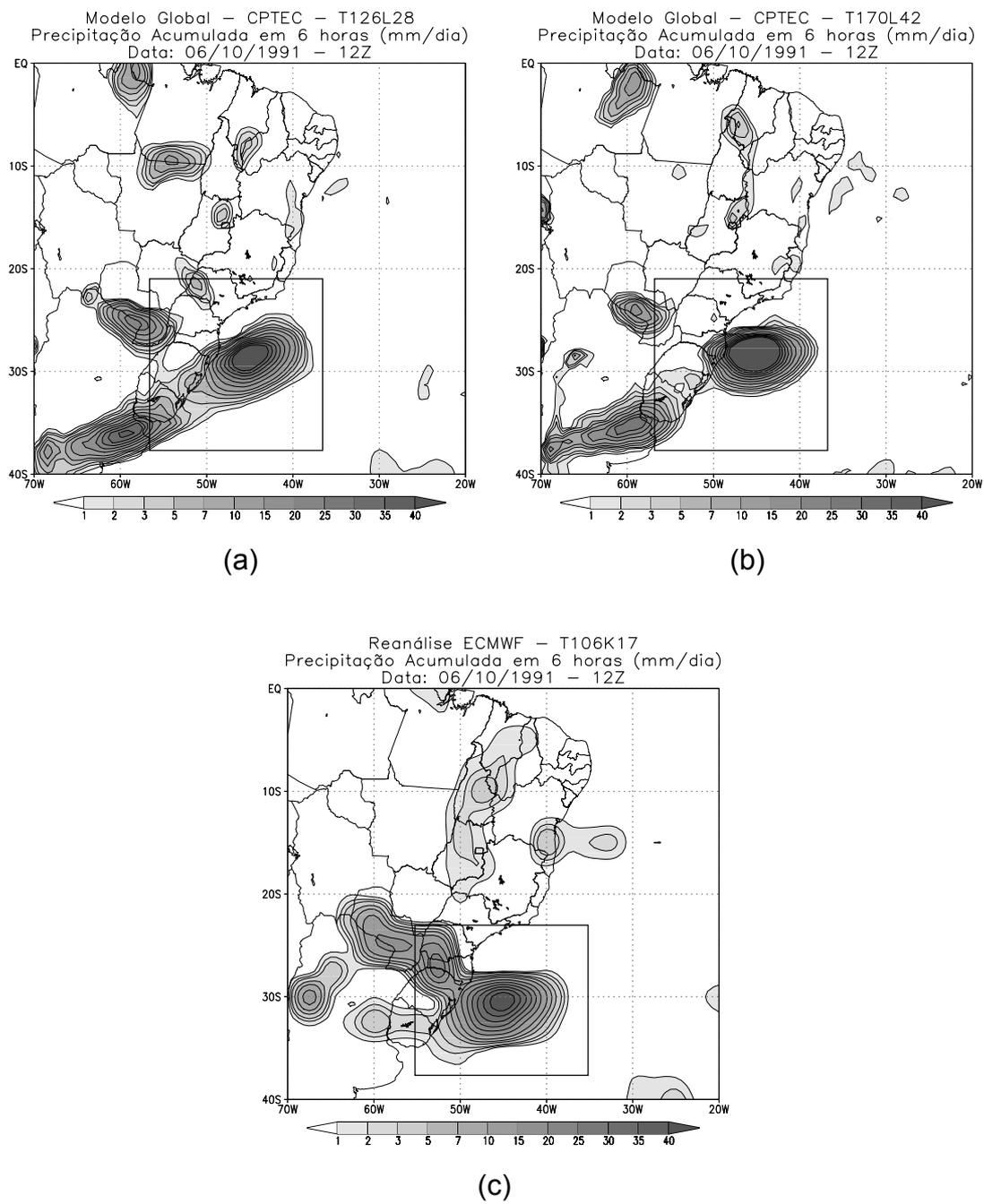
Para os campos da temperatura 850 hPa (Figuras 4.26 a 4.28), podemos observar fortes gradientes de temperatura na região de desenvolvimento do SSMNVI, denotando uma intensa zona baroclínica da atmosfera em baixos níveis, muito bem simulados pelo modelo para todos os casos.



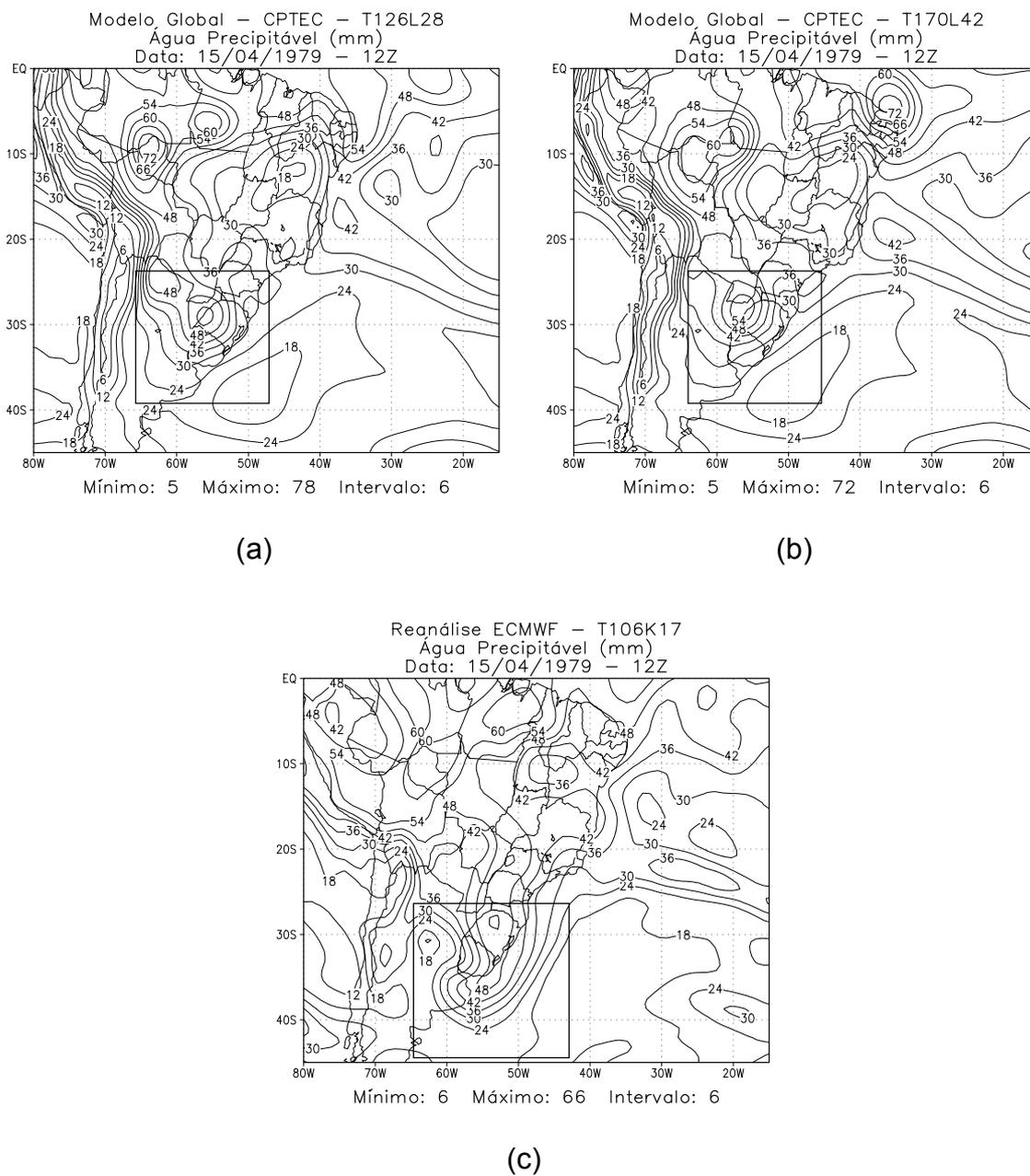
**FIGURA 4.20** – Precipitação acumulada em 6 horas para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTC - T126L28; (b) MGCPTC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



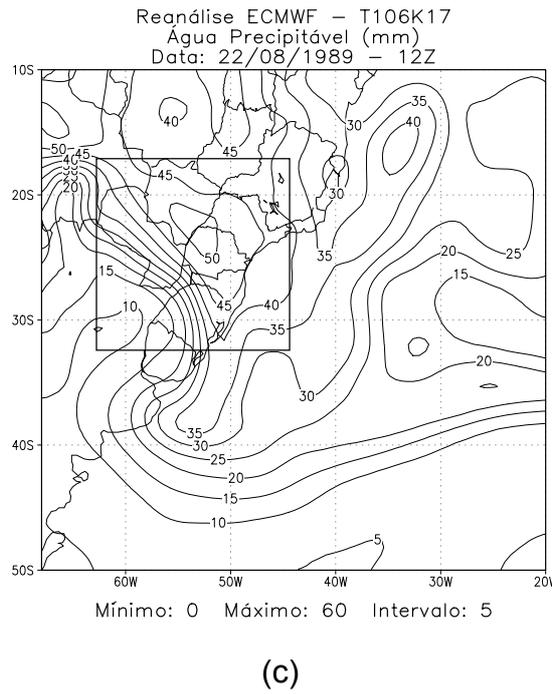
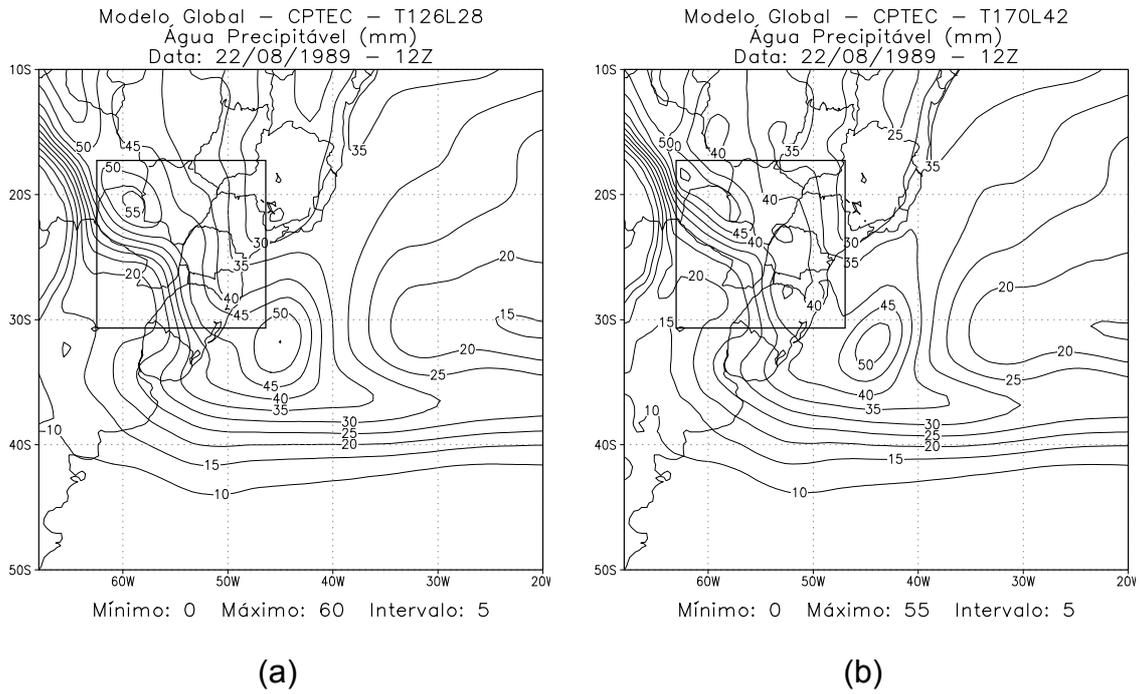
**FIGURA 4.21** – Idem Figura 4.20, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



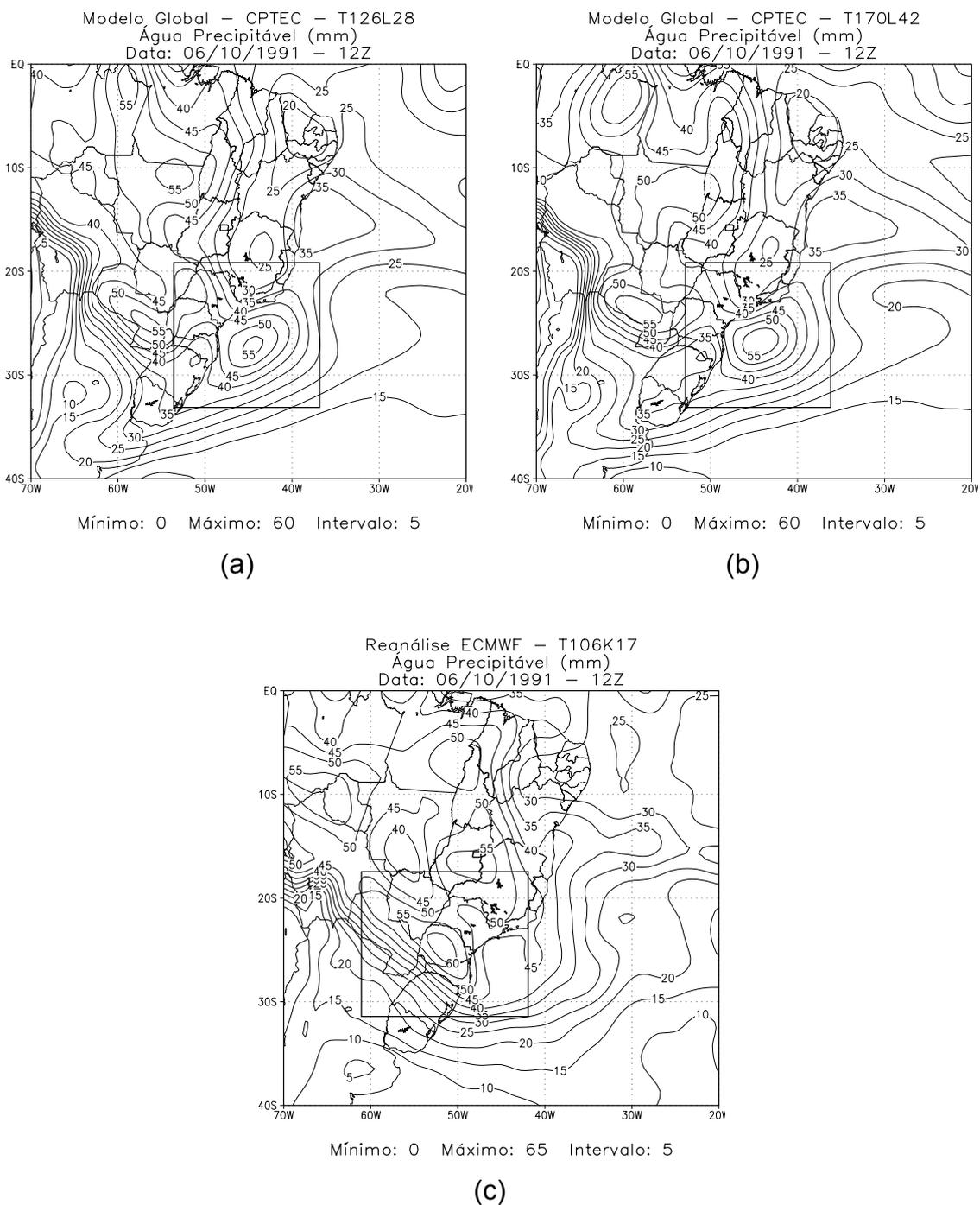
**FIGURA 4.22** – Idem Figura 4.20, exceto para o dia 07/10/1991 - 12Z.



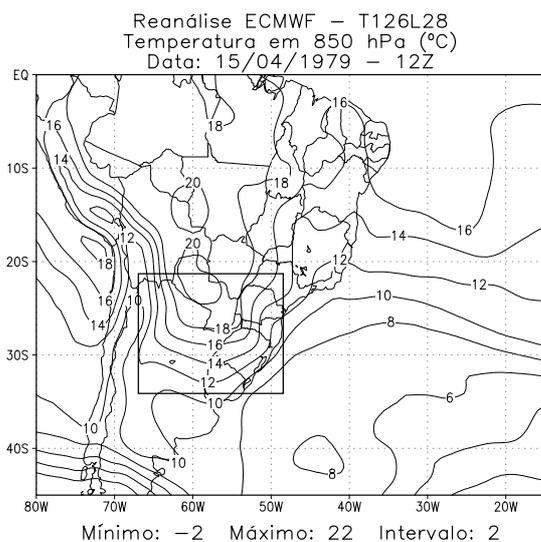
**FIGURA 4.23** – Água precipitável para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



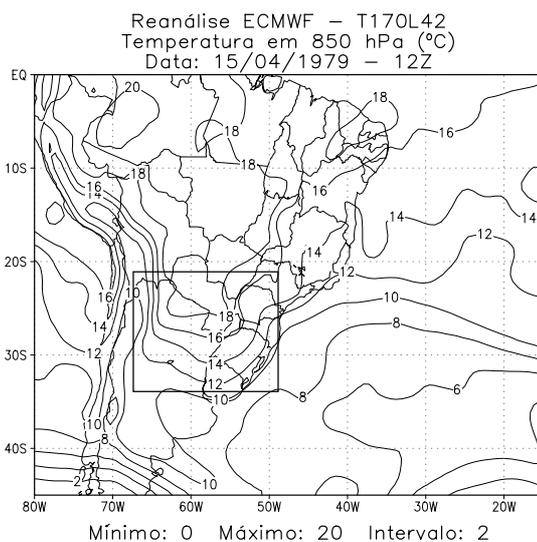
**FIGURA 4.24** – Idem Figura 4.23, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



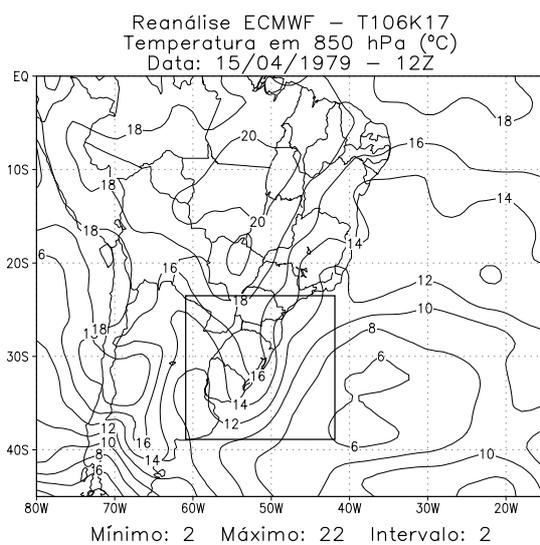
**FIGURA 4.25** – Idem Figura 4.23, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.



(a)

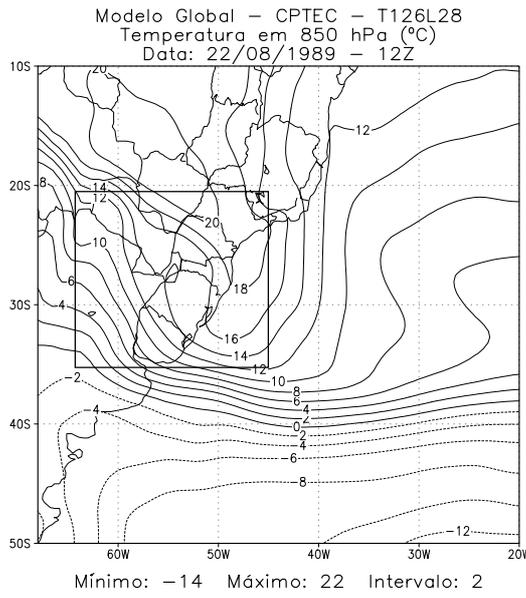


(b)

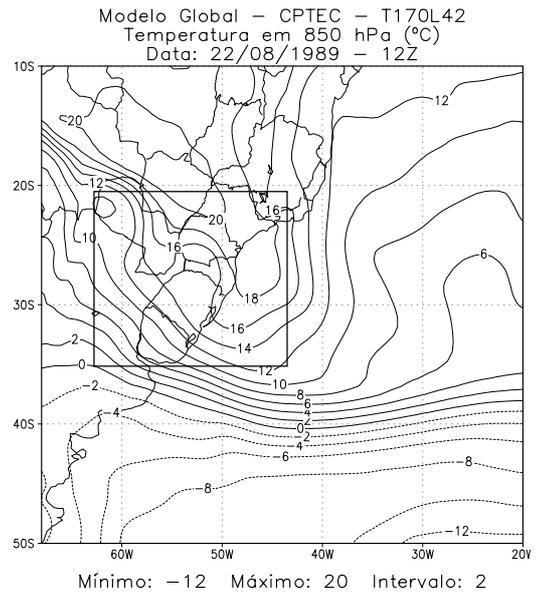


(c)

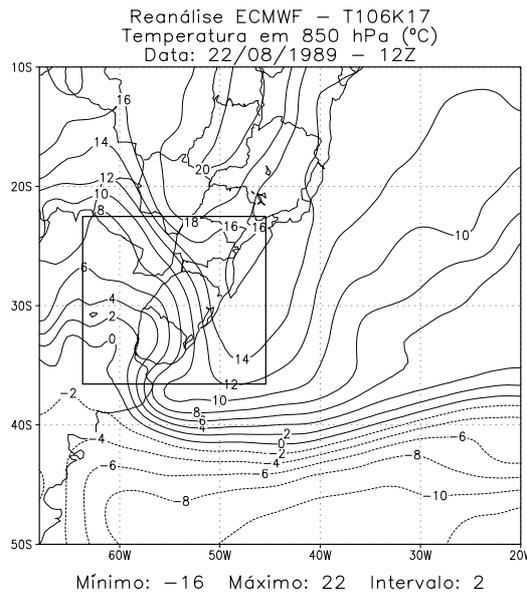
**FIGURA 4.26** – Temperatura (°C) em 850 hPa para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



(a)

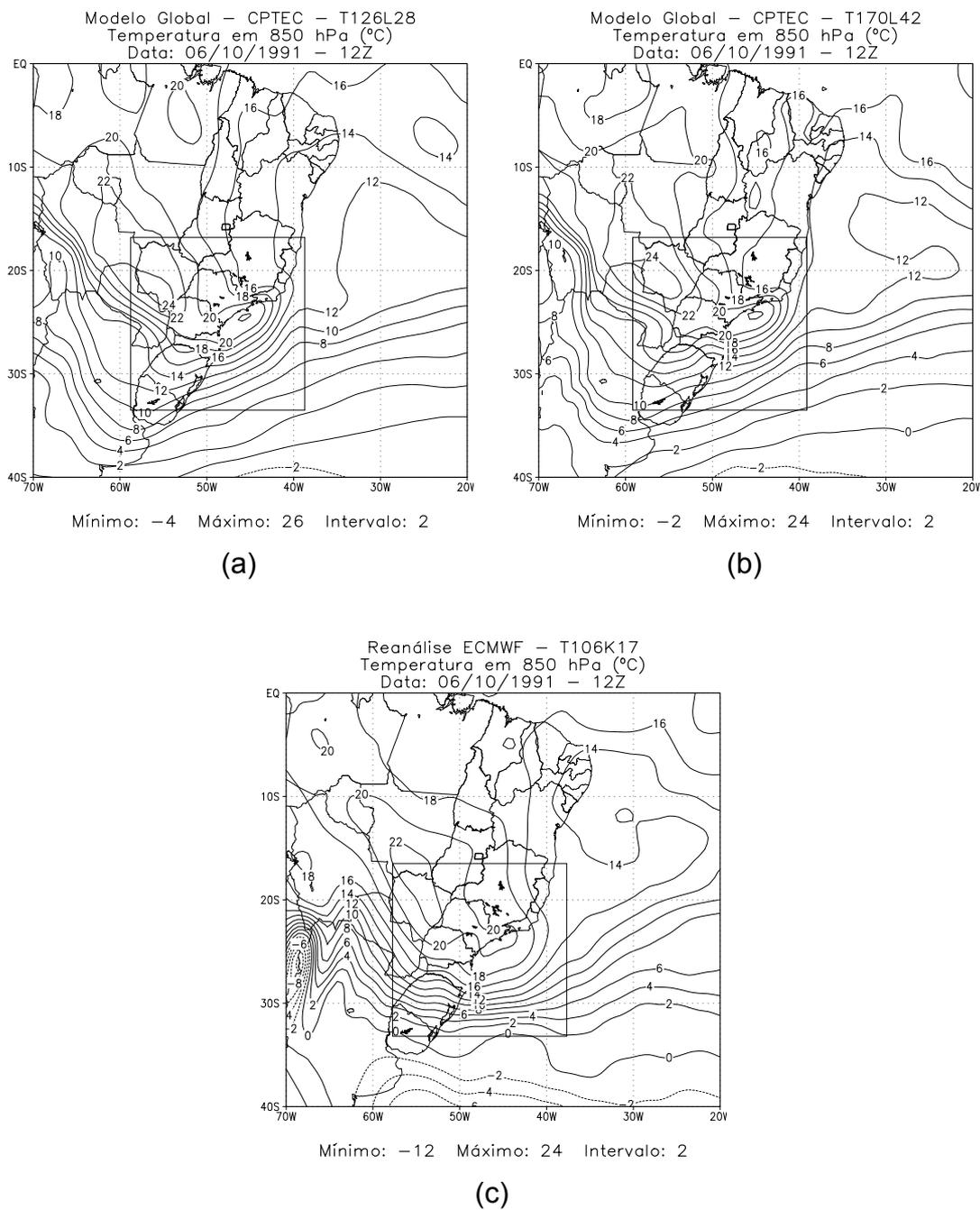


(b)



(c)

**FIGURA 4.27** – Idem Figura 4.26, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



**FIGURA 4.28** – Idem Figura 4.26, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.

As Figuras 4.29 a 4.31 exibem a altura geopotencial (m) em 1000 hPa para o estágio maduro do SSMNVI. Podemos observar, através da reanálise para os três casos (abril de 1979 – Figura 4.29 (c); agosto de 1989 – Figura 4.30 (c) e outubro de 1991 – Figura 4.31 (c)) que no local onde o SSMNVI adquiriu seu estágio maduro, há um cavado de onda curta bem definido, indicando um centro de relativa baixa pressão. Para o caso de abril de 1979 ele está localizado no sul do Brasil e Uruguai, concordando com o campo de precipitação. Para a simulação do modelo (EXP7), sua localização ocorre um pouco mais ao sul do Paraguai e leste do Rio Grande do Sul, com um deslocamento um pouco mais lento para o sudeste e relativamente melhor definido pelo T170L42 (Figura 4.29 (b)). Ao leste do SSMNVI, sobre o oceano, podemos notar a presença de um centro de alta pressão bem localizado por ambas as resoluções do modelo, mas com uma inclinação mais ao sudoeste em comparação com a reanálise do ECMWF.

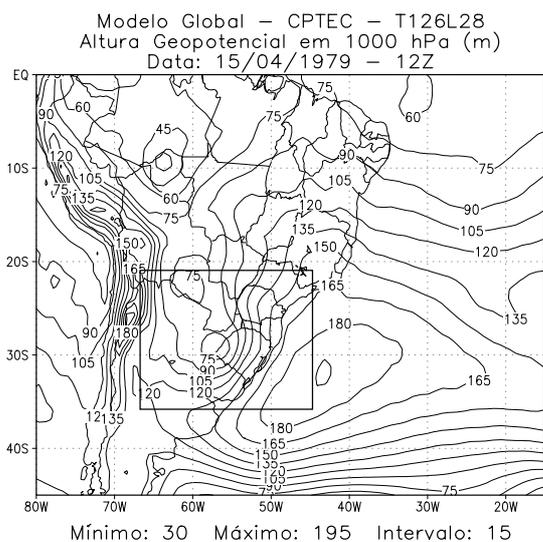
Para o caso ocorrido em agosto de 1989 – EXP8 (Figura 4.30 (c)), a inclinação para sudoeste do eixo do cavado com a altura denota a situação baroclínica da frente e a disponibilidade de energia potencial para o sistema como um todo. Ainda pela reanálise, podemos observar um cavado de onda curta sobre o sul do Brasil e o Uruguai, estendendo-se sobre o oceano. Como ocorreu nos outros casos, o modelo atrasa um pouco mais a oeste a região do SSMNVI, com uma componente mais ao norte e um pouco mais avançada para o sudeste do sul do Brasil, sobre o oceano. Pela imagem de satélite para esse caso (Figura 4.3 (b)), podemos observar dois sistemas, um referente ao estágio maduro do SSMNVI e outro sobre o oceano, bem identificados pelo modelo de alta resolução (Figura 4.30 (b)), apresentando dois pequenos núcleos nessa região, que será melhor vista pelos campos de linhas de fluxo do vento e magnitude do vento (próximas figuras).

O mesmo ocorreu no caso de outubro de 1991 (Figura 4.31 (c)), onde o SSMNVI apresentou uma grande intensificação da baixa altura geopotencial

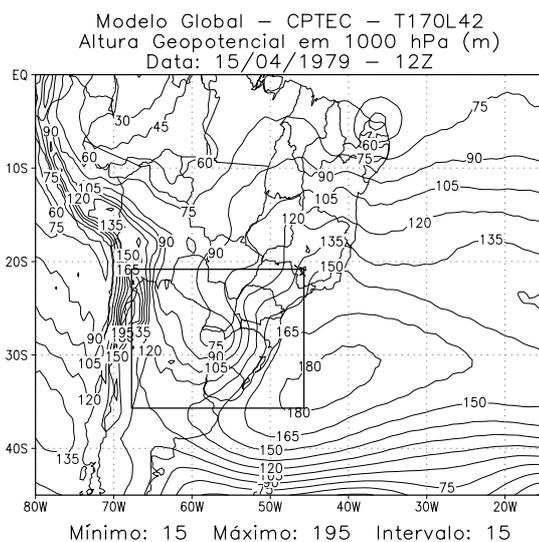
sobre os estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e se estendendo para o oceano com o decorrer do tempo. Da mesma forma que os outros campos, campos de precipitação, água precipitável e temperatura em 850 hPa, o campo da altura geopotencial em 1000 hPa, simulado pelo modelo (Figura 4.31 (a) e (b)), mostrou excelente concordância com os respectivos campos analisados, exceto pela propagação mais lenta do SSMNVI simulado.

Nos campos de vorticidade em baixos níveis, para os três casos (Figura 4.32 (c); 4.33 (c) e 4.34 (c)), na região do SSMNVI havia um núcleo de vorticidade, denotando a intensificação da circulação ciclônica. Para o caso de abril de 1979 (Figura 4.32 (c)) essa atividade ciclônica ocorreu sobre o sul do Brasil e mais intensa sobre o Uruguai, estendendo-se para o oceano; e junto com essa atividade ciclônica, podemos observar um núcleo anti-ciclônico localizado abaixo do núcleo ciclônico. O mesmo foi observado para os casos de agosto de 1989 (Figura 4.33 (c)) e outubro de 1991 (Figura 4.34 (c)). Pode-se observar sobre o Paraguai, Paraná, Santa Catarina e sul do Brasil uma forte atividade ciclônica, também acompanhada de um núcleo de atividade anti-ciclônica a leste, deslocando-se para o oceano. Por fim, o caso de outubro de 1991, há um núcleo ciclônico sobre o leste do sul do Brasil e Uruguai estendendo-se para o oceano, acompanhado de dois pequenos núcleos de atividade anti-ciclônica, um ao norte e outro mais ao sul do núcleo ciclônico.

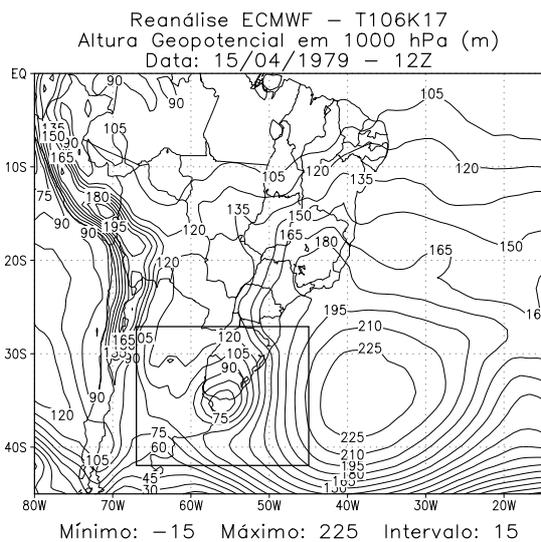
Para os experimentos simulados pelo modelo, houve uma boa concordância com as reanálises, localizando muito bem essas regiões, mas com uma propagação um pouco mais lenta, como observados anteriormente nos outros campos.



(a)

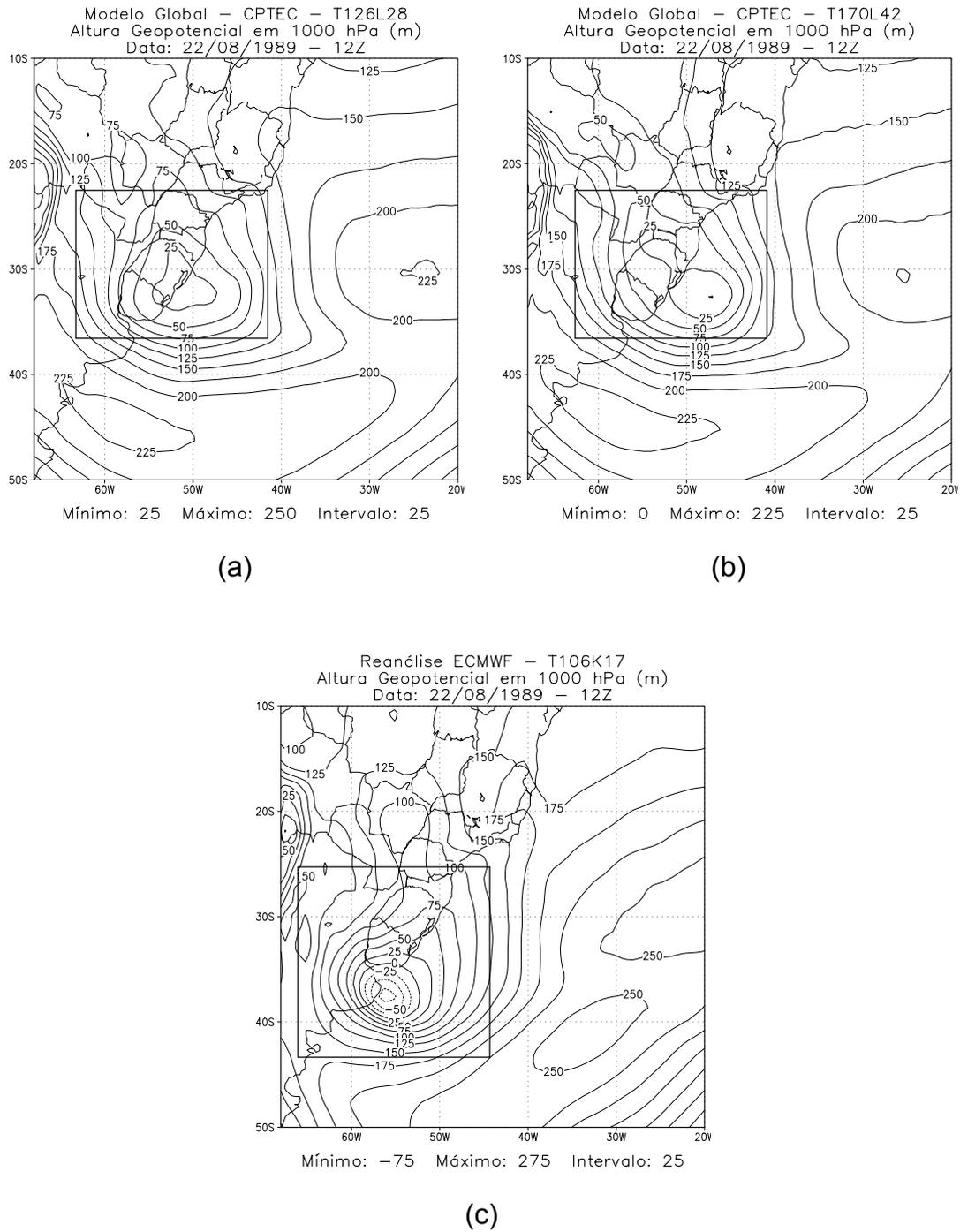


(b)

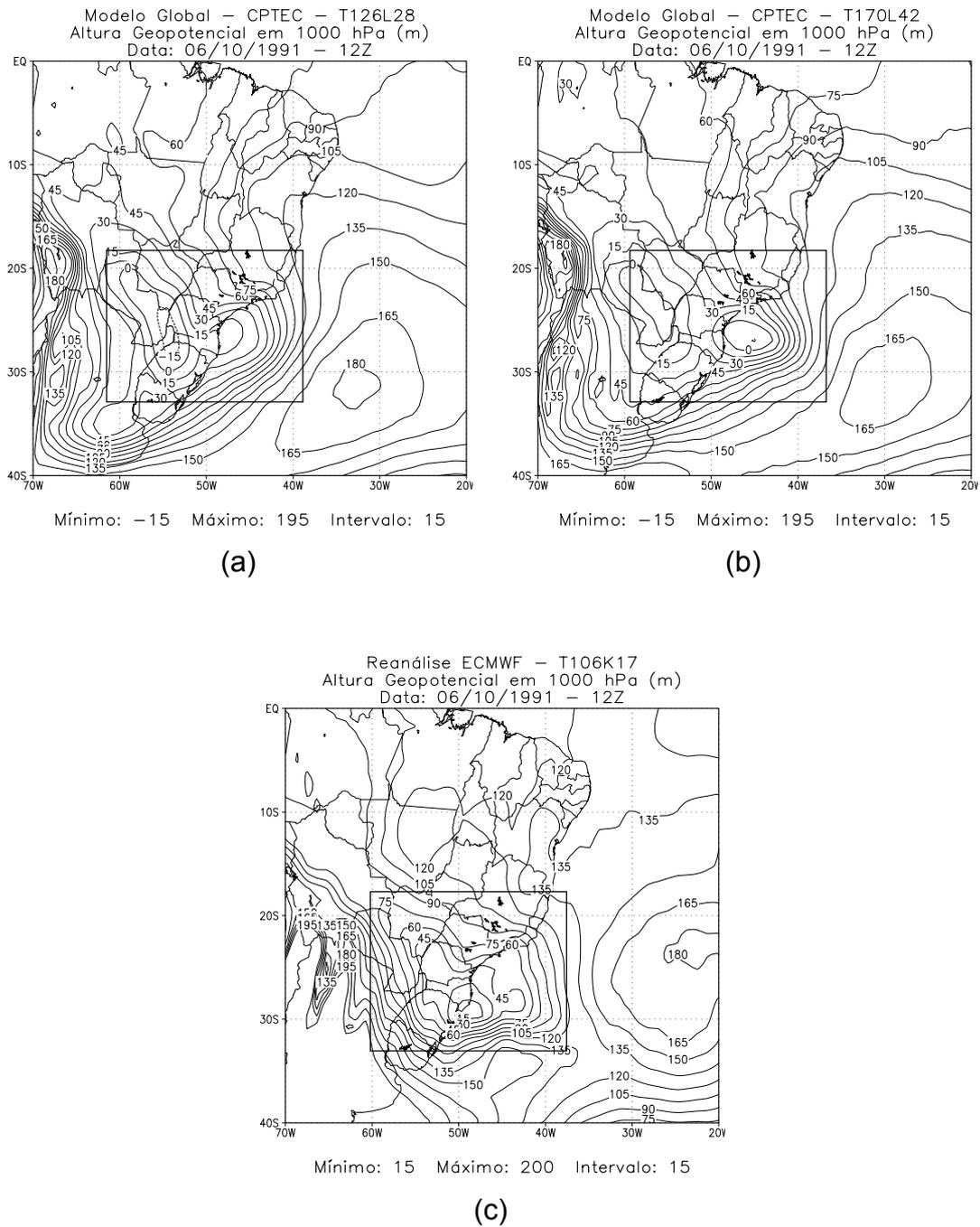


(c)

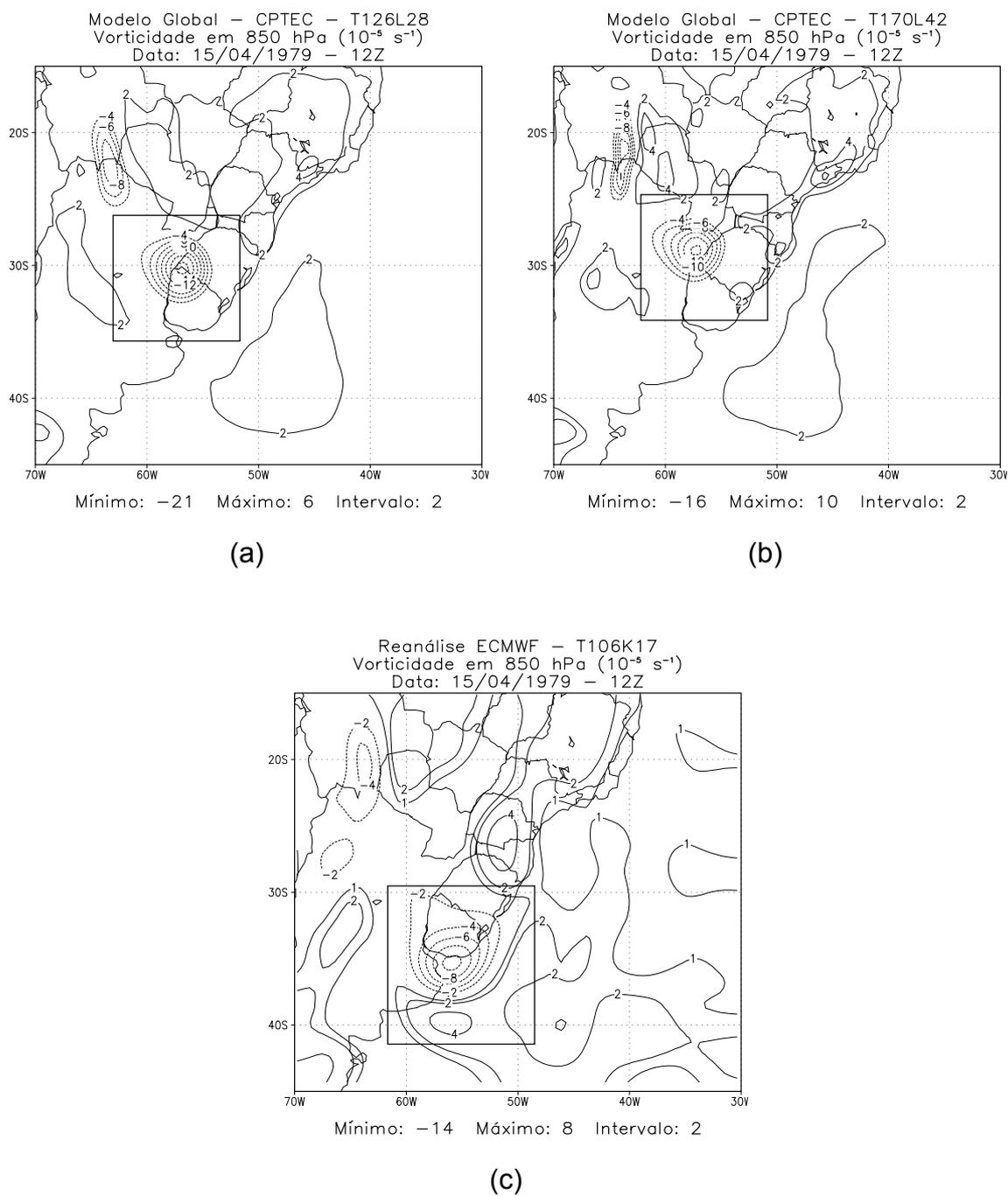
**FIGURA 4.29** – Altura Geopotencial (m) em 1000 hPa para o dia 15/04/1979 – 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



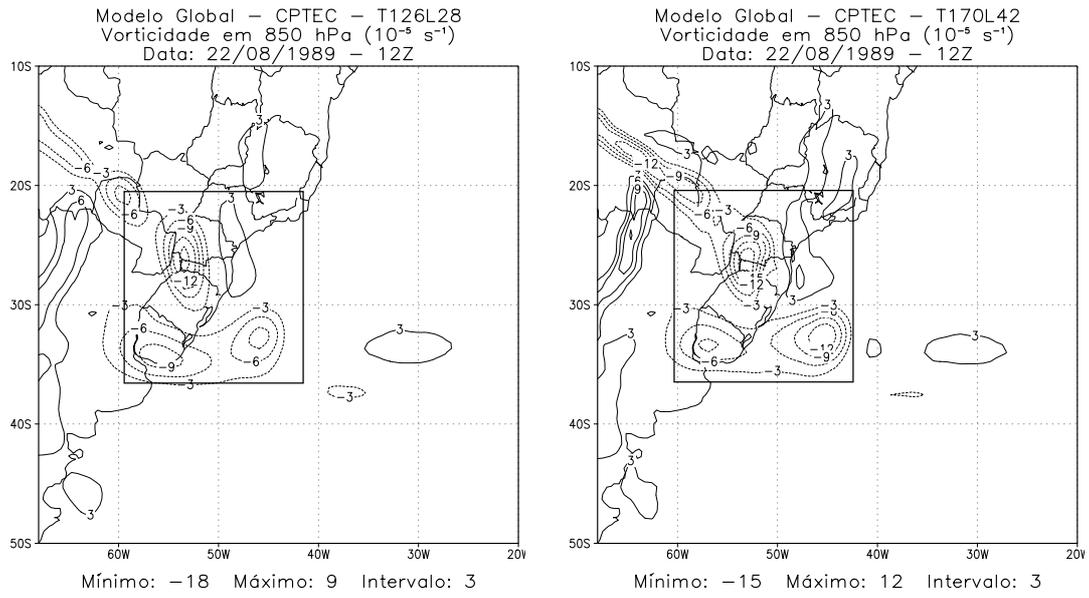
**FIGURA 4.30** – Idem Figura 4.29, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



**FIGURA 4.31** – Idem Figura 4.29, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.

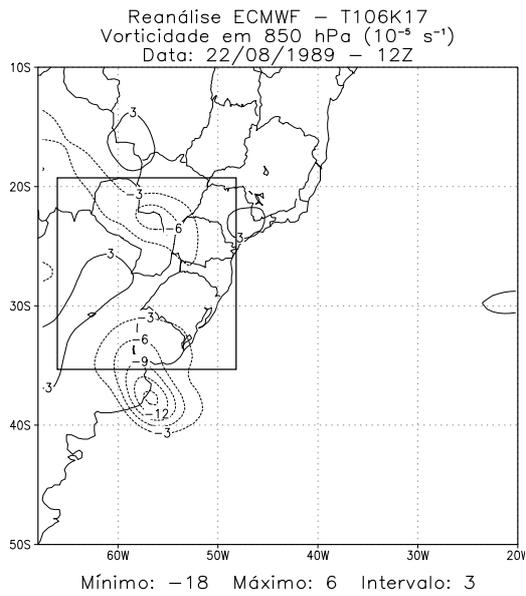


**FIGURA 4.32** – Vorticidade em 850 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTC - T126L28; (b) MGCPTC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



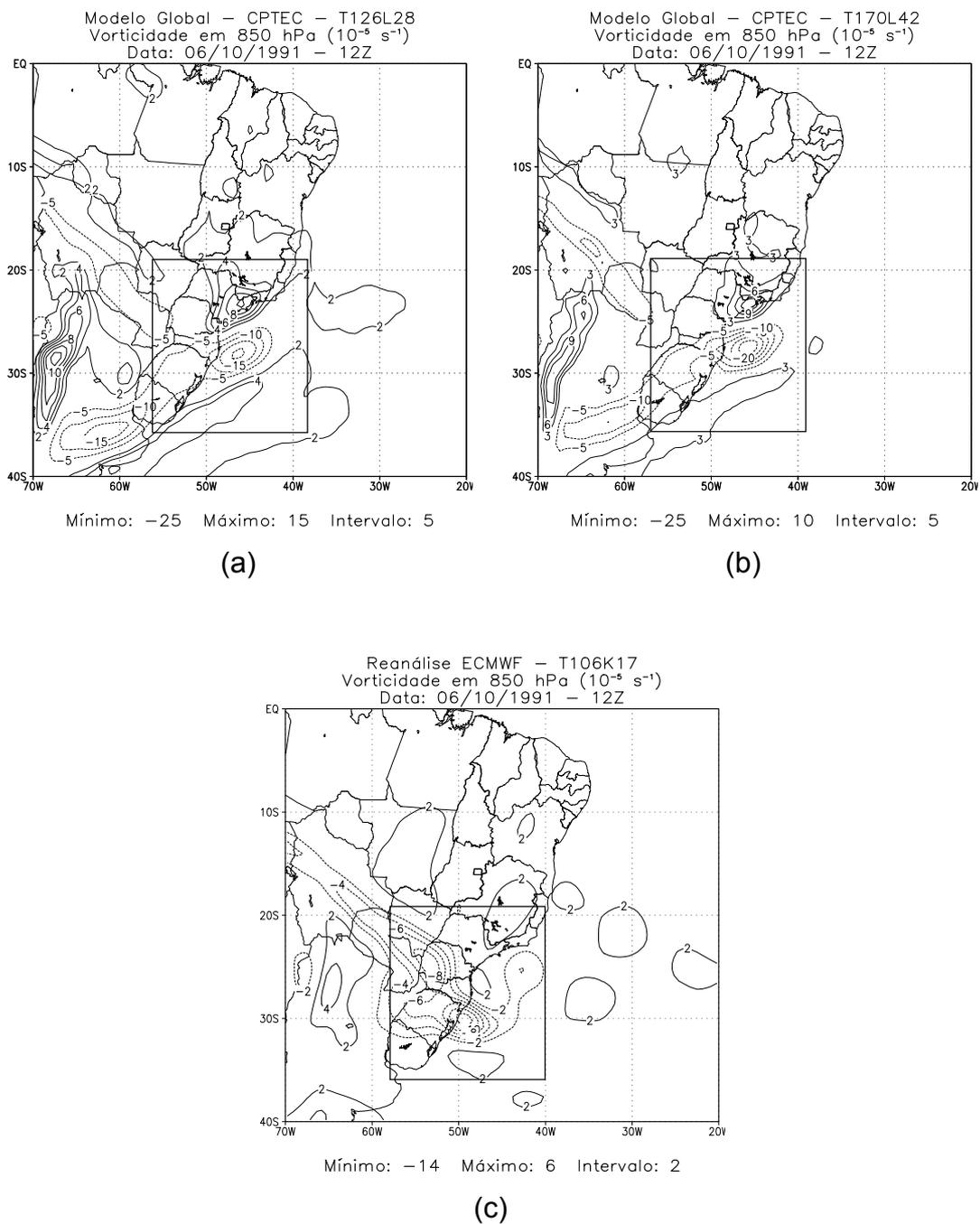
(a)

(b)



(c)

**FIGURA 4.33** – Idem Figura 4.32, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



**FIGURA 4.34** – Idem Figura 4.32, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.

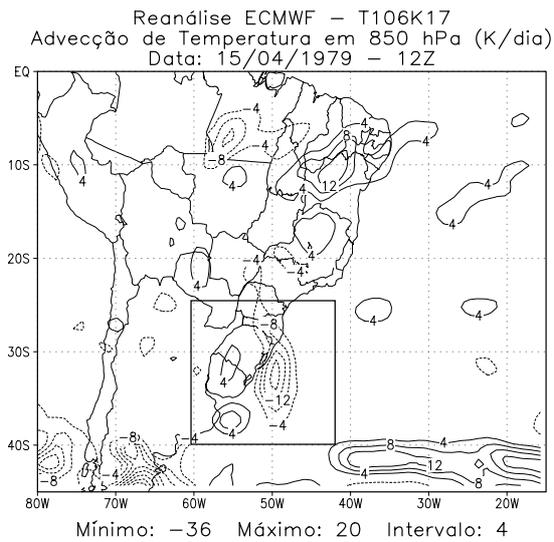
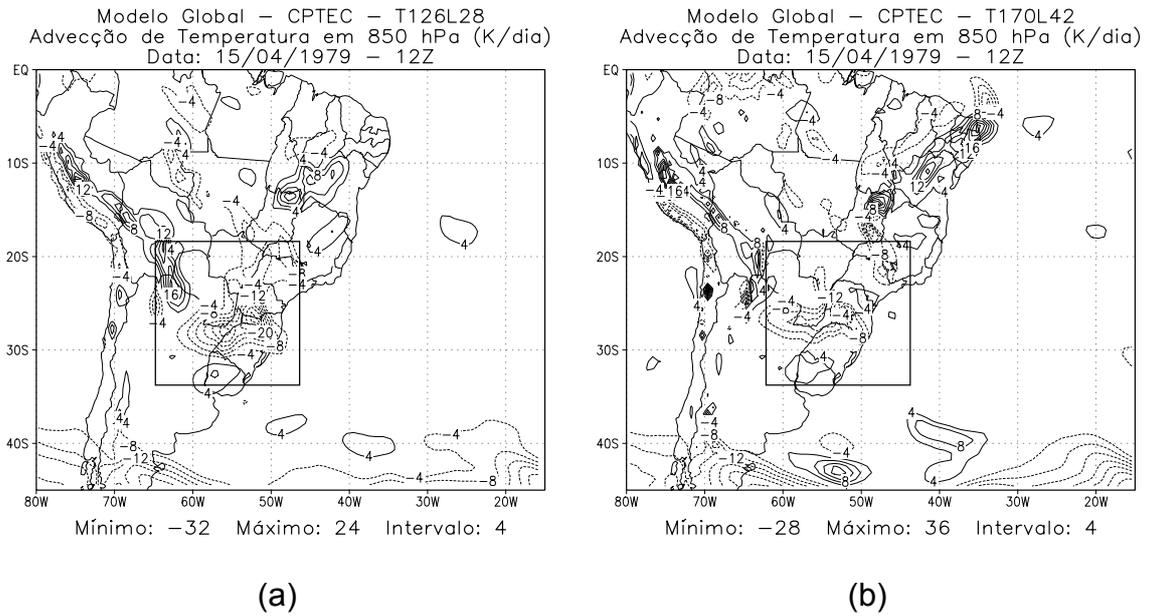
Analisando o campo de advecção de temperatura para o nível de 850 hPa Figuras 4.35 (c), 4.36 (c) e 4.37 (c); e o campo de convergência do fluxo de umidade específica (positivo significa convergência) integrado na vertical Figuras 4.38 (c), 4.39 (c) e 4.40 (c) para os três estágios maduros dos SSMNVI's , podemos observar que os principais aspectos destas figuras são a advecção térmica fria e a divergência do fluxo de umidade em 850 na região do SSMNVI.

O caso de abril de 1979 (Figura 4.35 (c)) mostra dois núcleos sobre o sul do Brasil e o Uruguai, um quente (advecção térmica quente) a oeste do núcleo frio (advecção térmica fria), mostrando-se um pouco diferente do simulado pelo modelo, tanto para o T126L28 como para o T170L42, Figuras 4.35 (a) e (b) respectivamente. O modelo simulou uma região de advecção fria situado ao norte do núcleo quente, um pouco mais intensa para o T126L28 e mais deslocado para o sul do Brasil, do que mostra a reanálise do ECMWF. Para o campo de convergência do fluxo de umidade (Figura 4.38 (c)), podemos observar um forte núcleo, mostrando divergência de umidade sobre o Uruguai, seguido por um núcleo de convergência estendendo-se para o oceano, o que concorda com o campo de precipitação (Figura 4.20 (c)), onde havia um núcleo de precipitação sobre a região de convergência de umidade. A simulação do modelo (Figura 4.38 (a) e (b)) está com excelente concordância com a reanálise, mostrando-se apenas um pouco mais ao norte e menos inclinado, ocupando uma área relativamente menor, mas com maior intensidade nos valores absolutos desses campos, em comparação com a reanálise.

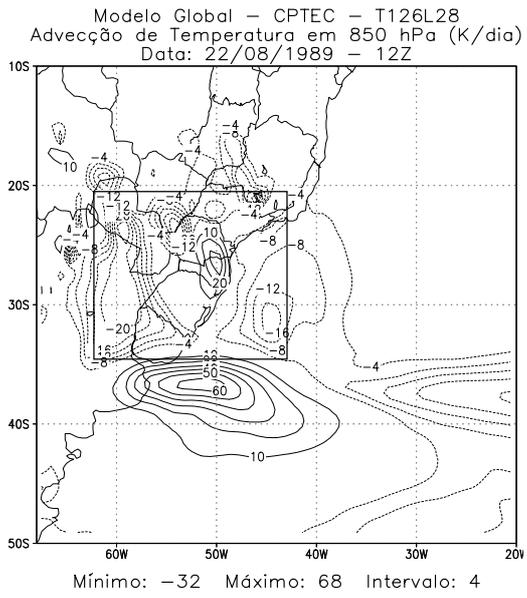
Podemos observar pelas Figuras 4.36 (c) e 4.37 (c) que houve uma semelhança muito grande, tanto para o campo de advecção de temperatura em 850 hPa, como para o campo de convergência do fluxo de umidade para os estágios maduros, ocorridos em agosto de 1989 e outubro de 1991, onde podemos observar advecção fria e núcleos de divergência e convergência de

umidade na região do SSMNVI. Para o caso ocorrido em agosto de 1989, vale ressaltar a presença de um núcleo muito forte de advecção quente (Figura 4.36 (c)) e úmido (Figura 4.39 (c)) ao sul da ocorrência do SSMNVI, muito bem identificado pelo modelo (Figuras 4.36 (a) e (b) e 4.39 (a) e (b)), apenas um pouco mais ao norte e com propagação mais lenta do que observada pela reanálise (Figura 4.36 (c)).

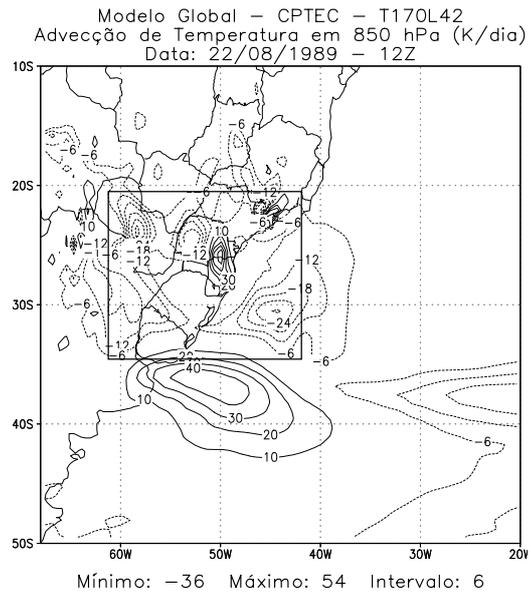
O caso de outubro de 1991 mostra que os campos de advecção de temperatura modelados (Figura 4.37 (a) e (b)) têm comportamento semelhante aos analisados (Figura 4.37 (c)), porém são em geral mais intensos, principalmente a advecção quente mais ao sul do SSMNV. Já os campos de convergência do fluxo de umidade (Figura 4.40 (a) e (b)) simulados têm intensidade comparável, com os valores positivos (convergência), ligeiramente mais intensos e na região do SSMNV ocupam uma área maior.



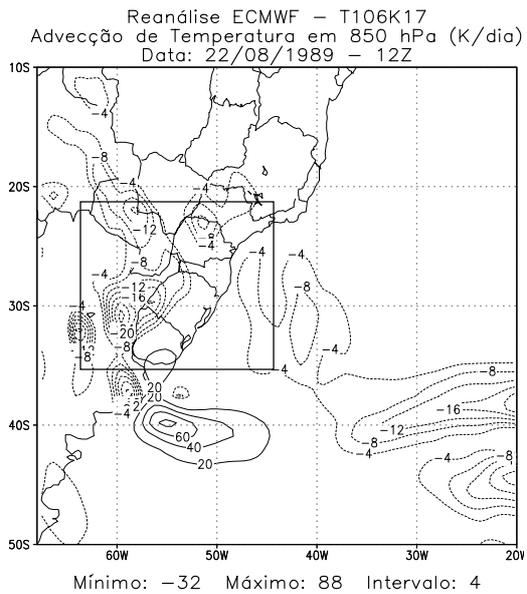
**FIGURA 4.35** – Advecção de Temperatura (K/dia) em 850 hPa para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



(a)

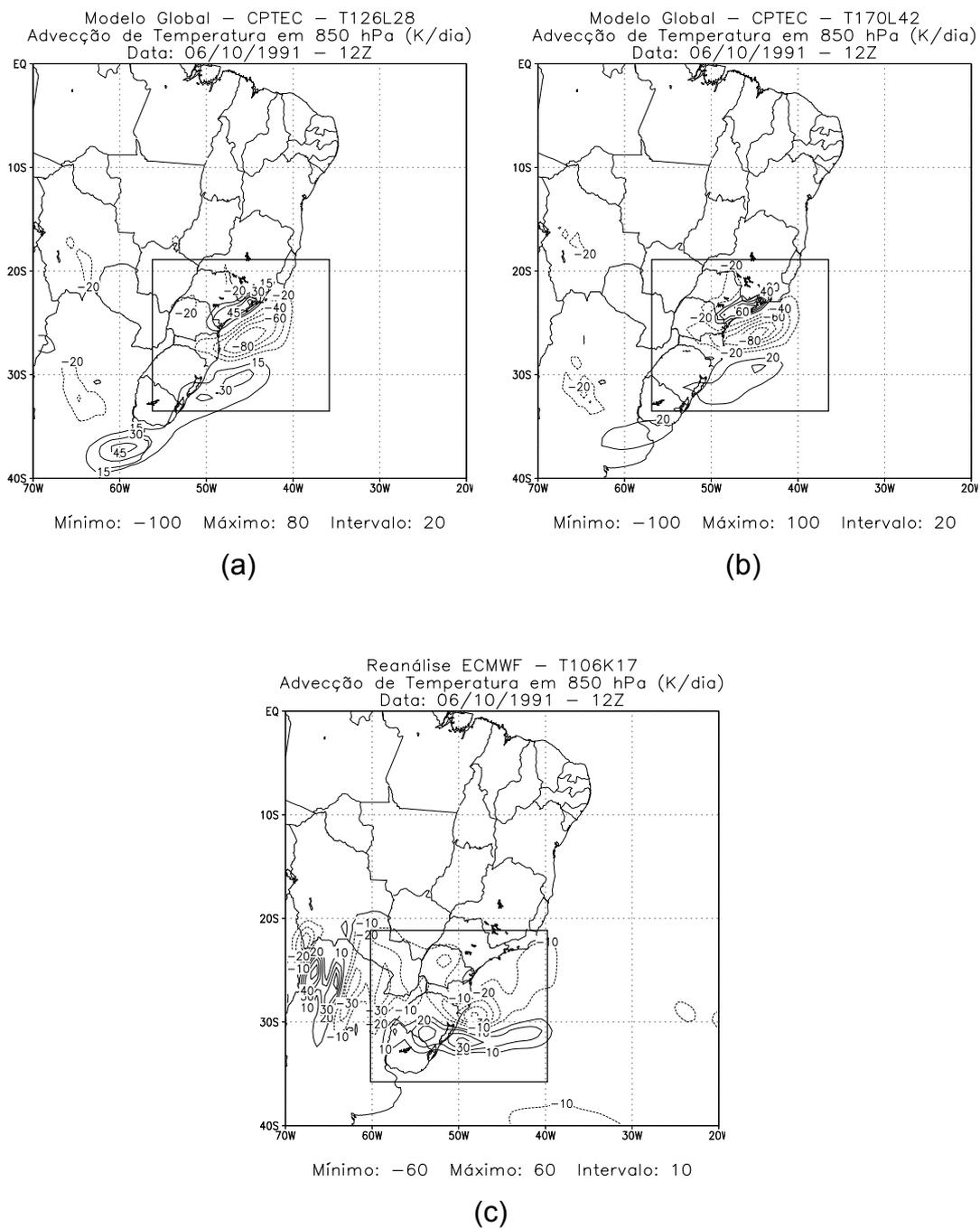


(b)

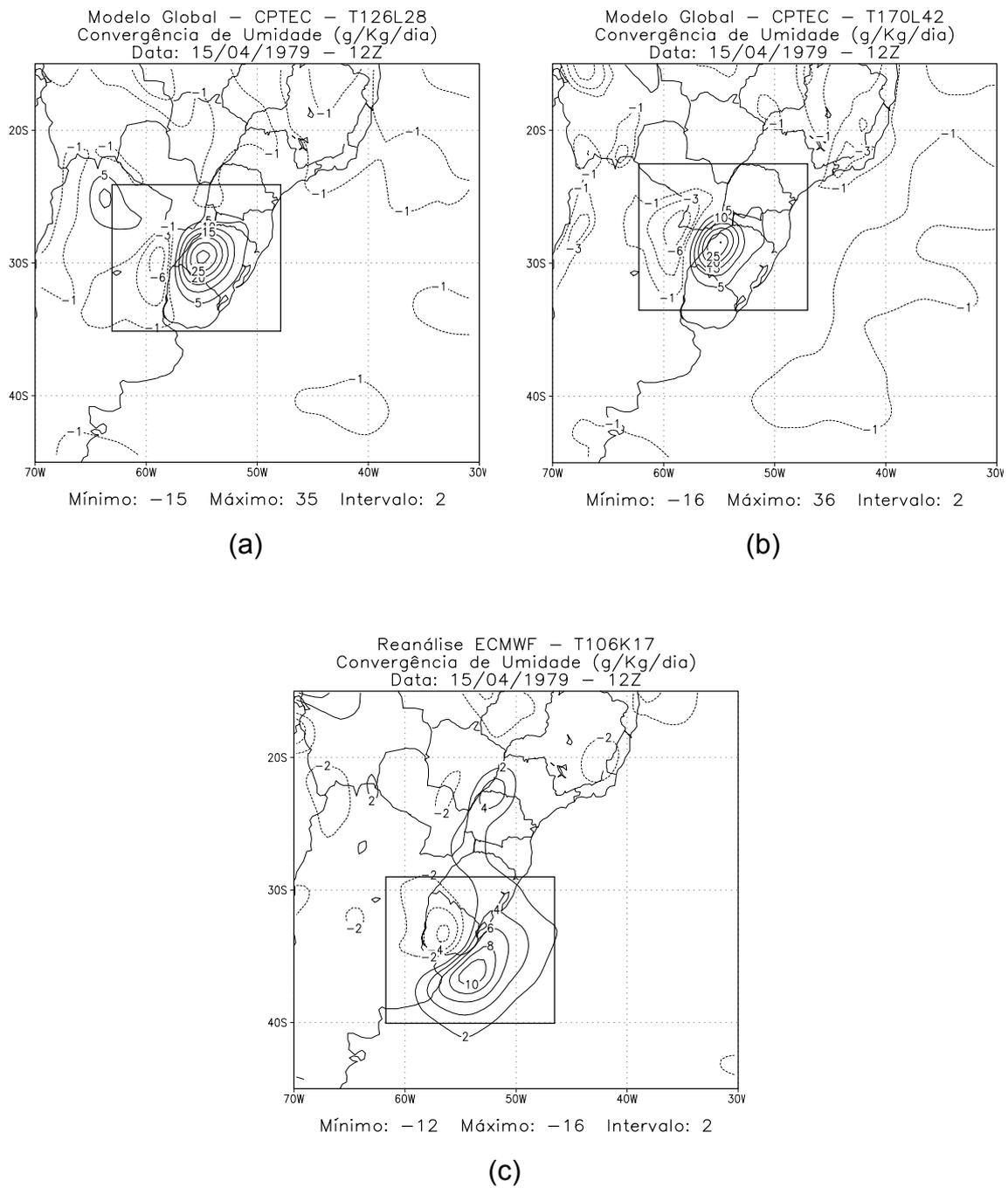


(c)

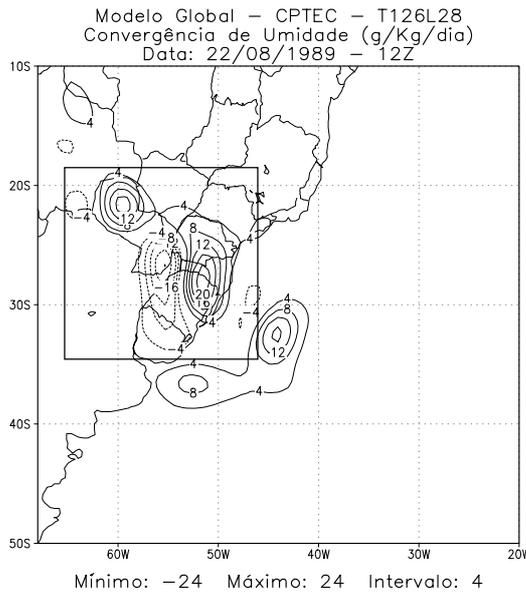
**FIGURA 4.36** – Idem Figura 4.35, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



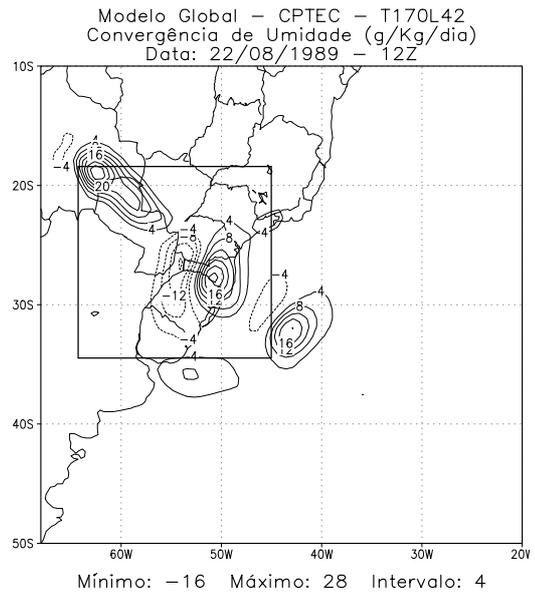
**FIGURA 4.37** – Idem Figura 4.35, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.



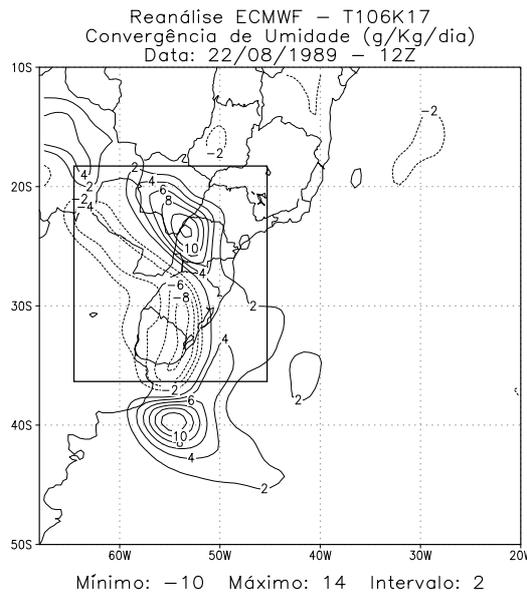
**FIGURA 4.38** – Convergência de umidade (g/Kg/dia) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



(a)

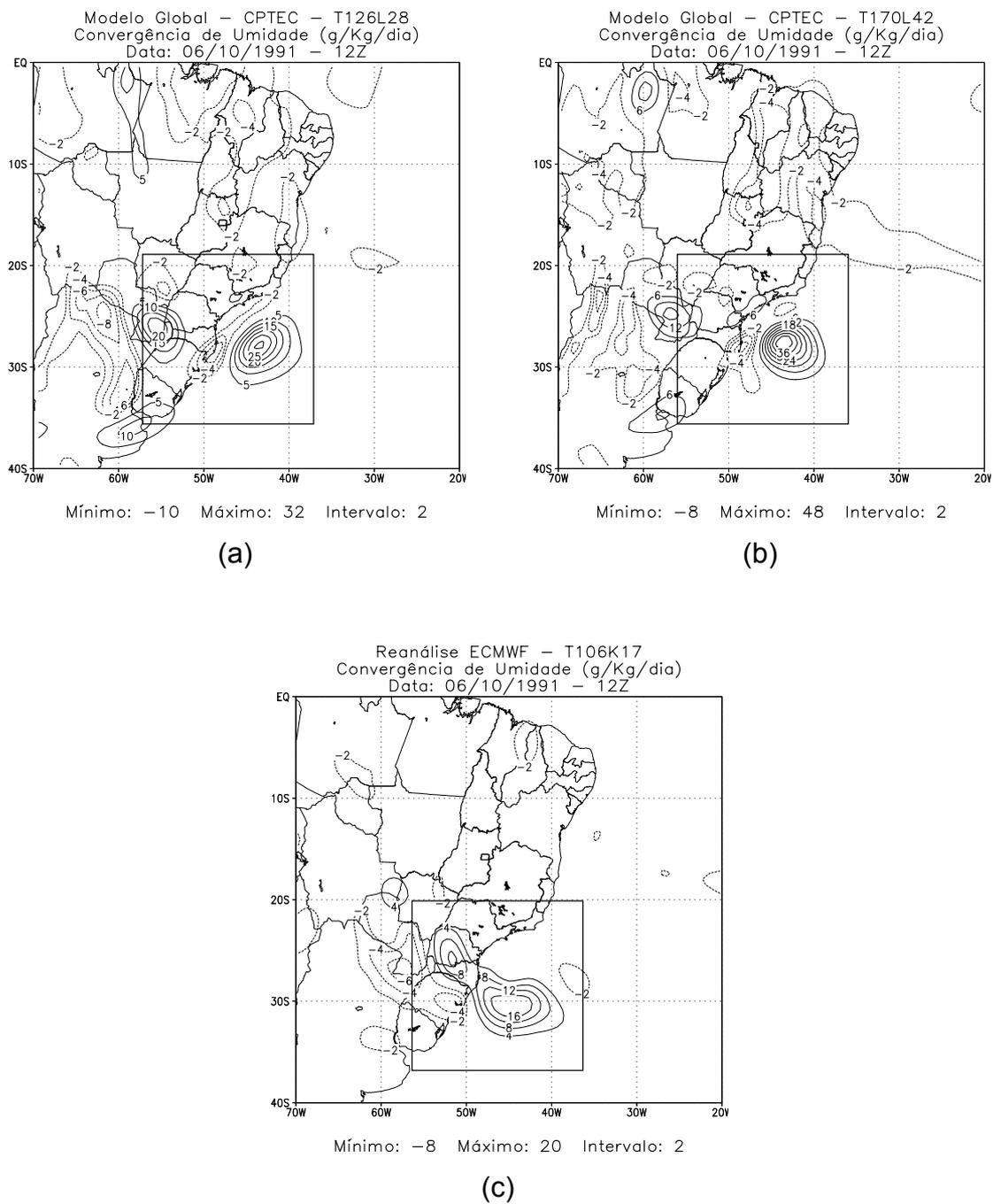


(b)



(c)

**FIGURA 4.39** – Idem Figura 4.38, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.

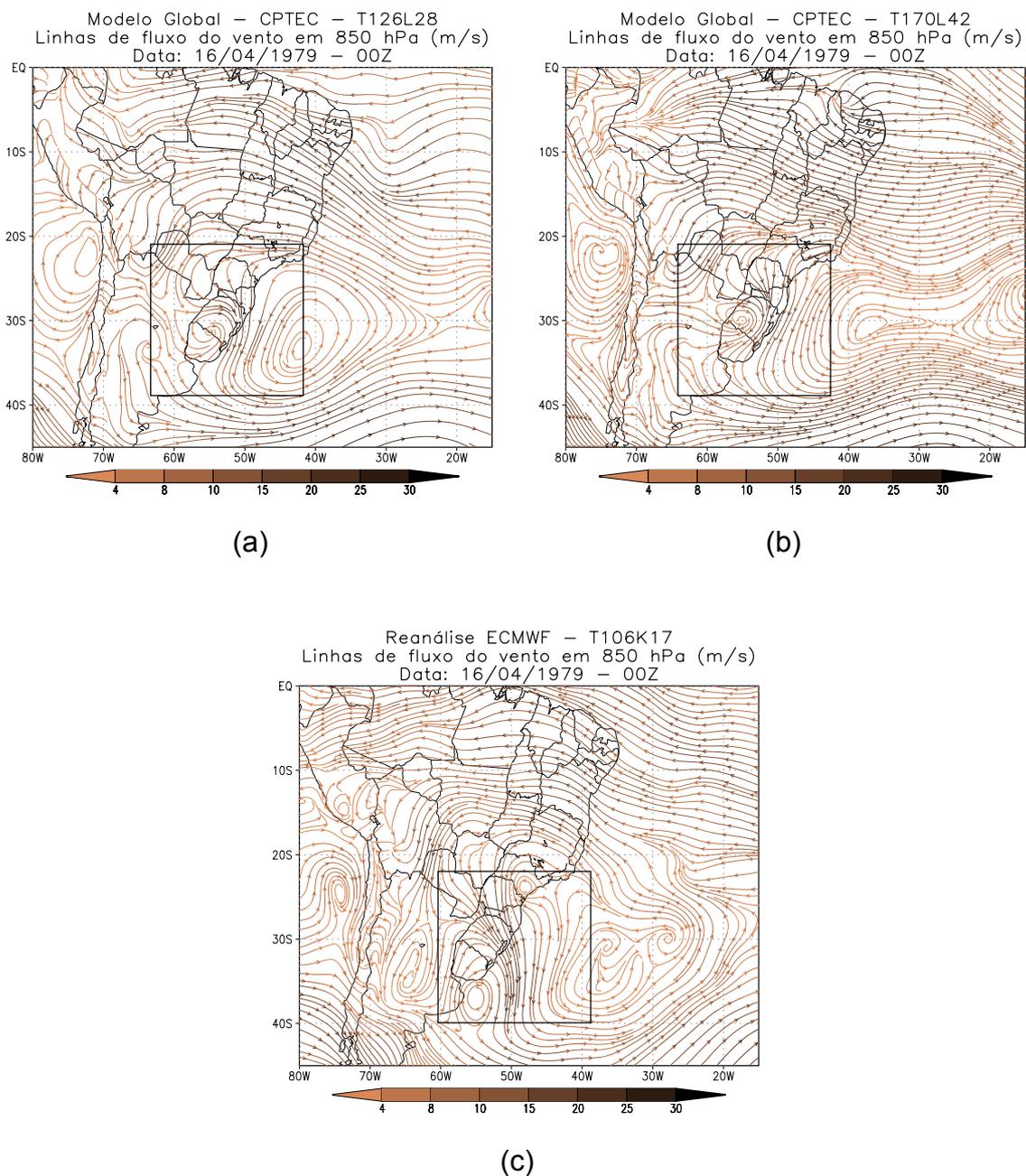


**FIGURA 4.40** – Idem Figura 4.38, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.

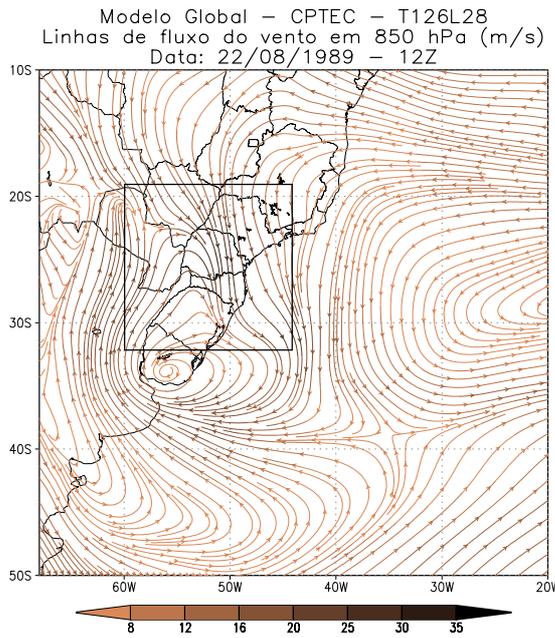
Para finalizar esse capítulo, as Figuras 4.41 a 4.43 mostram as linhas de fluxo do vento em 850 hPa, e as Figuras 4.44 a 4.46 mostram o campo da magnitude do vento também em 850 hPa para os três casos. Em geral, podemos observar pela reanálise (item (c)) de cada figura que há um núcleo de circulação ciclônica relativamente intenso na região que representa o estágio maduro do SSMNVI. Vale ressaltar que para o caso ocorrido em agosto de 1989, o modelo conseguiu identificar muito bem a região onde o SSMNVI está atuando (Figuras 4.42 e 4.45).

Para o caso de outubro de 1991 podemos notar que o modelo de média resolução (4.43 (b) e 4.46 (b)) mostra um SSMNVI com maior intensidade e ventos fortes em uma área maior, e o modelo de mais alta resolução mostra uma circulação menos intensa. Pela Figura 4.46 (b), pode-se verificar que há dois núcleos de baixa e de alta magnitude de vento oeste do SSMNV para o modelo T126L28, enquanto que no modelo T170L42 esses núcleos tendem a desaparecer e o núcleo de vento máximo se aproxima mais da localização dada na reanálise. Esta configuração de vento mais próxima à da análise em alta resolução certamente contribui para uma melhor definição da convergência do fluxo de umidade, o que certamente melhora a previsão da precipitação.

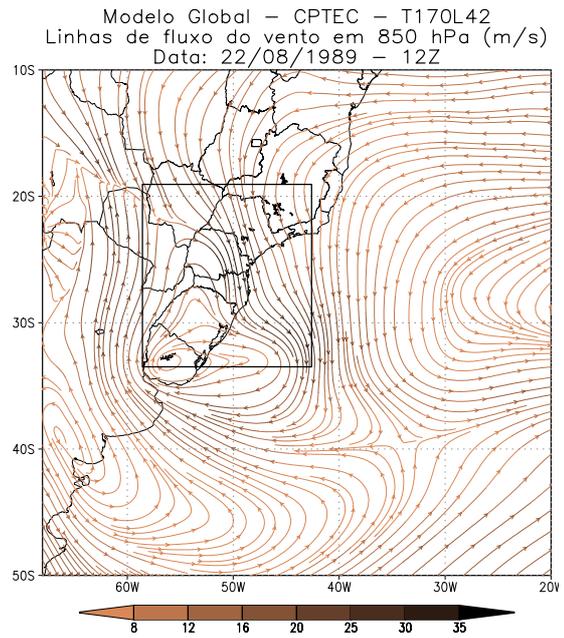
Em geral, as configurações dos campos das Figuras (item (b)) previstos pelo modelo T170L42 são semelhantes às das Figuras (item (a)) previstos pelo T126L28, porém apresentando um detalhamento maior. Para os quatro casos aqui estudados, o modelo conseguiu simular muito bem a evolução e principalmente, o estágio maduro do SSMNVI, apenas com uma propagação mais lenta do que observada na análise.



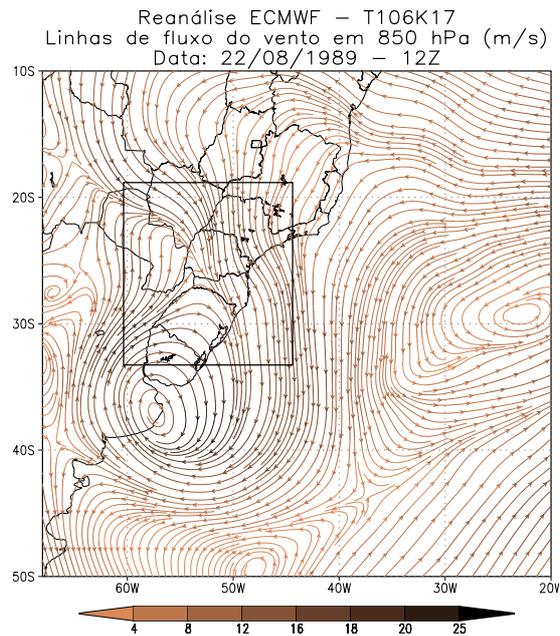
**FIGURA 4.41** – Linhas de fluxo do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTEC - T126L28; (b) MGCPTEC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



(a)

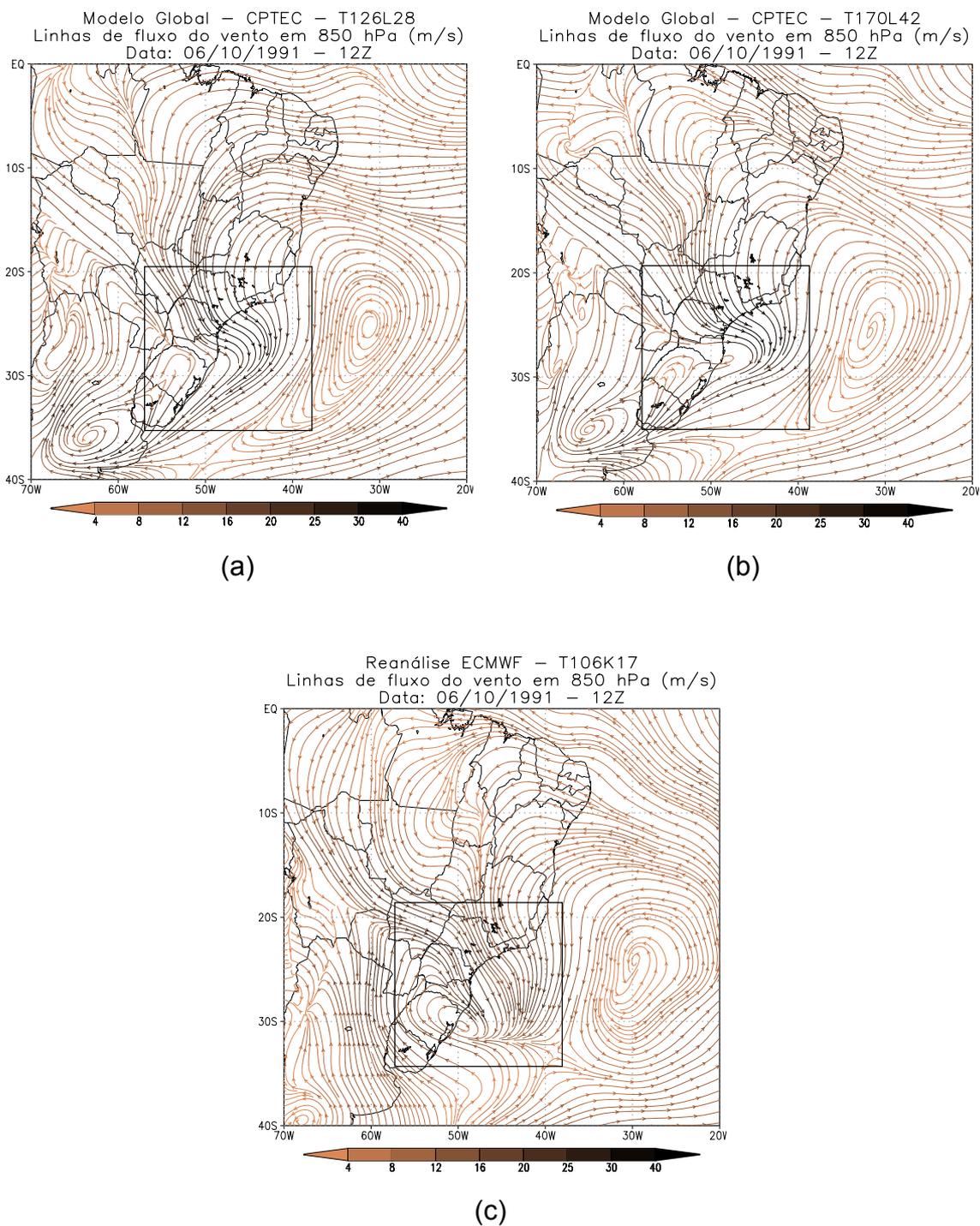


(b)

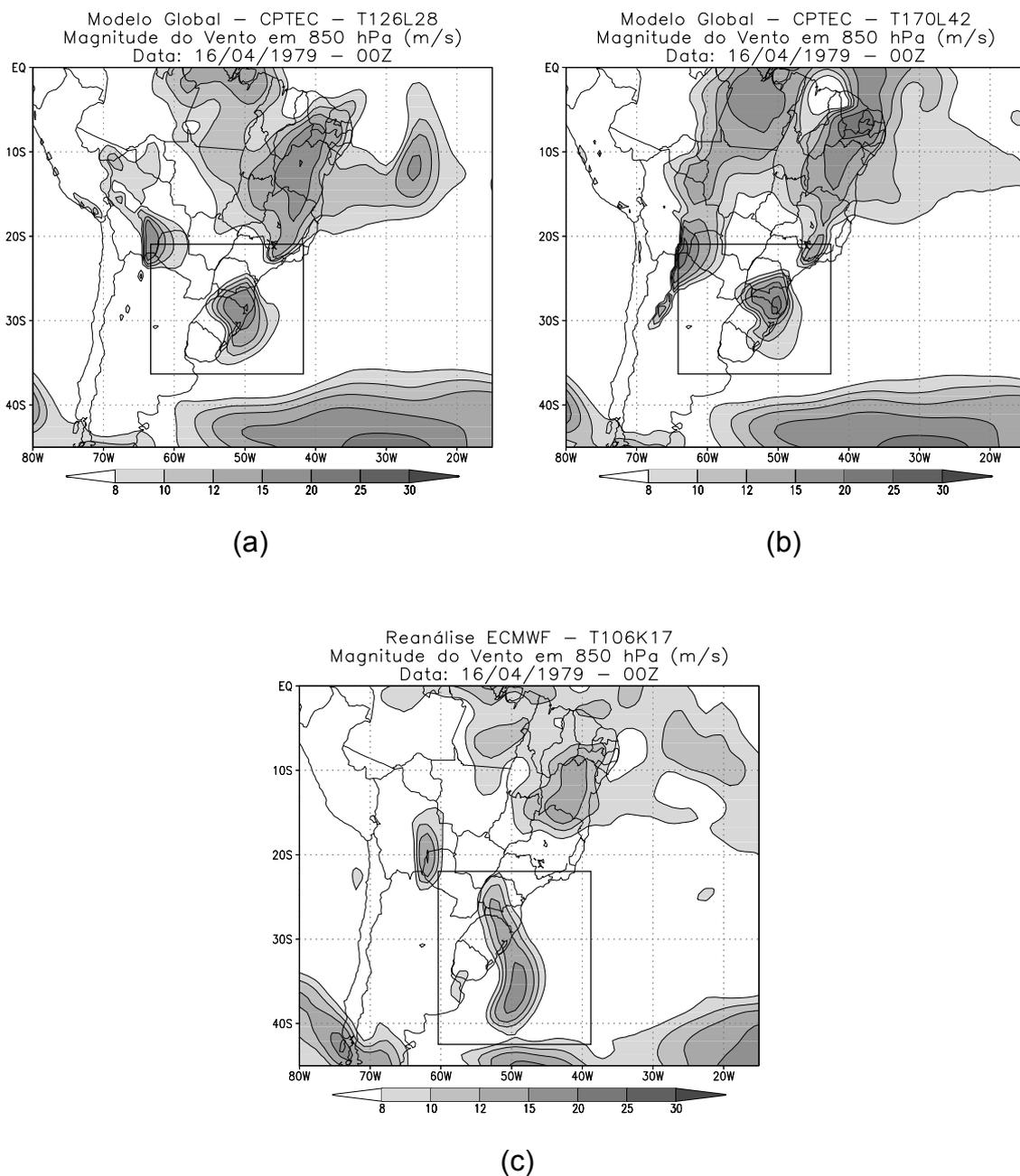


(c)

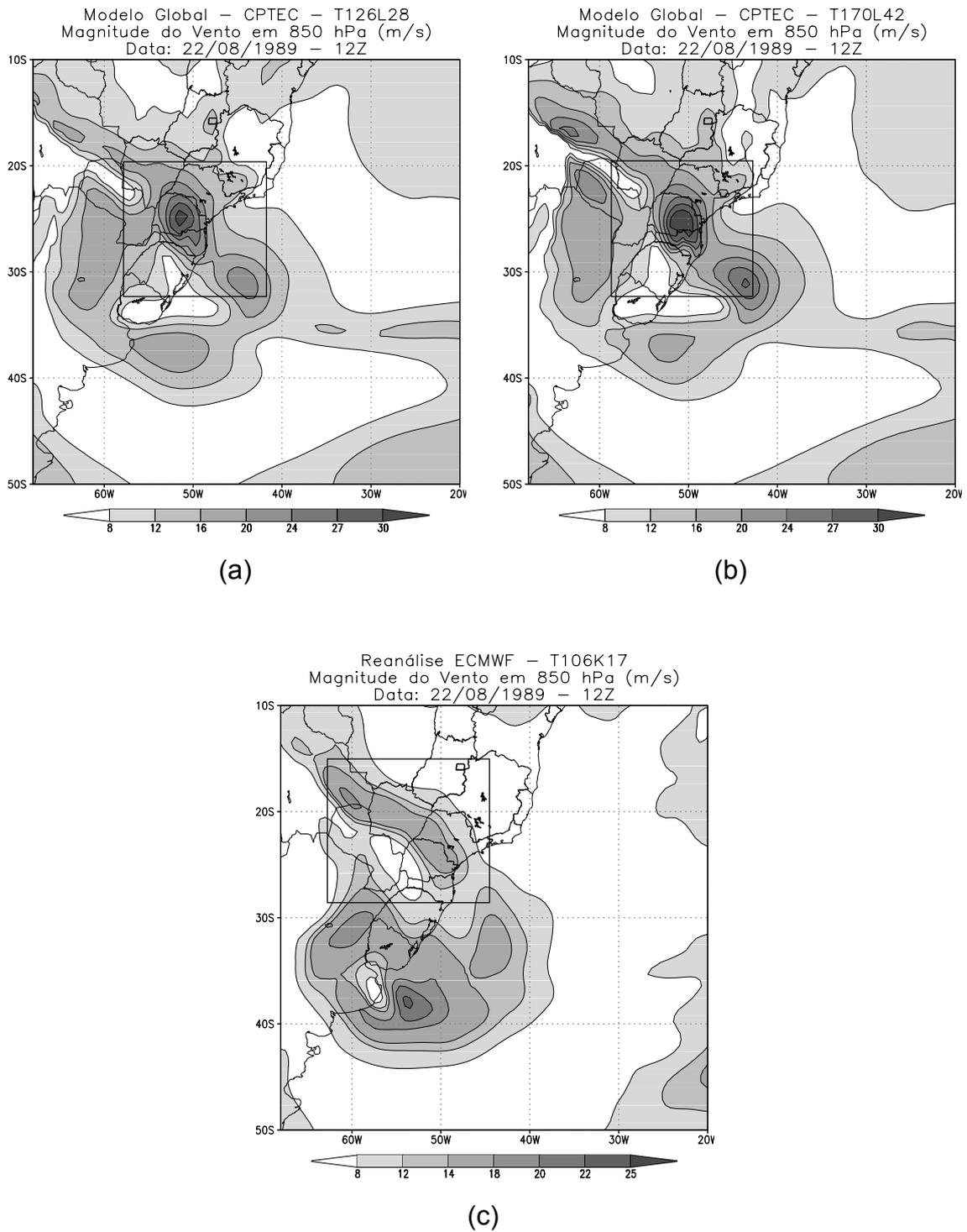
**FIGURA 4.42 – Idem Figura 4.41, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.**



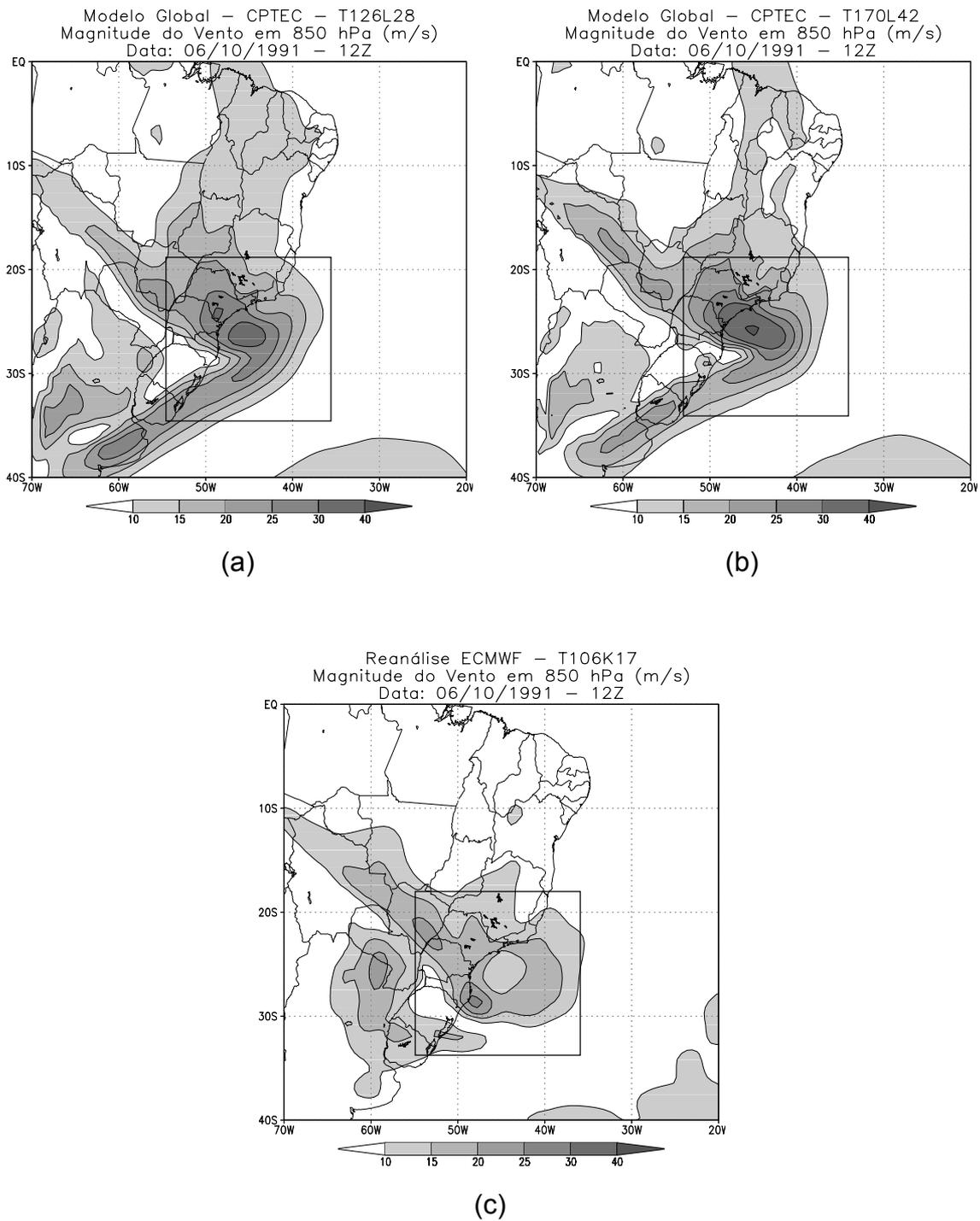
**FIGURA 4.43** – Idem Figura 4.41, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.



**FIGURA 4.44** – Magnitude do vento em 850 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ) para o dia 15/04/1979 - 12Z. (a) MGCPTC - T126L28; (b) MGCPTC - T170L42 e (c) Reanálise ECMWF – T106K17.



**FIGURA 4.45** – Idem Figura 4.44, exceto para o dia 22/08/1989 - 12Z.



**FIGURA 4.46** – Idem Figura 4.44, exceto para o dia 06/10/1991 - 12Z.

### 4.3 – Estudo da Performance do Mgcptec para as Resoluções T126L28 e T170L42 para os Dois Esquemas de Convecção

Nesta seção vamos avaliar a performance do MGCPTEC em relação às resoluções e os dois esquemas de convecção utilizados no caso de setembro de 2003. Os índices estatísticos utilizados na avaliação dos modelos foram obtidos a partir das equações a seguir:

$$EMP = \frac{1}{n} \sum (P - A) \quad (4.1)$$

$$EMQ = \left[ \frac{1}{n} \sum (P - A)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

onde:

$P$  – previsão,  $A$  – análise inicial,  $n$  – número de pontos de grade na área verificada.

O erro médio da previsão (EMP) permite avaliar a tendência do modelo em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) os campos. O erro médio quadrático (EMQ) dá a amplitude média dos erros da previsão.

A Tabela 4.1 dá os cálculos do EMP e EMQ para as resoluções T126L28 e T170L42 para o esquema de convecção tipo Kuo, que roda operacionalmente desde 1994 no CPTEC; e a Tabela 4.2 para o esquema de convecção RAS.

Os campos analisados são: altura geopotencial em 1000 hPa, água precipitável, convergência de umidade, advecção de temperatura, temperatura, magnitude do vento e vorticidade, todos em 850 hPa.

De acordo com o EMP, o modelo que utilizou o esquema Kuo, tende a superestimar os valores da altura geopotencial em 1000 hPa, água precipitável e vorticidade em 850 hPa e subestimar os campos de convergência de umidade, advecção de temperatura, temperatura e magnitude do vento, todos em 850 hPa. Já o modelo com esquema de convecção RAS, tende a subestimar a maioria dos campos, exceto o campo da altura geopotencial em 1000 hPa, onde o modelo superestima os valores. No geral, os valores do EMQ para o esquema RAS são menores que os do Kuo.

Para questão de comparação, encontra-se no **Apêndice E**, as Tabelas E.1, E.2 e E.3 para os outros três casos de SSMNVI, onde se encontram os valores do EMP E EMQ somente para o estágio maduro do SSMNVI.

**TABELA 4.1** – Cálculo EMP e EMQ para as resoluções T126L28 e T170L42 do caso ocorrido em setembro de 2003 para o esquema de convecção Kuo. O período de 60 horas (em negrito) representa o estágio maduro do SSMNVI.

<b>Caso:</b> setembro de 2003 - Kuo					
<b>Rodada:</b> 18/09 - 22/09					
<b>Latitude:</b> -50 até -14					
<b>Longitude:</b> -70 até -25					
<b>Título:</b> Altura Geopotencial em 1000 hPa (m)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	21,53	9,99	21,55	10,68
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	22,93	10,00	25,05	9,39
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>39,30</b>	<b>19,91</b>	<b>42,31</b>	<b>21,83</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	46,79	27,12	50,15	27,53

(continua)

TABELA 4.1 – Continuação.

Título: Água Precipitável (mm)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	4,32	0,39	4,60	0,58
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	6,13	0,31	6,45	0,53
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>6,11</b>	<b>0,88</b>	<b>6,27</b>	<b>1,20</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	5,59	0,09	5,81	0,34
Título: Convergência de Umidade (g/Kg/dia)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	2,49	-0,05	2,81	0,04
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	3,41	-0,13	3,79	-0,18
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>3,69</b>	<b>-0,09</b>	<b>3,84</b>	<b>-0,10</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	3,05	-0,26	3,33	-0,31
Título: Advecção de Temperatura em 850 hPa (K/dia)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	7,76	-0,03	9,22	-0,10
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	7,66	0,28	8,46	0,46
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>7,87</b>	<b>-1,37</b>	<b>8,73</b>	<b>-1,38</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	6,47	-0,26	7,00	0,02
Título: Temperatura em 850 hPa (°C)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	1,91	-0,44	2,13	-0,33
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	1,90	-0,21	1,99	-0,04
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>2,15</b>	<b>-0,74</b>	<b>2,14</b>	<b>-0,59</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	2,30	-0,97	2,22	-0,85
Título: Magnitude do Vento em 850 hPa (ms <sup>-1</sup> )					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	4,10	-0,55	4,19	-0,55
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	4,60	-0,73	4,61	-0,61
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>6,47</b>	<b>-0,18</b>	<b>6,76</b>	<b>-0,27</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	6,11	-0,68	6,49	-0,92

(continua)

**TABELA 4.1 – Conclusão.**

<b>Título: Vorticidade em 850 hPa (<math>10^5 \text{ s}^{-1}</math>)</b>					
<b>Resolução:</b>	<b>T126L28</b>			<b>T170L42</b>	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	2,96	0,11	3,27	0,08
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	3,12	0,01	3,38	0,03
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	4,08	0,20	4,29	0,19
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	4,02	0,17	4,27	0,18

**TABELA 4.2 – Idem Tabela 4.1, exceto que para o esquema de convecção RAS.**

<b>Caso: setembro de 2003 - RAS</b>					
<b>Rodada: 18/09 - 22/09</b>					
<b>Latitude: -50 até -14</b>					
<b>Longitude -70 até -25</b>					
<b>Título: Altura Geopotencial em 1000 hPa (m)</b>					
<b>Resolução:</b>	<b>T126L28</b>			<b>T170L42</b>	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	14,13	4,14	16,88	4,96
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	12,56	5,06	33,13	18,96
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>20,35</b>	<b>7,77</b>	<b>28,13</b>	<b>7,04</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	23,54	16,10	46,46	32,41
<b>Título: Água Precipitável (mm)</b>					
<b>Resolução:</b>	<b>T126L28</b>			<b>T170L42</b>	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	2,27	0,69	2,37	0,66
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	3,95	-0,19	3,98	-0,30
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>4,16</b>	<b>-0,01</b>	<b>4,63</b>	<b>-0,54</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	5,58	-0,31	6,74	-1,17
<b>Título: Convergência de Umidade (g/Kg/dia)</b>					
<b>Resolução:</b>	<b>T126L28</b>			<b>T170L42</b>	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	1,61	-0,11	1,97	-0,10
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	2,37	-0,23	2,75	-0,13
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>2,20</b>	<b>-0,03</b>	<b>2,50</b>	<b>-0,14</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	2,68	-0,29	3,00	-0,18

(continua)

TABELA 4.2 – Conclusão.

Título: Advecção de Temperatura em 850 hPa (K/dia)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	6,35	-0,90	8,12	-1,17
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	5,32	0,15	8,25	-1,32
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>7,43</b>	<b>-0,86</b>	<b>8,63</b>	<b>-0,64</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	5,81	0,28	6,94	-0,87
Título: Temperatura em 850 hPa (°C)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	1,30	-0,02	1,55	-0,09
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	1,39	0,15	2,91	-1,24
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>1,71</b>	<b>-0,29</b>	<b>3,16</b>	<b>-1,61</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	1,93	-0,17	4,33	-2,51
Título: Magnitude do Vento em 850 hPa (ms <sup>-1</sup> )					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	4,10	-0,55	4,19	-0,55
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	4,60	-0,73	4,61	-0,61
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>6,47</b>	<b>-0,18</b>	<b>6,76</b>	<b>-0,27</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	6,11	-0,68	6,49	-0,92
Título: Vorticidade em 850 hPa (10 <sup>5</sup> s <sup>-1</sup> )					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
36 horas	19/09/2003 - 12 Z	2,43	-0,36	2,46	-0,27
48 horas	20/09/2003 - 00 Z	2,87	-0,07	3,06	0,07
<b>60 horas</b>	<b>20/09/2003 - 12 Z</b>	<b>3,79</b>	<b>-0,04</b>	<b>3,62</b>	<b>-0,35</b>
72 horas	21/09/2003 - 00 Z	3,87	-0,17	3,72	-0,82

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE DA PARTIÇÃO DE ENERGIA: MODOS VERTICAIS E HORIZONTAIS

Esse Capítulo inicia uma discussão sobre a partição e interação de energia entre os modos verticais e horizontais, e o efeito da resolução referente aos quatro casos de SSMNVI estudados no capítulo anterior.

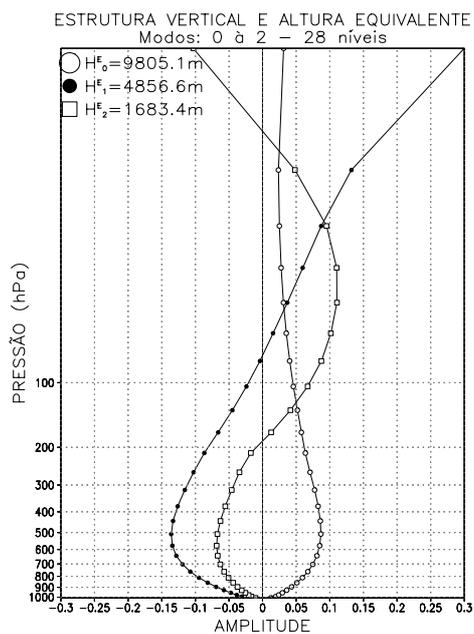
#### 5.1 – Partição da Energia Total entre os Modos Verticais

Os modelos em geral utilizam equações primitivas (descritas no Capítulo 3) e tais equações podem ser escritas em forma espectral tanto na horizontal quanto na vertical (Andrade, 1994). O desenvolvimento da técnica espectral utiliza como base de expansão as Funções Vetoriais de Hough, onde a estrutura horizontal é um problema de um oscilador harmônico acoplado forçado e a estrutura vertical desse sistema de equações, juntamente com as condições de contorno, formam um problema de Sturm–Liouville. Os autovalores da equação da estrutura vertical permitem a obtenção da estrutura horizontal para cada modo vertical normal, ou seja, cada equação da estrutura horizontal está associada a uma profundidade equivalente (autovalor) e a um modo vertical (autovetor). Essas funções podem ser utilizadas na análise de campos tridimensionais (Kashara e Puri, 1981) e também no estudo da partição de energia entre os modos verticais e horizontais, como mostra Andrade (1994).

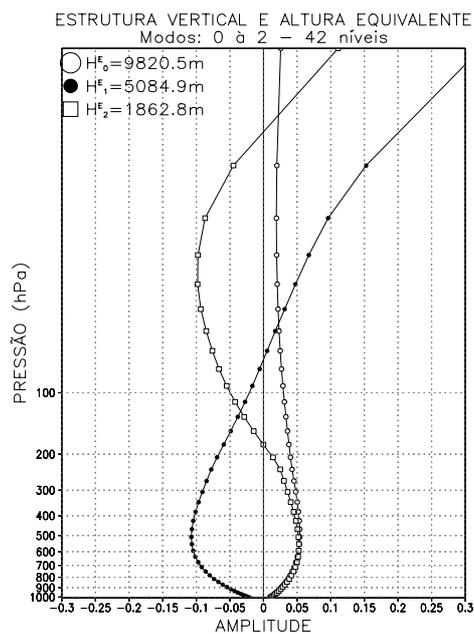
As soluções da estrutura vertical (Capítulo 3) fornecem os autovalores vistos na Figura 5.1. As estruturas verticais (autovetores) são mostradas para uma atmosfera padrão para 28 e 42 camadas. Na Figura 5.1 (a) e (b) 28 e 42 camadas, respectivamente, estão representados o primeiro modo vertical ou externo e os dois primeiros internos. Os três primeiros modos possuem

autovalores ou alturas equivalentes de aproximadamente 9805 m, 4857 m e 1683 para 28 camadas e 9821 m, 5085 m e 1863 m para 42 camadas. O primeiro modo  $n = 0$  para ambos os casos não tem zeros, sendo por isso denominado modo externo ou barotrópico equivalente. Os demais, denominados modos verticais internos, têm o número de zeros correspondente ao índice vertical  $n$  e com estrutura cada vez mais complexa, sendo denominados de modos baroclínicos. Os modos internos  $n = 1$  e 2 apresentam para ambos uma estrutura vertical mais complexa, com um zero e um máximo em torno de 500 hPa, para o segundo modo, e dois zeros e dois máximos (em torno de 550 hPa e acima da tropopausa) para o terceiro modo.

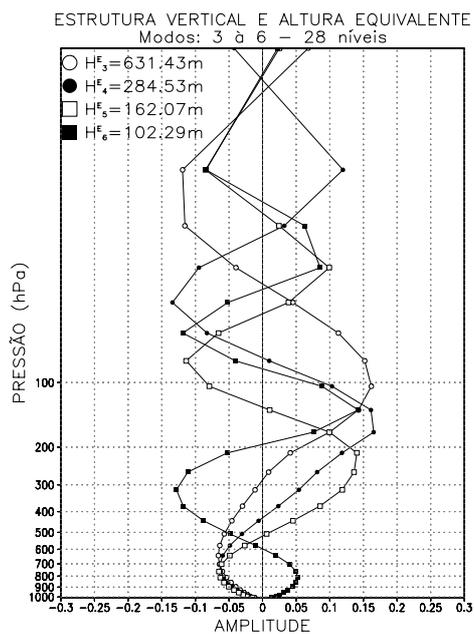
Os modos verticais internos, de 3 a 6 para 28(42) camadas, têm suas estruturas verticais representadas na Figura 5.1 (c) e (d), e alturas equivalentes de aproximadamente 631 (732) m, 285 (342) m, 163 (194) m e 102 (127) m. Ressalta-se uma certa semelhança entre esses modos, tanto para 28 como para 42 camadas, com valores de alturas equivalentes bem próximas. Destaca-se o modo com altura equivalente em torno de 300 m ( $n = 4$ ), que possui máximos em torno de 800 e 200 hPa e zero em torno de 400 hPa. Este modo é o que contém a maior parte da energia na região tropical (Silva Dias e Bonatti, 1986), principalmente próximo à região de atividade convectiva de grande escala intensa.



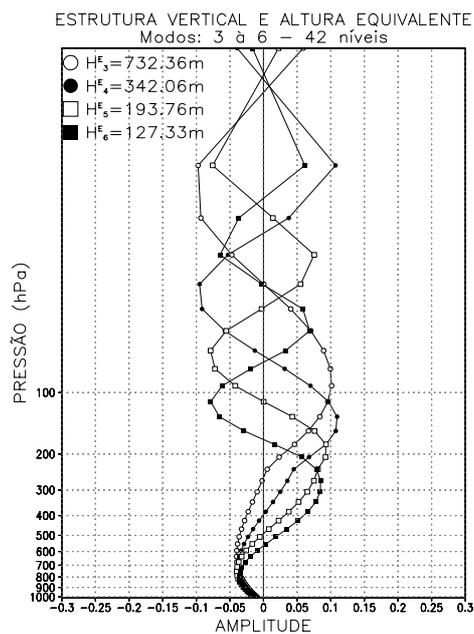
(a)



(b)



(c)



(d)

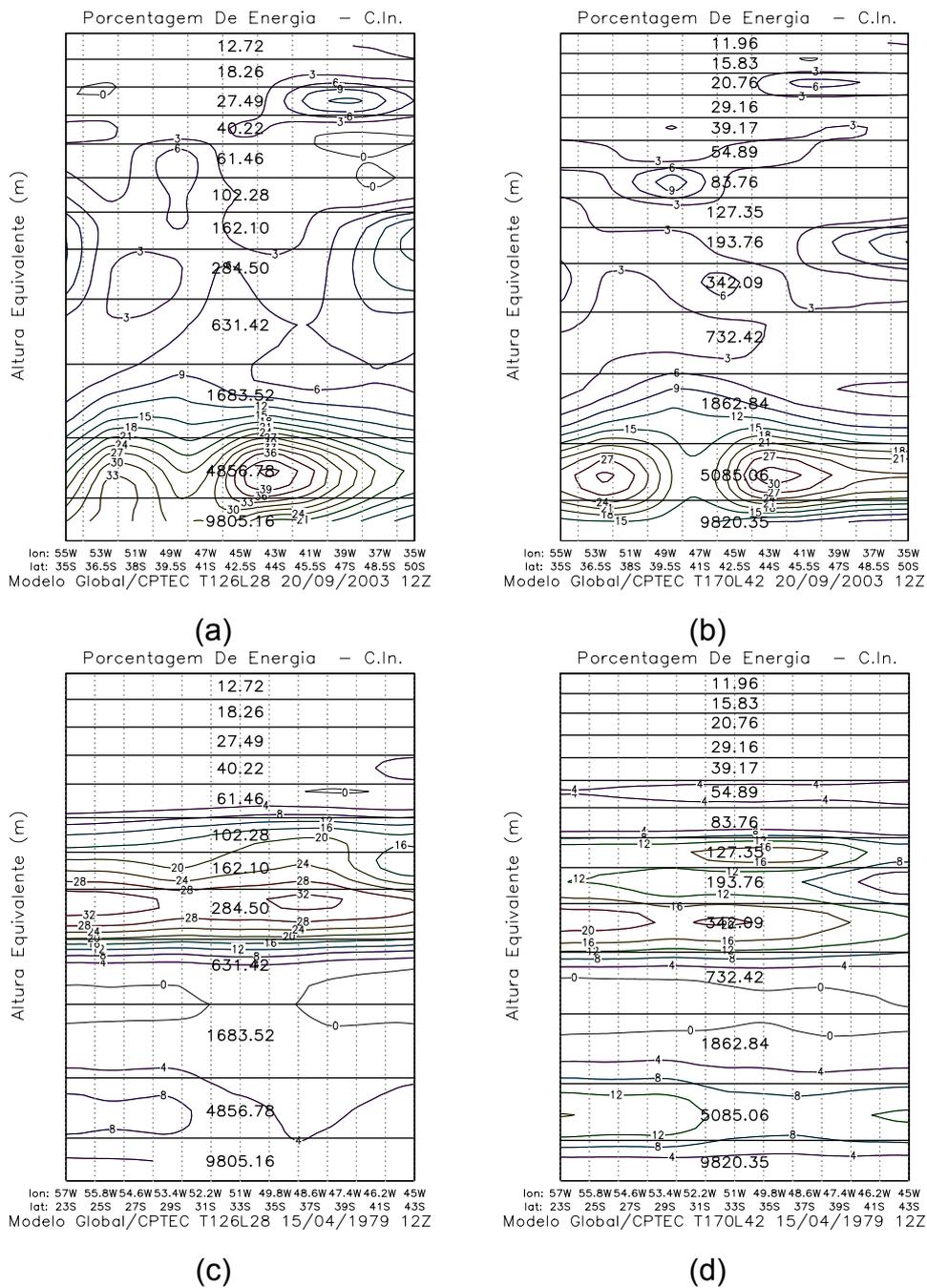
**FIGURA 5.1** – Estrutura vertical e altura equivalente (m) para uma atmosfera padrão: (a) e (c) modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6 respectivamente para 28 camadas; (b) e (d) modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6 respectivamente para 42 camadas.

A Figura 5.2 (a) a (h) apresenta uma seção ao longo do estágio maduro dos quatro casos de SSMNVI, mostrando onde se encontra a maior concentração de energia para esses modos verticais e suas respectivas alturas equivalentes.

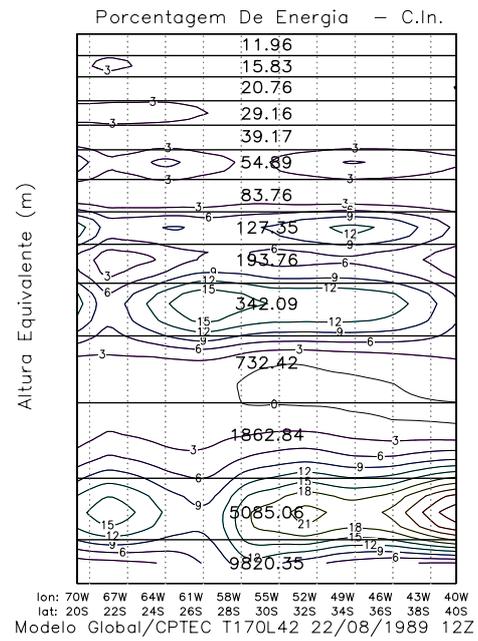
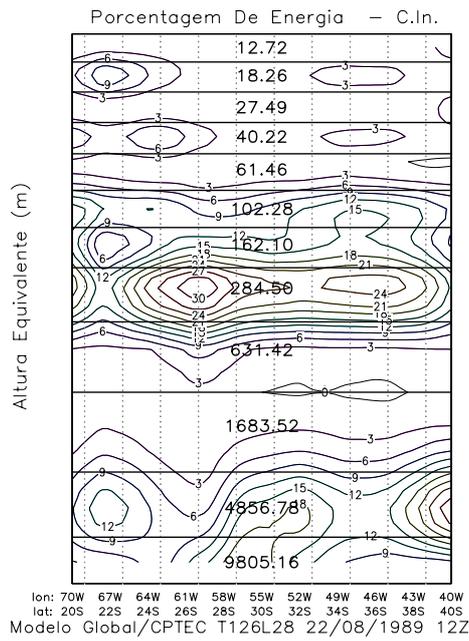
Para o caso ocorrido em setembro de 2003, Figura 5.2 (a) e (b), a maior concentração de energia no local do estágio maduro do SSMNVI se encontra nos 3 primeiros modos verticais, ambos em boa concordância para a média e alta resolução. Nos demais casos, abril de 1979 (c) e (d), agosto de 1989 (e) e (f) e outubro de 1991 (g) e (h), a maior concentração de energia na seção ao longo da nuvem vírgula, encontra-se nos modos verticais internos de 3 a 6, valendo ressaltar que, para a alta resolução (T170L42), há uma maior intensidade da percentagem de energia para os modos verticais de 0 a 2. Pode-se observar que a maior concentração de energia, ao longo da seção dos SSMNVI's ocorre nos 6 primeiros modos verticais, para isso o estudo da partição e interação de energia entre os modos verticais e horizontais se concentrará entre os modos verticais 0 a 2 e 3 a 6. Devido a isso, os modos verticais nesta Dissertação serão divididos da seguinte maneira:

- a) Primeira categoria (0 a 2): compreenderá os modos com altura equivalente acima de 600 m;
- b) segunda categoria (3 a 6): alturas entre 100 e 600 m;
- c) terceira categoria (7 a 11(13)): alturas entre 10 e 100 m.

Há ainda uma quarta categoria incluindo-se os demais modos, com altura equivalente abaixo de 10 m, mas não será estudada nessa dissertação. Essa divisão é baseada em uma extensão dos resultados de Silva Dias e Bonatti (1986)

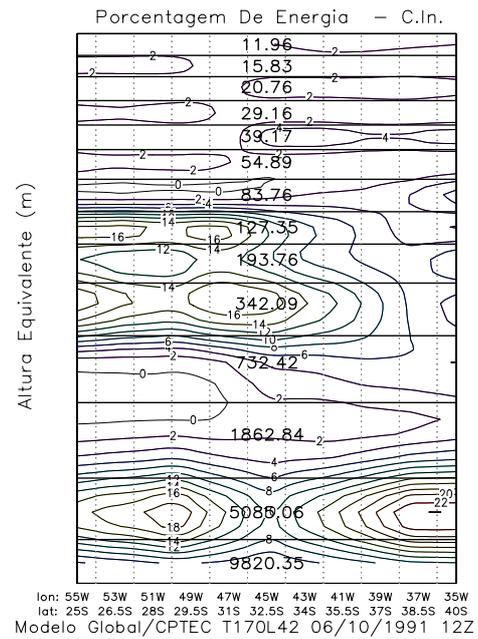
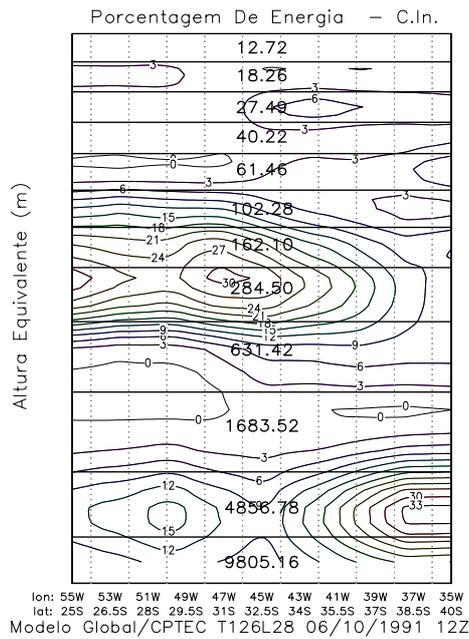


**FIGURA 5.2** – Secção ao longo do estágio maduro do SSMNVI para os casos: 20/09/2003 - 12Z (a) e (b), 15/04/1979 - 12Z (c) e (d), 22/08/1989 - 12Z (e) e (f) e 06/10/1991 - 12Z (g) e (h) da porcentagem de energia para as resoluções T126L28 e T170L42 respectivamente. (continua).



(e)

(f)



(g)

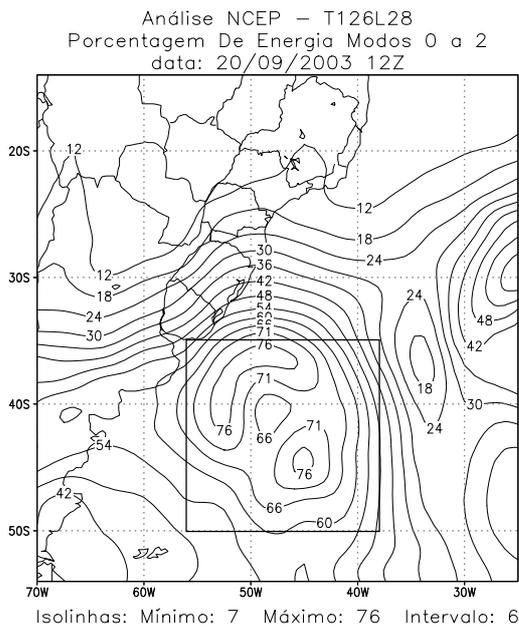
(h)

FIGURA 5.2 – Conclusão.

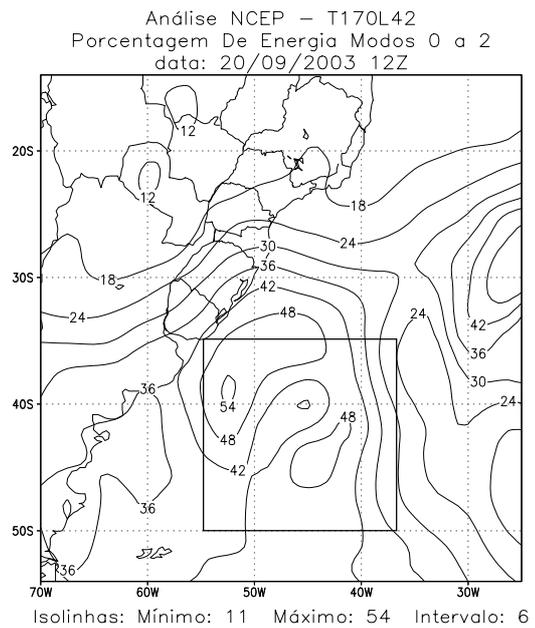
Nas Figuras 5.3 (a) a (f) encontram-se as porcentagens de energia para os modos verticais de 0 a 2 (primeira categoria), utilizando o esquema de convecção tipo Kuo (c) e (d) e RAS (e) e (f) para as resoluções T126L28 e T170L42, respectivamente, referente ao caso de SSMNVI ocorrido no dia 20 de setembro de 2003. Pode-se observar pela análise do NCEP (a) e (b) que a maior a maior parte da energia encontra-se na região do estágio maduro do SSMNVI (quadrículo latitudes médias), enquanto que em latitudes tropicais o percentual é abaixo de 18%. Resultados estes consistentes com Silva Dias e Bonatti (1985).

Comparando-se a análise do T126L28 com o T170L42, pode-se observar que, embora qualitativamente semelhantes, na região de maior concentração de energia no local do SSMNVI, os valores da porcentagem simulados pelo T170L42 são um pouco menores que o T126L28, em torno de 55% contra 75% do T126L28. Para a simulação, utilizando o esquema de convecção Kuo, ocorre o mesmo, os valores para o T126L28 na região do SSMNVI estão em torno de 50% contra 25% do T170L42, relativamente menores em comparação com a análise do NCEP. Já para o esquema de convecção profunda tipo RAS, os valores e a localização do SSMNVI estão bem próximos da análise. Isso concorda com a Figura 5.2 (a) e (b), mostrando que a maior concentração de energia na região do SSMNVI para esse caso, está contida na primeira categoria.

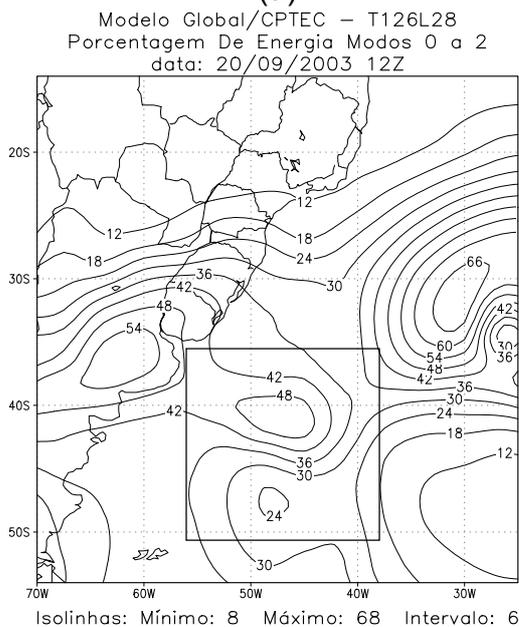
Para diminuir o imenso número de Figuras e para questão de informação, há um Apêndice D, somente de Figuras para o caso ocorrido em setembro de 2003 (EXC1, EXP5 e EXP6), onde estão descritas as interações menos importantes, mas com resultados expressivos e que não podem deixar de serem analisados.



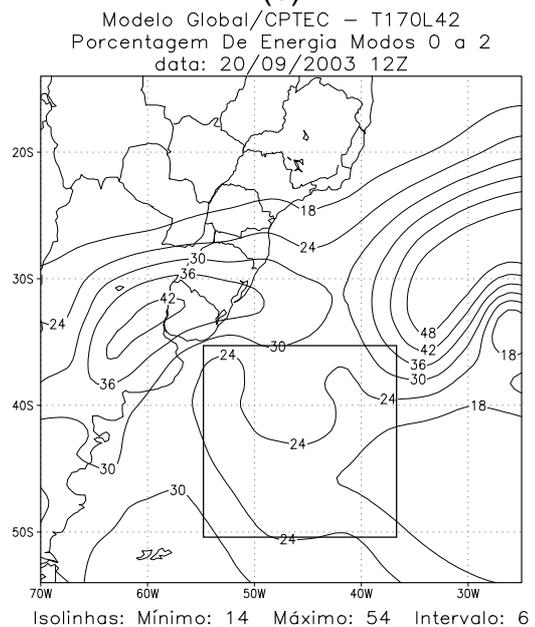
(a)



(b)

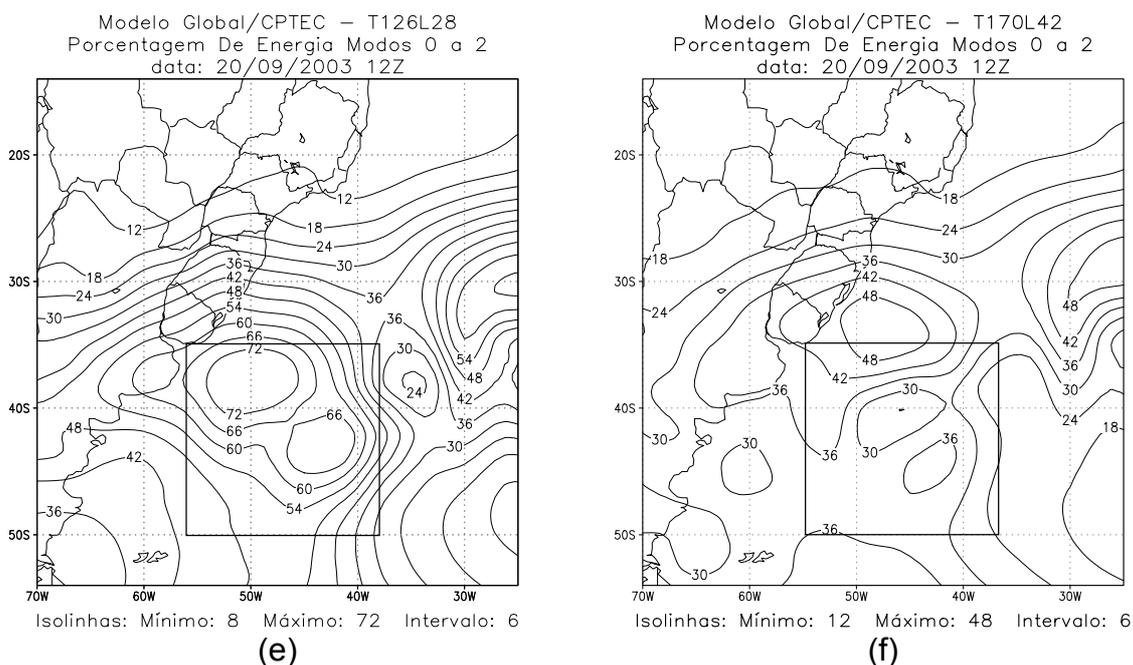


(c)



(d)

**FIGURA 5.3** – Porcentagens de energia para os modos verticais de 0 a 2: (a) Análise NCEP, (c) MGCPTEC – Kuo, (e) MGCPTEC – RAS, ambas para a resolução T126L28; (b) Análise NCEP, (d) MGCPTEC – Kuo, (f) MGCPTEC – RAS, ambas para resolução T170L42, referente ao dia 20/09/03, 12Z. (continua).

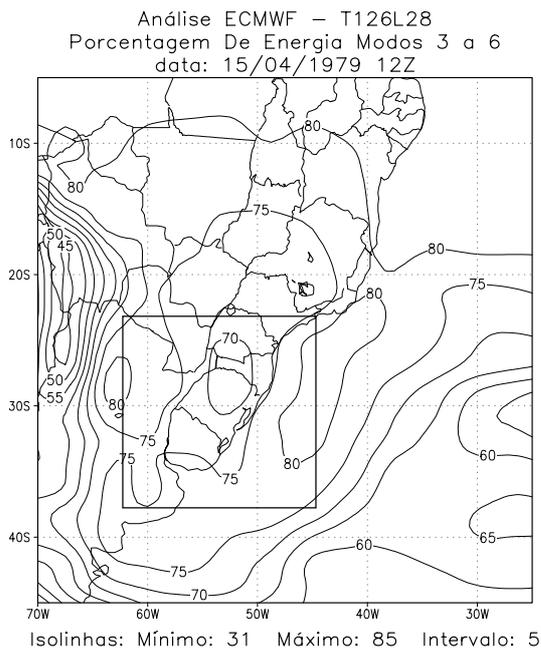


**FIGURA 5.3 – Conclusão.**

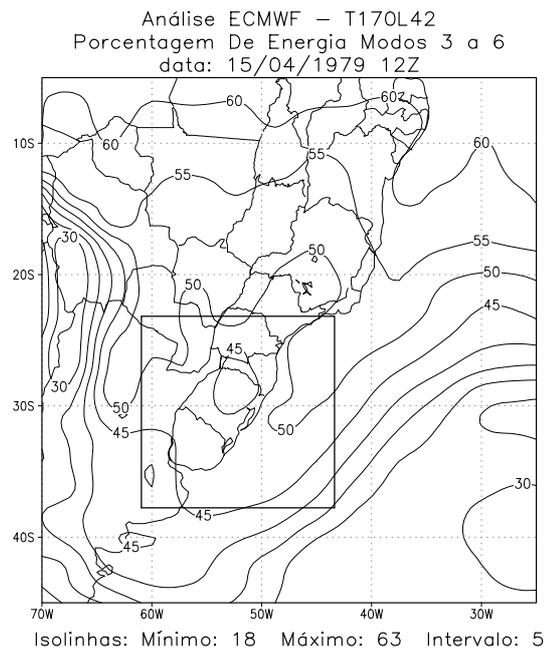
A porcentagem de energia para os modos internos verticais de 3 a 6 e 7 a 11 (13) para 28 (42), camadas referente ao caso de setembro de 2003, podem ser observados na Figura D.1 e D.2 (a) a (f) no Apêndice D. Diferente da primeira categoria, na segunda categoria a maior porcentagem de energia se encontra na região tropical, chegando a mais de 80%, enquanto que no local do SSMNVI está em torno de 30% para a resolução T126L28 e 20% para o T170L42 (Figura D.1 (a) e (b)) respectivamente. Já para a simulação pelo modelo com esquema de convecção Kuo, o T126L28 mostra resultados (Figura D.1 (c)) semelhantes à análise na região tropical, com máximo de energia acima de 80% e na região do SSMNVI, a porcentagem de energia é mais intensa, em torno de 50% na região central do SSMNVI, contra 20% na simulação feita pelo T170L42 (Figura D.1 (d)). Para o modelo que utilizou o esquema de convecção tipo RAS (Figura D.1 (e) e (f)), os valores estão bem próximos da análise, havendo apenas valores menores (48% contra 66% da análise para o T126L28) a leste SSMNVI.

Na terceira categoria (Figura D.2 (a) a (f)), os percentuais maiores (10 a 25%) se concentram no sul da América do Sul, parte dos Andes e sobre o oceano, chegando em torno de 15% na região do SSMNVI. Para a resolução T170L42, onde os modos mais internos possuem uma resolução vertical maior, há máximos significativos próximos à região convectiva, dando um papel mais relevante na partição e interação de energia. Para a quarta categoria (Figuras não mostradas), esses valores são bem maiores, mostrando que, para se ter uma boa representatividade da interação entre modos verticais, é necessário se ter uma resolução vertical mínima para um dado número de modos considerados (Andrade 1994).

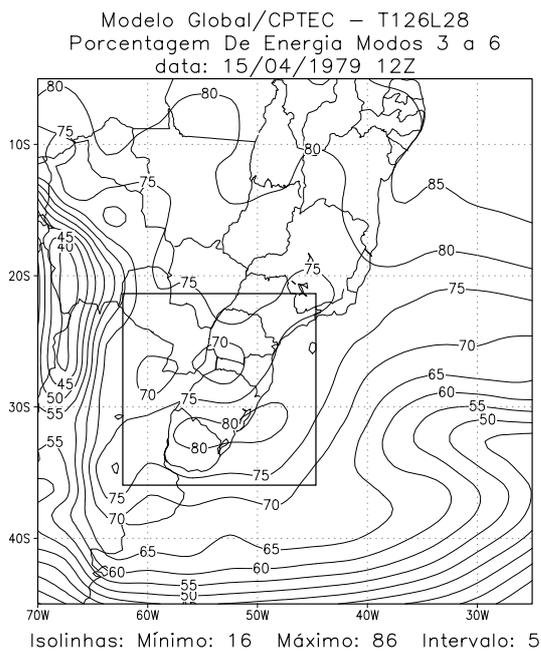
A seguir, encontram-se as porcentagens de energia (Figura 5.4 a 5.6) para os outros três casos de SSMNVI.



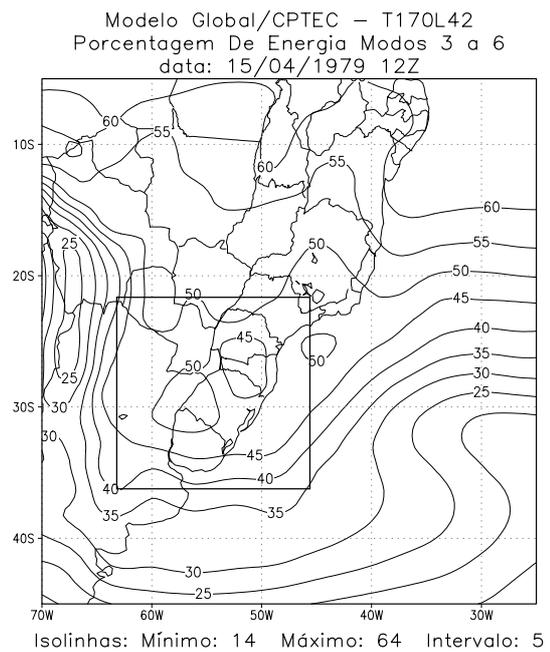
(a)



(b)

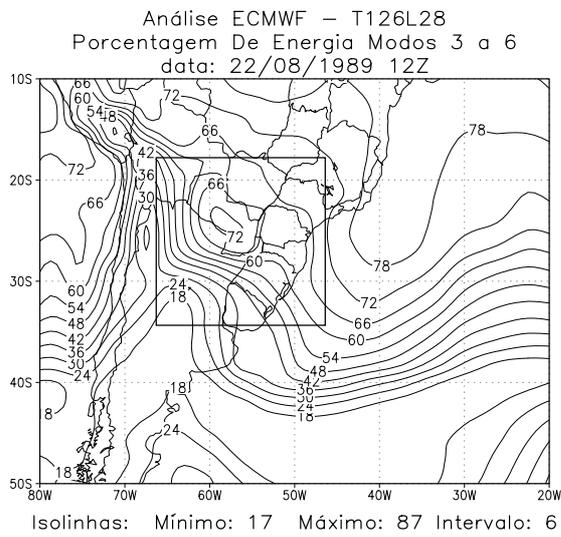


(c)

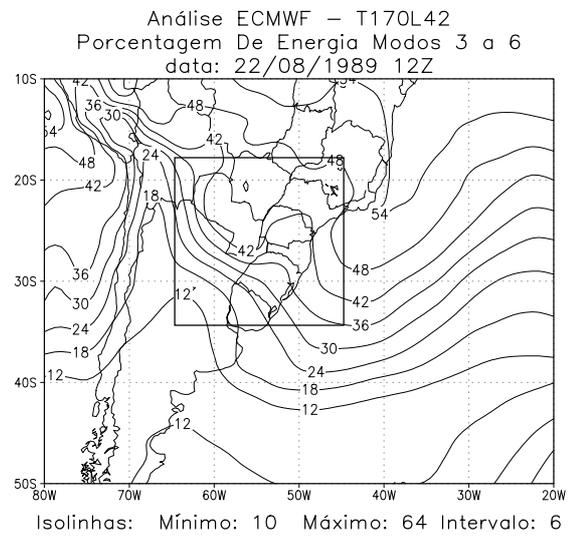


(d)

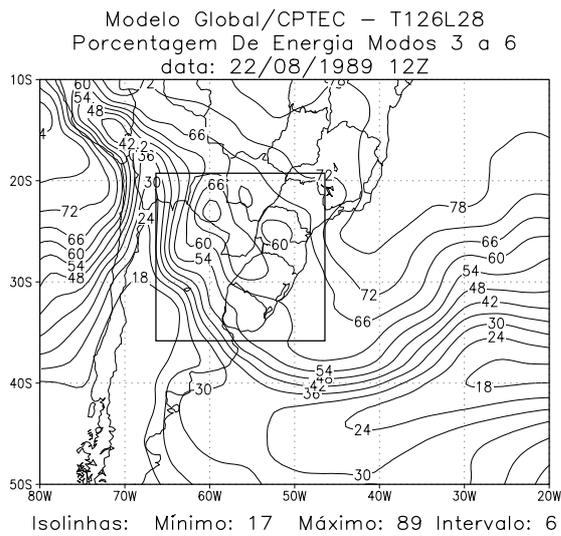
**FIGURA 5.4** – Porcentagens de energia para os modos verticais de 3 a 6: (a) e (b) Análise ECMWF; (c) e (d) MGCPTEC para 28 (42) camadas para as resoluções T126L28 e T170L42, referente ao dia 15/04/1979 – 12Z.



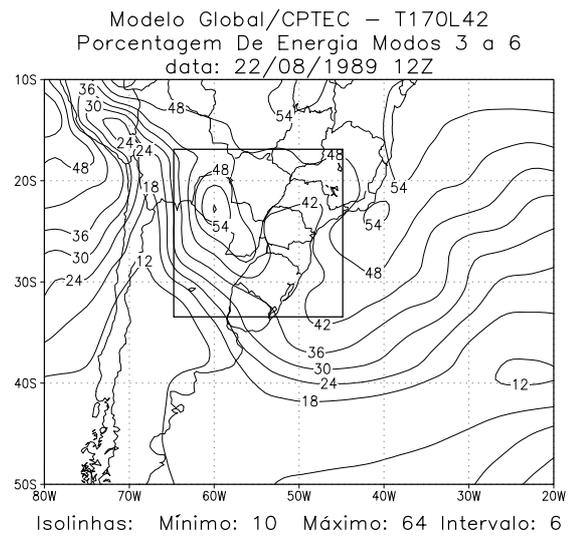
(a)



(b)

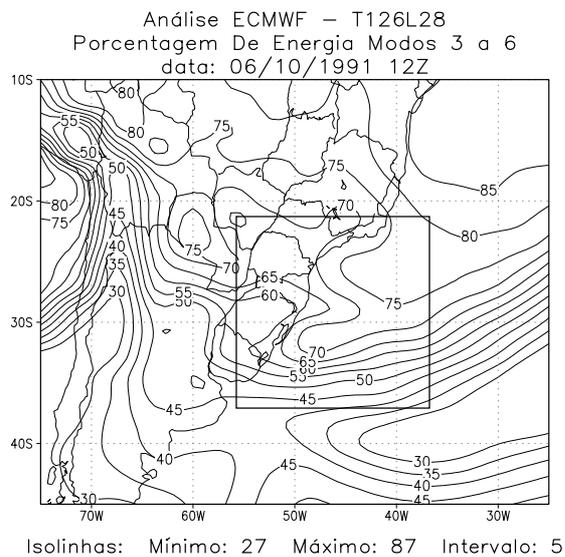


(c)

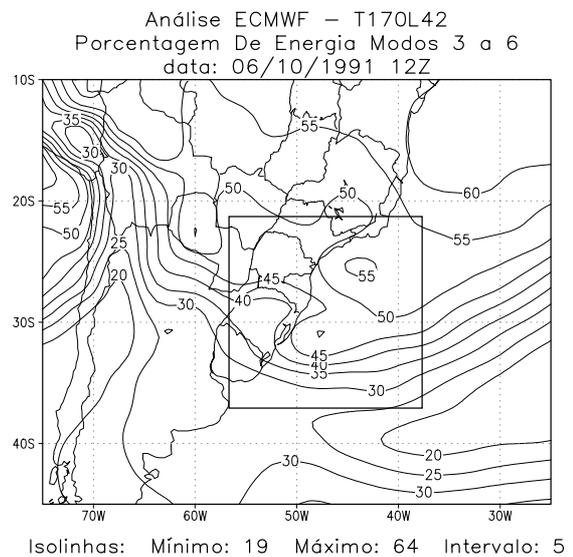


(d)

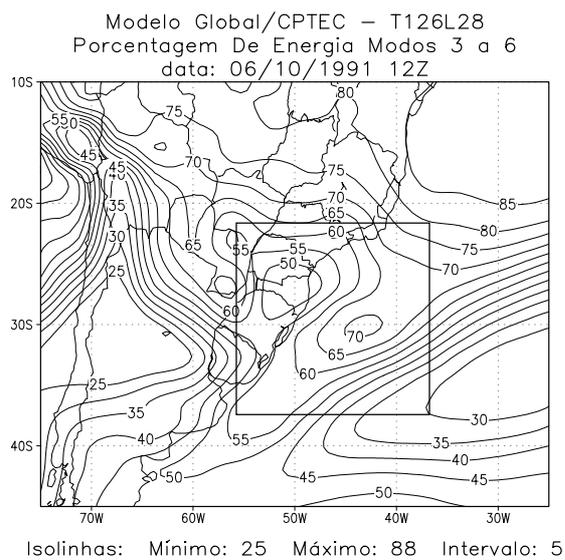
**FIGURA 5.5 – Idem Figura 5.4, exceto para o dia 22/08/1989 – 12Z.**



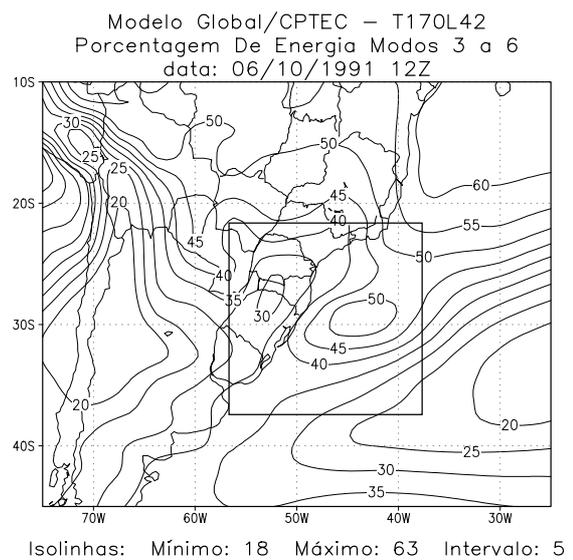
(a)



(b)



(c)



(d)

**FIGURA 5.6 – Idem Figura 5.4, exceto para o dia 06/10/1991 – 12Z.**

A maior porcentagem de energia na região do estágio maduro dos outros três casos de SSMNVI está na segunda categoria, como visto na Figura 5.2. O caso de abril de 1979 (Figura 5.4), a maior porcentagem de energia está na região tropical, como observado no caso de setembro de 2003, chegando a mais de 80%. No local da nuvem vírgula Figura 5.4 (a) e (b), a porcentagem de energia também é alta, com um núcleo chegando a 70% para a análise na grade recomposta para o T126L28 e um pouco menor (45%) para o T170L42. Com muito boa concordância está a simulação do modelo (c) e (d), com valores e localização bem próximos da análise.

O mesmo pode ser observado para os casos agosto de 1989 e outubro de 1991, com valores próximos de 70% e 50% para ambos os casos e resoluções. Os valores simulados pelo modelo, também estão bem próximos da análise e muito bem localizados. Em geral, a porcentagem de energia para esses três casos está em torno de 70% do T126L28 contra 50% em relação ao T170L42, tanto para análise como para a simulação do modelo. Já o caso ocorrido em setembro de 2003, os valores também estão em torno de 60% contra 45-50%, exceto para a primeira categoria, mas todos os 4 casos com porcentagens de energia bem próximas.

## **5.2 – Partição da Energia Total entre os Modos Horizontais**

Para a análise da partição de energia em modos verticais, é feita a recomposição dos dados espectrais no espaço físico, calculando as variáveis vento zonal, vento meridional e geopotencial generalizado e é procedida a decomposição desses campos em modos verticais obtidos em coordenadas sigma, conforme descrito em Kasahara e Puri (1981). Neste caso, os modos verticais são os mesmos que os do MGCPTEC. A seguir, os modos verticais são decompostos em modos horizontais, seguindo o procedimento descrito em Andrade (1994). A partir daí é calculada a energia total (cinética zonal mais

cinética meridional mais potencial disponível) para cada modo horizontal de Rossby, de Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, de Gravidade propagando-se para oeste e para leste e sua porcentagem em relação à soma da energia dos modos horizontais em questão para as três primeiras categorias, conforme descritos no Capítulo 3.

A porcentagem da energia total de cada estrutura horizontal é dada, segundo:

$$E_{pw} = \sum_{n=n_1}^{n_2} \frac{E_{w_n}}{E_{t_n}} \times 100\% \quad (5.21)$$

onde:

$$E_{T_n} = E_{T_{RB}} + E_{T_{KV}} + E_{T_{MX}} + E_{T_{GO}} + E_{T_{GE}} \quad (5.22)$$

$E_{pw}$  representa a porcentagem da energia total do modo horizontal  $w$  em relação a todos, incluindo as interações entre eles, contida no grupo de modos verticais considerados.  $n_1$  é o modo vertical inicial do grupo (0, 3 ou 7) e  $n_2$ , o final (2, 6 ou 11(13)).  $E_{w_n}$  e  $E_{t_n}$  são as energias totais de cada modo horizontal  $w$  correspondentes às ondas de Rossby ( $E_{T_{RB}}$ ), Kelvin ( $E_{T_{KV}}$ ), Misto Rossby-Gravidade ( $E_{T_{MX}}$ ), Gravidade oeste ( $E_{T_{GO}}$ ) e Gravidade leste ( $E_{T_{GE}}$ ) e a soma de todos os modos horizontais para um dado modo vertical  $n$ .

Assim como foi feito anteriormente, serão apresentados somente os resultados mais expressivos obtidos nos quatro casos de SSMNVI, porém no Apêndice D, serão mostrados os resultados menos expressivos, mas de certa importância, referentes ao caso ocorrido em setembro de 2003. Dentre as três categorias entre os modos verticais, a terceira (modos 7 11(13)) com altura equivalente entre 10 e 100 m, apresenta valores muito baixos e somente se encontra no Apêndice D, os resultados em que a porcentagem de energia é realmente

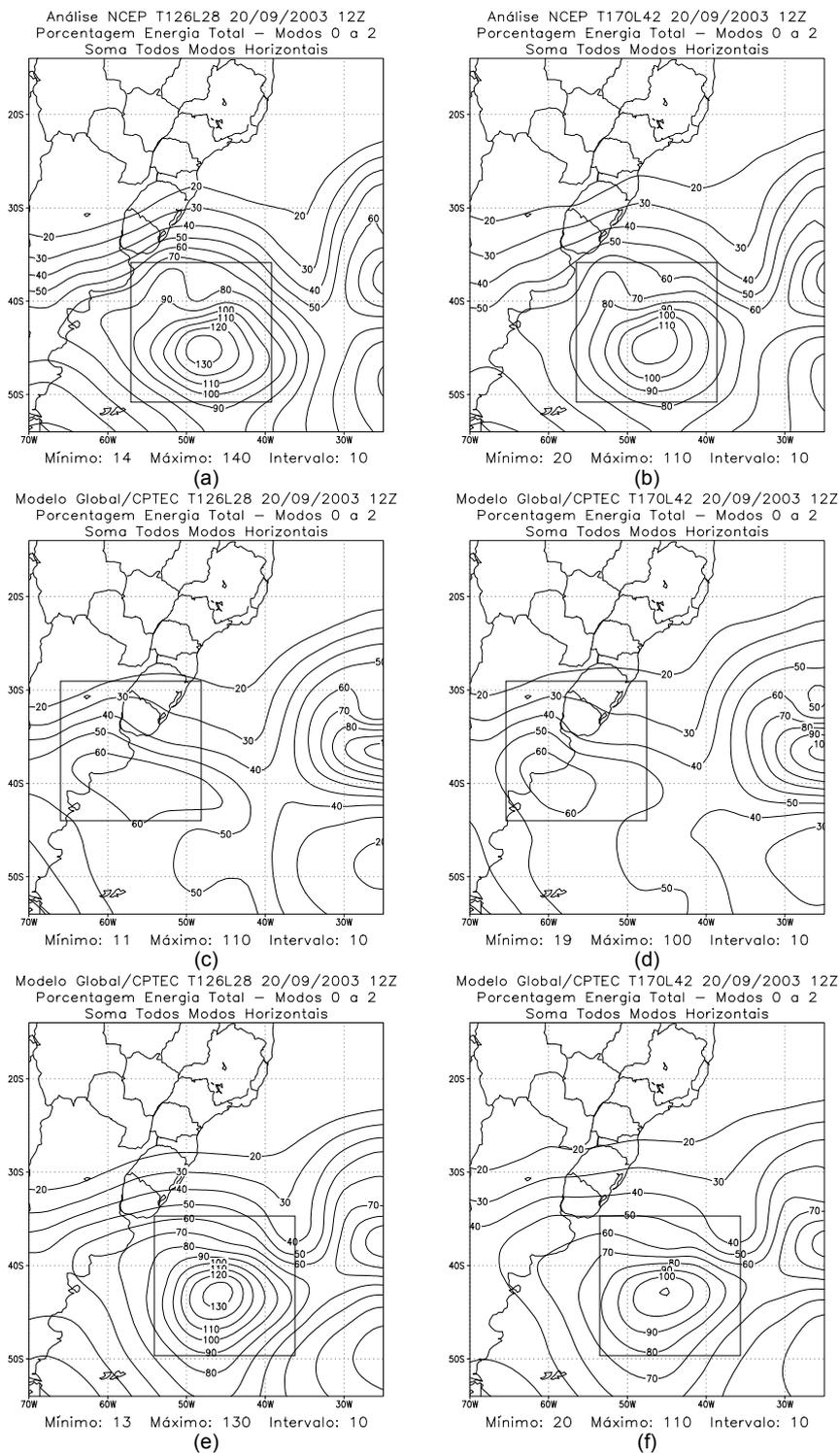
significativa. Dentre as outras duas categorias (modos verticais 0 a 2 e 3 a 6), somente os resultados de maior porcentagem de energia estão descritos abaixo.

Para efeito comparativo com a Figura 5.3, apresenta-se na Figura 5.7 a porcentagem de energia somada para todos os modos horizontais (Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, Gravidade propagando-se para oeste e para leste) em questão, para a primeira categoria (modos 0 a 2) e para as resoluções T126L28 e T170L42, utilizando os dois esquemas de convecção profunda: Kuo e RAS. Nota-se que as configurações tendem para aquelas da Figura 5.3, porém as diferenças de porcentagem, principalmente em regiões acima de 100%, indicam interações entre os modos horizontais (Bonatti, 2002).

Pela análise do NCEP, resolução T126L28 (a) e T170L42 (b), pode-se notar que na região do SSMNVI tem-se maior porcentagem de energia (acima de 100%), mostrando que na região do SSMNVI há interação entre os modos horizontais. Comparando-se a análise, com os resultados do modelo que utilizou o esquema de convecção Kuo (c) e (d), e RAS (e) e (f) respectivamente para as resoluções T126L28 e T170L42, o modelo que utilizou o esquema RAS reproduziu melhor a localização do SSMNVI do que o modelo que utilizou esquema Kuo, representando o SSMNVI um pouco mais deslocado a oeste, do que mostra a análise, fato esse já observado no Capítulo 4. Vale ainda ressaltar que as diferenças de porcentagem, principalmente em regiões acima de 100%, indicam interações entre os modos horizontais, muito bem simuladas pelo modelo do esquema RAS, apenas com valores na região do SSMNVI um pouco menores para o T170L42 (f), 110% contra 130% do T126L28.

Para questão de comparação, no Apêndice D encontra-se a porcentagem de energia somada para todos os modos horizontais para a segunda e terceira categoria, referente ao caso ocorrido em setembro de 2003, Figuras D.3 e D.4. Vale ressaltar que, para a terceira categoria Figura D.4 (modos 7 a 11(13)),

para a resolução do T170L42, o maior número de modos verticais (13 contra 11 do T126L28), mostra uma maior interação entre os modos horizontais, onde os modos mais internos podem ter um papel relevante na partição de energia e isto, surgindo quanto à resolução vertical, é maior e pode ser interpretado em conformidade com os resultados de Andrade (1994), onde é mostrado que para se ter uma boa representatividade da interação entre modos verticais é necessário se ter uma resolução vertical mínima para um dado número de modos considerados. Para os outros três casos (abril de 1979, agosto de 1989 e outubro de 1991) as configurações tendem para aquelas apresentadas no conjunto de Figuras 5.4 a 5.6.



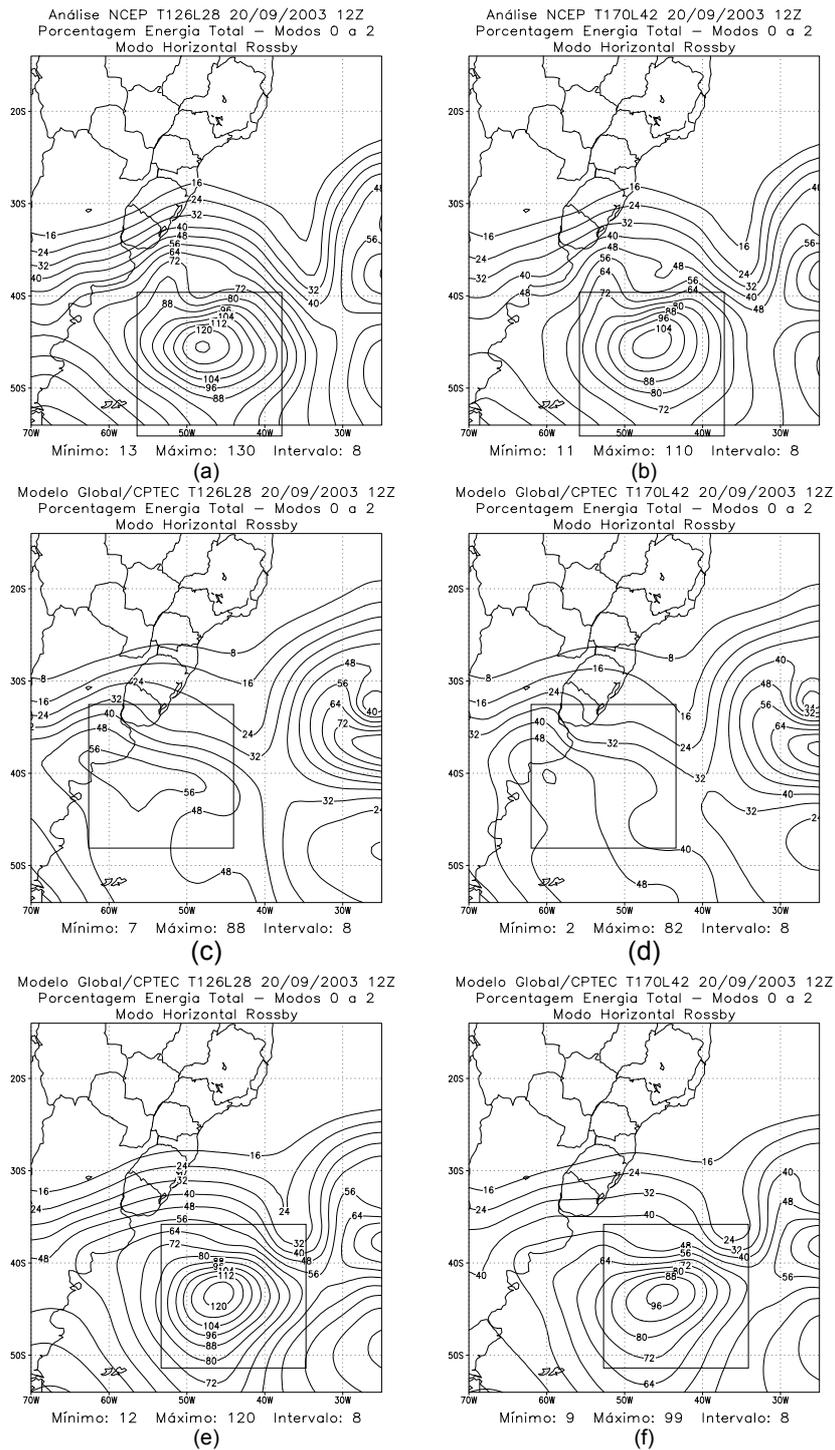
**FIGURA 5.7** – Porcentagem de energia somada para todos os modos horizontais e modos verticais 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

A porcentagem de energia para a onda de Rossby, para as três primeiras categorias e para as resoluções T126L28 e T170L42, são apresentadas nas Figuras 5.8 a 5.10, referente ao caso ocorrido em setembro de 2003. Pela análise, a primeira e a terceira categorias (Figuras 5.8 e 5.10 (a) e (b)), a energia tem máximos em latitudes médias, principalmente na região do SSMNVI e mínimos na região tropical, enquanto que para a segunda categoria (Figura 5.9 (a) e (b)) há uma melhor distribuição de energia em todo domínio estudado. Para esse caso em particular, a primeira categoria foi a que deteve a maior porcentagem de energia no local do SSMNVI, onde tem-se máximos de energia superior a 100%, indicando interação entre os modos horizontais com valores um pouco maiores para o T126L28 (Figura 5.8 (a)). Para o modelo com esquema Kuo, esses valores não passam de 60% e estão mais ao oeste da região do SSMNVI, em comparação com a análise. Já para o esquema tipo RAS, esses valores estão muito próximos da análise, e também o fato de que a porcentagem de energia é maior para o T126L28 do que o T170L42.

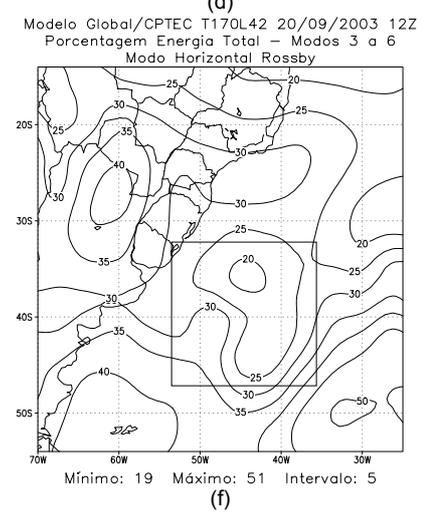
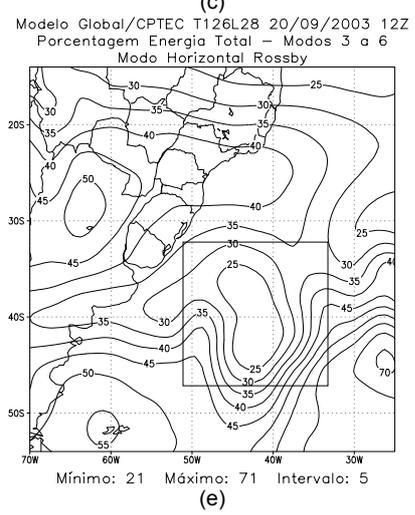
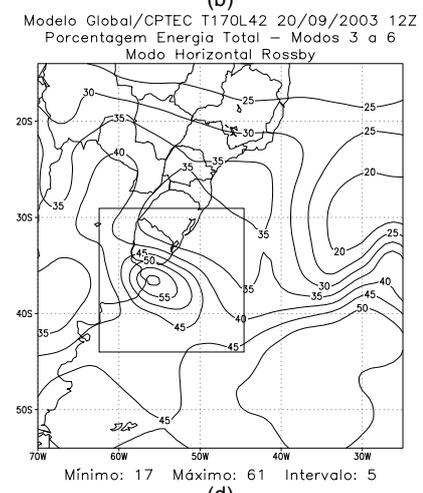
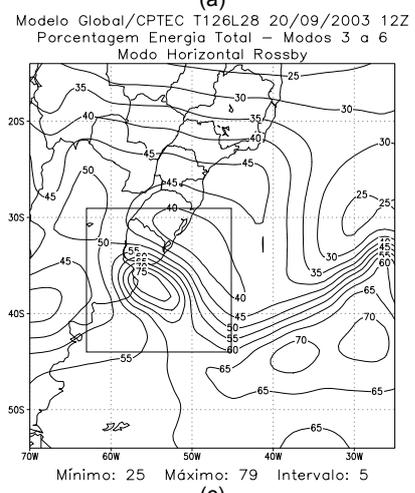
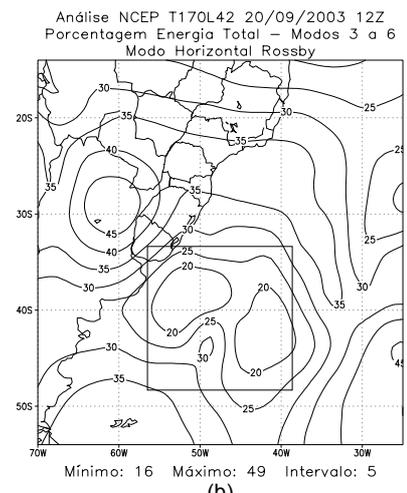
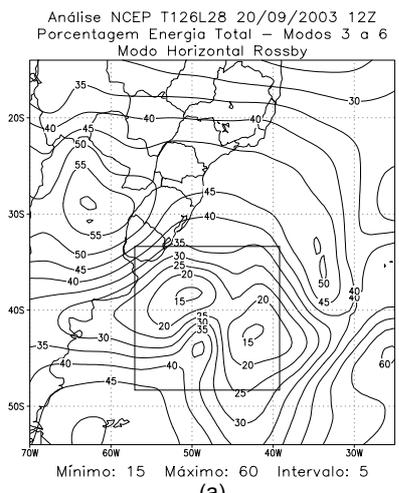
Na segunda e terceira categorias, esses valores estão em torno de 30% e diminuem na região do SSMNVI, mas ainda representam valores muito significativos para as três principais categorias em estudo. O modelo com esquema Kuo mostrou para a segunda categoria (Figura 5.9 (c) e (d)) valores em torno de 70% - 55% na região do SSMNVI, bem maiores do que observados na análise (a) e (b) e pelo modelo com esquema RAS (e) e (f). A terceira categoria (Figura 5.10 (a) e (b)), o modelo T170L42 com mais camadas, mostra uma melhor representação das trocas de energia entre os modos verticais na região do SSMNVI, como observado anteriormente. Vale ressaltar que esses resultados (Figuras 5.8, 5.9 e 5.10) estão muito semelhantes com as Figuras 5.5, D.3 e D.4, mostrando que as ondas de Rossby e nas próximas Figuras, para o modo horizontal Kelvin, detêm a maior porcentagem de energia, dentre os modos horizontais.

Para os outros três casos, a porcentagem de energia para o modo horizontal Rossby é maior na região do SSMNVI para a segunda categoria. As Figuras 5.11 a 5.13 referem-se aos estágios maduros do SSMNVI para a onda de Rossby dos casos abril 1979, agosto de 1989 e outubro de 1991. Vale ressaltar que para esses três casos, somente foi utilizado o esquema de convecção profunda do tipo Kuo.

Analisando num modo geral, os três casos atingiram máximos de energia na região do SSMNVI, mostrando que a porcentagem de energia para a segunda categoria do modo horizontal Rossby tem um papel muito importante para a análise energética dos SSMNVI's, fato esse também observado no caso setembro de 2003, exceto que para a primeira categoria. Os casos abril de 1979 e agosto de 1989 (Figuras 5.11 e 5.12), foram muito bem simulados pelo modelo, apenas localizando a região do SSMNVI ligeiramente mais deslocado ao sul (c) e (d) em comparação com a análise (a) e (b), apresentando valores relativamente mais intensos no domínio estudado para o T126L28. Através da análise do caso outubro de 1991 (Figura 5.13 (a) e (b)), pode-se observar que o SSMNVI está sobre a região sul do Brasil, mas com uma inclinação para oeste e deslocando-se para o oceano, enquanto que o modelo (c) e (d) mostra que a região do SSMNVI está um pouco mais ao leste do sul do Brasil, sobre o oceano e possui uma inclinação para leste. De um modo geral, os valores de porcentagem de energia simulados pelo modelo, para ambas resoluções estão próximos das análises.

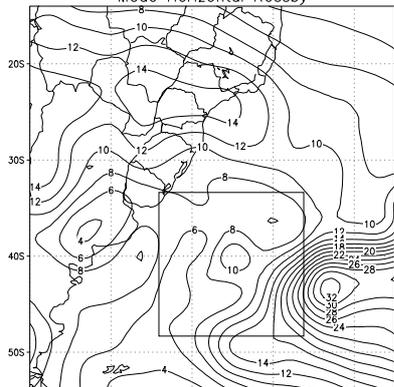


**FIGURA 5.8** – Energia total (%) do modo Rossby para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.



**FIGURA 5.9** – Idem Figura 5.8, exceto que para os modos verticais de 3 a 6.

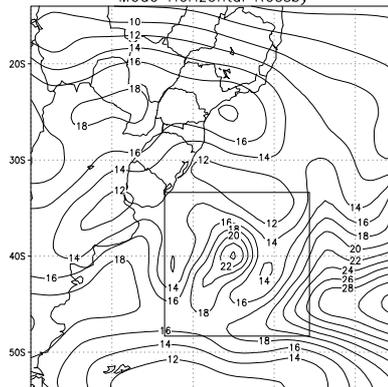
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Rossby



Mínimo: 3 Máximo: 33 Intervalo: 2

(a)

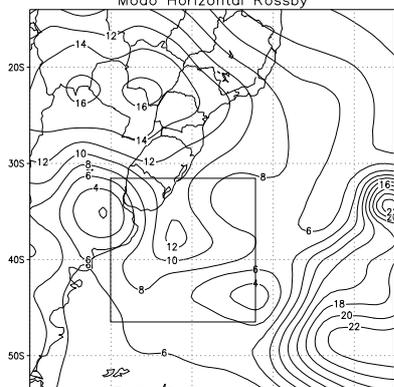
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Rossby



Mínimo: 6 Máximo: 33 Intervalo: 2

(b)

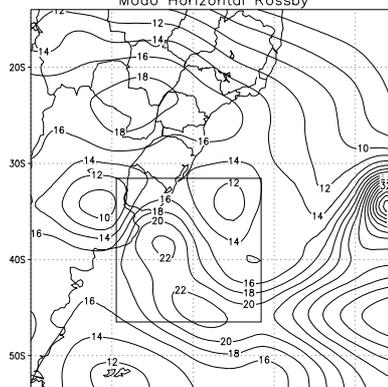
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Rossby



Mínimo: 2 Máximo: 24 Intervalo: 2

(c)

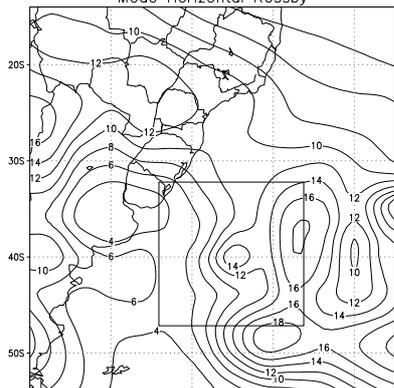
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Rossby



Mínimo: 5 Máximo: 41 Intervalo: 2

(d)

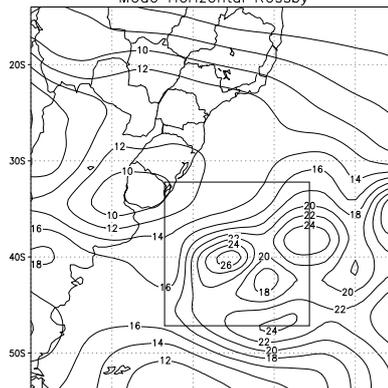
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Rossby



Mínimo: 4 Máximo: 28 Intervalo: 2

(e)

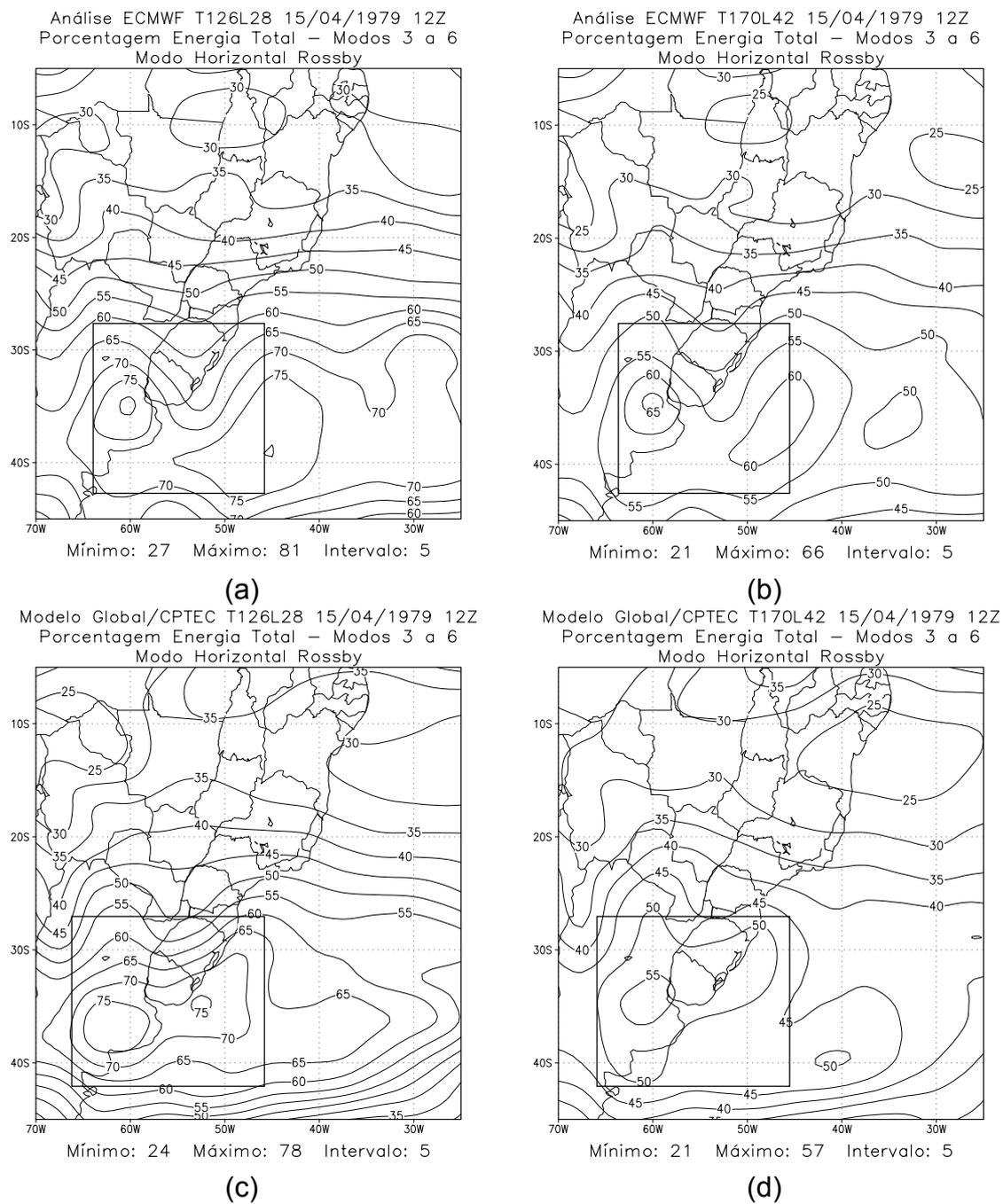
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Rossby



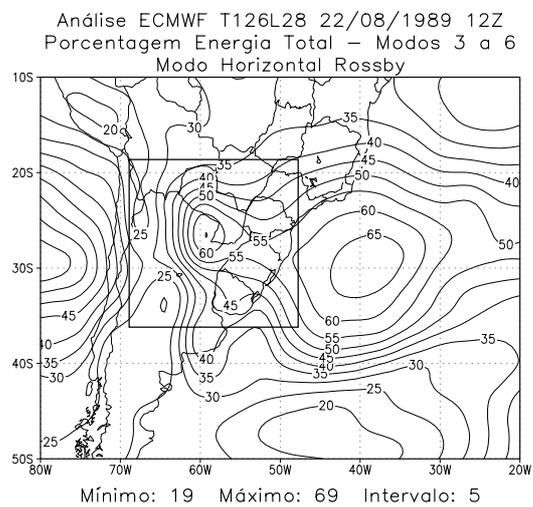
Mínimo: 6 Máximo: 33 Intervalo: 2

(f)

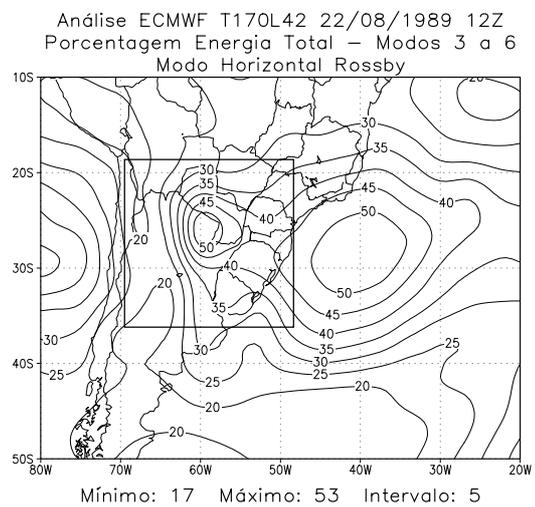
**FIGURA 5.10** – Idem Figura 5.8, exceto que para os modos verticais de 7 a 11(13).



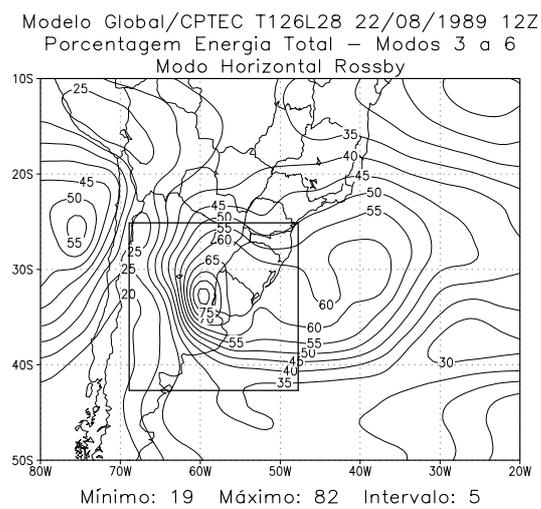
**FIGURA 5.11** – Energia total (%) do modo Rossby para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTec T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTec T170L42.



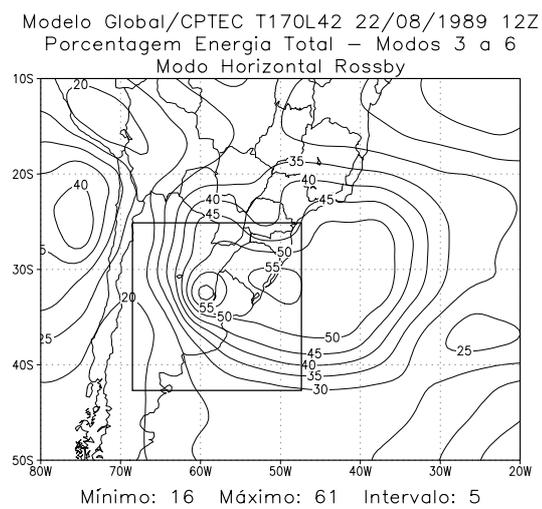
(a)



(b)

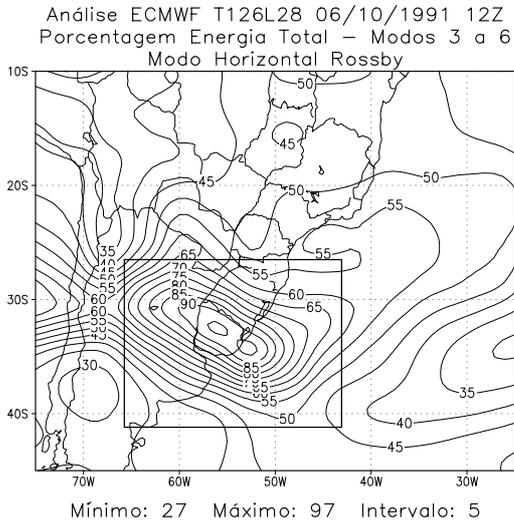


(c)

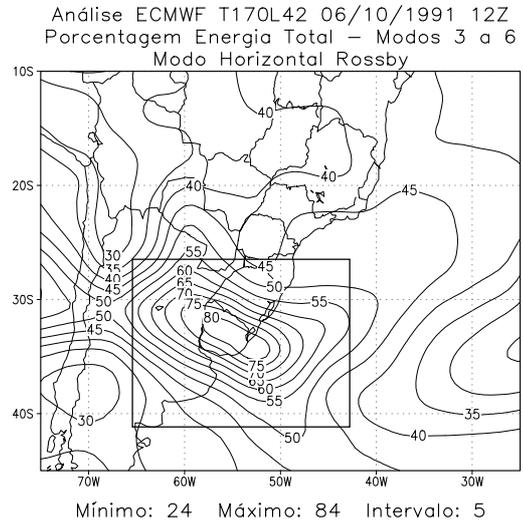


(d)

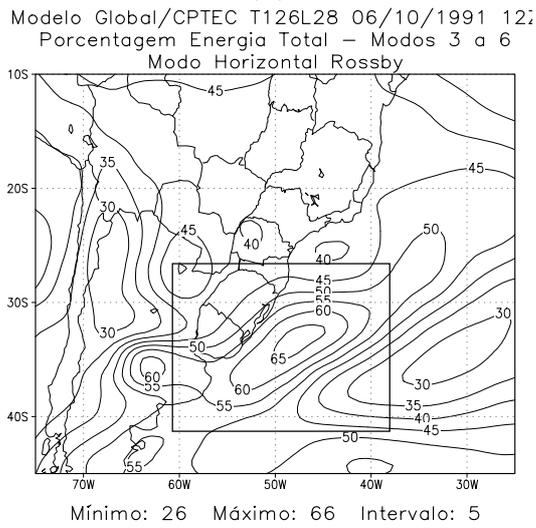
**FIGURA 5.12 – Idem Figura 5.11, exceto que para o dia 22/08/1989 – 12Z.**



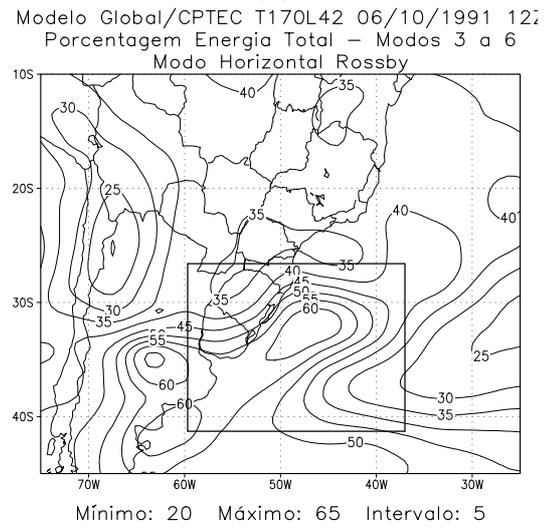
(a)



(b)



(c)



(d)

**FIGURA 5.13** – Idem Figura 5.11, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.

O modo Kelvin (Figuras 5.14 a 5.17) apresenta valores significativos da porcentagem de energia na região do SSMNVI somente para a primeira categoria, onde a porcentagem de energia é maior em latitudes médias. Para as outras duas categorias (figuras não apresentadas), a maior parte da energia está confinada na região tropical, sendo que, para a terceira categoria, esses valores são menores ainda, mas também confinados na região tropical. Ao se somar a porcentagem de energia da região tropical para a segunda categoria com os correspondentes do modo de Rossby, encontram-se valores acima de 100%, sugerindo interferência entre essas ondas nessa região, como será visto mais adiante quando serão feitos os produtos cruzados entre os modos horizontais.

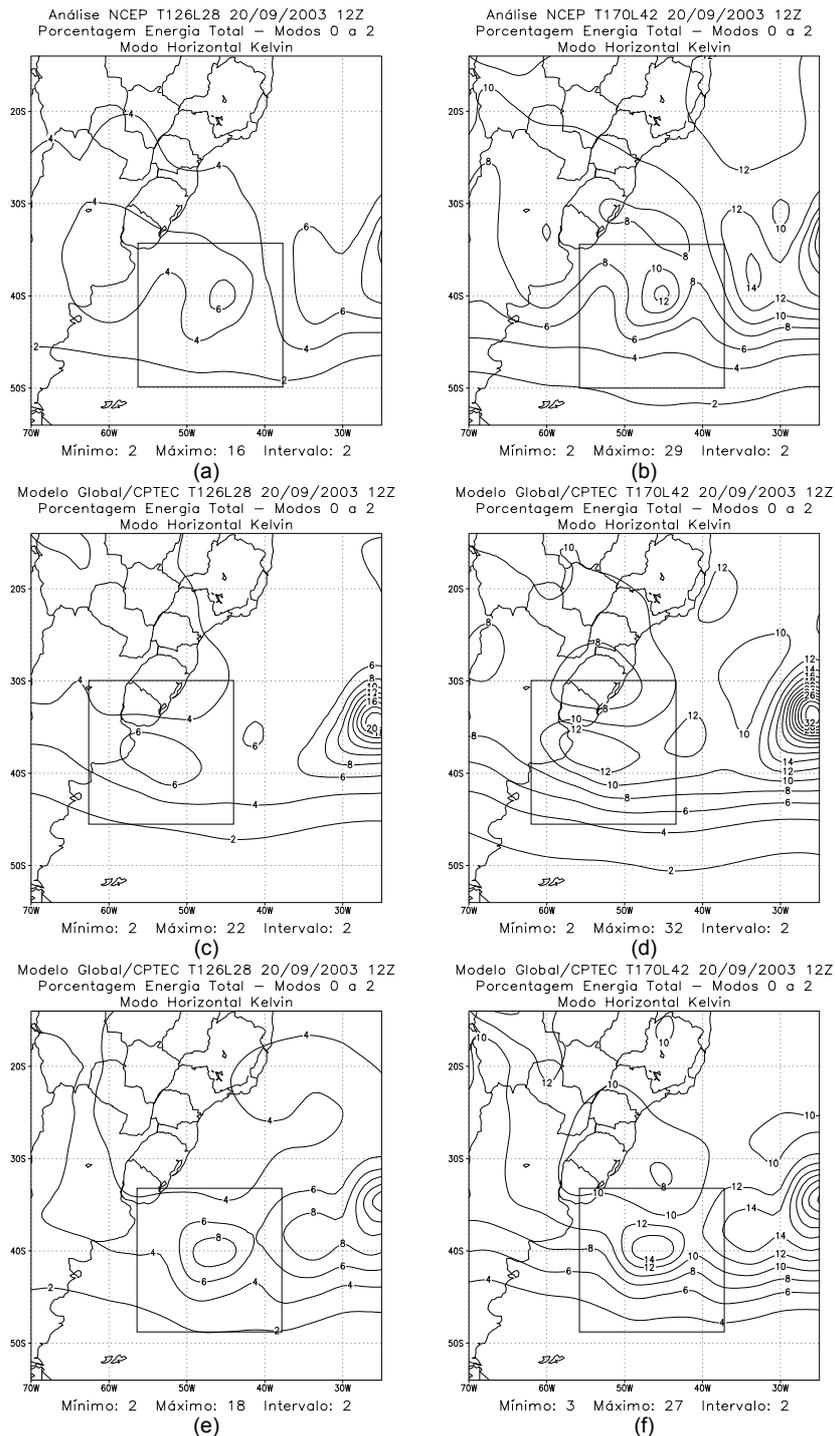
Pode-se observar pela análise (itens (a) e (b) das Figuras 5.14 a 5.17) que na região do SSMNVI tem-se a maior parte da porcentagem de energia para a primeira categoria em relação aos quatro casos. Para o caso setembro de 2003, tanto o esquema Kuo (Figura 5.14 (c) e (d)) como o RAS (Figura 5.15 (e) e (f)) identificaram bem o SSMNVI, apenas com um deslocamento mais lento para leste simulado pelo modelo que utilizou o esquema Kuo. No geral, os outros três casos (Figura 5.15 a 5.17) são bem representados em configuração e posicionamento dos máximos pelos modelos, com valores próximos para o modelo de mesma resolução (análise T126L28 com modelo T126L28 ou análise T170L42 com modelo T170L42), mas com valores relativamente maiores do T170L42 em relação ao T126L28.

A porcentagem de energia para o modo horizontal Misto Rossby-Gravidade para as resoluções T126L28 e T170L42 para as três primeiras categorias não serão apresentadas nessa seção, pois tiveram valores abaixo de 1%.

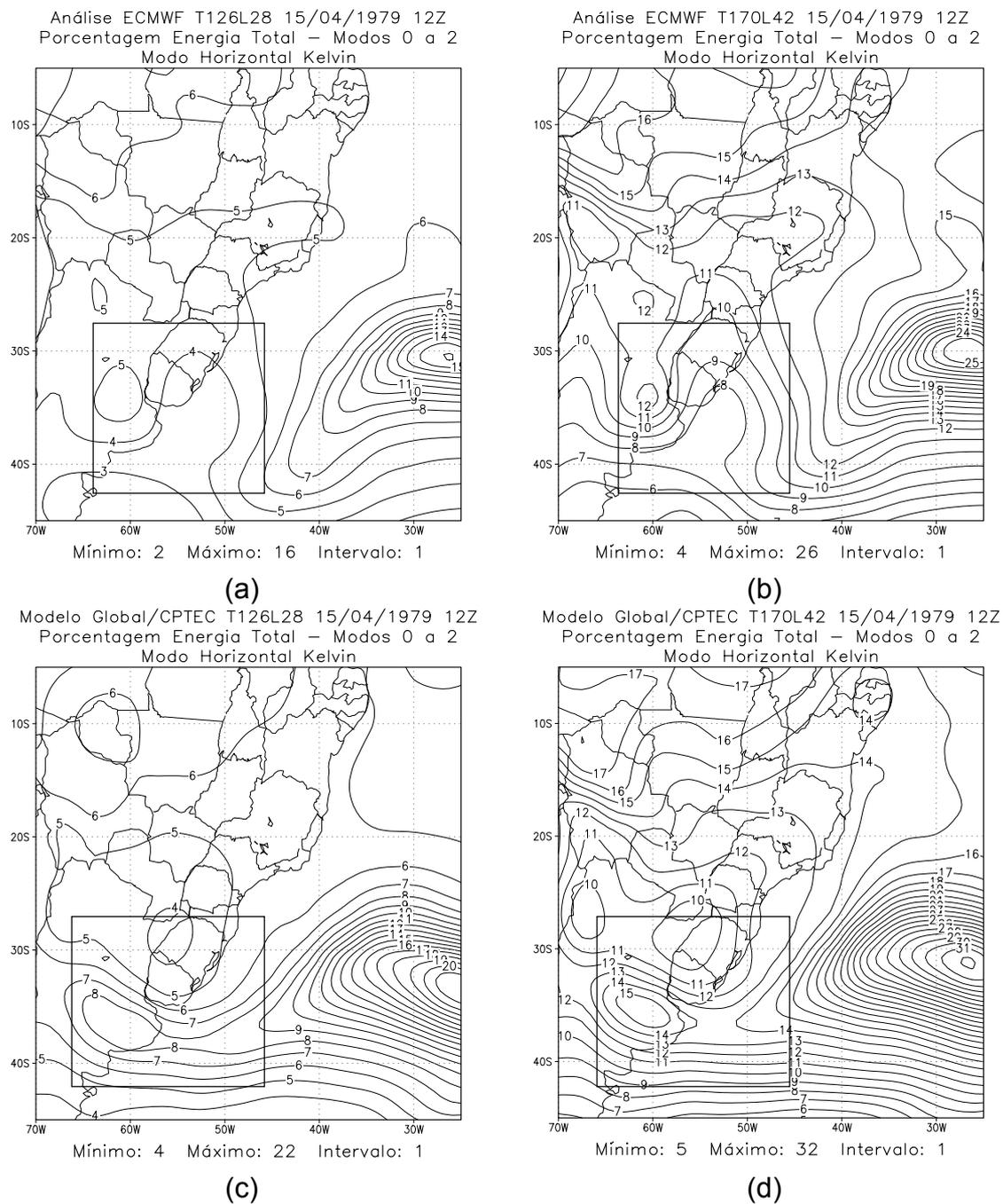
As Figuras 5.18 a 5.23 apresentam a porcentagem de energia para as ondas de Gravidade propagando-se para leste e oeste. O caso ocorrido em abril de 1979 não apresentou valores significativos na região do SSMNVI para esses

dois modos horizontais e por isso não serão discutidos nessa seção. A maior interação na região do SSMNVI foi para a segunda categoria, onde pode-se observar que a maior porcentagem de energia para os dois modos horizontais estão confinados em latitudes médias e no geral os valores para a resolução T126L28 são ligeiramente maiores que o T170L42. A análise das Figuras 5.18 a 5.23 (a) e (b) respectivamente para as resoluções T126L28 e T170L42, mostram que no local do SSMNVI há a maior concentração da porcentagem de energia para a segunda categoria, denotando uma importante contribuição para os modos horizontais gravitacionais para leste e oeste, referente a esse tipo de sistema. Como observado anteriormente, o esquema de convecção RAS (Figura 5.18 (e) e (f)) está em melhor concordância com a análise em comparação com o esquema Kuo que simula o SSMNVI um pouco mais a oeste.

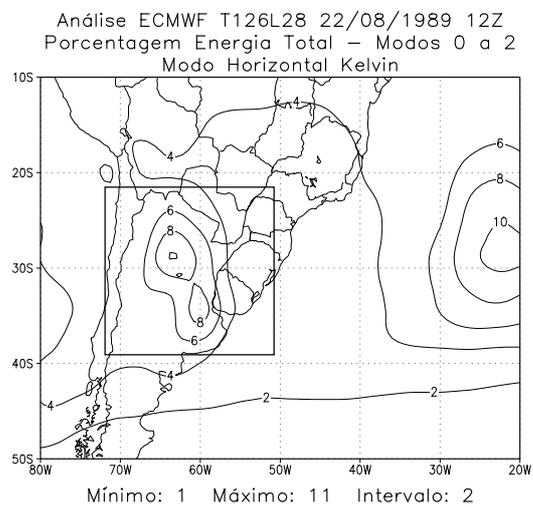
Semelhantemente ocorreram nos outros dois casos, onde o modelo reproduziu as principais características em comparação com as análises, inclusive pode-se observar que as características do modo Gravidade para leste são muito semelhantes às da onda de Gravidade para oeste. No Apêndice D (Figuras D.5 a D.8), encontram-se os resultados para a primeira e terceira categorias, referentes às ondas de Gravidade para oeste e leste do caso setembro de 2003. No geral, eles são muito semelhantes ao que foi visto anteriormente, valendo ressaltar que, para a primeira categoria, para os dois tipos de ondas em questão, pode-se notar uma de trem de ondas passando pelo sul da América do Sul na região do SSMNVI, aspecto esse também observado por Bonatti (2002), mas em relação à passagem de uma frente fria no sul do Brasil.



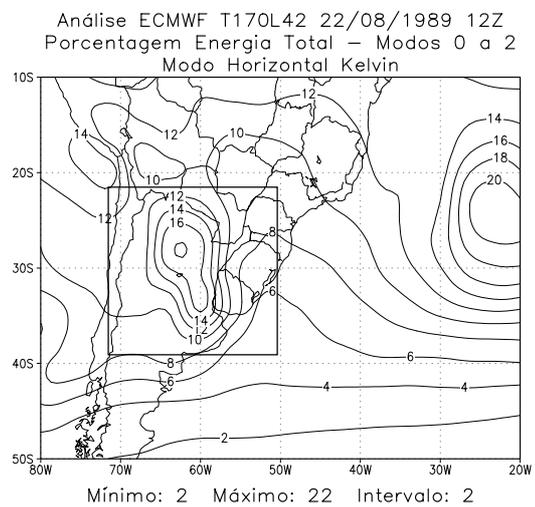
**FIGURA 5.14** – Energia total (%) do modo Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTec – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTec – Kuo e RAS para resolução T170L42.



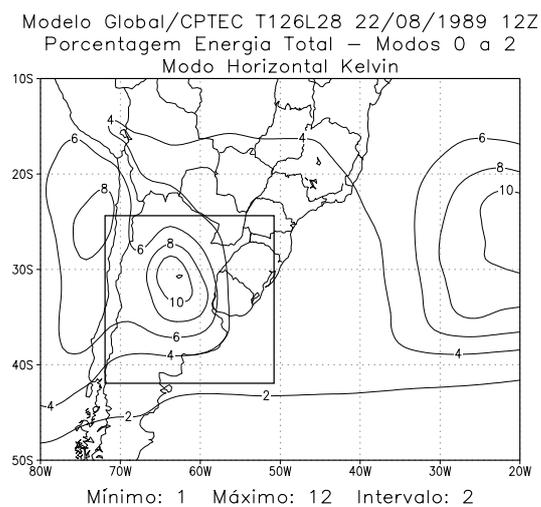
**FIGURA 5.15** – Energia total (%) do modo Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



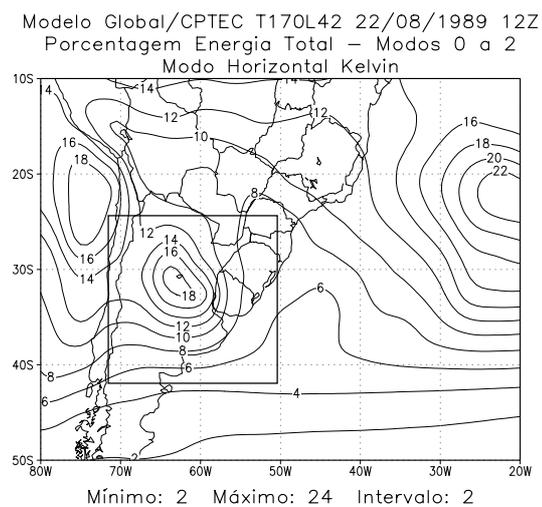
(a)



(b)

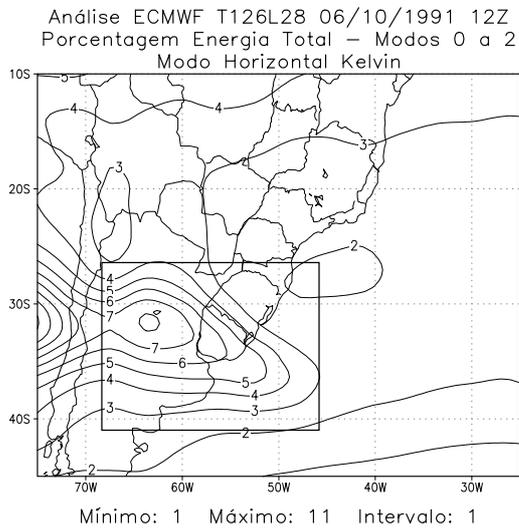


(c)

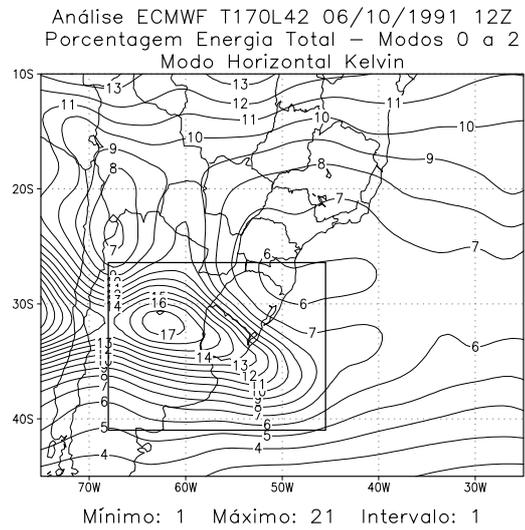


(d)

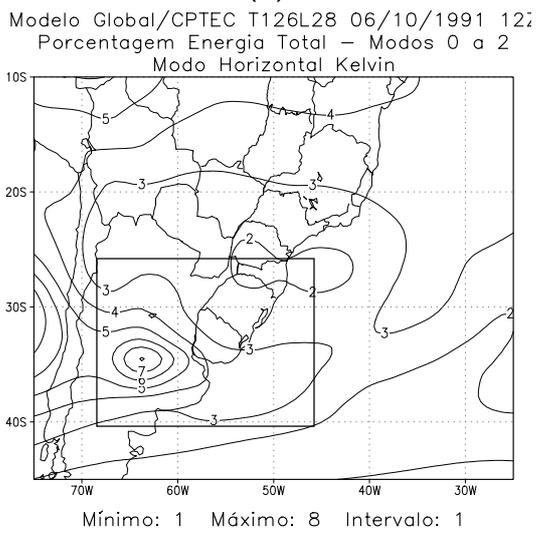
**FIGURA 5.16** – Idem Figura 5.15, exceto que para o dia 22/08/1989 – 12Z.



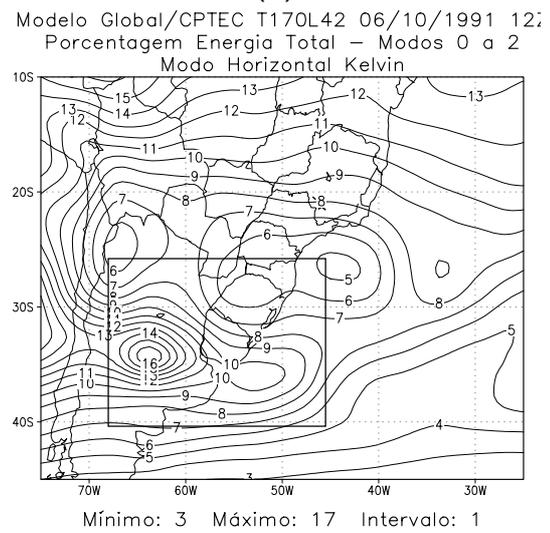
(a)



(b)

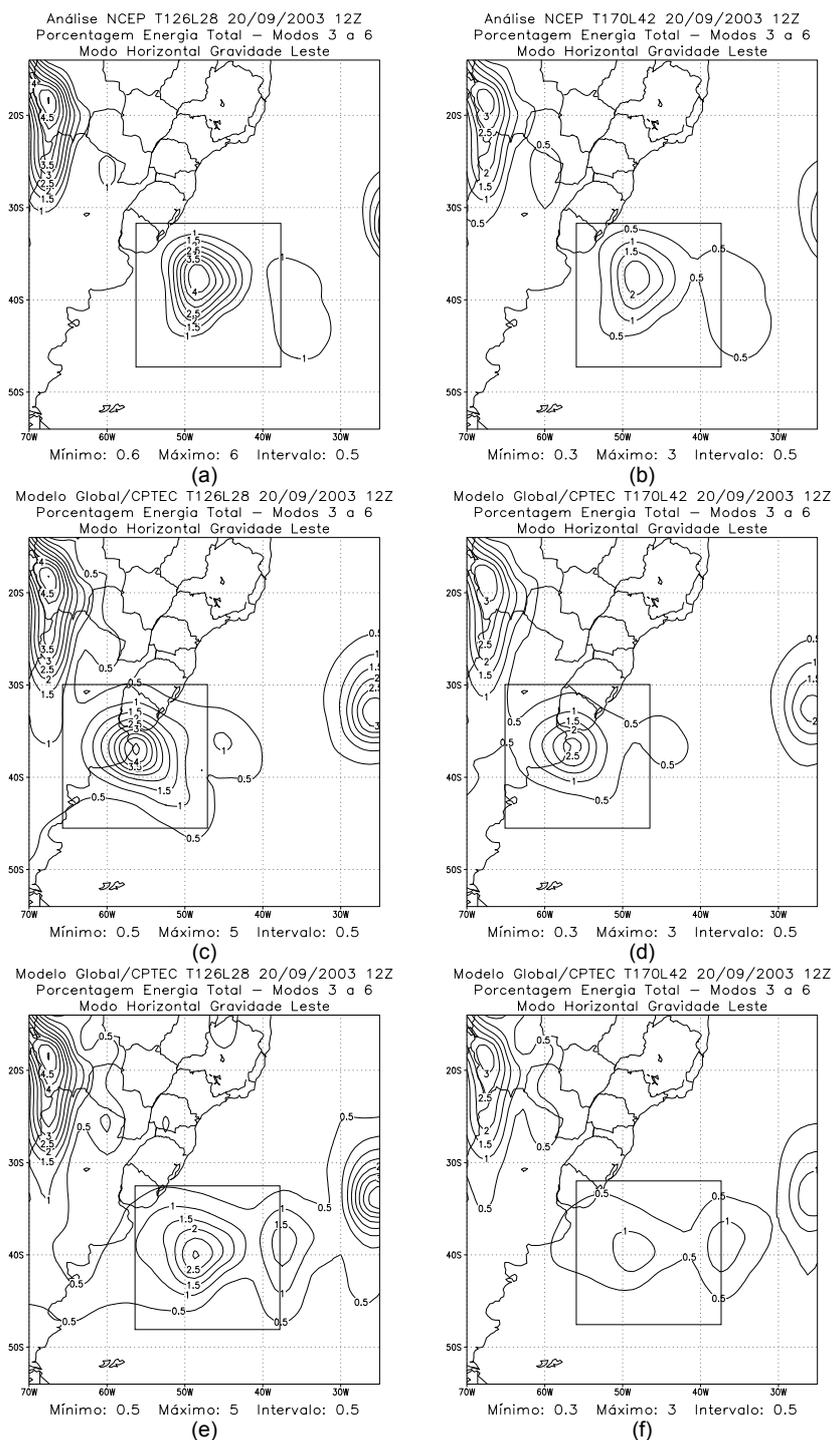


(c)

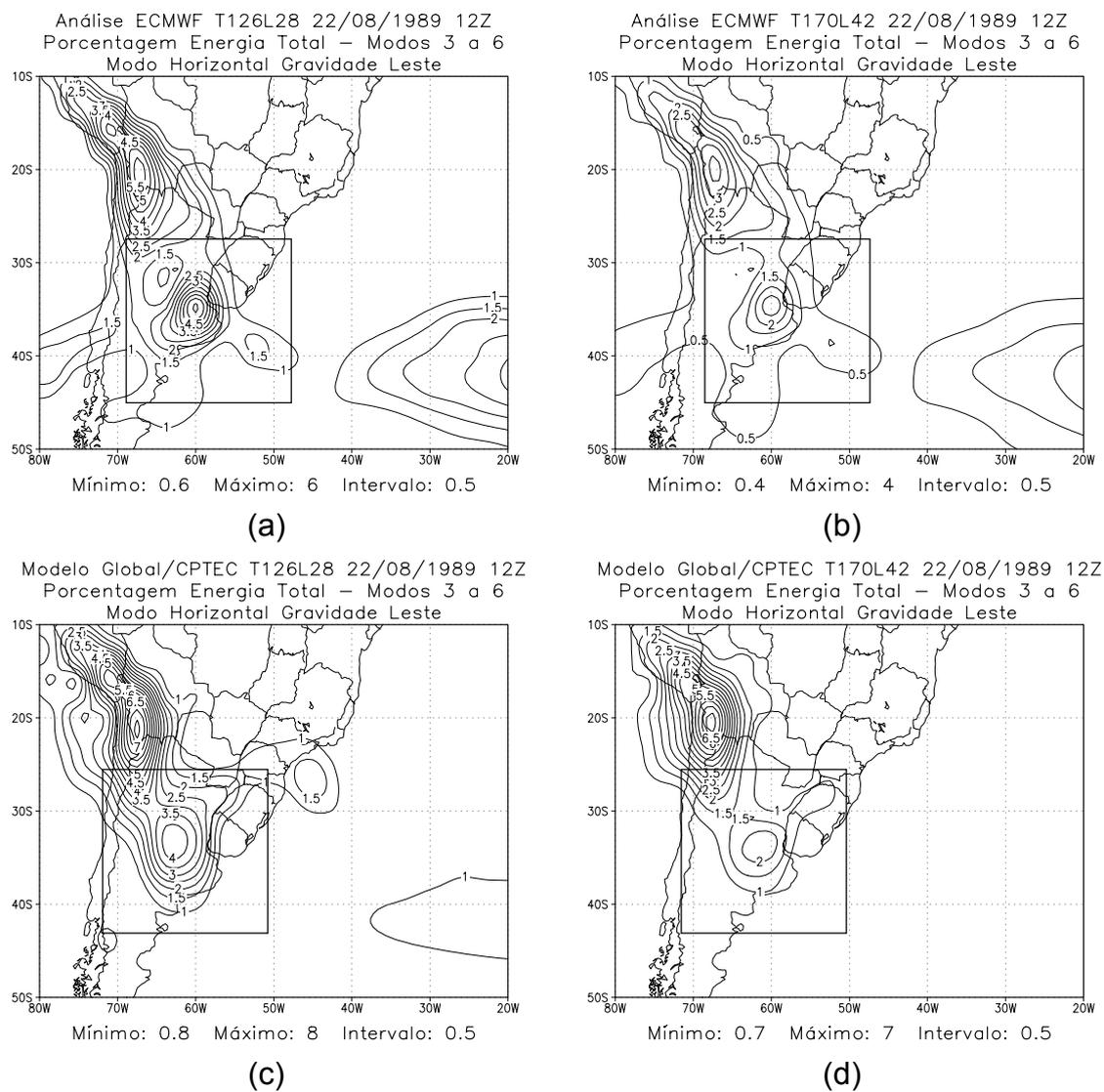


(d)

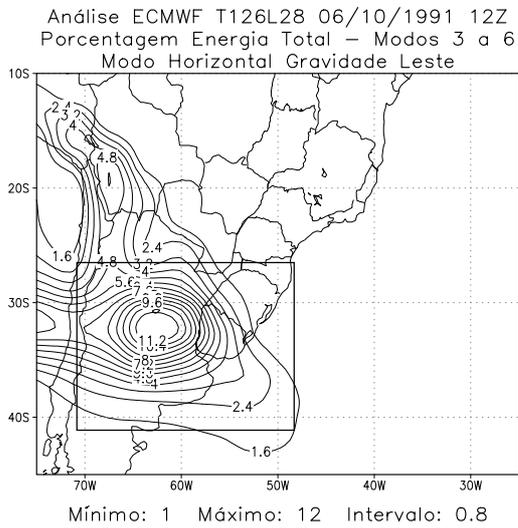
**FIGURA 5.17** – Idem Figura 5.15, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



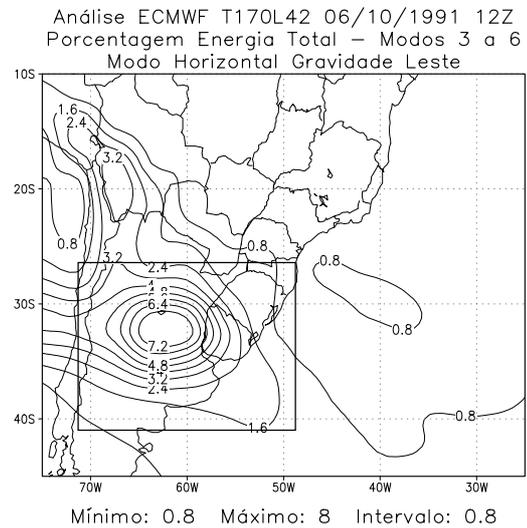
**FIGURA 5.18** – Energia total (%) do modo Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.



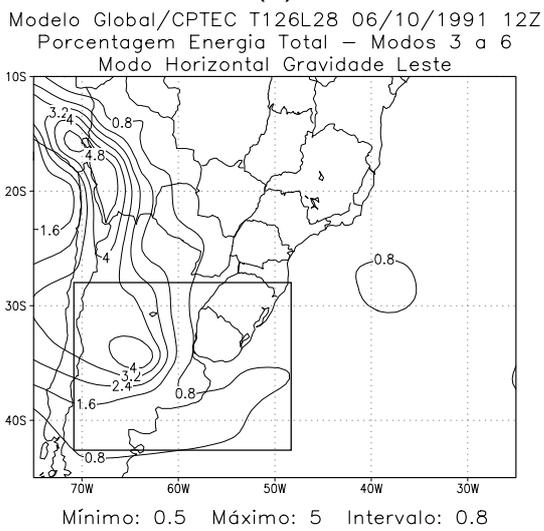
**FIGURA 5.19** – Energia total (%) do modo Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



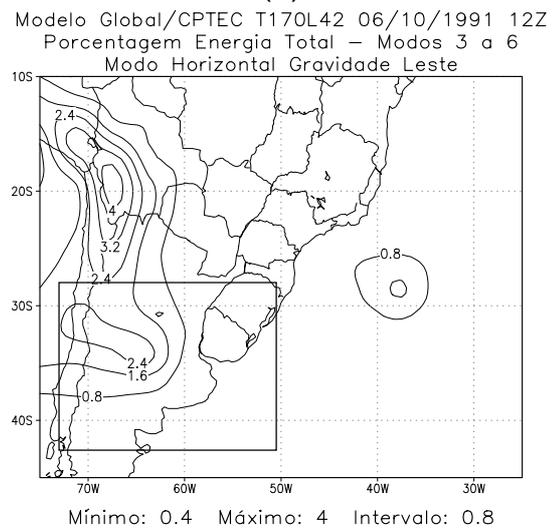
(a)



(b)

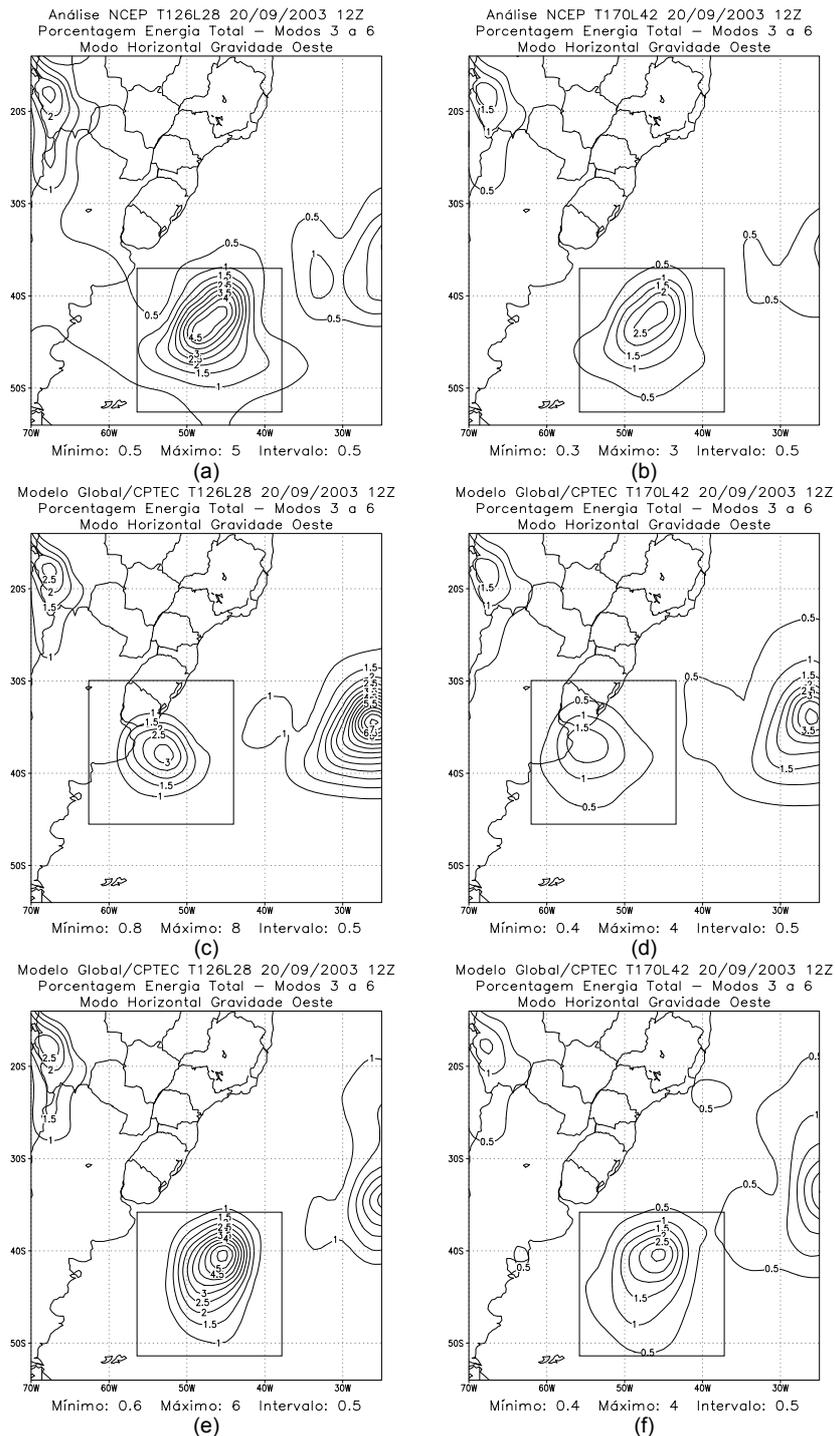


(c)

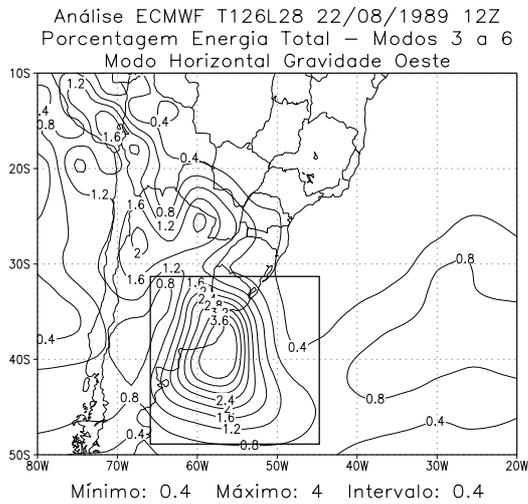


(d)

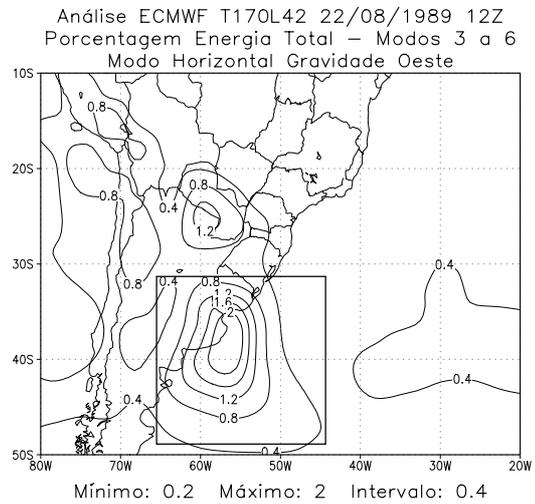
**FIGURA 5.20** – Idem Figura 5.19, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



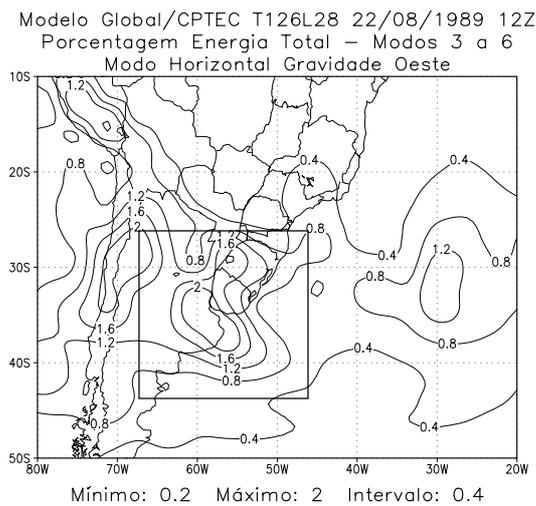
**FIGURA 5.21** – Energia total (%) do modo Gravidade oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T126L28; (b), (d) e (f) Análise NCEP, MGCPTEC – Kuo e RAS para resolução T170L42.



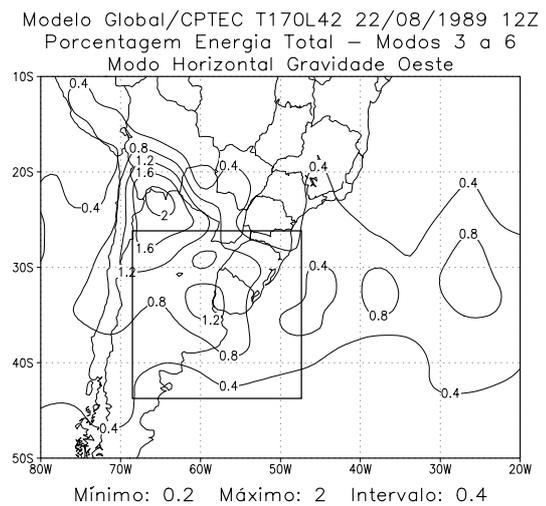
(a)



(b)

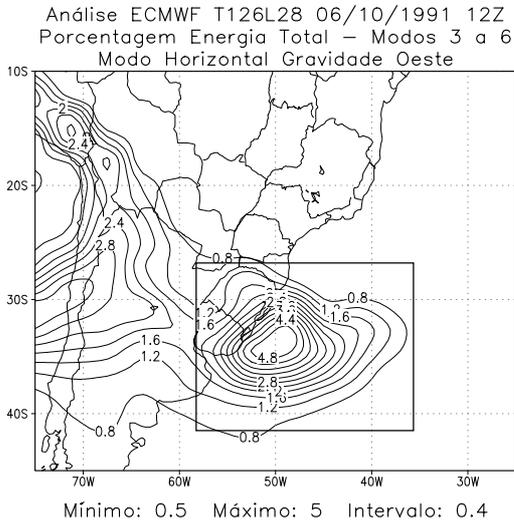


(c)

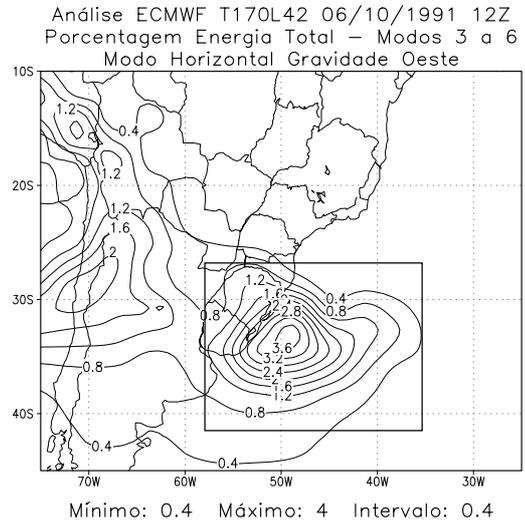


(d)

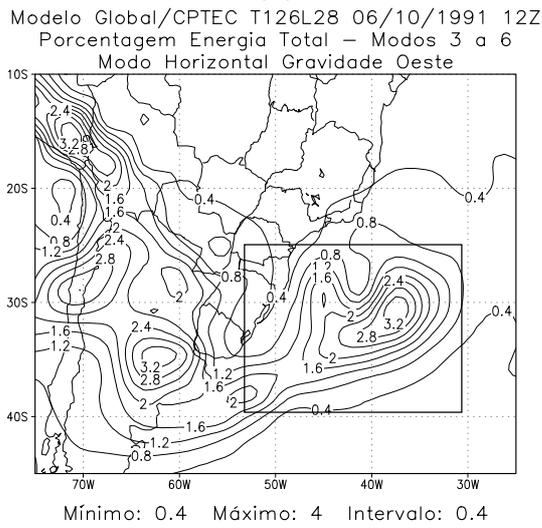
**FIGURA 5.22** – Energia total (%) do modo Gravidade oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



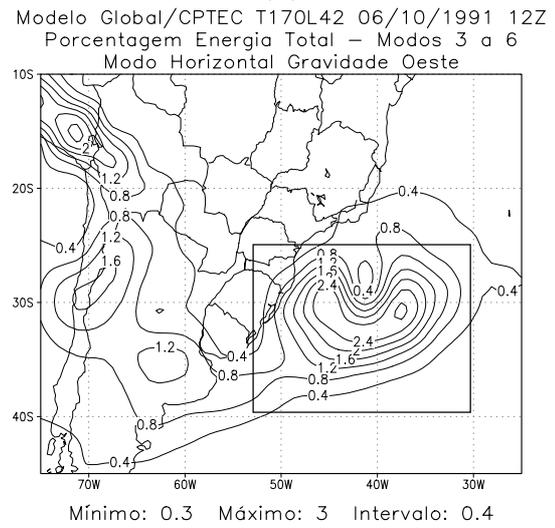
(a)



(b)



(c)



(d)

**FIGURA 5.23** – Idem Figura 5.22, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.

### 5.3 – Interações entre os Modos Horizontais

A energia total devido à interação entre pares de modos horizontais é obtida da mesma maneira descrita na Seção 5.2, exceto que agora será calculado para as interações entre os modos horizontais. As interações são definidas como em Andrade (1994), ou seja, considerando apenas a energia cinética zonal ( $E_{CZ}$ ) dada por:

$$\begin{aligned}
 E_{CZ} = \frac{1}{2}U^2 = \frac{1}{2}(U_{RB} + U_{KV} + U_{MX} + U_{GO} + U_{GE})^2 = \\
 \frac{1}{2}(U_{RB}^2 + U_{KV}^2 + U_{MX}^2 + U_{GO}^2 + U_{GE}^2) + \\
 U_{RB}(U_{KV} + U_{MX} + U_{GO} + U_{GE}) + \\
 U_{KV}(U_{MX} + U_{GO} + U_{GE}) + \\
 U_{MX}(U_{GO} + U_{GE}) + \\
 U_{GO} + U_{GE}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

onde  $U$  é o vento zonal e os índices  $RB, KV, MX, GO$  e  $GE$  referem-se, respectivamente, aos modos horizontais de Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, Gravidade propagando-se para oeste e leste. A energia cinética zonal de um determinado modo horizontal ( $MH$ ) é dada por:

$$E_{CZ_{MH}} = \frac{1}{2}U_{MH}^2 \tag{5.2}$$

Por exemplo, se o modo horizontal ( $MH$ ) for para a onda de Rossby, a energia cinética zonal para o modo horizontal Rossby será:

$$E_{CZ_{RB}} = \frac{1}{2}U_{RB}^2 \tag{5.3}$$

Os produtos cruzados se anulam se integrados globalmente, devido às propriedades de ortogonalidade das funções de Hough, porém podem ser interpretados localmente como interferência construtiva (valores positivos) ou destrutiva (valores negativos) entre os modos que produzem o produto. Neste caso, podem aparecer valores maiores que 100% para a porcentagem relativa aos modos horizontais de oscilação. Então, a interação entre o modo horizontal  $HA$  e  $HB$  pode ser definida como o produto  $U_{HA}U_{HB}$ . Exemplo: energia cinética zonal entre a interação dos modos horizontais Rossby e Kelvin é dada por:

$$E_{CZ_{RBKV}} = \frac{1}{2}U_{RB}U_{KV} \quad (5.4)$$

De maneira análoga, pode-se decompor a energia cinética meridional e a energia potencial disponível em termos dos modos horizontais.

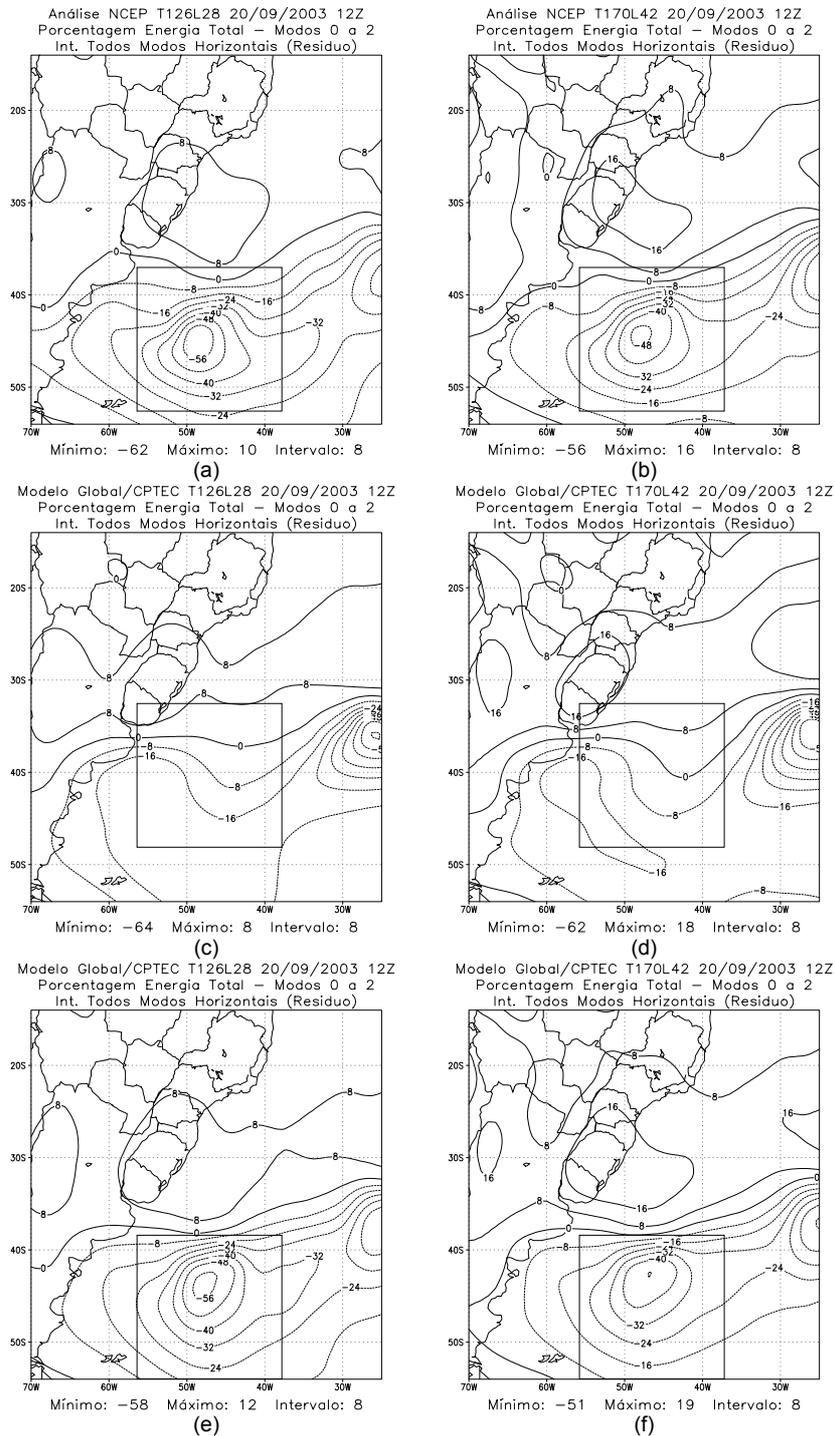
A porcentagem de energia para a soma de todas as interações (resíduo) definidas na equação 5.1 para as resoluções T126L28 e T170L42 apresentou uma maior interação para a primeira categoria. A Figura 5.24 mostra o resíduo referente ao caso setembro de 2003. Pode-se observar para a segunda categoria desse mesmo caso o resíduo no Apêndice D, representado pela Figura D.8 (segunda categoria). Vale ressaltar que a terceira categoria não será apresentada no Apêndice, por não apresentar resultados muito significativos.

Nota-se para a primeira categoria (Figura 5.24) que os valores significativos aparecem mais em latitudes médias, onde há uma alternância entre valores positivos e negativos na região próxima e no local do SSMNVI, caracterizando um trem de ondas. A região do SSMNVI é denotada por interferência destrutiva de energia que pode ser vista através dos resultados da análise do NCEP para as duas resoluções em questão (a) e (b); e pela simulação dos dois esquemas de convecção Kuo (c) e (d) e RAS (e) e (f) pode-se ver que os modelos

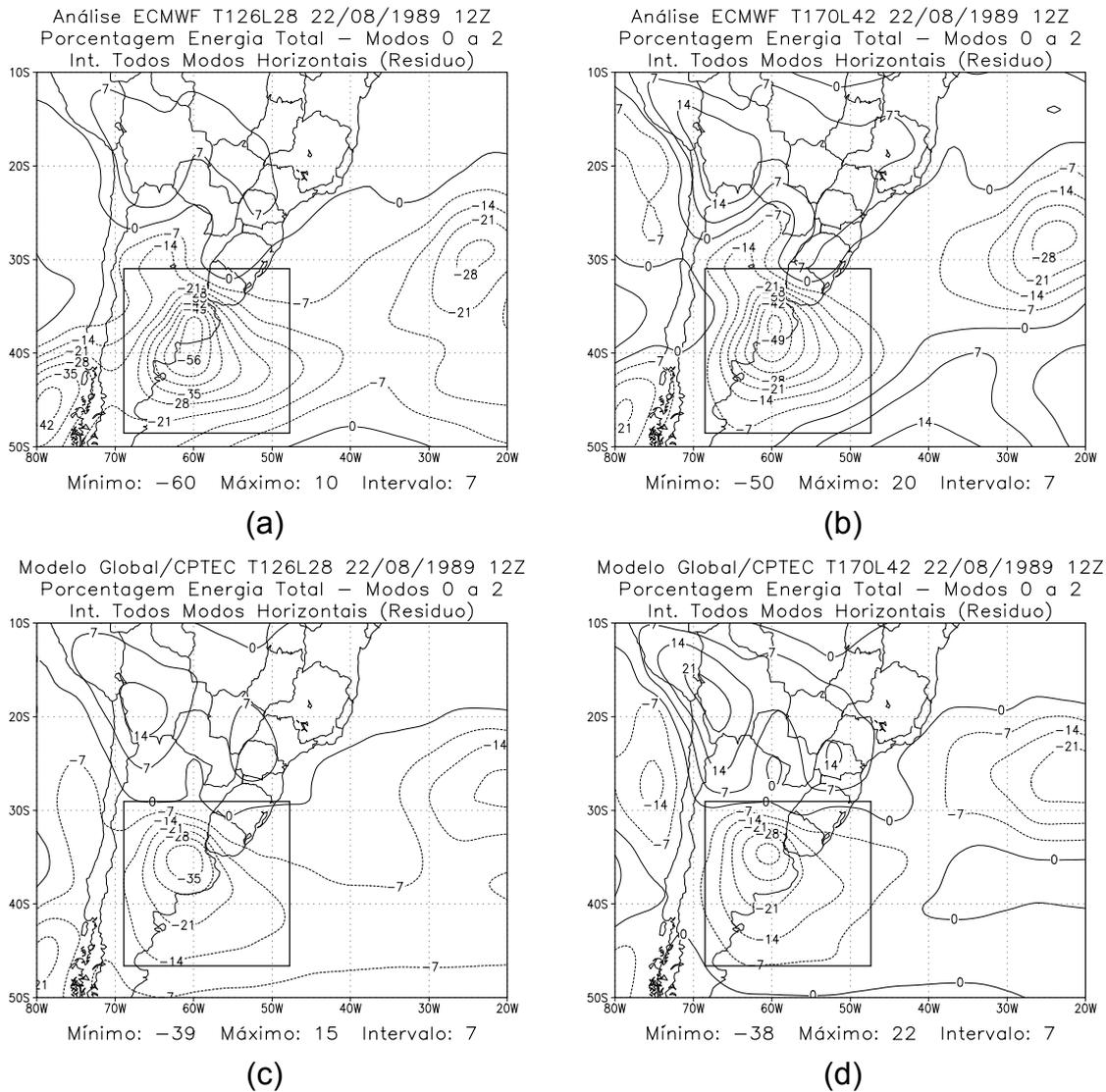
representam bem o trem de ondas e a região de interferência destrutiva entre as ondas, exceto que pela localização mais a oeste da análise simulada pelo modelo com esquema de convecção Kuo, aspecto esse já observado anteriormente. Para a segunda categoria, Figura D.9 do Apêndice D, a região tropical é a que detém a maior concentração de energia. Pelos limites (latitude x longitude) que está sendo analisado, o resíduo dessa região em questão, denota interferência construtiva na maior parte do domínio estudado, exceto na região do SSMNVI, onde tem-se interferência destrutiva. Vale ressaltar que o modelo com esquema Kuo (Figura D.9 (c) e (d)), apresenta valores maiores para a segunda categoria do que a análise, indicando uma maior interferência destrutiva a sudeste do sul do Brasil, estendendo-se para o oceano. Como foi observado anteriormente, a resolução do T126L28 indica valores percentuais de energia tanto destrutiva como construtiva ligeiramente maiores que o T170L42.

Em relação aos outros três casos, o mesmo pode ser observado em comparação com o caso ocorrido em setembro de 2003, por isso, será apresentado a seguir somente o resultado do caso ocorrido em agosto de 1989, onde na região do SSMNVI, a maior porcentagem da soma de todas as interações está sobre a região do SSMNVI, indicando interferência destrutiva entre as ondas (Figura 5.25), muito bem simulada pelo modelo para ambas as resoluções em termos de localização e com magnitude de valores ligeiramente maiores para a resolução do T126L28 em relação à resolução do T170L42.

Dentre os produtos cruzados que serão estudados a seguir, as interações entre os modos horizontais Kelvin – Misto Rossby-Gravidade, Kelvin – Gravidade leste, Misto Rossby-Gravidade – Gravidade oeste e Misto Rossby-Gravidade – Gravidade leste não serão exibidos nessa seção e no Apêndice, pois foram interações com resultado poucos expressivos para a análise energética do SSMNVI.



**FIGURA 5.24** – Energia total (%) para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



**FIGURA 5.25** – Energia total (%) para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.

As interações entre os pares de ondas mostradas nas Figuras 5.26 a 5.39 representam as porcentagens de energia total entre os produtos cruzados do modo horizontal Rossby com os modos Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, Gravidade oeste e leste. A interação Rossby-Kelvin para os modos verticais de

0 a 2 para os quatro casos são apresentadas nas Figuras 5.26 a 5.29. Nota-se, que em geral, as configurações são semelhantes para ambas as resoluções, porém a resolução T170L42 apresenta valores em magnitudes ligeiramente maiores na região do SSMNVI. A região no local do SSMNVI é dominada por interferência destrutiva de energia (latitudes médias para altas); e conforme as latitudes vão diminuindo há um aumento da energia (interferência construtiva de energia). Essa configuração ocorre de modo geral nos quatro casos, valendo ressaltar que ao Norte do SSMNVI até o Norte da região de Minas Gerais (acima de 15°S) a energia vai diminuindo e a região tropical é dominada por interferência destrutiva de energia. Isso ocorre, pois os modos verticais de 0 a 2 das ondas de Rossby e Kelvin são dominados por construção de energia na região de latitudes médias para altas.

Comparando-se as análises (itens (a) e (b)) das Figuras 5.26 a 5.29 com os itens (c) e (d) do modelo com esquema de convecção Kuo, pode-se observar que o modelo consegue representar muito bem essa interação, com configurações muito semelhantes, localizando o SSMNVI um pouco mais a oeste do que observado pelas análises. Apenas o caso setembro de 2003 (Figura 5.26 (c) e (d)) o modelo não simulou muito bem a localização e as magnitudes dos valores na região do SSMNVI, como visto anteriormente, mostrando que o Modelo com esquema de convecção RAS consegue representar muito bem o SSMNVI em relação ao esquema Kuo. Nos casos: abril 1979, agosto 1989 e outubro 1991, o SSMNVI ocorre sobre o continente sul Americano, ao contrário do caso setembro de 2003, onde seu estágio maduro está sobre o oceano e é muito melhor representado pelo modelo com esquema de convecção RAS, se comparado ao esquema Kuo para esse caso específico. Já o esquema Kuo, foi melhor para os outros três casos que ocorreram sobre o continente sul Americano.

Os modos verticais de 3 a 6 a porcentagem de energia é maior na região tropical, não havendo interação importante no domínio que interessa e por isso

não é apresentada. A interação entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade para os modos verticais de 0 a 2 são mostrados nas Figuras 5.30 e 5.31. Como os resultados não são tão expressivos, apenas será apresentado o caso setembro de 2003 (Figura 5.30) e agosto de 1989 (Figura 5.31) dentre os outros três casos que obtiveram valores mais significativos na região do SSMNVI. Em geral os valores são baixos, apresentando destruição de energia a leste e construção de energia a oeste da região do SSMNVI (Figura 5.30 (a) e (b)), muito bem simulados pelo modelo Kuo (localizando a região mais a oeste próximo ao sul do Brasil) e RAS, com valores um pouco menores em comparação com as análises. Para o caso agosto de 1989 (Figura 5.31) ocorre o contrário, tem-se destruição de energia a oeste e construção de energia a leste do SSMNVI com valores percentuais maiores do que simulados pelo modelo.

As Figuras 5.32 a 5.35 e 5.36 a 5.39 apresentam respectivamente as interações entre os modos horizontais Rossby e Gravidade oeste e Rossby e Gravidade leste para os modos verticais 3 a 6 referente aos quatro casos. Para a segunda categoria da interação Rossby-Gravidade oeste do caso setembro de 2003, há uma grande interferência destrutiva na região do SSMNVI, com um núcleo de construção de energia a oeste da região de destruição de energia (Figura 5.32 (a) e (b)). O mesmo pode ser observado pelo modelo com esquema Kuo para ambas resoluções (c) e (d), apresentando um máximo de destruição de energia mais próximo ao sul do Brasil deslocando-se para o sudeste e com valores maiores que o da análise. Pode-se também observar uma região de construção de energia a sudoeste do SSMNVI para o esquema Kuo e a oeste para o modelo com esquema RAS.

Nas Figuras 5.33 a 5.35, pode-se observar que a maior parte percentual de energia concentra-se nas médias e altas latitudes para a segunda categoria da interação Rossby-Gravidade oeste. Nos casos agosto de 1989 e outubro de 1991 Figuras 5.34 e 5.35, tem-se máximos de destruição de energia para ambos os casos na região do SSMNVI e a nordeste construção de energia.

Para o caso abril de 1979, a região do SSMNVI não está muito bem definida pela análise mostrando apenas uma pequena porcentagem de construção de energia para as resoluções T126L28 e T170L42 (Figura 5.33 (a) e (b)), diferente da simulação dos modelos (itens (c) e (d)), onde está muito bem definido a região de construção a oeste e destruição de energia a leste do SSMNVI. Pela simulação dos modelos dos outros dois casos, observa-se que o caso agosto de 1989 (Figura 5.34 (c) e (d)) foi muito bem simulado em termos de localização dos núcleos de destruição e construção de energia, com magnitudes maiores para o T126L28. O caso outubro de 1991 simulado pelos modelos (Figura 5.35 (c) e (d)), tem-se destruição de energia ao sul e construção de energia ao Norte do SSMNVI, mas com inclinação para nordeste, diferente da análise, onde o sistema tem sua inclinação para sudeste.

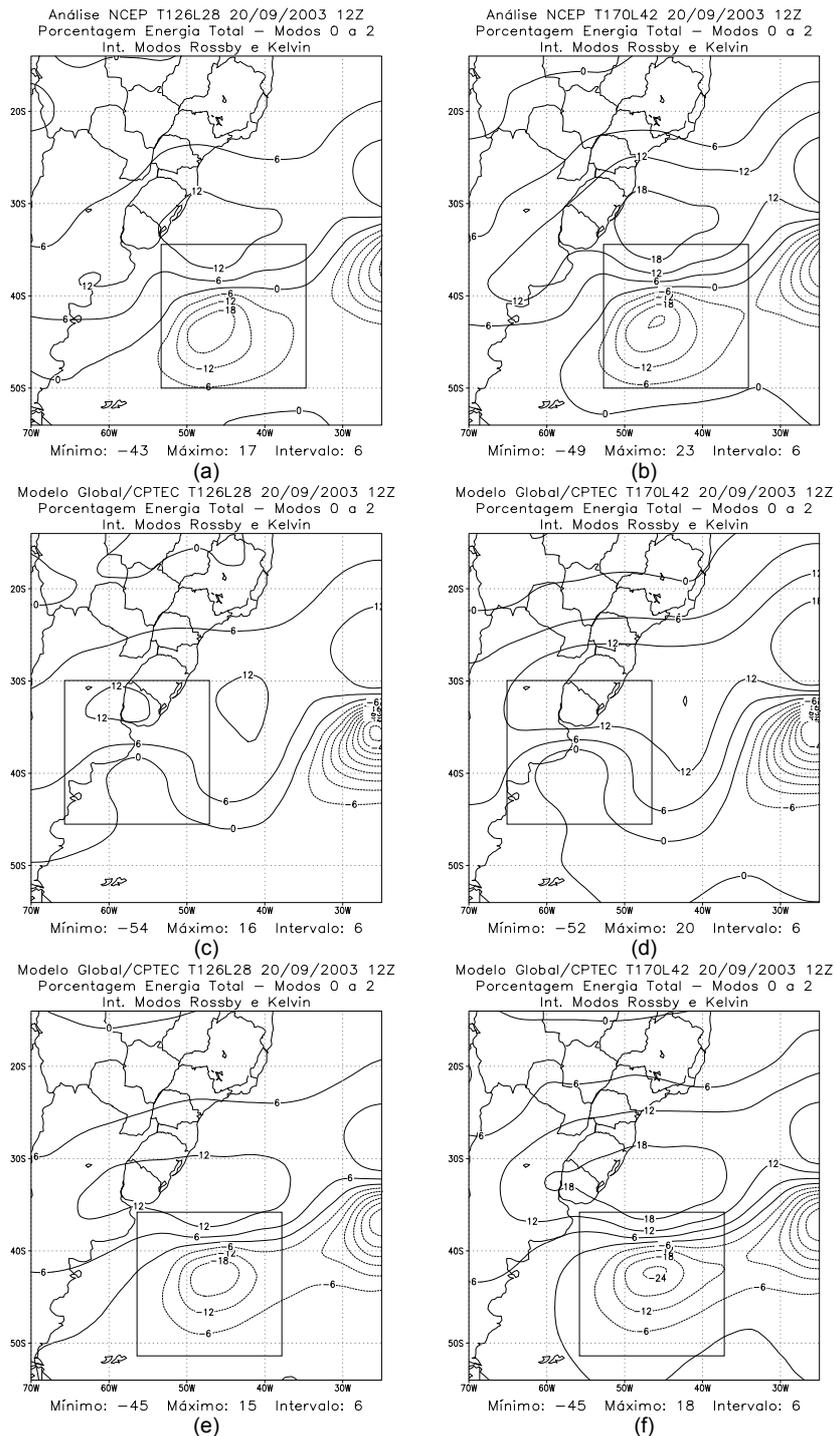
Os conjuntos de Figuras 5.36 a 5.39 representam a interação Rossby-Gravidade leste para a segunda categoria, muito semelhante à interação anterior. Pode-se observar de um modo geral para ambos os casos e resoluções que têm-se máximos de destruição de energia a oeste e construção a leste da região do SSMNVI, tendo suas características muito bem representadas pelos modelos, porém com valores mais intensos para a média resolução.

Para questão de comparação, encontra-se no Apêndice D, a primeira categoria para as interações Rossby-Gravidade propagando-se para oeste e leste (Figuras D.10 e D.11) para o caso setembro de 2003. Na interação Rossby-Gravidade leste, pode-se notar uma configuração de trem de ondas passando ao sul da América do Sul.

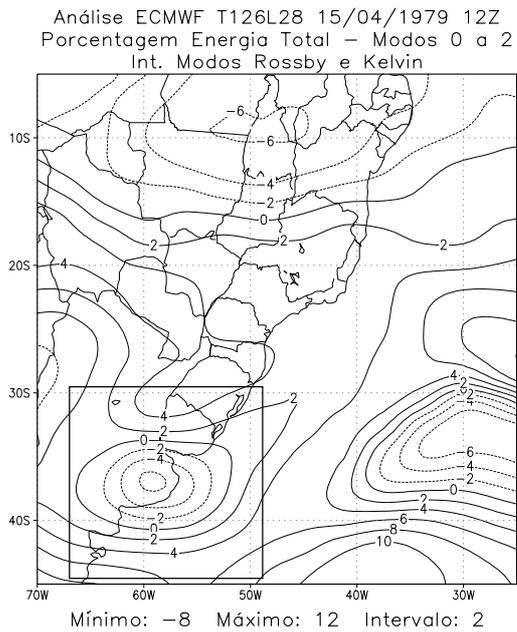
As contribuições da interação entre o modo Kelvin e Gravidade oeste, nos modos verticais de 0 a 2 não mostrou resultados expressivos para o caso abril de 1979 e por isso não estão expostas nessa seção. Para os casos setembro, agosto e outubro, Figuras 5.40 a 5.42, pode-se observar pelas análises (itens

(a) e (b)) que a maior porcentagem de energia concentra-se em médias e altas latitudes em termos de destruição de energia, mostrando que na região do SSMNVI há um núcleo de destruição de energia para os três casos citados, onde a interação entre esses modos tem de certa forma uma importante contribuição para o estudo da partição de energia entre os modos horizontais e verticais. Os modelos representaram muito bem a simulação dessa interação, com valores significativos ligeiramente mais intensos para o T170L42, com exceção para o modelo Kuo do caso setembro de 2003, onde a região destrutiva de energia referente o SSMNVI encontra-se mais próximo do continente Sul Americano.

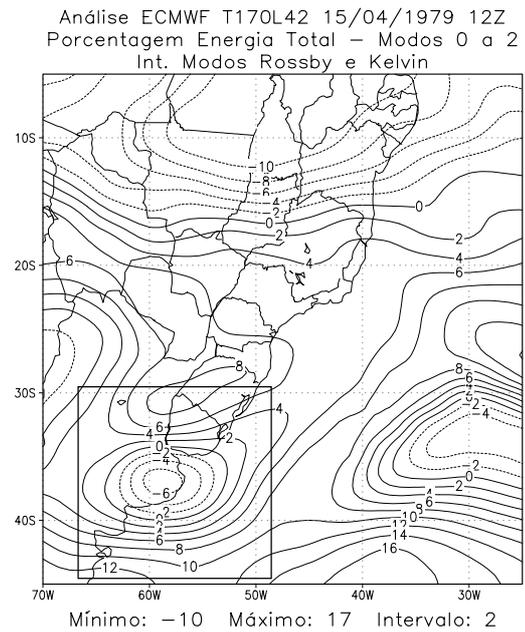
Nas Figuras 5.43 a 5.45 encontra-se a interação entre as ondas de Gravidade propagando-se para oeste e propagando-se para leste para a segunda categoria. Novamente o caso de 1979 não apresentou resultados expressivos e não será discutido aqui. As características principais a destacar são que as magnitudes são novamente menos intensa para a resolução mais alta e que há interferência construtiva de energia mais intensa do lado oeste da região do SSMNVI e uma pequena interferência destrutiva a leste para ambos os casos. Vale ressaltar que a simulação do modelo com esquema Kuo para o caso setembro de 2003 (Figura 5.43 (c) e (d)) representa muito melhor o SSMNVI para a segunda categoria do que para a primeira categoria, em termos valores e localização. Essa característica também pode ser observada nos modos horizontais para a segunda categoria Gravidade leste (Figura 5.18), Gravidade oeste (Figura 5.21) e nas interações entre os modos Rossby-Gravidade oeste e Rossby-Gravidade leste, Figuras 5.32 e 5.36 respectivamente. Para questão de comparação no Apêndice D encontra-se na Figura D.12 a interação entre os modos Gravidade oeste e leste para a segunda categoria.



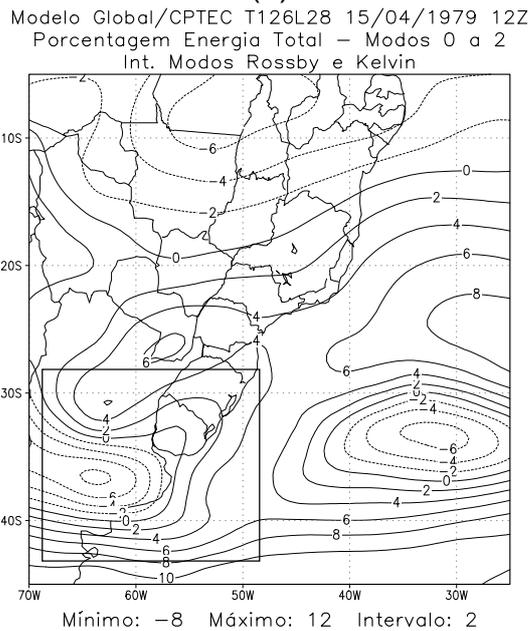
**FIGURA 5.26** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



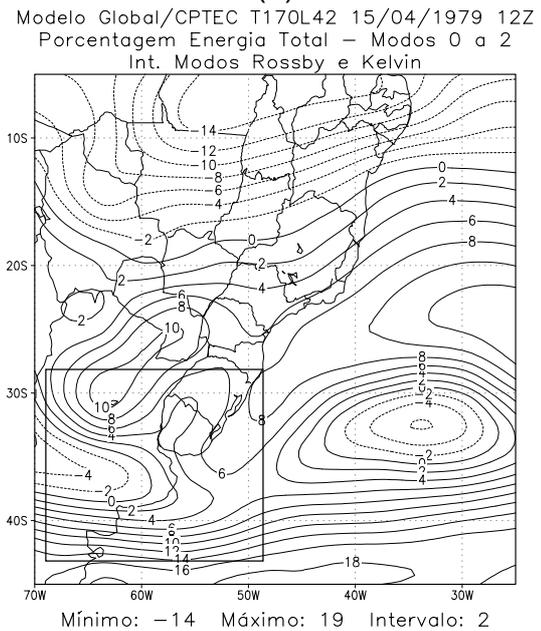
(a)



(b)

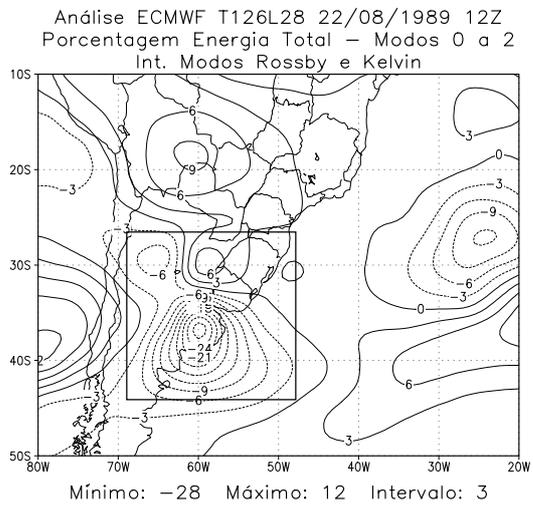


(c)

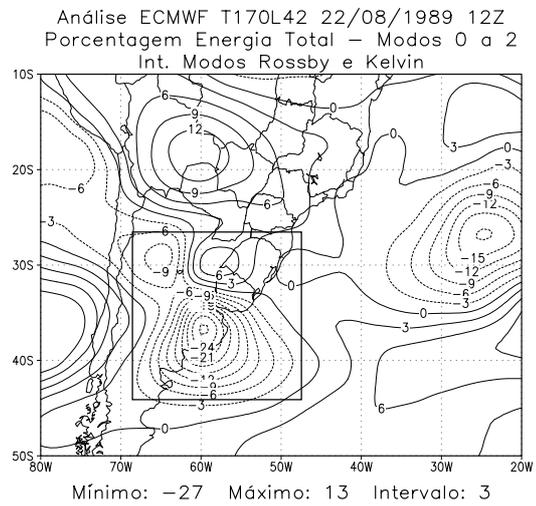


(d)

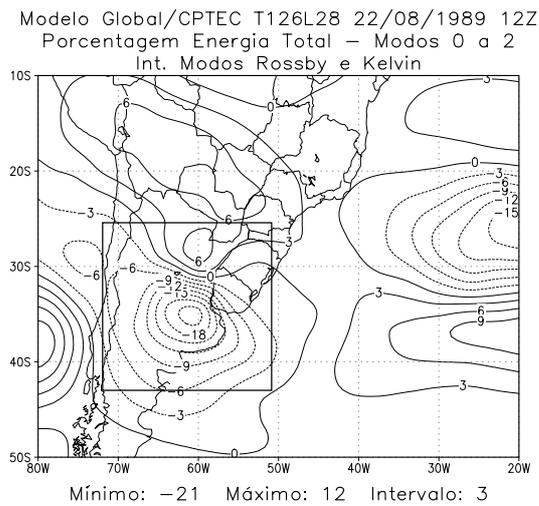
**FIGURA 5.27** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



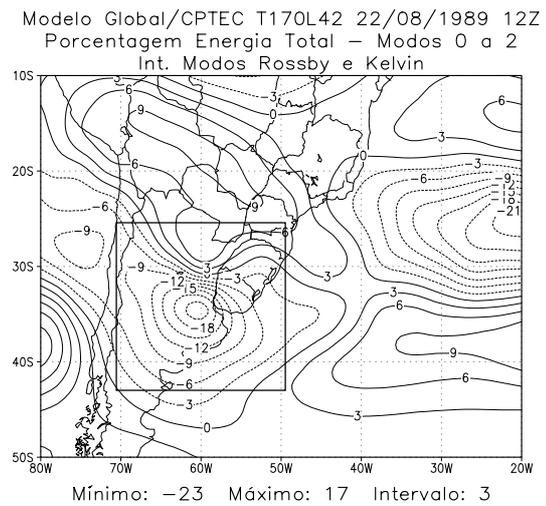
(a)



(b)

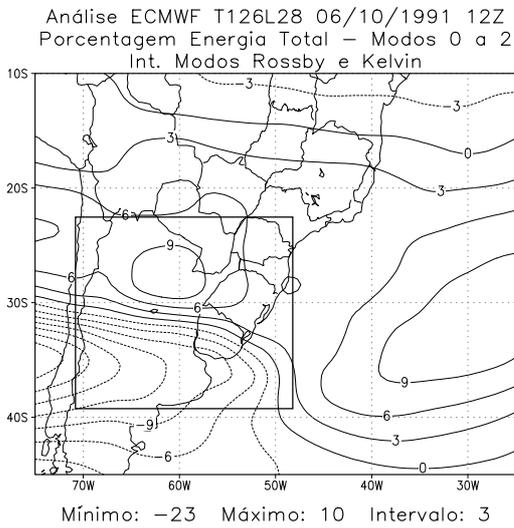


(c)

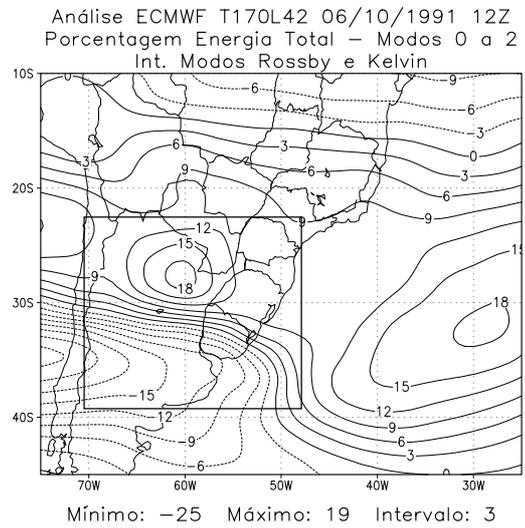


(d)

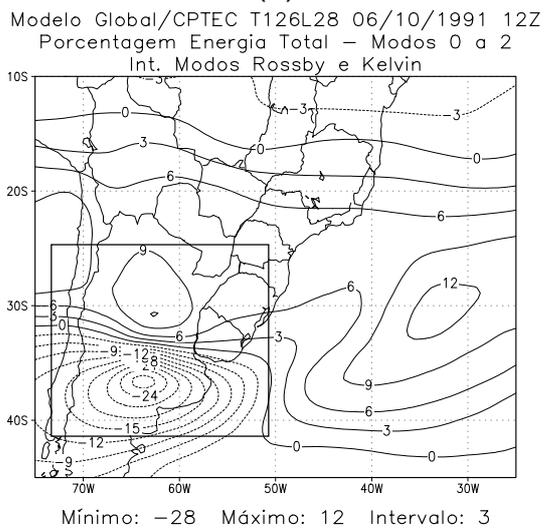
**FIGURA 5.28** – Idem Figura 5.27, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.



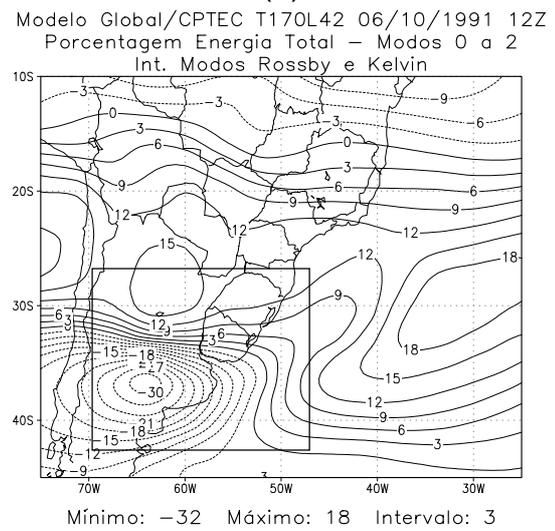
(a)



(b)

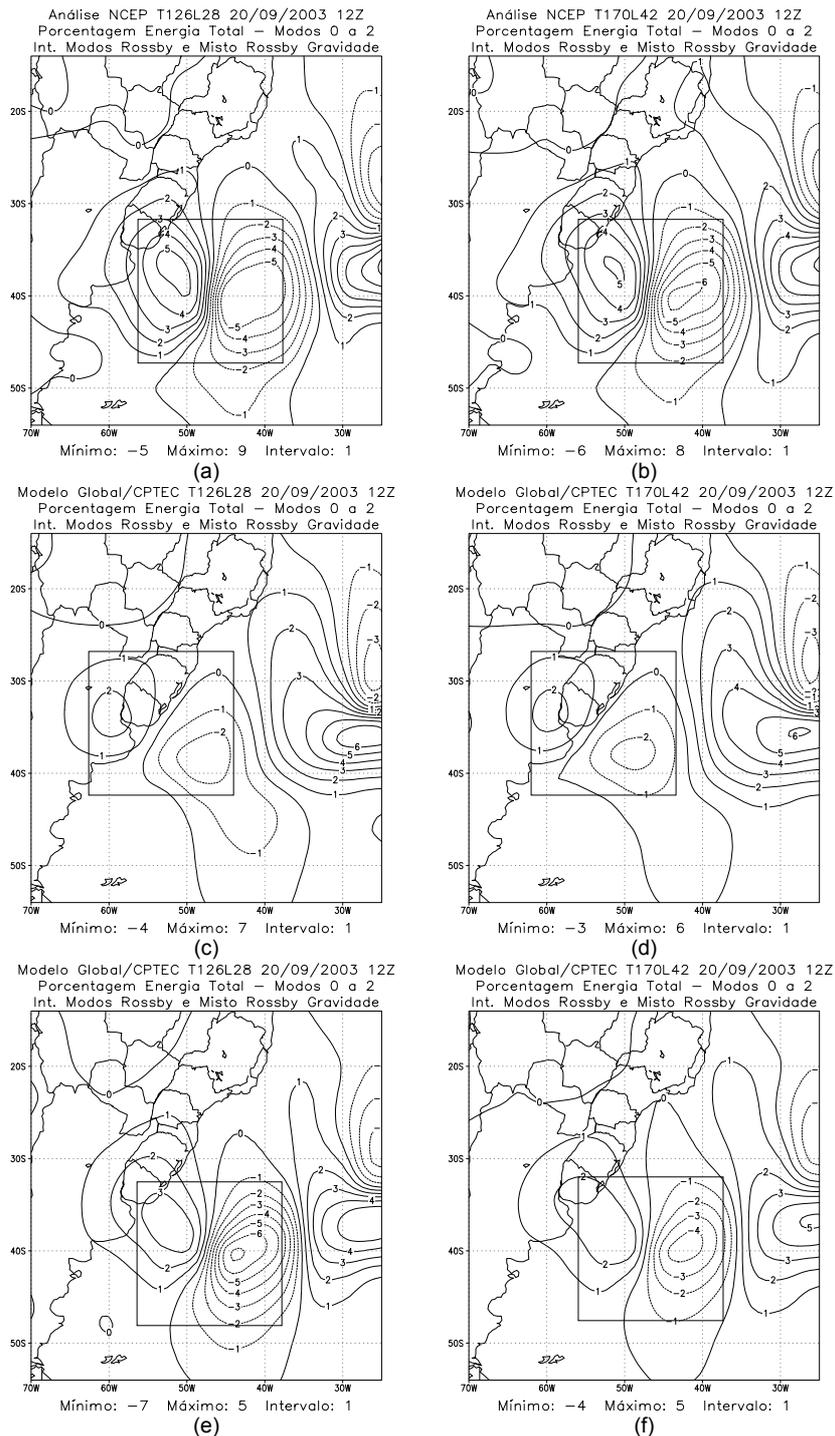


(c)

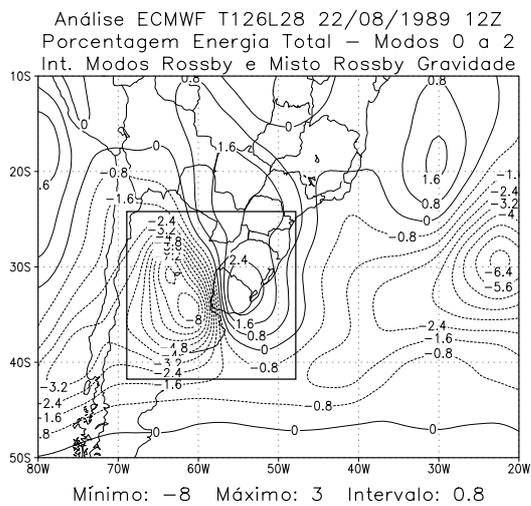


(d)

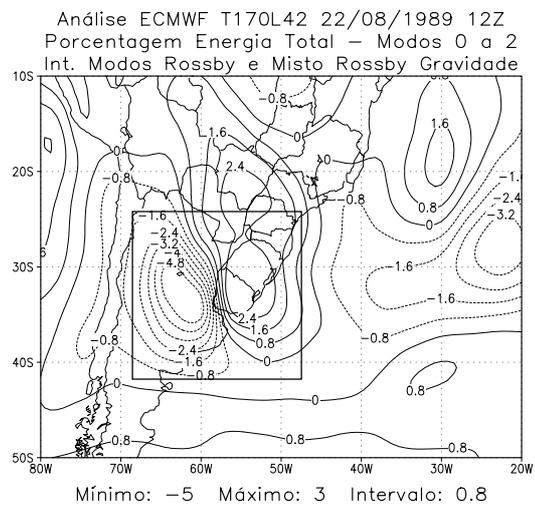
**FIGURA 5.29** – Idem Figura 5.27, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



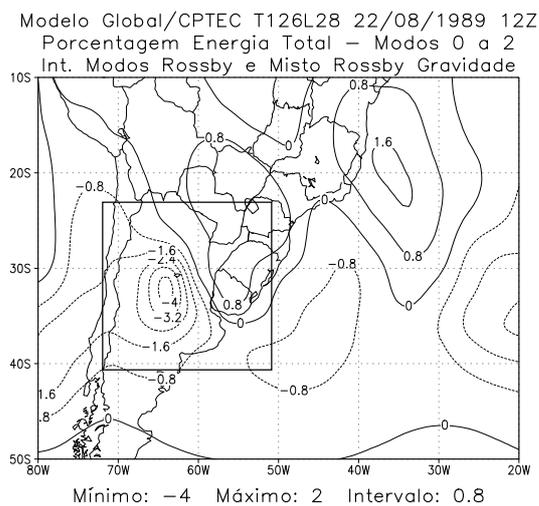
**FIGURA 5.30** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



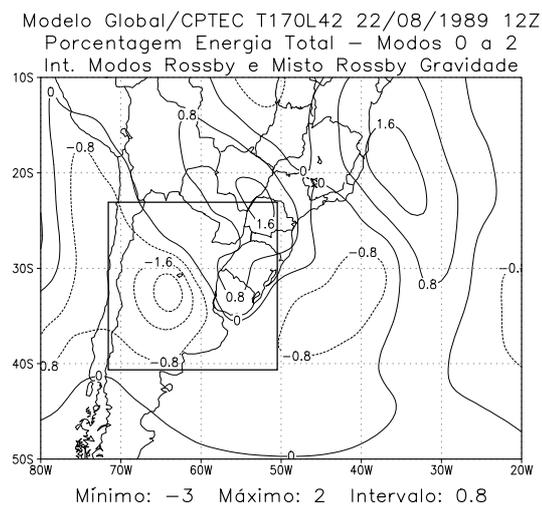
(a)



(b)

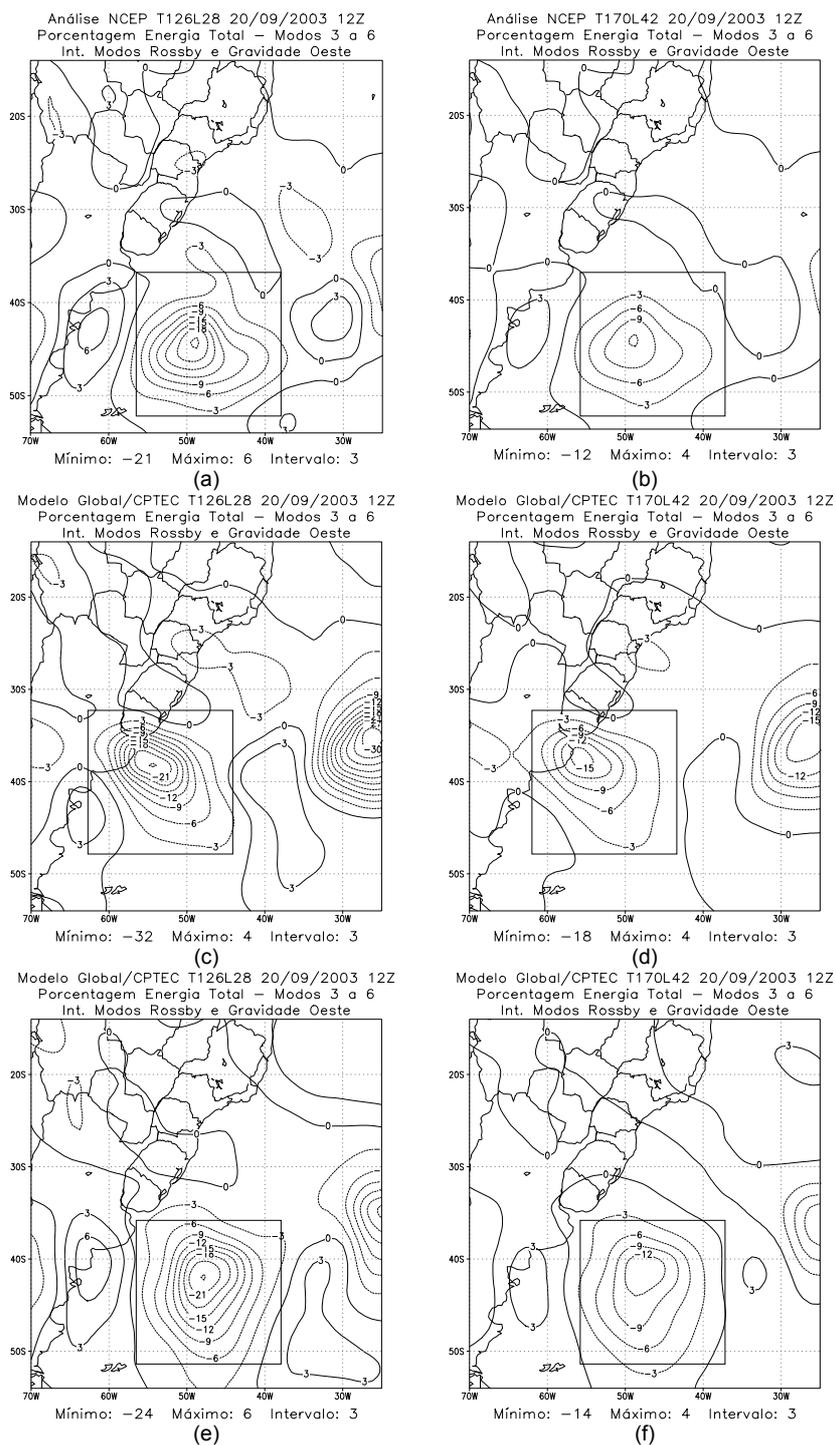


(c)



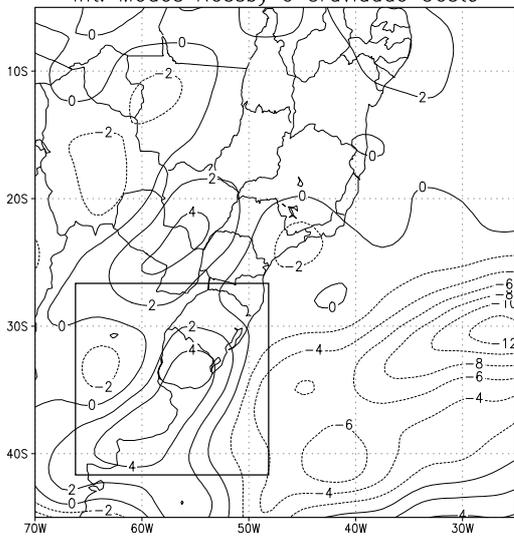
(d)

**FIGURA 5.31** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



**FIGURA 5.32** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade oeste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

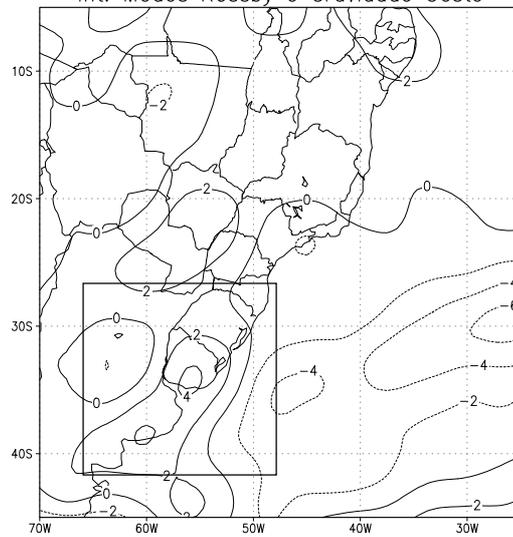
Análise ECMWF T126L28 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Oeste



Mínimo: -13 Máximo: 5 Intervalo: 2

(a)

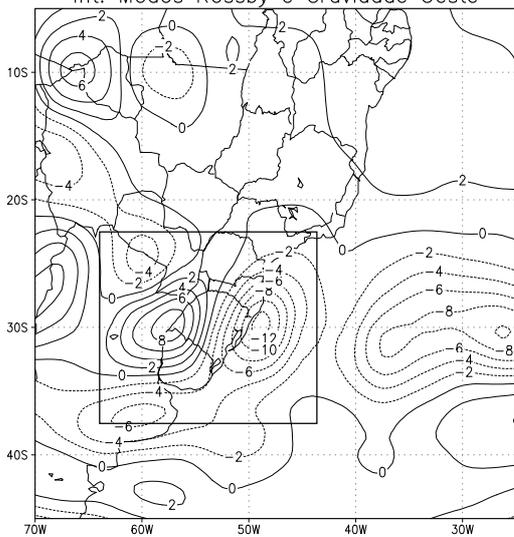
Análise ECMWF T170L42 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Oeste



Mínimo: -6 Máximo: 4 Intervalo: 2

(b)

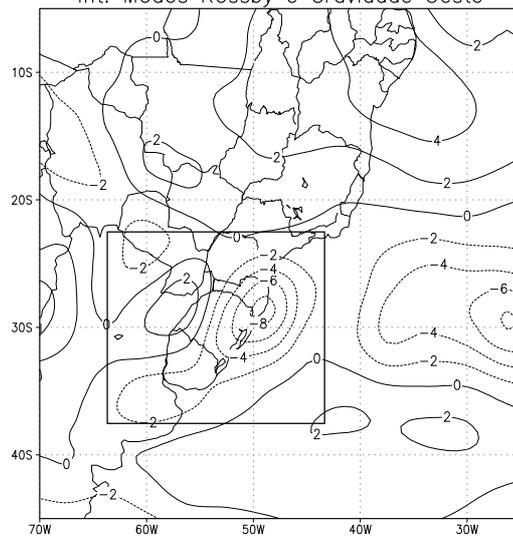
Modelo Global/CPTEC T126L28 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Oeste



Mínimo: -12 Máximo: 8 Intervalo: 2

(c)

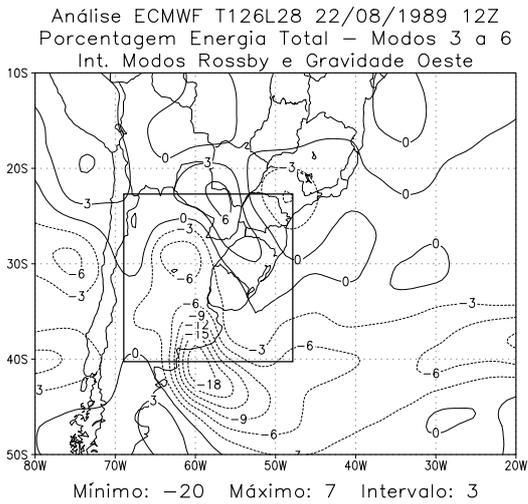
Modelo Global/CPTEC T170L42 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Oeste



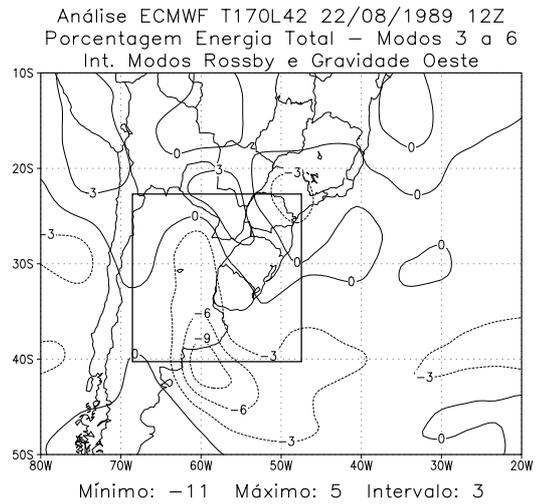
Mínimo: -9 Máximo: 5 Intervalo: 2

(d)

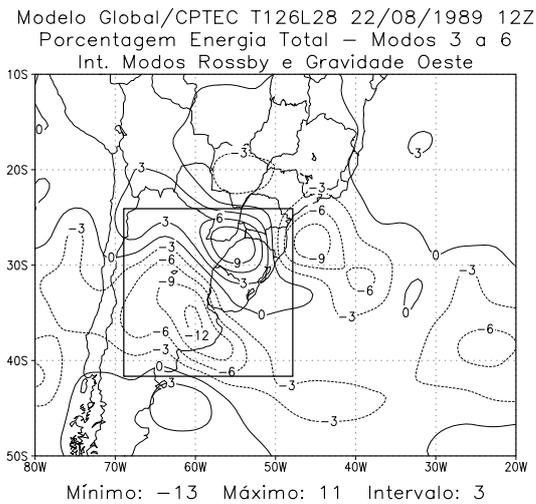
**FIGURA 5.33** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade oeste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



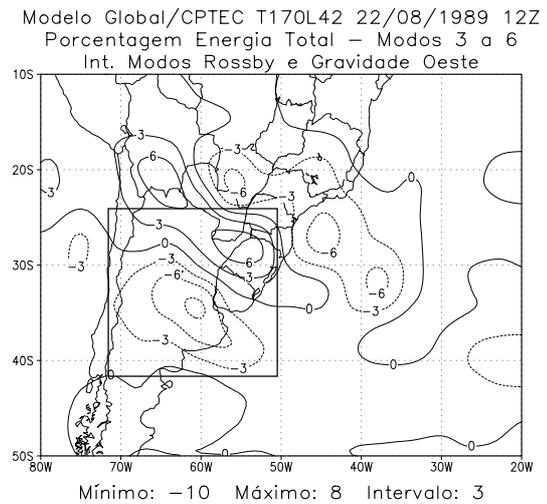
(a)



(b)

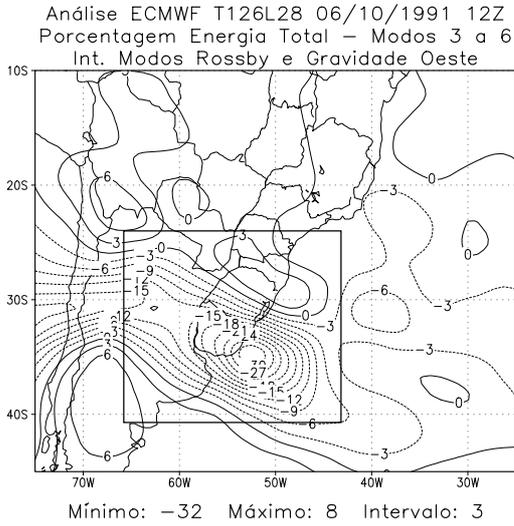


(c)

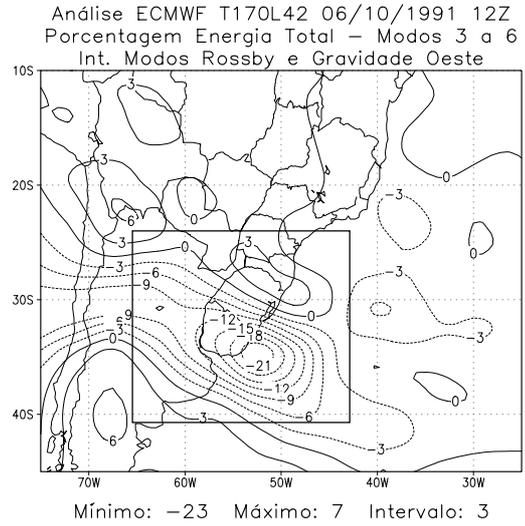


(d)

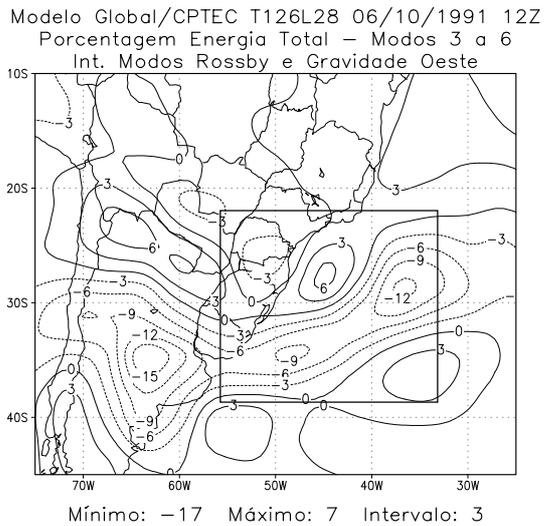
**FIGURA 5.34 – Idem Figura 5.33, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.**



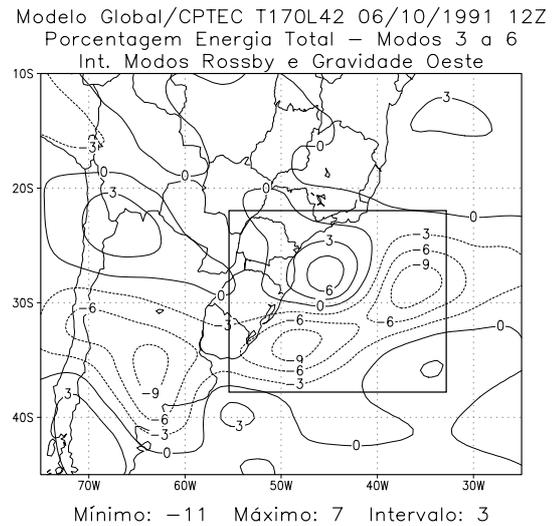
(a)



(b)

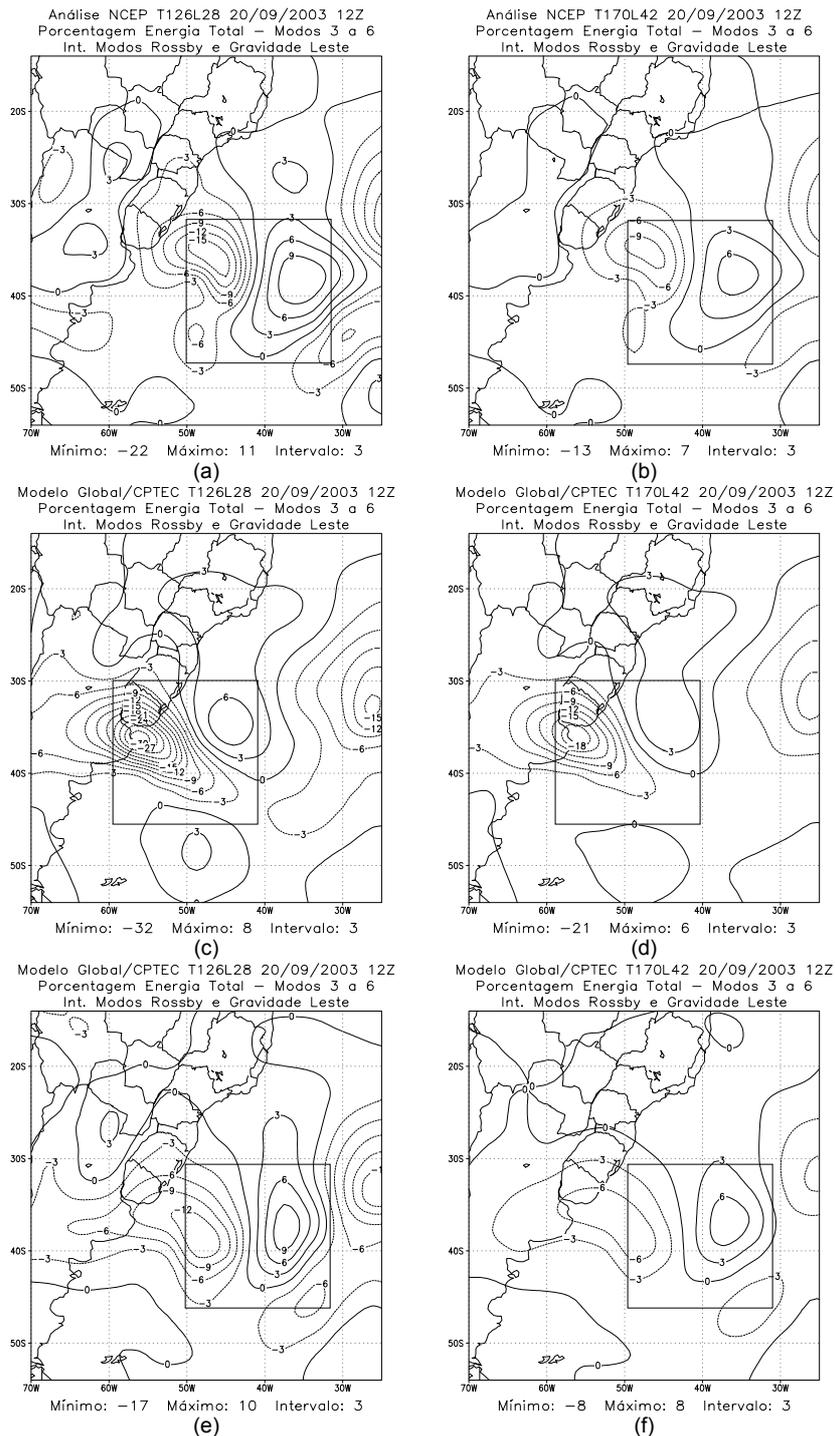


(c)



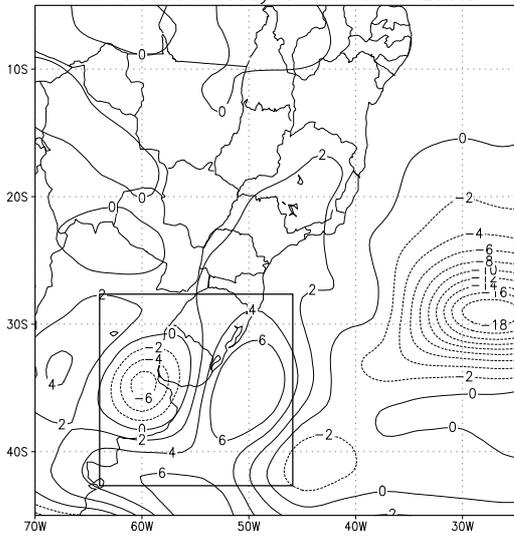
(d)

**FIGURA 5.35** – Idem Figura 5.33, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



**FIGURA 5.36** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

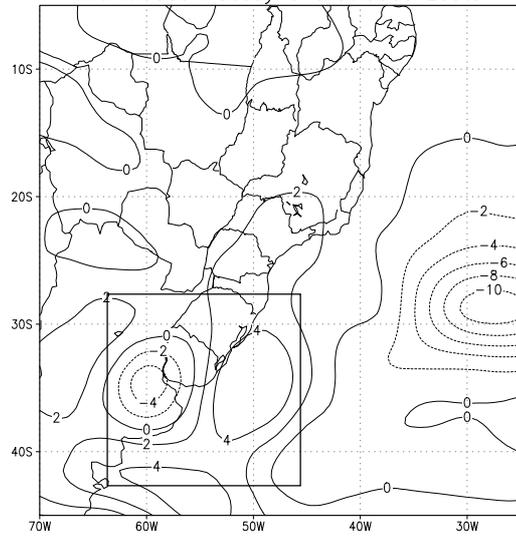
Análise ECMWF T126L28 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Leste



Mínimo: -20 Máximo: 7 Intervalo: 2

(a)

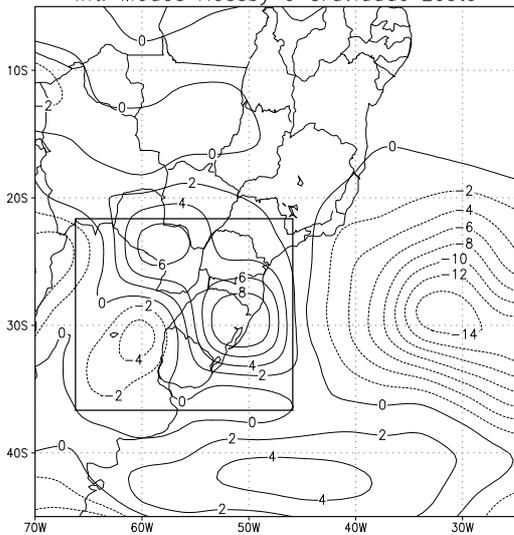
Análise ECMWF T170L42 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Leste



Mínimo: -11 Máximo: 5 Intervalo: 2

(b)

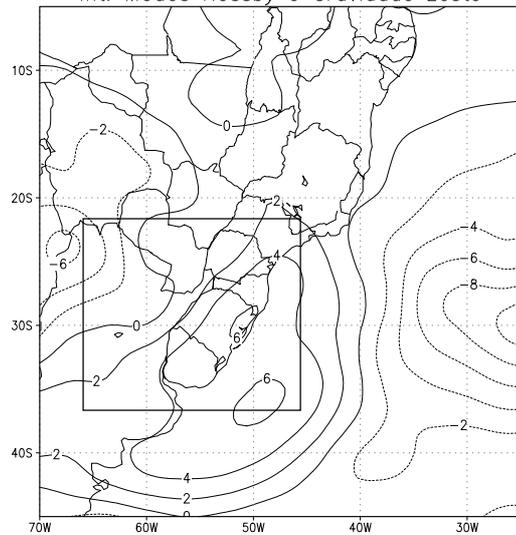
Modelo Global/CPTec T126L28 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Leste



Mínimo: -15 Máximo: 9 Intervalo: 2

(c)

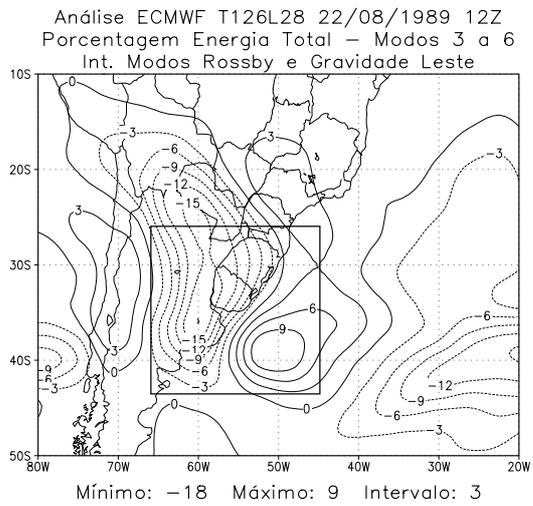
Modelo Global/CPTec T170L42 15/04/1979 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Rossby e Gravidade Leste



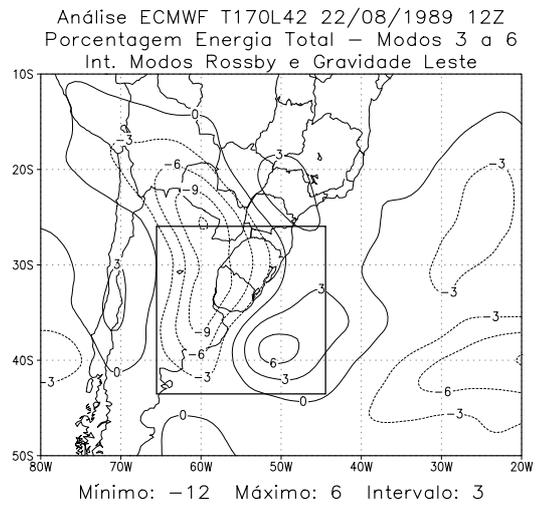
Mínimo: -12 Máximo: 6 Intervalo: 2

(d)

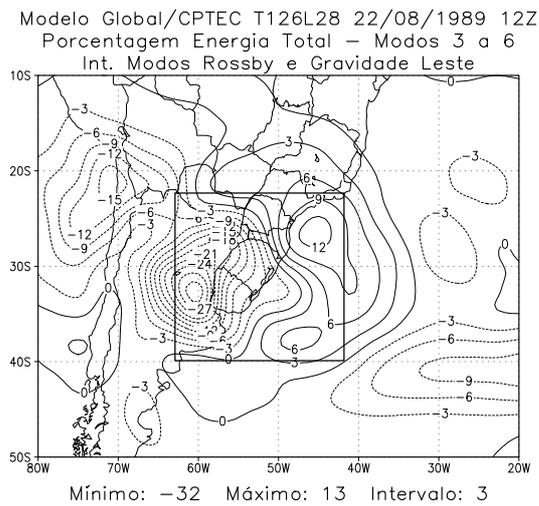
**FIGURA 5.37** – Energia total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 15/04/1979 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.



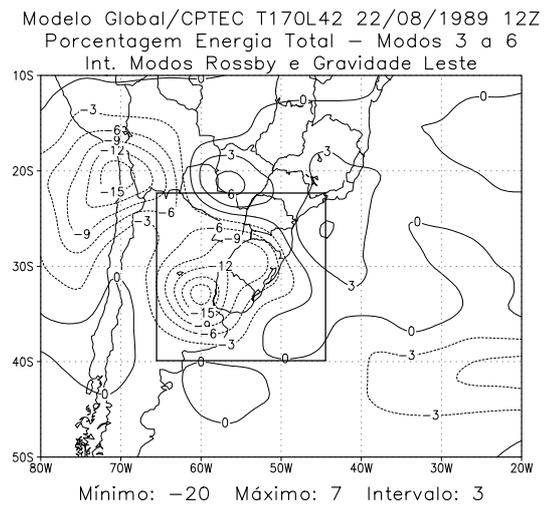
(a)



(b)

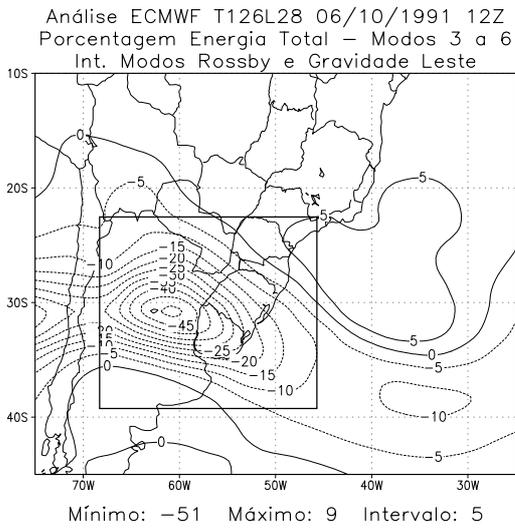


(c)

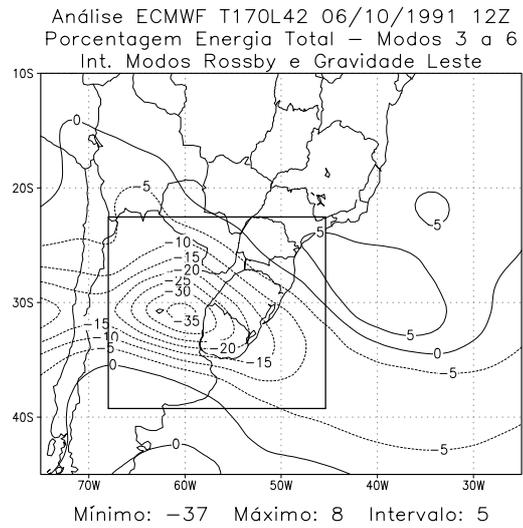


(d)

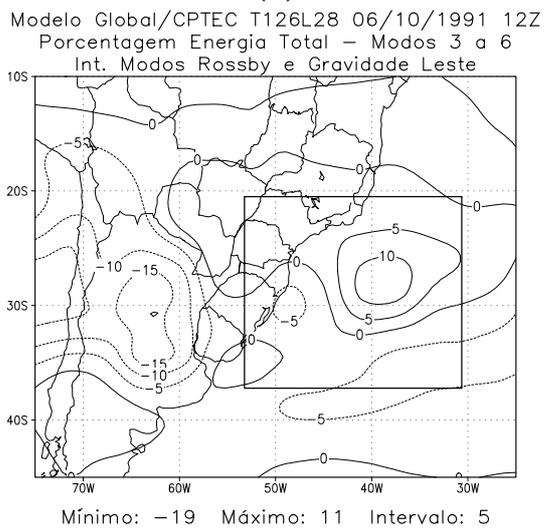
**FIGURA 5.38** – Idem Figura 5.37, exceto que para o dia 22/08/1989 -12Z.



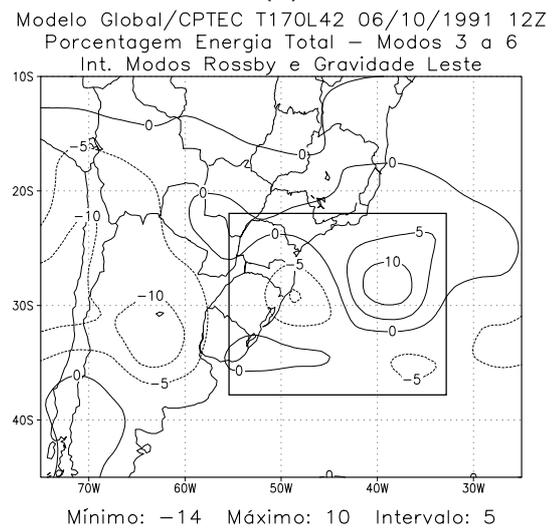
(a)



(b)

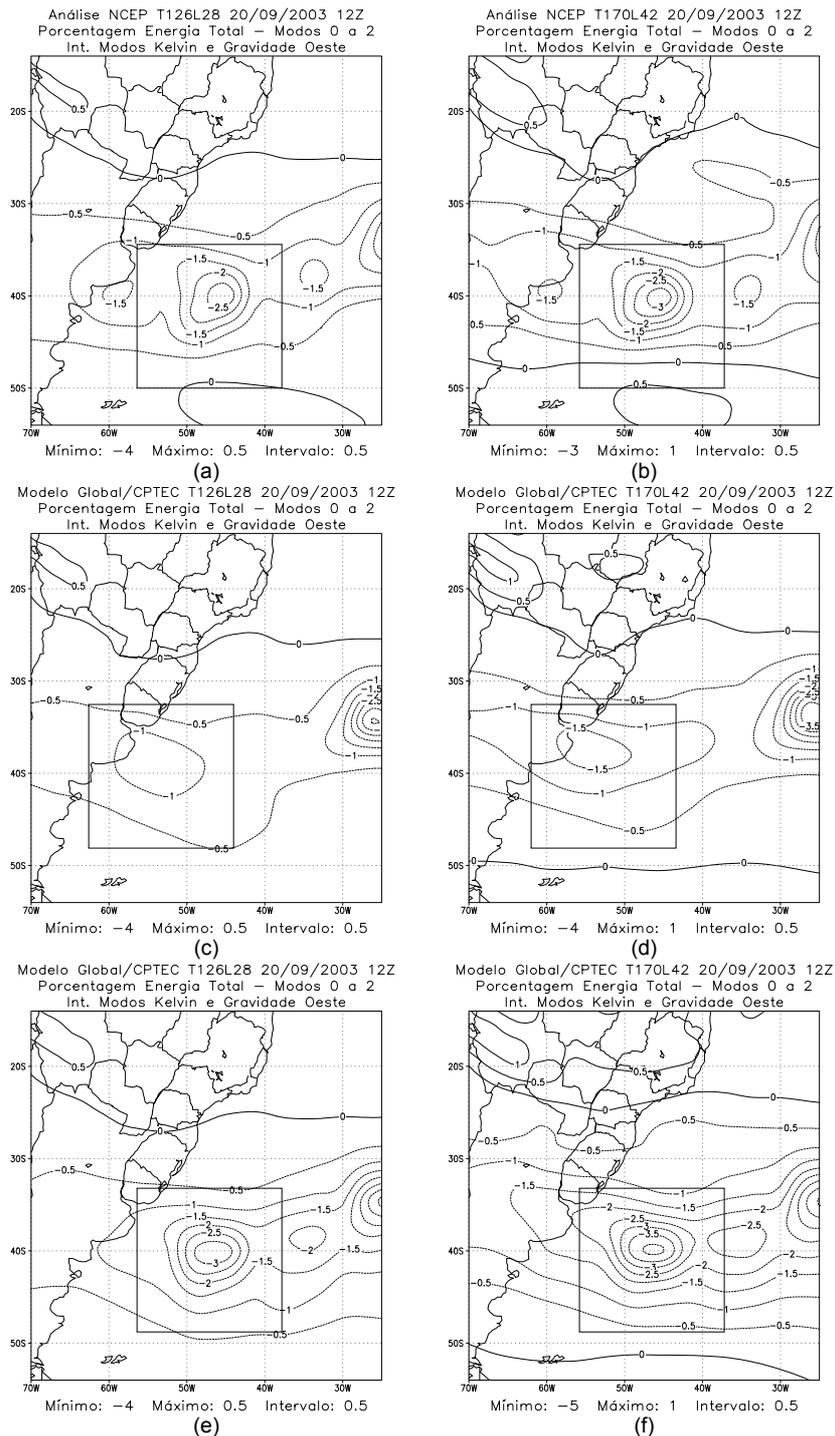


(c)

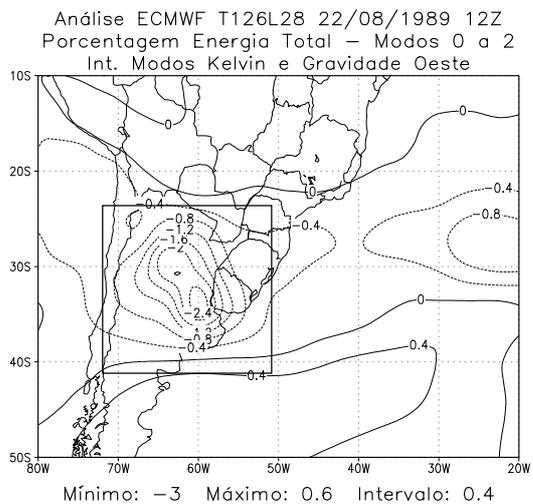


(d)

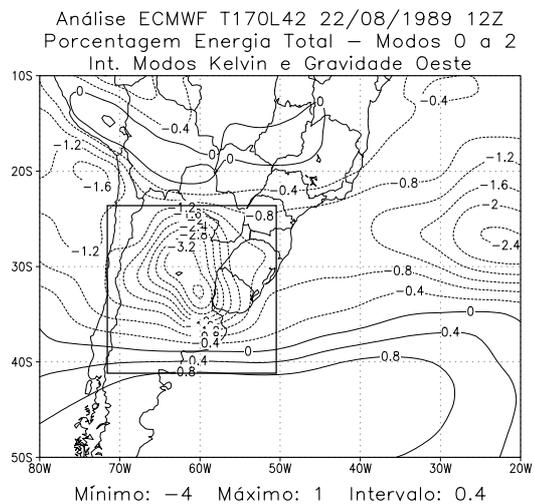
**FIGURA 5.39** – Idem Figura 5.37, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



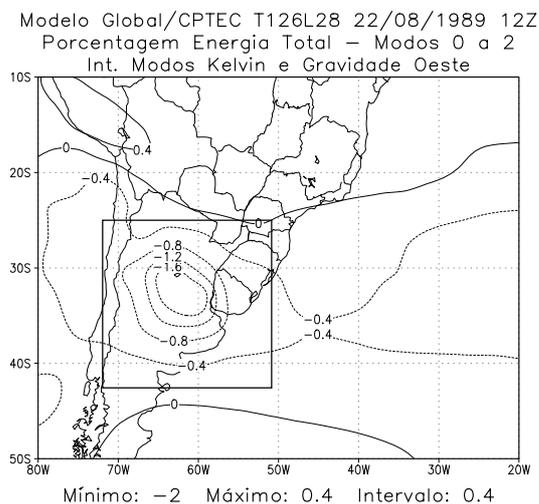
**FIGURA 5.40** – Energia total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



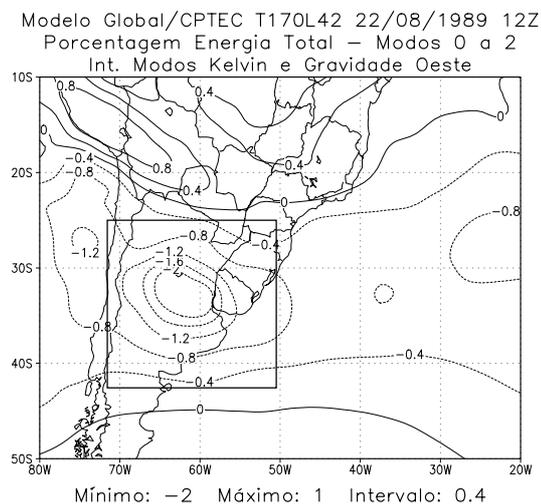
(a)



(b)



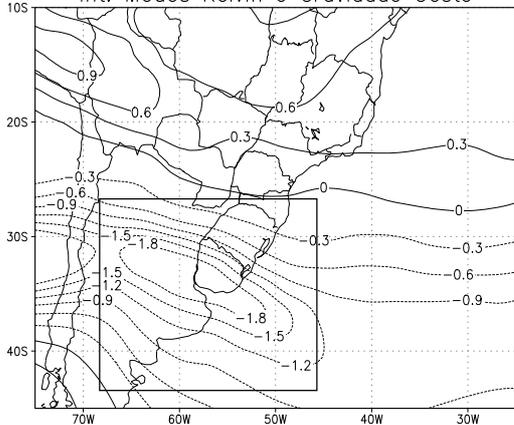
(c)



(d)

**FIGURA 5.41** – Energia total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade oeste para os modos verticais de 0 a 2, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.

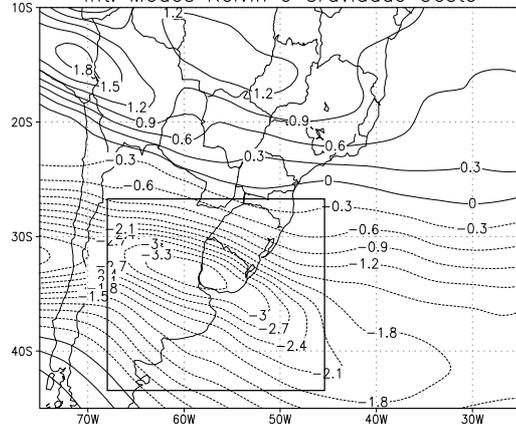
Análise ECMWF T126L28 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Int. Modos Kelvin e Gravidade Oeste



Mínimo: -2 Máximo: 1 Intervalo: 0.3

(a)

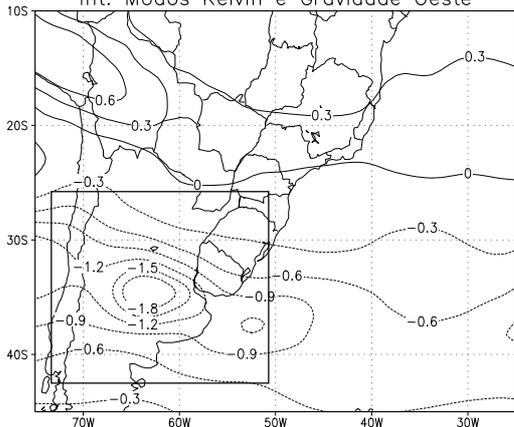
Análise ECMWF T170L42 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Int. Modos Kelvin e Gravidade Oeste



Mínimo: -4 Máximo: 2 Intervalo: 0.3

(b)

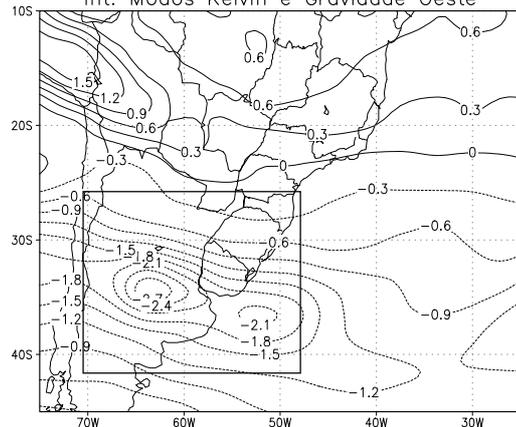
Modelo Global/CPTC T126L28 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Int. Modos Kelvin e Gravidade Oeste



Mínimo: -2 Máximo: 0.7 Intervalo: 0.3

(c)

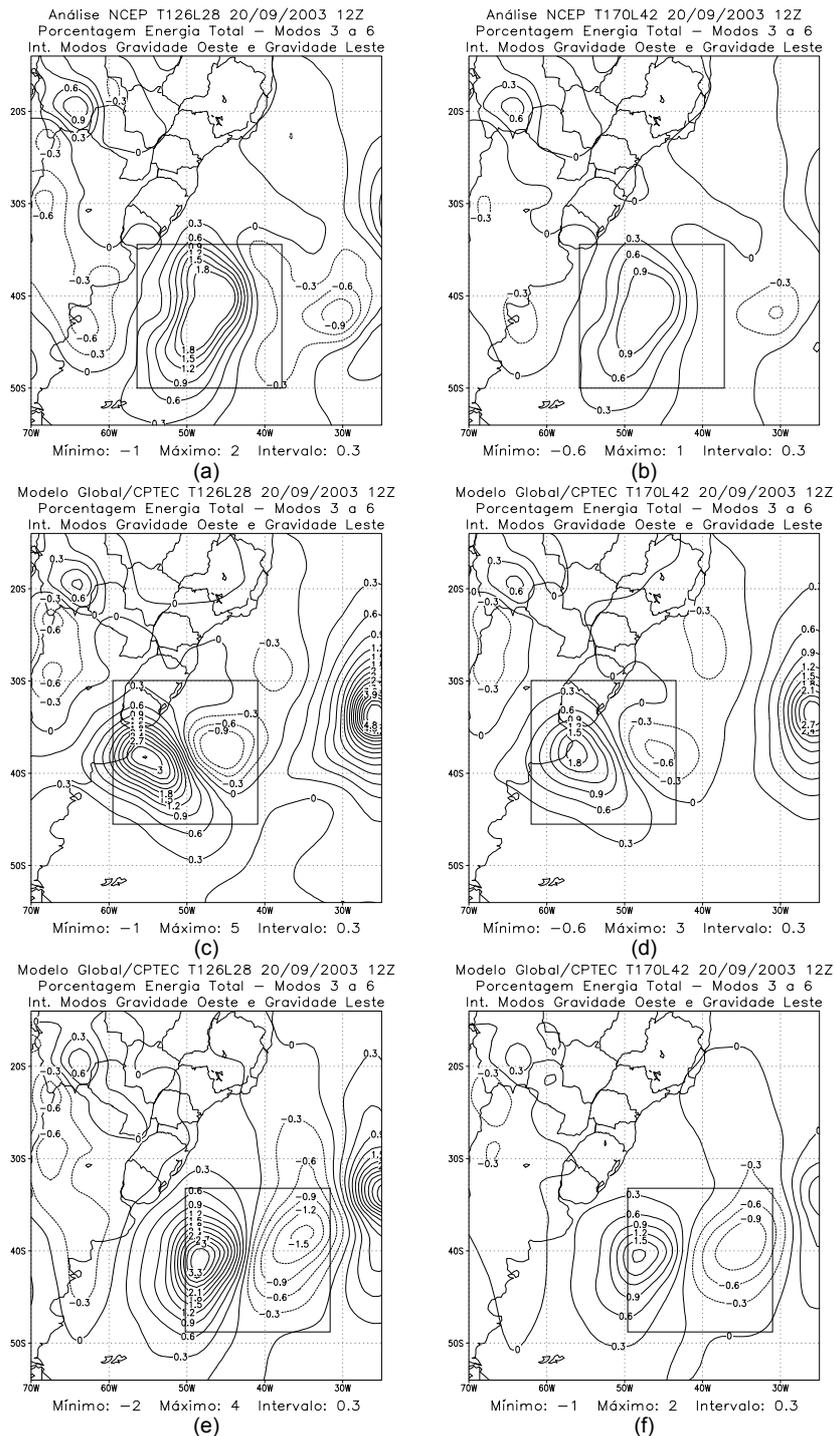
Modelo Global/CPTC T170L42 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Int. Modos Kelvin e Gravidade Oeste



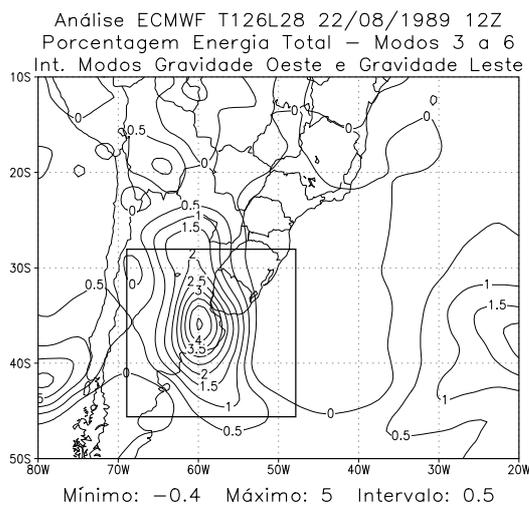
Mínimo: -3 Máximo: 2 Intervalo: 0.3

(d)

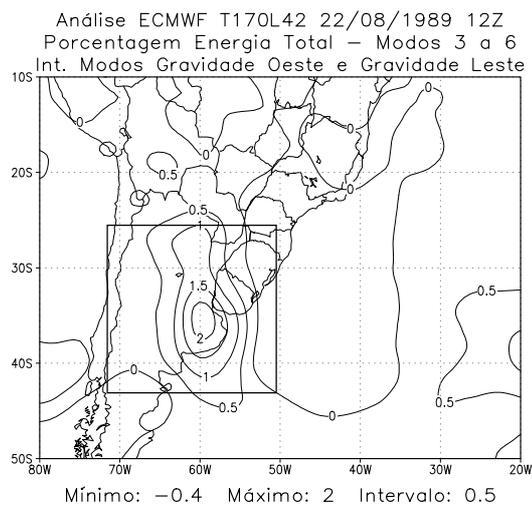
**FIGURA 5.42** – Idem Figura 5.41, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.



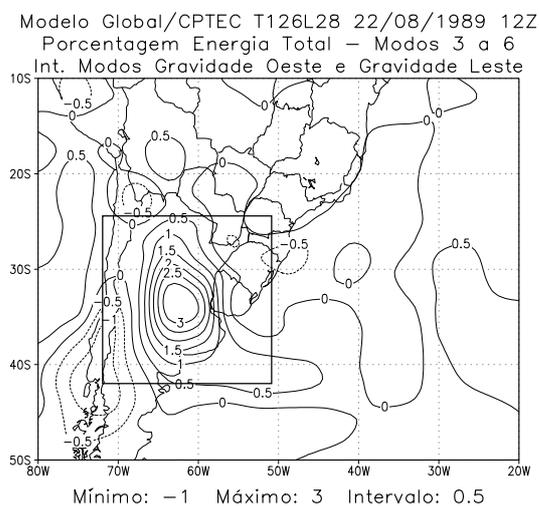
**FIGURA 5.43** – Energia total (%) das interações entre os modos Gravidade oeste e Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



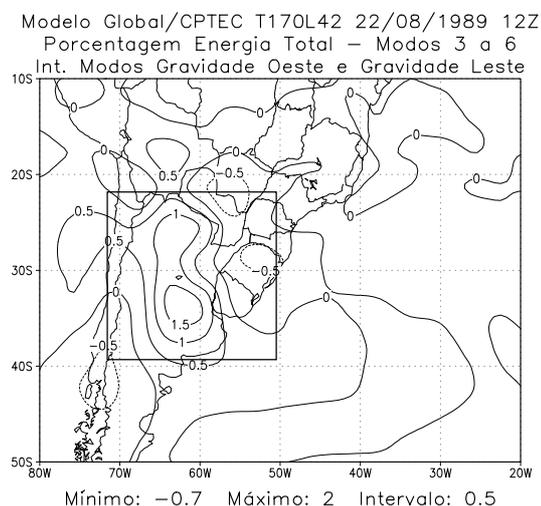
(a)



(b)



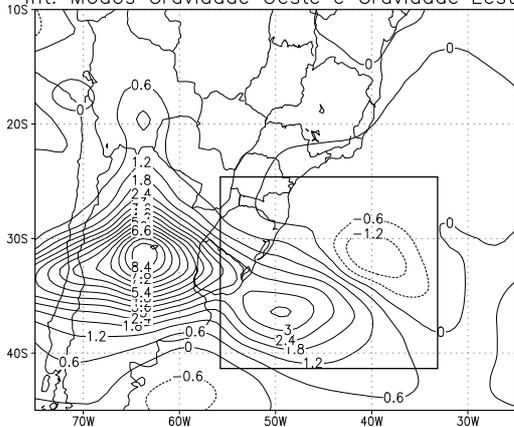
(c)



(d)

**FIGURA 5.44** – Energia total (%) das interações entre os modos Gravidade oeste e Gravidade leste para os modos verticais de 3 a 6, referente ao dia 22/08/1989 -12Z: (a) e (c) Análise ECMWF e MGCPTEC T126L28; (b) e (d) Análise ECMWF e MGCPTEC T170L42.

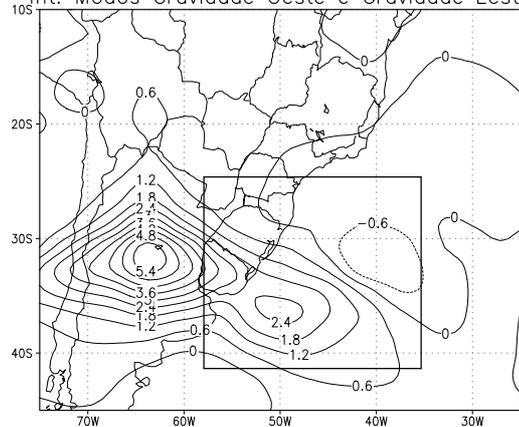
Análise ECMWF T126L28 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste



Mínimo: -2 Máximo: 9 Intervalo: 0.6

(a)

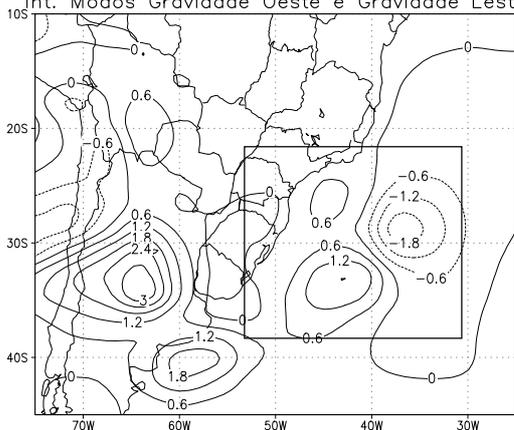
Análise ECMWF T170L42 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste



Mínimo: -1 Máximo: 6 Intervalo: 0.6

(b)

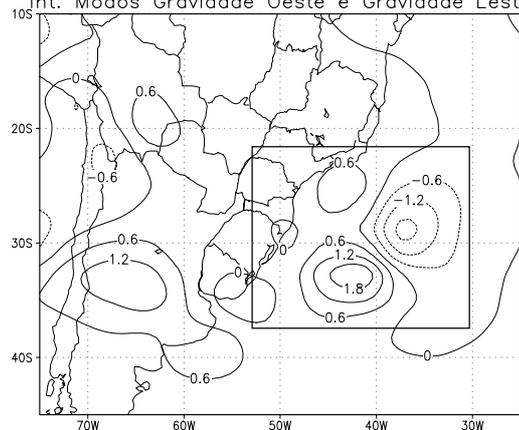
Modelo Global/CPTEC T126L28 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste



Mínimo: -2 Máximo: 3 Intervalo: 0.6

(c)

Modelo Global/CPTEC T170L42 06/10/1991 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste



Mínimo: -2 Máximo: 2 Intervalo: 0.6

(d)

**FIGURA 5.45** – Idem Figura 5.44, exceto que para o dia 06/10/1991 – 12Z.

#### **5.4 – Interação da Energia Total entre os Modos Verticais em Diferentes Níveis de Pressão.**

Nesta seção, serão analisados os resultados somente para o caso setembro de 2003 da porcentagem da interação da energia total, considerando-se 4 categorias de níveis de pressão definidas a seguir:

- a) Baixos Níveis - Superfície até 800 hPa;
- b) Níveis Médios - 800 hPa até 300 hPa;
- c) Altos Níveis - 300 hPa até 150 hPa;
- d) Estratosfera - 150 hPa até Topo

Os valores mais significativos estão concentrados nas categorias b e d para os seguintes resultados:

- 1) Porcentagem da interação da energia total entre os modos verticais de 0 a 2 para as categorias b e d. Figuras 5.46 e 5.47;
- 2) porcentagem da interação da energia total entre os modos verticais de 0 a 2 – 3 a 6 e 0 a 2 – 7 a 11(13) para a categoria b; Figuras 5.48 e 5.49;
- 3) porcentagem do resíduo da interação entre os modos verticais 0 até 11(13) para as categorias b a d. Figuras 5.50 e 5.51.

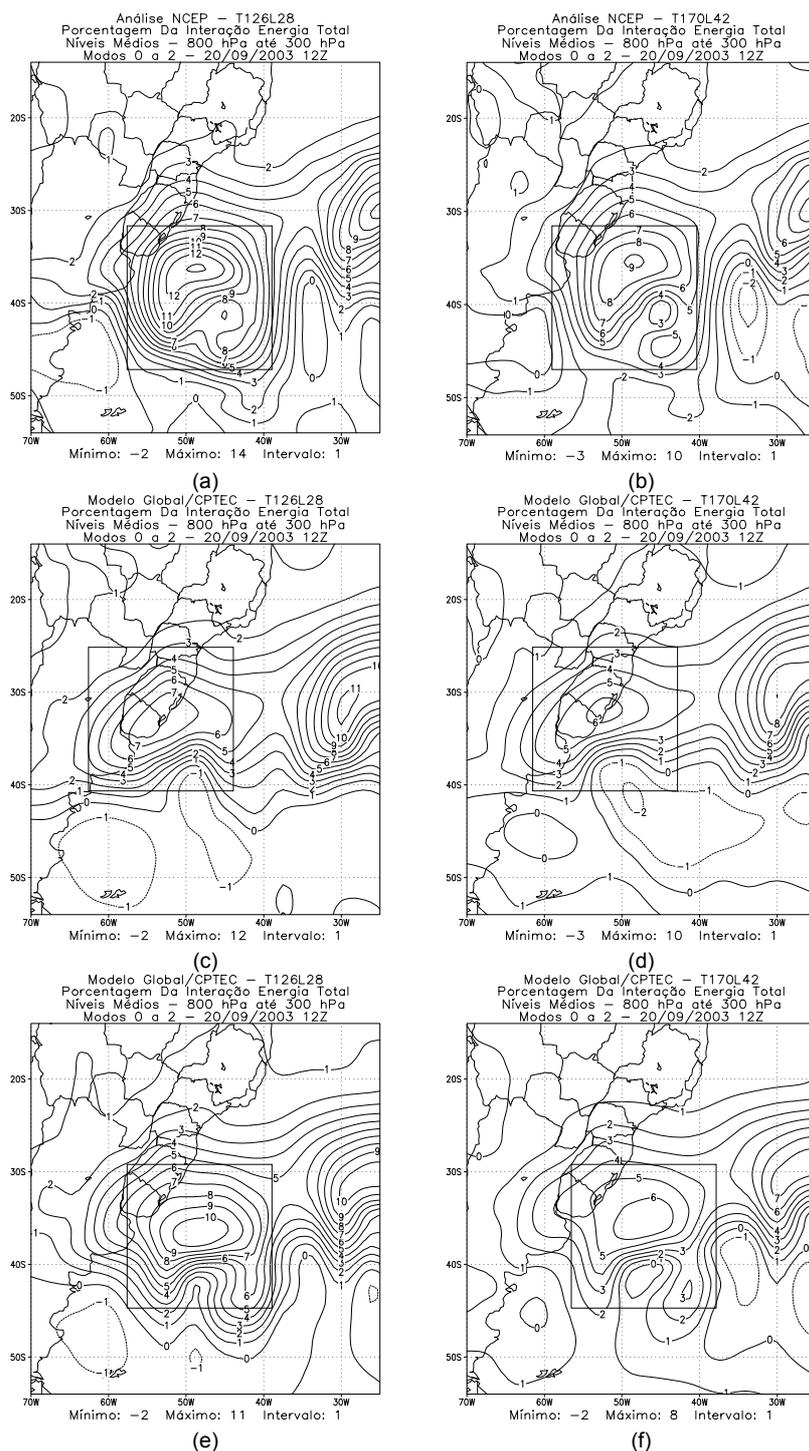
Os resultados obtidos no item 1) mostra máximo de construção de energia na região do SSMNVI para a categoria b e máximo de interferência destrutiva para a categoria d com valores maiores para a média resolução e em concordância com os modelos em ambos esquemas de convecção. Para o item 2), tem-se interferência construtiva para a categoria b, com exceção da simulação do esquema Kuo (Figura 5.48 (c) e (d)). As interações entre os modos 0 a 2 – 7 a 11(13) mostra na região do SSMNVI núcleos de construção ao Norte e destruição de energia ao sul para a categoria d, onde os valores para a resolução T170L42 são maiores que o T126L28 por possuir maior número de

camadas verticais, apresentando uma melhor representação da partição de energia entre os modos verticais (Andrade 1994).

As Figuras do item 3 mostram o resíduo da interação da energia total para os modos verticais de 0 a 11(13) respectivamente para as resoluções T126L28 e T170L42 para a categoria b e d. Pode-se notar para a categoria b que tem-se construção de energia na região do SSMNVI e destruição de energia para a categoria d. No geral, para os baixos níveis (categoria a) a energia é construtiva e vai aumentando nos níveis médios (categoria b), onde começa a diminuir nos altos níveis (categoria c) com variação de construção e destruição de energia, até que na troposfera (categoria d) a energia apresenta-se totalmente na forma de destruição. Analisando os itens 1) a 3) pode-se concluir que:

- Para o item 1), a porcentagem da interação da energia total para o caso setembro de 2003 é semelhante a Figura 5.3, onde foi maior para os modos verticais de 0 a 2 para os níveis médios (categoria b) – energia construtiva, e para a Estratosfera (categoria d) – energia destrutiva. A porcentagem de energia foi pequena nos baixos níveis (categoria a) e tem seu máximo de construção de energia nos níveis médios (categoria b), por se tratar de uma região convectiva. Para os altos níveis (categoria c), a porcentagem de energia foi diminuindo, mas ainda é na forma de energia construtiva, e finalmente para a Estratosfera (categoria d) a energia é quase que totalmente destrutiva em todo domínio onde se encontra o SSMNVI;
- para o item 2), a porcentagem de energia foi maior apenas para os níveis médios (categoria b), para os modos verticais de 0 a 2 e 3 a 6 – energia construtiva na região do SSMNVI, e 0 a 2 e 7 a 11(13), alternando entre energia construtiva e destrutiva;
- para o item 3), assim com no item 1), os resultados seguiram o mesmo padrão, construção de energia para os níveis médios e destruição para a Troposfera.

Se integramos verticalmente (categoria a - baixos níveis até d - Estratosfera) a energia em toda essa região é nula, ou seja, a energia vai aumentando dos baixos níveis até os níveis médios e vai diminuindo dos altos níveis até a Estratosfera, onde a integral vertical em toda essa região é nula.



**FIGURA 5.46** – Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

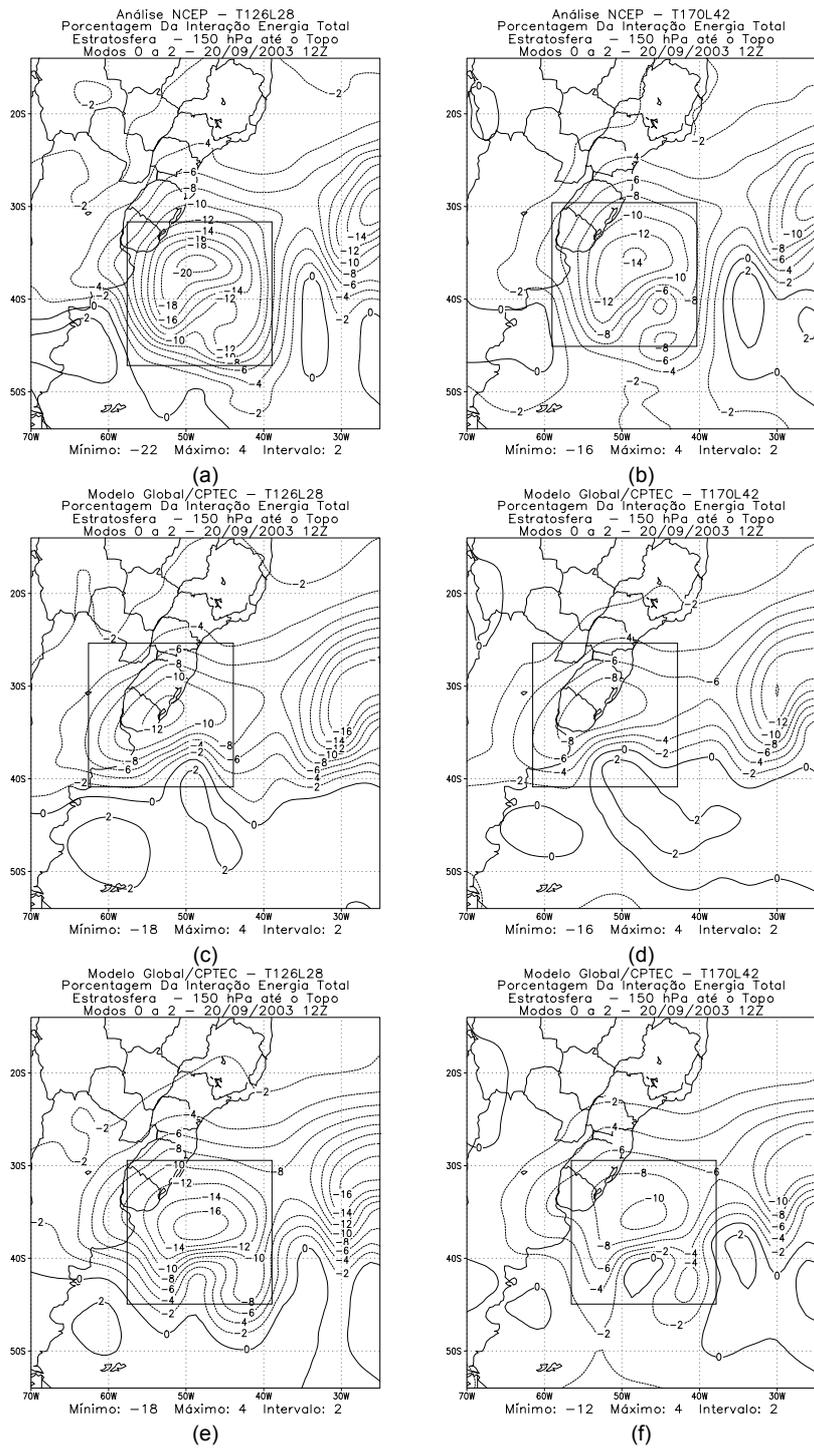
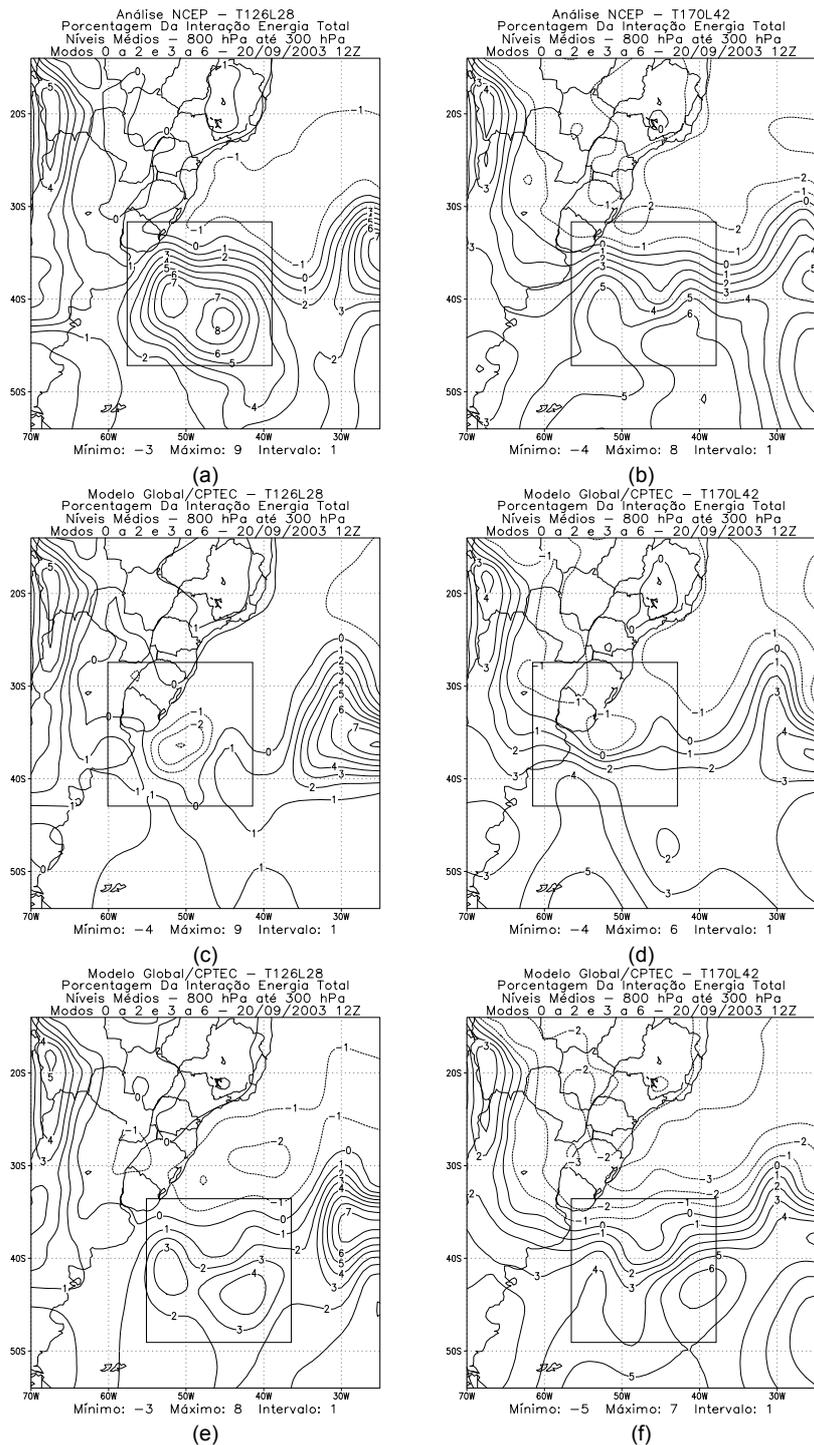
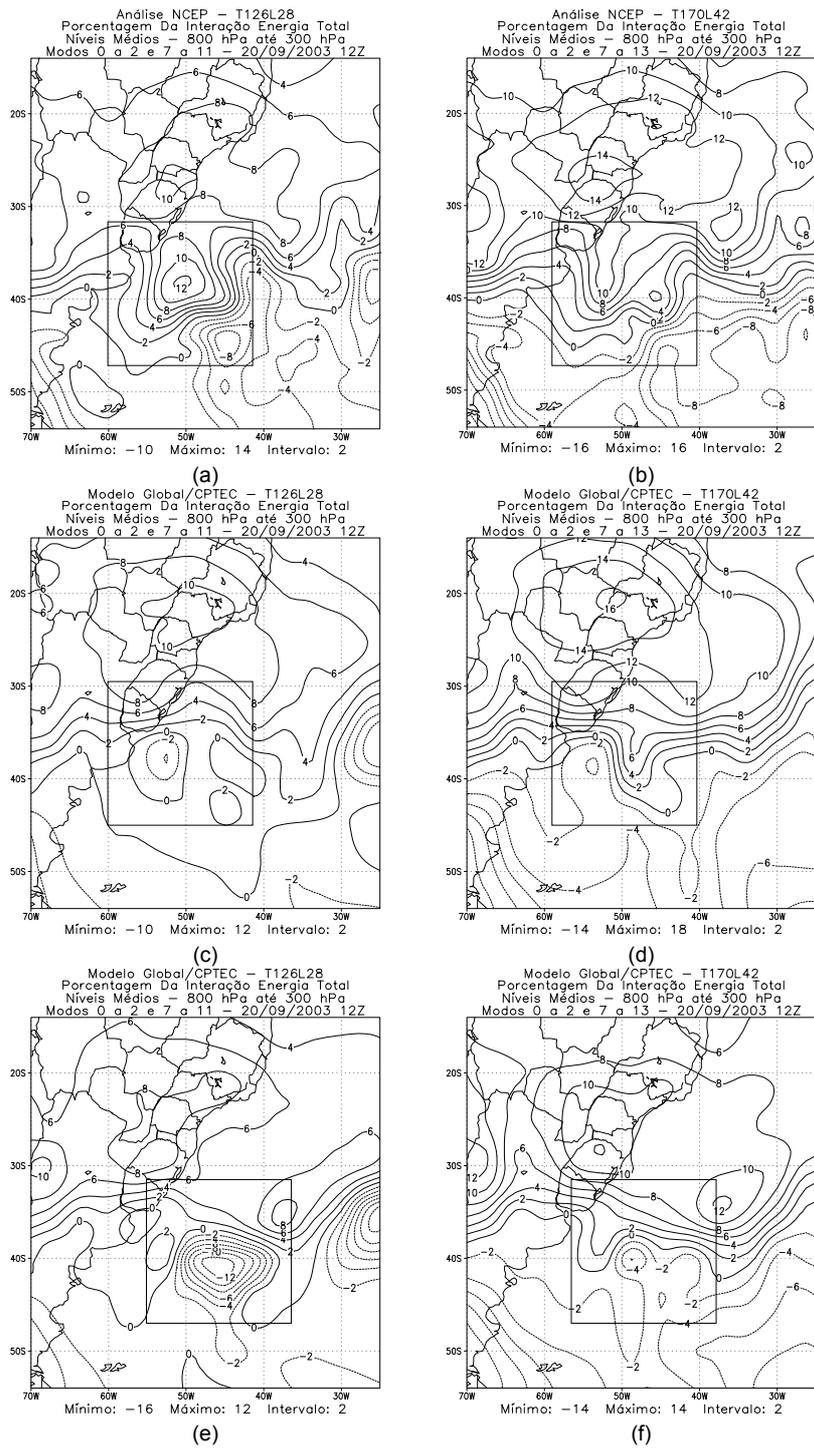


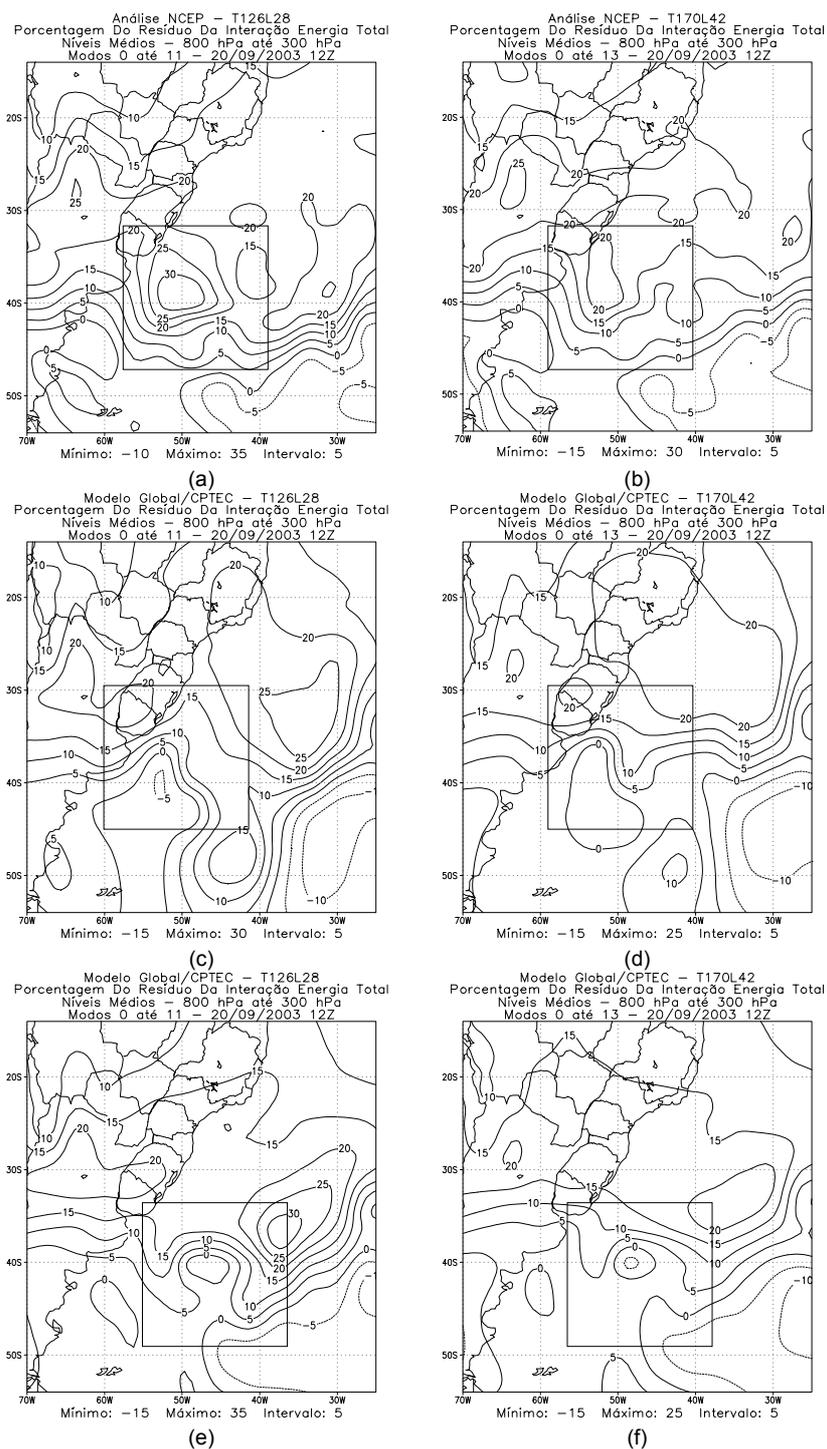
FIGURA 5.47 – Idem Figura 5.46, exceto que para a Troposfera (150 hPa até o topo).



**FIGURA 5.48** – Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 – 3 a 6, referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTec Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

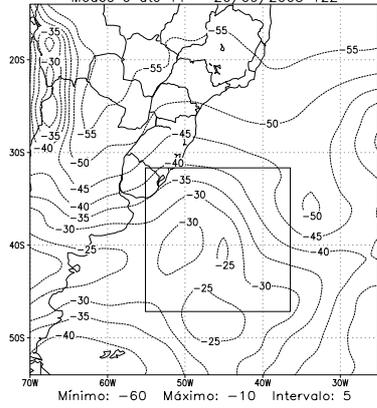


**FIGURA 5.49** – Energia total (%) da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 2 – 7 a 11(13), referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



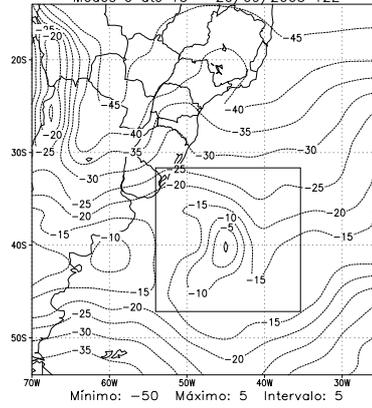
**FIGURA 5.50** – Energia total (%) do resíduo da interação da energia total em níveis médios (800 hPa até 300 hPa) para os modos verticais de 0 a 11(13), referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) Análise NCEP, MGCPTec Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

Análise NCEP - T126L28  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 11 - 20/09/2003 12Z



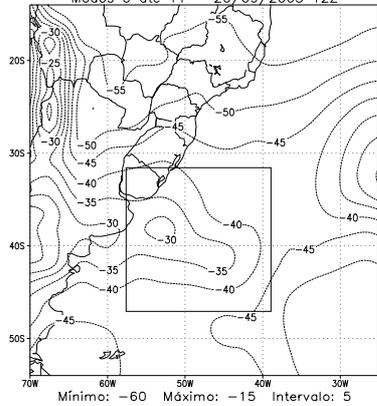
(a)

Análise NCEP - T170L42  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 13 - 20/09/2003 12Z



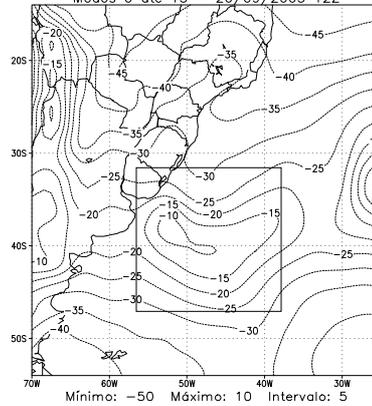
(b)

Modelo Global/CPTEC - T126L28  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 11 - 20/09/2003 12Z



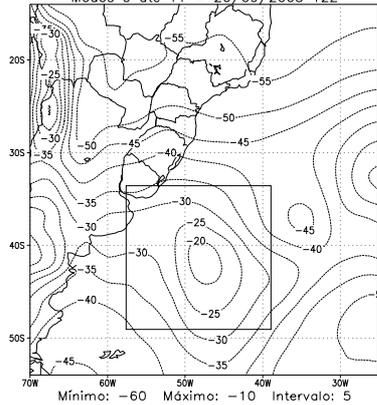
(c)

Modelo Global/CPTEC - T170L42  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 13 - 20/09/2003 12Z



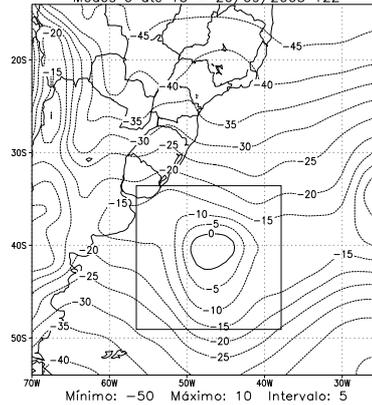
(d)

Modelo Global/CPTEC - T126L28  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 11 - 20/09/2003 12Z



(e)

Modelo Global/CPTEC - T170L42  
 Porcentagem Do Resíduo Da Interação Energia Total  
 Estratosfera - 150 hPa até o Topo  
 Modos 0 até 13 - 20/09/2003 12Z



(f)

**FIGURA 5.51** – Idem Figura 5.50, exceto que para a Troposfera (150 hPa até o topo).

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS ESTUDOS

#### 6.1– Considerações Gerais

Nesta dissertação foram estudados 4 casos de SSMNVI que adquiriram estágio maduro nos dias:

- 1) 19 a 20 de setembro de 2003 – sul do Uruguai e oceano;
- 2) 15 de abril de 1979 – sul do Brasil e Uruguai;
- 3) 22 de agosto de 1989 – Paraguai, oeste de Santa Catarina e Rio Grande do Sul;
- 4) 06 de outubro de 1991 – sul do Brasil e Uruguai;

Os estágios maduros podem ser observados pelas imagens de satélite no Capítulo 4 (Figuras 4.1 a 4.4), onde a nuvem apresenta a forma de vírgula invertida e as imagens de satélites foram importantes para determinar o estágio maduro. Nos três últimos casos, apenas os estágios maduros foram analisados; e o caso mais recente (setembro de 2003), foi analisado desde o estágio inicial, amadurecimento (adquirindo o padrão de vírgula invertida) e dissipação.

O estudo teve duas partes principais: uma observacional e de simulação numérica, onde se verificou a capacidade do MGCPTec em simular a nuvem vírgula, e o efeito da resolução; e a parte da partição e interação de energia, onde se enfatizou a análise energética, tanto no que se refere às trocas verticais de energia como para as interferências entre os modos horizontais de oscilação (ondas de Rossby, Kelvin, Mista e Gravidade oeste e leste) e suas interações.

## 6.2 – Análise Observacional e Simulação Numérica

O estudo do caso ocorrido em setembro de 2003, utilizou análises do NCEP, recomposta na grade correspondente as resoluções T126L28 e T170L42, utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3. Os três casos restantes, utilizaram as reanálises do ECMWF na resolução T106K17 e comparados com as rodadas do MGCPTEC para as resoluções T126L28 e T170L42.

O esquema de convecção tipo Kuo, utilizado operacionalmente no CPTEC foi adotado para todos os experimentos, e o esquema de convecção RAS foi utilizado apenas no caso ocorrido em setembro de 2003, para questão de comparação.

Para os 3 casos, foram calculados os campos de advecção de temperatura (K/dia), temperatura em 850 hPa (°C), vorticidade ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), magnitude do vento (m/s), linhas de fluxo do vento (m/s), ambos em 850 hPa, precipitação acumulada em 6 horas (mm/dia), altura geopotencial em 1000 hPa (m), água precipitável (mm) e convergência de umidade (g/Kg/dia). Esses campos calculados a partir das reanálises do ECMWF, foram comparados com a rodada do MGCPTEC para as resoluções T126L28 e T170L42 onde se pode observar uma boa concordância entre os cálculos dos campos da reanálise com a simulação do modelo, apenas com um deslocamento mais a oeste (um pouco mais atrasado) na região do estágio maduro simulados pelos modelos. No geral, a resolução do T170L42 apresentou resultados mais detalhados dos campos em comparação com as reanálises para os 3 casos, todos com o esquema de convecção tipo Kuo.

Em relação ao caso ocorrido em setembro de 2003, o mesmo estudo foi realizado, porém acrescentando o esquema de convecção RAS e analisado não somente o estágio maduro, mas o início, amadurecimento e dissipação do SSMNVI. Para o campo de precipitação acumulada em 24 horas, foram

utilizadas as análises do GPCP, que não foram muito satisfatórias, pois os dados limitavam-se apenas até a latitude de 39.5°S e o estágio maduro do SSMNVI estava sobre o oceano e um pouco mais ao sul do que os dados do GPCP disponibilizavam.

Comparado-se os dois esquemas de convecção (Kuo x RAS), pode-se observar que o esquema Kuo apresentou bons resultados para os três últimos experimentos, conseguindo simular com boa concordância os campos citados anteriormente, onde o estágio maduro do SSMNVI estava mais sobre o continente. Para o caso setembro de 2003, o esquema de convecção RAS apresentou melhores resultados que o esquema Kuo. Em termos de resolução, o T170L42 apresentou ligeiramente resultados melhores, pois mostrou uma melhor definição dos campos.

Para o estudo da performance dos modelos, foram calculados o Erro Médio Previsto (EMP) ou VIÉS, que permite avaliar a tendência do modelo em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) os campos. Foi calculado também o Erro Médio Quadrático (EMQ), que dá a amplitude dos erros da previsão. No geral, o modelo com esquema Kuo superestimou os valores da altura geopotencial em 1000 hPa, água precipitável e vorticidade em 850 hPa e subestimou os demais campos. Já o esquema de convecção RAS subestimou a maioria dos campos, mas apresentou EMQ menor do que o esquema Kuo no caso setembro de 2003. Esses resultados podem ser observados nas Tabelas 4.1 e 4.2 do Capítulo 4 e Tabelas E.1, E.2 e E.3 do Apêndice E.

As análises observacionais apresentadas no Capítulo 4 estão de acordo com os resultados obtidos em abril de 1979 e agosto de 1989. Maiores informações encontram-se, respectivamente, em Bonatti e Rao (1987), Dall' Antonia (1991) e Hallak (2000).

### **6.3 – Análise da Partição e Interação de Energia entre os Modos Horizontais e Verticais e suas Interações**

Para a análise da partição e interação de energia entre os modos horizontais e verticais e suas interações, foi analisado apenas o estágio maduro dos quatro casos, utilizando a metodologia desenvolvida no Capítulo 3 e apresentada no Capítulo 5.

Os modos verticais nesta Dissertação foram divididos da seguinte maneira:

- a) Primeira categoria (0 a 2): compreenderá os modos com altura equivalente acima de 600 m;
- b) segunda categoria (3 a 6): alturas entre 100 e 600 m;
- c) terceira categoria (7 a 11(13)): alturas entre 10 e 100 m.

Essa divisão é baseada em uma extensão dos resultados de Silva Dias e Bonatti (1986).

Os resultados mais expressivos referente à análise da partição de energia entre os modos horizontais foram para os modos Rossby (3 categorias) e Kelvin (somente para a primeira categoria), pois para a segunda e a terceira categoria, a porcentagem de energia está mais confinada na região tropical. Na terceira categoria para o modo horizontal Rossby, os valores percentuais de energia foram maiores para a resolução T170L42, mostrando que um maior número de modos verticais (13 contra 11 do T126L28), mostra uma maior interação entre os modos horizontais, onde os modos mais internos podem ter um papel relevante na partição de energia e isto, surgindo quanto à resolução vertical, é maior e pode ser interpretado em conformidade com os resultados de Andrade (1994), onde é mostrado que para se ter uma boa representatividade da interação entre modos verticais é necessário se ter uma resolução vertical mínima para um dado número de modos considerados.

Para o caso setembro de 2003, o modo horizontal Rossby, apresentou valores percentuais maiores para a primeira categoria (modos verticais 0 a 2), atingindo mais de 100%, o que indica interação entre os modos horizontais. Nos outros 3 casos, a porcentagem de energia para o modo Rossby foi maior para a segunda categoria. Os modos horizontais gravidade propagando-se para leste e oeste, apresentaram valores bem menores que os modos Rossby e Kelvin, mostrando resultados mais expressivos para a segunda categoria para os 4 casos de SSMNVI e para a primeira categoria, pode-se observar uma espécie de trem de ondas passando pelo sul da América do Sul na região do SSMNVI, aspecto esse também observado por Bonatti (2002), mas em relação à passagem de uma frente fria no sul do Brasil. Já o modo horizontal Misto Rossby-Gravidade apresentou valores pequenos para as 3 categorias.

A porcentagem de energia para as interações entre os modos horizontais, foi maior para os produtos cruzados entre os modos Rossby e Kelvin com os demais. Os produtos cruzados podem ser interpretados localmente como interferência construtiva (valores positivos) ou destrutiva (valores negativos) entre os modos que produzem o produto. No geral, a região do SSMNVI foi dominada por interferência destrutiva de energia, dentre os produtos cruzados entre os modos Rossby e Kelvin com os demais modos horizontais. As interações entre os modos horizontais Misto Rossby-Gravidade x (Gravidade oeste e leste) apresentaram valores menores que 1% e a interação entre os modos horizontais Gravidade oeste e leste apresentaram valores pequenos, mas indicaram interação na região do SSMNVI.

Em ordem decrescente, os resultados obtidos a partir das interações entre os modos horizontais ficaram:

- Rossby – Kelvin para os modos 0 a 2;
- Rossby – Gravidade propagando-se para oeste para os modos 3 a 6;
- Rossby – Gravidade propagando-se para leste para os modos 3 a 6;

- Rossby e Misto-Rossby Gravidade para os modos 0 a 2;
- Kelvin – Gravidade propagando-se para oeste para os modos 0 a 2;
- Gravidade propagando-se para oeste – Gravidade propagando-se para leste para os modos 3 a 6.

Houve também interações menos expressivas para o caso setembro de 2003, mostradas pelas Figuras contidas no Apêndice D, que são:

- Rossby – Gravidade propagando-se para oeste para os modos 0 a 2;
- Rossby – Gravidade propagando-se para leste para os modos 0 a 2;
- Gravidade propagando-se para oeste – Gravidade propagando-se para leste para os modos 0 a 2.

Pôde-se observar que o modo horizontal Rossby é dominante, pois o início dele é quase-geostrófico (Bonatti e Rao, 1987). Dentre as interações, Rossby – Kelvin foram dominantes para a primeira categoria, porém pode ter relação na interação de energia entre modos mais internos e externos, já que o modo horizontal Kelvin mostrou uma maior concentração de energia na região do SSMNVI para a primeira categoria (modos mais externos), onde é mais esperado interação Rossby – Kelvin na região tropical (Raupp, 2002).

As interações entre Rossby e gravidade propagando-se para oeste e leste, foram maiores para a segunda categoria, mostrando no domínio do estágio maduro do SSMNVI núcleos de construção e destruição de energia, sendo que a maior porcentagem de energia para os modos horizontais gravitacionais (Figuras 5.18 a 5.23) foram maiores para os modos 3 a 6. Já a interação entre as ondas de Rossby e Misto Rossby-Gravidade foi pequena, devido ao fato, da porcentagem de energia para o modo horizontal Misto Rossby-Gravidade, ter sido menor de 1% para as três categorias, apresentando destruição de energia (energia negativa) a oeste e construção de energia a leste.

A interação Kelvin e Gravidade propagando-se para oeste foi expressiva para os modos 0 a 2, pois Kelvin, só contribui para a região do SSMNVI para os modos mais externos e só poderia apresentar resultados na região do SSMNVI somente para a primeira categoria, como foi para as outras interações, já que a nuvem vírgula ocorre de latitudes médias para altas, e a maior porcentagem de energia do modo horizontal Kelvin está sobre a região tropical para os modos mais internos.

Analisando as interações entre os modos verticais para diferentes níveis de pressão, de acordo com as categorias definidas no item 5.4 no Capítulo 5. Os valores mais significativos estão concentrados nas categorias b e d para os seguintes resultados:

- 1) Porcentagem da interação da energia total entre os modos verticais de 0 a 2 para as categorias b e d. Construção de energia na região do SSMNVI para os níveis médios e conforme a altura vai aumentando, a energia vai diminuindo e se encontra na forma destrutiva na Estratosfera;
- 2) porcentagem da interação da energia total entre os modos verticais de 0 a 2 – 3 a 6 e 0 a 2 – 7 a 11(13) para a categoria b. Alternância entre construção e destruição de energia na região do SSMNVI;
- 3) porcentagem do resíduo da interação entre os modos verticais 0 até 11(13) para as categorias b a d. Parecido com o item 1).

Para os baixos níveis (categoria a), há pouca concentração de energia, porém nos níveis médios, a porcentagem de energia (construtiva) na região do SSMNVI é grande, devido ao fato de ser uma região convectiva. Nos altos níveis a energia diminui e quando atinge a estratosfera, a região é dominada por destruição de energia. Se integramos verticalmente (categoria a - baixos

níveis até d - Estratosfera) a energia em toda essa região tende a zero, ou seja, a energia vai aumentando (positiva) dos baixos níveis até os níveis médios e vai diminuindo (negativa) dos altos níveis até a Estratosfera, onde a integral vertical em toda essa região é nula.

No geral, o modelo com resolução T126L28 apresentou valores percentuais maiores que o T170L42 para as duas primeiras categorias, e como observado no Capítulo 4, o esquema Kuo para ambas resoluções, atrasa um pouco a localização do SSMNVI em relação as reanálises do ECMWF para os três últimos casos. Para o caso setembro de 2003, o esquema de convecção RAS saiu-se melhor do que o esquema Kuo para esse experimento, pelo fato do esquema RAS conseguir simular melhor a fonte de calor sobre o oceano em relação ao esquema Kuo. O esquema RAS pega a base da nuvem (primeira nuvem superior), onde no oceano não há problema, mas no continente causa problemas na simulação e talvez por isso, o sistema nuvem vírgula invertida sobre o oceano, foi melhor simulado pelo esquema RAS, ao contrário do esquema Kuo, que foi melhor quando o SSMNVI atuou mais próximo do continente, como ocorreram nos outros três casos.

#### **6.4 – Sugestões para Estudos Futuros**

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Repetir o estudo com resolução do MGCPTEC ainda maior (T254L64, T511L64) e para outros casos, principalmente mais recentes;
- Analisar as interações verticais do ponto de vista da contribuição dos modos horizontais;
- Estudar mesmo caso de Bonatti e Rao (1987) utilizando a nova parametrização Mak (Mak, 1982);

Durante o desenvolvimento deste trabalho e com o acontecimento recente do “fenômeno” Catarina, surgiram novas idéias e sugestões que ainda podem ser exploradas, entre elas pode-se citar:

- Verificar a possibilidade de uma nuvem vírgula intensificar e adquirir características semelhantes a um furacão. Como e quais são as condições favoráveis para que isso ocorra;
- comparar o desenvolvimento do “fenômeno” Catarina com o que acontece na Antártida;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, R. K., J. P. Ashman, F. Bittner, G. R. Farr, E. W. Ferguson, V. J. Oliver and A. H. Smith, 1969: **Application of meteorological satellite data in analysis and forecasting**. ESSA Tech. Rep. NESC 51 [Available from Govt. Printing Office, Washington, DC 20402].
- Andrade, C.R. **Análise das trocas de energia entre modos verticais e horizontais em reposta a fontes tropicais de calor de grande escala**. 1994. 366p. (INPE-5681-TDI/567). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1994.
- Anthes, R. A. A cumulus parametrizations scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 3, p. 270-286, 1977.
- Arakawa, A.; Schubert, W.H. Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 3, p. 671-701, 1974.
- Bjerknes, V. Das problem von der wettvorhersage, betrachtet von standpunkt der mechanic und der physic. **Meteorol. Z.**, n. 54, p. 1-22, 1904.
- Bluestein, H. B., **Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes**. Oxford University Press. Volume II, 1993. 594 p.
- Bonatti J. P.; Rao, V. B. Moist baroclinic instability of North Pacific and South American intermediate-scale disturbances. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 18, p. 2657-2667, 1987.

Bonatti, J.P. Modelo de Circulação geral do CPTEC. [on-line]. **Climanálise Especial 10 anos**, v.11, número especial, ref. 26, 5p., out. 1996.

Bonatti, J.P. Análise observacional da partição de energia em modos verticais: estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Local: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. p. 3392-3402. 1 CD-ROM.

Bonatti, J.P. **Metodologia operacional disponível no CPTEC, nas rodadas da análise JMA (Japan Meteorological Agency)**. [comunicação pessoal]. 2003.

Browning, K. A. Conceptual models of precipitation systems. **Weather and Forecasting**, v. 1, p. 23-41, 1986.

Businger, S. and P. V. Hobbs Meso-scale structures of two comma cloud systems over the Pacific Ocean. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1908-1928, 1987.

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

Caplan, P. **Recomposição da grade T256L64 para T126L28 e T170L42 utilizando a metodologia adaptada do NCEP 2003**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[gilberto@cptec.inpe.br](mailto:gilberto@cptec.inpe.br)> em out. 2003.

Carlson, T. Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 1498-1509, 1980.

Carleton, A. M., Satellite climatological aspects of the “polar low” and “instant occlusion” . **Tellus**, v. 37, p. 433-450, 1985.

Charney, J. G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. **Journal of Meteorology**, v. 4, n. 5, p. 135-162, 1947.

Charney, J. G., Fjortoft, R. e von Neumann, J. Numerical integration of the vorticity equation. **Tellus**, v. 2, p. 237-254, 1950.

Dall' Antonia Jr., A. M. **Vórtice de ar frio na América do Sul - Análise diagnóstica**. 1991. 116 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico - USP, São Paulo. 1991.

Dereczynski, C. P. **Estudo de caso de uma nuvem vírgula invertida e a subsequente ocorrência de ventos fortes na Bacia de Campos**. 1995. 77 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico - USP, São Paulo. 1995.

Duncan, C. N., A numerical investigation of polar lows. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, p. 255-267, 1977.

Gan, M. A., Rao, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293-1302, 1991.

Hallak, R. e M. A. F. Silva Dias. Análise de casos de formação de vórtices de ar frio. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8., 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Local: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1994. p. 613-616, 1994. 1 CD-ROM.

Hallak, R. **Aspectos dinâmicos e simulação numérica da formação e evolução de um vórtice de ar frio**. 2000. 140 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico - USP, São Paulo. 2000.

Harley, D. G., Frontal contour analysis of a "polar low". **Meteor. Mag.**, v. 89, p. 146-147, 1960.

Harrold, T. W., Browning, K. A. The polar low as a baroclinic disturbance. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 95, p. 710-723, 1969.

Harrold, T. W. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 99, p. 232-251, 1973.

Harshvardhan, R. D., Randall, D. A., and Corsetti, T. G. A fast radiation parameterization for general circulation models. **J. Geophys. Res.**, 92, 1009-1016, 1987.

Holton, J. R. **An introduction to dynamic meteorology**. Local: New York, Academic Press. Terceira Edição, 1997. 511 p.

Hoskins, B. J., and Ambrizzi, T. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, p. 1661-1671, 1993.

Hoskins, B. J., and Karoly, D. J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 1179-1196, 1981.

Hough, S. S. On the application of harmonic analysis to the dynamical theory of the tides. II, On the general integration of Laplace's dynamical equations.. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 191A, p. 139-185, 1898.

House, R. A., and Hobbs, P. V. Organization and structure of precipitating cloud systems. **Adv. Geophys.**, v. 24, p. 225-315, 1982.

Huffman, G.J.; Bolvin, D.T. GPCP one-degree daily precipitation data set documentation. Disponível em:  
[http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/gpcp/1dd/doc/1DD\\_doc](http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/gpcp/1dd/doc/1DD_doc) . Acesso em: 09 Sept. 2005.

Kasahara, A.; Puri, K. Spectral representation of three dimensional global data by expansion in normal mode functions. **Monthly Weather Review**, v. 109 (1), p. 37-51, 1981.

Kinter III, J. L. et. al. **The COLA atmosphere-biosphere general circulation model. Volume 1: Formulation.** Calverton, MA,: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA), 1997. Report n. 51, 44 p.

Kuo, H. L. On the formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, p. 40-63, 1965.

Lacis A. and J. E. Hansen. A parameterization of the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.

Locatelli, J. D.; Hobbs, P. V. e Werth J. A. Mesoscale structures of vortices in polar air streams. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 1417-1433, 1982.

Longuet-Higgins, M. S. The eigenfunctions of Laplace's tidal equations over a sphere. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 262A, p. 511-607, 1968.

Mak, M. On moist quasi-geostrophic baroclinic instability. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 39, p. 2028-2037, 1982.

Mellor, G. L. and T. Yamada. Development of a turbulence closure model geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, v. 20, p. 851-875, 1982.

Mendonça, R. W. B. **Estudo das trocas horizontais e verticais de energia durante episódios de ZCAS:** Influência da resolução das análises e dos modelos e da parametrização de convecção. 2002. 56 p. Proposta de Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Meteorological Office. **A course in elementary meteorology.** Local: M.O. 707, H.M.S.O., London, p. 189. 1962.

Moorthi, S., and M. J. Suarez. Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. **Monthly Weather Review**, v. 120, p. 978-1002, 1992.

Mullen, S. L. An investigation of small synoptic-scale cyclones in polar airstreams, **Monthly Weather Review**, v. 97, p. 1636 – 1647, 1979.

Mullen, S. L. Cyclone development in polar air streams over the wintertime continent, **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 1664 – 1676, 1982.

Mullen, S. L. Explosive cyclogenesis associated with cyclones in polar air streams. **Monthly Weather Review**, v. 111, p. 1537-1552, 1983.

NMC Development Division Staff. **Research version of the medium range forecast model.** NMC Documentation Series #1 (available from the Development Division, NMC, Washington, DC. 20233), 1988.

Nunes, A. M. B. **Inicialização física em modelos de previsão de tempo e estudo de seus efeitos na partição de energia em modos verticais e horizontais nos trópicos e na América do Sul.** 2002. 217 p. (INPE-9359-TDI/821). Tese (Doutorado em Meteorologia) -, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Orlanski, I. A rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. **Bull. Am. Met. Soc.**, v. 56, p. 527-530, 1975.

Rasmussen, E. The polar low as an extratropical CISK disturbance. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 105, p. 531-549, 1979.

Rasmussen, E. An investigation of a polar low with a spiral cloud structure. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 1785-1792, 1981.

Raupp, C. F. M. **Efeitos de processos não-lineares na influência inter-hemisférica de fontes de calor**. 2002. 218 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Astronômico e Geofísico - USP, São Paulo. 2002.

Reed, R. J. Cyclogenesis in polar air streams. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 38-52, 1979.

Reed, R. J. e W. Blier A case study of comma cloud development in the Eastern Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 114, p. 1681-1695, 1986.

Richardson, L. F. **Weather prediction by numerical process**. Local: London, University Press, p. 236, 1922.

Rossby, C. G. et al. Relations between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi permanent centres of actions. **Journal of Marine Research**, v. 2 p. 212-229, 1939.

Satyamurty, P., Ferreira, C. C., Gan, M. A., Cyclonic vortices over South America. **Tellus**, v. 42A, p. 194-201, 1990.

Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 43, 505-531.

Sela, J. Spectral Modeling at the National Meteorological Center. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 1279 -1292, 1980.

Silva Dias, P.L.; Schubert, W. H. **The dynamics of equatorial mass-flow adjustment**. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO. (Atmospheric Science, 312), p. 203, 1979.

Silva Dias, P.L.; Bonatti, J. P. A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulations over tropical South America. **Tellus**, v. 37A (2), p. 185-195, 1985.

Silva Dias, P.L.; Bonatti, J. P. Vertical mode decomposition and model resolution. **Tellus**, v. 38A (3), p. 205-214, 1986.

Slingo, J. M. The development of verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 13, p. 899-927, 1987.

Tiedtke, M. The sensitivity of the time mean large scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. In: Workshop on Convection in Large Scale Numerical Models, 1983, Reading. **Proceedings...** Reading: ECMWF, p. 297-316, 1983.

Wetzel P. and J.-T. Chang. Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture. **J. Climate Appl. Meteor.**, v. 26, p. 18-27, 1987.

Xue, Y., P. J. Sellers, J. L. Kinter III, and J. Shukla. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal Climate**, v. 4, p. 345-364, 1991.

## APÊNDICE A

### DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM NUMÉRICA PARA A PREVISÃO DE TEMPO

Este Apêndice contém um breve resumo sobre o desenvolvimento da Previsão Numérica de Tempo (PNT).

#### A.1 – Introdução

As leis físicas que governam os fenômenos da atmosfera foram elaboradas primeiramente por Vilhelm Bjerknes (1904), que formulou equações matemáticas, que resolvidas, poderiam prever o tempo. A primeira tentativa para prever o tempo numericamente deve-se ao trabalho do matemático britânico Lewis Fry Richardson (*Weather Prediction by Numerical Process*, 1922), utilizando pela primeira vez um sistema de equações para tentar conhecer a evolução do tempo. Richardson, apesar do trabalho cansativo envolvido, utilizando apenas simples calculadoras, conseguiu um exemplo de previsão para a tendência de pressão de superfície, para dois pontos de grades. Infelizmente, os resultados foram desastrosos. As variações de pressão previstas foram uma ordem de magnitudes maiores que as observadas. Além disso, seu resultado foi primeiramente afetado pela pequena quantidade de dados iniciais disponíveis, especialmente pela falta de sondagens. Porém, suas equações governam não só os movimentos lentos importantes para a meteorologia como também ondas de som e gravidade de alta velocidade. Tais ondas atuam como ruídos que são amplificados no decorrer da integração da previsão.

Percebia-se que aquelas equações parciais, não-lineares, eram de difícil, senão impossível solução. Além disso, era necessário simplificá-las, conhecer as condições iniciais e usar métodos de cálculo extremamente rápidos, para

que a mudança do tempo meteorológico não ultrapassasse o tempo cronológico do previsor. Simplificar essas equações poderia acarretar erros grosseiros ao processo de cálculo, e a falta de dados tornava cada vez mais difícil obter um resultado razoável. Seria necessária uma vasta rede de estações para se medir as variáveis do sistema, e uma rede de comunicação que transmitisse esses valores aos centros de previsão, além de máquinas que calculassem muito rapidamente as informações, em tempo real.

Após o insucesso de Richardson para obter um resultado razoável, a previsão numérica não foi tentada novamente por muitos anos. Somente após a Segunda Guerra Mundial, houve interesse na previsão numérica, devido ao grande desenvolvimento tecnológico e a uma expansão da rede de observações meteorológicas, que forneceu os dados iniciais mais aperfeiçoados. O mais importante disso tudo, foi o avanço no desenvolvimento dos computadores digitais, que se encarregavam de fazer o enorme volume de operações aritméticas necessárias à previsão numérica conveniente. Com o passar dos anos, toda essa problemática foi sendo enfrentada e resolvida. Importantes trabalhos como de Bjerknes (1904), Rossby (1939), Pettersen, Charney (1947) e outros, só vieram a contribuir para que mais tarde, com o desenvolvimento tecnológico, tivesse início a era da previsão numérica de tempo (PNT).

Em 1950, no *Electronic Numerical Integrator and Computer* (ENIAC) Charney, Fjortoft e John von Neumann obtiveram, com relativo sucesso, a primeira solução numérica de previsão: utilizando um sistema de equações simplificadas, conseguiram prever a altura geopotencial em 500 hPa para as 24 horas seguintes, com uma grande precisão, sobre a América do norte.

O emprego da PNT se baseia na criação de um modelo matemático, constituído de um sistema de equações diferenciais parciais que têm o propósito de descrever os processos dinâmicos e termodinâmicos da

atmosfera. Tais equações podem ser aproximadas, de acordo com os processos físicos mais significativos para o tipo de previsão. Para cada área de interesse de previsão, cria-se um modelo matemático específico, de acordo com os processos envolvidos. Quanto mais sofisticado o modelo, maior a precisão dos resultados, o que necessitará de um maior esforço computacional.

O modelo matemático não resolve o problema da previsão, pois a solução analítica do sistema é inviável, a não ser que sejam introduzidos erros grosseiros para simplificar a solução, mas isso seria inviável. Em vista disso, há necessidade de modificar o modelo, para que sejam obtidas soluções numéricas, para isso é necessária a criação de um modelo numérico.

A discretização do modelo, nada mais é que a transformação do modelo matemático em um modelo numérico. No modelo matemático, temos um sistema de equações diferenciais, já em um modelo numérico, um sistema de equações discretas solúveis. A discretização das equações do modelo global do CPTEC estão detalhadas no **Apêndice B**.



## APÊNDICE B

### FORMA DISCRETA DAS EQUAÇÕES PARA O MGCPTC

Neste Apêndice são apresentadas as equações discretizadas para o MGCPTC.

#### B.1 – Discretização das Equações

A **Equação do movimento** horizontal em coordenadas horizontais esféricas e vertical sigma é dada por:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -RT\nabla_{\sigma}(\ln p_s) - \nabla_{\sigma}(gz) - f\vec{k} \times \vec{V} + \vec{F} \quad , \quad (\text{B.1})$$

onde:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_{\sigma} \vec{V} + \dot{\sigma} \frac{\partial\vec{V}}{\partial\sigma} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \nabla_{\sigma} \left( \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{2} \right) + \zeta \vec{k} \times \vec{V} - \vec{V} \frac{\partial\dot{\sigma}}{\partial\sigma} + \frac{\partial(\dot{\sigma}\vec{V})}{\partial\sigma} \quad ,$$
$$\nabla_{\sigma} ( ) \equiv \left( \frac{\partial( )}{a \cos \varphi \partial \lambda} \Big|_{\sigma} \vec{i} + \frac{\partial( )}{a \partial \varphi} \Big|_{\sigma} \vec{j} \right) \quad ,$$

$\sigma = p/p_s$  é a coordenada vertical,

$\lambda$  = longitude é a coordenada horizontal zonal,

$\varphi$  = latitude é a coordenada horizontal meridional,

$t$  é o tempo,

$p$  é a pressão no ponto  $(\lambda, \varphi, z)$ ,

$p_s$  é a pressão à superfície,

$z$  = altura geopotencial,

$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$  é o vetor vento horizontal,

$\vec{i}$  = versor esférico horizontal oeste-leste,  
 $\vec{j}$  = versor esférico horizontal sul-norte,  
 $\vec{k}$  = versor esférico vertical,  
 $u$  = componente oeste-leste de  $\vec{V}$  ,  
 $v$  = componente sul-norte de  $\vec{V}$  ,  
 $\hat{\sigma}$  = velocidade vertical em coordenada sigma,  
 $\zeta$  = componente vertical da vorticidade,  
 $T$  = temperatura absoluta,  
 $R$  = constante do gás para o ar seco,  
 $a$  = raio médio da Terra,  
 $g$  = aceleração da gravidade,  
 $f = 2\Omega \sin\varphi$  = parâmetro de Coriolis,  
 $\Omega$  = velocidade angular de rotação da Terra e  
 $\vec{F}$  = forçantes dissipativas de momentum.

A derivada vertical em diferenças finitas será expressa por:

$$\left. \frac{\partial(\hat{\sigma}\vec{V})}{\partial\sigma} \right|_k = \frac{1}{\Delta_k} \left( \hat{\sigma}_{k+1} \hat{V}_{k+1} - \hat{\sigma}_k \hat{V}_k \right) ,$$

onde

$$\hat{V}_{k+1} = (\vec{V}_k + \vec{V}_{k+1})/2 \quad , \quad \Delta_k = \Delta\hat{\sigma}_k \quad , \quad \hat{\sigma}_k = 1 - \sigma_k \quad ,$$

$k$  = índice da camada vertical = 1, 2, ...,  $K$

$K$  = número de camadas verticais.

Pode-se, então, escrever a equação do movimento horizontal para cada camada como:

$$\frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} = -\nabla \left( \frac{\vec{V}_k \cdot \vec{V}_k}{2} \right) - \zeta_k \vec{k} \times \vec{V}_k - \frac{1}{2\Delta_k} \left[ \hat{\sigma}_{k+1} (\vec{V}_{k+1} - \vec{V}_k) + \hat{\sigma}_k (\vec{V}_k - \vec{V}_{k-1}) \right] -$$

$$-\nabla(gz_k) - RT_k \nabla(\ln p_S) - f \vec{k} \times \vec{V}_k + \vec{F}_k \quad , \quad (\text{B.2})$$

### Equação da Energia Termodinâmica:

$$\frac{d(\ln \theta)}{dt} = \frac{\dot{Q}}{C_p T} \quad ,$$

(B.3)

onde:

$\theta$  = temperatura potencial,

$\dot{Q}$  = taxa de aquecimento diabático

$C_p$  = calor específico do ar à pressão constante.

### Considerando que:

$$T(\lambda, \varphi, k, t) = T_o(k) + T'(\lambda, \varphi, k, t) \quad ,$$

$T_o$  = temperatura de referência para cada camada

$T'$  = desvio de  $T$  em relação a  $T_o$  ,

Obtém-se a equação da energia termodinâmica para cada camada como:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = Y_k + B_k \delta_k \quad , \quad (\text{B.4})$$

onde:

$$Y_k = -\nabla \cdot (T_k \vec{V}_k) + T'_k \delta_k - \kappa T'_k \bar{\delta} + \kappa T_k (C_k - \bar{C}) - \frac{1}{2\Delta_k} \left[ \hat{\sigma}_{k+1} (P_k^1 T'_{k+1} - T'_k) + \hat{\sigma}_k (T'_k - P_k^2 T'_{k-1}) \right. \\ \left. + \left( \hat{\sigma}_{k+1} \bar{C} - \sum_{j=1}^k \Delta_j C_j \right) H_k^1 + \left( \hat{\sigma}_k \bar{C} - \sum_{j=1}^{k-1} \Delta_j C_j \right) H_k^2 \right],$$

$$B_k \delta_k = \left[ -\kappa T_{OK} + (\hat{\sigma}_{k+1} H_k^1 + \hat{\sigma}_k H_k^2) / (2\Delta_k) \right] \bar{\delta} + \left[ H_k^1 \sum_{j=1}^k \Delta_j \delta_j + H_k^2 \sum_{j=1}^{k-1} \Delta_j \delta_j \right] / (2\Delta_k),$$

$\delta$  = divergência do vento horizontal,

$$\kappa = R/C_p,$$

$$\bar{\delta} = \sum_{j=1}^K \Delta_j \delta_j; \quad \bar{C} = \sum_{j=1}^K \Delta_j \vec{V}_j \cdot \nabla (\ln p_s) = \sum_{j=1}^K \Delta_j C_j,$$

$$P_k^1 = \Pi_k / \Pi_{k+1}, k = 1, \dots, K-1; \quad P_K^1 = 0,$$

$$P_1^2 = 0; \quad P_k^2 = \Pi_k / \Pi_{k-1}, k = 2, \dots, K,$$

$$\Pi_k = T_k / \theta_k = (p_k / p_o)^\kappa; \quad p_o = 10^5 Pa,$$

$$H_k^1 = P_k^1 T_{OK+1} - T_{OK}, k = 1, \dots, K-1; \quad H_K^1 = 0,$$

$$H_1^2 = 0; \quad H_k^2 = T_{OK} - P_k^2 T_{OK-1}, k = 2, \dots, K.$$

**Equação da continuidade de massa** em coordenada sigma é dada por:

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial \sigma} = -\vec{V} \cdot \nabla (\ln p_s) - \nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}. \quad (\text{B.5})$$

Integrando no domínio vertical com condições de contorno:  $\dot{\sigma}(0) = \dot{\sigma}(1) = 0$ ,  
obtem-se a equação para a tendência de pressão à superfície:

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = - \sum_{k=1}^K (\delta_k + C_k) \Delta_k = -\bar{\delta} - \bar{C}$$

e, usando diferenças finitas na vertical, obtém-se a equação para determinação da velocidade vertical:

$$\hat{\sigma}_{k+1} = \hat{\sigma}_k + \Delta_k \left[ (\bar{\delta} - \delta_k) + (\bar{C} - C_k) \right].$$

### Aproximação Hidrostática

$$\frac{\partial z}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{g\sigma} = - \frac{C_p T}{g\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \sigma},$$

(B.6)

com  $\Pi = (p/p_0)^\kappa = (\sigma p_s/p_0)^{R/C_p}$ ,

e, em diferenças finitas obtidas pela conservação de energia, como:

$$z_k = z_{k-1} - \frac{C_p}{2g} \left[ \left( \frac{\Pi_k}{\Pi_{k-1}} - 1 \right) T_{k-1} + \left( 1 - \frac{\Pi_{k-1}}{\Pi_k} \right) T_k \right],$$

para  $k = 2, \dots, K$ , de modo que :

$$\sum_{k=1}^K z_k \Delta_k = z_1 + (R/g) \sum_{k=1}^K T_k \Delta_k,$$

onde  $z_1 = z_s$  representa a topografia de superfície.

Para uso posterior define-se:

$$\tilde{\xi} = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_k \dots \quad \xi_{K-1} \quad \xi_K]^T ,$$

onde  $[( )]^T$  significa o transposto.

Os modos normais da versão linear do modelo são as soluções de  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $T$  e  $\ln(p_s)$  tendo a mesma variação no tempo. O número de tais modos é função da resolução do modelo, tanto vertical como horizontal. Para se determinar todas as oscilações possíveis do modelo, uma versão linear deve ser primeiramente estabelecida e posta em forma espectral. Para permitir a separação das estruturas horizontal e vertical, consideram-se perturbações sobre uma atmosfera em repouso com temperatura  $T_o(k)$ .

A **equação linearizada** da componente vertical da **vorticidade**  $\zeta$  é dada por:

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial t} = -\nabla \cdot (f \tilde{\vec{V}}) , \text{ com } \tilde{\zeta} = \vec{k} \cdot \nabla \times \tilde{\vec{V}} , \quad (\text{B.7})$$

e a **equação linearizada** da **divergência** horizontal  $\delta$  é dada por:

$$\frac{\partial \tilde{\delta}}{\partial t} = \vec{k} \cdot \nabla (f \tilde{\vec{V}}) - g \nabla^2 \tilde{h} , \quad (\text{B.8})$$

onde:  $\tilde{\delta} = \nabla \cdot \tilde{\vec{V}}$  e  $h = z + (RT_o/g) \ln p_s$ .

As relações entre Vorticidade e Função de Corrente  $\psi$  e Divergência e Potencial de Velocidade  $\chi$  são dadas por:

$$\zeta = \nabla^2 \psi' = a^2 \nabla^2 \psi$$

$$\delta = \nabla^2 \chi' = a^2 \nabla^2 \chi .$$

Então, pode-se escrever as equações da vorticidade e da divergência linearizadas como:

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial t} = -2\Omega \left( \tilde{\delta} \sin \varphi + \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \lambda} + \cos \varphi \frac{\partial \tilde{\chi}}{\partial \varphi} \right) \quad (\text{B.9})$$

e

$$\frac{\partial \tilde{\delta}}{\partial t} = -2\Omega \left( -\tilde{\zeta} \sin \varphi + \frac{\partial \tilde{\chi}}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \varphi} \right) - g \nabla^2 \tilde{h} . \quad (\text{B.10})$$

A **Equação linearizada da energia termodinâmica** é dada por:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} = \underline{\underline{B}} \tilde{\delta} ,$$

onde  $\underline{\underline{B}}$  é uma matriz que depende apenas da discretização vertical e de  $T_0$ .

A **equação da continuidade de massa linearizada** fica expressa por:

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = - \sum_{k=1}^K \Delta_k \delta_k = -\tilde{S} \cdot \tilde{\delta} ,$$

A **equação da aproximação hidrostática** por:

$$\tilde{z} = \underline{\underline{A}} \tilde{T} + z_s ,$$

onde  $\underline{A}$  é uma matriz que depende apenas da discretização vertical e  $z_S$  é considerado nulo na obtenção dos modos normais.

Através das equações anteriores pode-se mostrar que:

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial \alpha} = \left[ \left( \underline{AB} - (R/g) \tilde{T}_O \cdot \tilde{S} \right) \right] \tilde{\delta} = \underline{G} \tilde{\delta}, \quad (\text{B.11})$$

onde:

$\underline{G} = \underline{G}(\sigma_k)$  é uma matriz que depende apenas da camada e que possibilita a separação da solução nas estruturas horizontal e vertical.

## B.2 – Harmônicos Esféricos

Nas equações (B.9), (B.10) e (B.11) será feito o uso de Harmônicos Esféricos:

$$\underline{F}(\lambda, \mu, k, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} \underline{F}_n^m(k, t) P_n^m(\mu) \exp(im\lambda), \quad (\text{B.12})$$

com  $\mu = \sin \varphi$

$$\underline{F}(\lambda, \mu, k, t) = \begin{pmatrix} \zeta \\ \delta \\ h \end{pmatrix} (\lambda, \mu, k, t); \quad \underline{F}_n^m(k, t) = \begin{pmatrix} Z_n^m \\ D_n^m \\ H_n^m \end{pmatrix} (k, t)$$

onde:

$P_n^m(\mu)$  = Função Associada de Legendre, representando a transformada em latitude;

$\exp(im\lambda)$  = Representa a Transformada de Fourier em longitude;

$i$  representa o número complexo;

$m$  = harmônico zonal =  $1, 2, \dots, M$  ;

$M$  = truncamento zonal;

$n$  = índice do modo meridional =  $|m|, |m| + 1, \dots, N(m)$ ;

$N(m)$  = truncamento Meridional;

$N(m) = M$  = truncamento Triangular;

$N(m) = |m| + M$  = truncamento romboidal;

Usando (B.12) em (B.9), (B.10) e (B.11) obtém-se, respectivamente:

$$\frac{\partial \tilde{Z}_n^m}{\partial t} = 2\Omega \left[ \frac{im\tilde{Z}_n^m}{n(n+1)} - \frac{(n+1)}{n} E_n^m \tilde{D}_{n-1}^m - \frac{n}{(n+1)} E_{n+1}^m \tilde{D}_{n+1}^m \right]$$

$$\frac{\partial \tilde{D}_n^m}{\partial t} = 2\Omega \left[ \frac{im\tilde{D}_n^m}{n(n+1)} + \frac{(n+1)}{n} E_n^m \tilde{Z}_{n-1}^m + \frac{n}{(n+1)} E_{n+1}^m \tilde{Z}_{n+1}^m \right] + \frac{n(n+1)}{a^2} \tilde{H}_n^m$$

$$\frac{\partial \tilde{H}_n^m}{\partial t} = \underline{\underline{G}} \tilde{D}_n^m$$

onde:  $E_n^m = \left[ \frac{n^2 - m^2}{4n^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2}}$

Então, definindo:

$-\bar{H}_j$  = autovalor e  $\tilde{\Psi}_j = [\Psi_{j,1}, \Psi_{j,2}, \dots, \Psi_{j,k}]^T$  = autovetor de  $\underline{\underline{G}}$ , chega-se a:

$$\underline{\tilde{F}}(t) = \sum_{j=1}^K \underline{F}_j(t) \tilde{\Psi}_j \quad \text{e}$$

$$\underline{F}_j(t) = \frac{(\underline{\tilde{F}}(t) \cdot \tilde{\Psi}_j^T)}{(\tilde{\Psi}_j \cdot \tilde{\Psi}_j^T)} = \gamma_j(\underline{\tilde{F}}(t) \bullet \tilde{\Psi}_j^T)$$

onde  $\tilde{\Psi}_j^T$  é o autovetor da matriz adjunta de  $\underline{G}$ , e o produto interno acima representando a transformada vertical, e pode-se escrever:

$$\frac{\partial Z_n^{m,j}}{\partial t} = 2\Omega \left[ \frac{imZ_n^{m,j}}{n(n+1)} - \frac{(n+1)}{n} E_n^m D_{n-1}^{m,j} - \frac{n}{(n+1)} E_{n+1}^m D_{n+1}^{m,j} \right]$$

$$\frac{\partial D_n^{m,j}}{\partial t} = 2\Omega \left[ \frac{imD_n^{m,j}}{n(n+1)} + \frac{(n+1)}{n} E_n^m Z_{n-1}^{m,j} + \frac{n}{(n+1)} E_{n+1}^m Z_{n+1}^{m,j} \right] + \frac{n(n+1)}{a^2} H_n^{m,j}$$

$$\frac{\partial H_n^{m,j}}{\partial t} = \overline{H}_j D_n^{m,j}$$

As equações acima têm a forma das **equações da água rasa lineares esféricas** escritas em forma espectral, e formam um problema de autovalor-autovetor ao se considerar a variação no tempo na forma  $\exp(i\omega t)$ , onde  $\omega$  é o autovalor e o autovetor é dado por  $\underline{\hat{F}}_j$ , com  $\underline{F}_j(t) = \underline{\hat{F}}_j \exp(i\omega t)$ . A autofunção pode ser considerada como tendo amplitude  $\underline{\hat{F}}_j$ , variação temporal  $\exp(i\omega t)$ , e variação espacial  $P_n^m(\mu) \exp(im\lambda)$ . As equações acima são também válidas para a autofunção.

Resumindo:  $H_j$  representa a altura equivalente de cada modo vertical e para cada  $H_j$  há um conjunto de freqüências para os modos horizontais que podem

ser separadas em: modos de Rossby, modos de gravidade inercial propagando-se para Leste e para Oeste, modo de Kelvin e modo misto Rossby-gravidade.



## APÊNDICE C

### DESCRIÇÃO SUCINTA DO MODELO DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO ESPECTRAL, GLOBAL, EM COORDENADAS VERTICAIS SIGMA E HORIZONTAIS ESFÉRICAS

#### C.1 - Origem:

- NMC (National Meteorological Center).
- COLA (Center For Ocean-Land-Atmosphere Studies).
- Versão Romboidal 1.7 COLA.

#### C.2 - Versão Atual:

- Triangular 1.0 CPTEC/COLA (COLA versão 1.12 + CPTEC).
- Versátil para resoluções horizontal e vertical.

#### C.3 - Condições de Contorno:

- Velocidade vertical sigma nula no topo e na superfície;
- Topografia espectral suavizada e truncada;
- Ozônio climatológico sazonal médio zonal interpolado linearmente espacialmente e para cada intervalo de tempo;
- Temperatura da superfície do mar média semanal (NCEP);
- Gelo do mar: valor pré-fixado no campo de TSM;
- Campos iniciais climatológicos: umidade do solo, neve e TSM;

As condições iniciais do modelo são coeficientes espectrais de: logaritmo da pressão à superfície, temperatura virtual, divergência horizontal, vorticidade vertical e umidade específica. A topografia é tratada em forma espectral, de

modo que é representada por uma série truncada, sujeita a problemas como o efeito Gibbs.

A condição de contorno superior do MCGA é uma restrição cinemática que impõe velocidade vertical, em coordenada sigma, nula em todos os pontos na superfície e no topo do modelo, para satisfazer a conservação de massa. Essa restrição é usada na solução das equações através da diferenciação vertical em coordenada sigma.

Para representar os processos atmosféricos em escala de tempo climática de um mês ou mais, os campos na superfície da Terra que mais significativamente afetam a atmosfera devem ter variação no tempo. Esses campos incluem a temperatura de superfície sobre os continentes e oceanos, considerando tanto água livre como gelo do mar, umidade do solo, albedo da superfície e altura de neve. Dentre esses campos, os de temperatura de superfície continental, temperatura do gelo do mar e altura de neve variam muito rapidamente com o tempo e devem ser tratados como variáveis prognósticas no modelo, tornando-os acoplados com a atmosfera, mesmo em escalas de tempo menores. Os demais campos podem também ser tratados como variáveis prognósticas, porém variam de forma suficientemente lenta para que sejam considerados como condições de contorno do modelo, podendo variar independentemente com o tempo. Assim procedendo, as respostas atmosféricas a esses campos podem ser determinadas sem a consideração de resíduos armazenados em cada um desses campos. À medida que o conhecimento da correspondente resposta atmosférica a esses campos aumentar, eles também se tornarão variáveis prognósticas do modelo.

#### **C.4 - Inicialização:**

- Diabática e não-linear por modos normais.

A inicialização física consiste da modificação dos campos iniciais do modelo através da inclusão de informações de observações não convencionais, como estimativa de precipitação por satélite, como um termo de forçamento fazendo com que os campos do modelo sejam modificados no sentido de reproduzirem tal informação. Geralmente esse método atua durante as primeiras horas de execução do modelo de previsão para o qual a observação não convencional é válida. A inicialização física pode ser incluída mesmo em modelos cujos campos iniciais já sofreram algum outro tipo de inicialização.

#### **C.4.1 - Modos normais linear e não linear:**

A técnica de inicialização por modos normais é utilizada geralmente em modelos espectrais, uma vez que ela atua sobre os coeficientes de expansão espectrais dos modos que se deseja modificar.

Na versão linear todos os modos que podem conter ruídos ou erros indesejáveis são alterados da mesma forma e geralmente os coeficientes de expansão desses modos são zerados.

Ex.:  $C_{s,l,r} = 0$  para os  $s,l,r$  escolhidos.

Na versão não-linear cada coeficiente de expansão de cada modo que se deseja inicializar é alterado de uma forma específica. Geralmente o algoritmo de inicialização por modo normal não-linear realiza várias interações de alteração nos coeficientes de maneira que sua tendência inicial, de crescimento ou amortecimento, seja anulada. Esse método depende de todos os termos incluídos no modelo além da sua resolução espectral a partir da qual os modos são selecionados.

Ex.:  $\frac{\partial}{\partial t} C_{s,l,r} = 0$  para os  $s,l,r$  escolhidos

### **C.5 - Dinâmica Espectral:**

- Equações primitivas.
- Diferenças finitas na vertical e no tempo.
- Integração semi-implícita no tempo com filtro de Asselin.

O método espectral de representar a atmosfera em modelos numéricos é o mais difundido para modelos hemisféricos e globais e mais ainda para previsão climática.

Ele tem a grande vantagem de calcular os termos diferenciais de quantidades dinâmicas como gradientes de pressão e gradiente de velocidade exatamente no espaço espectral, enquanto todos os processos parametrizados como aquecimento e resfriamento radiativo, condensação e precipitação são calculadas no espaço físico. Nesse método a vorticidade e a divergência são variáveis prognósticas no lugar das componentes do vento, juntamente com a temperatura, umidade e a pressão à superfície.

No método espectral as variações espaciais das variáveis dependentes são representadas em termos de uma série finita de funções ortogonais chamadas de funções base. Para geometria Cartesiana a série de funções base adequada é a série de Fourier dupla em  $x$  e  $y$ . Já para o globo, esfera toda, as funções base apropriadas são harmônicos esféricos.

### **C.6 - Processos Físicos - Superfície:**

- Terra: Modelo Biológico Simplificado (SSiB, Xue et al, 1991).
- Mar: esquema aerodinâmico tipo “balde” (Esquema “Bulk”, NMC, 1988).

A superfície da Terra é composta de uma variedade de diferentes plantas, solos e formações geográficas, as quais trocam massa, momentum e calor com a atmosfera em graus e modos dos mais variados. O MCGA inclui uma formulação explícita da vegetação sobre a superfície da Terra e seus intercâmbios com a atmosfera e solo, que é baseada em um modelo *Biosférico Simples (SIB)*. O modelo simples da biosfera (SiB) foi descrito inicialmente por Sellers et al. (1986). É um modelo biofisicamente realista, isto é, baseia-se nos processos físicos de interação continente-atmosfera, sendo designado para avaliações climáticas em escala global.

O SiB consiste de 3 sub-modelos, os quais descrevem os processos de transferência radiativa (albedo), transporte turbulento (comprimento de rugosidade) e controle biofísico da evapotranspiração (resistência na superfície). Cada um desses modelos opera sobre uma série de parâmetros apropriados às propriedades da vegetação. Xue et al. (1991) desenvolveram uma versão simplificada do SiB (*Simple Simplified Biosphere - SSiB*), com o objetivo de reduzir o custo computacional da primeira. Os tipos de vegetação incluem parâmetros que foram obtidos de diversas fontes (Klink e Willmott, 1985; Sellers et al., 1986; Sellers e Dorman, 1987; Dorman e Sellers, 1989).

A evaporação e os fluxos de calor sensível da superfície dos oceanos para a atmosfera são importantes fontes de energia para a atmosfera; esses efeitos são parametrizados no MCGA de acordo com um esquema aerodinâmico no qual o fluxo é proporcional à velocidade do vento na superfície e à diferença de temperatura ou de umidade entre a superfície do oceano e o ar adjacente.

### **C.7 - Viscosidade e Camada Limite Planetária:**

- Difusão turbulenta com fechamento de segunda ordem (Mellor e Yamada, 1982).

- Arrasto topográfico pelas ondas de gravidade (NMC,1988).

Apesar de não ser muito importante seu efeito direto nos modelos de previsão de tempo, a viscosidade tem um efeito indireto importante, o fato que o vento rente à superfície é nulo. Como consequência um cisalhamento do vento ocorre o que leva a formação de anomalias turbulentas no escoamento, os turbilhões, cuja escala de tempo e espaço são muito menores que aquelas resolvidas pelos modelos de previsão. Juntamente surgem os turbilhões convectivos que são extremamente eficazes na transferência de momento para a superfície e de calor (latente e sensível) para fora da superfície muito mais rápido que a transferência realizada por processos moleculares. Surge então a camada limite planetária.

A parametrização da viscosidade então atua no sentido de captar como a transferência de momento e calor ocorre na camada limite através de relações com as variáveis de estado do modelo. Tais relações em geral são construídas em termos do gradiente vertical do vento.

A camada limite planetária (CLP) é a camada da atmosfera próxima à superfície onde a influência da superfície terrestre atua através da troca turbulenta de momento, calor e umidade. Esses fenômenos têm escala muito menor que a simulada pelos modelos de previsão de tempo e clima e para terem seus efeitos contabilizados devem ser incluídos através de parametrizações. A altura até onde essa camada se estende pela atmosfera pode ser tão baixa como 100m durante a noite sobre o continente até uns poucos quilômetros quando a atmosfera é aquecida pela superfície. Algumas razões importantes fazem com que a CLP tenha que ser considerada nos modelos:

- Balanço de momento, calor e umidade de grande escala são afetados consideravelmente pelos fluxos de superfície na escala de uns poucos dias;
- Variáveis na CLP (temperatura a 2m, umidade do ar, vento a 2m) são produtos importantes dos modelos, sendo as mais requisitadas em diversas atividades;
- Os fluxos da CLP interagem com outros processos (alguns também parametrizados) como formação de nuvens, convecção, radiação, etc...

A CLP é parametrizada através de um esquema fechado de ordem 2.0 para a difusão vertical. Os efeitos da mistura de calor, momentum e umidade pela turbulência de pequena escala é representada por essa difusão vertical. Os coeficientes de mistura são calculados considerando um balanço local entre a produção e dissipação de energia cinética turbulenta. É considerado também um arrasto topográfico pelas ondas de gravidade como um mecanismo de amortecimento nas equações do movimento; os coeficientes de amortecimento são calculados considerando a variância da silhueta orográfica do modelo.

### **C.8 - Radiação:**

- Onda curta a cada hora (Lacis e Hansen, 1974).
- Onda longa a cada três horas (Harshvardhan et al, 1987).
- Efeitos de sua interação com as nuvens (Slingo, 1987).

A **radiação** é dividida em aquecimento devido às ondas curtas (radiação solar) e devido às ondas longas (radiação terrestre). A força propulsora de todos os movimentos atmosféricos relativos à superfície da Terra é o aquecimento devido à absorção de radiação solar. O espectro de emissão pelo Sol tem o pico na banda visível no final dos comprimentos de onda relativamente curtos

do espectro eletromagnético. Como os raios solares não são verticais em todas as latitudes há uma forte variação no aquecimento solar sobre o globo. A presença de nuvens na atmosfera também modula fortemente a absorção de radiação solar. As nuvens são boas espalhadoras de radiação de onda curta e também são responsáveis por uma fração substancial do albedo planetário em regiões que não são cobertas por gelo. A formulação do aquecimento solar no MCGA inclui o aquecimento atmosférico devido à absorção de radiação solar pelo ozônio. A concentração de ozônio é especificada através de uma média zonal climatológica. Desde que a nebulosidade tem impacto na quantidade de radiação solar que é espalhada e absorvida, a nebulosidade prevista é usada no cálculo do aquecimento solar. O aquecimento devido às ondas curtas é calculado a cada hora do tempo simulado.

Para balancear a absorção de radiação solar, a Terra emite radiação para o espaço resultando na conservação de energia do sistema terra / atmosfera na média global e no tempo. A radiação emitida pela Terra para o espaço tem pico na banda do infravermelho. A emissão de radiação de onda longa pela superfície da Terra pode também ser absorvida por constituintes da atmosfera e pode ainda ser reemitida. A distribuição da emissão pela superfície, bem como das espécies absorventes / emittentes e das nuvens não é uniforme sobre o globo, e então, o aquecimento devido às ondas longas não é igualmente distribuído. A distribuição desigual de aquecimento devido à radiação de ondas curtas e longas induz gradientes de pressão que causam os movimentos atmosféricos. O aquecimento devido à radiação de ondas longas é parametrizado como banda larga e inclui aquecimento atmosférico devido à absorção de radiação terrestre pelo vapor d' água (previsto), pelo dióxido de carbono (especificado), nuvens (previstas) e também por outras espécies radiativamente ativas menos importantes. A quantidade de nuvens é dependente da umidade específica, que é prognosticada, na coluna vertical em questão. O aquecimento atmosférico devido às ondas longas é calculado a cada três horas de tempo simulado.

As **parametrizações** de aquecimento devido à radiação de ondas curtas e de ondas longas são substancialmente afetadas pela presença de nuvens. Inicialmente, o CGA do COLA incluía nuvens especificadas usando uma climatologia média zonal do GFDL. Porém, foi mostrado que as nuvens previstas alteram o balanço de energia e proporcionam um reservatório de energia potencial disponível, para gerar movimentos atmosféricos, maior que as nuvens zonalmente simétricas. Então, foi adotado um esquema para considerar esse efeito, que prevê nuvens em três camadas e mais nuvens conectivas profundas. O critério usado para se determinar a quantidade de nuvens em uma dada coluna inclui a umidade relativa e a velocidade vertical para nuvens baixas, médias e altas. A quantidade de nuvens convectivas é baseada na razão de precipitação convectiva prevista na parametrização de **convecção profunda**.

#### **C.9 - Convecção:**

- Profunda: KUO (Kuo, 1965 e Anthes, 1977),
- RAS (Moorthi e Suarez, 1992).
- Rasa (Tiedke, 1983)

Os **processos úmidos** do MCGA incluem a condensação de grande escala, a convecção profunda e a convecção rasa. Entre os processos muito importantes que afetam tanto a dinâmica quanto a termodinâmica da atmosfera, a mudança de fase da água se destaca. Quando uma parcela de ar contendo vapor d' água é resfriada, sua capacidade de reter vapor d' água é reduzida até que a parcela fique saturada. Se a parcela continuar a ser resfriada, o vapor d' água muda para a fase líquida, formando as nuvens. Apesar deste ser um processo complexo envolvendo a disponibilidade de núcleos de condensação de nuvens, ele é tratado de uma forma muito simples pelo MCGA.

### **C.9.1 - Esquema KUO:**

O aquecimento e umedecimento devido a nuvens convectivas profundas são representados na versão operacional do Modelo Global do CPTEC usando o esquema de KUO (1965), modificado por Anthes (1977). A convecção profunda no esquema Kuo atua na presença de uma coluna de ar condicionalmente instável e uma fonte de umidade positiva devido à soma da convergência de umidade e evaporação dentro da coluna. A soma da convergência de umidade e evaporação dentro da coluna é conhecida como “ascensão de umidade”.

Nas colunas para a qual a convecção profunda é diagnosticada, a ascensão de umidade é particionada numa porção que produz calor (produzindo chuva) e uma porção úmida baseada na umidade relativa integrada na coluna. A distribuição vertical de aquecimento e umedecimento do ambiente é baseada na distribuição vertical de diferenças de temperatura e umidade específica entre a nuvem e o ambiente.

A temperatura e a umidade específica da nuvem são determinadas pelo levantamento de uma parcela de ar da camada mais baixa do modelo, pela adiabática seca até o nível de condensação por levantamento (base da nuvem), e então subindo pela adiabática úmida até o nível onde a temperatura da nuvem é igual à temperatura do ambiente (topo da nuvem). Se o nível de condensação por levantamento para o ar próximo à superfície não está em torno de 0,65 vezes a pressão da superfície, então não é permitido ocorrer convecção profunda. A ascensão de umidade é determinada calculando-se a variação da umidade específica no passo de tempo (centrado) para todos os níveis. A presença da convecção profunda é restrita aos seguintes critérios:

- A convecção profunda ocorre apenas para colunas na qual a espessura da nuvem é superior a 30 por cento da pressão à superfície. Para uma pressão à superfície de 1000 hPa, estas convecções profundas estariam

restritas àquelas colunas de tem nuvens convectivas de no mínimo 300 hPa de espessura;

- a ascensão de umidade nas camadas abaixo de  $\sigma = 0,46$  deve exceder  $2 \text{ mm dia}^{-1}$  em algum passo de tempo particular para que a convecção profunda ocorra.

### **C.9.2 - Esquema Arakawa-Schubert Relaxado (RAS)**

O esquema de convecção *Relaxed Arakawa-Schubert* (RAS) foi descrito por Moorthi e Suarez (1992). Este esquema difere da implementação comum de Arakawa-Schubert em dois aspectos. Primeiro, o fluxo de massa normalizado que é uma função exponencial da altura na formulação original é substituída por uma função linear da altura. Segundo, a parametrização “relaxa” a atmosfera de grande escala em direção ao quase-equilíbrio, ao invés de exigir o quase-equilíbrio cada vez que a sub-rotina da convecção cumulus é chamada. O quase-equilíbrio assume que o conjunto de nuvens cumulus responde suficientemente rápido aos efeitos desestabilizantes do escoamento de grande escala, mantendo o equilíbrio.

A implementação do RAS na versão de pesquisa do Modelo Global do CPTEC assume que a camada sub-nuvem é composta pela média ponderada da massa dos dois níveis mais baixos do modelo. Cada vez que a convecção cumulus é chamada, todos os níveis acima da camada sub-nuvem são checados para obter a possibilidade de convecção. Nuvens com mesma base, mas diferentes níveis de detranhamento (topo das nuvens), são classificados como diferentes tipos de nuvens. No esquema RAS, a convecção cumulus ocorre para aqueles tipos de nuvens para os quais a função trabalho da nuvem excede um valor crítico, determinado empiricamente. A função trabalho da nuvem é uma medida integrada da diferença entre a energia estática úmida da nuvem e aquela do ambiente. Para aqueles tipos de nuvem em que a função

trabalho excede da nuvem excede a função trabalho crítica, é determinado o fluxo na base da nuvem necessário para restaurar a função trabalho da nuvem para seu valor crítico. Este fluxo de massa é usado para resolver as equações em escala de grade, incluindo os efeitos da convecção na temperatura e na umidade específica.

### **C.9.3 - Convecção Rasa**

As condições para a formação de cúmulos rasos são menos rigorosas do que para a formação de cúmulos profundos. Os cúmulos rasos não necessitam de convergência de umidade pela grande escala, pois a umidade que já se encontra em baixos níveis, proveniente dos processos evaporativos, geralmente é suficiente para a sua geração. Os cúmulos rasos formam-se sob estratificação estável, tem penetração vertical de poucos quilômetros e, normalmente, não precipitam. Embora possa parecer que os cúmulos rasos são de importância menor para a atmosfera, o fato de se dissolverem depois de formados exerce um papel importante na modificação da estrutura vertical da camada com nuvem. Na parte inferior ocorre diminuição da umidade e aquecimento devido à condensação e à subsidência de ar seco, enquanto que na parte superior ocorre umedecimento e resfriamento devido a reevaporação. Assim, a convecção rasa atua transportando calor para baixo e vapor d' água para cima. Não obedecem a um processo pseudo-adiabático, isto é, uma vez que ocorre condensação, a água líquida é mantida como uma propriedade da parcela (Betts, 1975). Portanto, os cúmulos rasos mantêm a estrutura termodinâmica da baixa atmosfera e são de fundamental importância para a definição do escoamento de grande escala.

### C.10 - Ajustes:

- Condensação de grande escala (NMC, 1988).
- Difusão horizontal: bi-harmônica explícita (NMC, 1988).
- : 2n-harmônica implícita (desenvolvida no CPTEC em 2002)
- Difusão prevenindo CFL: Local (desenvolvida no COLA em 1994 e modificada no CPTEC em 1995),  
Espectral Aumentada (adaptado do esquema do ECMWF em 2002).

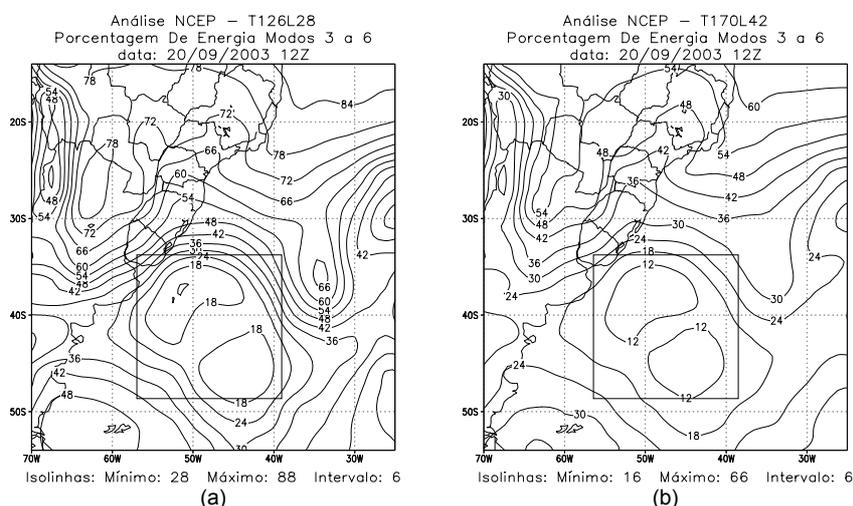
Além dos processos físicos já descritos, são considerados ajustes difusivos: a difusão horizontal e a local. A difusão horizontal é necessária para controlar ruídos de pequena escala que surgem no modelo. As origens de tais ruídos são: a) os efeitos do truncamento espectral finito, que interrompe a cascata de enstrofia e/ou energia para escalas pequenas; b) ondas de gravidade de pequena escala causadas pelos processos físicos subgrade; c) efeitos puramente computacionais. Desde que as escalas maiores, bem resolvidas, não devem ser afetadas é utilizado um tipo de difusão seletivo de escala bi-harmônico. A difusão local torna-se necessária em regiões onde o jato é muito forte podendo comprometer a estabilidade numérica de integração no tempo. Para manter o jato em valores compatíveis com os critérios de estabilidade numérica, é feita uma dissipação local newtoniana toda vez que o vento ultrapassar um valor crítico pré-definido.



## APÊNDICE D

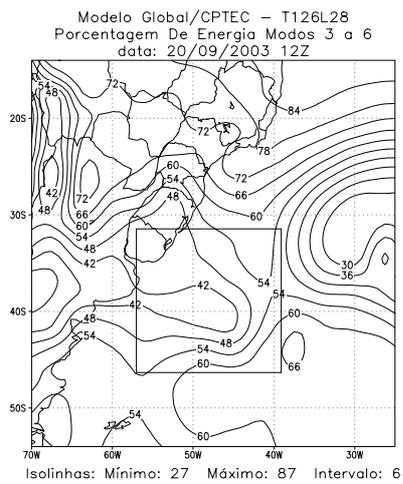
### APÊNDICE DE FIGURAS REFERENTE AO CASO OCORRIDO EM SETEMBRO DE 2003 (EXC1, EXP5 E EXP6)

Neste Apêndice, são apresentados resultados menos expressivos, mas importantes, na análise da partição e interação de energia entre os modos horizontais e verticais para o estágio maduro do SSMNVI ocorrido em setembro de 2003.

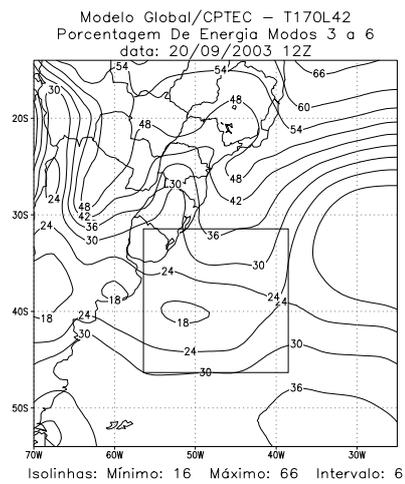


**FIGURA D.1** – Porcentagens de energia para os modos verticais de 3 a 6: (a) Análise NCEP T126L28, (b) Análise NCEP T170L42, (c) MGCPTec T126L28 – Kuo, (d) MGCPTec T170L42 – Kuo, (e) MGCPTec T126L28 – RAS, (f) MGCPTec T170L42 – RAS, para o dia 20/09/03, 12Z.

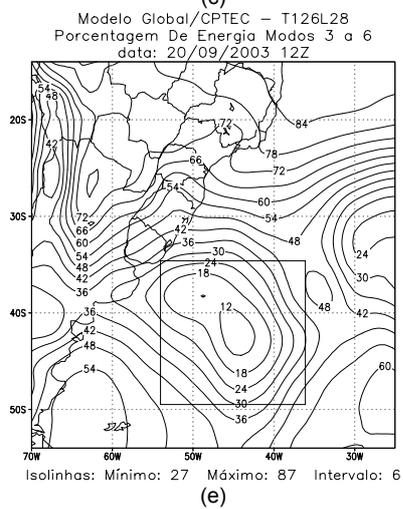
(continua)



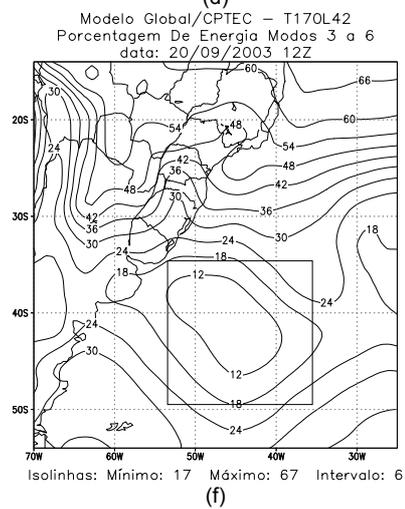
(c)



(d)

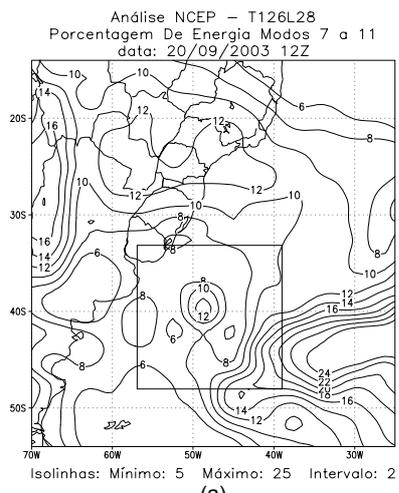


(e)

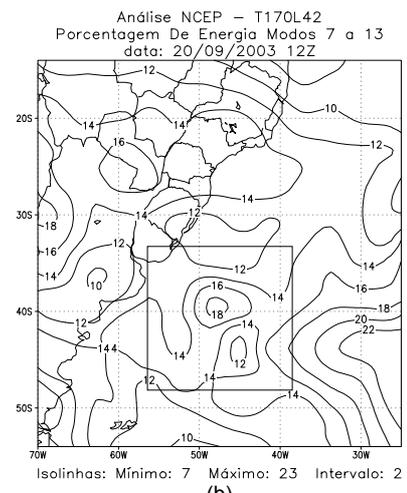


(f)

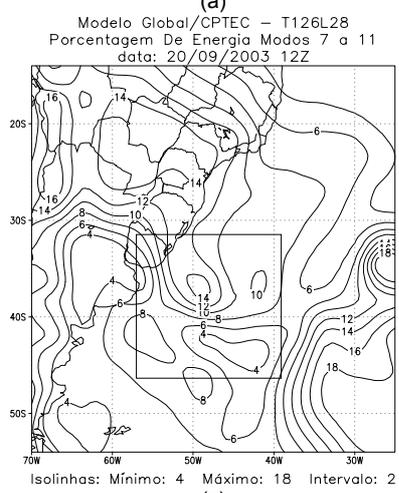
FIGURA D.1 – Conclusão.



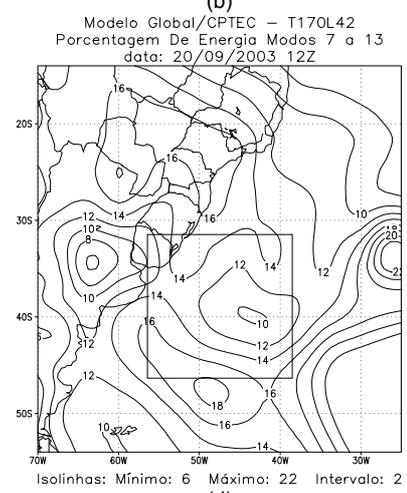
(a)



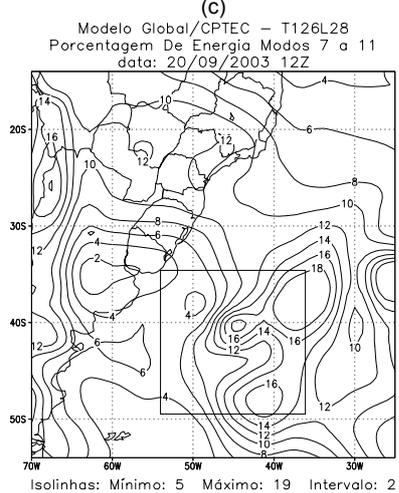
(b)



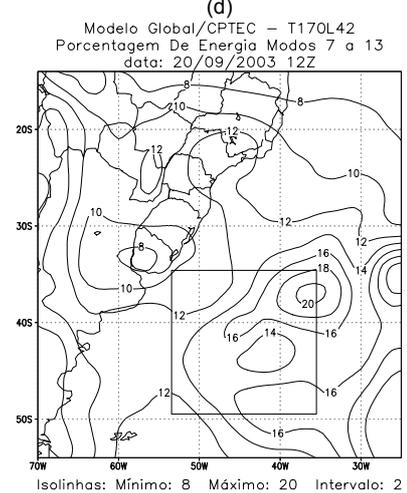
(c)



(d)

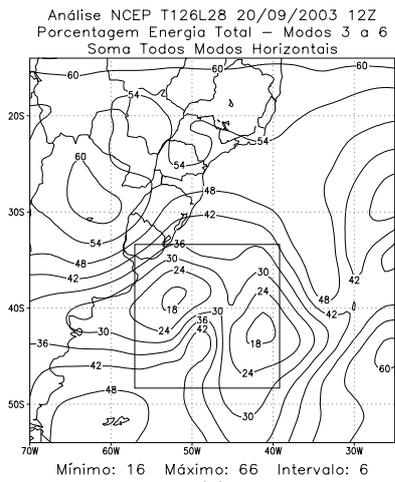


(e)

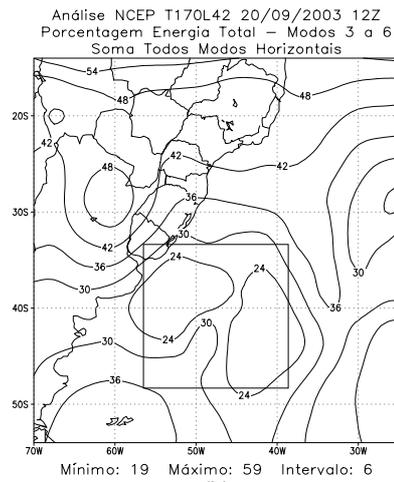


(f)

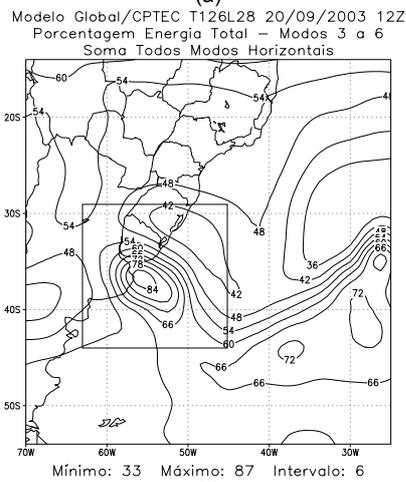
**FIGURA D.2** – Idem FIGURA D.1, exceto para os modos verticais de 7 a 11 (13) para 28 (42) camadas.



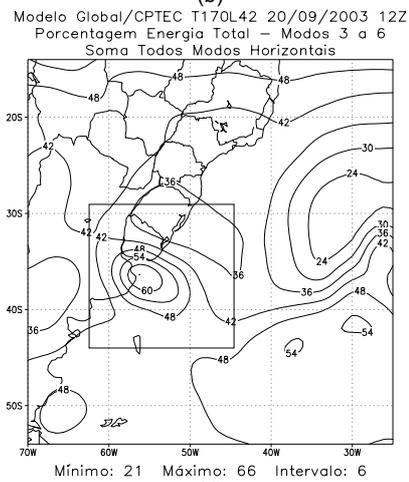
(a)



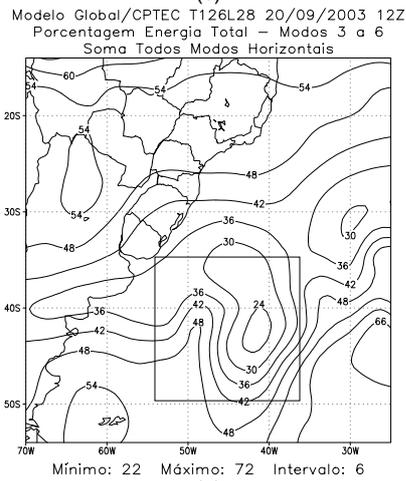
(b)



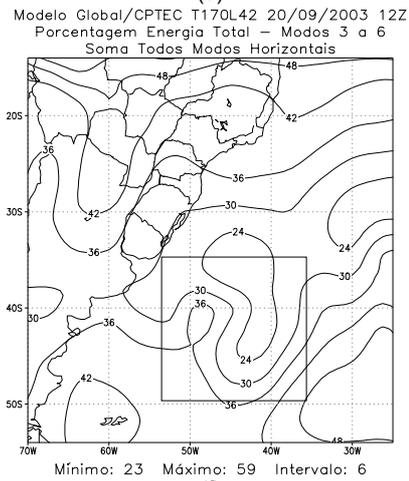
(c)



(d)



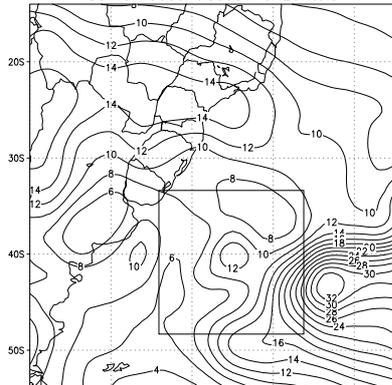
(e)



(f)

**FIGURA D.3** – Percentagem de energia somada para todas os modos horizontais e modos verticais 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTec Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

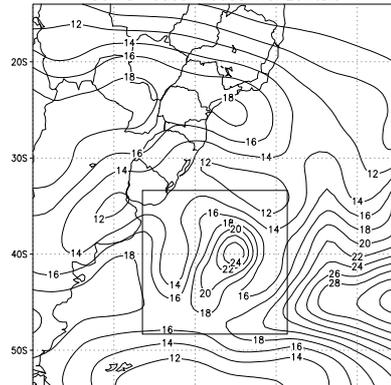
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Soma Todos Modos Horizontais



Mínimo: 3 Máximo: 33 Intervalo: 2

(a)

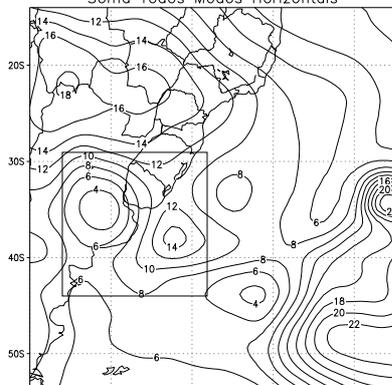
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Soma Todos Modos Horizontais



Mínimo: 6 Máximo: 33 Intervalo: 2

(b)

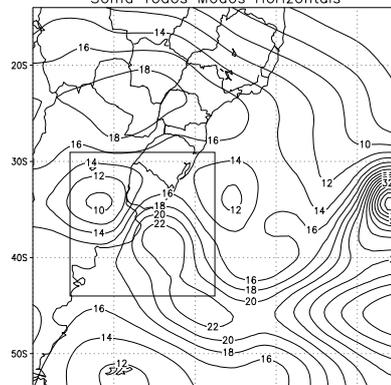
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Soma Todos Modos Horizontais



Mínimo: 2 Máximo: 24 Intervalo: 2

(c)

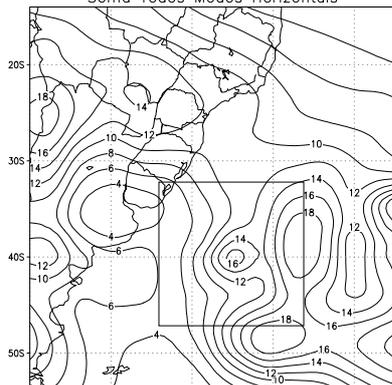
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Soma Todos Modos Horizontais



Mínimo: 5 Máximo: 41 Intervalo: 2

(d)

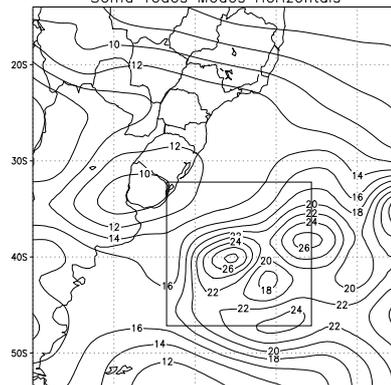
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Soma Todos Modos Horizontais



Mínimo: 4 Máximo: 28 Intervalo: 2

(e)

Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Soma Todos Modos Horizontais

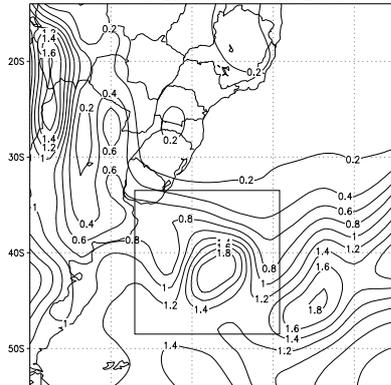


Mínimo: 6 Máximo: 33 Intervalo: 2

(f)

**FIGURA D.4 – Idem FIGURA D.3, exceto para os modos verticais de 7 a 11 (13) para 28 (42) camadas.**

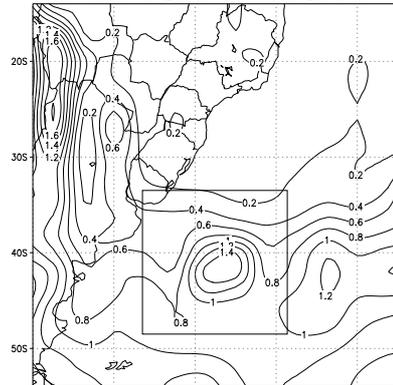
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(a)

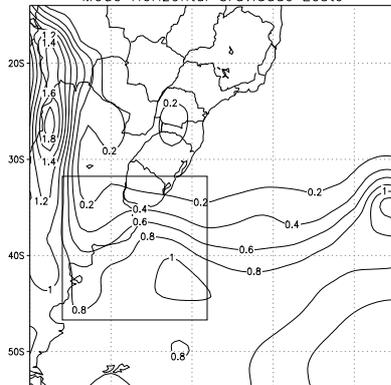
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(b)

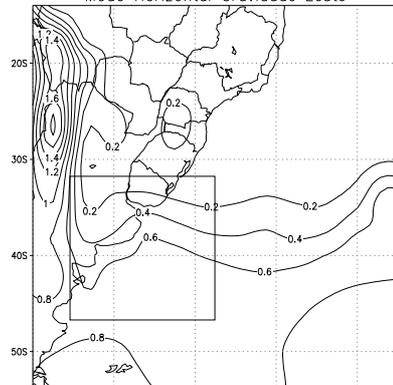
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(c)

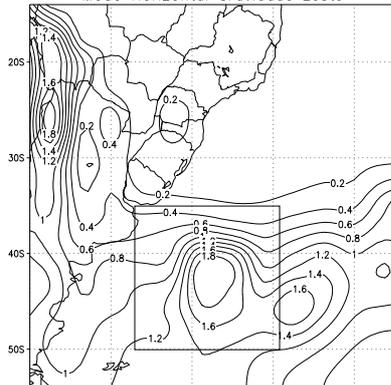
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(d)

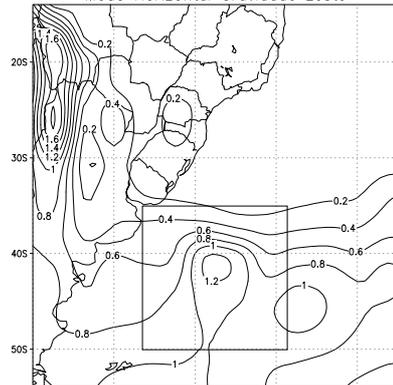
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(e)

Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 0 a 2  
 Modo Horizontal Gravidade Leste

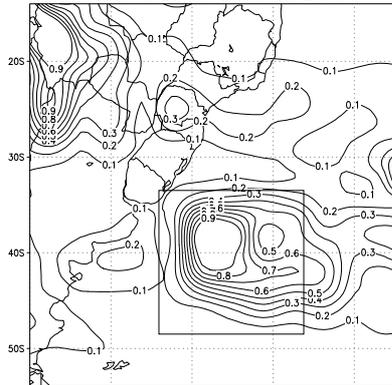


Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.2

(f)

**FIGURA D.5** – Porcentagem de energia do modo Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

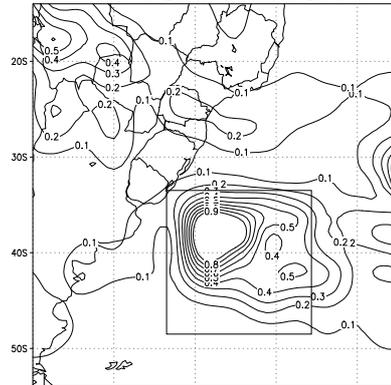
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.1 Máximo: 1 Intervalo: 0.1

(a)

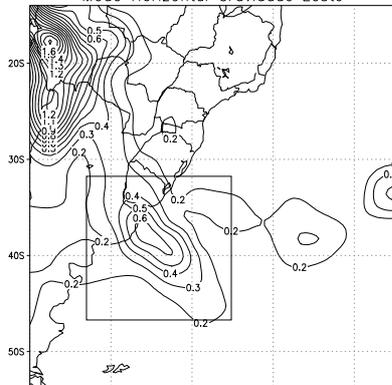
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.1 Máximo: 1 Intervalo: 0.1

(b)

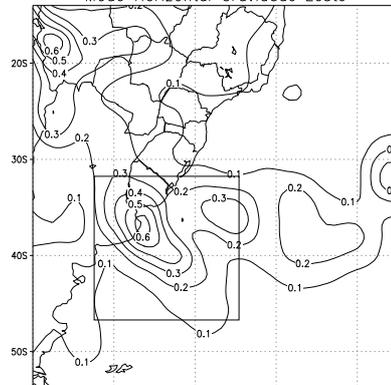
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.1

(c)

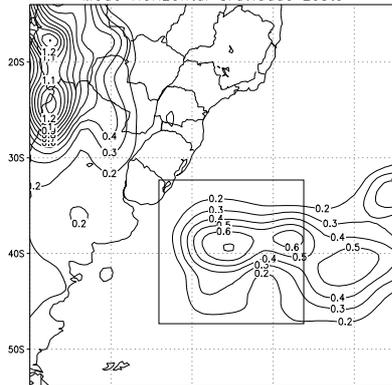
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.07 Máximo: 0.7 Intervalo: 0.1

(d)

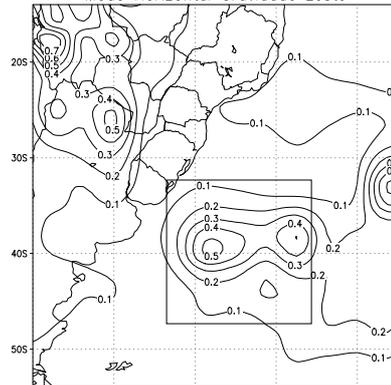
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.1

(e)

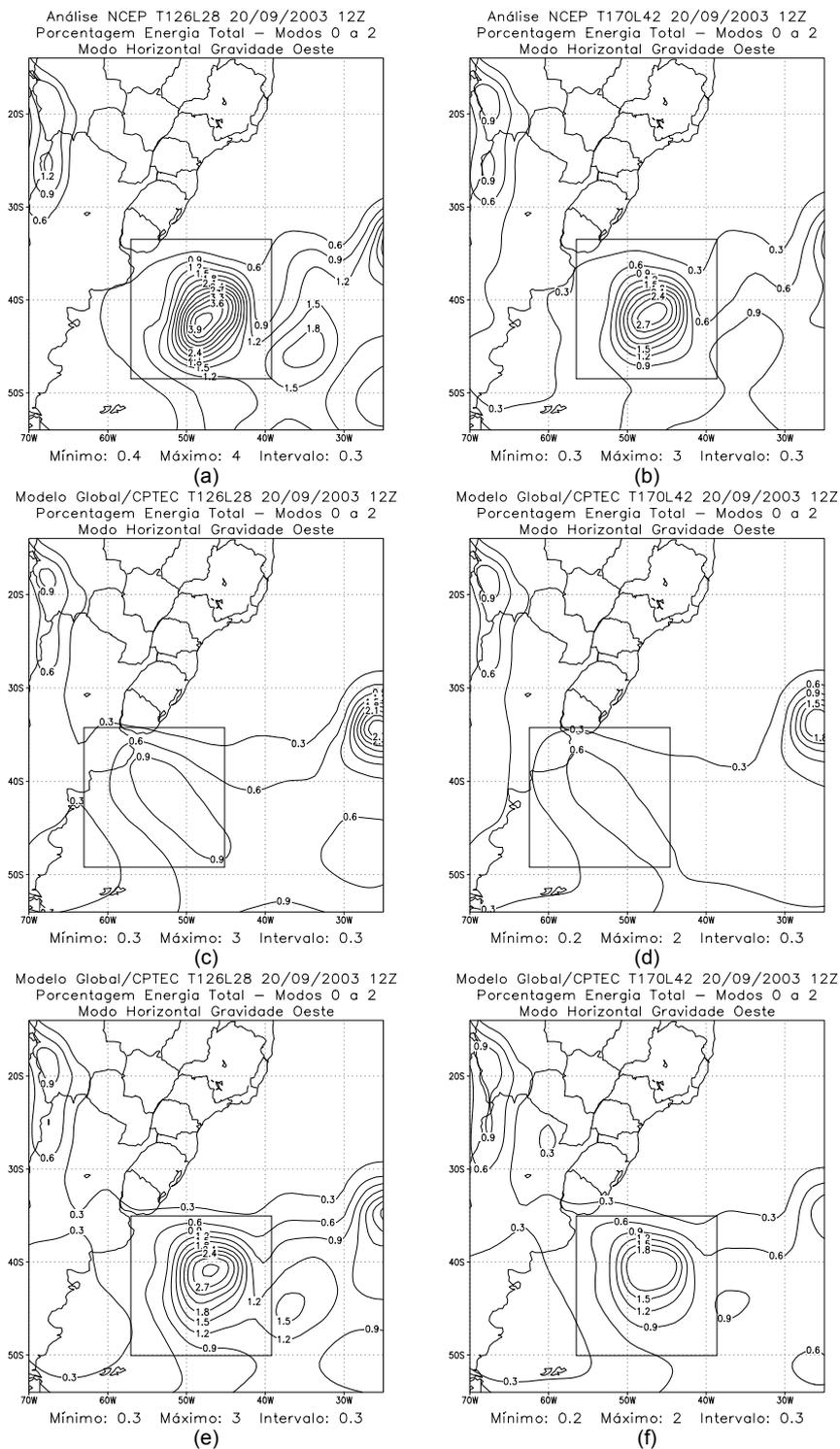
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Percentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
 Modo Horizontal Gravidade Leste



Mínimo: 0.09 Máximo: 0.9 Intervalo: 0.1

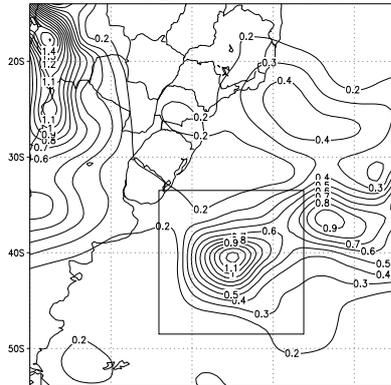
(f)

**FIGURA D.6 – Idem FIGURA D.5, exceto que para o modo vertical de 7 a 11(13).**



**FIGURA D.7** – Porcentagem de energia do modo Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.

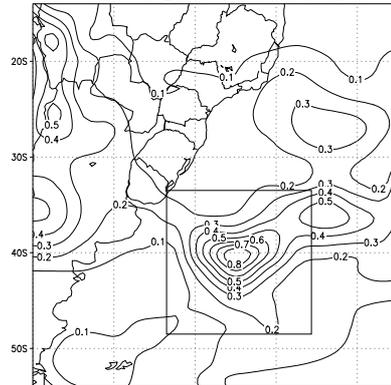
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
Modo Horizontal Gravidade Oeste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.1

(a)

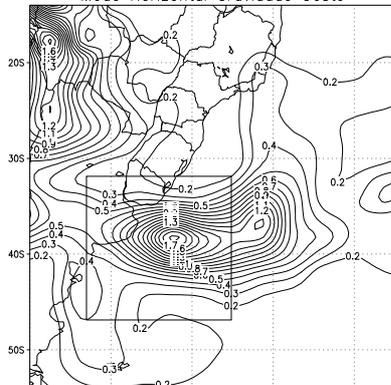
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
Modo Horizontal Gravidade Oeste



Mínimo: 0.09 Máximo: 0.9 Intervalo: 0.1

(b)

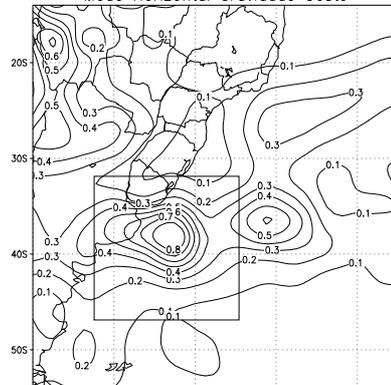
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
Modo Horizontal Gravidade Oeste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.1

(c)

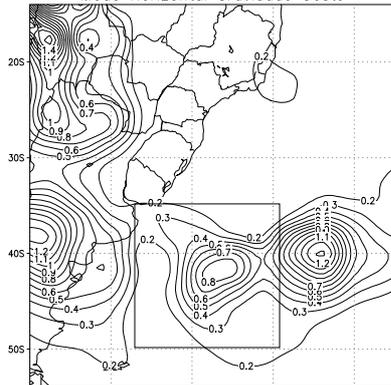
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
Modo Horizontal Gravidade Oeste



Mínimo: 0.09 Máximo: 0.9 Intervalo: 0.1

(d)

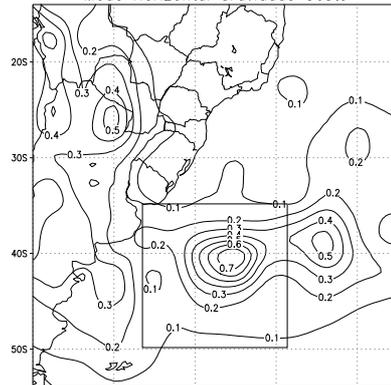
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 11  
Modo Horizontal Gravidade Oeste



Mínimo: 0.2 Máximo: 2 Intervalo: 0.1

(e)

Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
Porcentagem Energia Total – Modos 7 a 13  
Modo Horizontal Gravidade Oeste

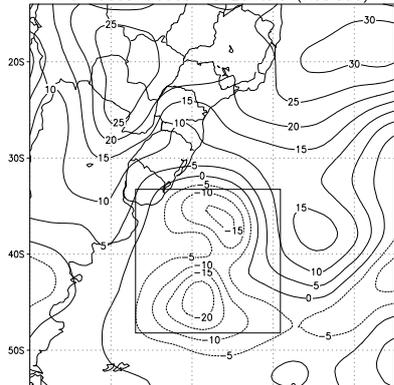


Mínimo: 0.08 Máximo: 0.8 Intervalo: 0.1

(f)

**FIGURA D.8 – Idem FIGURA D.7, exceto que para o modo vertical de 7 a 11(13).**

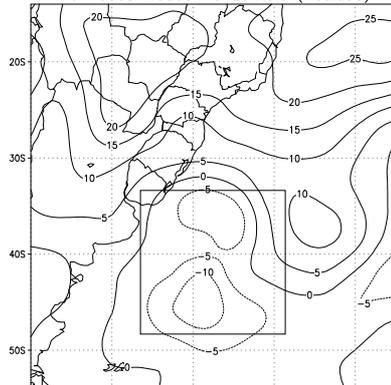
Análise NCEP T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



Mínimo: -21 Máximo: 33 Intervalo: 5

(a)

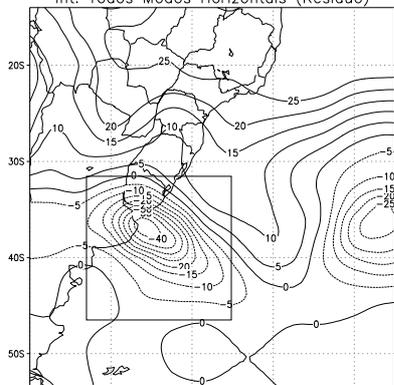
Análise NCEP T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



Mínimo: -13 Máximo: 27 Intervalo: 5

(b)

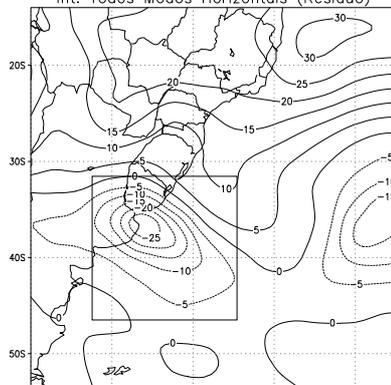
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



Mínimo: -43 Máximo: 29 Intervalo: 5

(c)

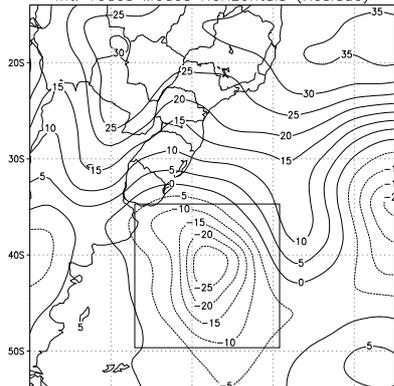
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



Mínimo: -29 Máximo: 31 Intervalo: 5

(d)

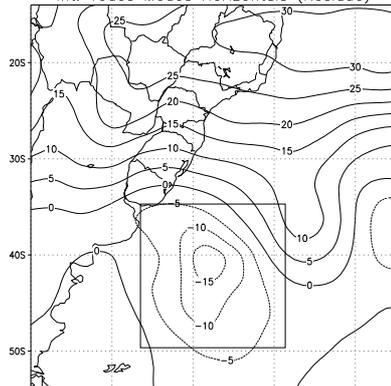
Modelo Global/CPTEC T126L28 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



Mínimo: -25 Máximo: 38 Intervalo: 5

(e)

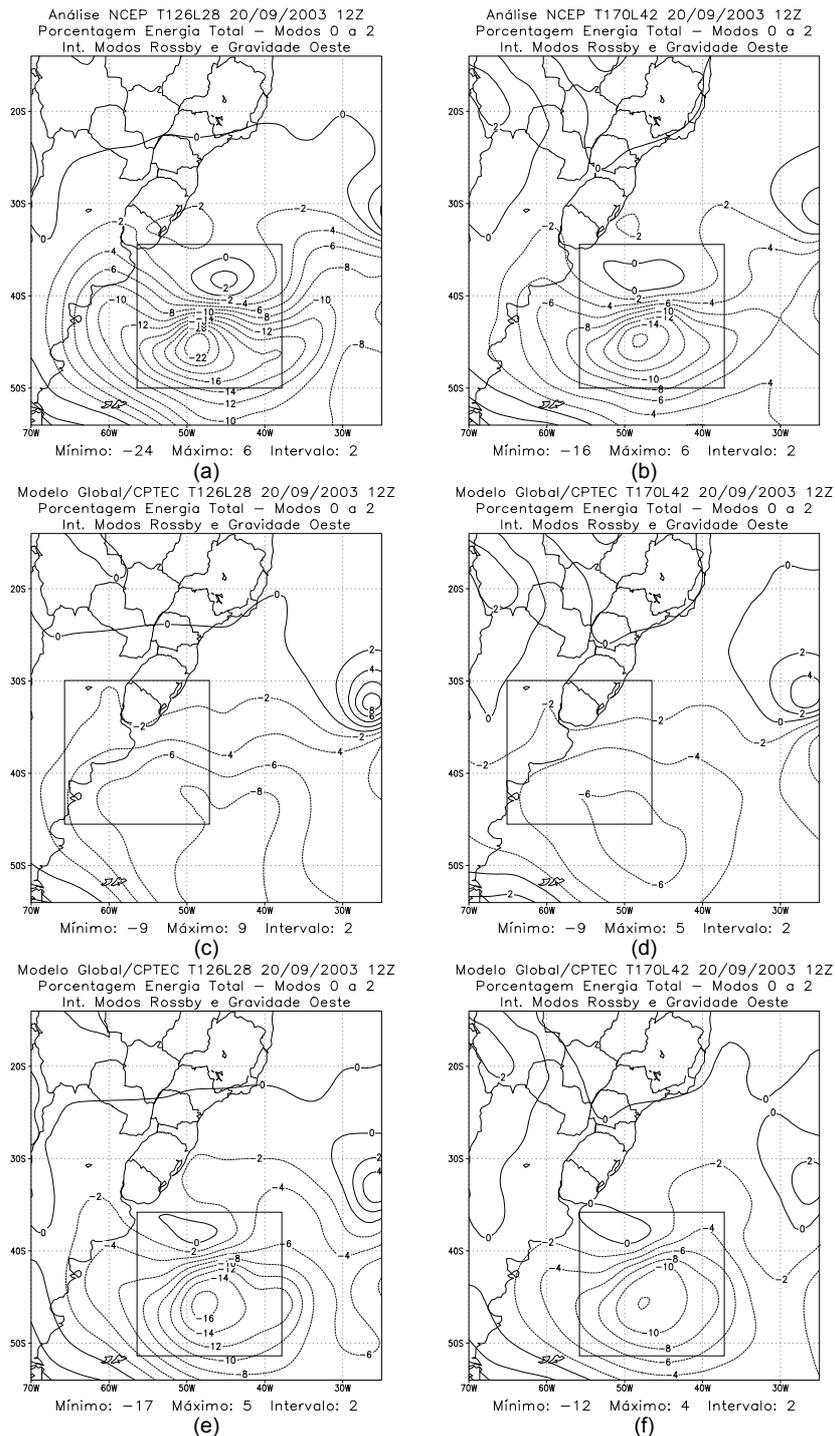
Modelo Global/CPTEC T170L42 20/09/2003 12Z  
 Porcentagem Energia Total – Modos 3 a 6  
 Int. Todos Modos Horizontais (Resíduo)



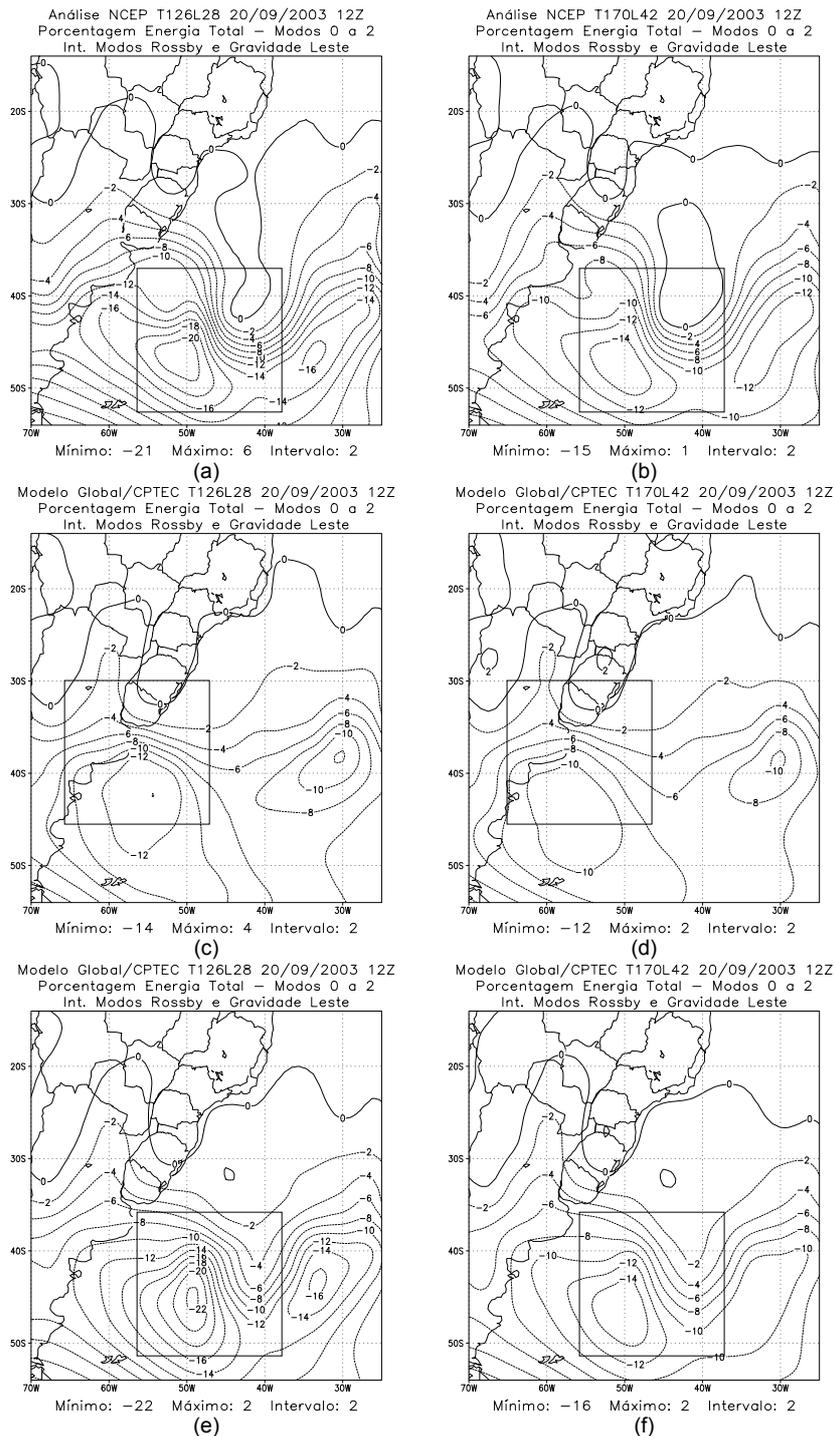
Mínimo: -17 Máximo: 33 Intervalo: 5

(f)

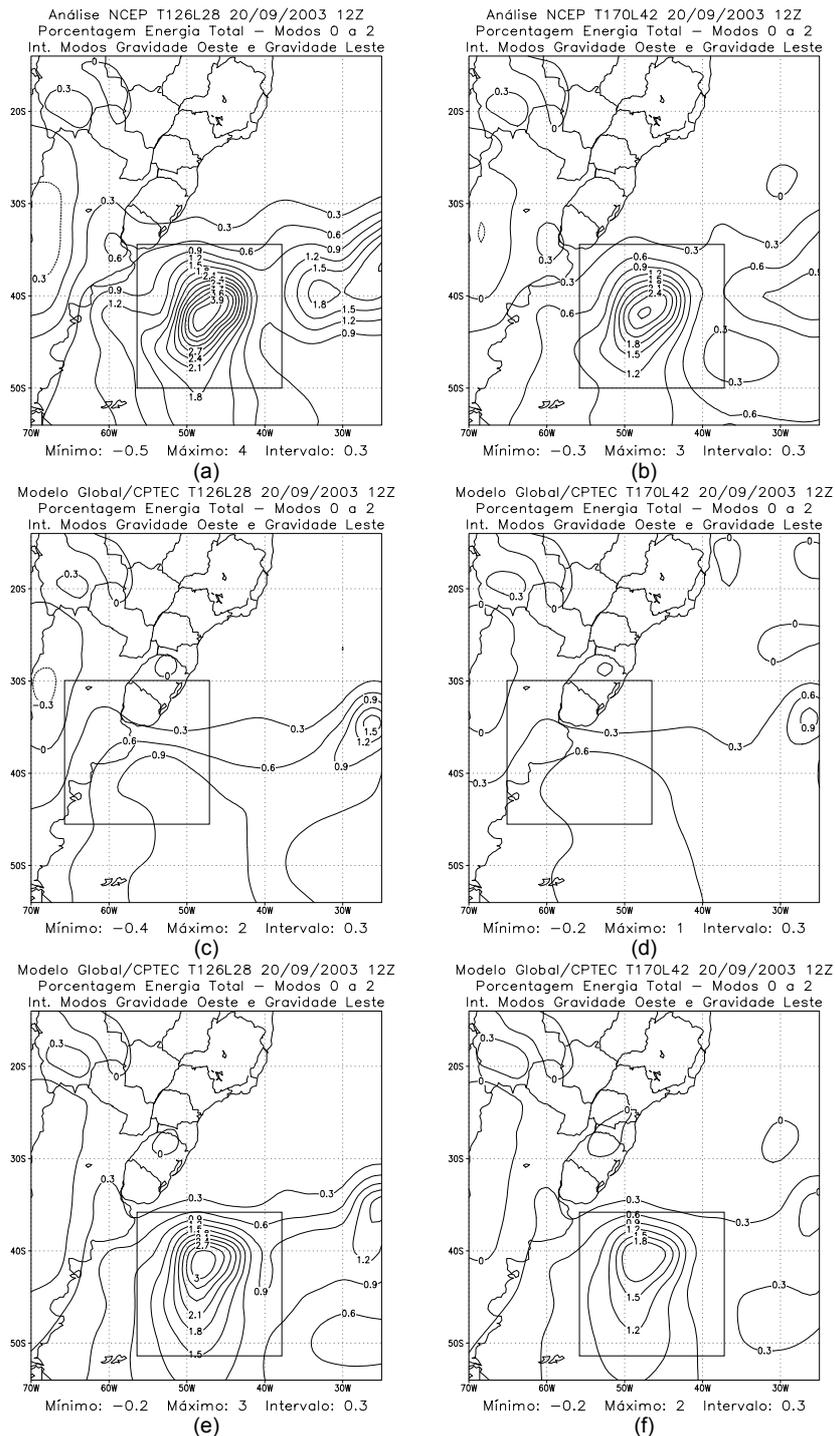
**FIGURA D.9** – Porcentagem de energia para a soma de todas as interações (Resíduo) para os modos verticais de 3 a 6 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTec Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



**FIGURA D.10** – Porcentagem de energia das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



**FIGURA D.11** – Porcentagem de energia das interações entre os modos Rossby e Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



**FIGURA D.12** – Porcentagem de energia das interações entre os modos Gravidade Oeste e Gravidade Leste para os modos verticais de 0 a 2 referente ao dia 20/09/2003 -12Z, para: (a), (c) e (e) referente à Análise NCEP, MGCPTEC Kuo e RAS para a resolução T126L28 e (b), (d) e (f) para a resolução T170L42, respectivamente.



## APÊNDICE E

### CÁLCULO DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO E ERRO MÉDIO PREVISTO REFERENTE AOS ESTÁGIOS MADUROS DOS CASOS DE SSMNVI: ABRIL DE 1979, AGOSTO DE 1989 E OUTUBRO DE 1991

**TABELA E.1** – Cálculo EMP e EMQ para as resoluções T126L28 e T170L42 do caso ocorrido em abril de 1979 para o esquema de convecção Kuo. O período de 60 horas representa o estágio maduro do SSMNVI.

<b>Caso:</b> abril de 1979					
<b>Rodada:</b> 13/04 - 17/04					
<b>Latitude:</b> -45 até 0					
<b>Longitude:</b> -80 até -15					
<b>Título:</b> Altura Geopotencial em 1000 hPa (m)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	37,37	-23,00	38,59	-23,35
<b>Título:</b> Água Precipitável (mm)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	7,29	0,23	8,11	-0,14
<b>Título:</b> Convergência de Umidade (g/Kg/dia)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	4,27	-0,18	3,90	-0,14
<b>Título:</b> Advecção de Temperatura em 850 hPa (K/dia)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	4,67	-0,59	5,17	-0,27
<b>Título:</b> Temperatura em 850 hPa (°C)					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	2,69	-1,29	2,63	-1,43

(continua)

**TABELA E.1 – Conclusão.**

<b>Título: Magnitude do Vento em 850 hPa (ms<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	3,38	0,76	3,94	0,58
<b>Título: Vorticidade em 850 hPa (10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	15/04/1979 - 12 Z	2,21	-0,08	2,34	0,003

**TABELA E.2 – Idem TABELA E.1, exceto que para o caso ocorrido em agosto de 1989.**

<b>Caso:</b> agosto de 1989					
<b>Rodada:</b> 20/08 - 25/08					
<b>Latitude:</b> -60 até -10					
<b>Longitude:</b> -70 até -10					
<b>Título: Altura Geopotencial em 1000 hPa (m)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	42,57	-12,85	47,08	-16,70
<b>Título: Água Precipitável (mm)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	5,23	0,83	5,10	0,62
<b>Título: Convergência de Umidade (g/Kg/dia)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	3,19	-0,04	3,64	0,06
<b>Título: Advecção de Temperatura em 850 hPa (K/dia)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	9,08	-1,05	9,00	-1,46

(continua)

**TABELA E.2 – Conclusão.**

<b>Título: Temperatura em 850 hPa (°C)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	2,62	-0,35	2,62	-0,21
<b>Título: Magnitude do Vento em 850 hPa (ms<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	3,83	1,49	4,24	1,59
<b>Título: Vorticidade em 850 hPa (10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
60 horas	22/08/1989 - 12 Z	2,50	0,09	2,80	0,07

**TABELA E.3 –** Idem TABELA E.1, exceto que para o caso ocorrido em outubro de 1991 e estágio maduro do SSMNVI às 84 horas.

<b>Caso:</b> outubro de 1991					
<b>Rodada:</b> 03/10 - 07/10					
<b>Latitude:</b> -40 até 0					
<b>Longitude:</b> -70 até -20					
<b>Título: Altura Geopotencial em 1000 hPa (m)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	54,54	-33,10	54,43	-38,08
<b>Título: Água Precipitável (mm)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	7,38	0,48	7,43	0,32
<b>Título: Convergência de Umidade (g/Kg/dia)</b>					
<b>Resolução:</b>	T126L28			T170L42	
<b>Horas:</b>	<b>Data:</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>	<b>EMQ</b>	<b>EMP</b>
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	4,44	0,17	4,92	0,01

(continua)

**TABELA E.3 – Conclusão.**

Título: Advecção de Temperatura em 850 hPa (K/dia)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	10,48	0,12	11,35	0,28
Título: Temperatura em 850 hPa (°C)					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	3,17	0,66	3,15	1,08
Título: Magnitude do Vento em 850 hPa (ms <sup>-1</sup> )					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	5,16	2,06	4,49	1,42
Título: Vorticidade em 850 hPa (10 <sup>5</sup> s <sup>-1</sup> )					
Resolução:	T126L28			T170L42	
Horas:	Data:	EMQ	EMP	EMQ	EMP
84 horas	06/10/1991 - 12 Z	3,64	-0,09	3,73	-0,04