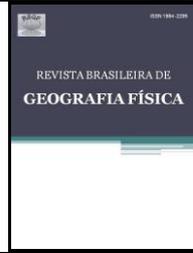




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Mudanças na Estrutura Termodinâmica da Atmosfera na Presença de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis: Um Episódio de Precipitação Extrema no Semiárido Brasileiro

Magaly de Fatima Correia¹, Weber Andrade Gonçalves², Maria Regina da Silva Aragão³,
Maryfrance de Cassia S. Diniz⁴

¹Professora. Doutora; Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, E-mail: magaly@dca.ufcg.edu.br; ²Doutorando do Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE. ³Pesquisadora do Instituto de Gestão das Águas e Clima; Salvador – BA

Artigo recebido em 09/10/2012 e aceito em 19/10/2012

RESUMO

A natureza da relação entre a energia potencial convectiva (CAPE), índice de instabilidade K e altas taxas de precipitação sob a influência de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) é investigada. Dados de radiossondas realizadas em Petrolina - PE foram utilizados para diagnosticar mudanças na estrutura termodinâmica da atmosfera. Totais diários de precipitação coletados na estação meteorológica de superfície permitiram avaliar a eficiência da utilização dos índices K e CAPE na determinação do grau de instabilidade da atmosfera e previsão de chuvas extremas. A relação entre valores elevados de CAPE e registros de precipitação é evidente no período de estudo. Entretanto, a existência de valores elevados desse índice não implica necessariamente na ocorrência de chuva. As chuvas abundantes e enchentes registradas na região de Petrolina no mês de janeiro de 2004 resultaram da ação conjunta de sistemas atmosféricos de escala local e sinótica. Mecanismos dinâmicos associados com VCAN foram determinantes para liberação ou supressão da atividade convectiva.

Palavras - chave: eventos extremos de precipitação, vórtices ciclônicos de altos níveis, convecção, CAPE_{MAX}.

Changes in the Atmospheric Thermodynamic Structure in the Presence of Upper Level Cyclonic Vortices: An Episode of Extreme Precipitation in the Brazilian Semiarid

ABSTRACT

The nature of the relationship between convective potential energy (CAPE), the instability index K and high rainfall rates under the influence of upper level cyclonic vortices is investigated. Upper air sounding data collected in Petrolina – PE, Brazil, were used to diagnose changes in the thermodynamic structure of the atmosphere. Daily precipitation totals observed at the surface meteorological station allowed evaluation of the K and CAPE efficiency in the determination of the degree of atmospheric instability and prediction of extreme rainfall. The relationship between high CAPE values and precipitation is evident in the period of study. However, high CAPE values may not lead to rainfall. The large rainfall totals and flooding registered in the Petrolina region were a result of the combined action of local and synoptic scale atmospheric systems. Dynamical mechanisms associated with VCAN played a major role in the enhancement or inhibition of convective activity.

Keywords: extreme precipitation events, upper level cyclonic vortices, convection, CAPE_{MAX}

1. Introdução

A chuva na região Nordeste do Brasil é predominantemente de natureza convectiva e a ocorrência de episódios extremos está

associada com o desenvolvimento da convecção profunda. Estudos sobre sistemas precipitantes no semiárido brasileiro comprovam que as condições termodinâmicas locais têm influência na atividade convectiva da região, porém também evidenciam o forte

* E-mail para correspondência: magaly@dca.ufcg.edu.br (Correia, M. F.).

controle de mecanismos atmosféricos de grande escala (Correia, 1989, Silva Aragão et al., 2000, Barbosa e Correia, 2005). Em condições favoráveis, o aquecimento e umedecimento da camada limite atmosférica são fatores fundamentais na formação e evolução de sistemas convectivos intensos.

Vórtices ciclônicos de altos níveis são exemplos de sistemas atmosféricos transientes em escala sinótica que influenciam substancialmente a atividade convectiva local. A formação e desenvolvimento de sistemas convectivos em mesoescala (SCM) alteram as condições de tempo na escala que varia de horas a algumas semanas (Loureiro et al., 2006; Barbosa e Correia, 2005; Silva Dias, 1987).

Os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) se destacam entre os principais sistemas atmosféricos produtores de chuva na região Nordeste. O campo de precipitação associado a este sistema é caracterizado pela coexistência de nuvens do tipo convectivo e estratiforme (Correia, 1989; Silva Aragão et al., 2007; Silva Aragão et al., 2000). A organização da atividade convectiva e intensificação dos SCM observadas em condições atmosféricas sob a influência do VCAN mostram grande variabilidade na distribuição espacial das chuvas. Dependendo do posicionamento geográfico o VCAN pode causar chuvas fortes em muitas localidades e simultaneamente reduzir a nebulosidade e precipitação nas áreas sob a influência da subsidência no centro do sistema.

Eventos significativos de chuva associados com SCM também tem sido foco de atenção de diversas investigações científicas (Ramos, 1975; Silva Aragão et al., 2000; Diniz, et al., 2004; Barbosa e Correia, 2005). Na maioria destes trabalhos os autores analisaram processos atmosféricos que influenciam na formação e desenvolvimento dos SCM. Os resultados evidenciam a influência de fatores em diferentes escalas na evolução destes sistemas.

Barbosa e Correia, (2005), investigaram a natureza de SCM responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações no semiárido brasileiro. Episódios extremos no período chuvoso da região e um evento incomum de intensa atividade convectiva registrado no mês de junho de 1985 foram analisados. Os resultados mostram que a convergência do fluxo de umidade em grande escala nos baixos níveis é fundamental para a ocorrência da convecção profunda.

A relação entre parâmetros termodinâmicos em mesoescala e taxas máximas de precipitação foi analisada por vários autores (Zawadzki e Ro, 1978 e Zawadzki et al., 1981). Os resultados mostram que existe uma alta correlação entre a energia potencial convectiva disponível (CAPE) e taxas elevadas de precipitação num período de 24 horas. Entretanto, verificaram também a existência de dias com valores altos de CAPE sem ocorrência de precipitação convectiva indicando que a forçante dinâmica exerce um controle bem maior na formação e

manutenção dos sistemas convectivos.

Nos meses de janeiro e fevereiro de 2004, chuvas fortes, observadas nos Estados de Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, provocaram o transbordamento de vários açudes na região do Submédio São Francisco e formaram uma onda de cheia na calha principal do rio. De acordo com Diniz et. al., 2011, o fenômeno foi predominantemente observado no trecho entre a cidade de Belém do São Francisco e a foz no Oceano atlântico. O aumento significativo da atividade convectiva e ocorrência de chuvas intensas no período foram atribuídos a atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) e da zona de convergência intertropical (ZCIT). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar alterações na estrutura termodinâmica da atmosfera na presença de VCAN e avaliar o grau de relação entre chuvas extremas e a energia convectiva da parcela em superfície.

2. Material e Métodos

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo foram utilizados totais diários e mensais de chuva provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA); disponível em <http://www.ana.gov.br>; registros médios diários de precipitação do campo experimental de Bebedouro, pertencente a Embrapa Semiárido e disponível em <http://www.cpatsa.embrapa.br>; dados de sondagens realizadas as 12 UTC em Petrolina - PE para analisar a estrutura termodinâmica e

grau de instabilidade da atmosfera no período de episódios extremos de precipitação; perfis verticais da temperatura do ar e do ponto de orvalho: disponível em <http://www.cptec.inpe.br>; e imagens do satélite GOES; disponíveis em <http://www.cptec.inpe.br/products/temp>, para o mês em estudo.

Os totais diários de chuva coletados na Estação Meteorológica de Petrolina (9,38°S;40,4°W), do INMET, foram utilizados na avaliação da intensidade dos eventos. Campos de temperatura de brilho, obtidos através do satélite GOES foram usados para determinar áreas de convecção ativa.

Os dados de sondagens realizadas em Petrolina - PE foram usados para avaliar modificações na estrutura termodinâmica da atmosfera. Na avaliação do grau de instabilidade foi utilizada a energia potencial convectiva disponível (CAPE) e o índice de instabilidade K.

Os índices de instabilidade podem ser obtidos graficamente usando diagramas termodinâmicos ou por meio de equações específicas que permitem resultados mais precisos. Neste trabalho os valores foram obtidos usando os dois métodos.

O Índice K indica o grau de instabilidade atmosférica com base na análise conjunta do gradiente de temperatura entre os níveis de 850 e 500 hPa e do teor de umidade abaixo de 700 hPa. Têm-se valores mais altos em situações de grande teor de umidade nos

baixos níveis da atmosfera e taxa de variação vertical de temperatura instável (Benetti e Silva Dias, 1986). O índice K foi obtido por meio da equação:

$$IK = (T_{850} - T_{500}) + [T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})] \quad (1)$$

em que,

T_{850} é a temperatura do ar em 850 hPa (°C); T_{500} é a temperatura do ar em 500 hPa (°C); T_{d850} é a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa (°C); T_{700} é a temperatura do ar em 700 hPa (°C); e T_{d700} é a temperatura do ponto de orvalho em 700 hPa (°C).

O CAPE representa uma medida da energia disponível para convecção e quando usado em conjunto com parâmetros dinâmicos como o cisalhamento do vento permite determinar a natureza dos sistemas precipitantes resultantes da atividade convectiva. As análises a partir do CAPE foram feitas utilizando duas formas de determinação do parâmetro:

Inicialmente utilizou-se a metodologia desenvolvida por Zawadzki e Ro, (1978) e modificada por Correia, (1989), para obter a energia máxima da parcela em superfície denominada de $CAPE_{MAX}$. Os valores foram obtidos com base na equação (2).

$$CAPE_{MAX} = \int_{NE}^{NCL} (T_{VP} - T_{VA}) R_d \ln P \quad (2)$$

em que, NE é o nível de equilíbrio ($T_{va} = T_{vp}$); NCL é o nível de convecção por levantamento; $T_{va} = (T + 0,61q)$ é a temperatura virtual do ambiente (°C); $T_{vp} = (T_p + 0,61q)$ é a temperatura virtual da parcela (°C); T é temperatura do ambiente (°C); T_p é

temperatura da parcela (°C); q é a umidade específica do ar; R_d é a constante dos gases para o ar seco e P é a pressão atmosférica (Pa).

A temperatura da parcela foi obtida utilizando-se o diagrama termodinâmico a partir do valor mais alto da temperatura potencial do bulbo úmido (θ_{wmax}), com base nos dados de superfície. A relação linear entre CAPE e temperatura do bulbo úmido foi comprovada por vários autores (Zawadzki and Ro, 1978; Williams et al, 1992; Williams & Renno, 1993; Petersen et al, 1996).

Os dados de ar superior também foram utilizados na obtenção de variáveis termodinâmicas essenciais na avaliação estratificação vertical do vapor d'água. A temperatura potencial equivalente (θ_e) foi calculada segundo as equações propostas por Bolton (1980) apresentadas abaixo:

$$\theta_e = \theta \times \exp \left[\left(\frac{3,376}{T_L} - 0,00254 \right) \times r (1 + 0,81 \times 10^{-3} \times r) \right] \quad (3)$$

em que, θ é a temperatura potencial, r é a razão de mistura em (g/kg) e T_L é a temperatura em (k) do nível de condensação por levantamento, dadas por:

$$\theta = T \left(\frac{P}{1000} \right)^{0,287} \quad (4)$$

$$r = \frac{0,622 \times e}{(p - e)} \quad (5)$$

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_K} - \ln \left(\frac{UR/100}{2840} \right)} + 55 \quad (6)$$

$$e = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (7)$$

$$e_s(T) = 6,11 \times \exp \left[\frac{(17,67)T}{T + 243,5} \right] \quad (8)$$

em que, $T_k = T + 273,15$ é a temperatura absoluta (K), T é a temperatura do ar (C), P é a pressão atmosférica (hPa), UR é a umidade relativa do ar (%), “ e ” a pressão do vapor (hPa), e_s é a pressão de vapor de saturação (hPa) e r_s é a razão de mistura de saturação (g/Kg).

Em uma segunda etapa, com o objetivo de comprovar a eficiência da utilização do $CAPE_{MAX}$ na avaliação do grau de instabilidade atmosférica e sua associação com eventos extremos de chuva. Valores de CAPE e perfis termodinâmicos disponíveis no site do CPTEC foram também utilizados na análise da estrutura termodinâmica da atmosfera.

Com base na metodologia usada por Betts, (1974) e Cohen e Frank, (1989), a estabilidade atmosférica é mais bem representada mediante a análise da estratificação vertical da umidade. Neste sentido para de entender melhor as condições

atmosféricas extremas observadas na área de Petrolina, seções verticais da razão de mistura, temperatura potencial equivalente e das anomalias de r (g/kg) e de θ_e (°K) foram construídas.

3. Resultados e Discussão

A variabilidade temporal da precipitação no mês de janeiro em Petrolina - PE no período de 1961 a 2010 é apresentada na Figura 1. Observa-se que o total mensal de 427,4 mm em 2004 corresponde ao maior valor registrado em 49 anos de observação. Neste mês foram diagnosticados oito episódios de vórtices ciclônicos nos oceanos Atlântico e Pacífico.

Normalmente em períodos de atuação de VCAN no Nordeste brasileiro, verifica-se atividade convectiva intensa em parte da região sob a influência do sistema e áreas com pouca ou nenhuma nebulosidade.

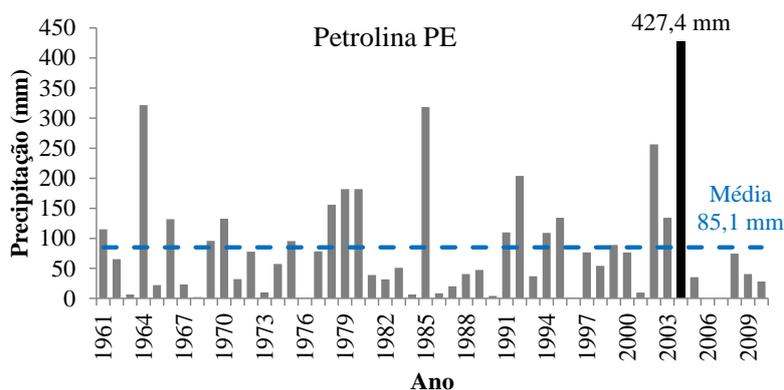


Figura 1. Evolução temporal da precipitação observada no mês de janeiro na Estação Meteorológica de Petrolina - PE. A precipitação média no período para p mês de janeiro é indicada pela linha tracejada.

As chuvas entre os dias 01 e 03 de janeiro de 2004 (primeiro episódio de VCAN)

ocorreram predominantemente no sul do Piauí e no noroeste da Bahia, em função do

posicionamento do vórtice. A área de Petrolina - PE/Juazeiro - BA, região foco deste estudo, esteve sob a influência do centro do vórtice. O efeito da subsidência nesta região é evidente pela ausência de nuvens na maior parte do Nordeste como pode ser visto na imagem apresentada na Figura 2a. A

mudança provocada pela influência do vórtice posicionado no Oceano Atlântico e da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) é visível na intensificação da atividade convectiva e aumento da nebulosidade, principalmente a partir do dia 10 de janeiro de 2004 (Figuras 2c e 2d).

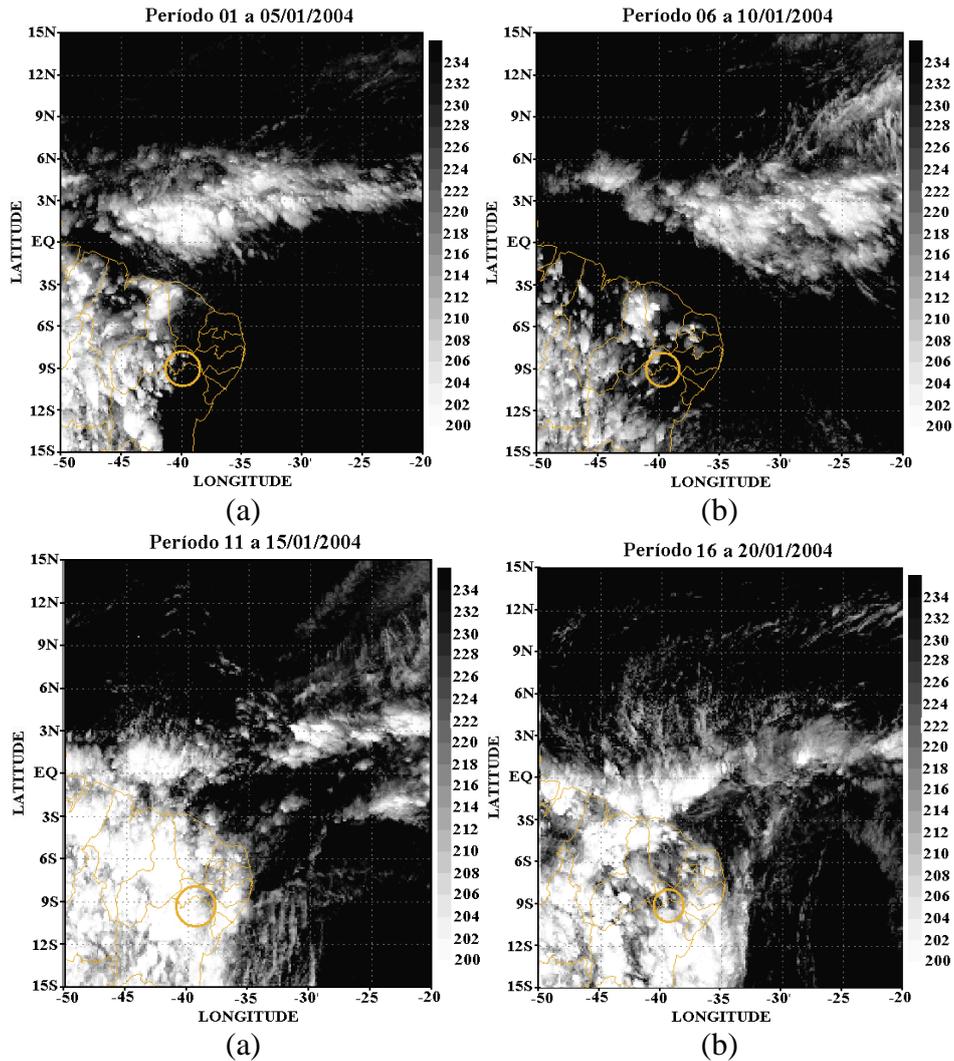


Figura 2. Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de janeiro de 2004 em parte da região Nordeste do Brasil, com destaque para a área de Petrolina – PE/ Juazeiro - BA. Fonte: CPTEC (www.cptec.inpe.br/products/temp_brilho)

Desenvolvimento de convecção profunda requer transporte de umidade numa camada relativamente extensa. Para avaliar o comportamento da estratificação vertical do vapor e sua relação com a atividade

convectiva, desvios da razão de mistura com relação à média para cada nível de pressão (anomalias) são apresentados na Figura 3b.

Valores de anomalias negativas da ordem de 3,5 g/kg observadas entre os dias 04

e 10 contrastam com anomalias positivas significativas concentradas na média troposfera entre os dias 11 e 21 de janeiro. O

período de anomalias negativas coincide com os poucos dias sem registro de chuva na área de Petrolina.

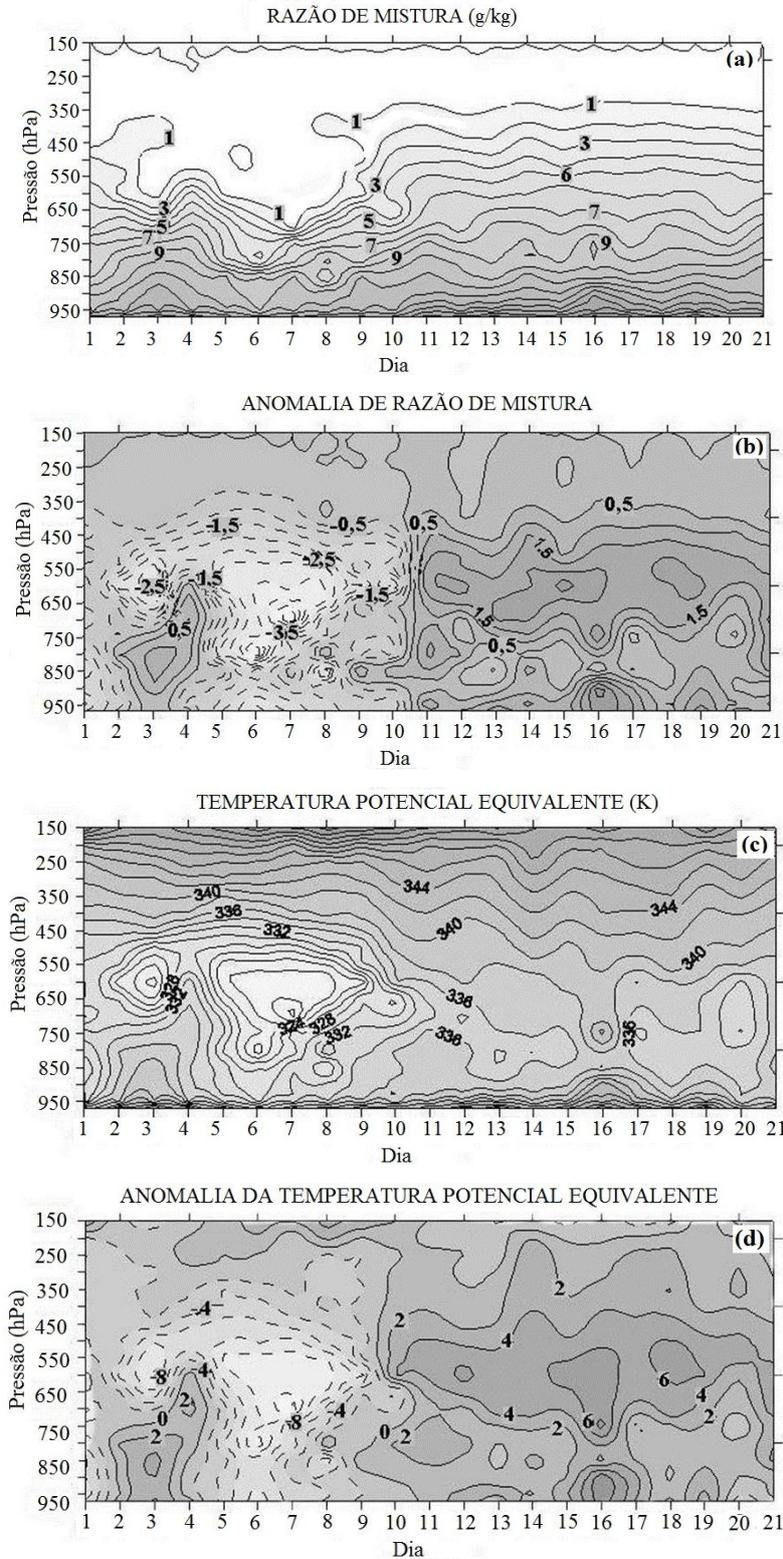


Figura 3. Perfis verticais: da razão de mistura r (g/kg) (a), da anomalia de r em relação aos níveis de pressão (b); da temperatura potencial equivalente (θ_e) (c), e da anomalia de (θ_e) (d).

Os perfis verticais das temperaturas do ar (T) e do ponto de orvalho (Td) para os dias 06 e 07 de janeiro de 2004 obtidos de

sondagens realizadas em Petrolina as 12 UTC são apresentados nas Figuras 4a e 4b.

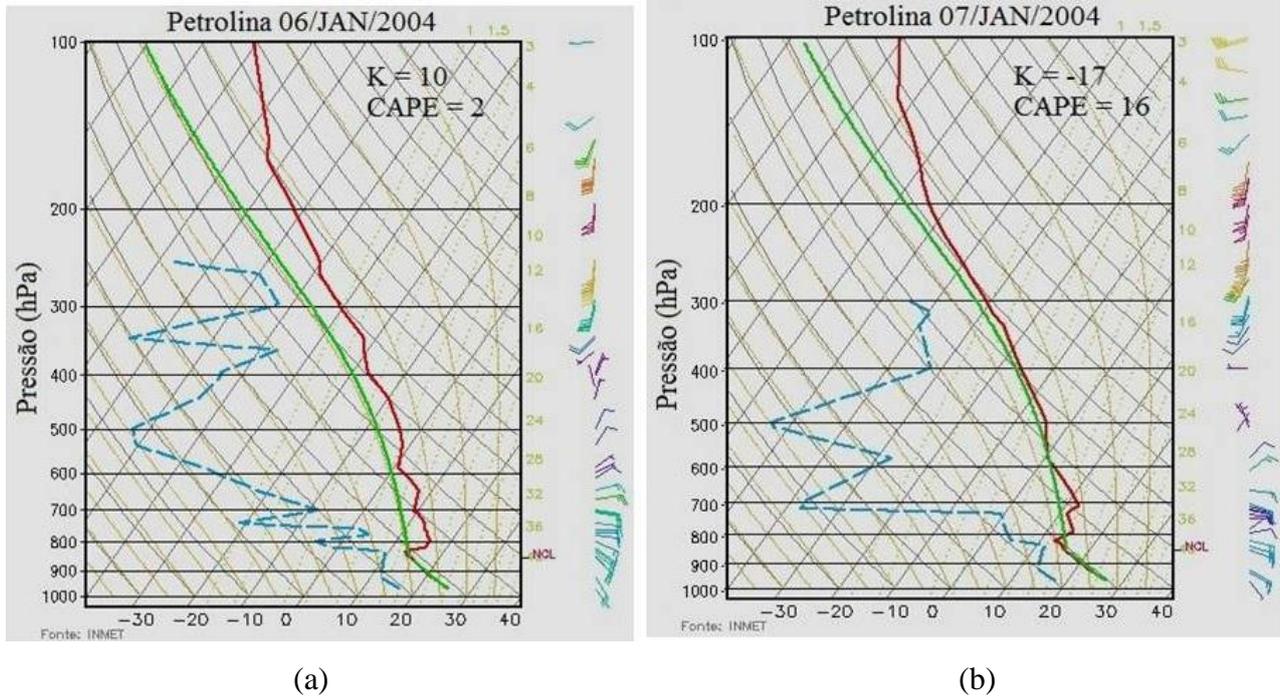


Figura 4. Perfis verticais das temperaturas do ar (linha contínua vermelha), temperatura do ponto de orvalho (linha tracejada de cor azul) e trajetória da parcela (linha contínua verde) para os dias 06 de janeiro de 2004 (a) e 07 de janeiro de 2004 (b) as 12 UTC. Fonte: CPTEC (www.cptec.inpe.br).

Observa-se, nos dois casos, a existência de uma camada com forte inversão de subsidência caracterizada pelo afastamento brusco das curvas de T (linha vermelha) e Td (linha azul) no nível de aproximadamente 800 hPa (base da inversão). Sob o ponto de vista físico este afastamento indica uma forte secagem na atmosfera provocada pelo transporte de ar relativamente mais seco de níveis mais altos da atmosfera em direção à superfície. No processo de subsidência, o ar é aquecido por compressão justificando o aumento da temperatura com a altura dentro da camada. Valores de CAPE extremamente

baixos de aproximadamente 2 J/kg e 16 J/kg nos dias 6 e 7 de abril, respectivamente, indicam que a atmosfera é desfavorável ao desenvolvimento de SCM e precipitação. Valores do índice K iguais a 10 e -17 observados nos dias 6 e 7 de abril de 2004 (abaixo de 20) indicam pouca probabilidade de chuva.

No período de chuvas mais intensas entre os dias 10 e 21 de janeiro, anomalias positivas significativas da razão de mistura são verificadas na média troposfera (Figura 3b). Entre os dias 15 e 17 valores da ordem 2g/kg são observados entre a superfície e o nível de

350 hPa. O aumento no teor de umidade da atmosfera pode ser atribuído a advecção de ar úmido ou transportes convectivos.

A evolução temporal da anomalia de θ_e é apresentada na Figura 3d. As mudanças abruptas observadas em intervalos curtos (de um dia para o outro) nos leva a presumir que, a secagem (umedecimento) da atmosfera em Petrolina, observada (o) no período analisado é resultante da ação conjunta da subsidência (convecção) e advecção de ar seco (ar úmido).

No dia 03 de janeiro, primeiro episódio de VCAN, a temperatura potencial equivalente, atinge 338°K no nível de 850 hPa (Figura 3c) indicando um aumento de aproximadamente 10°K em relação ao dia 01 de abril de 2004 cujo valor é de 328 °K. Em superfície os valores de θ_e variam de 341 °K no dia 01 para 351 °K no dia 3 de abril de 2004. Este resultado indica um aumento no teor de vapor na atmosfera. A formação de um núcleo com anomalias positivas da razão de mistura é evidente na Figura 3b. Por outro lado, a redução da temperatura potencial equivalente com a altura caracteriza uma atmosfera convectivamente instável no período. No entanto, no dia 07 de janeiro a distribuição vertical da razão de mistura mostra um forte decréscimo no teor de umidade nos níveis médios da atmosfera (Figura 3a). Este comportamento é coerente com a distribuição vertical da temperatura potencial equivalente (θ_e) que também indica uma redução de aproximadamente 10°K

(Figura 3c). Comportamento inverso é observado em torno do dia 16 de janeiro.

Valores elevados de anomalias positivas da razão de mistura (3 J/kg) e da temperatura potencial equivalente (10 °K entre a superfície e 900 hPa) são observados nas Figuras 3b e 3d.

Perfis verticais das temperaturas do ar (T) e do ponto de orvalho (Td) para os dias 15 e 16 de janeiro de 2004 obtidos de sondagens realizadas em Petrolina as 12 UTC são apresentados nas Figuras 5a e 5b. Em ambos os casos o nível de condensação por levantamento está abaixo de 900 hPa, indicando um alto teor de umidade próximo da superfície. No dia 16, o nível de 700 hPa marca a base de uma camada de inversão térmica intensa na qual há uma acentuada redução na umidade atmosférica (Figura 5b). Embora esse tipo de inversão térmica seja mais frequentemente observado nos períodos secos da região, em que o anticiclone subtropical do Atlântico Sul domina a área de Petrolina (Silva, et. al., 2008) movimentos verticais convectivos intensos associados a condições atmosféricas sob a influência do VCAN justificam esse comportamento.

A sobreposição das curvas de T e Td ($T = Td$) na camada entre a superfície e a base da inversão indica uma atmosfera praticamente saturada. O valor do CAPE acima de 1000 J/kg as 12 UTC é um indicativo da possibilidade de liberação da instabilidade convectiva e ocorrência de precipitação.

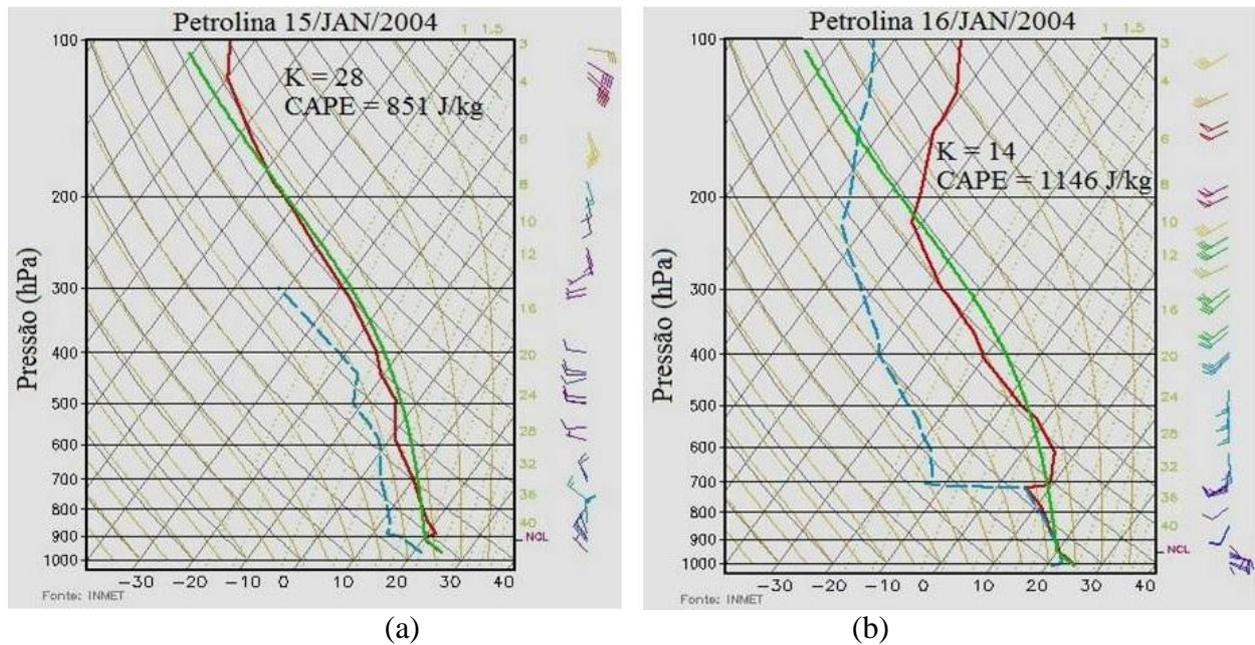


Figura 5. Perfis verticais das temperaturas do ar (linha contínua vermelha), temperatura do ponto de orvalho (linha tracejada de cor azul) e trajetória da parcela (linha contínua verde) para os dias 15 de janeiro de 2004 (a) e 16 de janeiro de 2004 (b) as 12 UTC. Fonte: CPTEC (www.cptec.inpe.br).

A evolução temporal diária do $CAPE_{MAX}$, do índice K e do total máximo diário de precipitação no período entre 1 e 21

de janeiro de 2004 é mostrada na Figura 6. Falhas nos dados de ar superior impediram a análise entre os dias 22 e 30 de janeiro.

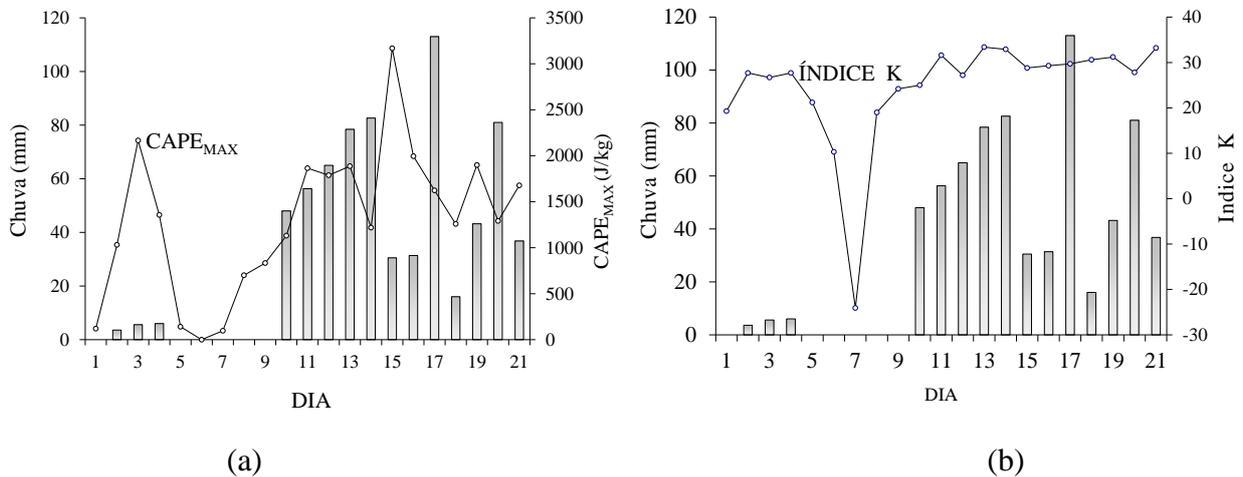


Figura 6. Variação diária do total máximo de precipitação (a e b); da $CAPE_{MAX}$ (a) e do índice de instabilidade K (b).

A relação positiva entre os índices de instabilidade $CAPE_{MAX}$ e K e o máximo diário de chuva é evidente. Observa-se ocorrência de precipitação sempre que o valor

da $CAPE_{MAX}$ é superior a 1000J/kg. Na maioria dos casos, totais diários de chuva superiores a 50 mm estiveram associados com valores altos de $CAPE_{MAX}$. No período de 11

a 14 de abril de 2004 foram registradas precipitações totais diários que variaram de 53,6 mm a 82,6 mm. O menor valor do $CAPE_{MAX}$ (1218 J/kg) foi observado no dia 14. No dia 11 de abril de 2004 o $CAPE_{MAX}$ atingiu o valor de 1865 J/kg).

A variabilidade diária observada nos parâmetros analisados indica que processos dinâmicos de escala sinótica foram fundamentais para liberação da instabilidade convectiva nos eventos de chuva máxima. Os resultados mostram que a estrutura termodinâmica da atmosfera muda substancialmente em condições atmosféricas sob a influência dos vórtices.

É importante ressaltar que os valores obtidos para $CAPE_{MAX}$, dependem da temperatura potencial do bulbo úmido (θ_w) e que a variabilidade de θ_w tem uma componente aleatória já que valores extremos dessa variável podem ocorrer varias vezes durante o dia (para mesma ou em outras estações de superfície). Essa variabilidade é refletida nas energias das parcelas.

A relação entre os valores do $CAPE_{MAX}$, temperatura potencial equivalente em superfície e dias com valores máximos de chuva indica que apesar do forte controle da grande escala, fatores locais têm influência na formação e organização dos sistemas convectivos e conseqüentemente na distribuição e intensidade da chuva.

4. Conclusões

Mudanças na estrutura termodinâmica

da atmosfera sob a influência de vórtices ciclônicos de altos níveis e ocorrência de episódios extremos de chuva foram avaliadas neste trabalho. Os parâmetros analisados incluíram CAPE (energia potencial convectiva da parcela em superfície), $CAPE_{MAX}$ (energia potencial convectiva máxima da parcela em superfície), temperatura potencial equivalente, índice K e razão de mistura.

A relação entre valores elevados de CAPE ou do $CAPE_{MAX}$ em dias com registros de precipitação é evidente no período analisado. Entretanto, verificou-se que apenas o registro de valores elevados destes parâmetros não implica necessariamente na ocorrência de chuva.

Mecanismos dinâmicos associados com a atuação dos VCAN foram determinantes para liberação ou supressão da atividade convectiva, e conseqüentemente no desenvolvimento ou inibição de sistemas precipitantes.

As chuvas abundantes e formação e enchentes registradas na região de Petrolina no mês de janeiro de 2004 resultou da ação conjunta de sistemas atmosféricos locais e de escala sinótica.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária pela cessão dos dados meteorológicos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro (Processos Números 504189/2003-4; 480266/2004-2).

6. Referências

- Barbosa, T. F.; Correia, M. F. (2005). Sistemas Convectivos Intensos no Semiárido Brasileiro: O Controle da Grande Escala. *Rev. Brasileira de Meteorologia*, v.19, n.3, 273-285.
- Benetti, C. A.; Dias, M. A. F. S. (1986). Análise da performance dos índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4 Brasília, out. 1986. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Meteorologia. v.2, p. 65-70.
- Betts, A. K. (1974). Thermodynamic classification of tropical convective soundings. *Monthly Weather Review*. 102, 760-764.
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, V., 108, pp.1046-1053.
- Cohen, C.; Frank, W. M. (1989). A Numerical Study of Lapse-rate Adjustments in the Tropical Atmosphere. *Monthly Weather Review*, 117, 1889-1903.
- Correia, M. F. (1989). Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semiárido brasileiro: O evento de 1985. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, USP São Paulo.
- Diniz, M. C. S., Correia, M. F., Melo, E. C. S., Farias, Gomes, W. R.; Silva Aragão, M. R. S. (2011). Episódios de Cheias na Região Semiárida da Bacia do Rio São Francisco em Abril de 1985: Um estudo das escalas dominantes e condições atmosféricas associadas. *Engenharia Ambiental (Online)*. , v.8, p.277 – 298.
- Diniz, M. C. S.; Correia, M. F.; Silva Aragão, M. R. (2004). Convecção profunda no submédio do Rio São Francisco: uma avaliação das condições atmosféricas na área do aeroporto de Petrolina – PE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.19, n.3, 273-285.
- Loureiro, R. S., Gomes, R. G., Rocha, E. J. P. (2006). Análise de uma linha de instabilidade costeira na região leste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, 258-27.
- Petersen, W. A., Rutledge, S. A., Orville, R. E. (1996). Cloud to-ground lightning observation from TOGA COARE: Selected results and lightning location algorithms. *Monthly Weather Review*, 124, 602-620.
- Silva Aragão, M. R.; Damião, M. C.; Cavalcanti, I. F, Correia, M. F. (2007). Observational study of a rainy January day in the Northeast Brazil semi-arid region: synoptic and mesoscale characteristics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.133, p.1127 – 1141.
- Silva Aragão, M. R., Correia, M. F.; Araújo,

- H. A. (2000). Characteristic of C-Band Meteorological Radar Echoes at Petrolina, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v.20, p. 279-298.
- Silva Dias, M. A. F. (1987). Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo em Curto Prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, V. 2. p. 133-150.
- Silva, F. D. dos Santos, Correia, M F, Silva Aragão, M. R. S., Silva, Mota, J. (2008). Convecção Linearmente Organizada na Área de Petrolina, Semiárido do Nordeste do Brasil: Aspectos em Meso e Grande Escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 23, p.292 – 304.
- Williams, E. R.; Renno, N. (1993). An analysis of the conditional instability of the tropical atmosphere. *Monthly Weather Review*; 121: p.21-36.
- Williams, E. R; Rutled, S. A.; Geotis, S. G.; Renno N.; Rasmussen, E., Rickenbach, T. (1992). A Radar and Electrical Study of Tropical “Hot Towers”. *Journal of Atmospheric Sciences*. V.49: p.1368-1395.
- Zawadzki, I.; Ro, I. (1978). Correlation between Maximum Rate of Precipitation and Mesoscale Parameters. *Journal of Applied Meteorology*, v.17.
- Zawadzki, I., E., Torlarchi, Sarvagean, R. (1981). Relationship Between Mesoscale Thermodynamic Variables and Convective Precipitation. *Journal of Atmospheric Sciences*. V. 38. p.1535-1540.