



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



FATORES FÍSICOS NA ATMOSFERA DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO EM JANEIRO DE 2004

Jaqueline Núbia de Queiroz¹, Leandro Fontes de Sousa², Roberta Everllyn Pereira Ribeiro¹, Maria Regina da Silva Aragão³, Magaly de Fatima Correia³

¹Mestranda em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (CNPq), Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil – autor correspondente: jaquelinenubia@gmail.com, robertaeverllyn@hotmail.com. ²Mestrando em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (CAPES), Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, l.f.sousa@hotmail.com. ³Professora Doutora, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, regina@dca.ufcg.edu.br, magaly@dca.ufcg.edu.br.

Artigo aceito em 12/09/2014

RESUMO

Técnicas de análise multivariada são aplicadas aos dados de ar superior coletados em Petrolina com o objetivo de identificar fatores físicos na atmosfera para janeiro de 2004, mês chuvoso no semiárido brasileiro. As chuvas são frequentes na área de Petrolina a partir do dia 10, associadas a ventos em superfície fracos e com direção variável. Na média troposfera o teor de umidade é muito baixo nos dias sem precipitação, em contraste com o teor de umidade elevado nos dias chuvosos. A aplicação da análise fatorial de componentes principais aos dados de ar superior resulta em um modelo com três componentes, retendo 96% e 93% da variância total dos dados no nível de 850 hPa e 500 hPa, respectivamente. O primeiro fator retido para cada nível isobárico é associado à advecção horizontal. No nível de 850 hPa, com 45% da variância total explicada, o fator é relacionado a advecção de temperatura pela componente meridional do vento; no nível de 500 hPa, com 46% da variância total explicada, ele está ligado a advecção de umidade pela componente zonal do vento. A aplicação da análise de agrupamentos aos fatores retidos possibilita identificar quatro grupos no nível de 850 hPa: os Grupos 1 e 2, formados por dias sem registro de chuva, e os Grupos 3 e 4, formados por dias com precipitação. No nível de 500 hPa são identificados três grupos, com características similares às dos grupos do nível de 850 hPa.

Palavras-chave: evento extremo, precipitação, análise de componentes principais, análise de agrupamentos, Nordeste do Brasil

ATMOSPHERIC PHYSICAL FACTORS IN THE BRAZILIAN SEMIARID IN JANUARY 2004

ABSTRACT

Multivariate analysis techniques are applied to upper air data collected in Petrolina aiming to identify physical factors in the atmosphere on January 2004, a rainy month in the Brazilian semiarid. Starting on the 10th, rainfall is frequent in the Petrolina area associated with weak and variable surface winds. In the middle troposphere the moisture content is very low in rainless days, in contrast with high moisture content in rainy days. Factorial analysis by principal components applied to upper air data results in a three component model, retaining 96% and 93% of the total variance in the data, at the 850 hPa and 500 hPa levels, respectively. Both isobaric levels have the first retained factor associated with horizontal advection. At 850 hPa, with 45% of the total variance explained, the factor is related to temperature advection by the meridional wind component, while at 500 hPa, with 46% of the total variance explained, the factor is related to moisture advection by the zonal wind component. Cluster analysis applied to the retained factors allows identification of four groups at the 850 hPa level: Groups 1 and 2 are formed by rainless days, while Groups 3 and 4 are comprised by rainy days. Three groups were identified at the 500 hPa level, whose characteristics are similar to those of the 850 hPa groups.

Keywords: extreme event, precipitation, principal component analysis, cluster analysis, Northeast Brazil

Introdução

O Semiárido brasileiro, que ocupa uma grande extensão da Região Nordeste, é influenciado por vários fenômenos meteorológicos responsáveis por alta variabilidade da precipitação. Historicamente, o Semiárido tem sido foco de pesquisas relacionadas com eventos de estiagem prolongada. A partir da implantação do complexo hidrelétrico de Sobradinho no Submédio do Rio São Francisco no final da década de 70, e do conseqüente desenvolvimento regional através da agricultura irrigada, o estudo de eventos chuvosos extremos ganhou maior importância pelo seu potencial para causar impactos negativos nessa atividade econômica. Situada no Semiárido brasileiro, a cidade de Petrolina, que integra a mesorregião do sertão do São Francisco e a microrregião de Petrolina, Pernambuco (IBGE, 2010), é conhecida como um importante pólo agrícola no qual a ocorrência de eventos extremos associados a fatores meteorológicos pode ocasionar sérios transtornos econômicos, sociais e ambientais.

Recentemente, Correia et al. (2013) e Correia et al. (2012) analisaram aspectos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera em Petrolina, no mês extremo chuvoso de janeiro de 2004. Os autores destacaram que mecanismos dinâmicos associados com vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) foram determinantes para a liberação ou supressão da atividade convectiva e, conseqüentemente, para o desenvolvimento ou inibição de sistemas precipitantes. A importância da modulação das chuvas no semiárido pelos VCAN em janeiro de 2004 também foi destacada por Alves et al. (2006). Silva et al. (2008) discutem essa interligação com o suporte de imagens de um radar meteorológico banda-C que ilustram áreas de convecção linearmente organizada na presença de um VCAN em abril de 1985. Na mesma linha estão os resultados obtidos por Silva Aragão et al. (2007) para o mês extremo chuvoso de janeiro de 1985. Numa análise detalhada das condições atmosféricas do dia 24 daquele mês as autoras diagnosticaram a presença do cavado de ar superior do Nordeste-Atlântico Sul, com

grande amplitude, e de áreas de precipitação da escala meso- β (Orlanski, 1975) constituídas por núcleos convectivos profundos inseridos em áreas de precipitação estratiforme.

Neste trabalho o mês de janeiro de 2004 é analisado através de técnicas de análise multivariada com o objetivo de investigar relações entre elementos meteorológicos obtidos de sondagens de ar superior realizadas em Petrolina. Dados representativos da baixa e média troposfera são submetidos à análise fatorial de componentes principais e à análise de agrupamentos para identificar fatores físicos dominantes e grupos de dias com características similares. Os resultados da análise multivariada são complementados pela análise da precipitação e do vento à superfície e pelo diagnóstico da estrutura termodinâmica e do vento ao longo da vertical em Petrolina.

Material e Métodos

Totais diários de precipitação

Os dados diários de precipitação utilizados neste estudo são provenientes de três estações localizadas na região de Petrolina-PE (Fig. 1). A estação de Bebedouro (09°09'S, 40°22"W) e a estação Fruit Fort (09°22'S, 40°33"W) estão situadas no município de Petrolina, enquanto que a da Fazenda Logos Butiá (09°05'S, 39°55"W) está situada no município de Curuçá-BA.

Sondagens de ar superior

Dados diários de ar superior da estação de altitude de Petrolina (9°24'S, 40°30'W) também foram usados na realização deste estudo (Fig. 1). As sondagens, realizadas às 12 UTC, correspondem ao período de 1 a 21 de janeiro de 2004, no qual há dois dias sem sondagem: 9 e 17. As variáveis utilizadas foram: temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (T_d), umidade relativa (U_r), razão de mistura (r), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}) e as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento.

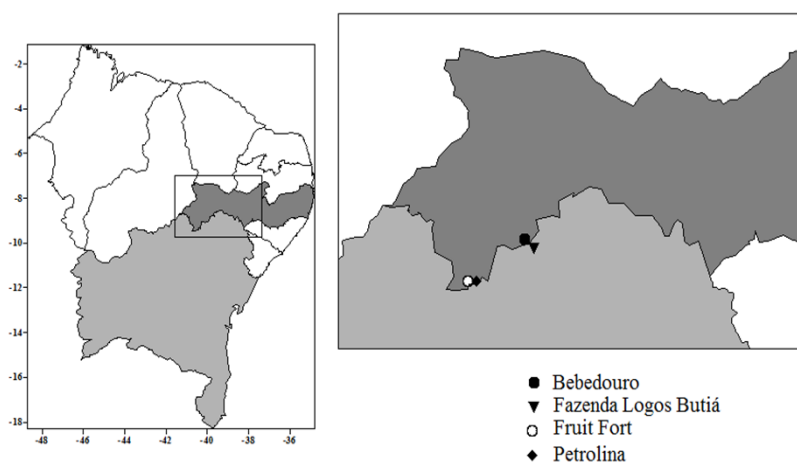


Figura 1 – (a) Divisão política da região Nordeste do Brasil com destaque para os estados da Bahia (cinza médio) e Pernambuco (cinza escuro); (b) área delimitada pelo retângulo em (a), com a localização da estação de altitude de Petrolina-PE (losango) e das três estações com dados pluviométricos: Bebedouro (círculo preto), Fruit Fort (círculo branco) e Fazenda Logos Butiá (triângulo).

Análise de Componentes Principais (ACP)

Neste trabalho a Análise Fatorial de Componentes Principais (ACP) é aplicada a variáveis meteorológicas obtidas em níveis isobáricos padrões. A ACP é uma técnica de estatística multivariada cujo objetivo principal é reduzir o número de variáveis de um conjunto de dados, preservando a maior parte das informações nele contidas. As componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, obtidas em ordem decrescente de importância. A aplicação da ACP tem início com o cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variância-covariância ou de uma matriz de correlação entre variáveis. O teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) indicou uma boa adequação dos dados para a aplicação da técnica. Foi usado o procedimento de rotação de fatores através do método Varimax com o objetivo de aumentar o poder explicativo dos fatores na análise (WILKS, 2006).

A ACP foi realizada através da matriz de correlações com o objetivo de identificar possíveis relações entre variáveis meteorológicas em dois níveis isobáricos padrões, 850 hPa e 500 hPa. Cada nível foi analisado de forma independente usando o modo P (RICHMAN, 1986). Esse modo tem sido usado para analisar séries temporais de variáveis obtidas em um ponto com objetivos diversos: identificar índices de instabilidade adequados para a previsão de granizo (DALEZIOS e PAPAMANOLIS, 1991), caracterizar ambientes sinóticos favoráveis ao desenvolvimento de convecção (BENTLEY et al., 2012), quantificar aspectos da dinâmica dos fluxos de água, energia e CO₂ no bioma caatinga (SANTOS, 2011), etc.

2.4. Análise de Agrupamentos (AA)

Os fatores rotacionados obtidos da Análise de Componentes Principais formaram a base de dados para a aplicação da Análise de Agrupamentos. O agrupamento foi feito a partir do método aglomerativo hierárquico denominado Método de Ward. A distância euclidiana foi utilizada como medida de similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos. O método de Ward propõe que, em qualquer fase da análise, a perda de informação que resulta da junção de elementos em grupos é medida pela soma dos quadrados dos desvios de cada ponto em relação à média do grupo ao qual pertence (EVERITT, 1993).

A aglomeração hierárquica se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura em forma de árvore. Os grupos nos métodos hierárquicos são geralmente representados por um gráfico denominado dendrograma. Através dele, do conhecimento prévio a respeito dos dados e da curva de inércia é escolhida uma distância de corte para definir quais grupos serão formados. Essa decisão é subjetiva e deve ser feita de acordo com o objetivo da análise e o número de grupos desejados.

Análise das condições termodinâmicas e do vento em altitude

Os dados disponíveis de sondagens de ar superior também foram utilizados para diagnosticar a estrutura vertical da atmosfera na área de Petrolina. Foram

obtidos perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento, e as condições de estabilidade da atmosfera foram avaliadas através dos perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), calculadas usando as equações propostas por Bolton (1980):

$$\theta = T_K \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1-0,28x10^{-3}r)}$$

$$\theta_e = \theta \exp\left(2,675 \frac{r}{T_L}\right)$$

$$\theta_{es} = \theta \exp\left(2,675 \frac{r_s}{T_k}\right)$$

nas quais:

r é a razão de mistura (g/kg)

r_s é a razão de mistura à saturação (g/kg)

T_k é a temperatura (K)

T_L é a temperatura no nível de condensação por levantamento (K) dada por:

$$T_l = 55,0 + \frac{1}{\frac{1}{T_k - 55} - \frac{\ln\left(\frac{UR}{100}\right)}{2840}}$$

na qual UR é a umidade relativa em porcentagem.

Resultados e Discussão

No conjunto de análises discutido a seguir um dos aspectos considerados é a relação entre o vento na baixa troposfera e a chuva no interior semiárido do Nordeste, o que também é abordado por Moscati e Gan (2007), Silva Aragão et al. (2007), Silva Aragão et al. (1997), entre outros. Outro aspecto considerado, através da aplicação do modo P da ACP, foram as interligações entre os campos de temperatura, umidade e vento na baixa e média troposfera e sua relação com a ocorrência ou ausência de precipitação na região de Petrolina.

Análise da precipitação e do vento à superfície

A Figura 2 ilustra a série temporal dos totais diários de precipitação do mês de janeiro de 2004 nas três estações ilustradas na Figura 1. É evidente a ausência quase total de precipitação na região de Petrolina no início do mês, do dia 1 ao dia 9. A partir do dia 10, chove quase todos os dias. Um evento de precipitação intensa é observado no dia 14, quando os acumulados pluviométricos ultrapassam 80 mm nas três estações. Nesse dia o total diário de precipitação atinge 157 mm na estação de Bebedouro e 104 mm na estação da Fruit Fort. Outro evento de precipitação intensa é observado no dia 29, com totais diários de precipitação acima de 50 mm. Nos outros dias os totais pluviométricos variam entre 1 e 52 mm nas três estações.

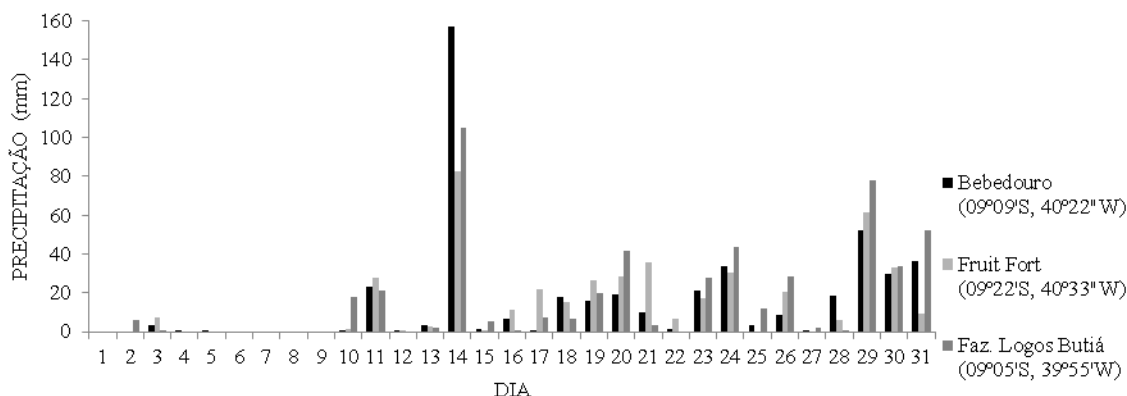


Figura 2 - Série temporal dos totais diários de precipitação (mm) de janeiro de 2004 na estação meteorológica de: Bebedouro, Fruit Fort e Fazenda Logos Butiá. A simbologia utilizada é vista à direita do gráfico.

A Figura 3 ilustra a variabilidade do vento em superfície obtido das sondagens de ar superior disponíveis no mês através da velocidade e das componentes zonal (u) e meridional (v). O gráfico evidencia dois períodos distintos, tanto no que diz respeito à direção quanto à velocidade. O vento é de leste ou do quadrante sudeste e atinge velocidades acima de 4 m s⁻¹ até o dia 10, o que resulta em valores elevados da componente zonal e/ou meridional. Após a calmaria do dia 11, apenas no dia 18 a velocidade supera 4 m s⁻¹, enquanto que a direção varia muito; ela é do quadrante nordeste ou noroeste, ou é de leste, oeste, norte ou sul, conforme evidenciam as componentes do vento nesse período. Esse padrão de variabilidade indica que a alta subtropical do Atlântico Sul está enfraquecida após o dia 10, coincidindo com os dias de ocorrência de chuva na região (Fig. 2). Ventos à superfície fracos e com direção variável também são observados no mês chuvoso de janeiro de 1985 (SILVA ARAGÃO et al., 2007).

Análise de Componentes Principais (ACP)

Na aplicação da ACP um modelo com três componentes (fatores) foi adequado para representar a estrutura das variáveis no nível isobárico de 850 hPa, retendo 96% da variância total; o mesmo número de componentes foi identificado em 500 hPa, retendo 93% da variância total.

A Tabela 1 mostra a matriz dos fatores rotacionados para os níveis isobáricos estudados. Na baixa troposfera (850 hPa), as variáveis de maior peso na primeira componente estão altamente relacionadas com temperatura, componente meridional do vento e umidade relativa. Esse fator retém 45% da variância total dos dados e pode ser indicativo de advecção de temperatura pela componente meridional do vento.

No segundo fator, que retém 39% da variância total dos dados, estão as variáveis relacionadas com o teor de umidade do ar, incluindo a umidade relativa, embora com peso menor. A presença da umidade relativa nos dois primeiros fatores indica sua dependência da temperatura e da umidade do ar em 850 hPa.

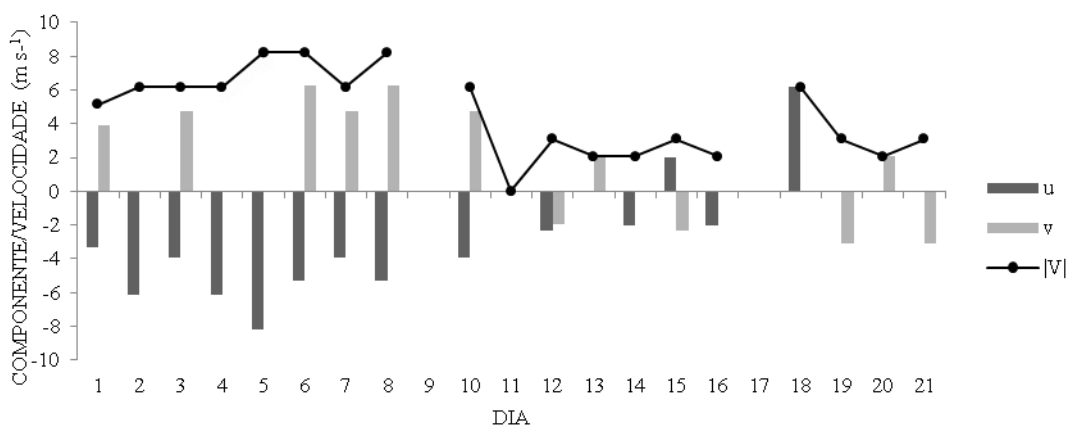


Figura 3 - Série temporal dos valores diários da velocidade (|V|) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento à superfície (m s⁻¹), obtidos das sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC, no período de 1 a 21 de janeiro de 2004, na estação de altitude de Petrolina-PE. Os valores negativos (positivos) de u representam componente de leste (oeste). Os valores negativos (positivos) de v representam componente de norte (sul). Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (9 e 17). A simbologia utilizada é vista à direita do gráfico.

A componente zonal do vento é explicada pelo terceiro fator, que retém 12% da variância total dos dados. Na média troposfera (500 hPa), as variáveis de maior peso na primeira componente estão altamente relacionadas com a componente zonal do vento e a umidade do ar, inclusive a umidade relativa. Esse fator deve estar associado com advecção de umidade pela componente zonal do vento, e tem 46% da variância total dos dados. O segundo fator, com 36% da variância total dos dados, explica as variáveis relacionadas com a temperatura. Vale observar que a umidade relativa tem contribuição importante apenas no primeiro fator, uma indicação de que na média

troposfera sua variabilidade está relacionada apenas com o teor de umidade do ar. A componente meridional do vento é explicada pelo terceiro fator, que retém 11% da variância total dos dados.

A Figura 4 ilustra o peso dos três fatores no período de 1 a 21 de janeiro de 2004 no nível isobárico de 850 hPa. O fator 1, que está relacionado com advecção de temperatura pela componente meridional do vento, apresenta um mínimo no dia 6 (Fig. 4).

As séries temporais dessas variáveis (Fig. 5a) indicam que as condições de tempo nesse dia estão associadas a um mínimo de temperatura e a um máximo da componente meridional (de sul).

Tabela 1 - Fatores rotacionados para os níveis isobáricos de: (a) 850hPa e (b) 500hPa.

(a)	850			(b)	500			
	hPa	Fator 1	Fator 2	Fator 3	hPa	Fator 1	Fator 2	Fator 3
	T	0,986	-0,104	0,074	0e	0,972	-0,123	0,118
	θ	0,986	-0,106	0,073	r	0,950	-0,245	0,121
	θes	0,984	-0,131	0,062	Ur	0,934	-0,297	0,130
	Ur	-0,710	0,698	0,083	Td	0,882	-0,346	0,145
	v	-0,666	-0,416	-0,365	u	0,729	0,178	0,108
	Td	-0,229	0,955	0,177	θes	-0,124	0,986	-0,069
	r	-0,217	0,955	0,190	T	-0,135	0,985	-0,060
	0e	0,278	0,926	0,227	θ	-0,172	0,980	-0,063
	u	0,137	0,319	0,930	v	0,242	-0,105	0,964

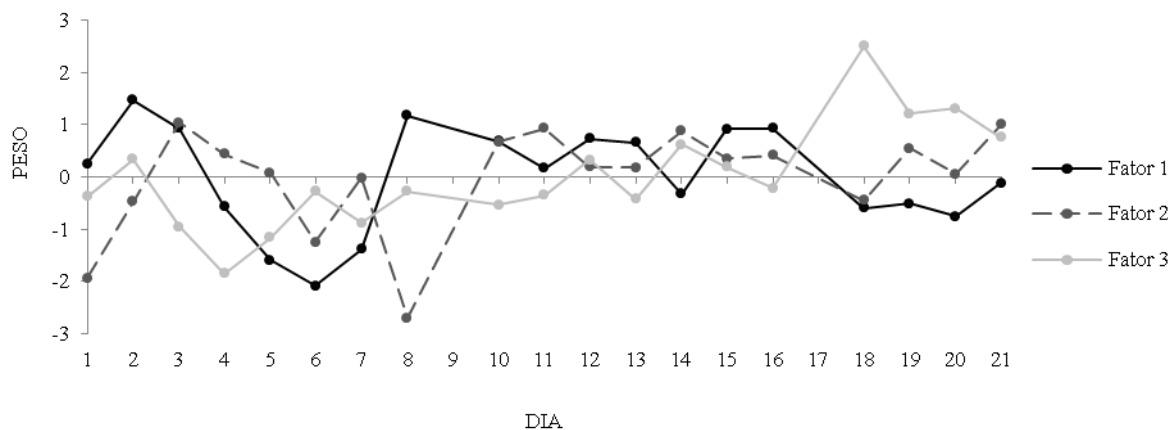


Figura 4 – Peso dos fatores obtidos para o nível isobárico de 850 hPa no período de 1 a 21 de janeiro de 2004 em Petrolina-PE. Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (9 e 17). A simbologia utilizada é vista à direita do gráfico.

Nos dias 1 e 8 há mínimos do fator 2, que correspondem aos valores mais baixos da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho nesse mês (Fig. 5b). Em particular, o teor de umidade diminui cerca de 50% do dia 7 para o dia 8. Segundo Correia et al. (2012), entre os dias 1 e 10 a umidade na região de

Petrolina foi inferior à média do mês, devido à influência da subsidência da área central de um VCAN. Os dias 4 e 18 apresentam valores extremos do fator 3 que está relacionado com a componente zonal do vento. Ela atinge intensidade máxima, de leste, no dia 4, e de oeste, no dia 18 (Fig. 5c).

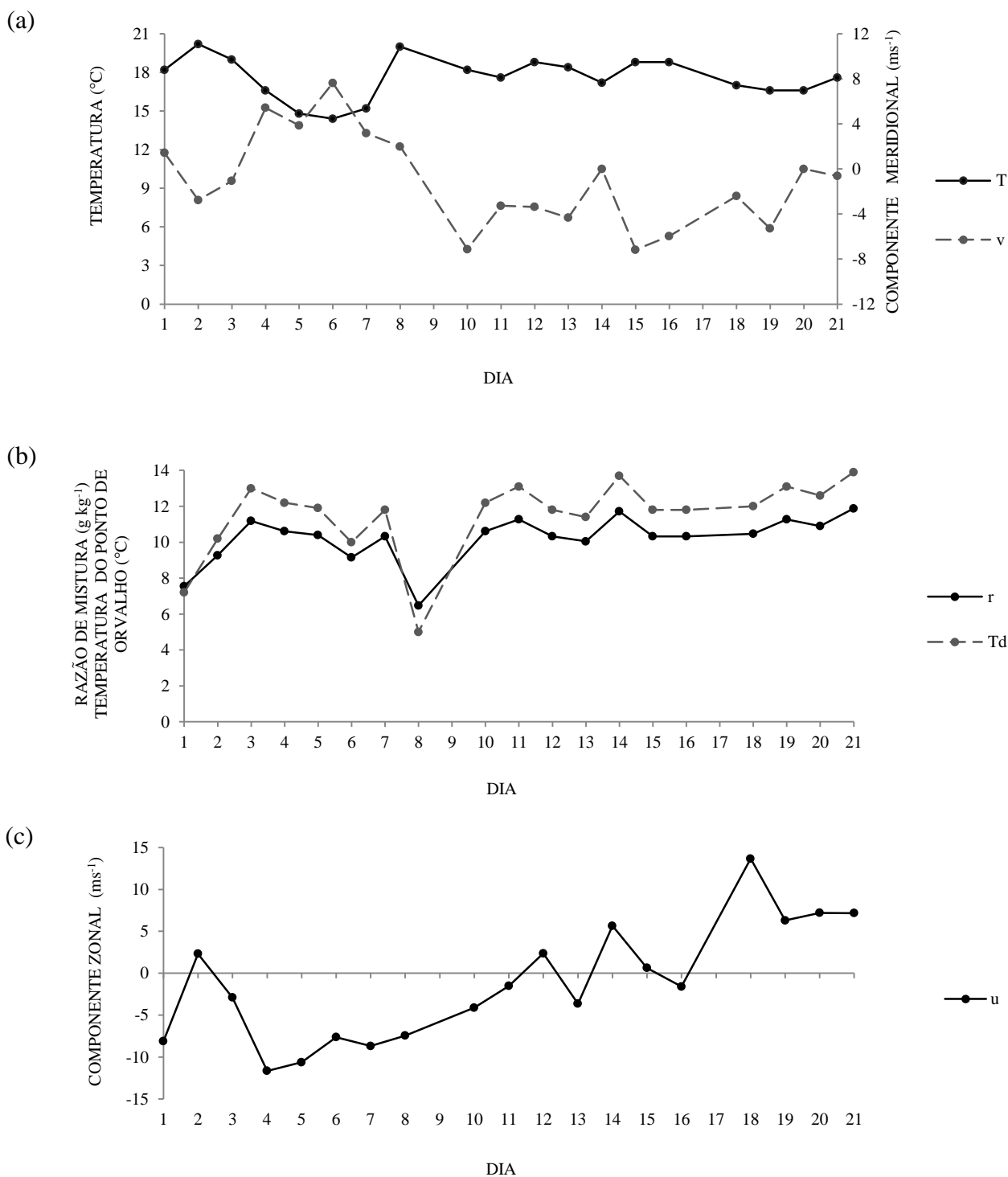


Figura 5 – Série temporal de elementos meteorológicos no nível isobárico de 850 hPa para o período de 1 a 21 de janeiro de 2004 em Petrolina-PE: (a) temperatura do ar (T) e componente meridional do vento (v), (b) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) componente zonal do vento (u). Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (9 e 17). A simbologia utilizada é vista à direita dos gráficos.

A Figura 6 ilustra o peso dos três fatores no período de 1 a 21 de janeiro de 2004 no nível isobárico de 500 hPa. A série temporal do fator 1, que relaciona as variáveis de umidade com a componente zonal, evidencia valores negativos até o dia 8 (Fig. 6). A componente zonal é de oeste a partir do dia 7 e o teor de umidade é consideravelmente maior no dia 10 (Fig.

7a), uma indicação de transporte horizontal de umidade para a área de Petrolina. Esse dia marcou o início de um período mais úmido nesse nível isobárico que teve razão de mistura nula nos dias 5, 6 e 7, ocasionada possivelmente pela subsidência de ar seco de níveis mais elevados típica da área central de VCAN (KOUSKY e GAN, 1981). Vale assinalar que

anomalias positivas da razão de mistura foram encontradas na média troposfera entre os dias 11 e 21 de janeiro por Correia et al. (2012). É possível destacar o máximo do fator 2 no dia 15, que está relacionado com a variabilidade na temperatura, correspondendo aos valores mais altos da temperatura do ar e temperatura potencial (Fig. 7b). O fator 3, associado com a componente meridional, mostra máximos nos dias 19 (secundário) e 21 (principal). Na série temporal da componente também há máximos (de sul) nos mesmos dias (Fig. 7c).

Análise de Agrupamentos (AA)

A curva de inércia para o agrupamento no nível isobárico de 850 hPa está representada na Figura 8a. A flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos que, no caso, são quatro. No nível de 500 hPa, conforme indicado na curva de inércia (Fig. 8b), o corte no dendrograma é de ordem 3, agrupando os dias em três grupos.

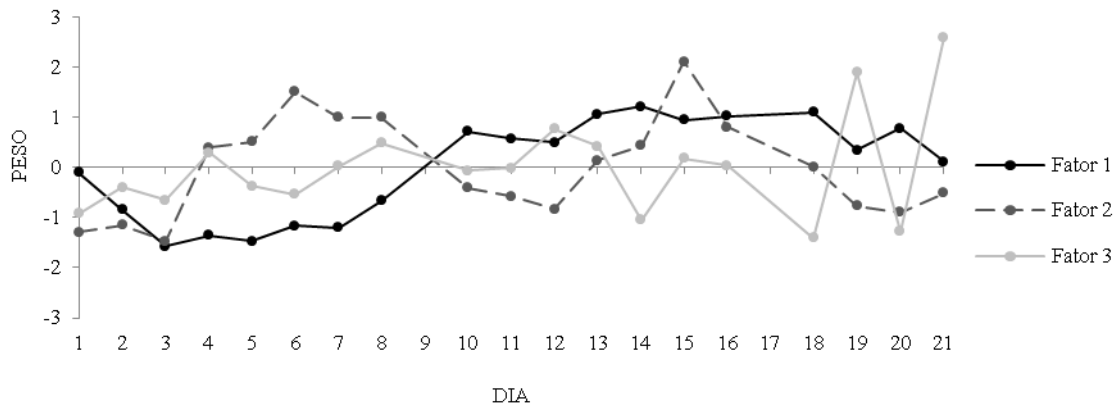
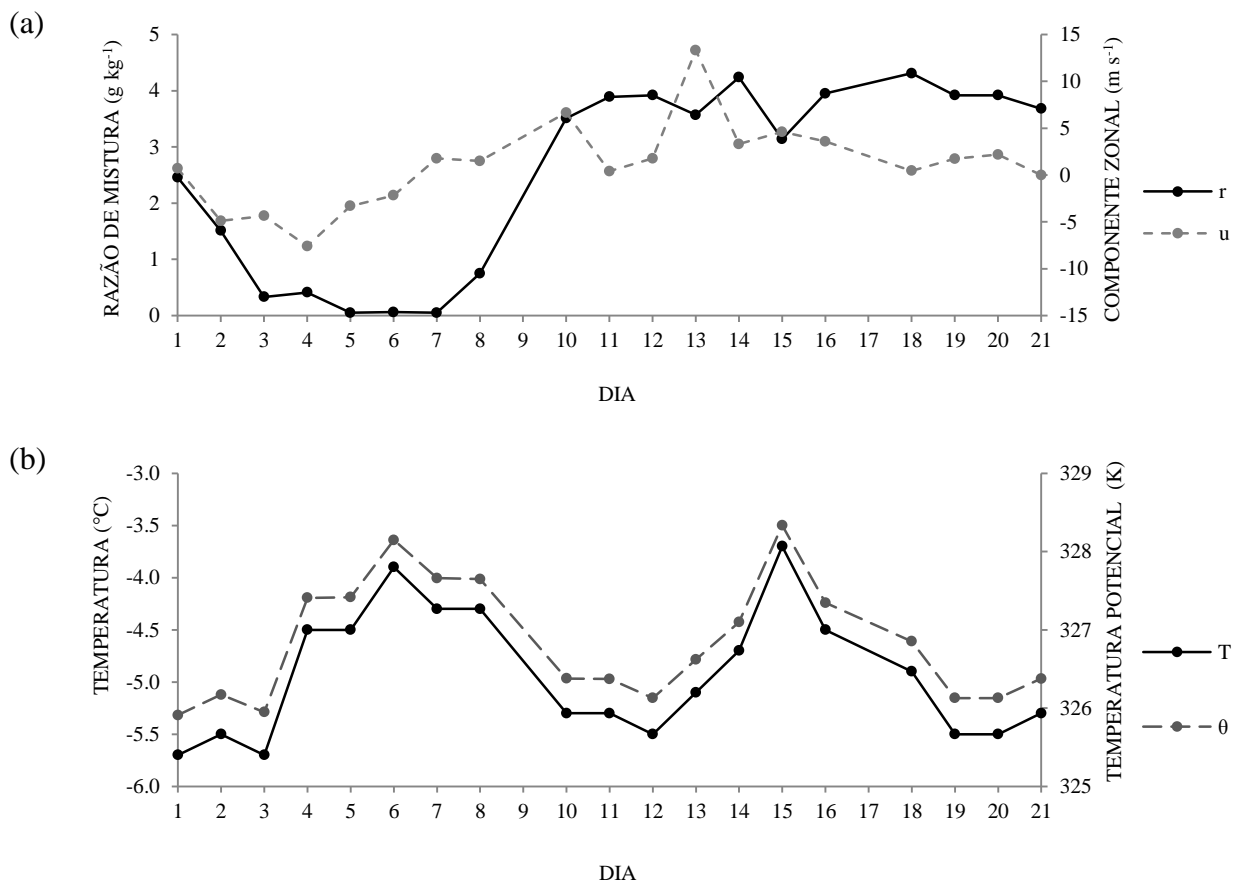


Figura 6 – Peso dos fatores obtidos para o nível isobárico de 500 hPa no período de 1 a 21 de janeiro de 2004 em Petrolina-PE. Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (9 e 17). A simbologia utilizada é vista à direita do gráfico.



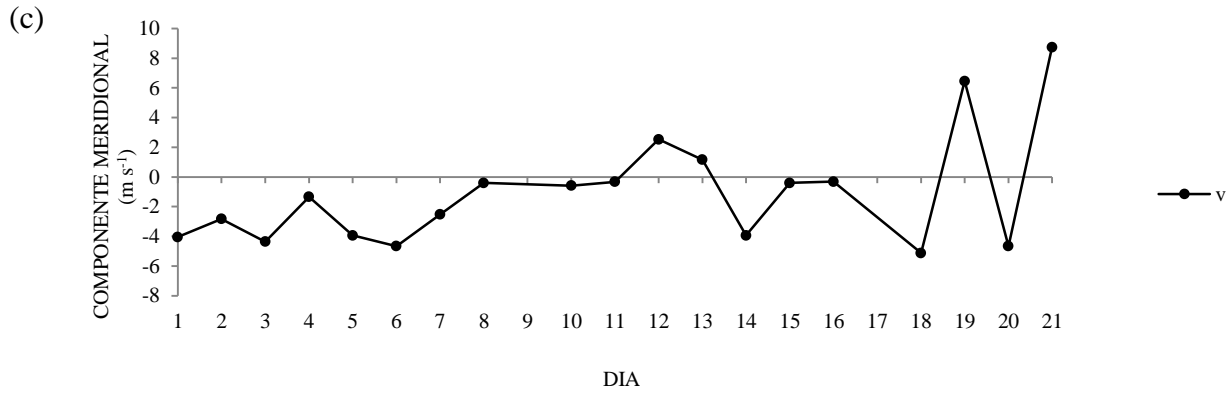


Figura 7 – Série temporal de elementos meteorológicos no nível isobárico de 500 hPa para o período de 1 a 21 de janeiro de 2004 em Petrolina-PE: (a) razão de mistura (r) e componente zonal do vento (u), (b) temperatura do ar (T) e temperatura potencial (θ), e (c) componente meridional do vento (v). Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (9 e 17). A simbologia utilizada é vista à direita dos gráficos.

Na Figura 9a está representado o dendrograma para o nível isobárico de 850 hPa. Com base no critério da curva de inércia, o corte dividiu o mês de janeiro em quatro grupos de acordo com sua similaridade. No Grupo 1 estão dias do início do mês (Fig. 9a, Tab. 2). Correia et al. (2012) destacam que entre os dias 4 e 10 houve anomalias negativas de razão de mistura na atmosfera em Petrolina, coincidindo com dias em que não houve precipitação. Dessa forma, é evidente a relação entre o Grupo 1 e as condições meteorológicas associadas a ausência de chuva na região de Petrolina durante os primeiros dias de janeiro. O Grupo 2 reúne apenas os dias 1 e 8 (Fig. 9a, Tab. 2). Neles as condições meteorológicas também eram compatíveis com ausência de chuva. Em particular, nos resultados da Análise de Componentes Principais há, nos dias 1 e 8, valores mínimos do fator 2 (Fig. 4), que está relacionado com as variáveis de umidade, que apresentam seus valores mais baixos nesses dias (Fig. 5b). O Grupo 3 reúne cinco dias (Fig. 9a, Tab. 2), nos quais houve chuva nas três estações (Fig. 2). Há 8 dias no Grupo 4 (Fig. 9a, Tab. 2) dos quais dois, do início

do mês (2, 3), apresentam valores muito baixos de precipitação. Nos seis dias restantes (10, 11, 12, 13, 15, 16) também choveu, mas apenas no dia 11 a chuva foi registrada nas três estações, com valor em torno de 20 mm. Assim, nos Grupos 3 e 4 estão os dias nos quais VCAN contribuíram favoravelmente para o desenvolvimento de convecção na região de Petrolina. Desse modo, é evidente a ligação dos Grupos 3 e 4 com os dias de ocorrência de precipitação na área de estudo.

Na Figura 9b está representado o dendrograma para o nível isobárico de 500 hPa. O corte realizado com base no critério da curva de inércia dividiu o mês de janeiro em três grupos. O Grupo 1 reúne os dias 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (Fig. 9b, Tab. 2). Esse grupo também apresenta características compatíveis com dias de ausência de precipitação. O Grupo 2 reúne os dias 19 e 21 (Fig. 9b, Tab. 2), e no Grupo 3 estão os dias 1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18 e 20 de janeiro (Fig. 9b, Tab. 2). Assim, nos Grupos 2 e 3 está a maioria dos dias nos quais houve chuva na região de Petrolina.

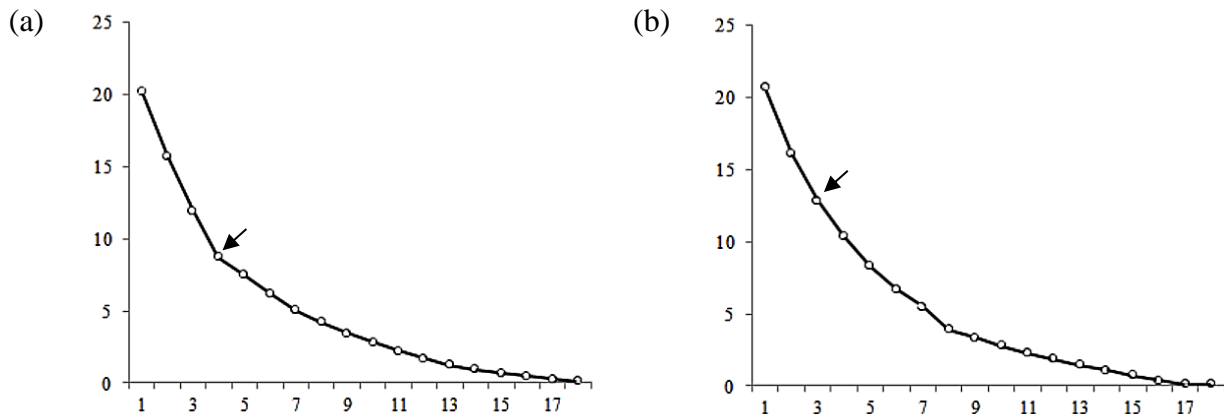


Figura 8 - Curva de inércia para o nível de: (a) 850 hPa e (b) 500 hPa.

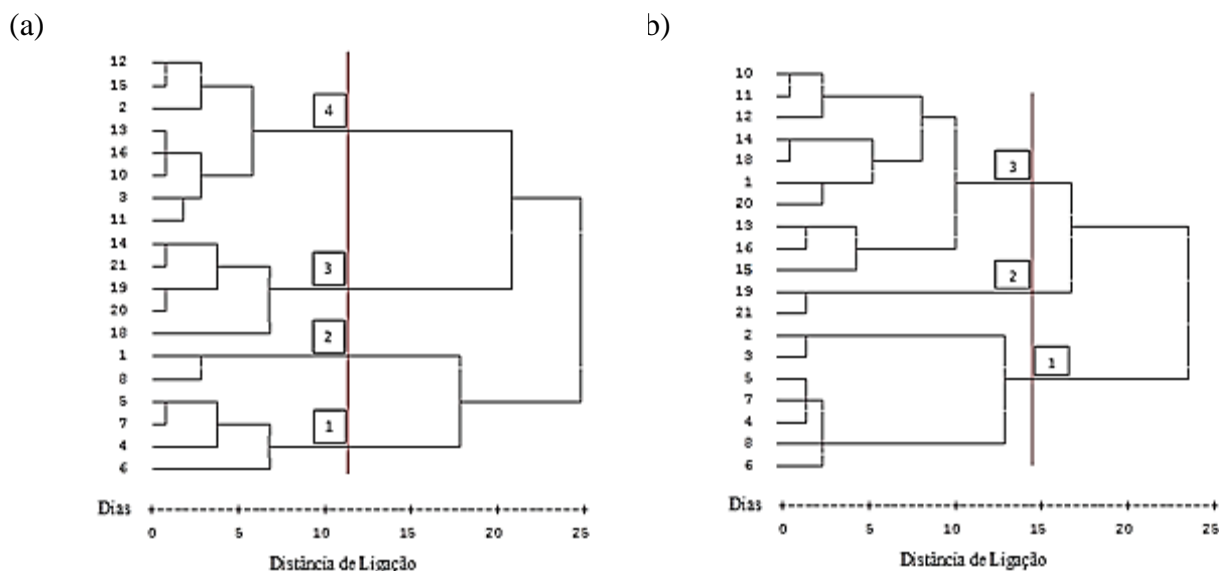


Figura 9 - Dendrograma utilizando o método de Ward e distância euclidiana para o nível de: (a) 850 hPa e (b) 500 hPa.

Tabela 2 - Grupos de dias com características similares obtidos através da análise de agrupamentos para os níveis isobáricos de 850 e 500 hPa.

Grupo	Dias em 850 hPa	Dias em 500 hPa
1	4, 5, 6 e 7	2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8
2	1 e 8	19 e 21
3	14, 18, 19, 20 e 21	1, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18 e 20
4	2, 3, 10, 11, 12, 13, 15 e 16	-

Análise da estrutura termodinâmica e do vento em altitude

A Figura 10 ilustra a estrutura termodinâmica e a variação do vento ao longo da vertical através dos perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado em Petrolina-PE, nos dias 4, 8, 10 e 14. Os dois primeiros são representativos dos dias sem precipitação e os demais de dias com registro de chuva, de acordo com a Figura 2.

Às 12 UTC do dia 04 de janeiro (Fig. 10a), os perfis termodinâmicos ilustram uma atmosfera com teor de umidade consideravelmente baixo evidenciado pelo afastamento das curvas de θ_e e θ_{es} , e, principalmente, pela proximidade entre as curvas de θ e θ_e na média e alta troposfera. Próximo da superfície há uma camada de mistura espessa, condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) e convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z = 0$), cujo topo coincide com a base de uma camada de inversão térmica. Às 12 UTC do dia 8 (Fig. 10c) os perfis termodinâmicos também ilustram uma camada de mistura espessa e condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$). Seu topo, situado acima de 900 hPa, coincide com a base de uma camada de inversão térmica de subsidência, caracterizada pelo afastamento

acentuado entre as curvas de θ_e e θ_{es} . O teor de umidade permanece muito baixo na média e alta troposfera. Foi visto na seção 3.2 que neste dia, em comparação com o dia 7, a razão de mistura é cerca de 50% menor no nível de 850 hPa, e é pouco maior no nível de 500 hPa (Figs. 5b e 7a). Esse dia também se caracteriza por valores extremos (opostos) dos fatores 1 e 2 no nível de 850 hPa (Fig. 4).

No dia 10 (Fig. 10e) os perfis termodinâmicos das 12 UTC mostram uma camada bem misturada ($\partial\theta/\partial z = 0$) e condicionalmente e convectivamente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$ e $\partial\theta_e/\partial z < 0$) próximo à superfície; entre 890 hPa e 850 hPa a atmosfera está aproximadamente convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z = 0$), e está instável acima dessa camada. De maneira geral, nesse dia o teor de umidade é maior em toda a troposfera, em comparação com o dia 8 (Fig. 10c), principalmente acima de 600 hPa, conforme evidenciado pela maior proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es} . Esse aumento da umidade também é evidente na série temporal da razão de mistura no nível de 850 hPa (Fig. 5b) e 500 hPa (Fig. 7a). Essas séries também mostram que o teor de umidade varia pouco nos dias subsequentes, mas que atinge um máximo no dia 14. Às 12UTC desse dia (Fig. 10g), no qual foi registrado o maior total de precipitação do mês (Fig. 2), os perfis termodinâmicos ilustram uma atmosfera muito úmida

desde a superfície até os níveis mais altos, o que é evidenciado pela proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es} , principalmente acima de 700hPa. Há uma camada convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z < 0$) próximo à superfície, cujo topo coincide com a base de uma camada convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z = 0$). É importante observar que, de maneira geral, o teor de umidade da troposfera no dia 14 (Fig. 10g) é maior do que nos dias 4, 8 e 10 (Fig. 10 a,c,e). Os perfis termodinâmicos ilustrados na Figura 5 de Correia et al. (2012) mostram condições semelhantes no dia 15, e teor de umidade mais baixo acima de 700 hPa no dia

16. De maneira geral, no período de 15 a 21 de janeiro o teor de umidade permanece elevado, conforme evidenciam as Figuras 5b e 7a para o nível de 850 hPa e 500 hPa, respectivamente. Teor de umidade elevado, comparável ao do dia 14, também é visto na Figura 10 de Silva Aragão et al. (2007). Condições semelhantes são vistas na área de Petrolina quando da atuação de outros sistemas atmosféricos, a exemplo da Zona de Convergência Intertropical (BARBOSA e CORREIA, 2005; DINIZ et al., 2004) e de sistemas frontais austrais (BARBOSA e CORREIA, 2005; SOUZA, 2003).

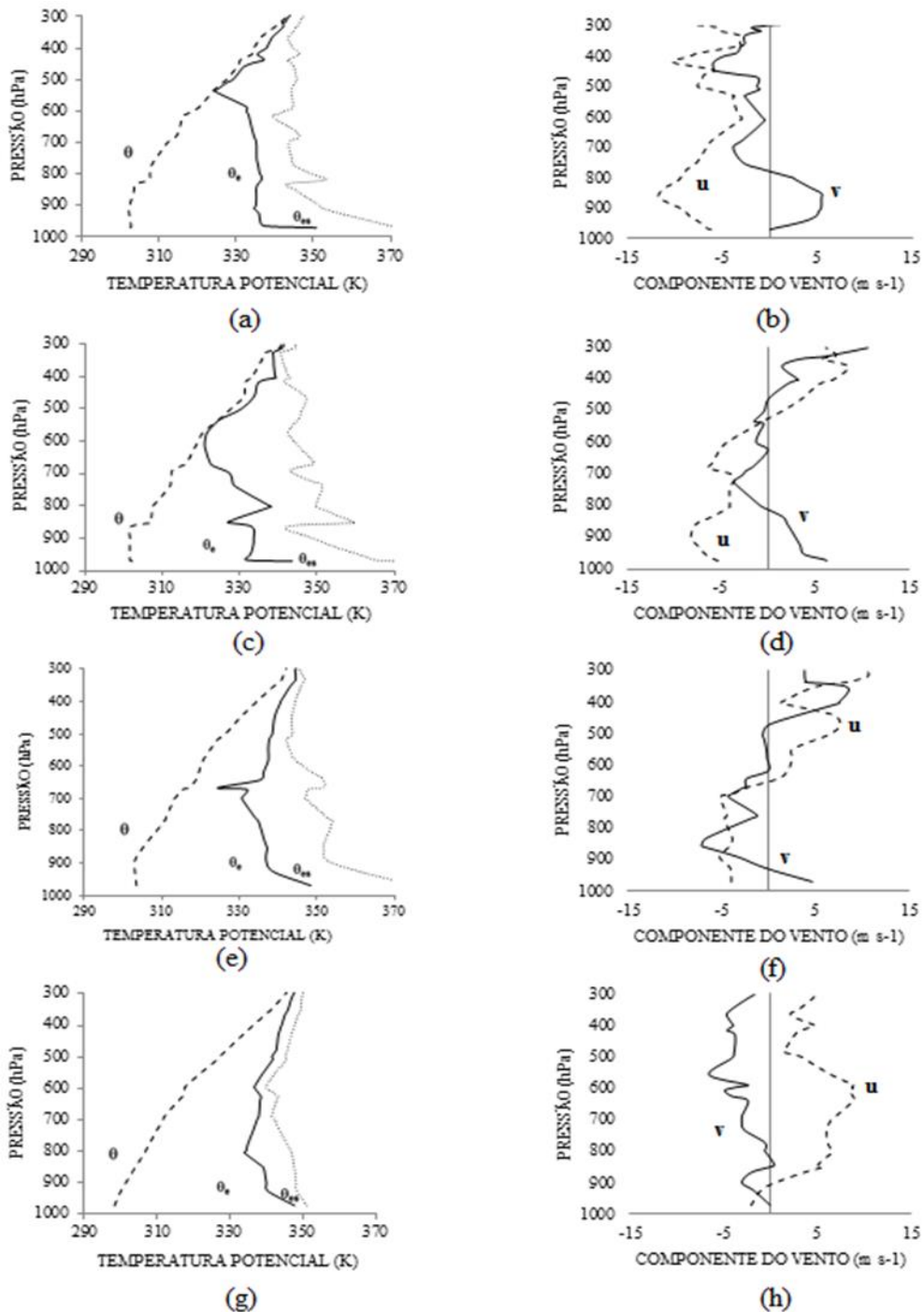


Figura 10 - Perfis verticais das temperaturas (K) potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), à esquerda, e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m s⁻¹), à direita, obtidos de sondagem de ar superior realizada em janeiro de 2004 em Petrolina, às 12 UTC do dia: (a,b) 4, (c,d) 8, (e,f) 10 e (g,h) 14. (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

Às 12 UTC do dia 4 (Fig. 10b), a direção do vento varia pouco, sendo do quadrante sudeste entre a superfície e o nível de 770 hPa, e do quadrante nordeste acima. Os perfis verticais da componente zonal e da componente meridional evidenciam o aumento da velocidade do vento dentro da camada de mistura.

Às 12 UTC do dia 8 (Fig. 10d), a direção do vento é do quadrante sudeste entre a superfície e o nível de 800 hPa, torna-se de nordeste até o nível de 530 hPa, e é de sudoeste nos níveis acima. A velocidade diminui até a média troposfera, onde é próxima de zero, e aumenta de forma sistemática nos níveis acima. Às 12 UTC do dia 10 (Fig. 10f), a direção do vento tem distribuição vertical semelhante a do dia 8 (Fig. 10d), variando entre os quadrantes sudeste, nordeste e sudoeste. Entretanto, a camada de ventos de sudoeste é ligeiramente mais espessa, enquanto que a de ventos de sudeste é visivelmente mais rasa, uma indicação do enfraquecimento da circulação da alta subtropical do Atlântico Sul na região. Às 12 UTC do dia 14 (Fig. 10h), o vento varia menos ao longo da vertical. Há ventos fracos do quadrante nordeste numa camada rasa próximo à superfície, e ventos do quadrante noroeste acima, que são mais intensos na baixa e média troposfera. De maneira geral, as velocidades são mais baixas a partir do dia 11 (não mostrado). No período de 14 a 21 de janeiro a direção do vento varia pouco e a velocidade é baixa a moderada (não mostrado).

Conclusões

No mês de janeiro de 2004 a região de Petrolina registrou precipitação de forma sistemática a partir do dia 10. O volume máximo de precipitação foi observado no dia 14, um total de 157 mm na estação de Bebedouro. Esse padrão temporal está relacionado com mudanças importantes na atmosfera, em superfície e altitude. O vento à superfície, com intensidade moderada, varia entre leste e sudeste até o dia 10. Nos dias posteriores é fraco e com grande variabilidade na direção. Os perfis verticais obtidos de sondagens de ar superior mostram baixo teor de umidade e direção do vento variável ao longo da vertical nos oito primeiros dias do mês. Em contrapartida, o teor de umidade é elevado e a direção do vento varia pouco a partir do dia 10.

A aplicação da técnica da análise fatorial de componentes principais às sondagens de ar superior diárias disponíveis para Petrolina resulta em um modelo com três componentes nos dois níveis isobáricos analisados separadamente, retendo 96% da variância total no nível de 850 hPa e 93% da variância total no nível de 500 hPa. Os primeiros fatores encontrados são associados à advecção horizontal. Na baixa troposfera, a advecção de temperatura pela componente meridional do vento está no primeiro fator, contribuindo com 45% da variância total dos dados, enquanto que na média troposfera é a advecção de umidade pela componente zonal do vento que responde por esse fator, com 46% de contribuição.

A aplicação aos fatores da técnica da análise de agrupamentos possibilita agrupar os dias com e sem ocorrência de precipitação. No nível de 850 hPa são

identificados quatro grupos. Os Grupos 1 e 2 estão associados com seis dos sete dias sem registro de precipitação. Os Grupos 3 e 4 associam os treze dias restantes. No nível de 500 hPa é possível identificar três grupos. O Grupo 1 associa sete dias, dos quais cinco sem registro de precipitação. Nos Grupos 2 e 3 estão doze dias, com chuva registrada em dez.

6. Agradecimentos

A primeira e terceira autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e o segundo autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudos. Os autores agradecem à CPATSA/EMBRAPA (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) pela cessão dos dados pluviométricos. Esta pesquisa teve apoio parcial da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do Convênio FINEP/PCPC Nº01 08 0617 01 Projeto CAFÉ – Centro de Alerta de Fenômenos Extremos.

Referências

- Alves, J. M. B.; Ferreira, F. F.; Campos, J. N. B.; Filho, F. A. S.; Souza, E. B.; Duran, B. J.; Servain, J.; Studart, T. M. C. (2006). Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante janeiro/2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. 1, p. 56-76.
- Barbosa, T. F.; Correia, M. F. (2005). Sistemas convectivos intensos no semi-árido brasileiro: O controle da grande escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 3, p. 395-410.
- Bentley, M. L.; Stallins, J. A.; Ashley, W. S. (2012). Synoptic environments favourable for urban convection in Atlanta, Georgia. *International Journal of Climatology*, v. 32, p. 1287-1294.
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, v. 108, p. 1046-1053.
- Correia, M. F.; Gonçalves, W. A.; Silva Aragão, M. R.; Diniz, M. C. S. (2012). Mudanças na estrutura termodinâmica da atmosfera na presença de vórtices ciclônicos de altos níveis: Um episódio de precipitação extrema no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, p. 877-890.
- Correia, M. F.; Costa, M. N. M.; Barbosa Silva, A.; Silva Aragão, M. R.; Queiroz, J. N. (2013). Processos de desestabilização atmosférica e convecção profunda no semiárido brasileiro. *Ciência e Natura*, v. esp., p. 274-276.
- Dalezios, N. R.; Papamanolis, N. K. (1991). Objective assessment of instability indices for operational hail forecasting in Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 45, p. 87-100.
- 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, p. 273-286.
- EVERITT, B. S. (1993). Cluster Analysis. London: Heinemann Educational Books.
- IBGE: Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>.
- Kousky, V. E.; Gan, M. A. (1981). Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, v. 33, p. 538-551.
- Moscato, M. C. L.; Gan, M. A. (2007). Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of Northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime. *International Journal of Climatology*, v. 27, p. 493-512.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 56, p. 527-530.
- Richman, M. B. (1986). Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, v. 6, p. 293-335.
- Santos, S. A. (2011). Análise do controle ambiental nas trocas de energia, vapor d'água e CO₂ em área de caatinga. 2011. 82 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Santos Silva, F. D.; Correia, M. F.; Silva Aragão, M. R. (2008). Convecção linearmente organizada na área de Petrolina, semi-árido do Nordeste do Brasil: Aspectos em meso e grande escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p. 292-304.
- Silva Aragão, M. R.; Correia, M. F.; Sobral, Z. R. (1997). Vento à superfície e chuva em anos contrastantes no Submédio São Francisco. *Boletim Climatológico, Presidente Prudente - SP*, ano 2, n. 3, p. 213-217.
- Silva Aragão, M. R.; Damião Mendes, M. C.; Cavalcanti, I. F. A.; 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.
- Souza, P. P. (2003). Estudo da atuação de um sistema de latitudes médias no semi-árido do Nordeste do Brasil: Aspectos de grande e mesoescala. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2. ed. Elsevier Academic Press Publications, 627p. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. ISBN 10: 0-12-751966-1.