

ESTRUTURA VERTICAL DA TROPOSFERA ASSOCIADA COM NUVENS CUMULUNIMBUS E NIMBUSTRATUS EM PELOTAS, RS

NATALIA FEDOROVA¹; MARIA HELENA DE CARVALHO²; VLADIMIR LEVIT¹;
PAULO R.B. BARBIERI², ANDRÉ M. GONÇALVES²; ELIANE P. ALVES²; ELIZABETH SIGNORINI²;
GILSANE M. C. PINHEIRO²; JÚLIO R. Q. MARQUES²; VLADAIR M. DE OLIVEIRA²; ANTONIO J.
DE ALMEIDA²

¹Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade

Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, AL

²Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas da Universidade

Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS

natalia@dimin.net

Enviado Setembro 2001 - Aceito Abril 2010

RESUMO

As condições termodinâmicas do desenvolvimento de nuvens *Cumulunimbus* (*Cb*) e *Nimbustratus* (*Ns*) e formação de precipitações na cidade de Pelotas são estudadas utilizando-se dados do NCEP (National Center for Environmental Prediction, Washington) para os níveis padrões e dados meteorológicos convencionais. Analisou-se a frequência das nuvens *Cb* e *Ns* durante três anos, para as quatro estações do ano, e calcularam-se os índices de instabilidade (Showalter, lifted, K and standard totals-totals) e a energia potencial de convecção. Foram identificados cinco tipos de perfis verticais de temperatura e umidade para os dias em que foram verificadas nuvens *Cb* e *Ns*, através de dados de radiossondagens de Porto Alegre, e das análises do NCEP. Apresentam-se os resultados da análise da instabilidade atmosférica e são discutidos os problemas da previsão de nuvens *Cb* e *Ns*, utilizando os índices de instabilidade.

Palavras-Chave: nuvens *Cb* e *Ns*, instabilidade atmosférica, previsão do tempo.

ABSTRACT: THE TROPOSPHERIC VERTICAL STRUCTURE ASSOCIATED WITH CUMULUNIMBUS AND NIMBUSTRATUS CLOUDINESS IN PELOTAS, RS

The thermodynamic conditions of *Cumulunimbus* (*Cb*) and *Nimbustratus* (*Ns*) cloudiness development and precipitation formation in Pelotas city were studied using NCEP (National Centers for Environmental Prediction, Washington) data for standard levels and conventional meteorological data. The frequency of the *Cb* and *Ns* cloudiness during three years and for each seasons was analyzed. Stability indexes (Showalter, lifted, K and standard totals-totals) and the convective available potential energy were calculated. Five types of vertical profiles of temperature and humidity for days with *Cb* and *Ns* clouds were identified through radiosonde data over Porto Alegre and NCEP analysis. The results of the atmospheric instability analysis are presented and problems involving the *Cb* and *Ns* cloudiness forecasting, using the stability indexes, are discussed.

Keywords: *Cb* and *Ns* cloudiness, atmospheric instability, weather forecast.

1. INTRODUÇÃO

A previsão da precipitação de curto prazo é um dos elementos principais no trabalho diário dos meteorologistas nos diferentes Centros de Previsão de Tempo. Quando ocorrem

precipitações intensas, diversos setores da economia e a sociedade em geral sofrem enormes prejuízos.

Os estudos climatológicos das precipitações em Pelotas mostram diferentes lados deste problema. Uma análise das probabilidades das precipitações pluviométricas em Pelotas foi

feita por Silva e Amaral (1987). Utilizando um arquivo de dados de 1900 a 1951, elaboraram-se as tabelas de probabilidades pentadais, totais e máximas, utilizando as transformações raiz cúbica e raiz quinta. O padrão de distribuição espacial de chuvas intensas na região de Pelotas também foi estudado em Goulart (1992). Sua análise para o período de dois anos das alturas pluviométricas e duração de chuva, mostrou que a precipitação máxima para o período de 1/2 hora foi 34,7 mm, para 2 e 3 horas foram quase iguais, 50,2 e 54,9mm, respectivamente, e para 24 horas atingiu 85,2mm. Já analisando 24 eventos, registrados no período entre 1954 e 1984, obteve-se que a tendência da redução da precipitação pontual diminuiu sistematicamente com o aumento da duração da chuva; mas esta tendência foi verificada somente para durações entre 3 e 12 horas. O comportamento das precipitações mensais em Pelotas, durante os eventos de El Niño e La Niña no período de 1950 a 1997, foi estudado em Sansigolo et al. (2000). Os autores concluíram que a influência do fenômeno El Niño no regime de precipitações é pequena e restrita ao segundo trimestre do ano, enquanto a do La Niña é maior, mas pequena, na maior parte do ano. Todavia, alguns autores como Kousky e Cavalcanti (1984), Rao e Hada (1990) verificaram que em anos de El Niño ocorre precipitação acima da normal na região sul do Brasil. Já Assis (1991) apud Goulart (1992) mostrou que os dias chuvosos em Pelotas apresentam uma distribuição bem uniforme ao longo do ano. Por este estudo, os meses mais chuvoso e seco são setembro e abril; sendo que estes meses apresentam precipitações equivalentes a 10,1% e 7,3% do total anual, respectivamente.

As precipitações mais intensas ocorrem em associação com nuvens que apresentem um desenvolvimento vertical significativo. Bluestein (1993) descreveu os quatro tipos de perfil vertical da atmosfera associados com pancadas e trovoadas nos Estados Unidos. O tipo I tem uma camada muito úmida e estável até 800 hPa; uma forte inversão no topo desta camada e acima desta outra camada instável com ar muito seco ($T-T_d$ é de aproximadamente 30 °C). O tipo II é típico para regiões tropicais e é caracterizado por uma camada condicionalmente instável e úmida (com $T-T_d$ variando entre 1 e 5 °C), com desenvolvimento vertical profundo (até 7 km), e sem camadas com inversão de temperatura. O tipo III é semelhante ao do tipo II, todavia a atmosfera é mais fria, sendo que as temperaturas são, aproximadamente, 10 a 15 °C mais baixas e a atmosfera em níveis médios e baixos é mais seca (o valor de $T-T_d$ é, na camada de 700 a 600 hPa, aproximadamente, 10 °C e acima de 600 hPa, de, aproximadamente, 20 °C). O tipo IV não tem uma camada úmida em baixos níveis, porém a umidade aumenta com a altura. Neste tipo o ar à superfície é muito quente e a base das nuvens é muito alta.

Para a região sul do Brasil não se encontrou nenhuma descrição do perfil vertical da atmosfera associada com

convecção intensa. Somente em Fedorova e Khan (1999) é apresentado um perfil vertical da atmosfera associado com o desenvolvimento de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM). Estas autoras enfatizaram o desenvolvimento de convecção desde o topo da camada estável com isoterma. Para análise da instabilidade atmosférica que está associada com chuvas intensas, Correa (1997), em seus estudos sobre camada limite planetária sobre o sul do Brasil, usou o número de Richardson (Ri), o qual é indicador da estabilidade atmosférica, devido à distribuição vertical da temperatura e do vento.

A formação de tempestades severas na região centro-sul dos Estados Unidos foi analisada por Newton (1967). Ele mostrou que este processo desenvolve-se nas proximidades da intersecção entre correntes de jato nos altos e baixos níveis, quando as advecções diferenciais de umidade e calor são máximas. A corrente de jato nos baixos níveis é responsável pelo transporte de ar quente e úmido proveniente do Golfo do México, enquanto que nos altos níveis, o ar seco e frio é levado desde o oeste até o centro-sul dos E.U.A., onde ocorrem as tempestades. Para Uccellini e Johnson (1979), o efeito combinado dos máximos dos ventos da alta e baixa troposfera é o de criar uma região de instabilidade convectiva dentro da qual se desenvolvem as tempestades que produzem chuvas intensas. Scofield (1990), estudando casos de chuvas intensas associadas a ciclones extratropicais, observou que em muitos casos estas chuvas ocorrem quando um forte escoamento em 850 hPa passa por sobre uma região com altos valores de temperatura potencial equivalente ou quando uma perturbação nos altos níveis (corrente de jato) passa sobre regiões com alto teor de umidade.

Visto que na literatura não foram encontradas informações sobre a estabilidade atmosférica e a estrutura do perfil vertical da troposfera associadas com chuvas intensas sobre o Rio Grande do Sul, o objetivo deste trabalho é analisar a estrutura vertical da troposfera relacionada à formação de nuvens *Cumulonimbus* (*Cb*) e *Nimbostratus* (*Ns*), e de chuvas e trovoadas sobre a cidade de Pelotas. Adicionalmente serão determinados quais dos índices de instabilidade relacionados na metodologia podem ser melhor utilizados para a identificação das precipitações e trovoadas.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1. Dados Convencionais e Perfis Verticais

Neste estudo foram utilizadas informações de nuvens *Cb* e *Ns*, precipitações e trovoadas ocorridas na cidade de Pelotas – RS, registradas na estação meteorológica do Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas (CPPMET) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) para um período de três anos (de agosto de

1997 a julho de 2000). As nuvens e trovoadas foram observadas especialmente para a realização deste trabalho na mesma estação.

As análises numéricas do modelo do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) são básicas para a elaboração da previsão de tempo pelos meteorologistas do CPPMET. A partir dessas análises numéricas para 1200 UTC nos níveis padrões de 1000 hPa até 300 hPa, construíram-se perfis verticais de temperatura e umidade (posteriormente mencionados como perfis construídos) para os dias em que foram observadas as nuvens *Ns* e *Cb*, para um ponto de grade próximo da cidade de Pelotas. A elaboração do perfil vertical da análise numérica foi feito devido à ausência de radiossondagem em Pelotas e, por outro lado, devido à utilização diária das análises do NCEP para elaboração da previsão de tempo.

Posteriormente foi feita a comparação do perfil vertical construído com os dados de radiossondagem (para 1200 UTC) de Porto Alegre, denominado de perfil real. Esta comparação foi realizada a fim de se avaliar a qualidade dos perfis construídos com os dados de reanálise do NCEP. Para esta análise foram escolhidos os dias em que nuvens *Ns* e *Cb* foram observadas tanto em Pelotas, quanto em Porto Alegre (pelos dados do 8º DISME), e foi feita então a análise da estrutura vertical da atmosfera pelos dados de radiossondagem.

2.2. Análise da Estrutura Vertical da Atmosfera

Para todos os perfis verticais (simulado e real) foram calculados os seguintes índices de instabilidade: K, Total Totals (TT), Lifted (LI) e Showalter (S).

O índice K (Vasquez, 1994) foi calculado pela equação: $K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - (T - Td)_{850}$, onde T_{850} e T_{500} são a temperatura do ar nos níveis de 850 e 500 hPa, respectivamente; Td_{850} e $(T - Td)_{850}$ são a temperatura do ponto de orvalho e a depressão do ponto de orvalho no nível de 850 hPa, respectivamente. Valores de KI entre 31 e 35 correspondem a pancadas, e $KI > 35$ indica pancadas com trovoadas.

De acordo com Bluestein (1993) e Djuric (1994), o índice K é calculado de uma maneira um pouco diferente, ou seja, pela equação: $K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - (T - Td)_{700}$, onde $(T - Td)_{700}$ é a depressão do ponto de orvalho no nível de 700 hPa. O valor de $K > 24$ mostra a possibilidade de pancadas e $K > 30$ corresponde a pancadas com trovoadas.

O índice TT foi calculado pela seguinte equação: $TT = Td_{850} + T_{850} - 2 \times T_{500}$ (Bluestein, 1993, Vasquez, 1994 e Djuric, 1994). As interpretações dadas pelos vários autores é um pouco diferente. Para Djuric (1994), os valores de TT_D (TT_D é o índice TT com a interpretação de Djuric.) > 44 indicam aguaceiros com trovoadas; os valores TT_D próximos de 55 correspondem a fenômenos do tipo tornados. Para Vasquez os valores de TT_V (TT_V é o índice de TT com a interpretação por

Vasquez) > 50 indicam alguns aguaceiros; os valores de $TT_V > 52$ correspondem a muitas pancadas com trovoadas e os valores $TT_V > 56$ correspondem a tornados.

O LI foi calculado como a diferença da temperatura do ar no nível de 500 hPa (T_{500}) e a temperatura (T_L) no mesmo nível. O valor de T_L foi obtido pela curva de estado (Fedorova, 1999), a qual foi calculada a partir da superfície (Bluestein, 1993, Vasquez, 1994 e Djuric, 1994). O índice LI é negativo, se $T_L > T_{500}$. Para Vasquez, os valores de $LI < -5$ indicam tempo severo, sendo que, para Djuric (1994), valores $-2 < LI < -6$ são comuns nas regiões com pancadas.

A primeira versão do LI, que foi derivada do índice S, foi obtida quando T_L foi calculada no nível de 850 hPa (Bluestein, 1993, Vasquez, 1994 e Djuric, 1994). O índice S é calculado em função de três parâmetros: a temperatura do ar em 500 hPa, a temperatura do ar em 850 hPa e a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa. A parcela de ar em 850 hPa é levantada até alcançar seu nível de condensação por levantamento e, a seguir, por uma adiabática saturada até alcançar o nível de 500 hPa, onde atinge a temperatura da parcela ascendente (T'_{500}). Assim, o índice S é definido como sendo $S = T_{500} - T'_{500}$. Os valores negativos de S indicam possibilidade de convecção (Bluestein); os valores de $S < -4$ correspondem a tempo severo (Vasquez, 1994). Pela informação de Alcântara (1969) a interpretação de S é a seguinte: quando $+1 < S < +3$, podem ocorrer algumas tempestades na área; se $-2 < S < +1$, existe boa chance de haver trovoadas; $-6 < S < -2$, de ocorrência de tempestades severas, e $S < -6$, de desenvolver tornado.

Utilizando a interpretação dos valores dos índices apresentados acima e os dados sobre precipitação e trovoadas observados no CPPMET, foi estudada a destreza destes índices. Este estudo foi feito separadamente para a precipitação e a trovoadas. Para a interpretação do índice TT foi usada a explicação de Vasquez (1994) para valores menores do que 51, acrescentada à interpretação de Djuric (ver os itens 3.3.2 e 3.3.3).

Também, para todos os perfis verticais, foi calculada a energia potencial de convecção ou energia de instabilidade (CAPE, *convective available potential energy*, Bluestein, 1993, Vasquez, 1994 e Djuric, 1994) pelo método descrito em Fedorova e Khan (1999). A CAPE foi calculada para três camadas (de 1000 hPa até 700 hPa, 700hPa até 500hPa e de 500hPa até 300 hPa) e para toda a troposfera.

3. RESULTADOS

3.1. Frequência das Nuvens Cb e Ns durante as Estações do Ano

Durante a observação das nuvens feita em 1072 dias durante os três anos (devido a problemas técnicos os dados de

alguns dias foram perdidos), nuvens *Cb* e *Ns* foram identificadas em 69 dias, ou seja, em 6,43% dos dias com observação (Tabela 1). Identificaram-se nuvens *Ns* mais freqüentemente em 40 dias (em 3,37% dos dias com observação). Já as nuvens *Cb* foram mais raras, sendo registradas em apenas 16 dias (1,49% dos dias com observação). Estes dois tipos de nuvens juntamente (posteriormente mencionadas como *Ns+Cb*) foram observados em 13 dias (1,21% dos dias com a observação).

As nuvens *Cb*, *Ns* e *Ns+Cb* juntamente foram um pouco mais freqüentes no inverno (29 casos ou 6,57 % dos dias com observação) e no verão (17 casos ou 6,71% dos dias com observação). Na primavera e no outono estas nuvens tiveram uma freqüência menor (11 casos ou 4,08 %, e 12 casos ou 4,87 %, relativamente). O aumento de formação destas nuvens no inverno está associado com o aumento das atividades frontais sobre o Rio Grande do Sul.

A freqüência das nuvens *Ns* foi maior no inverno, quando foram registrados 17 casos, ou seja, estas nuvens foram

observadas em 5,6 % dos dias com observação nesta estação do ano, ou em 42,5% dos dias, considerando todo o período (Tabela 1). As nuvens *Ns+Cb* foram identificadas no inverno em 6 casos (em 1,97% dos dias com a observação), sendo que ocorreram, no verão e na primavera, 3 casos (em 1,18% e 1,11%, respectivamente). Em relação às nuvens *Cb*, a freqüência das mesmas aumentou no verão (5 casos, em 1,97% dos dias com observação) e esta porcentagem foi igual à do inverno (para 6 casos).

3.2. Estrutura do Perfil Vertical de Temperatura e de Umidade e a Energia de Instabilidade nos Dias com Nuvens *Ns* e *Cb*

3.2.1. Perfis Verticais para os Casos com Nuvens *Ns*

Os perfis verticais da análise numérica de temperatura e umidade, construídos para os dias com nuvens *Ns*, foram

Tabela 1 — Quantidade (C é o número de casos, % é a porcentagem relativamente aos dias com dados) dos dias com nuvens *Ns*, *Cb* e *Ns+C*, durante 3 anos. N é o número de dias com dados disponíveis durante cada estação do ano.

Grupos													
Estações	1		2		3		4		5		Total		N
	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	
Ns													
Outono	2	0.81	1	0.40	6	2.43	0	0	-	-	9	3.65	246
Inverno	12	3.94	3	0.98	1	0.32	1	0.32	-	-	17	5.59	304
Primavera	2	0.74	2	0.74	1	0.37	0	0	-	-	5	1.85	269
Verão	0	0	3	1.18	3	1.18	3	1.18	-	-	9	3.55	253
Ano	16	1.49	9	0.83	11	1.02	4	0.37			40	3.73	1072
Cb													
Outono	0	0	1	0.40	1	0.40	0	0	0	0	2	0.81	246
Inverno	3	0.98	0	0	1	0.32	1	0.32	1	0.32	6	1.97	304
Primavera	0	0	0	0	1	0.37	1	0.37	1	0.37	3	1.11	269
Verão	0	0	0	0	1	0.39	4	1.58	1	0.39	7	2.37	253
Ano	3	0.27	1	0.09	4	0.37	6	0.55	3	0.27	17	1.58	1072
Ns e Cb													
Outono	0	0	1	0.40	0	0	-	-	0	0	1	0.40	246
Inverno	1	0.32	3	0.98	0	0	-	-	2	0.65	6	1.97	304
Primavera	1	0.37	0	0	1	0.37	-	-	1	0.37	3	1.11	269
Verão	0	0	0	0	3	1.18	-	-	0	0	3	1.18	253
Ano	2	0.18	4	0.37	4	0.37	-	-	3	0.27	13	1.21	1072
Ns, Cb, Ns e Cb													
Outono	2	0.81	3	1.21	7	2.84	0	0	0	0	12	4.87	246
Inverno	16	5.26	6	1.97	2	0.65	2	0.65	3	0.98	29	6.57	304
Primavera	3	1.11	2	0.74	3	0.11	1	0.37	2	0.74	11	4.08	269
Verão	0	0	3	1.18	7	2.76	7	2.76	1	0.39	18	7.11	253
Ano	21	1.95	14	1.30	19	1.77	10	0.93	6	0.55	70	6.52	1072

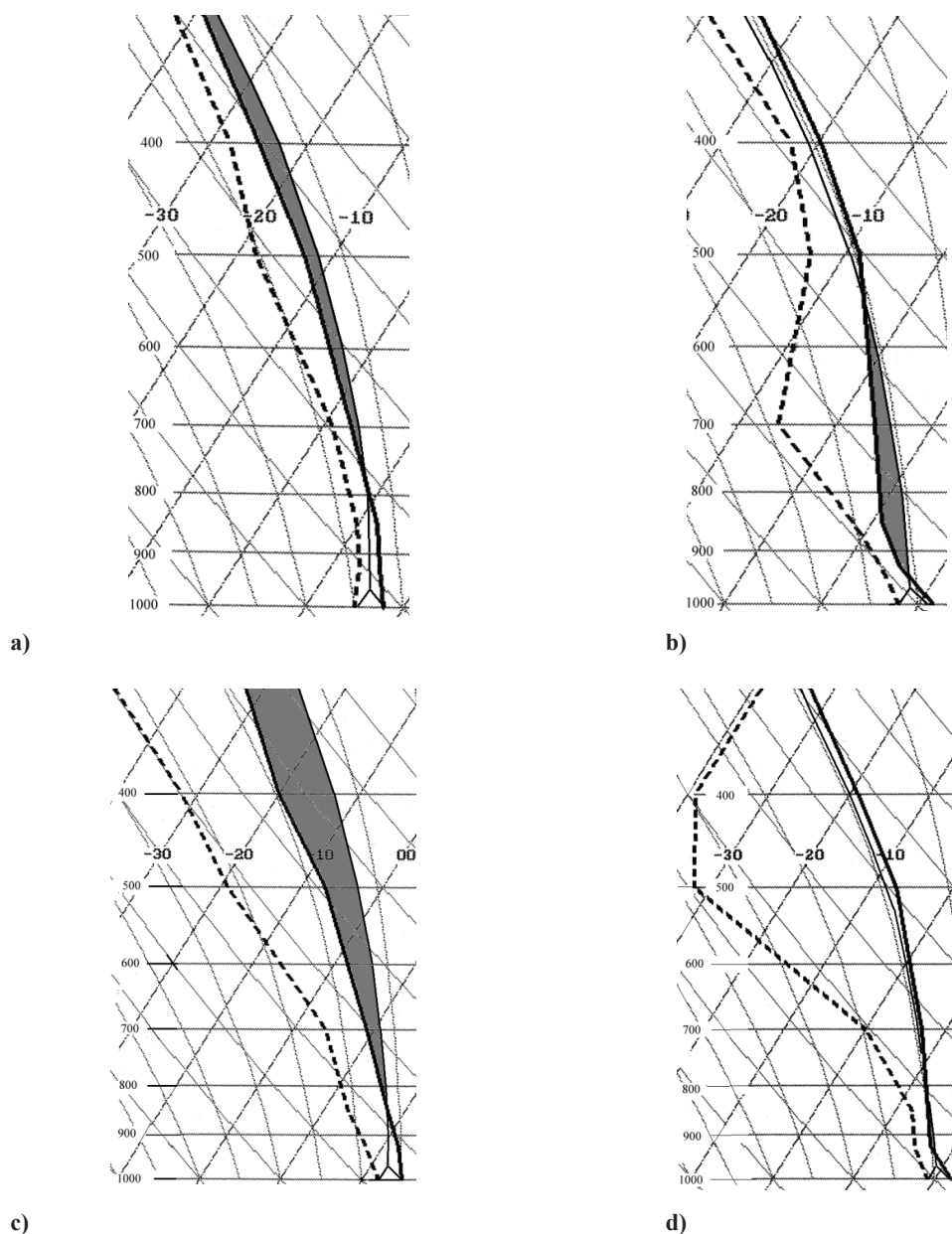


Figura 1 – Os quatro tipos de perfis verticais de temperatura e umidade para dias com nuvens Ns: **a)** tipo I, 7 de agosto de 1999; **b)** tipo II, 18 de março de 1998; **c)** tipo III, 28 de dezembro de 1997; **d)** tipo IV, 2 de fevereiro de 2000. As áreas cinzas mostram CAPE+.

divididos em quatro grupos (Figura 1 e Tabela 2a). As quantidades de casos de cada grupo foram 16, 9, 11 e 4 casos, respectivamente.

Os perfis do *primeiro grupo (I)* apresentam altos valores de umidade ($1^{\circ}\text{C} < T - T_d < 7^{\circ}\text{C}$) em toda a troposfera (Figura 1a). Nestes casos foram observadas nuvens Ns durante o dia. A energia de instabilidade para estes casos não era muito grande e em média foi 244 J/kg. A energia positiva foi registrada em várias camadas: desde baixos até altos níveis (aproximadamente de 800 até 300 hPa, 2 casos), em médios e altos níveis (aproximadamente de 600 até 300 hPa, 5 casos); somente em

baixos níveis (aproximadamente de 960 até 810 hPa, 5 casos) e em quatro dias não foi registrada energia positiva. Os maiores valores de CAPE+, 450-570 J/kg, foram registrados quando as camadas com CAPE+ foram observadas em toda a troposfera. Os menores valores da mesma, de 4 até 25 J/kg, foram obtidos para os casos com CAPE somente em baixos níveis.

Os perfis do *segundo grupo (II)* mostram altos valores de umidade em baixos (até, aproximadamente 900 hPa, $T - T_d < 3^{\circ}\text{C}$) e altos (acima de 400 hPa, $T - T_d < 7^{\circ}\text{C}$) níveis da troposfera (Figura 1b). Em um dos casos, a camada nos baixos

Tabela 2a – Dias com nuvens Ns e precipitações associadas (mm/24h, o símbolo - significa falta de dados observacionais) e trovoadas (T e S são situações com trovoadas e sem este fenômeno, respectivamente); índices de instabilidade S, TT, K, KI e LI (v e i são valor e interpretação, respectivamente), valores de CAPE+ (J/Kg, o símbolo - é sem CAPE+) e os níveis entre os quais a CAPE+ foi registrada nos grupos dos perfis verticais.

A interpretação dos índices de instabilidade é a seguinte: S: (tm) é alguma tempestade na área, (T) é boa chance de trovoadas, (TS) é tempestade severa, TT, K, KI: (a) é aguaceiro, (aT) é aguaceiro com trovoadas, (aTD) é aguaceiro com trovoadas por Dusan, LI: (a) é aguaceiro, (TS) é tempo severo. Sem interpretação é sem fenômenos

Data	S		TT		K		KI		LI		CAPE +	Níveis		Precip itação	Trovoa da
	v	i	v	i	v	i	v	i	v	i		de	até		
Grupo 1															
02/09/97	-1	T	49	aT _D	36	aT	35	a	2		573.8	780	300	4,21	S
13/09/97	6		40		24	a	25		6		-	-	-	-	S
01/10/97	7		37		26	a	25		7		25.5	960	870	32,11	S
04/10/97	5		42		26	a	26		4,9		10.8	960	880	57,89	S
05/10/97	0	T	46	aT _D	35	aT	35	a	2		454.6	800	300	2,63	S
12/11/97	0	T	47	aT _D	36	aT	34	a	1,5		136.7	610	395	51,05	S
26/11/97	1	T	47	aT _D	31	aT	31	a	-1		183.1	650	350	3,16	S
13/04/98	3	T _m	42		30	A	31	a	1		-	-	-	2,11	S
14/05/98	9		34		18		21		6,9		22.3	920	810	57,89	S
01/07/98	1	T	47	aT _D	30	a	32	a	3,5		503.4	630	300	2,11	S
24/07/98	2	T _m	46	aT _D	27	a	30		5		-	-	-	14,2	S
23/08/98	6		39		23		25		9		-	-	-	18,42	S
25/08/98	9		37		17		21		5		25.7	960	870	71,58	S
26/08/98	7	□	38		21		24		6		3.7	930	880	34,21	S
27/06/99	-1	T	□	□	□	□	□	□	□		427.8	630	300	49,47	S
07/08/99	0	T	48	aT _D	33	aT	33	a	3		469.4	750	300	3,68	S
Média	3		43		28		26		4		244	712	462	25,29	
Grupo 2															
03/08/97	10		32		8		9		8,5		-	-	-	11,5	S
28/02/98	6		37		20		25		1,5		37.5	930	720	76,06	S
18/03/98	7		36		18		25		1		170.1	950	560	36,84	S
10/06/98	5		41		23		23		5,5		-	-	-	-	S
19/09/98	11		35		16		19		0		14.1	950	860	18,95	S
24/01/99	1	T	44		27	a	33	a	1		-	-	-	32,11	S
19/07/99	10		37		14		16		8		-	-	-	32,11	S
20/07/99	2	T _m	48	aT _D	22		28		1		-	-	-	4,74	S
15/10/99	2	T _m	45	aT _D	20		20		3		-	-	-	0,0	S
Média	6		39		17		22		3		42	376	256	23,59	S
Grupo 3															
29/10/97	4		41		15		28		6		-	-	-	0,0	S
28/12/97	1	T	45	aT _D	33	aT	33	a	-4	a	1073.5	820	300	0,0	S
01/01/98	10		32		20		23		8,5		-	-	-	41,05	S
10/04/98	11		32		8		9		7		3.6	910	950	-	S
29/04/98	5		45	aT _D	12		21		1,5		-	-	-	2,11	S
15/05/98	3	tm	44		26	a	29		2		25.9	960	800	48,42	S
11/06/98	10		36		16		18		8,5		22.4	930	810	60,0	S
25/03/99	0	T	45	aT _D	34	aT	35	aT	-1	a	315.7	800	340	3,16	S
16/04/99	10		34		17		20		7		22.5	890	805	18,42	S
29/06/99	2	tm	46	aT _D	21		27		2		-	-	-	11,05	S
01/02/00	6		39		25	a	25		0		22.2	950	790	-	S
Média	6		40		21		24				146	682	557	16,74	
Grupo 4															
01/03/98	1	T	45	aT _D	16		33	a	-1		3.6	950	895	8,42	S
17/03/98	7		39		8		22		5		-	-	-	15,79	S
23/07/98	3	tm	46	aT _D	10		26		2		-	-	-	2,63	S
02/02/00	3	tm	40		26	a	31	a	1,5		10.8	940	850	4,74	S
Média	4		42		15		20		2		5	630	582	7,89	

Tabela 2b – Para nuvens Cb (idem Tabela 2a).

Data	S		TT		K		KI		LI		CAPE +	Níveis		Precip itação	Trovoa da
	v	I	v	i	v	i	v	i	v	i		de	até		
Grupo 1															
04/09/97	-3	TS	54	aT	36	aT	36	aT	-3	a	63.3	680	460	7,37	T
06/07/98	-1	T	52	a	33	aT	31	a	0		651.9	750	300	26,8	T
Média	-2		53		34		34		-2		358	715	380	17,08	
Grupo 2															
27/04/98	3	Tm	44		27	a	30		-2	a	726.4	960	300	3,16	S
12/09/98	0	T	49	aT _D	28	a	31	a	-3	a	598.7	760	300	8,42	T
Média	2		46		28		30		-2		662	860	300	5,79	
Grupo 3															
09/06/98	0	T	47	aT _D	31	aT	33	a	-1		282.2	750	300	41,05	S
07/07/98	1	T	50	aT _D	26	a	28		-5	a	785.9	800	300	0,0	S
20/01/99	-1	T	48	aT _D	26	a	34	a	2		1196.1	970	300	15,79	S
05/12/99	9		39	aT _D	19		23		5		22.3	920	810	4,21	S
Média	2		46		26		30		0		572	860	427	15,26	
Grupo 4															
11/12/97	4		44		14		21		-4	a	501.2	920	370	0,0	S
11/01/98	3		46	aT _D	6		31	a	-3	a	651.5	890	300	0,0	S
14/01/98	14		22		21		16		0		-	-	-	5,26	S
22/02/98	8		36		7		21		1		29.8	930	800	0,0	S
24/08/98	3	tm	43		25	a	29		7		-	-	-	107,3	T
21/01/99	2	tm	44		27	a	31	a	-6	a	886.6	920	300	0,0	S
Média	6		39		17		20		-1		414	732	354	18,76	
Grupo 5															
31/08/99	-2	TS	52	a	35	aT	32	a	-4	a	806.8	720	300	27,74	T
13/10/99	-2	TS	50	aT _D	35	aT	38	aT	4		526.5	700	300	9,47	T
03/03/99	3	-	43	-	27	a	28	-	-5	a	1082,2	890	300	5,26	T
Média	-0		48		32		33		-2		805,2	770	300	14,15	

níveis foi mais seca, com T-Td entre 1000 e 900 hPa variando de 5 até 9 °C. Os outros níveis da troposfera em todos os casos foram mais secos e a depressão do ponto de orvalho atingiu valores de 10 °C até 15 °C nos níveis de 700 hPa e/ou de 500 hPa. Os perfis deste grupo caracterizam-se por valores de CAPE+ menores do que os perfis do primeiro grupo (o valor médio de CAPE+ era 42 J/kg). Somente um perfil apresentou CAPE+ com valor 170 J/kg, em baixos e médios níveis (de 950 hPa até 560 hPa). O outro perfil tinha esta energia nos níveis de 930 hPa até 720 hPa e o valor era muito pequeno, 38 J/kg; um perfil tinha CAPE+ somente em baixos níveis. Os perfis deste grupo caracterizam-se por uma camada mais instável em baixos níveis (o gradiente vertical de temperatura foi igual ou um pouco maior do que o gradiente vertical de temperatura para os processos adiabáticos secos) do que nos outros grupos.

Os perfis do *terceiro grupo (III)*, comparados com o segundo, foram mais secos (10 °C < T-Td < 15 °C) em médios e altos níveis da troposfera. Em 5 casos, os pequenos valores de CAPE+, os quais não ultrapassaram 26 J/kg, foram registrados

entre, aproximadamente, 950 e 800 hPa. Em 4 casos, não foi identificada CAPE+. Em dois casos os valores de CAPE+ foram observados em toda troposfera acima de 820 hPa; em um deles os valores de CAPE+ foram grandes e atingiram o valor de 1073 J/kg (Figura 1c). Em todos os casos deste grupo as nuvens *Ns* foram observadas ou na parte da manhã ou da noite.

No *quarto grupo (IV)* foram incluídos quatro perfis, porque em médios e/ou altos níveis o ar estava muito seco (20 °C < T-Td < 35 °C). Todavia, em baixos níveis até aproximadamente, 850 hPa, o ar encontrava-se úmido, com T-Td < 3 °C. A CAPE+ entre 950 e 850 hPa apresentou valores pequenos, até 11 J/kg (2 casos). Nos outros dois casos, o valor de CAPE+ não foi determinado. As chuvas foram registradas na parte da manhã, ou à noite, ou em curtos períodos durante o dia.

3.2.2 Perfis Verticais para os Casos com Nuvens Cb

Para os dias em que foram observadas nuvens *Cb*, foi registrada uma grande variedade de distribuições verticais de

Tabela 2c – Para Ns+Cb (idem Tabela 2a).

Data	S		TT		K		KI		LI		CAPE +	Níveis		Precip itação	Trovoa da
	v	i	v	I	v	i	v	i	v	i		de	até		
Grupo 1															
16/08/97	-6	TS	56	aT	44	AT	44	aT	-3	a	1768.5	855	300	43,68	T
14/10/97	3	tm	42		30	a	30	a	7		83.7	600	370	31,6	S
Média	-2		49		37		37		2		926	728	335	37,64	
Grupo 2															
07/09/97	5		43		23		16		-2	a	481.3	610	300	44,21	T
25/05/98	-3	TS	53	aT	34	AT	36	aT	-4	a	563.5	700	300	2,11	S
30/06/98	-2	TS	51	a	33	aT	37	aT	-2	a	543.7	780	300	14,74	S
28/06/99	-1	T	50	aT _D	30	A	35	aT	-3	a	370.6	650	300	15,79	T
Média	-0		49		30		31		-3		490	685	300	19,21	
Grupo 3															
28/10/97	-3	TS	51	a	34	AT	39	aT	9		705.6	780	300	20,53	T
27/12/97	-1	T	45	aT _D	34	AT	37	aT	-3	a	1073.5	680	300	22,63	T
05/01/98	-1	T	49	aT _D	36	AT	38	aT	-1		96.4	705	460	23,68	T
06/01/98	0	T	47	aT _D	36	AT	36	aT	-5	a	912.1	800	300	36,84	T
Média	-1		48		35		38		0		697	741	340	25,92	
Grupo 5															
19/08/97	-2	T	50	aT _D	36	aT	35	a	3		573.6	690	300	0,0	T
17/07/98	-1	T	52	a	35	aT	31	a	1		830.6	760	300	35,26	T
26/11/99	1	T	48		31	aT	28		-4	a	860.8	800	300	0,0	S
Média	-1		50		34		31		0		755	750	300	11,75	

umidade do ar. Foi possível agrupar no máximo seis dias com perfis semelhantes. Todavia, foram achados quatro tipos de perfis parecidos com os grupos descritos para as nuvens Ns e um perfil diferente (grupo V).

Foram encontrados dois casos parecidos com os do grupo I para as nuvens Ns, ou seja, com umidade alta em toda a troposfera (Figura 2a). Nestes dois casos, durante o dia foram observadas nuvens altas (Cc, Cs) e médias (Ac) e no fim da tarde e no começo da noite, foram desenvolvidos Cb. A CAPE+ ocorreu em níveis médios e altos (acima de 680 e 750 hPa) com valor máximo (652 J/kg) maior do que para o grupo I de Ns.

Em dois casos os perfis para os dias com Cb foram parecidos (pela distribuição de umidade) com os do grupo II de Ns (Figura 2b), mas a CAPE+ ocorreu quase em toda a troposfera (um caso de 960 hPa e outro de 760 hPa) e o valor máximo da CAPE+ foi maior do que para as nuvens Ns e atingiu o valor de 726 J/kg.

Em quatro casos de Cb, os perfis com uma camada úmida somente foram semelhantes aos do grupo III de Ns em baixos níveis. A diferença em relação ao último é o valor e a altura da distribuição vertical de CAPE+, a qual foi registrada em três casos em toda a troposfera e em um caso somente em baixos níveis.

Os valores de CAPE+ foram um pouco maiores do que para os casos com Ns. Nos três casos incluídos neste grupo, as nuvens Cb foram desenvolvidas à noite. No dia 20 de janeiro de 1999 (Figura 2c), o valor da CAPE+ atingiu o valor de 1196 J/kg; neste dia à tarde foram registradas fortes pancadas de chuva e granizo.

Os perfis semelhantes ao do grupo IV de Ns, também estavam associados com Cb (6 casos). Uma diferença entre o perfil do grupo IV para Cb e Ns é a umidade em baixos níveis. No caso de Cb nesta camada o ar estava um pouco mais seco: em geral, T-Td era menor do que 5 °C (comparado com T-Td < 3 °C para Ns) e em dois dias o ar úmido existia somente próximo à superfície. Em dois casos, não foi registrada CAPE+; em um deles, foi pequena e não ultrapassou o valor de 30 J/kg. Em três casos, a CAPE+ foi grande, maior do que 500 J/kg e ocorreu em quase toda a troposfera. Em um destes casos, no dia 11 de janeiro de 1998 (Figura 2d), a CAPE+ com valor de 652 J/kg apresentou valor acima de 890 hPa. Neste dia de manhã foram observados *Cumulus humilis* (Cu hum), os quais desenvolveram-se até *Cumulus mediocris* (Cu med) às 16 horas (hora local) e às 18 horas até Cb com pancadas de chuvas. O valor máximo de CAPE+ para este grupo de Cb atingiu 887 J/kg e foi registrado acima de 920 hPa.

O grupo V e último (3 casos) para *Cb* apresentou semelhança com o terceiro grupo, ou seja, com ar bastante seco ($7^{\circ}\text{C} < T - T_d < 15^{\circ}\text{C}$) em médios e altos níveis da troposfera. A diferença principal com o grupo III é que, nestes casos, em baixos níveis o ar não estava úmido com $5^{\circ}\text{C} < T - T_d < 10^{\circ}\text{C}$ (Figura 2e). Além disso, o desenvolvimento de instabilidade do ar nestes casos foi observado, tanto à superfície, quanto em níveis mais altos, desde 850 hPa e 910 hPa. Nestas situações foi observada CAPE+, aproximadamente, desde 700 hPa até acima de 300 hPa, cujo valor atingiu 1082 J/kg. Resultados parecidos foram obtidos no trabalho de Fedorova e Khan (1999) para um caso de CCM,

onde o valor máximo de energia de instabilidade positiva foi 1040 J/kg e esta energia foi observada desde o nível de 700 hPa.

3.2.3. Perfis Verticais para os Casos com Nuvens *Ns* juntamente com *Cb*

Para os dias em que nuvens *Ns* foram observadas juntamente com *Cb*, foram identificados quase os mesmos grupos de perfil vertical de temperatura e umidade como para *Cb*, e os primeiros quatro grupos para *Ns*. A única diferença

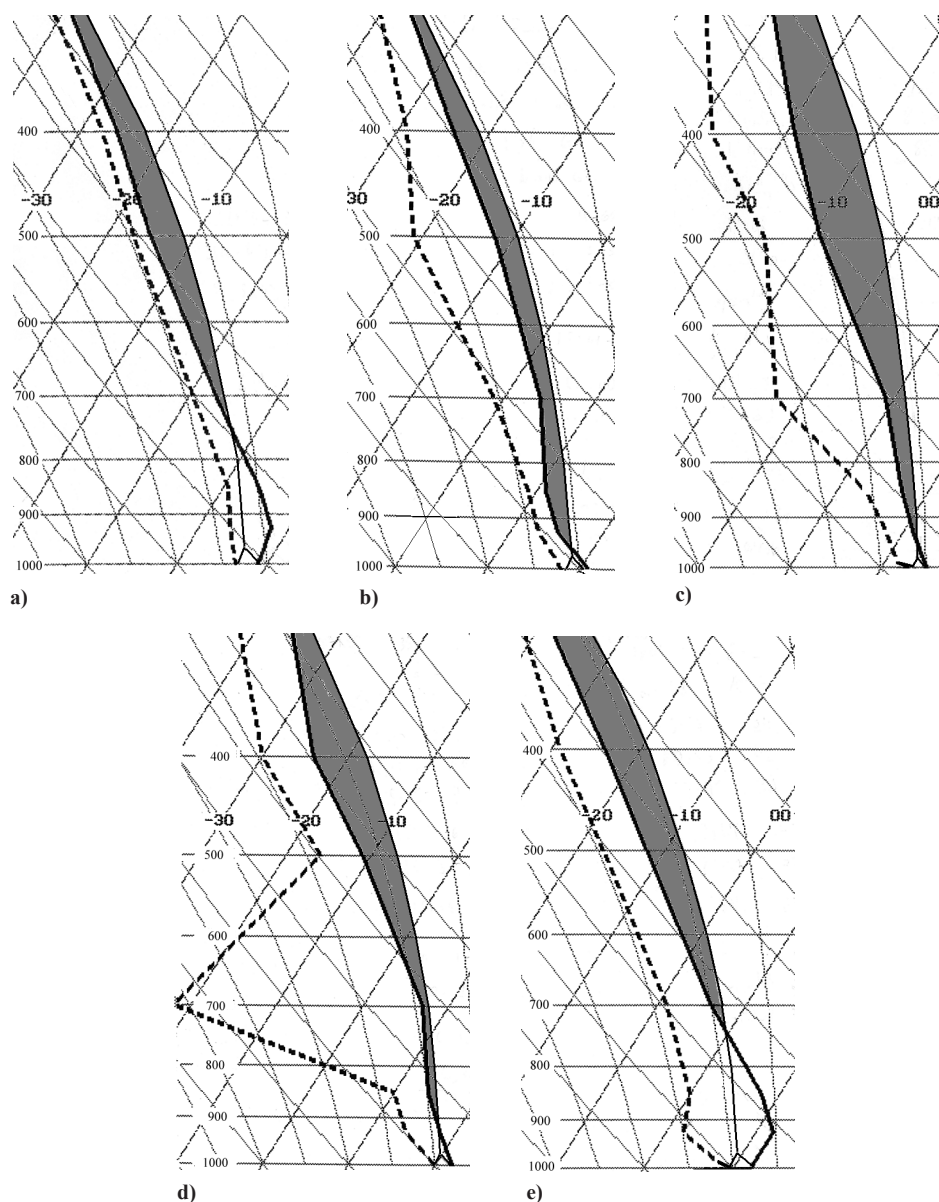


Figura 2 – Os cinco tipos de perfis verticais de temperatura e umidade para dias com nuvens *Cb*: a) tipo I, 4 de setembro de 1997; b) tipo II, 27 de abril de 1998; c) tipo III, 20 de janeiro de 1999; d) tipo IV, 11 de janeiro de 1998; e) tipo V, 31 de agosto de 1999. As áreas cinzas mostram CAPE+.

é que para $Ns+Cb$ não foram encontrados casos semelhantes ao grupo IV das nuvens Cb e Ns . Para fazer-se a comparação entre os grupos de perfis de Ns , Cb e $Ns+Cb$, o grupo IV não foi usado para $Ns+Cb$.

Para o grupo I de $Ns+Cb$ (2 casos), o valor máximo de $CAPE+$ foi maior do que para o mesmo grupo de cada uma destas nuvens separadamente. Este valor atingiu 1768 J/kg no dia 16 de agosto de 1997 e foi registrado acima do nível de 860 hPa (Figura 3a).

Foram encontrados quatro casos com perfil semelhante ao grupo II, o qual foi descrito anteriormente para Ns e Cb .

Para este grupo de nuvens $Ns+Cb$, a base da área com $CAPE+$ estava mais alta (entre 610 e 780 hPa) do que para estas nuvens separadamente (Figura 3b). Os valores de $CAPE+$ variaram um pouco entre 371 e 564 J/kg; sendo maiores do que para Ns e menores do que para Cb .

Em quatro casos os perfis foram parecidos com o do grupo III, o qual foi descrito anteriormente para Ns e Cb . A base da área com $CAPE+$ encontrava-se, como para o grupo II, mais alta (em média a 741 hPa) do que para estas nuvens separadamente (Figura 3c). Os valores de $CAPE+$ em média foram maiores do que para Cb separadamente, e um pouco

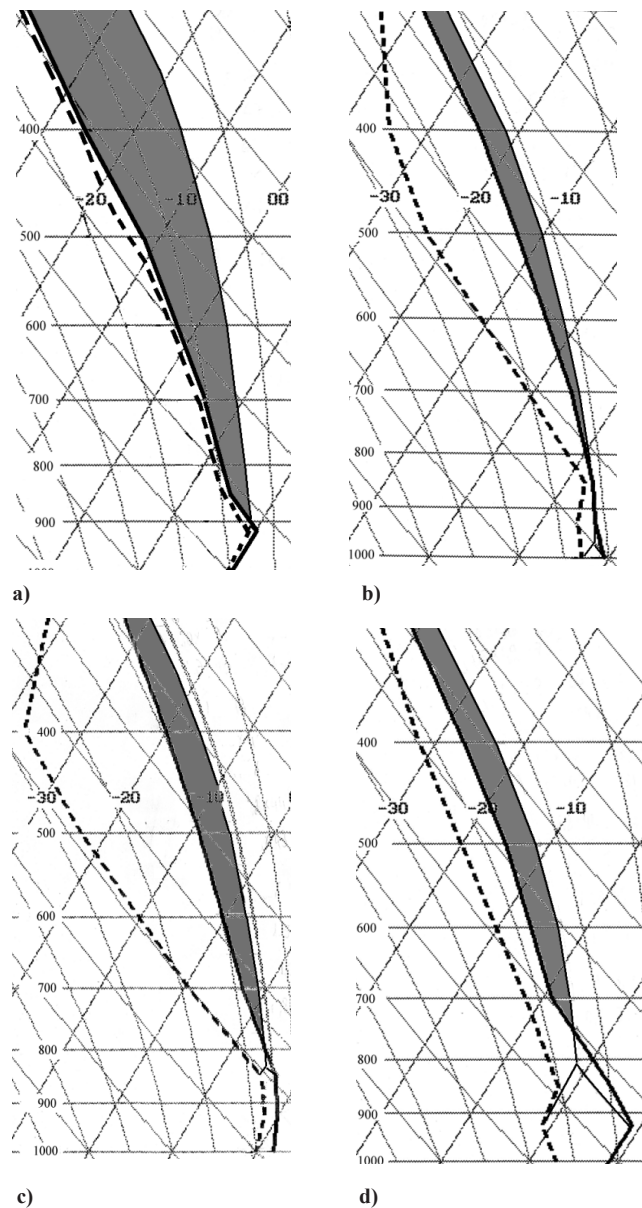


Figura 3 – Os quatro tipos de perfis verticais de temperatura e umidade para dias com nuvens Ns e Cb juntamente: a) tipo I, 16 de agosto de 1997; b) tipo II, 30 de junho de 1998; c) tipo III, 28 de outubro de 1997; d) tipo V, 17 de julho de 1998. As áreas cinzas mostram $CAPE+$.

maiores do que para o mesmo grupo de *Ns*. Mas os valores máximos de CAPE+ no terceiro grupo para *Ns*, *Cb* e para estas nuvens juntamente foram quase iguais, aproximadamente 1070 J/kg.

No grupo V (3 casos), o desenvolvimento de instabilidade foi observado a partir do topo da camada superficial seca e, em dois casos, do topo da camada superficial com isoterma (Figura 3d). O valor da CAPE+ e a altura da base da área com CAPE+ foram, aproximadamente, iguais aos dos casos com *Cb*.

3.2.4. Energia de Instabilidade em Três Camadas em Dias com Nuvens *Ns* e *Cb*

Para as nuvens *Ns*, os valores médios de CAPE+ calculados entre os níveis de 1000 hPa até 700 hPa, de 700 hPa até 500hPa e de 500 hPa até 300 hPa foram de 12 J/kg, 27 J/kg e 75 J/kg, respectivamente. Para as nuvens *Cb* os valores de CAPE+ para os mesmos níveis foram maiores: 41 J/kg, 161 J/kg e 321 J/kg, respectivamente. Os valores de CAPE+ nas nuvens *Ns+Cb* atingiram os valores máximos 211 J/kg e 487 J/kg nas camadas entre 700 hPa e 500hPa, e de 500 hPa até 300 hPa, respectivamente, comparando-se com os valores obtidos para situações com estas nuvens separadamente. O valor de CAPE+ em baixos níveis (41 J/kg) foi maior para *Cb* do que para *Ns* e *Ns+Cb*.

3.2.5. Frequência dos Grupos de Nuvens *Ns* e *Cb*

Em geral para as nuvens analisadas foi obtido que o perfil do grupo I predominou no inverno (16 casos, 5,26%) e do grupo 4 no verão (7 casos, 2,76%). Vale destacar que as porcentagens citadas são em relação aos dias com dados observacionais para a respectiva estação do ano.

Para as nuvens *Ns* é necessário salientar a predominância no inverno do perfil do grupo I (12 casos, 3,94%). Para as nuvens *Cb* foi mais freqüente no verão o perfil do grupo IV. Os outros perfis foram observados regularmente durante o ano.

3.3. Análise dos Índices de Instabilidade nos Dias com Nuvens *Cb* e *Ns* e os Fenômenos Associados

3.3.1. Precipitações e Trovoadas Associadas com as Nuvens *Ns* e *Cb* em Pelotas

Os valores médios das precipitações associadas com as nuvens *Ns* e *Ns+Cb* foram quase iguais, 21 e 22 mm/24 h, respectivamente (Tabela 2). Para os *Cb*'s este valor foi menor, 16 mm/24 h. Todavia, o valor máximo (107 mm/24 h) das precipitações foi associado com as nuvens *Cb*.

Para as nuvens *Ns* os maiores valores médios das precipitações foram encontrados para os grupos I e II (25 e 24 mm/24 h, respectivamente) e os menores (8 mm/24 h) para o grupo IV. Para as nuvens *Ns+Cb* os perfis do primeiro grupo foram associados com valores maiores de precipitações, os quais, na média, foram 38 mm/24 h. As variações dos valores médios das precipitações entre os grupos de nuvens *Cb* foram menores (de 15 até 19 mm/24 h) do que para *Ns* e *Ns+Cb*.

Em todos os dias com nuvens *Ns*, não foram registradas trovoadas (Tabela 2). Também, dias sem trovoada ocorreram freqüentemente, com *Cb* dos grupos III e IV. Todavia, as nuvens *Cb* dos grupos I e V e as nuvens *Ns+Cb* dos grupos III e V, sempre foram associadas com trovoadas.

3.3.2. Índices de Instabilidade nos Dias com Nuvens *Cb* e *Ns* e Precipitações Associadas

O índice *S* apresentou bons resultados nos dias com *Cb* e *Ns+Cb*, com acerto de interpretação em 81,2% e 84,6% dos dias com estes tipos de nuvens. A mesma porcentagem para as nuvens *Ns* foi não alta, somente 55,6%. É preciso ressaltar que nos grupos I, II e V para *Cb* e I e III para *Ns+Cb* foram acertados todos os casos, embora a quantidade de dias tenha sido pequena (de 2 a 4 casos).

O índice *LI* nos dias com *Ns* e *Cb* não indicou a ocorrência de pancadas ou tempo severo em quase todos os casos (em 94,7% e em 68,8%, respectivamente). Esta porcentagem foi melhor para as nuvens *Ns+Cb* e o acerto foi 61,5%. Todavia, para todos os casos dos grupos II das nuvens *Cb* e *Ns+Cb*, este índice apresentou pancadas, as quais foram observadas na realidade.

O índice *K* para *Cb* e *Ns+Cb* identificou melhor as pancadas do que o índice *LI*, mas apresentou resultados piores do que o índice *S*. A porcentagem do acerto pelo índice *K* para estas nuvens foi 75,0 e 76,9%, respectivamente. Pelo mesmo índice, é impossível identificar as precipitações associadas com as nuvens *Ns*, porque foram acertadas somente em 47,2%. Todos os casos de acerto ocorreram em os mesmos grupos, os quais foram citados para o índice *S* (no primeiro parágrafo do 3.3).

O índice *K* apresentou uma porcentagem de acerto muito baixa (38,9%) para as nuvens *Ns*; sendo que para as nuvens *Cb* e *Ns+Cb* este acerto foi melhor (62,5 e 69,2%, respectivamente), mas também baixo. Para os grupos I e V (para *Cb*) e I e III (para *Ns+Cb*) o índice de acerto foi total.

O índice *TT* apresentou uma porcentagem de acerto muito baixa (5,6%, 37,5% e 53,8% para as nuvens *Ns*, *Cb* e *Ns+Cb*, respectivamente), quando foram usados os critérios somente de Vasquez (1994). Acrescentando os critérios de Djuric (1994), esta porcentagem aumentou até 36,1%, 37,5 e 69,2% para as mesmas nuvens, respectivamente.

Tabela 3 – Valores da energia de instabilidade positiva (J/Kg) calculados entre os níveis de 1000 hPa até 700 hPa, de 700 hPa até 500hPa e de 500 hPa até 300 hPa para os dias com nuvens Ns, Cb e Ns+Cb. M é a Média para todos os casos

Ns			Cb			Ns+Cb					
Data	1000 - 700	700 - 500	500 - 300	Data	1000 - 700	700 - 500	500 - 300	Data	1000 - 700	700 - 500	500 - 300
Grupo 1											
02/09/97	11.7	117.2	444.9	04/09/97	-	54.5	8.8	16/08/97	96.5	522.1	1500.2
13/09/97	-	-	-	06/07/98	11.7	213.4	426.8	14/10/97	-	34.1	49.6
01/10/97	25.5	-	-								
04/10/97	10.8	-	-								
05/10/97	7.8	92.1	354.7								
12/11/97	22.3	46.8	89.9								
26/11/97	-	46.5	136.6								
13/04/98	-	-	-								
14/05/98	22.3	-	-								
01/07/98	-	67.7	435.7								
24/07/98	-	-	-								
23/08/98	-	-	-								
25/08/98	25.7	-	-								
26/08/98	3.7	-	-								
27/06/99	-	88.9	338.9								
07/08/99	7.8	130	331.6								
Média	7.20	36.82	133.26	Média	5.85	133.95	217.8	Média	48.25	278.1	774.9
Grupo 2											
03/08/97	-	-	-	27/04/98	117.4	195.5	413.5	07/09/97	-	106.3	375
28/02/98	37.5	-	-	12/09/98	7.8	204.8	386.1	25/05/98	-	243.1	320.4
18/03/98	121.6	48.5	-					30/06/98	7.8	159.3	376.6
10/06/98	-	-	-					28/06/99	-	94.8	275.8
19/09/98	14.1	-	-								
24/01/99	-	-	-								
19/07/99	-	-	-								
20/07/99	-	-	-								
15/10/99	-	-	-								
Média	19.24	5.38	-	Média	62.6	200.15	399.8	Média	1.95	150.87	336.95
Grupo 3											
29/10/97	-	-	-	09/06/98	3.9	108.3	170	28/10/97	31.2	262.9	411.5
28/12/97	42.6	262.8	768.1	07/07/98	23.3	276.4	486.2	27/12/97	42.6	262.8	768.1
01/01/98	-	-	-	20/01/99	160.3	357.9	677.9	05/01/98	-	87.6	8.8
10/04/98	3.6	-	-	05/12/99	22.3	-	-	06/01/98	42.6	241.9	627.6
29/04/98	-	-	-								
15/05/98	25.9	-	-								
11/06/98	22.4	-	-								
25/03/99	35	165.6	115.1								
16/04/99	22.5	-	-								
29/06/99	-	-	-								
01/02/00	22.2	-	-								
Média	15.83	38.94	80.29	Média	52.45	185.65	333.52	Média	29.1	213.8	454
Grupo 4											
01/03/98	3.6	-	-	11/12/97	76	255.1	170.1				
17/03/98	-	-	-	11/01/98	22.9	168	460.6				
23/07/98	-	-	-	14/01/98	-	-	-				
02/02/00	3.6	-	-	22/02/98	29.8	-	-				

3.3.3 Índices de Instabilidade nos Dias com Nuvens Ns e Cb e Trovoadas Associadas

Os dados da Tabela 4 mostram a porcentagem de indicação de trovoadas por vários índices de instabilidade. A melhor indicação de trovoada nas nuvens *Cb* foi feita pelo índice *K* (em 81,2%), e em segundo lugar pelos índices *S* e *KI* (em 75%). Nas nuvens *Ns+Cb* a melhor porcentagem (69,2%) foi obtida utilizando os três índices, ou seja, *S* e *TT* (com a interpretação de Djuric, 1994), e a segunda melhor porcentagem foi conseguida com o índice *K* (61,5%). Nas nuvens *Ns* não foram observados relâmpagos (como foi descrito no 3.3.1) e os índices *KI*, *LI* e *TT* (com a interpretação por Vasquez, 1994) não mostraram o desenvolvimento de *Ns* em todos os casos.

A interpretação da trovoada nas nuvens *Cb* estava absolutamente certa nos casos em que o perfil vertical tinha os tipos I, II e V, e a interpretação foi feita pelos índices *S*, *K* (excluindo o tipo II) e *TT* (exclusivamente com a interpretação de Djuric). As trovoadas associadas com o perfil do tipo III das nuvens *Cb*, foram indicadas de forma absolutamente certa, utilizando os índices *LI*, *KI* e *TT* (exclusivamente com a interpretação de Vasquez).

A identificação de trovoada nas nuvens *Ns+Cb* foi feita absolutamente certa, quando os perfis tinham o tipo I (utilizando os índices *S*, *K* e *TT*, tanto por Dusan, quanto por Vasquez) e III (utilizando os índices de *K*, *KI*, *LI* e *TT*, exclusivamente com a interpretação de Djuric).

3.4. Estrutura da troposfera pelos dados de radiossondagem nos dias com nuvens Ns e Cb em Porto Alegre

As nuvens *Ns* foram registradas em Porto Alegre no horário da radiossondagem de dois dias (6/01/1998 e 19/09/1998). Também, às 0000 UTC do dia 6/01/1998, ou seja, antes do horário da radiossondagem foi registrada a existência de *Cb na região*. Neste dia, o perfil foi parecido com o do terceiro grupo (item 3.2.1); havia valores altos (1607 J/kg) de CAPE+, a qual

foi observada em toda a troposfera acima de 800 hPa (Tabela 3). É importante acentuar que nos baixos níveis, até 910 hPa, a troposfera estava muito estável com camadas de inversão de temperatura e de isotermia. Além disso, o ar úmido ($1 < T-Td < 2^\circ\text{C}$) encontrava-se somente na camada superficial até 980 hPa; acima desta camada até 855 hPa a depressão *T-Td* estava entre 3 e 5 °C. Esta estrutura de perfil nos baixos níveis era parecida com o grupo V das nuvens *Cb* e *Ns+Cb* (itens 3.2.2 e 3.2.3). O segundo perfil das nuvens *Ns* na hora da radiossondagem foi semelhante ao do segundo grupo (item 3.2.1), com um valor pequeno de CAPE+ (7,5 J/kg) em baixos níveis. Os perfis verticais dos outros casos, quando as nuvens *Ns* foram observadas às 1800 UTC foram parecidos com o do grupo IV (item 3.2.1).

As nuvens *Cb* foram registradas na hora da radiossondagem somente em um caso, no dia 17/07/1998. O perfil para este dia foi semelhante em baixos níveis e em altos níveis com o do grupo V; em médios níveis a troposfera estava muito úmida, com *T-Td* igual a 1 °C. Todavia, os valores de CAPE+ eram pequenos e eles foram registrados somente em baixos níveis (Tabela 3). Em cinco casos as nuvens *Cb* foram observadas às 0000 UTC e/ou às 1800 UTC. Os perfis para estes casos foram semelhantes ao do grupo IV. Os valores de CAPE+ foram registrados, aproximadamente, acima de 800 hPa com valores de 560 até 1190 J/kg. Em um dia com nuvens *Cb* às 1800 UTC, toda a atmosfera estava muito seca ($10 < T-Td < 30^\circ\text{C}$) e instável (a curva de temperatura quase em toda a troposfera era paralela à adiabática seca); não foi encontrada CAPE+. Este caso foi semelhante ao descrito em Fedorova et al. (2000) para um caso com desenvolvimento de nuvens *Cb* com trovoada, mas sem precipitações.

4. CONCLUSÃO

A média da energia de instabilidade positiva observada atingiu os maiores valores (619 J/Kg) para os dias com nuvens *Ns+Cb*. Nos dias em que havia somente *Cb* este valor foi menor (551 J/Kg). A menor instabilidade (90 J/Kg) foi registrada nos dias com *Ns*.

Tabela 4 –Porcentagem (%) do acerto da identificação de precipitações e de trovoada, associadas com as nuvens *Ns*, *Cb* e *Ns+Cb*, utilizando os índices de instabilidade *S*, *TTD*, *TTV*, *K*, *KI* e *LI*.

nuvens	S	TT _D	TT _V	K	KI	LI
Precipitação						
<i>Ns</i>	55,6	36,1	5,6	47,2	38,9	5,6
<i>Cb</i>	81,2	37,5	37,5	75,0	62,5	31,2
<i>Ns+Cb</i>	84,6	69,2	53,8	76,9	69,2	61,5
Trovoada						
<i>Ns</i>	69,4	61,1	100,0	75,0	100,0	100,0
<i>Cb</i>	75,0	68,8	68,8	81,2	75,0	62,5
<i>Ns+Cb</i>	69,2	69,2	30,8	61,5	53,8	30,8

Nas nuvens *Ns*, a energia de instabilidade positiva foi observada em toda a troposfera em 15% dos casos e somente em baixos níveis em 35% dos casos. Para as nuvens *Cb* as porcentagens foram de 69% e 12% para estes mesmos níveis. Nas nuvens *Ns+Cb*, a energia esteve presente em toda a troposfera em 54%, e não foi registrado nenhum caso com CAPE+, somente em baixos níveis.

Os menores valores médios para a energia de instabilidade positiva em todas as camadas foi registrada para as nuvens *Ns* (11 J/kg, 27 J/kg e 75 J/kg nas camadas de 1000 até 700 hPa, de 700 hPa até 500hPa e de 500 hPa até 300 hPa, respectivamente). Já para as nuvens *Cb* os valores encontrados foram maiores, principalmente em médios e altos níveis (41 J/kg, 161 J/kg e 321 J/kg). Para as nuvens *Ns+Cb*, os valores foram ainda maiores, para estes mesmos níveis (21 J/kg, 211 J/kg e 487 J/kg, respectivamente). Observou-se que na camada de 500 hPa até 300 hPa, obteve-se uma maior quantidade de energia de instabilidade positiva.

Nos casos com desenvolvimento de *Ns*, a energia de instabilidade positiva máxima foi de 1073 J/kg; para os casos de *Cb* esta energia aumentou até 1196 J/kg; para as situações destes dois tipos de nuvens juntamente ela atingiu o valor de 1768 J/kg.

Os perfis verticais sempre estiveram associados com trovoadas, quando o desenvolvimento de instabilidade foi observado acima da camada seca e estabilidade em baixos níveis (grupos V para as nuvens *Cb* e nuvens *Ns+Cb*). Além disso, as trovoadas acompanharam as nuvens *Cb* no ar úmido em toda a troposfera (grupo I para as nuvens *Cb*) e no ar muito úmido somente em baixos níveis (grupo III para as nuvens *Ns+Cb*).

Nos dias com *Cb* e *Ns*, os perfis verticais simulados para a cidade de Pelotas foram parecidos com os perfis construídos com os dados de radiossondagem para Porto Alegre, para os dias com os mesmos tipos de nuvens.

A maior porcentagem de acerto na interpretação dos valores dos índices de instabilidade (K, KI, TT, LI e S) foi para o índice S nos casos das nuvens *Cb* e *Ns+Cb*. Para as nuvens *Ns* nenhum índice mostrou valores bastante altos para se recomendar que ele seja utilizado na prática. Todavia, a maioria dos índices acertou todos os casos dos grupos I, II e V para *Cb* e I e III para *Ns+Cb* (embora a quantidade de dias tenha sido pequena).

Para a previsão de trovoadas nas nuvens *Cb* e *Ns+Cb*, é melhor utilizar os índices K e S e, nas nuvens *Cb*, também o índice KI e nas nuvens *Ns+Cb* o índice TT_D.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento deste trabalho no Centro de Pesquisas Meteorológicas da Universidade Federal de Pelotas.

6. BIBLIOGRAFIA

- ALCÂNTARA, F. *Manual de análise do Diagrama "Skew-T, log P"*. Ministério da Aeronáutica, Diretoria de Rotas Aéreas. 122 p. 1969.
- BLUESTEIN, H. B. *Observations and theory of weather systems*. In: _Synoptic - dynamic meteorology in midlatitudes. Oxford: Oxford University Press, 1993, v. 2, 595p.
- CORRÊA, C. S. *Estudo micrometeorológico da Camada Limite Planetária Estável na Região de Porto Alegre*. Porto Alegre, 1997. Dissertação (mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 61 p.
- DJURIC, D. *Weather Analysis*. Upper Saddle River: Prentice Hall, - 1994, 304 p.
- FEDOROVA, N. *Meteorologia Sinótica. Volume I*, Pelotas: Ed. Universitária/ UFPel, 1999, 259 p.
- FEDOROVA, N., KHAN, V. M., Análise de complexo convectivo de mesoescala sobre o sul do Brasil. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 14, n. 1, p. 35 - 48, 1999.
- FEDOROVA, N., CARVALHO, M.H., BARBIERI, P. R. B., GONÇALVES, A. M., ALVES, E. P., SIGNORINI, E., PINHEIRO, G. M. C., MARQUES, J. R. Q., OLIVEIRA, V. M., ALMEIDA, A. J. Um estudo do desenvolvimento das nuvens *Ns* e *Cb* em Pelotas. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro., *Anais...* em CD.
- GOULART, J. P. Distribuição espacial de chuvas intensas na região de Pelotas, RS. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 7, n. 1, p. 553 - 562, 1992.
- KOUSKY, V. E., CAVALCANTI, I. F. A. Eventos Oscilação do Sul-El Niño: Características, evolução e anomalias de precipitação. *Ciência e Cultura*, 36 (11), 1888-1899, 1984.
- NEWTON, C. W. Severe Convective Storms. *Advances in Geophysics*, v.12, p. 257 - 303, 1967.
- RAO, V. B., HADA, K. Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.* 42. 81-91, 1990.
- SANSIGOLO, C. A., DINIZ, G. B., SALDANHA, R. L. Influência dos eventos El Niño e La Niña no regime de precipitação de Pelotas, RS. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 15, n. 1, p. 69 - 75, 2000.
- SCOFIELD, R. A. Instability bursts associated with extratropical cyclone systems (ECSs) and a forecast index of 3 - 12 hour Heavy Precipitation. *NOAA Technical Memorandum NESDIS 30*. Washington, D.C, July 1990.
- SILVA, J. B., AMARAL E. Probabilidades das precipitações pluviométricas em Pelotas, RS. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 2, p. 167 - 177, 1987.
- UCCELLINI, L. W., JOHNSON, D.R. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. *Mon. Wea. Rev.*, 107, p. 682 - 703, 1979.
- VASQUEZ, T. *Weather Forecasting Handbook*. Garland: Weather Graphics Technologies, 1994, 98 p.