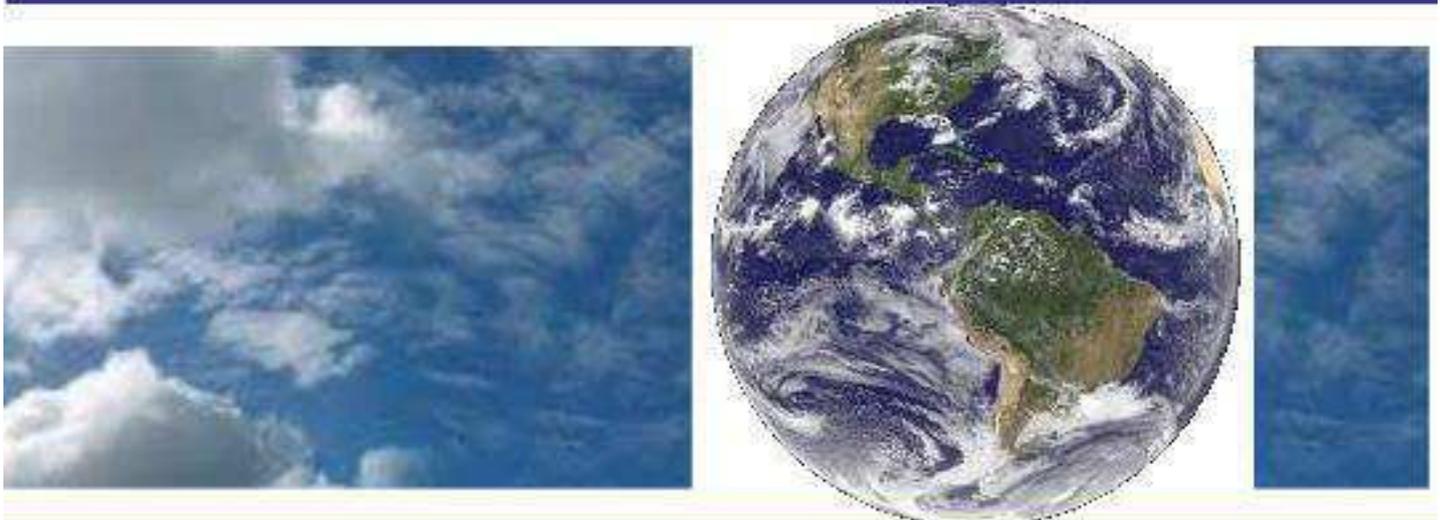


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Características da circulação e da estabilidade atmosférica no
Estado do Rio Grande do Norte: aplicação da análise multivariada**

Roberta Everllyn Pereira Ribeiro

Campina Grande, fevereiro de 2015.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERÍSTICAS DA CIRCULAÇÃO E DA ESTABILIDADE
ATMOSFÉRICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO
DA ANÁLISE MULTIVARIADA**

ROBERTA EVERLLYN PEREIRA RIBEIRO

CAMPINA GRANDE – PB

2017

ROBERTA EVERLLYN PEREIRA RIBEIRO

**CARACTERÍSTICAS DA CIRCULAÇÃO E DA ESTABILIDADE
ATMOSFÉRICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO
DA ANÁLISE MULTIVARIADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Sub-área: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Profa. Dra. Maria Regina da Silva Aragão

CAMPINA GRANDE – PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C837p Ribeiro, Roberta Everllyn Pereira.
Características da circulação e da estabilidade atmosférica no estado do Rio Grande do Norte : aplicação da análise multivariada / Roberta Everllyn Pereira Ribeiro. – Campina Grande, 2017.
112 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Profª. Dra. Maria Regina da Silva Aragão".

Referências.

1. Evento Extremo. 2. Índices de Estabilidade. 3. Distúrbio Ondulatório de Leste. 4. Condições Atmosféricas – Rio Grande do Norte – Nordeste do Brasil. 5. Condições Atmosféricas – Análise de Agrupamentos. 6. Condições Atmosféricas – Análise em Componentes Principais. I. Maria Regina da Silva Aragão. II. Título.

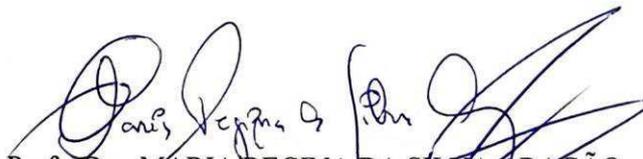
CDU 551.51(043)J

ROBERTA EVERLLYN PEREIRA RIBEIRO

CARACTERÍSTICAS DA CIRCULAÇÃO E DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA
NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: APLICAÇÃO DA ANÁLISE
MULTIVARIADA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. WEBER ANDRADE GONÇALVES
Centro de Monitoramento de Alerta de Desastre Naturais

Lâmpada para os meus pés é a tua palavra e, luz para os meus caminhos.”

(Sl 119,105)

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, razão da minha existência, sem Ele não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, pelo amor, carinho e incentivo.

Ao meu irmão e ao meu noivo, pelo incentivo e paciência.

A minha família, em especial a minhas avós Odete e Maria, que sempre estiveram comigo.

A professora Dra. Maria Regina da Silva Aragão pela orientação, paciência e incentivo para conclusão deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (DCA) pelos ensinamentos.

A professora Dra. Magaly de Fatima Correia, por seus ensinamentos e esclarecimento de dúvidas.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em particular a Divanete Cruz Rocha, que sempre disponibilizou sua ajuda quando precisei.

À equipe da Biblioteca Central pela prontidão.

A Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) pelo fornecimento dos dados de precipitação.

A Alexandra Barbosa Silva pelos ensinamentos sobre o uso do aplicativo GrADS.

Aos colegas da pós-graduação, que me ajudaram durante o Curso, em especial a Leandro, Elder, Francisco, Samira e Camila.

Aos meus familiares pelo incentivo, em especial a minha tia Fátima e a minha prima Priscila.

RESUMO

As condições atmosféricas no Estado do Rio Grande do Norte em julho de 2011 foram investigadas através da Análise em Componentes Principais (ACP) e da Análise de Agrupamentos (AA) aplicadas a dados observacionais de ar superior. Totais diários de precipitação, imagens realçadas do satélite meteorológico GOES-12, e dados de reanálise também foram utilizados. Quatro eventos de chuva foram observados na primeira quinzena do mês. Um evento de precipitação intensa registrado no dia 16 em Natal totalizou 60,4 mm na cidade. No ambiente sinótico foi diagnosticado nos baixos níveis um cavado no leste do estado e área costeira próxima, associado a confluência nos baixos níveis e difluência nos altos níveis, e movimento ascendente em toda a troposfera, na véspera do evento. A ACP aplicada separadamente aos dados dos níveis de 1000, 850, 500 e 300 hPa resultou em um modelo com três componentes. O primeiro fator às 00 UTC está relacionado com a umidade, na baixa e média troposfera, e com a temperatura, na alta troposfera. Às 12 UTC, o primeiro fator tem relação com a temperatura em 1000 e 300 hPa, e com a umidade em 850 e 500 hPa. As séries temporais dos fatores das 12 UTC mostram aumento significativo da umidade na baixa troposfera, na véspera do evento. Na aplicação da AA aos fatores obtidos na ACP, os dias foram agrupados com base em características meteorológicas similares, para cada nível isobárico e horário sinótico. A aplicação da ACP e da AA a índices de estabilidade atmosférica agrupou os dias de acordo com a probabilidade de ocorrência de tempestades. Foram identificados sete grupos para cada horário sinótico: um grupo de difícil interpretação, quatro que agruparam dias com baixa probabilidade e sem registro de precipitação, na maioria dos dias, e dois que agruparam dias com probabilidade e registro de precipitação, na maioria dos dias.

Palavras-chave: evento extremo, precipitação, índices de estabilidade, distúrbio ondulatório de leste, análise em componentes principais, análise de agrupamentos, Nordeste do Brasil

ABSTRACT

The atmospheric conditions in the Rio Grande do Norte State on July 2011 were investigated by applying Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis (CA) to observational upper air data. Daily precipitation totals, enhanced GOES-12 satellite imagery and reanalysis data were also used. Four precipitation events were observed in the first half of the month. An intense rainfall event registered on day 16 in Natal accounted for a 60.4 mm daily total in the city. The synoptic ambient was characterized by a low level trough on coastal eastern Rio Grande do Norte and the nearby oceanic area, associated with low level convergence and upper level divergence, and upward motion throughout the troposphere, on the day before the event. The PCA applied separately to data of the 1000, 850, 500 and 300 hPa levels resulted in a three component model for the isobaric levels and synoptic times analyzed. The first factor at 00 UTC is related to moisture, in the low and middle troposphere, and temperature, in the upper troposphere. At 12 UTC the first factor is related to temperature at 1000 and 300 hPa, and moisture at 850 and 500 hPa. The 12 UTC factors time series show a significant increase in moisture in the low troposphere, on the day before the event. The CA applied to the factors obtained by means of PCA resulted in days grouped on the basis of similar meteorological characteristics, for each isobaric level and synoptic time. The application of PCA and CA to atmospheric stability indices grouped the days in accordance with the probability of storm occurrence: one group of difficult interpretation, four groups with low probability and no rainfall in the majority of the days, and two groups with probability and rainfall in the majority of the days.

Keywords: extreme event, precipitation, stability indices, wavelike easterly disturbance, principal component analysis, cluster analysis, Northeast Brazil

SUMÁRIO

I- LISTA DE FIGURAS	9
II- LISTA DE TABELAS	14
III- LISTA DE QUADROS	15
IV-LISTA DE ABREVIATURAS	16
V- LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS	18
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	19
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	21
2.1- Objetivo Geral	21
2.2- Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
CAPÍTULO 4 – DADOS E METODOLOGIA	31
4.1- Área e Período de Estudo	31
4.2- Dados	32
4.3- Métodos	34
4.3.1- Análise da estabilidade da atmosfera	34
4.3.1.1- Cálculo das variáveis termodinâmicas	34
4.3.1.2- Índices de estabilidade	36
4.3.2- Análise multivariada	42
4.3.3- Análise do ambiente sinótico	48
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS	48
5.1- Análise em Escala Sinótica e Mesoescala	48
5.1.1- Análise da nebulosidade e condições em superfície	48
5.1.2- Análise termodinâmica e do vento em altitude	55
5.1.3- Análise do ambiente sinótico	58

5.2- Análise Multivariada de Dados Observacionais de Altitude	62
5.2.1-Temperatura, umidade e vento	63
5.2.2- Índices de estabilidade	94
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

I - LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1- Variação mensal de: CAPE, CINE, TT e K (a-d, respectivamente) para o período de 2002 a 2009; conteúdo de água precipitável em cm (e) para o período de 2002 a 2009; precipitação pluviométrica (f) para o período entre 2002 e 2009 e para o período de 1992 a 2009, conforme legenda (Fonte: SANTOS e SILVA et al., 2011). . 24
- Figura 3.2- Regiões homogêneas de precipitação através do método de K-means. Fonte: BRAGA et al., 2012. 27
- Figura 4.1- Mapa do Brasil com destaque para a Região Nordeste e seus estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA) e, sombreado de cinza, o Estado do Rio Grande do Norte (RN) e sua capital Natal. 32
- Figura 4.2-Mapa do Estado do Rio Grande do Norte com a localização da estação de altitude (azul), dos postos pluviométricos pertencentes à EMPARN (preto) e das estações meteorológicas pertencentes ao INMET (vermelho) com destaque para as estações localizadas na cidade de Natal (verde). 33
- Figura 5.1 - Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-12 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para: (a) 00 UTC do dia 15/07/2011, (b) 12 UTC do dia 15/07/2011, (c) 20 UTC do dia 15/07/2011, (d) 22 UTC do dia 15/07/2011, (e) 00 UTC do dia 16/07/2011, (f) 12 UTC do dia 16/07/2011, (g) 00 UTC do dia 17/07/2011, (h) 02 UTC do dia 17/07/2011 e (i) 12 UTC do dia 17/07/2011. A escala de cores da temperatura de brilho é vista abaixo das imagens (Fonte: http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp). 49
- Figura 5.2 - Totais diários de precipitação (mm) da estação meteorológica de superfície: (a) do INMET e da Escola Henrique Castriciano (EHC), localizadas em Natal-RN, e (b) do INMET, localizadas em: Apodi (Base Física), Ceará Mirim (Prefeitura) e Cruzeta, em julho de 2011. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN)). 51
- Figura 5.3- Série temporal dos valores diários da velocidade (|V|) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento à superfície (km h⁻¹), obtidos das sondagens de ar superior realizadas às (a) 00 UTC e (b) 12 UTC, no período de 1 a 30 de julho de 2011, na estação de altitude de Natal-RN. Os valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Os valores positivos de v representam componente de sul.

Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (15 (a) e 19 (b)). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.....	53
Figura 5.4 - Totais diários de precipitação (mm) observada no Estado do Rio Grande do Norte em julho de 2011 no dia: (a) 14, (b) 15, (c) 16, (d) 17, (e) 18 e (f) 19. A escala de tons de cinza, com intervalo de análise de 15 mm, é vista abaixo dos mapas (Fonte dos dados: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN)). Os pontos em destaque são as estações ilustradas na Figura 4.2	54
Figura 5.5 - 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), meridional (v) e velocidade (V) do vento (km h^{-1}), à direita, obtidos de sondagem de ar superior realizada em julho de 2011 em Natal-RN, no dia: (a, b) 15 às 12 UTC, (c, d) 16 às 00 UTC e (e, f) 16 às 12 UTC. (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).	57
Figura 5.6 – Diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento (m/s) em 600 hPa ao longo da latitude de 5°S em julho de 2011. As áreas sombreadas assinalam componente de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).	58
Figura 5.7 - Pressão ao nível médio do mar às 12 UTC do dia 15 de julho de 2011. O intervalo de análise é de 1 hPa (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).	60
Figura 5.8- Linhas de corrente e intensidade do vento para as 12 UTC do dia 15 de julho de 2011 no nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A escala da velocidade do vento (km h^{-1}) está representada ao lado dos mapas (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).	60
Figura 5.9 - Componente vertical da vorticidade relativa para as 12 UTC do dia 15 de julho de 2011 no nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. O sombreado destaca as áreas negativas (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).	61
Figura 5.10 - Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 5°S às (a) 12 UTC do dia 15/07/2011, (b) 18 UTC do dia 15/07/2011, (c) 00 UTC do dia 16/07/2011 e (d) 06 UTC do dia 16/07/2011. O intervalo de análise é de $5 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. O sombreado destaca as áreas negativas (movimento ascendente) (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).	62
Figura 5.11 Carga fatorial das 00 UTC no mês de julho de 2011 em Natal-RN obtida para os níveis isobáricos de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista	

abaixo dos gráficos sendo: F1 (fator 1), F2 (fator 2) e F3 (fator 3) (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).	66
Figura 5.12– Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 1000 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	67
Figura 5.13 – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 850 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	68
Figura 5.14 – – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 500 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos..	70
Figura 5.15 – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 300 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	71
Figura 5.16 - Carga fatorial das 12 UTC no mês de julho de 2011 em Natal-RN obtida para os níveis isobáricos de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19) e no dia sem dados no nível de 300 hPa (28). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos, sendo: F1 (fator 1), F2 (fator 2) e F3 (fator 3) (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).	75
Figura 5.17 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 1000 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) temperatura do	

ar (T) e componente zonal do vento (u), (b) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) componente meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	76
Figura 5.18 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 850 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	77
Figura 5.19 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 500 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	79
Figura 5.20 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 300 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial equivalente (θ_e), (b) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19) e no dia sem dados no nível de 300 hPa (28). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	80
Figura 5.21 - Curva de inércia das 00 UTC para o nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.	81
Figura 5.22 - Curva de inércia das 12 UTC para o nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.	82
Figura 5.23- Dendrograma das 00 UTC utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível isobárico de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.	85
Figura 5.24- Dendrograma das 12 UTC utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível isobárico de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.	90
Figura 5.25- Peso dos fatores obtidos dos índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC. A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	97

Figura 5.26 – Série temporal dos índices de estabilidade das 00 UTC para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) TT e SI, (b) CAPE e LI e (c) PII e KO. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	98
Figura 5.27 – Série temporal dos índices de estabilidade das 12 UTC para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) TT e SWEAT, (b) CAPE e LI, (c) K e KO e (d) SI e CINE. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.	99
Figura 5.28 - Curva de inércia para os índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC.	100
Figura 5.29-Dendrograma utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para os índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC.	102

II - LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Valores dos índices de estabilidade calculados.	56
Tabela 5.2 – Grupo de dias dos elementos meteorológicos das 00 UTC formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-P.	86
Tabela 5.3 - Grupo de dias dos elementos meteorológicos das 12 UTC formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-P.	92
Tabela 5.4- Grupos de dias com características similares obtidos através da análise de agrupamentos para os índices de estabilidade.	102

III - LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).	33
Quadro 4.2 - Limiares do índice CAPE segundo Bluestein (1993).	37
Quadro 4.3 - Limiares do índice TT como função da probabilidade de ocorrência de tempestades conforme proposto por Miller (1972).	38
Quadro 4.4 - Limiares do índice K em função da probabilidade de ocorrência de tempestades. Os valores são aqueles originalmente propostos por George (1960).	39
Quadro 4.5 - Limiares do índice IS e condições de tempo esperadas (AWS, 1979).	41
Quadro 4.6 - Limiares do índice KO e probabilidade de tempestades (AWS, 1979). ..	42
Quadro 4.7 - Matriz de entrada das variáveis termodinâmicas e do vento.	46
Quadro 4.8 - Matriz de entrada dos índices de estabilidade.	46
Quadro 5.1 - Fatores rotacionados das 00 UTC nos níveis isobáricos.	64
Quadro 5.2 - Fatores rotacionados das 12 UTC nos níveis isobáricos.	73
Quadro 5.3 - Valores médios dos elementos meteorológicos às 00 UTC nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos elementos meteorológicos. (*) As componentes do vento foram consideradas em módulo.	87
Quadro 5.4 - Valores médios dos elementos meteorológicos às 12 UTC nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos elementos meteorológicos. (*) As componentes do vento foram consideradas em módulo.	93
Quadro 5.5- Fatores rotacionados para os índices de estabilidade das 00 UTC e 12 UTC.	95
Quadro 5.6 - Valores médios dos índices de estabilidade das 00 e 12 UTC nos grupos homogêneos obtidos a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos índices de estabilidade.	103

IV - LISTA DE ABREVIATURAS

AA - Análise de Agrupamentos
ACP- Análise em Componentes Principais
AF - Análise Fatorial
AL - Alagoas
ASAS - anticiclone subtropical do Atlântico Sul
BA - Bahia
CAPE - Energia Potencial Convectiva Disponível
CE - Ceará
CINE- Energia de Inibição Convectiva
CP - componente principal
CPTEC- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CT- Cross Totals
DOL - Distúrbio Ondulatório de Leste
DTeI - índice Delta-Tetae
EHC - Escola Henrique Castriciano
EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
GRADS - Grid Analysis and Display System
INMET- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KMO - Kaiser-Meyer-Olkin
LI - Índice de Levantamento ou Lifted Index
MA - Maranhão
NCAR- National Center for Atmospheric Research
NCDC- National Climatic Data Center
NCEP - National Centers for Environmental Predictions
NCL - nível de convecção por levantamento
NE - nível de equilíbrio
NEB - Nordeste do Brasil
PB - Paraíba
PE - Pernambuco
PI - Piauí
PII - Índice de Instabilidade Potencial ou Potential Instability Index

RAMS - Regional Atmospheric Modeling System

RN - Rio Grande do Norte

SI - Índice Showalter ou Showalter Index

SE - Sergipe

SWEAT - Severe Weather Threat ou SWEAT

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

TSM - temperatura da superfície do mar

TT - Total Totals

VCAN - vórtice ciclônico de altos níveis

VT - Vertical Totals

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

V - LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

a	cargas fatoriais
b	autovetor da matriz de dados
e	pressão de vapor
es	pressão de vapor à saturação
F	matriz de fatores comuns
g	aceleração da gravidade
i	número de colunas
j	número de linhas
K	grau Kelvin
m	número de fatores
P	pressão
$\sqrt{\lambda}$	autovalor na matriz
θ	temperatura potencial
θ_e	temperatura potencial equivalente
θ_{es}	temperatura potencial equivalente de saturação
θ	direção do vento
r	razão de mistura
rs	razão de mistura à saturação
Ta	temperatura do ar
Td	temperatura do ponto de orvalho
Tk	temperatura em graus Kelvin
TL	temperatura no nível de condensação por levantamento
Tv	temperatura virtual do ambiente
Tvp	temperatura virtual da parcela
u	componente zonal do vento
UR	umidade relativa em porcentagem
v	componente meridional do vento
V	velocidade do vento
X	variáveis
z	altura
Z	componentes principais

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Estado do Rio Grande do Norte, que integra o Polígono das Secas, o clima semiárido domina em 57% da sua área, do interior ao litoral norte. O estado tem ainda mais três tipos de clima, distribuídos da seguinte forma: árido, na área central e no litoral norte; subúmido, no litoral leste e nas áreas serranas do interior; e úmido, no litoral leste (CEPED, 2011). Essa distribuição climática está diretamente relacionada com a heterogeneidade temporal e espacial nos regimes pluviométricos do Rio Grande do Norte, que se traduz em baixa precipitação no interior e litoral norte, entre 400 a 600 mm anuais concentrados no período de fevereiro a maio, e altos índices de precipitação no litoral leste, entre fevereiro e julho, com valores entre 800 e 1200 mm anuais (SEPLAN, 2014). Esses valores climatológicos estão fundamentados numa grande variabilidade temporal que envolve extremos climáticos como situações de seca e de grande pluviosidade.

Nos meses de estiagem, a população enfrenta dificuldades que são mais graves em anos de seca. No ano de 2013 o Rio Grande do Norte enfrentou a pior seca dos últimos 50 anos, principalmente na sua área sudoeste, onde animais morreram e lavouras foram perdidas, prejudicando a economia do estado. Os impactos da seca levaram à decretação do estado de emergência em 150 dos 167 municípios (<http://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2013/12/seca-obriga-moradores-do-rn-gastar-bolsa-familia-com-agua-potavel.html>).

Os eventos de chuva intensa, outro componente importante da variabilidade climática do estado, também causam grandes transtornos à população, principalmente em áreas urbanas. No mês de junho de 2014, mês de realização da Copa do Mundo no Brasil, a cidade sede de Natal entrou em estado de calamidade após deslizamentos provocados por 50 horas ininterruptas de chuva, que totalizaram 333 mm (http://portal.natal.rn.gov.br/_anexos/publicacao/dom/dom_20140616.pdf). No mês de setembro do mesmo ano, outro episódio de chuva forte na cidade provocou o desabamento de 37 casas e a interdição de outras 109, gerou 196 pontos de alagamentos, ocasionou deslizamentos de encosta, destruiu uma escadaria na praia de Ponta Negra, importante ponto turístico da cidade, entre outros prejuízos. Nesse evento o total de precipitação em 24 horas foi de 55 mm

(<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2014/09/09/morro-em-natal-volta-a-ceder-apos-chuva-de-55-mm-e-lama-invade-orla.htm>).

Os episódios de inundações bruscas somam, de 1991 a 2010, 91 registros oficiais no Rio Grande do Norte, sendo o Leste Potiguar a mesorregião mais impactada, fato esse que está relacionado com sua localização no litoral leste, que tem altos índices de precipitação e a maior densidade demográfica em área urbana do estado (CEPED, 2011).

A previsão de eventos intensos constitui um desafio nessa área do globo, onde a interação entre aspectos dinâmicos e termodinâmicos de sistemas atmosféricos de diferentes escalas é fundamental. Modelos numéricos e índices de estabilidade são alguns dos recursos usados no trabalho de previsão que podem necessitar de ajustes para melhor responderem em situações reais na região tropical.

A partir do estudo de eventos intensos de chuva é possível obter informações no tempo e espaço de características como intensidade, duração e severidade de sistemas atmosféricos, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas em curto prazo para minimizar impactos causados por esses eventos. A precipitação está relacionada com características da estabilidade atmosférica, o que possibilita utilizar técnicas de análise multivariada para investigar a existência de padrões de estabilidade que diferenciem situações com e sem precipitação e, em particular, que também forneçam um indicativo do volume e intensidade da chuva.

No presente trabalho é investigado um mês que se caracterizou pela ocorrência de um evento de precipitação intensa no Estado do Rio Grande do Norte através da aplicação de técnicas de análise multivariada a índices de estabilidade selecionados e a outras variáveis meteorológicas em altitude. Também foram utilizadas técnicas de análise meteorológica para diagnosticar as condições de grande escala e mesoescala envolvidas no evento. Espera-se que o conhecimento adquirido auxilie nas atividades de previsão meteorológica, particularmente de eventos de precipitação intensa e, em consequência, contribua para a redução de danos causados à sociedade.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é investigar os mecanismos físicos que atuam em um mês chuvoso no setor nordeste do Nordeste do Brasil, com foco no Estado do Rio Grande do Norte, através de análise multivariada e meteorológica.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos necessários à investigação são:

- Diagnosticar a evolução temporal da nebulosidade, precipitação e vento em superfície;
- Diagnosticar o ambiente sinótico em evento de chuva intensa;
- Identificar interrelações entre variáveis meteorológicas em ar superior;
- Diagnosticar a evolução temporal de índices de estabilidade.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Molion e Bernardo (2002) e Reboita et al. (2010), há três áreas com regimes de chuva distintos no Nordeste do Brasil (NEB): norte, leste e sul. As chuvas no Rio Grande do Norte são diretamente moduladas por circulações atmosféricas que atuam nas duas primeiras: anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), vórtices ciclônicos dos altos níveis (VCAN) / cavado de ar superior do Nordeste-Atlântico Sul, distúrbios ondulatórios na área dos ventos alísios, sistemas convectivos de mesoescala, sistemas de brisa, e convecção por aquecimento radiativo da superfície (convecção local). Molion e Bernardo (2002) destacam ainda a influência das anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) sobre a precipitação no NEB. No Oceano Pacífico, os eventos de La Niña intensos favorecem anos com chuva acima da média, enquanto que eventos de El Niño intensos estão associados a anos com chuvas abaixo da média. No Oceano Atlântico, o chamado Dipolo do Atlântico, caracterizado por anomalias de TSM positivas (negativas) no Atlântico Sul e anomalias negativas (positivas) no Atlântico Norte, é associado com anos chuvosos (secos) na região (MOLION e BERNARDO, 2002).

Bristot et al. (2000) estudaram as condições de pluviometria e as consequências de estiagem na cultura do feijão no Rio Grande do Norte (RN). Os autores utilizaram dados anuais de precipitação para o RN do período de 1962 a 1997 e resultados das safras anuais de feijão no período de 1988 a 1997. O índice pluviométrico médio anual calculado para todo o Estado é de 823,6 mm, apresentando variação entre as diferentes regiões: a maior média anual é observada na região Leste do Estado (1246,3 mm), e a menor, na região Central (630,4 mm), enquanto que na região Agreste o índice é de 639,1 mm, e na região Oeste é de 778,4 mm. As conclusões encontradas foram que as chuvas ocorrem primeiramente na região Oeste, que tem o período chuvoso concentrado entre os meses de fevereiro e maio, fazendo com que os índices pluviométricos ocorridos neste período representem 75,6% do total anual das chuvas nessa área. Nas regiões situadas mais a leste no estado, as regiões Leste e Agreste, o período chuvoso é mais longo, entre os meses de fevereiro e julho. Na região do Agreste, a maior produtora de feijão, as chuvas que ocorrem nesse período representam 83,0% do total

pluviométrico anual. Na região Leste, essas chuvas são responsáveis por 86,6% do total anual.

Santos e Silva et al. (2012) estudaram a distribuição espacial da precipitação no Estado do Rio Grande do Norte para o período de 1998 a 2008, através de estimativas de precipitação mensal fornecidas pelo satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) e precipitação observada (algoritmo 3B43_V6 e Universidade de Delaware, respectivamente). O ciclo anual de precipitação mensal estimada e observada permitiu dividir o Estado em três regiões: Litoral, Seridó e Oeste. Os maiores valores de precipitação são observados no Litoral, que apresenta o máximo principal em junho. Os meses de março a maio são caracterizados por máximos secundários, representando juntos cerca de 40% do total anual de precipitação. A precipitação média acumulada de março a julho corresponde a 75% do total anual da chuva observada. A precipitação observada no Seridó e no Oeste apresenta máximo em março. A precipitação no primeiro semestre (janeiro a junho) representa 92% do total anual. Nas três regiões o mínimo de precipitação ocorre no mês de novembro.

Atualmente vários estudos vêm sendo desenvolvidos no intuito de ampliar o conhecimento sobre os mecanismos físicos envolvidos em eventos de precipitação. Neles, uma das informações utilizadas são os índices de estabilidade termodinâmicos, que são comumente usados na previsão de eventos intensos de precipitação. Entretanto, ainda são poucos os estudos sobre esses índices em regiões equatoriais, a exemplo do NEB. Um exemplo é o trabalho de Santos e Silva et al. (2011) que analisaram a variação anual da média mensal dos índices CAPE, CINE, TT, K e água precipitável, de janeiro de 2002 a dezembro de 2009, na cidade de Maxaranguape -RN. Os resultados encontrados foram consistentes entre os índices, pois valores elevados do CAPE, TT, K e água precipitável associam-se a mínimos da CINE (Fig. 3.1). O máximo CAPE foi de 1300 J kg^{-1} em março, e o mínimo 200 J kg^{-1} em setembro. Os máximos dos índices K e água precipitável ocorreram em abril, e do índice TT em julho. Os máximos e mínimos dos índices coincidem com a precipitação. Observe que a estação chuvosa ocorre de março a julho, e a seca de agosto a fevereiro.

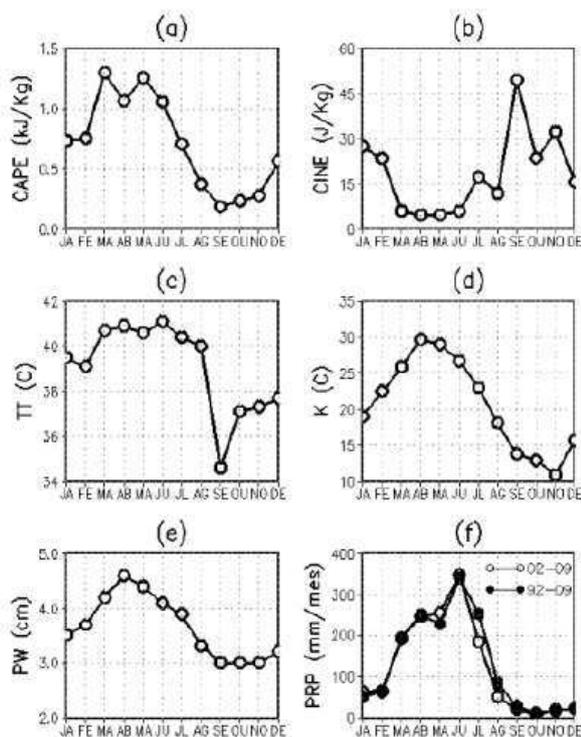


Figura 3.1- Variação mensal de: CAPE, CINE, TT e K (a-d, respectivamente) para o período de 2002 a 2009; conteúdo de água precipitável em cm (e) para o período de 2002 a 2009; precipitação pluviométrica (f) para o período entre 2002 e 2009 e para o período de 1992 a 2009, conforme legenda (Fonte: SANTOS e SILVA et al., 2011).

Diniz et al. (2004) investigaram as condições de tempo significativas no aeroporto de Petrolina-PE e sua relação com atividade convectiva intensa. Os autores utilizaram índices de estabilidade atmosférica, perfis termodinâmicos e do vento, e imagens de radar meteorológico. Os índices de estabilidade foram uma importante ferramenta para indicar situações favoráveis ao desenvolvimento de tempestades. Analisando em conjunto os perfis termodinâmicos e os perfis do vento, os autores observaram que as variações significativas na direção e intensidade do vento com a altura mostraram uma associação direta com camadas de inversão térmica. Os campos de precipitação obtidos com o radar meteorológico foram decisivos na avaliação da atividade convectiva da região, já que possibilitaram diagnosticar a estrutura e intensidade das tempestades que se desenvolveram na área de Petrolina.

Outros autores analisaram a relação entre precipitação e índices de estabilidade para outras áreas do Brasil com o objetivo de identificar os índices que melhor explicam a ocorrência de precipitação na região de estudo. Cardoso et al. (2006) analisaram a relação entre índices de estabilidade e precipitação em Porto Alegre - RS através de

correlações para o período de 1990 a 2005, nos meses de janeiro e julho (representativos do verão e inverno, respectivamente). Os dados foram divididos em três classes de valores de precipitação diária. Os autores concluíram para o mês de janeiro que os índices K, Lifted e Cross Totals foram os que melhor explicaram a variabilidade da chuva, enquanto que os índices Showalter e SWEAT foram os menos representativos. No mês de julho, o Vertical Totals e o Cross Totals foram os índices que melhor explicaram a variabilidade da chuva, enquanto que os menos representativos foram o Total Totals, o SWEAT e o K.

Tavares (2012) analisou as condições termodinâmicas da atmosfera durante os eventos de precipitação da estação chuvosa (dezembro a maio) de Belém - PA através de índices de estabilidade, para o período de 1987 a 2007. Os resultados mostraram que em 56% dos casos o índice CAPE indica um ambiente precursor de forte instabilidade, enquanto que os índices K, TT e LI representam bem o ambiente sinótico, prognosticando as tempestades com chuvas fortes com índice de acerto de até 74%. O autor destaca que a convecção severa pode se desenvolver mesmo com baixos valores de CAPE, porém em 46% dos eventos analisados de precipitação intensa, a estrutura vertical média apresenta grande conteúdo de umidade e CAPE acima de 1000 Jkg^{-1} , valor limite para o desenvolvimento da convecção úmida profunda. O autor ressalta que as condições termodinâmicas são necessárias, mas não são as únicas responsáveis pela formação da convecção úmida profunda com precipitações extremas na estação chuvosa da região de Belém. Os eventos extremos decorrem da atuação conjunta de vários sistemas, que realimentam a convecção.

Mourão et al. (2006) estudaram o comportamento dos índices de estabilidade em simulações do Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) de dois casos de tempestade com precipitação elevada e ventos fortes no Rio de Janeiro-RJ. No primeiro caso, uma linha de instabilidade, os índices K e TT simulados foram bons, apresentando seus valores críticos nas áreas onde as taxas de precipitação observadas tiveram um pico. O campo do índice Lapse Rate também mostrou uma concordância razoável entre os locais com valores mais críticos de Lapse Rate e aqueles com chuvas observadas mais intensas. Contudo, os resultados deste índice não foram tão bons quanto os dos outros dois (K e TT). No segundo caso, uma frente fria, os resultados dos índices K e TT, representados pelos seus valores críticos, também foram bons na definição das áreas mais favoráveis para o desenvolvimento e deslocamento da convecção profunda. Os resultados do índice Lapse Rate foram melhores do que os dos outros índices.

Outra ferramenta usada por diversos autores nos estudos sobre precipitação é a Análise Multivariada, como a Análise (Fatorial) de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Agrupamentos (AA). Essas técnicas estatísticas são muito utilizadas na investigação da variabilidade temporal e espacial de variáveis meteorológicas, a exemplo da identificação de padrões temporais e/ou espaciais da circulação atmosférica e da precipitação, entre outros.

Araújo (2012) utilizou dados de precipitação mensal de 522 postos distribuídos no NEB obtidos do National Climatic Data Center (NCDC), com o objetivo de identificar os padrões de precipitação. Foi aplicado o método da ACP, retendo nas três primeiras cargas fatoriais temporais rotacionadas 34,95%, 30,76% e 30,45% da variância total dos dados, respectivamente, totalizando mais de 96% de variância explicada. Posteriormente, aplicou o método de agrupamento hierárquico aglomerativo de Ward aos três fatores encontrados na ACP, identificando quatro regiões homogêneas, denominadas grupos. O peso do primeiro fator comum mostra que as maiores contribuições ocorrem na região litorânea (grupo 4). O peso associado ao segundo fator apresenta maiores contribuições na região extremo noroeste (grupo 1). O peso do terceiro fator evidencia o regime pluviométrico na região sul e oeste (grupo 3), e para estes três fatores, a região agreste (grupo 2) apresenta as menores contribuições. O grupo 1 representa a região do norte (meio-norte), que tem como principal sistema com chuva associada os VCAN; o grupo 2 engloba o semiárido nordestino, diretamente influenciado pela ZCIT; no grupo 3, próximo ao cerrado central, atuam as frentes frias provenientes do sul do país, e o grupo 4, que se estende na área costeira, da Bahia ao Rio Grande do Norte, tem como principais sistemas com chuva associada os DOL (Distúrbio Ondulatório de Leste) e os sistemas frontais e, em menor escala, os sistemas de brisa.

Maia (2013), através da ACP aplicada aos dados de precipitação média mensal de 40 estações, gerou dois padrões de precipitação no Estado do Rio Grande do Norte: o primeiro, com máximo em março, característico das regiões Central e Oeste do estado, e o segundo, com dois máximos, abril e junho, característico das regiões Leste e Agreste. A primeira componente principal (CP) explicou 57,3% da variância dos dados originais, a segunda 33,8% e a terceira 5,6%. A primeira e a segunda CP's, que explicaram mais de 90% da variância total dos dados, foram consideradas suficientes para a identificação dos diferentes padrões de precipitação existentes no estado.

Braga et al. (2012), utilizando totais médios mensais de um longo período de observações de precipitação (1963-2007) de 67 estações localizadas no Estado do Rio Grande do Norte, aplicaram a ACP para estimar séries temporais. Foram retidas as três primeiras CP's, que explicaram aproximadamente 94,0% da variância total dos dados mensais de precipitação, conforme critério sugerido por Kaiser. Foi aplicado o agrupamento pelo método K-means aos três primeiros fatores comuns temporais da precipitação, que dividiu o estado em quatro regiões homogêneas: Agreste (G1) e Litoral (G2), com chuvas associadas aos sistemas de leste; Alto Apodi e Serra Central (G3) na qual, além da atuação da ZCIT, existe um efeito orográfico acentuado, e Central e Norte (G4), com chuvas influenciadas principalmente pela ZCIT (Fig. 3.2). Foram selecionadas duas regiões com regimes pluviométricos distintos (litoral e semiárido) para estimar séries temporais de precipitação utilizando o método da ACP. O erro percentual médio na região litorânea foi de 12%, e de 19,8% na região semiárida, revelando eficácia na estimativa de dados faltosos, principalmente em regiões com regime pluviométrico mais regular.

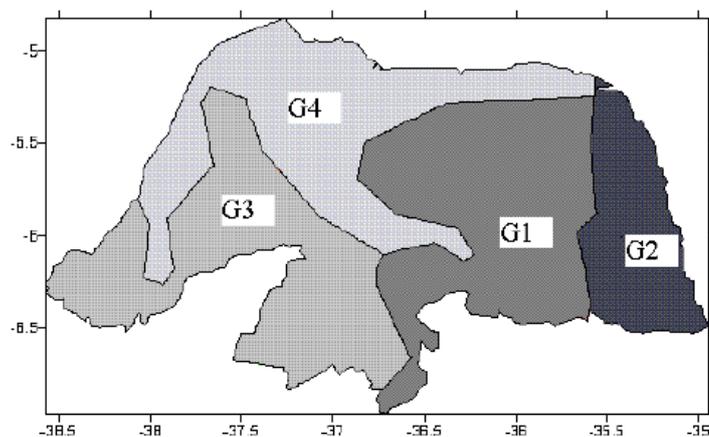


Figura 3.2- Regiões homogêneas de precipitação através do método de K-means. (Fonte: BRAGA et al., 2012).

A ACP e a AA também tem sido utilizadas para investigar a estabilidade da atmosfera. Bentley et al. (2012) examinaram ambientes sinóticos favoráveis ao desenvolvimento de tempestades na região metropolitana de Atlanta, Geórgia. A pesquisa analisa 244 dias em que houve tempestades. São utilizados dados de radar e de altitude obtidos a partir das reanálises do NCEP/NCAR. Esses últimos possibilitaram obter as seguintes variáveis derivadas: índices de estabilidade CAPE, TT, LI, e K, média da temperatura potencial da camada de mistura, média da razão de mistura da

camada de mistura, espessura média da camada e água precipitável. Através da ACP e da AA, os dias foram agrupados em quatro grupos de características semelhantes. O grupo 1 e o grupo 2 contêm dias com valores de instabilidade de moderada a forte, em todos os índices, enquanto que o grupo 4 representa condições estáveis. O grupo 3, em especial, foi de difícil análise já que, enquanto os índices K e Total Totals indicam instabilidade para o desenvolvimento de tempestade, o índice de levantamento e o CAPE são ligeiramente instáveis. Porém, foi possível identificar através de imagens de radar que houve atividade convectiva em todos os dias analisados dos quatro grupos. A mudança de instabilidade entre os quatro grupos deve-se a uma diferença sutil de temperatura em 500 hPa; os grupos 3 e 4 têm ambientes um pouco mais quentes do que os dos grupos 1 e 2.

Dalezios e Papamanolis (1991) examinaram o desempenho de dez índices de estabilidade atmosférica na previsão de granizo no período de abril a setembro de 1987 e 1988 na Grécia. Os dias foram divididos em 7 categorias de convecção, variando da menos intensa a mais intensa com queda de granizo. A avaliação dos índices foi realizada através da análise multivariada, utilizando a Análise Fatorial em Componentes Principais. Os resultados indicaram que três fatores foram suficientes para descrever o desenvolvimento convectivo. O fator 1 representou a instabilidade potencial para o ar quente ascendente, bem como para o ar descendente, enquanto que os fatores 2 e 3 representaram a extensão vertical da umidade na baixa troposfera. Os índices de instabilidade com alta carga fatorial podem ser utilizados em uma metodologia para a previsão de granizo.

Muitas pesquisas com foco na precipitação e, em particular, em eventos intensos de chuva, utilizam métodos de análise meteorológica para investigar as condições atmosféricas em escala sinótica e/ou em mesoescala associada aos eventos. No caso do NEB, há estudos nessa linha para o semiárido, a exemplo de Barbosa e Correia (2005), Silva Aragão et al. (2007), Silva et al. (2008), Correia et al. (2012), entre outros, e também para outras áreas, alguns dos quais são relatados a seguir.

Santos et al. (2012) investigaram um evento extremo de chuva registrado em junho de 2006 na cidade de Salvador - BA usando dados observacionais de superfície e altitude, dados de reanálise, imagens de satélite meteorológico e informações de desastres. Os autores identificaram ventos fracos em toda a troposfera e energia potencial convectiva disponível máxima de 3.233 Jkg^{-1} , quinze horas antes do período de chuva forte. Áreas de convecção profunda organizada em mesoescala caracterizaram

esse evento que foi favorecido pela convergência associado a um distúrbio ondulatório de leste que chegou à costa leste do Nordeste do Brasil após se propagar sobre o Atlântico Sul. Sua velocidade de fase foi estimada em 10 m s^{-1} nos diagramas de Hovmöller da componente meridional do vento no nível de 700 hPa, e em imagens de satélite meteorológico.

Paiva Neto et al. (2002) analisaram um caso de distúrbio de leste que atuou no NEB, simultaneamente com um VCAN, em fevereiro de 2000. No estudo foram utilizados dados de reanálise, totais diários de precipitação e imagens do satélite meteorológico METEOSAT. A estrutura e a propagação do distúrbio foram melhor visualizadas em um diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa no nível de 500 hPa. Um VCAN se forma na área do NEB no dia 4, perdurando até o dia 14, enquanto que o distúrbio de leste atinge o continente no dia 13. Nas imagens de satélite desse dia há uma área de nebulosidade no litoral leste, do norte da Bahia ao sul da Paraíba, com chuva intensa associada em algumas localidades do NEB. Esse evento foi seguido por enfraquecimento do VCAN e por uma sequência de dias caracterizados por céu nublado e chuvas fortes.

Mota (1998) utilizou a técnica de composição para determinar a estrutura e as propriedades de DOL no NEB. A composição foi realizada selecionando as ondas que apresentaram um período superior a dois dias nos diagramas de Hovmöller da componente meridional do vento em 700 hPa. O autor observou que houve 13 distúrbios de leste que cruzaram a longitude de 35°W , na latitude de 5°S , nos meses de junho e julho de 1994. As flutuações mais intensas da componente meridional do vento foram vistas em 700 hPa, o máximo de vorticidade ciclônica ocorreu no cavado em 700 hPa e a vorticidade anticiclônica máxima foi encontrada à frente do cavado em 225 hPa. Na composição da precipitação registrada na cidade de Natal, relacionada com a onda média em 700 hPa, a taxa de precipitação mais elevada foi detectada entre o cavado e a crista. A maior taxa de precipitação, equivalente a 30 mm/dia, ocorreu na área dos ventos de norte, enquanto que a menor taxa, de aproximadamente 6 mm/dia, ocorreu na área dos ventos de sul.

Ribeiro et al. (2013) analisaram a relação entre DOL, formação de linhas de instabilidade e volume de chuva no estado da Paraíba em julho de 2011. Os autores utilizaram dados de reanálise da componente meridional do vento, imagens realçadas de satélite, totais diários de precipitação e dados de sondagens atmosféricas de ar superior de Natal-RN. O DOL se caracterizou pelo desenvolvimento de convecção profunda

organizada em linha, no período noturno dos dias 15 e 16. A propagação para oeste do DOL sobre o Oceano Atlântico, e chegada ao NEB no dia 15, foram detectadas em um diagrama de Hovmöller da componente meridional do vento no nível de 600 hPa. A formação da linha de instabilidade na noite do dia 15 foi precedida por ventos com intensidade moderada na baixa e média troposfera. Ventos fracos e com direção variável foram observados nos dias 16 e 17, quando grandes volumes de chuva foram registrados no Litoral, Brejo e Agreste do Estado da Paraíba.

A revisão apresentada indica a importância das técnicas de análise multivariada e de análise meteorológica no estudo de eventos de chuva intensa com o objetivo de identificar padrões que sirvam de subsídio em atividades de monitoramento e previsão desses eventos.

CAPÍTULO 4

DADOS E METODOLOGIA

4.1- Área e Período de Estudo

A área foco deste estudo é o Estado do Rio Grande do Norte, que está situado entre os paralelos de 4°49'53''S e 6°58'57''S e os meridianos de 35°58'03''W e 38°36'12''W (Figura 4.1). Sua área é de 52.811,047 km², que representa 0,66% da superfície territorial brasileira e 3,41% da Região Nordeste (IBGE, 2010). Limita-se ao norte e a leste com o Oceano Atlântico, ao sul com o Estado da Paraíba, e a oeste com o Estado do Ceará.

O Estado do Rio Grande do Norte é dividido em quatro mesorregiões geográficas: Leste Potiguar, Agreste Potiguar, Central Potiguar e Oeste Potiguar (CEPED, 2014). O Leste Potiguar corresponde à orla oriental atlântica do estado. O Agreste Potiguar constitui uma faixa ou área de transição paralela entre o litoral leste e o interior do estado. A Central Potiguar é a região localizada na porção central, estendendo-se desde o litoral norte até o sul do estado. O Oeste Potiguar estende-se do litoral norte até o trecho sudoeste do estado. Apresenta quatro tipos de clima: árido, semiárido, subúmido seco e úmido.

A escolha do Rio Grande do Norte foi motivada pela importância dos impactos sociais e econômicos causados por eventos de precipitação intensa no estado. Dois critérios foram utilizados na seleção do mês de estudo: (a) a ocorrência de evento de chuva intensa, e (b) a série de dados de ar superior completa ou quase completa. Foi selecionado para análise um mês da quadra chuvosa da área costeira leste que se caracterizou pela ocorrência de um evento extremo de chuva: julho de 2011.

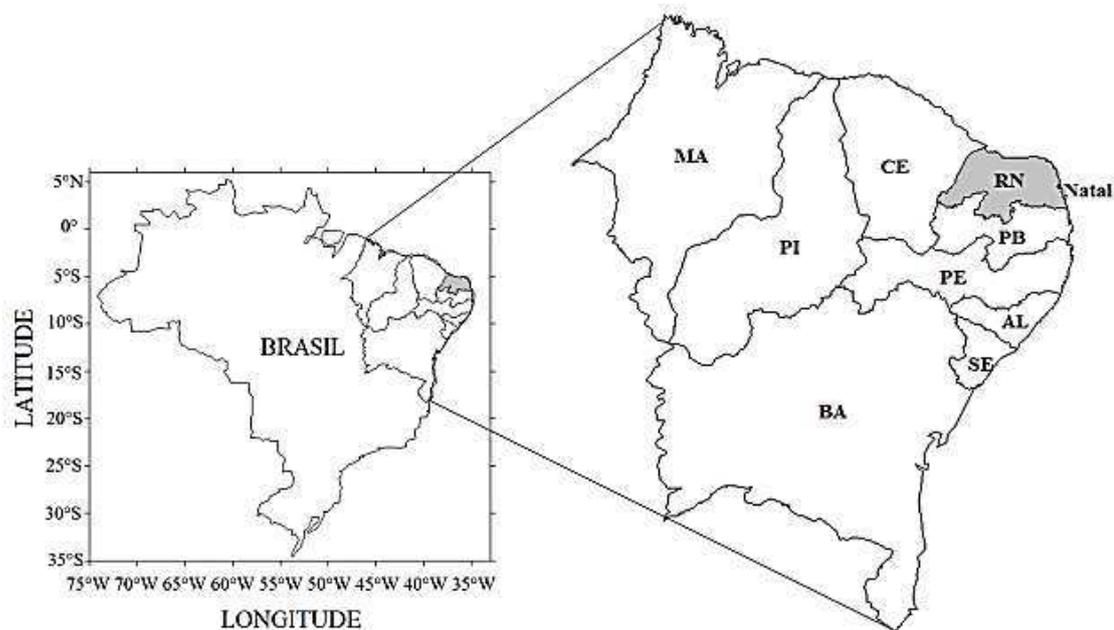


Figura 4.1- Mapa do Brasil com destaque para a Região Nordeste e seus estados: Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA) e, sombreado de cinza, o Estado do Rio Grande do Norte (RN), com a localização de sua capital Natal.

4.2- Dados

Na realização deste estudo foram utilizados:

- (a) Totais diários de precipitação observados no mês de julho de 2011 em: 151 postos pluviométricos pertencentes à rede de monitoramento da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), quatro estações meteorológicas (Fig. 4.2) operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Quadro 4.1), e na escola Henrique Castriciano (EHC), em Natal. A observação dos totais diários de precipitação é feita diariamente às 10 UTC pela EMPARN e às 12 UTC pelo INMET.
- (b) Dados de sondagens atmosféricas de ar superior do mês de julho de 2011 realizadas às 00 UTC e às 12 UTC na estação de altitude de Natal ($5^{\circ} 54' 36''$ S; $35^{\circ} 15'$ W; 49,0 m) (Fig. 4.2), cujo número sinótico é 82599.

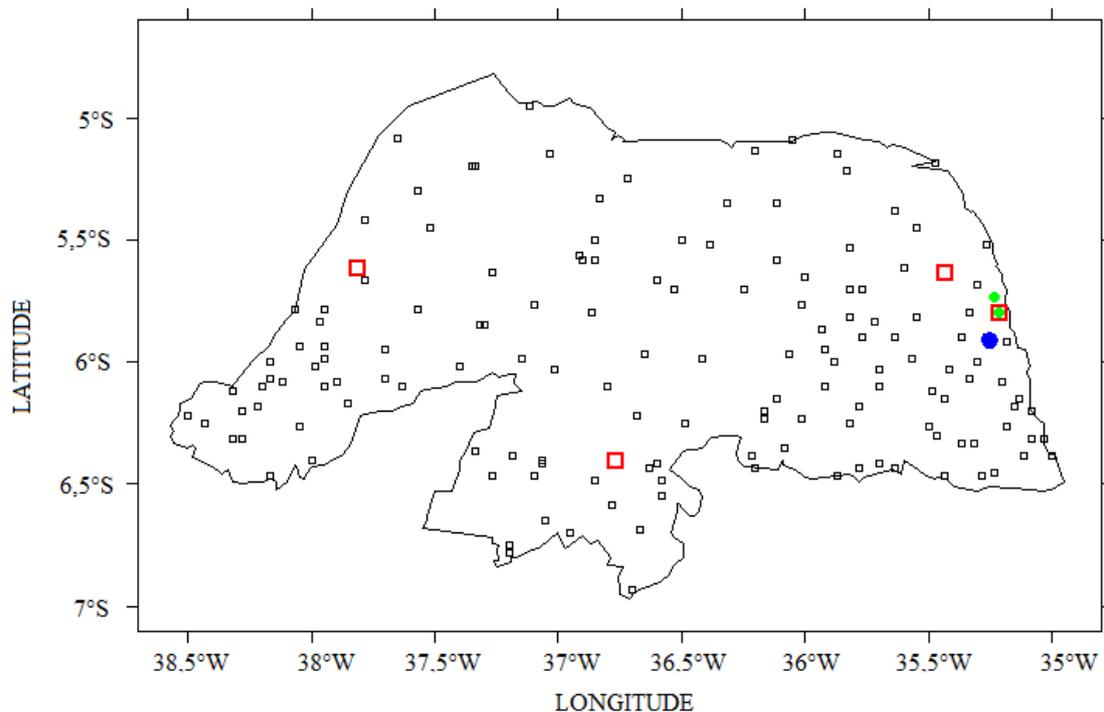


Figura 4.2 - Mapa do Estado do Rio Grande do Norte com a localização da estação de altitude (círculo azul), dos postos pluviométricos pertencentes à EMPARN (quadrados pretos) e das estações meteorológicas de superfície pertencentes ao INMET (quadrados vermelhos), com destaque para a estação localizada na cidade de Natal (quadrado vermelho/verde). O círculo verde representa a estação da Escola Henrique Castriciano (EHC) em Natal.

Quadro 4.1 - Coordenadas geográficas das estações meteorológicas de superfície pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Nome	Latitude (sul)	Longitude (oeste)	Altitude (m)
APODI (BASE FISICA)	5° 37'	37° 49'	120
CEARÁ MIRIM (PREFEITURA)	5° 38'	35° 26'	40
CRUZETA	6° 24'	36° 46'	140
NATAL (UFRN)	5° 48'	35° 13'	49

(c) Imagens realçadas do satélite GOES-12 da Região Nordeste e adjacências, disponibilizadas com resolução temporal de 15 minutos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) no endereço eletrônico http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp.

(d) Reanálises dos National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), com espaçamento de grade horizontal de 2,5° por 2,5°, para os horários sinóticos e níveis isobáricos padrões, no endereço eletrônico <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>.

4.3- Métodos

4.3.1- Análise da estabilidade da atmosfera

4.3.1.1- Cálculo das variáveis termodinâmicas

Inicialmente foram utilizadas as variáveis disponíveis nas sondagens: direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, temperatura do ar, temperatura de ponto do orvalho e umidade relativa. A partir delas foram calculadas: razão de mistura (r), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}), componente zonal do vento (u) e componente meridional do vento (v). Vale destacar que as informações do vento foram usadas em todas as análises deste trabalho, razão pela qual fazem parte desta subseção.

A razão de mistura foi calculada através da equação:

$$r = \frac{622 * e}{P - e} \quad (1)$$

na qual,

r é a razão de mistura (g/kg)

P é a pressão (hPa)

e é a pressão de vapor (hPa) calculada através da equação:

$$e = \frac{e_s * UR}{100} \quad (2)$$

na qual,

UR é a umidade relativa em porcentagem

e_s é a pressão de vapor à saturação (hPa) dada pela equação (BOLTON, 1980):

$$e_s = 6,112 * \exp \frac{(a*T)}{b+T} \quad (3)$$

na qual,

a (7,5 quando $T > 0$ ou 9,5 quando $T \leq 0$) e b (237,3 quando $T > 0$ ou 265,5 quando $T \leq 0$) são constantes.

As temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) foram calculadas usando as equações propostas por Bolton (1980):

$$\theta = T_K \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1-0,28 \times 10^{-3} r)} \quad (4)$$

$$\theta_e = \theta \exp \left(2,675 \frac{r}{T_L} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{es} = \theta \exp \left(2,675 \frac{r_s}{T_k} \right) \quad (6)$$

nas quais:

T_k é a temperatura (K)

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

$$T_L = 55,0 + \frac{1}{\frac{1}{T_k - 55} - \frac{\ln \left(\frac{UR}{100} \right)}{2840}} \quad (7)$$

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

$$r_s = \frac{622 * e_s}{P - e_s} \quad (8)$$

Conforme mencionado anteriormente, além dessas variáveis termodinâmicas a componente zonal (u) e a componente meridional (v) do vento foram calculadas através das equações:

$$u = -V \text{ sen} \theta \quad (9)$$

$$v = -V \cos\theta \quad (10)$$

na qual,

V é a velocidade do vento (ms^{-1})

e θ é a direção do vento (radianos).

4.3.1.2- Índices de Estabilidade

Os índices de estabilidade servem como um bom indicativo para avaliar a possibilidade de ocorrência de tempestades em uma determinada região, sendo úteis na previsão de eventos intensos de precipitação.

(a) Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE)

O índice Energia Potencial Convectiva Disponível (Convective Available Potential Energy, ou CAPE) mede a energia potencial disponível para a convecção. Quanto maior é a diferença entre a taxa da variação vertical de temperatura do ambiente e da parcela, maior é o CAPE, o que implica em um movimento de ascensão da parcela devido à sua flutuabilidade. Valores característicos de CAPE e condições de tempo esperadas são apresentados no Quadro 4.2. O valor do CAPE (Jkg^{-1}) pode ser calculado a partir da equação:

$$CAPE = \int_{z=NCL}^{z=NE} g \frac{Tvp - Tv}{Tv} dz \quad (11)$$

na qual:

NE é o nível de equilíbrio (m)

NCL é o nível de convecção por levantamento (m)

g é a aceleração da gravidade (ms^{-2})

Tv é a temperatura virtual do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

Tvp é a temperatura virtual da parcela ($^{\circ}\text{C}$).

Quadro 4.2- Limiares do índice CAPE segundo Bluestein (1993).

CAPE (Jkg^{-1})	Condições de tempo esperadas
$500 \leq \text{CAPE} < 1000$	Convecção fraca
$1000 \leq \text{CAPE} < 2500$	Convecção moderada
$\text{CAPE} \geq 2500$	Convecção forte

(b) Energia de Inibição Convectiva (CINE)

O índice Energia de Inibição Convectiva (Convective Inhibition Energy, ou CINE) é definido de forma análoga ao CAPE, porém os limites de integração são a superfície ($z = \text{sup}$) e o NCL. Dessa forma, este índice contabiliza a barreira energética que uma parcela de ar precisa superar para alcançar o NCE. Logo, de maneira geral, quanto maior o CINE menor é a probabilidade de ocorrência de tempestades. O valor do CINE (Jkg^{-1}) pode ser calculado a partir da equação:

$$CINE = \int_{z=\text{sup}}^{z=NCL} g \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz \quad (12)$$

na qual

NCL é o nível de convecção por levantamento (m)

sup é o nível da superfície (m)

g é a aceleração da gravidade (ms^{-2})

T_v é a temperatura virtual do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_{vp} é a temperatura virtual da parcela ($^{\circ}\text{C}$).

(c) Cross Totals (CT)

O índice Cross Totals (CT) combina o teor de umidade na baixa troposfera com a temperatura na média troposfera; valores maiores do que 18°C indicam desenvolvimentos convectivos. O valor do índice CT ($^{\circ}\text{C}$) pode ser calculado por (MILLER, 1972):

$$CT = Td_{850} - T_{500} \quad (13)$$

na qual,

Td_{850} é a temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$) em 850 hPa

T_{500} é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em 500 hPa.

(d) Vertical Totals (VT)

O índice Vertical Totals (VT) expressa a taxa de variação vertical da temperatura entre duas superfícies isobáricas, geralmente 850 e 500 hPa, sendo que usualmente desenvolvimentos convectivos têm este índice maior do que 26°C. O valor do índice VT (°C) pode ser calculado por (MILLER, 1972):

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (14)$$

na qual,

T_{850} é a temperatura do ar (°C) em 850 hPa

T_{500} é a temperatura do ar (°C) em 500 hPa.

(e) Total Totals (TT)

O índice Total Totals (TT) é dado pela soma de outros dois índices convectivos, o Vertical Totals e o Cross Totals. Ele é uma medida de estabilidade estática associada à disponibilidade de umidade da atmosfera (Quadro 4.3). O valor do índice TT (°C) pode ser calculado por (MILLER, 1972):

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2 * T_{500} \quad (15)$$

na qual as variáveis tem o mesmo significado visto nas equações (13) e (14).

Quadro 4.3- Limiares do índice TT como função da probabilidade de ocorrência de tempestades conforme proposto por Miller (1972).

TT (°C)	Probabilidade de tempestades
TT<43	Improvável
43<TT<44	Tempestades isoladas
45<TT<46	Tempestades dispersas
47<TT<48	Tempestades dispersas e severas isoladas
49<TT<50	Tempestades dispersas e tornados isolados
51<TT<52	Tempestades dispersas numerosas e tornados isolados
53<TT<55	Tempestades numerosas e tornados dispersos
56>TT	Tornados

(f) K

O índice K é muito usado para avaliar chuvas fortes, pois a presença de umidade em 850 e 700 hPa está relacionada com muita água precipitável (Quadro 4.4). O índice K (°C) é obtido através da equação (GEORGE, 1960):

$$K = (T_{850} - T_{500}) + [Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})] \quad (16)$$

na qual,

T_{850} é a temperatura do ar (°C) em 850 hPa

T_{500} é a temperatura do ar (°C) em 500 hPa

Td_{850} é a temperatura do ponto de orvalho (°C) em 850 hPa

T_{700} é a temperatura do ar (°C) em 700 hPa

Td_{700} é a temperatura do ponto de orvalho (°C) em 700 hPa.

Quadro 4.4- Limiares do índice K em função da probabilidade de ocorrência de tempestades. Os valores são aqueles originalmente propostos por George (1960).

K (°C)	Probabilidade de tempestades
K < 20	Improvável
20 < K < 25	Tempestades isoladas
25 < K < 30	Tempestades muito dispersas
30 < K < 35	Tempestades dispersas
35 < K < 40	Muitas tempestades

(g) SWEAT adaptado para o hemisfério sul

O índice SWEAT (Severe Weather Threat, ou SWEAT) foi formulado originalmente por Miller (1972) e modificado para o hemisfério Sul por Nascimento (2005). Sua definição e considerações adaptadas para o hemisfério sul são:

$$SWEAT = 20 (TT - 49) + 12 Td_{850} + 2 V_{850} + V_{500} + 125 \{sen (dir_{500} - dir_{850}) + 0,2\} \quad (17)$$

na qual,

TT é o valor do índice Total Totals (°C)

Td_{850} é a temperatura do ponto de orvalho (°C) em 850 hPa

V_{850} é a velocidade do vento (nós) em 850 hPa

V_{500} é a velocidade do vento (nós) em 500 hPa

$(dir_{500}-dir_{850})$ é a diferença entre as direções do vento (graus) em 500 hPa e 850 hPa.

O último termo da equação $(dir_{500}-dir_{850})$ deve ser igualado a zero se o valor de TT for menor que 49. Se Td_{850} for menor que zero, ele também deve ser igualado a zero. No caso do hemisfério sul, o último termo da equação deve ser desprezado se pelo menos uma das seguintes condições não for satisfeita: (i) direção do vento em 850 hPa deve estar entre 290° e 360°, ou entre 0° e 50°; (ii) direção do vento em 500 hPa deve estar entre 230° e 330°; (iii) $(dir_{500}-dir_{850})$ deve ser negativo, com a consideração importante de que caso a direção do vento em 850 hPa esteja entre 0° e 50°, deve-se somar 360 ao valor da direção em 850 hPa antes de calcular $(dir_{500}-dir_{850})$; (iv) a magnitude de V_{850} e de V_{500} deve ser de, pelo menos, 15 nós.

Valores de SWEAT acima de 300 são considerados indicativos de situações propícias a tempestades severas, enquanto que valores acima de 400 indicam maior probabilidade de eventos tornádicos (MILLER, 1972).

(h) Showalter (SI)

O Índice Showalter (Showalter Index, ou SI) é obtido através da diferença entre a temperatura do ar no nível de 500 hPa e a temperatura de uma parcela que sobe adiabaticamente desde o nível de 850 hPa até o nível de 500 hPa. O índice é calculado através de diagramas termodinâmicos. A partir da temperatura do ar no nível de 850 hPa sobe-se pela adiabática seca que passa por esse ponto até atingir o Nível de Condensação por Levantamento (NCL). A partir do NCL continua-se pela adiabática saturada até o nível de 500 hPa. O prognóstico da ocorrência de tempestade é feito com base na classificação descrita no Quadro 4.5. O SI (°C) é dado pela equação (SHOWALTER, 1947):

$$SI = T_{500} - Tp_{500} \quad (18)$$

na qual,

T_{500} é a temperatura do ar (°C) em 500 hPa

Tp_{500} é a temperatura (°C) em 500 hPa de uma parcela que ascende a partir de 850 hPa.

Quadro 4.5- Limiares do SI e condições de tempo esperadas (AWS, 1979).

SI (°C)	Condições esperadas
≤ 3	Possibilidade de pancadas e trovoadas
$1 \leq SI \leq -2$	Aumento da probabilidade de ocorrência de tempestades
≤ -3	Tempestades severas
≤ -6	Possibilidade de ocorrência de furacão

(i) Levantamento (LI)

O Índice de Levantamento (Lifted Index, ou LI) é a diferença entre a temperatura do ar no nível de 500 hPa, e a temperatura da parcela no nível de 500 hPa após ascender pela adiabática seca a partir do NCL; quanto mais negativo for o valor do LI, maior será a instabilidade associada. O LI (°C) é dado pela equação (GALWAY, 1956):

$$LI = T_{500} - Tp_{500} \quad (19)$$

na qual,

T é a temperatura do ar (°C) em 500 hPa

Tp_{500} é a temperatura da parcela (°C) em 500 hPa após a ascensão.

(j) KO

O índice KO examina a diferença da temperatura potencial equivalente média da média troposfera (isto é, a camada da troposfera entre 500 e 700 hPa) e a temperatura potencial equivalente média na troposfera inferior (isto é, a camada da troposfera entre 850 e 1000 hPa). Não há indicação de tempestades para valores maiores do que 6 K, e há indicação de tempestades para valores menores do que 2 K (Quadro 4.6). O índice KO (K) é dado pela equação (ANDERSSON, 1989):

$$KO = 0,5[(\theta e_{700} + \theta e_{500}) - (\theta e_{850} + \theta e_{1000})] \quad (20)$$

na qual,

θe_{500} é a temperatura potencial equivalente (K) em 500 hPa

θe_{850} é a temperatura potencial equivalente (K) em 850 hPa

θ_{e1000} é a temperatura potencial equivalente (K) em 1000 hPa.

Quadro 4.6- Limiares do índice KO e probabilidade de tempestades (AWS, 1979).

KO (K)	Probabilidade de Tempestades
KO > 6	Baixa
2 > KO < 6	Média
KO < 2	Alta

(h) Delta-Tetae (DTeI)

O índice Delta-Tetae (DTeI) é a diferença entre a temperatura potencial equivalente na superfície e a temperatura potencial equivalente no nível de 300 hPa. Os ambientes que exibem um DTeI maior do que 20 K são mais propícios à geração de microrrajadas, enquanto que ambientes com DTeI menores do que 13 K não são favoráveis. O índice DTeI (K) é calculado pela equação (ATKINS e WAKIMOTO, 1991):

$$DTeI = \theta_{e_{sup}} - \theta_{e_{300}} \quad (21)$$

(i) PII

O Índice de Instabilidade Potencial (Potential Instability Index, ou PII) é uma medida da instabilidade potencial da camada atmosférica entre 925 e 500 hPa. O índice PII (K) é dado pela equação (van DELDEN, 2001):

$$PII = \frac{\theta_{e_{925}} - \theta_{e_{500}}}{z_{500} - z_{925}} \quad (22)$$

na qual,

$\theta_{e_{925}}$ é a temperatura potencial equivalente (K) em 925 hPa

$\theta_{e_{500}}$ é a temperatura potencial equivalente (K) em 500 hPa

z_{500} é a altura (m) em 500 hPa

z_{925} é a altura (m) em 925 hPa.

4.3.2- Análise Multivariada

As técnicas de análise multivariada usadas neste trabalho foram a Análise Fatorial (AF) com extração de Componentes Principais e a Análise de Agrupamentos (AA). Na AF foi utilizado o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO).

A Análise em Componentes Principais (ACP) possibilita reduzir o número de variáveis observadas para um conjunto de variáveis não correlacionadas, fornecendo subsídios para entender a variabilidade e a estrutura de correlação dos dados com uma menor quantidade de variáveis não correlacionadas chamadas de componentes principais.

O teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) é uma estatística que indica a proporção da variância dos dados que pode ser considerada comum a todas as variáveis, ou seja, que pode ser atribuída a um fator comum. Assim, valores acima de 0,5 indicam que a Análise Fatorial consegue descrever satisfatoriamente as variações nos dados.

Segundo Manly (2008) o objetivo da análise fatorial de componentes principais é tomar p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p e encontrar combinações destas para produzir índices Z_1, Z_2, \dots, Z_p que sejam não correlacionados na ordem de sua importância, e que descrevam a variação nos dados. Se existirem p variáveis, então existirão no máximo p componentes principais. Assim, as p combinações lineares originais são:

$$\begin{aligned} Z_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \\ Z_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ Z_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \end{aligned} \quad (23)$$

em que a_{ij} são dados pelos autovetores da matriz de correlação.

Por meio desse modelo, é possível transformar um conjunto de dados referentes às variáveis originais X_1, X_2, \dots, X_n , em um novo conjunto de dados referentes aos componentes principais Z_1, Z_2, \dots, Z_n . Esta transformação é ortogonal, de modo que o relacionamento inverso é:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}Z_1 + a_{21}Z_2 + \dots + a_{p1}Z_p \\ X_2 &= a_{12}Z_1 + a_{22}Z_2 + \dots + a_{p2}Z_p \end{aligned}$$

\dots

$$X_p = a_{1p}Z_1 + a_{2p}Z_2 + \dots + a_{pp}Z_p \quad (24)$$

Numa análise de fatores, somente m das componentes principais são retidas. Assim, as últimas equações se tornam:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}Z_1 + a_{21}Z_2 + \dots + a_{p1}Z_p + e_1 \\ X_2 &= a_{12}Z_1 + a_{22}Z_2 + \dots + a_{p2}Z_p + e_2 \\ &\vdots \\ X_p &= a_{1p}Z_1 + a_{2p}Z_2 + \dots + a_{mp}Z_m + e_p \end{aligned} \quad (25)$$

em que e_p é uma combinação linear dos componentes principais Z_{m+1} a Z_p .

Após isso, é preciso escalonar as componentes principais Z_1, Z_2, \dots, Z_m para terem variâncias unitárias, como exigido pelos fatores. Para isto Z_i precisa ser dividido pelo seu desvio padrão, o qual é $\sqrt{\lambda_i}$, a raiz quadrada do correspondente autovalor na matriz de correlações. Assim, as equações se tornam:

$$\begin{aligned} X_1 &= \sqrt{\lambda_1}a_{11}F_1 + \sqrt{\lambda_2}a_{21}F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m}a_{p1}F_p + e_1 \\ X_2 &= \sqrt{\lambda_1}a_{12}F_1 + \sqrt{\lambda_2}a_{22}F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m}a_{p2}F_p + e_2 \\ &\vdots \\ X_p &= \sqrt{\lambda_1}a_{1p}F_1 + \sqrt{\lambda_2}a_{2p}F_2 + \dots + \sqrt{\lambda_m}a_{mp}F_m + e_p \end{aligned} \quad (26)$$

na qual $F_i = Z_i / \sqrt{\lambda_i}$.

Sendo assim, o modelo de fatores não-rotacionados é dado por:

$$\begin{aligned} X_1 &= b_{11}F_1 + b_{12}F_2 + \dots + b_{1m}F_m + e_1 \\ X_2 &= b_{21}F_1 + b_{22}F_2 + \dots + b_{2m}F_m + e_2 \\ &\vdots \\ X_p &= b_{p1}F_1 + b_{p2}F_2 + \dots + b_{pm}F_m + e_p \end{aligned} \quad (27)$$

na qual $b_{ij} = \sqrt{\lambda_m} a_{ji}$.

Foi aplicada a rotação de fatores pelo método de rotação Varimax (WILKS, 2006). O método de rotação Varimax é um tipo de rotação ortogonal (mantém os fatores perpendiculares entre si, isto é, sem correlação entre eles) e tem como característica o

fato de minimizar a ocorrência de uma variável ter altas cargas fatoriais para diferentes fatores, permitindo que uma variável seja facilmente identificada com um único fator.

A Análise de Agrupamentos (AA) é uma técnica multivariada que tem como objetivo agrupar dados de acordo com as similaridades (dissimilaridades) ou distâncias entre seus componentes (KAZNAR, 2007). Neste trabalho foi utilizada a distância euclidiana quadrática, que é a distância geométrica no espaço multidimensional. Esse tipo de distância é comumente utilizado para os métodos de agrupamento centróide e Ward. A distância euclidiana quadrática entre os elementos $X = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ e $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_p]$ é definida por:

$$d_{xy} = \sqrt{(X_1 - Y_1)^2 + (X_2 - Y_2)^2 + \dots + (X_p - Y_p)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (X_i - Y_i)^2} \quad (28)$$

O agrupamento foi feito através do método aglomerativo hierárquico denominado Método de Ward. O método de Ward propõe que, em qualquer fase da análise, a perda de informação que resulta do agrupamento de elementos em grupos é medida pela soma dos quadrados dos desvios de cada ponto em relação à média do grupo ao qual pertence. Pode-se ter como resultado uma árvore de grupos denominada dendrograma, que mostra como os grupos estão relacionados. O corte do dendrograma em um nível desejado possibilita obter um aglomerado de dados classificados em grupos disjuntos. Essa decisão é subjetiva e deve ser feita de acordo com o objetivo da análise e o número de grupos desejados (WILKS, 2006).

As técnicas acima foram aplicadas a dois tipos de matrizes. No primeiro caso, o objetivo foi identificar fatores físicos e respectivos dias de atuação. Essas matrizes foram geradas para níveis isobáricos selecionados (1000mb, 850mb, 500mb e 300mb) e contém as seguintes variáveis, para todos os dias do mês no horário das 00 e 12 UTC, separadamente: temperatura do ar (T_a), temperatura de ponto do orvalho (T_d), umidade relativa (UR), razão de mistura (r), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}), componente zonal do vento (u) e componente meridional do vento (v) (Quadro 4.7). Assim, há oito matrizes organizadas no modo P (RICHMAN, 1986), que foram submetidas à ACP. Os fatores obtidos serviram como dados de entrada para a AA, o que permitiu identificar os dias com características comuns. No segundo caso, o procedimento de análise foi o mesmo, porém havendo uma única matriz para cada horário, composta pelos índices de

estabilidade (Quadro 4.8). Neste caso o objetivo foi identificar os índices com potencial para indicar mudanças no tempo na área de estudo.

Quadro 4.7- Matriz de entrada das variáveis termodinâmicas e do vento.

Dia	Variáveis								
1	Ta ₁₁	Td ₁₂	UR ₁₃	r ₁₄	θ ₁₅	θe ₁₆	θes ₁₇	u ₁₈	v ₁₉
2	Ta ₂₁	Td ₂₂	UR ₂₃	r ₂₄	θ ₂₅	θe ₂₆	θes ₂₇	u ₂₈	v ₂₉
...
30	Ta _{n1}	Td _{n2}	UR _{n3}	r _{n4}	θ _{n5}	θe _{n6}	θes _{n7}	u _{n8}	v _{n9}

Quadro 4.8- Matriz de entrada dos índices de estabilidade.

Dia	Variáveis											
1	CAPE _{1,1}	CINE _{1,2}	CT _{1,3}	VT _{1,4}	TT _{1,5}	K _{1,6}	SWEAT _{1,7}	SI _{1,8}	LI _{1,9}	KO _{1,10}	DTeI _{1,11}	PII _{1,12}
2	CAPE _{2,1}	CINE _{2,2}	CT _{2,3}	VT _{2,4}	TT _{2,5}	K _{2,6}	SWEAT _{2,7}	SI _{2,8}	LI _{2,9}	KO _{2,10}	DTeI _{2,11}	PII _{2,12}
...
30	CAPE _{n,1}	CINE _{n,2}	CT _{n,3}	VT _{n,4}	TT _{n,5}	K _{n,6}	SWEAT _{n,7}	SI _{n,8}	LI _{n,9}	KO _{n,10}	DTeI _{n,11}	PII _{n,12}

4.3.3- Análise do ambiente sinótico

A evolução temporal e espacial das condições atmosféricas no período de estudo foi avaliada através dos dados observacionais e dos dados em pontos de grade. Foram elaborados gráficos para o município de Natal ilustrando a variação diária dos totais pluviométricos. O aplicativo Surface Mapping System (SURFER) versão 8.0 foi utilizado para visualizar a distribuição espacial dos totais diários de precipitação no estado.

As imagens de satélite possibilitaram analisar a nebulosidade, altura do topo das nuvens e sua evolução temporal, com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento dos sistemas de nuvens com chuva associada.

Os campos da pressão reduzida ao nível médio do mar, linhas de corrente, magnitude do vento, componente vertical da vorticidade relativa e movimento vertical, e o diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento obtidos das reanálises dos National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), com espaçamento de grade de 2,5° x 2,5°,

foram visualizados através do aplicativo OpenGrads, que é uma extensão do Grid Analysis and Display System (GrADS).

Os dados das sondagens de ar superior foram utilizados para diagnosticar a estrutura da atmosfera na vertical da estação de altitude. Foram obtidos perfis verticais da componente zonal e da componente 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}).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1- Análise em Escala Sinótica e Mesoescala

5.1.1- Análise da nebulosidade e condições em superfície

O desenvolvimento do evento de precipitação intensa foi acompanhado através de imagens realçadas do satélite GOES-12 obtidas em intervalos de 15 minutos. A Figura 5.1 ilustra a evolução da nebulosidade através de imagens selecionadas. A imagem de satélite do dia 15 às 00 UTC evidencia ausência quase total de nebulosidade sobre o RN (Fig. 5.1a). É possível observar, já às 12 UTC do dia 15, a formação das primeiras células convectivas próximo à costa leste do RN e PB, com topos mais altos (azul claro) próximo ao RN, com aproximadamente 12 km de altura (Fig. 5.1b). O desenvolvimento continua ao longo do dia, resultando num aumento considerável da profundidade das nuvens e da área encoberta, conforme ilustra a imagem das 20 UTC (Fig. 5.1c). Às 22 UTC (Fig. 5.1d) a área de topos mais frios (azul escuro), com mais de 15 km de altura, está mais extensa, e cobre o leste do RN, PB e o nordeste de PE. Às 00 UTC do dia 16 (Fig. 5.1e) a área de nebulosidade apresenta orientação noroeste-sudeste cobrindo parte do RN, PB e PE, numa configuração típica de linha de instabilidade. Na manhã do dia 16, às 12 UTC (Fig. 5.1f) não há topos frios, mas a nebulosidade intensifica à tarde (não mostrado) e núcleos de convecção profunda alinhados voltam a influenciar o CE, RN, PB e PE no período noturno (Fig. 5.1g,h). Na manhã do dia 17 (Fig. 5.1i) o sistema está enfraquecido, o que é evidenciado pela ausência de topos frios. Ribeiro et al. (2013) sugerem que no período noturno dos dias 15 e 16 de julho de 2011 o desenvolvimento de convecção profunda organizada em linha foi favorecido por um Distúrbio Ondulatório de Leste (DOL).

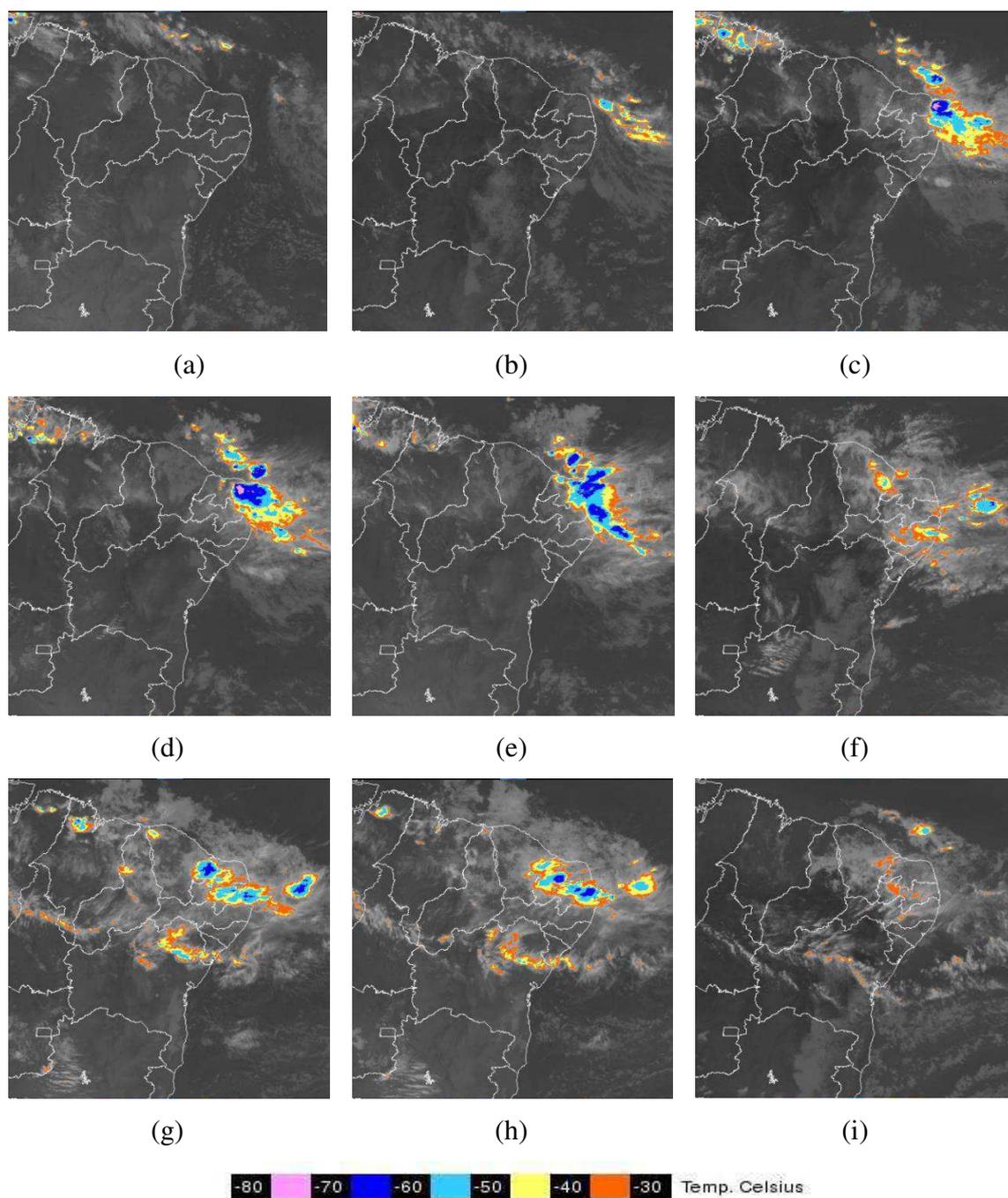
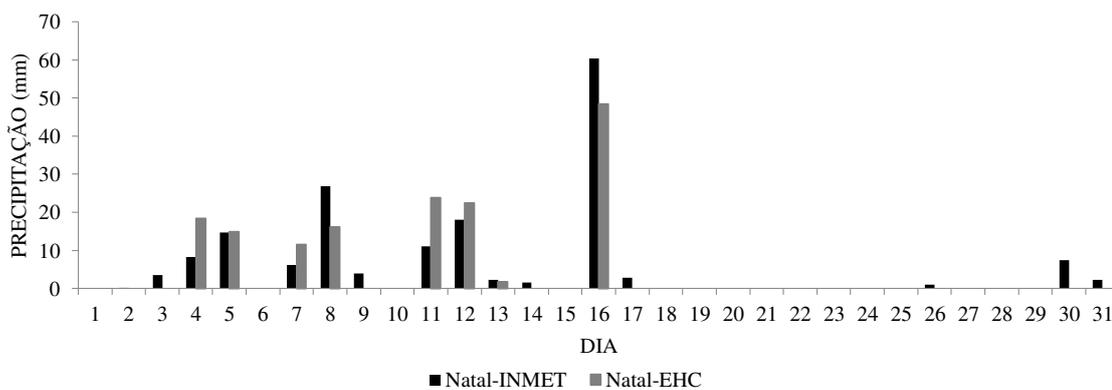


Figura 5.1 - Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-12 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para: (a) 00 UTC do dia 15/07/2011, (b) 12 UTC do dia 15/07/2011, (c) 20 UTC do dia 15/07/2011, (d) 22 UTC do dia 15/07/2011, (e) 00 UTC do dia 16/07/2011, (f) 12 UTC do dia 16/07/2011, (g) 00 UTC do dia 17/07/2011, (h) 02 UTC do dia 17/07/2011 e (i) 12 UTC do dia 17/07/2011. A escala de cores da

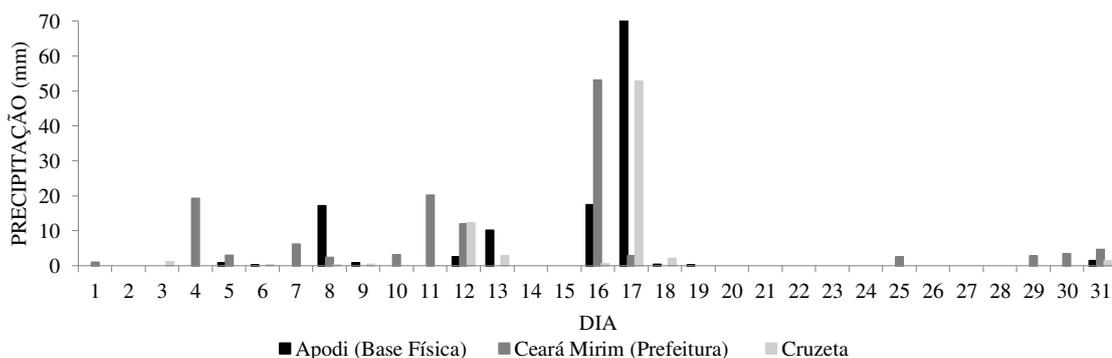
temperatura de brilho é vista abaixo das imagens (Fonte: http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp).

A Figura 5.2 ilustra a evolução temporal da precipitação observada em julho de 2011 nas estações meteorológicas do INMET e da Escola Henrique Castriciano (Fig. 4.2). Ela evidencia semelhanças entre as estações, como os quatro eventos de chuva registrados na primeira metade do mês. Nas duas estações de Natal (Fig. 5.2a), o maior total diário de precipitação foi o do dia 16 (60,4 mm no INMET e 48,4 mm na EHC), em concordância com a distribuição de nebulosidade com topos frios às 00 UTC do dia 16 (Fig. 5.1e). A estação do INMET registrou o maior total mensal de precipitação: 170,4 mm. Na estação da EHC o total mensal foi de 157,5 mm.

A Figura 5.2b evidencia precipitação na primeira metade do mês, com dias alternados entre as três estações. O maior total diário de precipitação na estação de Ceará Mirim foi no dia 16, e nas estações de Apodi e Cruzeta foi no dia 17, em concordância com a distribuição de nebulosidade com topos frios correspondente aos dias 16 e 17 (Fig. 5.1). A estação de Apodi registrou o maior total diário de precipitação do mês dentre as três estações: 77,4 mm. Por outro lado, chuvas intensas também foram observadas em outros estados. No Estado da Paraíba, nas cidades de João Pessoa e Campina Grande, os totais pluviométricos diários mais elevados foram de 83 mm no dia 16 e de 110 mm no dia 17, respectivamente (RIBEIRO et al., 2013). Na cidade de Recife-PE o total acumulado de precipitação foi de 175,6 mm, das 22 UTC do dia 15 às 16 UTC do dia 17 (<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/18533>).



(a)



(b)

Figura 5.2 - Totais diários de precipitação (mm) da estação meteorológica de superfície: (a) do INMET e da Escola Henrique Castriciano (EHC), localizadas em Natal-RN, e (b) do INMET, localizadas em: Apodi (Base Física), Ceará Mirim (Prefeitura) e Cruzeta, em julho de 2011. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN)).

A variabilidade do vento em superfície obtido das sondagens de ar superior é ilustrada para as 00 UTC (Fig. 5.3a) e 12 UTC (Fig. 5.3b) através da velocidade (IV) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. No decorrer do mês a direção do vento varia entre dois quadrantes, sudeste e sudoeste, com predominância do último. Ventos do quadrante sudeste são vistos apenas nos dias 8, 10, 20 e 22, às 00 UTC (Fig. 5.3a), e nos dias 1, 10, 16, 20 e 25, às 12 UTC. Às 00 UTC há calmaria no dia 7, e vento de sul nos dias 19 e 29. Às 12 UTC é observada calmaria no dia 5, e vento de sul nos dias 23 e 30. Esse resultado é compatível com a predominância do setor de 22,5 graus da rosa dos ventos, centrado em 180 graus, encontrada para o mês de julho por Castor et al. (2012) para o aeroporto de Natal (mesma localização da estação de altitude).

Às 00 UTC no dia 8 o vento é do quadrante sudeste, após a calmaria do dia anterior (Fig. 5.3a). Nesse dia há precipitação (Fig. 5.2a). A velocidade do vento aumenta até o dia 10, quando atinge o máximo do mês ($12,95 \text{ km h}^{-1}$). No dia 12 a velocidade do vento é muito baixa. A velocidade do vento também é baixa no dia 16, quando a área de nebulosidade influencia Natal (Fig. 5.1e). Nos dias posteriores a velocidade do vento varia pouco.

Às 12 UTC, o vento é do quadrante sudeste e tem um máximo de velocidade no dia 10 (Fig. 5.3b), sem registro de precipitação (Fig. 5.2a). A velocidade do vento diminui significativamente, atingindo um mínimo no dia 12, após o que volta a aumentar até um máximo no dia 14. Ele é seguido por um mínimo, com direção no quadrante sudeste, no dia 16, após o evento de chuva forte. Nos dias posteriores a direção do vento é predominantemente do quadrante sudoeste e a velocidade se mantém elevada. O vento mais intenso do mês, de sul com velocidade acima de 20 km h^{-1} , é visto no dia 23. De maneira geral, a velocidade do vento é mais baixa nos dias em que há registro de precipitação.

A precipitação observada no Estado do Rio Grande do Norte é ilustrada na Figura 5.4 para os dias 14, 15, 16, 17, 18 e 19 de julho de 2011. No dia 14 (Fig. 5.4a) não há registro de precipitação no estado. No dia 15 (Fig. 5.4b), há precipitação em pontos isolados, provavelmente ocasionada por fatores locais. As imagens de satélite para as 00 UTC e 12 UTC desse dia indicam ausência de nebulosidade sobre o estado (Fig. 5.1a,b). No dia 16 (Fig. 5.4c) a precipitação está concentrada no leste e no noroeste do estado; não há precipitação na região central. A precipitação observada neste dia está relacionada com a banda de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste vista sobre o leste do estado às 00 UTC do dia 16 (Fig. 5.1e). No dia 17 (Fig. 5.4d) é observada precipitação no sul, no oeste e em alguns pontos isolados no leste do estado. A configuração nesse dia está em concordância com a imagem das 00 e 02 UTC do dia 17 (Fig. 5.1g,h) que mostra nebulosidade com topos frios no oeste do estado, onde há os maiores totais de precipitação. No dia 18 (Fig. 5.4e) há precipitação apenas em pontos isolados, devido ao enfraquecimento do sistema a partir do dia 17 (Fig. 5.1i). Neste dia não há precipitação em torno de Natal, o que está de acordo com a evolução temporal de precipitação da Figura 5.2. No dia 19 (Fig. 5.4f) não houve precipitação em todo o estado.

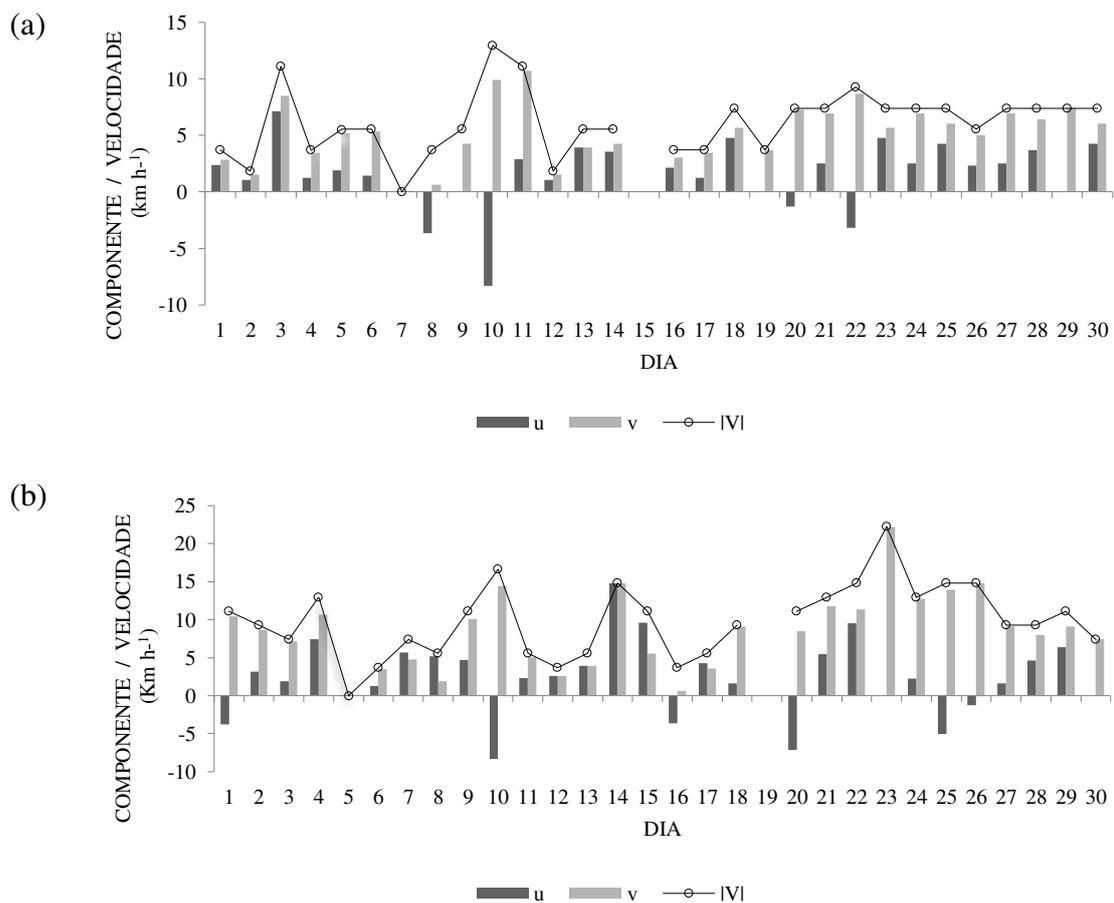


Figura 5.3- Série temporal dos valores diários da velocidade ($|V|$) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento à superfície (km h^{-1}), obtidos das sondagens de ar superior realizadas às (a) 00 UTC e (b) 12 UTC, no período de 1 a 30 de julho de 2011, na estação de altitude de Natal-RN. Os valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Os valores positivos de v representam componente de sul. Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (15 (a) e 19 (b)). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.

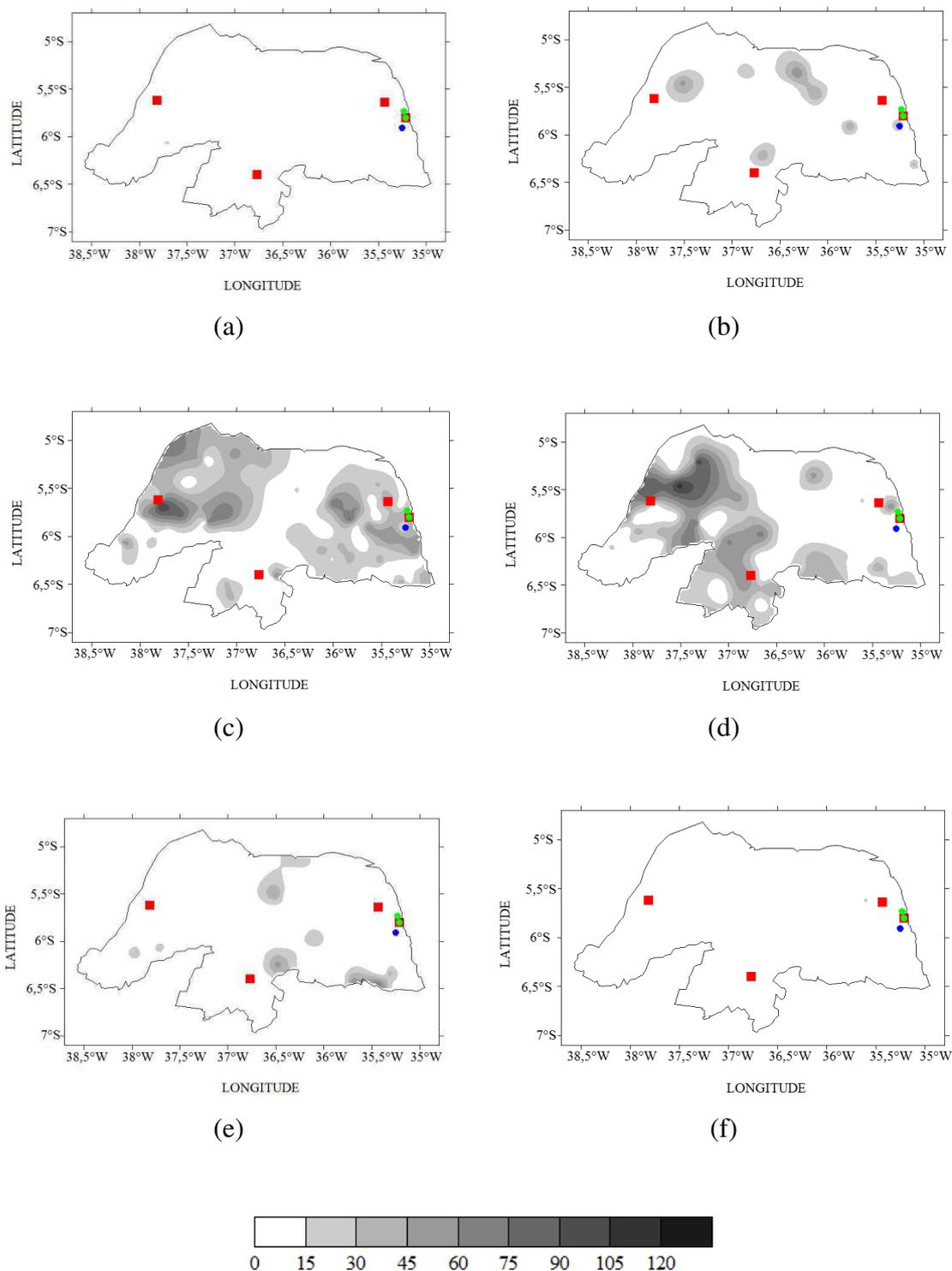


Figura 5.4 - Totais diários de precipitação (mm) observada no Estado do Rio Grande do Norte em julho de 2011 no dia: (a) 14, (b) 15, (c) 16, (d) 17, (e) 18 e (f) 19. A escala de tons de cinza, com intervalo de análise de 15 mm, é vista abaixo dos mapas (Fonte dos dados: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN)). Os pontos em destaque são as estações ilustradas com a mesma simbologia na Figura 4.2.

5.1.2-Análise termodinâmica e do vento em altitude

A Figura 5.5 ilustra a estrutura termodinâmica (à esquerda) e a variação do vento ao longo da vertical (à direita). Às 12 UTC do dia 15 de julho (Fig. 5.5a) os perfis termodinâmicos ilustram uma camada bem misturada ($\partial\theta/\partial z = 0$), e condicionalmente e convectivamente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$, $\partial\theta_e/\partial z < 0$) próxima à superfície, cujo topo coincide com a base de uma camada de inversão térmica ($\partial\theta_e/\partial z > 0$). Acima dessa camada a atmosfera está aproximadamente convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z = 0$) até o nível de 700 hPa. Nesse nível está a base de uma camada de inversão térmica de subsidência, que se caracteriza pelo afastamento das curvas de θ_e e θ_{es} , o que indica diminuição no teor de umidade do ar. Outra camada de inversão térmica tem a base em torno de 600 hPa. O teor de umidade é relativamente elevado entre a superfície e a base da camada de inversão térmica mais baixa; a imagem realçada evidencia a ausência de nuvens profundas sobre o RN nesse horário (Fig. 5.1b). O CAPE é nulo (Tab. 5.1), indicando convecção fraca (Quadro 4.2). Os demais índices, em sua maioria, indicam probabilidade de ocorrência de tempestades isoladas. A direção do vento varia pouco na vertical (Fig. 5.5b); ele é do quadrante sudoeste na superfície, e do quadrante sudeste nos níveis acima, o que é observado até próximo de 400 hPa. Acima desse nível, na alta troposfera e baixa estratosfera (não mostrado), a direção do vento varia entre os quatro quadrantes da rosa dos ventos, mas predominantemente entre o sudoeste e o noroeste. A velocidade do vento aumenta ao longo da vertical, atingindo um máximo de $50,0 \text{ km h}^{-1}$ na baixa troposfera (925hPa), logo acima de uma camada de inversão térmica (956 hPa). O vento máximo da sondagem é registrado em 200 hPa: $81,4 \text{ km h}^{-1}$ (não mostrado).

Às 00 UTC do dia 16 (Fig. 5.5c), a atmosfera encontra-se saturada à superfície, e convectivamente instável entre a superfície e o nível de 900 hPa, aproximadamente. Nesse nível está a base de uma camada de inversão térmica de subsidência fraca. No topo dessa camada, na baixa troposfera, a atmosfera é convectivamente instável e tem alto teor de umidade em toda a sua extensão, associado com a banda de nebulosidade convectiva profunda visualizada sobre o RN na Figura 5.1e. O CAPE é de $1150,2 \text{ J kg}^{-1}$, indicando convecção moderada (Quadro 4.2). Os valores dos índices K (36,4) e TT (45,7) são elevados (Quadros 4.3, 4.4) e os demais índices, em sua maioria, indicam uma atmosfera instável (Tab. 5.1) com probabilidade de tempestades dispersas. O valor do índice TT é superior ao da média de julho (42) encontrada por Santos e Silva et al. (2011), na cidade de Maxaranguape-RN (cidade próxima a Natal). O vento é bastante

variável, de fraco a moderado (Fig. 5.5d). À superfície ele é do quadrante sudoeste, e nos níveis acima, até 250 hPa (não mostrado), alterna entre os quadrantes sudeste e nordeste. Nos demais níveis (não mostrado) ele muda principalmente entre os quadrantes sudoeste e noroeste, num comportamento semelhante àquele visto na sondagem anterior. A velocidade máxima da sondagem ($70,2 \text{ km h}^{-1}$) é atingida no nível de 135 hPa.

Às 12 UTC do dia 16 (Fig. 5.5e), a atmosfera está convectivamente instável entre a superfície e o nível de 977 hPa. Acima, há uma camada quase neutra ($\partial\theta_e/\partial z \cong 0$ e $\partial\theta_{es}/\partial z \cong 0$), indicando uma forte mistura de vapor e alto teor de umidade evidenciado pela proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es} . O CAPE é de $124,3 \text{ J kg}^{-1}$ (Tab. 5.1) indicando convecção fraca (Quadro 4.2). O índice TT (42) indica que a ocorrência de tempestade é improvável (Quadro 4.3), enquanto que o índice K (33,5) indica probabilidade de tempestades dispersas (Quadro 4.4). O vento é muito fraco em superfície. Ele aumenta de intensidade até atingir um máximo de $14,8 \text{ km h}^{-1}$ no nível de 925 hPa. Há um nível de calmaria acima desse máximo. Outro máximo é visto em 500 hPa: $48,1 \text{ km h}^{-1}$. A velocidade máxima da sondagem ($81,5 \text{ km h}^{-1}$) é registrada no nível de 150 hPa (não mostrado). Semelhantemente à sondagem anterior, a direção do vento varia entre os quadrantes nordeste e sudeste. Os índices TT e K são muito elevados às 00 UTC do dia 16 (Tabela 5.1), uma indicação de chuvas torrenciais de acordo com Silva Dias (2000).

Tabela 5.1 - Valores dos índices de estabilidade calculados.

Dia/Hora (UTC)	CAPE	CINE	CT	VT	TT	K	SWEAT	SI	LI	KO	DTel	PII
15 /12	0	-89,4	21,3	22,5	43,8	23,5	147,0	-1,3	-1,3	-8,8	1,7	0,0022
16 /00	1150,2	-1,1	22,4	23,3	45,7	36,4	171,8	-2,7	0,5	-8,5	3,5	0,0014
16 /12	124,3	0,0	20,3	21,7	42,0	33,5	56,4	1,4	-1,1	-1,4	0,1	0,0009

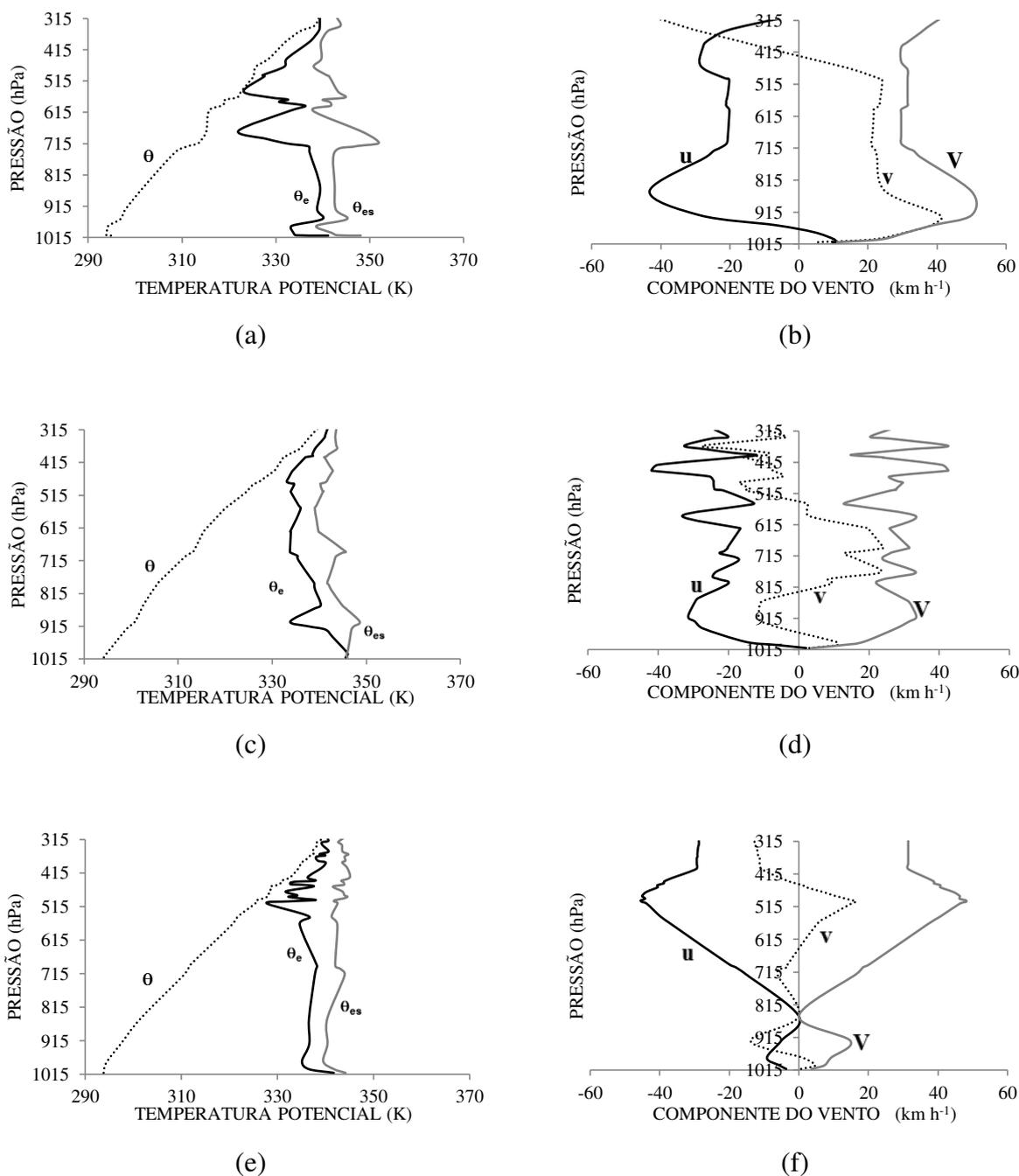


Figura 5.5 - Perfis verticais das temperaturas (K) potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), à esquerda, e das componentes zonal (u), meridional (v) e velocidade (V) do vento (km h^{-1}), à direita, obtidos de sondagem de ar superior realizada em julho de 2011 em Natal-RN, no dia: (a, b) 15 às 12 UTC, (c, d) 16 às 00 UTC e (e, f) 16 às 12 UTC. (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

5.1.3- Análise do ambiente sinótico

Na discussão a seguir são analisadas as condições atmosféricas em grande escala com foco principal no dia anterior ao do evento de chuva forte registrado em julho de 2011. Tendo como objetivo verificar a existência de um distúrbio com propagação na área dos ventos alísios, foram utilizados diagramas tempo x longitude da componente meridional do vento no mês de estudo. Os diagramas foram elaborados ao longo da latitude de 5°S, entre os meridianos de 0°W e 60°W, para vários níveis isobáricos padrões. A inclinação das áreas positivas (componente de sul) e negativas (componente de norte) possibilitou detectar propagação para oeste no diagrama para o nível de 600 hPa, ao longo da latitude de 5°S (Fig. 5.6). A análise do diagrama ao longo de 35°W (longitude que intercepta a faixa costeira do Rio Grande do Norte) mostra, após o dia 11, que a componente meridional, de sul (positiva), passa a ser de norte (negativa), e novamente de sul, o que sugere a passagem de um DOL. Essa mudança de sinal coincide com o desenvolvimento e organização da convecção profunda ilustrados nas imagens de satélite da Figura 5.1.

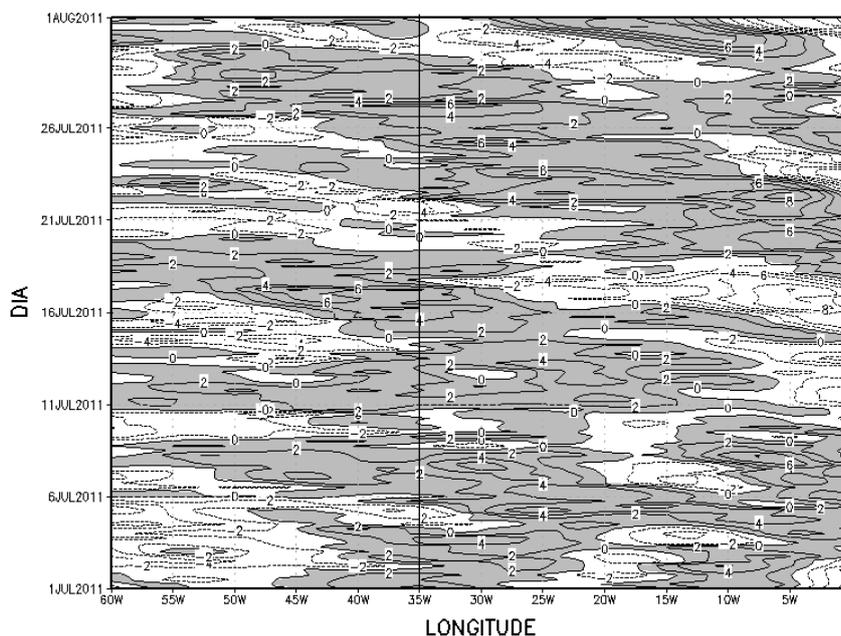


Figura 5.6 – Diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento (m/s) em 600 hPa ao longo da latitude de 5°S em julho de 2011. As áreas sombreadas assinalam componente de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

No campo de pressão ao nível médio do mar para as 12 UTC do dia 15 de julho, horário que antecede a atuação da área de nebulosidade na faixa litorânea do RN (Fig.

5.7), há um cavado invertido na área costeira leste do NEB (entre o RN e SE) e área oceânica adjacente, que também é visto nos níveis de 1000 hPa e 850 hPa (Fig. 5.8 a,b). De maneira geral, na área que se estende do centro de baixa pressão situado ao norte do NEB até o leste da região há vorticidade negativa nos baixos níveis (Fig. 5.9a, b) indicando confluência na atmosfera, e vorticidade positiva nos médios e altos níveis (Fig. 5.9c, d), indicando difluência. Essa estrutura vertical na área litorânea indica uma condição de ascendência na atmosfera, favorecida por convergência (divergência) na baixa (média e alta) troposfera.

A condição de ascendência na área de estudo foi investigada nos dias 15 e 16 de julho através de seções pressão-longitude do movimento vertical em coordenadas de pressão, ao longo de 5°S , latitude de Natal (Fig. 5.10). É possível observar nas proximidades de 35°W (longitude de Natal), às 12 UTC do dia 15 (Fig. 5.10a), uma área de movimento ascendente que se estende por toda troposfera, com núcleos intensos na baixa e alta troposfera. Às 18 UTC do dia 15 (Fig. 5.10b), também há movimento ascendente nas proximidades de 35°W , que se estende por toda a troposfera, porém com menor intensidade do que no horário anterior. Às 00 UTC do dia 16 (Fig. 5.10c), horário em que a banda de nebulosidade cobre o centro-leste do RN (Fig. 5.1e), o movimento ascendente está mais fraco. Às 06 UTC do dia 16 (Fig. 5.10d), há movimento ascendente em toda a troposfera, com magnitude comparável a do horário anterior. A ascendência é mais forte às 12 UTC do dia 15 (Fig. 5.10a), horário anterior ao da atuação da área de nebulosidade no continente (Fig. 5.1c).

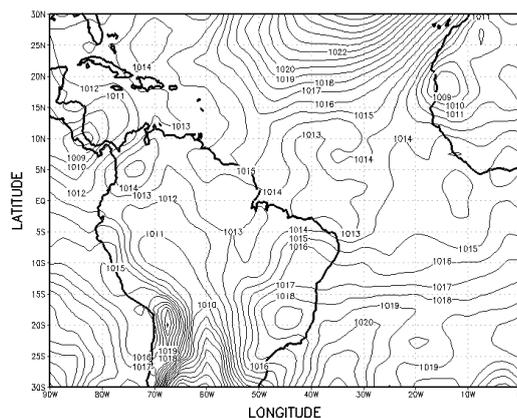


Figura 5.7 - Pressão ao nível médio do mar às 12 UTC do dia 15 de julho de 2011. O intervalo de análise é de 1 hPa (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

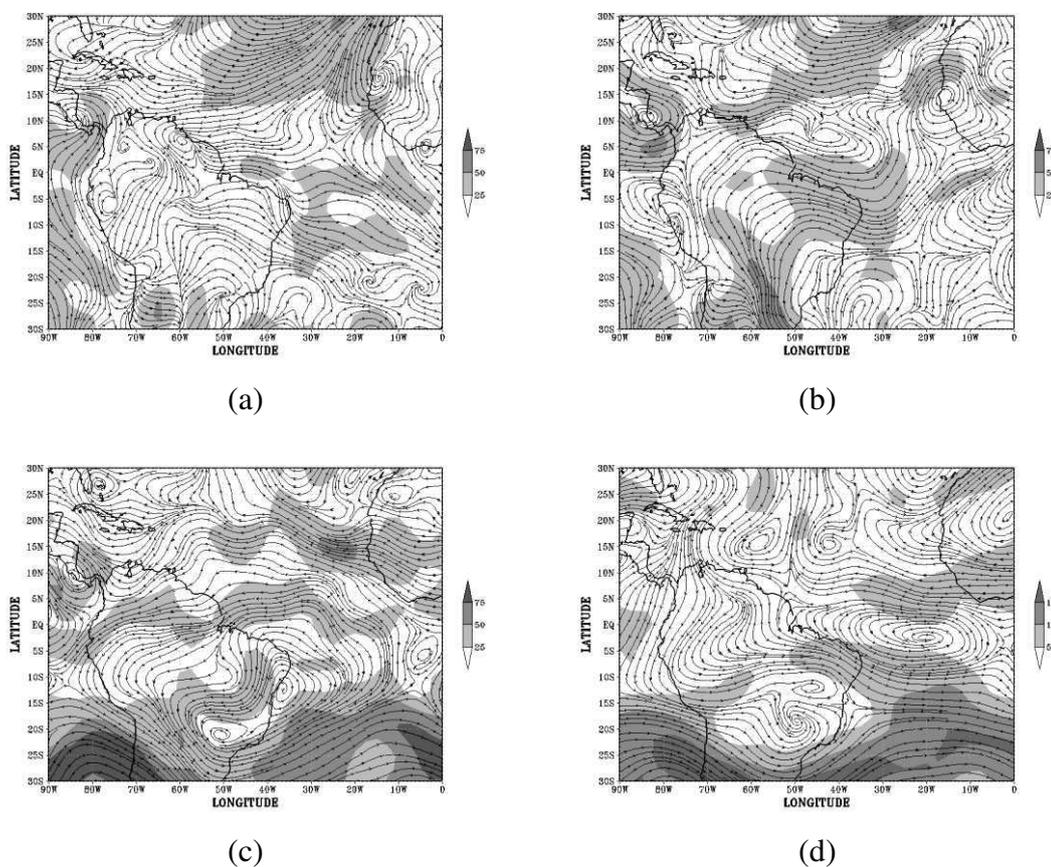


Figura 5.8- Linhas de corrente e intensidade do vento para as 12 UTC do dia 15 de julho de 2011 no nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A escala da velocidade do vento (km h^{-1}) está representada ao lado dos mapas. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

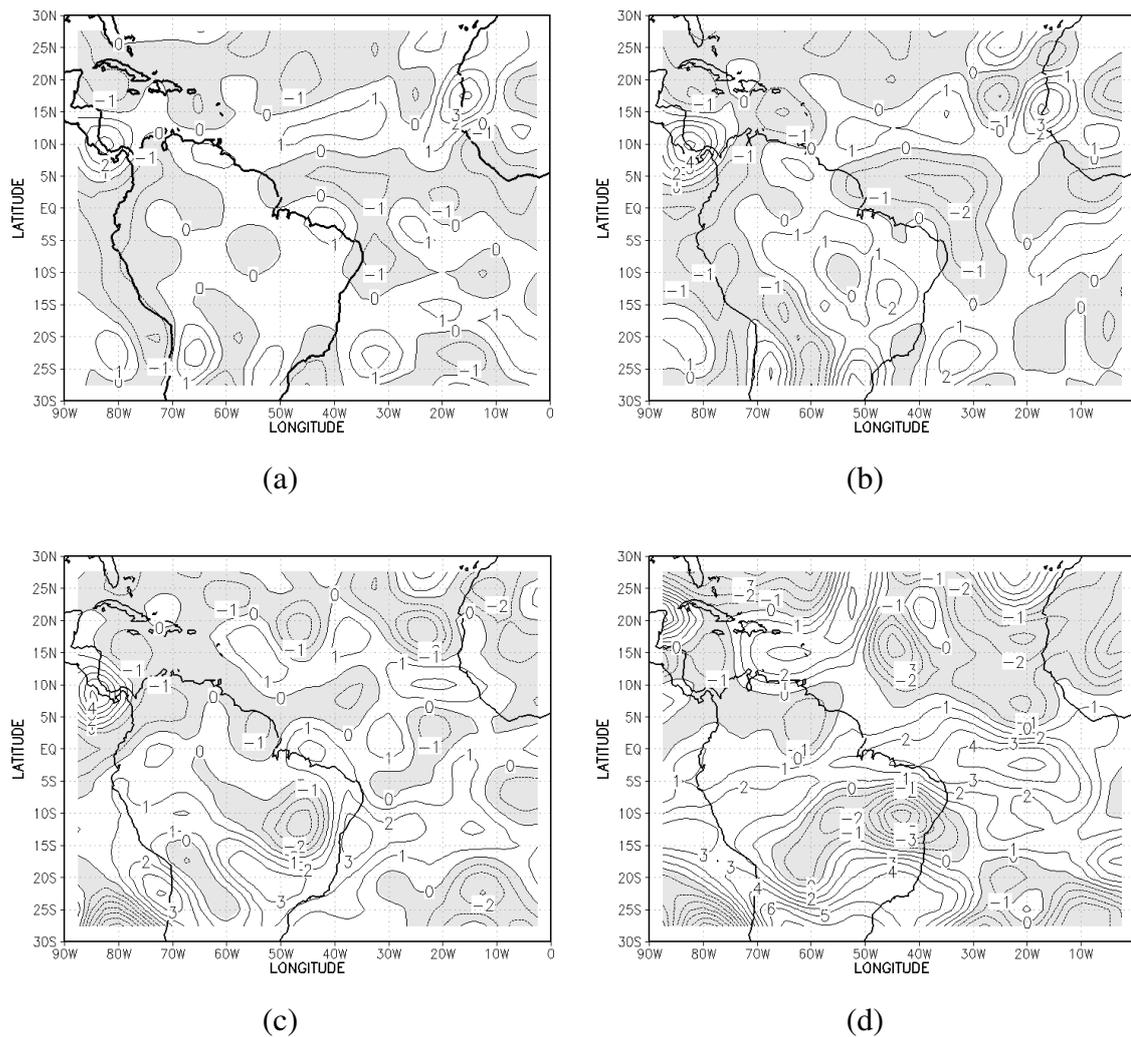


Figura 5.9- Componente vertical da vorticidade relativa para as 12 UTC do dia 15 de julho de 2011 no nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. O sombreado destaca as áreas negativas (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

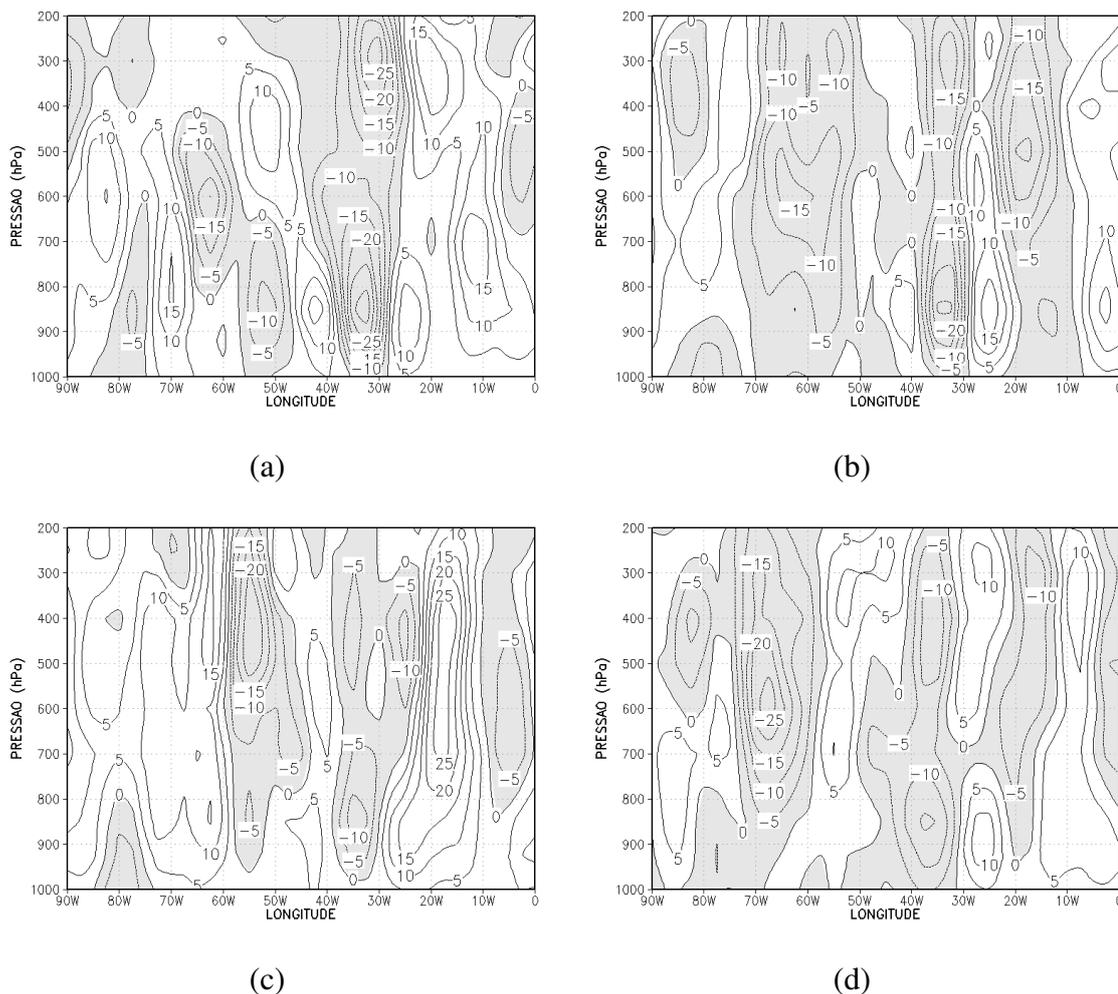


Figura 5.10-Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 5°S às (a) 12 UTC do dia 15/07/2011, (b) 18 UTC do dia 15/07/2011, (c) 00 UTC do dia 16/07/2011 e (d) 06 UTC do dia 16/07/2011. O intervalo de análise é de $5 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. O sombreado destaca as áreas negativas (movimento ascendente) (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

5.2 - Análise Multivariada de Dados Observacionais de Altitude

Na Análise Multivariada a ACP foi aplicada inicialmente, seguida pela AA, às sondagens de ar superior realizada às 00 UTC e 12UTC no mês de julho de 2011 na estação de altitude de Natal. Foram analisados a temperatura, umidade e vento de quatro níveis isobáricos, separadamente, e índices de estabilidade.

5.2.1- Temperatura, umidade e vento

Na primeira etapa foi aplicado o teste KMO, encontrando para o KMO o valor de 0,7 para todos os níveis, no horário das 00 UTC. No horário das 12 UTC o valor é de 0,8 nos níveis de 1000 e 850 hPa, 0,7 no nível de 500 hPa e 0,6 no nível de 300 hPa. Tendo em vista esses valores, foi possível aplicar a ACP. Um modelo de três componentes (fatores) foi adequado para explicar a variabilidade dos dados, retendo mais de 90% da variância, em todos os níveis analisados.

O Quadro 5.1 mostra a matriz dos fatores rotacionados das 00 UTC para os níveis isobáricos estudados. De maneira geral, as variáveis tiveram comportamento semelhante nos níveis de 1000, 850 e 500 hPa. As variáveis de maior contribuição na primeira componente estão altamente relacionadas com a umidade (inclusive a umidade relativa). Esse fator retém 39%, 42% e 40% da variância total dos dados, nos níveis de 1000, 850 e 500 hPa, respectivamente. No segundo fator estão as variáveis relacionadas com a temperatura (e a umidade relativa no nível de 1000 hPa). Ele retém 38%, 36% e 36% da variância total dos dados, nos níveis de 1000, 850 e 500 hPa, respectivamente. A presença da umidade relativa nos dois primeiros fatores do nível de 1000 hPa indica sua dependência da temperatura e da umidade do ar nesse nível próximo da superfície. No terceiro fator estão as componentes do vento, explicando 12%, 15% e 14% da variância total dos dados, nos níveis de 1000, 850 e 500 hPa, respectivamente.

No nível de 300 hPa a variável de maior contribuição no primeiro fator está relacionada com a umidade (através da temperatura potencial equivalente) e as demais variáveis com a temperatura, e explicam 44% da variância total dos dados. No segundo fator estão as variáveis relacionadas com a umidade, que respondem por 35% da variância total dos dados. No terceiro fator estão as componentes do vento, que explicam 12% da variância total dos dados.

Quadro 5.1 - Fatores rotacionados das 00 UTC nos níveis isobáricos.

Nível	Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3
1000 hPa	r	0,975	0,046	-0,057
	Td	0,970	0,121	-0,045
	θe	0,922	0,351	-0,067
	UR	0,723	-0,666	0,094
	θ	0,102	0,978	-0,050
	θes	0,138	0,972	-0,146
	Ta	0,151	0,960	-0,172
	u	0,152	-0,232	0,814
	v	-0,406	-0,008	0,570
850 hPa	UR	0,986	-0,123	0,105
	Td	0,975	0,186	0,103
	r	0,954	0,292	0,064
	θe	0,895	0,442	0,051
	θ	0,070	0,997	-0,024
	θes	0,198	0,978	-0,037
	Ta	0,231	0,973	-0,011
	u	0,008	-0,084	0,837
	v	-0,162	-0,041	-0,806
500 hPa	θe	0,981	-0,172	-0,015
	r	0,904	-0,422	-0,011
	Td	0,887	-0,387	0,134
	UR	0,854	-0,512	-0,009
	Ta	-0,318	0,946	-0,019
	θes	-0,353	0,934	-0,009
	θ	-0,375	0,925	-0,013
	u	-0,055	-0,104	0,805
	v	-0,093	-0,082	-0,799
300 hPa	θe	0,999	0,031	-0,014
	Ta	0,961	-0,272	-0,022
	θ	0,961	-0,270	-0,030
	θes	0,959	-0,277	-0,018
	r	-0,115	0,973	0,029
	UR	-0,194	0,965	0,009
	Td	-0,253	0,918	-0,087
	v	0,122	-0,229	0,860
	u	0,285	-0,417	-0,636

O peso dos três fatores para as 00 UTC no período de 1 a 30 de julho de 2011 é ilustrado na Figura 5.11 para os níveis isobáricos em estudo. Foram considerados como máximo (mínimo) de cada fator valores acima (abaixo) de 1,5 (-1,5). No nível de 1000 hPa o fator 1, que está relacionado com a umidade, apresenta máximos nos dias 8, 16 e 28 e mínimo no dia 24 (Fig. 5.11a). As séries temporais (Fig. 5.12a) indicam que as condições de tempo nesses dias estão associadas a um máximo (mínimo) nos dias 8, 16 e 28 (24) da temperatura do ponto de orvalho e razão de mistura. Aparentemente há um aumento no teor de umidade entre os dias 14 e 16, em concordância com a evolução da nebulosidade vista nas imagens de satélite (Fig. 5.1). Nos dias 10 e 28 há máximos e nos dias 11 e 13 há mínimos do fator 2, que está relacionado com a temperatura e a umidade relativa. As séries temporais (Fig. 5.12b) indicam que as condições de tempo nos dias 10 e 28 (11 e 13) estão relacionadas com máximos (mínimos) da temperatura do ar e temperatura potencial. O fator 3, que está associado às componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 3, 9 e 28 e mínimos nos dias 7 e 10. As séries temporais (Fig. 5.12c) indicam que os máximos do fator 3 estão relacionados com ventos do quadrante sudoeste, com componente meridional (zonal) forte (fraca). Os mínimos do fator 3 estão relacionados com os ventos do quadrante sudeste com componente meridional mais forte. O vento é do quadrante sudeste durante todo o mês, exceto nos dias 3, 9 e 13.

No nível de 850 hPa o fator 1, que está relacionado com a umidade, apresenta máximo no dia 28 e mínimo nos dias 2, 10 e 29 (Fig. 5.11b). As séries temporais (Fig. 5.13 a) indicam que as condições de tempo do dia 28 (2, 10 e 29) estão associadas a um máximo (mínimo) da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho. Aparentemente o teor de umidade aumenta entre os dias 14 e 16 (Fig. 5.13a), assim como visto no nível de 1000 hPa, em concordância com a nebulosidade vista nas imagens de satélite (Fig. 5.1). O fator 2, que está relacionado com a temperatura, tem máximo no dia 28 e mínimo no dia 21. As séries temporais (Fig. 5.13b) evidenciam que no dia 28 (21) há máximos (mínimos) da temperatura do ar e temperatura potencial. O fator 3, que está associado às componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 17 e 18. As séries temporais (Fig. 5.13c) indicam que eles estão relacionados com componentes quase nulas. O vento é do quadrante sudeste durante todo o mês, exceto nos dias 13, 16, 17 e 18.

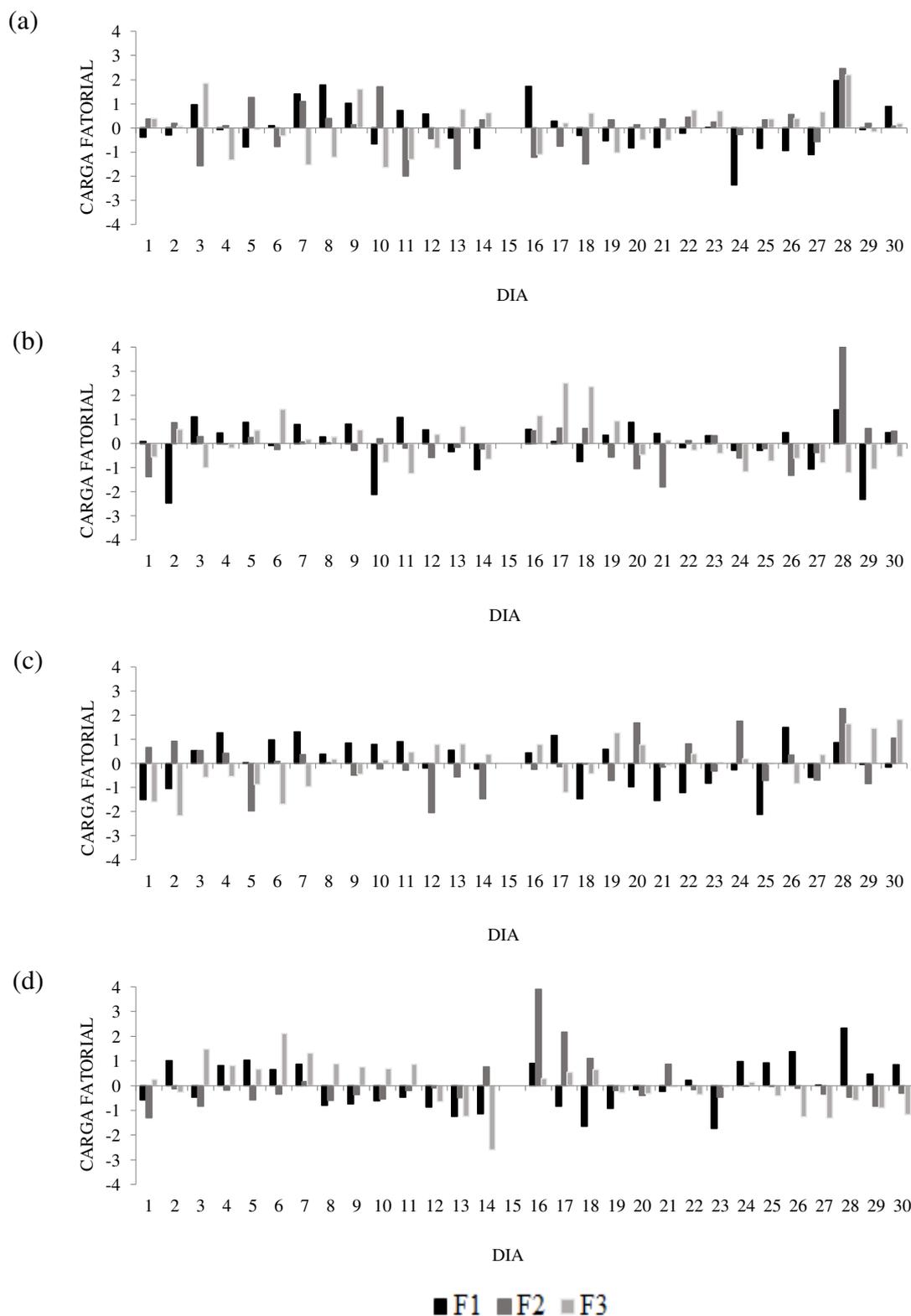


Figura 5.11- Carga fatorial das 00 UTC no mês de julho de 2011 em Natal-RN obtida para os níveis isobáricos de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos sendo: F1 (fator 1), F2 (fator 2) e F3 (fator 3) (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

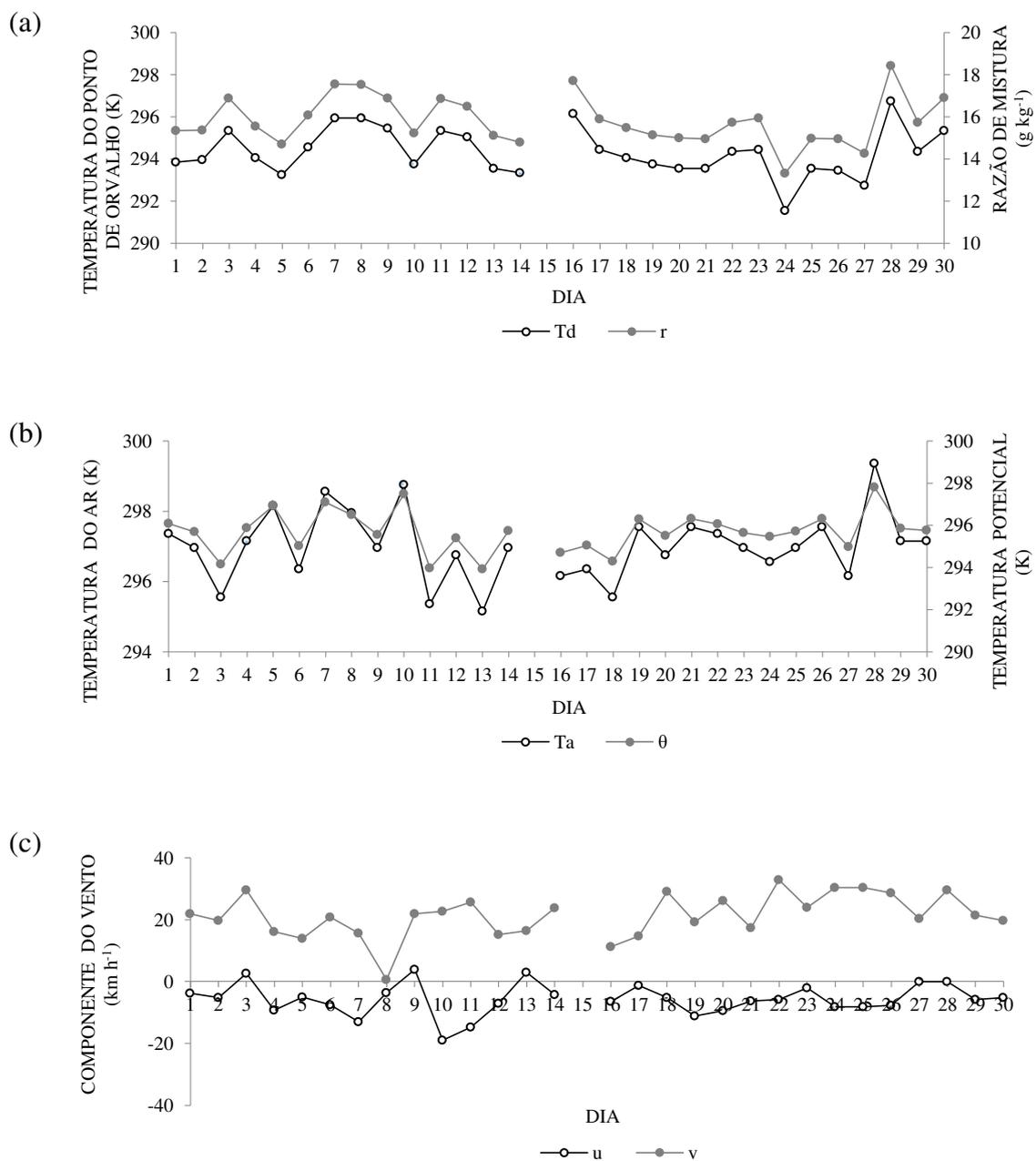


Figura 5.12 – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 1000 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d), (b) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

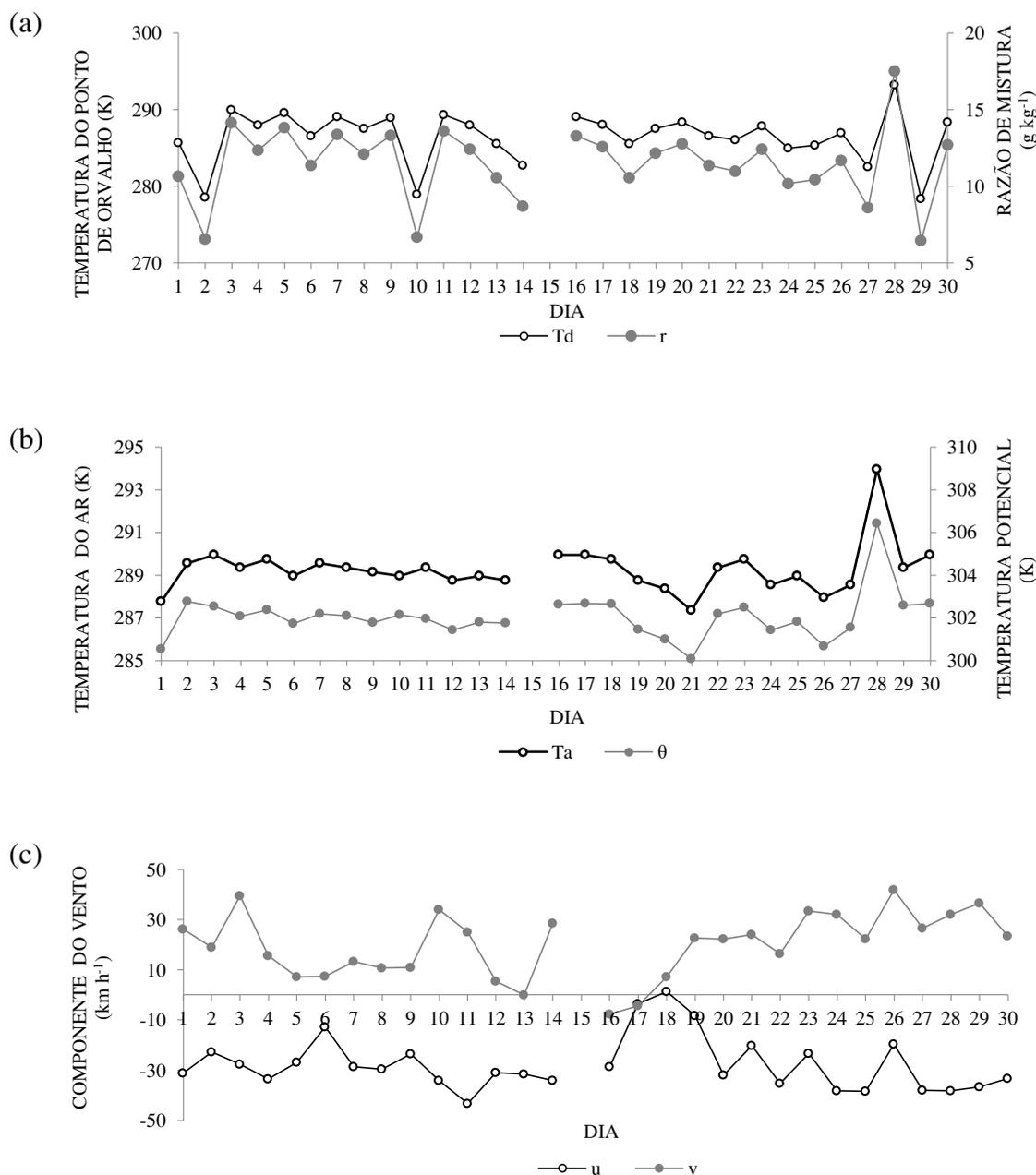


Figura 5.13 – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 850 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), (b) temperatura do ar (Ta) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

No nível de 500 hPa o fator 1, que está relacionado com a umidade, apresenta mínimos nos dias 1, 18, 21 e 25 (Fig. 5.11c). As séries temporais (Fig. 5.14a) indicam que as condições de tempo nesses dias estão associadas a um mínimo nos dias 21, 18, 21 e 25 da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho. O fator 2, que está relacionado com a temperatura, tem máximos nos dias 20, 24 e 28 e mínimos nos dias 5 e 12. As séries temporais (Fig. 5.14b) ilustram nos dias 20, 24 e 28 (5 e 12) máximos (mínimos) da temperatura do ar e temperatura potencial. O fator 3, que está associado às componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 28, 29 e 30 e mínimos nos dias 1, 2 e 6. Esses últimos estão associados com os ventos mais intensos (quadrante sudeste) ilustrados na Figura 5.14c. Por outro lado, os máximos do fator parecem estar relacionados com mudanças no quadrante da direção do vento. A figura evidencia que o vento muda de quadrante várias vezes nesse nível, em contraste com 1000 hPa (Fig. 5.12c) e 850 hPa (Fig. 5.13c). Na Figura 5.14c há vento de todos os quadrantes, mas predomina o sudeste.

No nível de 300 hPa o fator 1, que está relacionado com a temperatura, tem máximos (mínimos) nos dias 26 e 28 (18 e 23) (Fig. 5.11d). As séries temporais da temperatura do ar e temperatura potencial equivalente (Fig. 5.15a) ilustram máximos (mínimos) dessas variáveis nesses mesmos dias. O fator 2, que está relacionado com a umidade, apresenta máximos nos dias 16 e 17. As séries temporais da razão de mistura e da temperatura do ponto de orvalho (Fig. 5.15b) apresentam os valores mais elevados do mês nesses dias, o que pode estar relacionado com as áreas de nebulosidade vistas nas imagens de satélite, a partir das 12 UTC do dia 15 (Fig. 5.1b). O fator 3, que está associado às componentes zonal e meridional do vento, tem máximo no dia 6 e mínimo no dia 14. O máximo corresponde a vento do quadrante sudeste, cuja componente de sul tem o valor mais elevado do mês, em torno de 60 km h^{-1} . O mínimo corresponde a vento do quadrante noroeste, cuja componente de norte é a mais intensa do mês, em torno de 76 km h^{-1} . Esse valor é atingido ao final de um período de três dias de intensificação que tem início no dia 11, quando a componente meridional muda de sul para norte, enquanto que a componente zonal é nula ou quase nula.

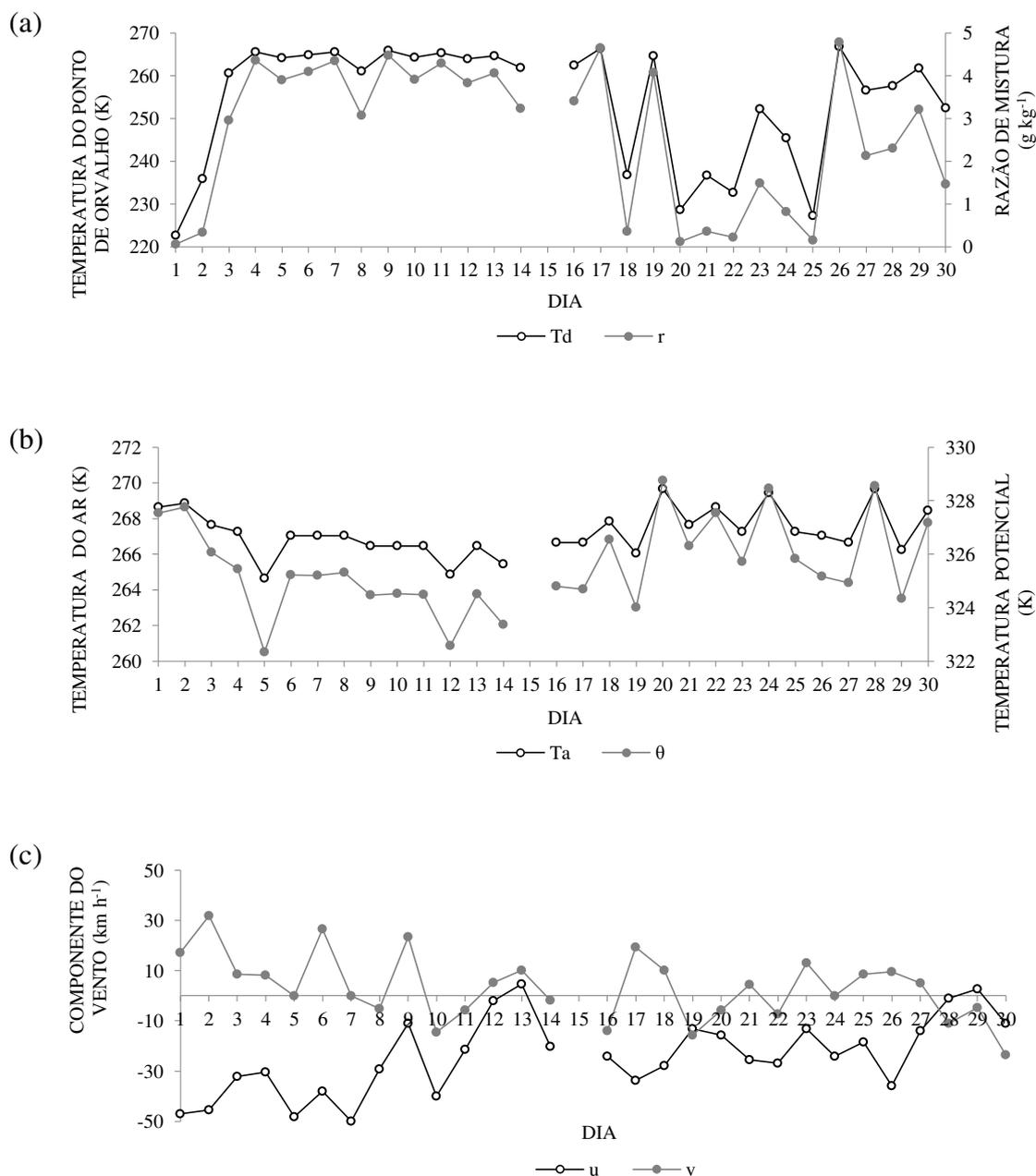


Figura 5.14 – Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 500 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d), (b) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

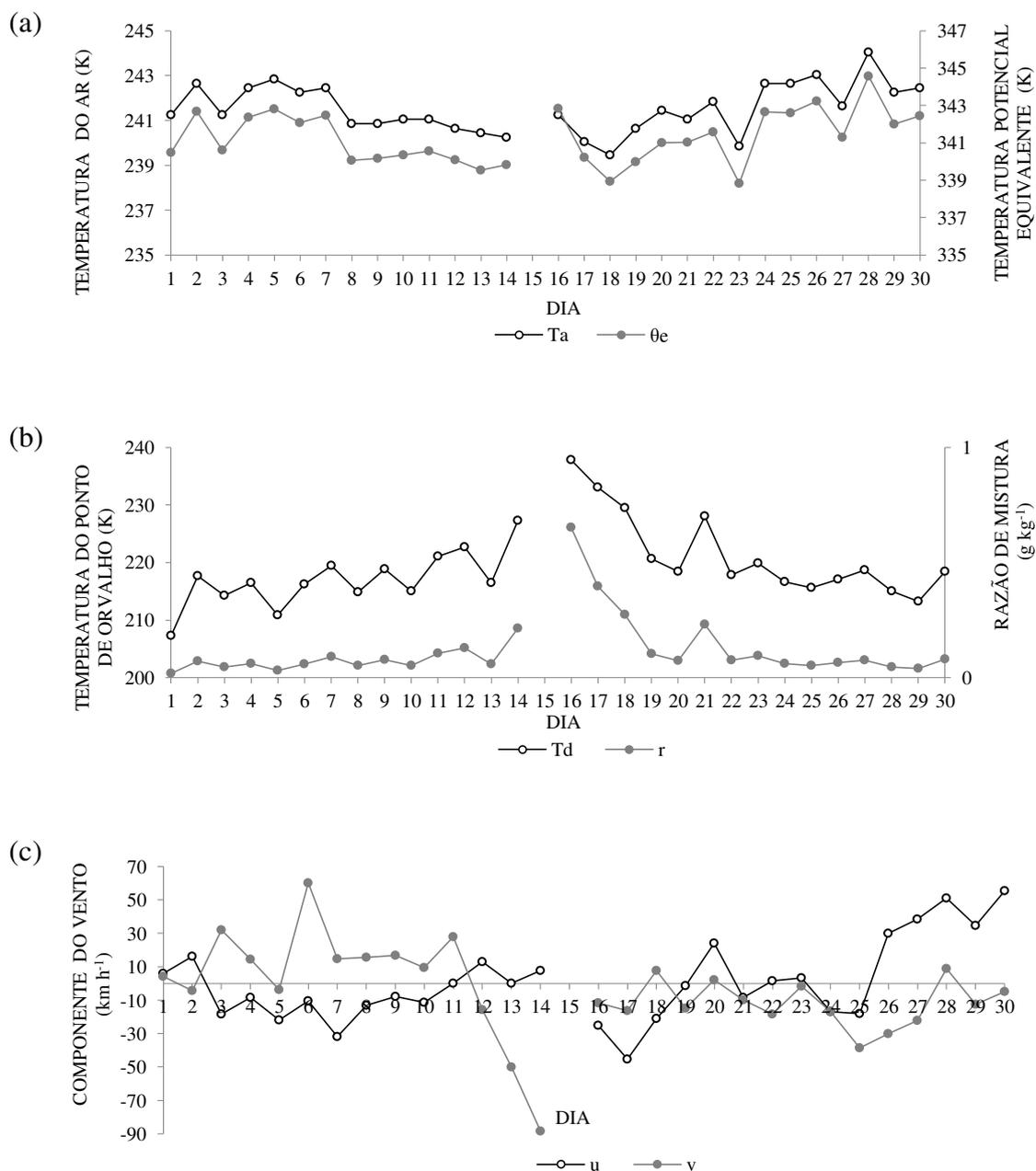


Figura 5.15- Série temporal de elementos meteorológicos às 00 UTC no nível isobárico de 300 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d), (b) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

O Quadro 5.2 mostra a matriz dos fatores rotacionados das 12 UTC para os níveis isobáricos estudados. No nível de 1000 hPa as variáveis de maior contribuição na primeira componente estão altamente relacionadas com temperatura, umidade relativa e componente zonal do vento, sendo as duas últimas com contribuição menor. Esse fator retém 44% da variância total dos dados e pode ser indicativo de advecção de temperatura pela componente zonal do vento. No segundo fator estão as variáveis relacionadas com o teor de umidade do ar, incluindo a umidade relativa, embora com contribuição menor, que retém 36% da variância total dos dados. O terceiro fator é explicado pela componente meridional do vento, que retém 13% da variância total dos dados.

Nos níveis de 850 hPa e 500 hPa as variáveis tiveram comportamento semelhante. Na primeira componente as variáveis de maior contribuição estão altamente relacionadas com a umidade, incluindo a umidade relativa, explicando 43% e 41% da variância total dos dados nos níveis de 850 e 500 hPa, respectivamente. No segundo fator estão as variáveis relacionadas com a temperatura, explicando 34% e 35% da variância total dos dados nos níveis de 850 e 500 hPa, respectivamente. No terceiro fator estão as componentes do vento, com explicação de 16% e 18% da variância total dos dados nos níveis de 850 e 500 hPa, respectivamente.

No nível de 300 hPa as variáveis de maior contribuição no primeiro fator estão relacionadas com a temperatura e umidade (através da temperatura potencial equivalente) com explicação de 43% da variância total dos dados. No segundo fator estão as variáveis relacionadas com a umidade, incluindo a umidade relativa, explicando 35% da variância total dos dados. No terceiro fator estão as componentes do vento, que explicam 13% da variância dos dados.

Quadro 5.2 - Fatores rotacionados das 12 UTC nos níveis isobáricos.

Nível	Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3
1000 hPa	Ta	0,978	-0,043	0,184
	θes	0,976	-0,063	0,181
	θ	0,971	-0,109	0,190
	UR	-0,752	0,627	-0,196
	u	-0,598	-0,045	-0,465
	Td	-0,203	0,971	-0,109
	r	-0,214	0,970	-0,103
	θe	0,243	0,967	-0,027
	v	0,295	-0,199	0,891
850 hPa	r	0,989	0,087	0,111
	Td	0,987	0,053	0,135
	UR	0,966	-0,240	0,073
	θe	0,955	0,262	0,134
	θ	-0,066	0,989	0,127
	θes	0,068	0,986	0,150
	Ta	0,123	0,981	0,147
	u	0,013	0,192	0,867
	v	-0,271	-0,112	-0,813
500 hPa	θe	0,988	-0,083	0,111
	r	0,933	-0,349	0,047
	UR	0,892	-0,437	0,007
	Td	0,875	-0,413	-0,037
	Ta	-0,275	0,943	0,186
	θes	-0,317	0,933	0,171
	θ	-0,347	0,922	0,173
	u	-0,132	-0,094	-0,888
	v	-0,038	0,222	0,867
300 hPa	θe	0,979	0,188	0,065
	Ta	0,975	-0,203	0,074
	θ	0,974	-0,209	0,079
	θes	0,972	-0,216	0,075
	UR	-0,057	0,986	-0,045
	r	-0,048	0,975	0,021
	Td	-0,228	0,942	0,038
	v	0,020	-0,237	-0,849
	u	0,245	-0,352	0,644

O peso dos três fatores das 12 UTC no período de 1 a 30 de julho de 2011 é ilustrado na Figura 5.16 para os níveis em estudo. Foram considerados como máximo (mínimo) de cada fator valores acima (abaixo) de 1,5 (-1,5). No nível de 1000 hPa o fator 1, que pode estar relacionado com advecção de temperatura pela componente zonal do vento, apresenta máximos nos dias 1 e 28 e mínimos nos dias 2, 5 e 13 (Fig. 5.16a). De maneira geral, as séries temporais (Fig. 5.17a) indicam que máximos (mínimos) da temperatura estão relacionadas com mínimos (máximos) da intensidade da componente zonal do vento, e vice-versa. O fator 2, que está relacionado com a umidade, tem máximo nos dias 7, 8, 10 e 15 e mínimos nos dias 1 e 14. O horário das 12 UTC no dia 15 antecede a atuação da área de nebulosidade organizada em Natal (Fig. 5.1b). As séries temporais da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho (5.17b) evidenciam máximos e mínimos nos dias correspondentes aos do fator. O fator 3, que está associado a componente meridional do vento, tem máximos nos dias 10 e 18 e mínimo no dia 8. A série temporal da componente meridional do vento (Fig. 5.17c) indica que os máximos (mínimo) do fator 3 tem máximos (mínimo) da componente.

No nível de 850 hPa o fator 1, que está relacionado com a umidade, apresenta mínimos nos dias 1 e 26. As séries temporais (Fig. 5.18a) indicam que as condições de tempo nesses dias estão associadas a valores mínimos da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho. O fator 2, que está relacionado com a temperatura, tem máximos nos dias 2 e 18 e mínimos nos dias 21 e 23. As séries temporais (Fig. 5.18b) indicam que as condições de tempo nos dias 2 e 18 (21 e 23) têm máximos (mínimos) da temperatura do ar e temperatura potencial. O dia 15, que antecede o evento de chuva intensa, tem contribuição do fator 1 e fator 2, já que apresenta máximos da temperatura e umidade (Fig. 5.18a,b). O fator 3, que está relacionado com as componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 2, 16 e 17. Neles o vento é muito fraco, conforme ilustra a Figura 5.18c. A direção do vento é do quadrante sudeste durante todo o mês, exceto nos dias 2, 5, 16 e 17.

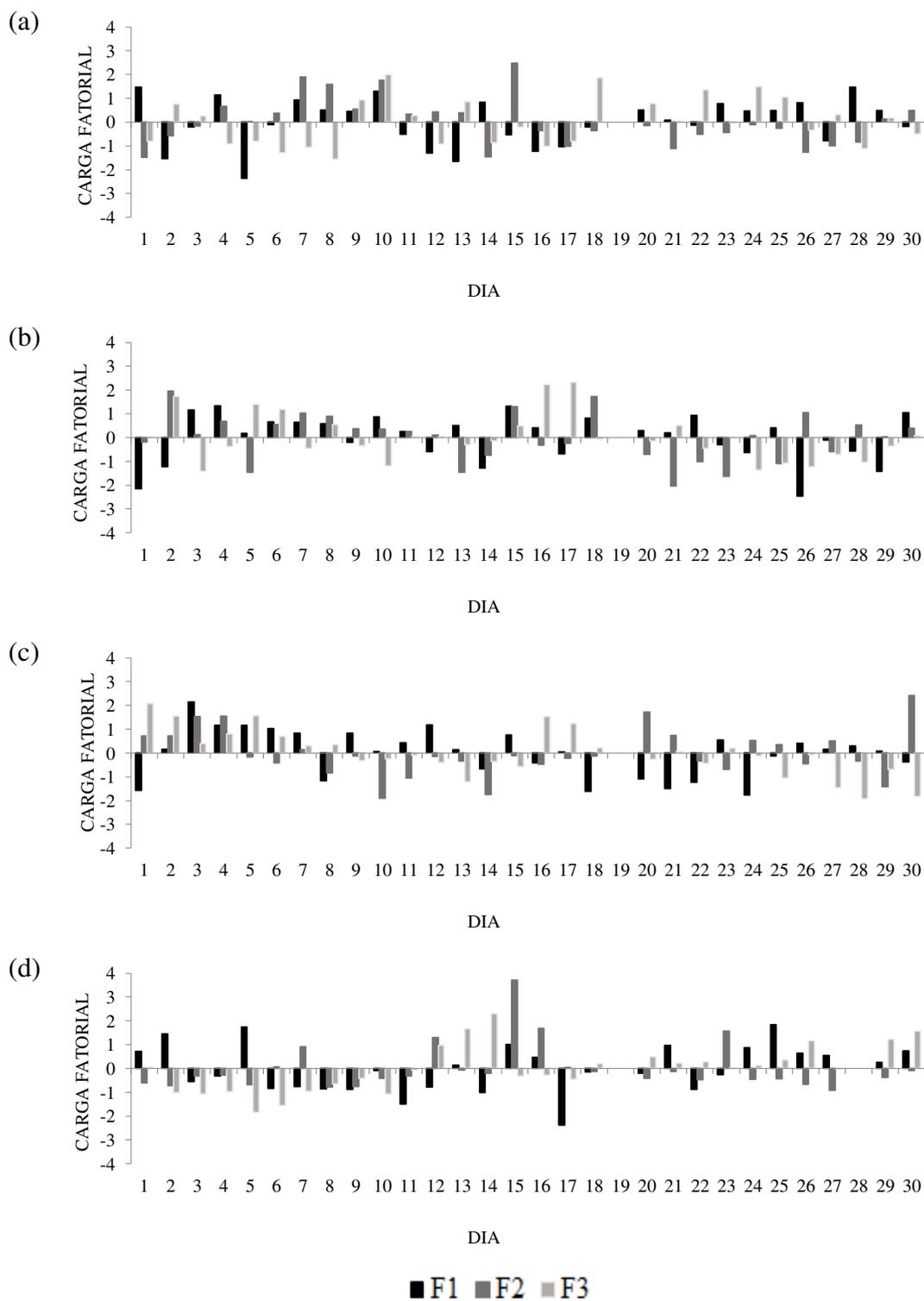


Figura 5.16 - Carga fatorial das 12 UTC no mês de julho de 2011 em Natal-RN obtida para os níveis isobáricos de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19) e no dia sem dados no nível de 300 hPa (28). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos, sendo: F1 (fator 1), F2 (fator 2) e F3 (fator 3) (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

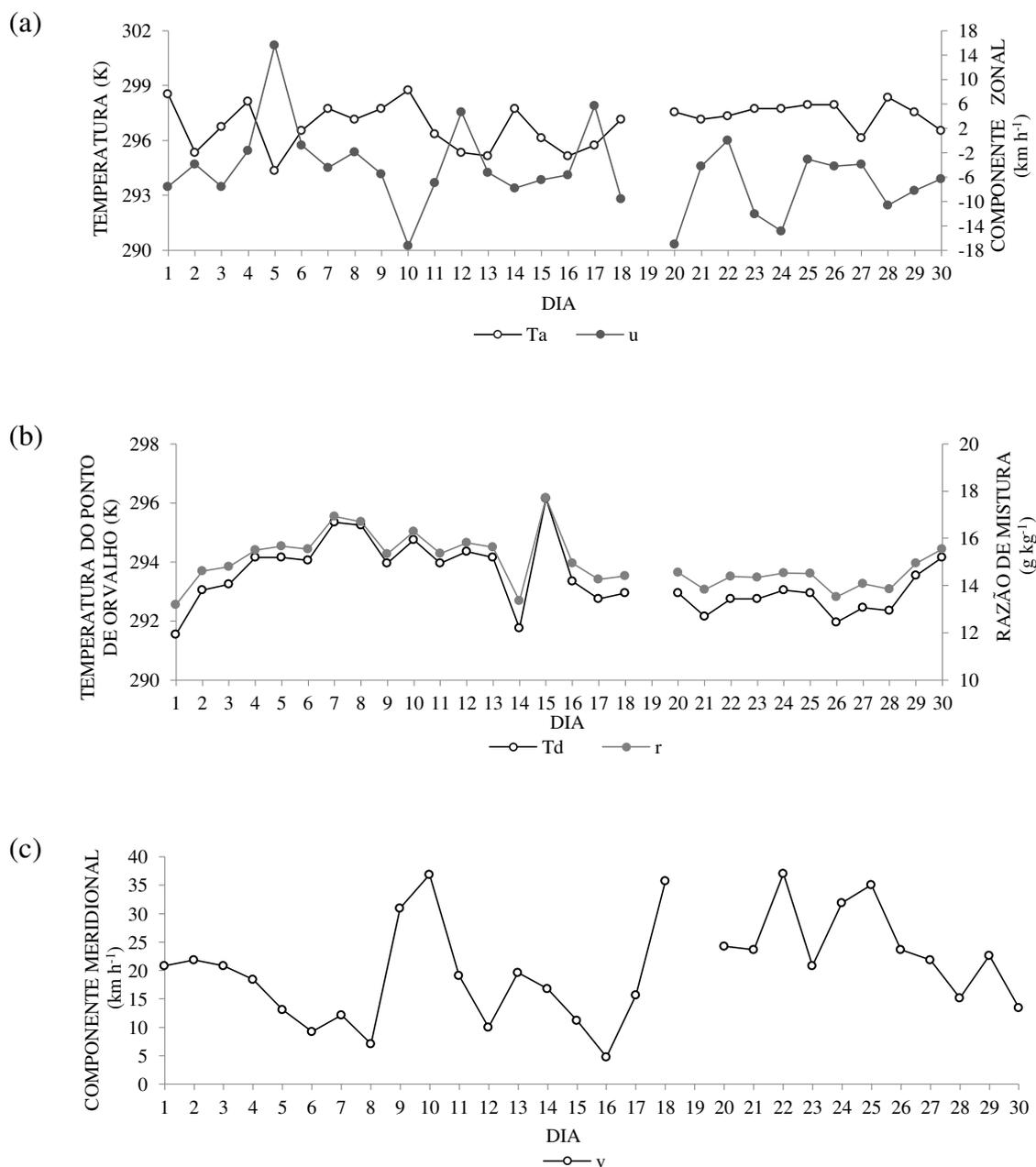


Figura 5.17– Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 1000 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) temperatura do ar (T) e componente zonal do vento (u), (b) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) componente meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

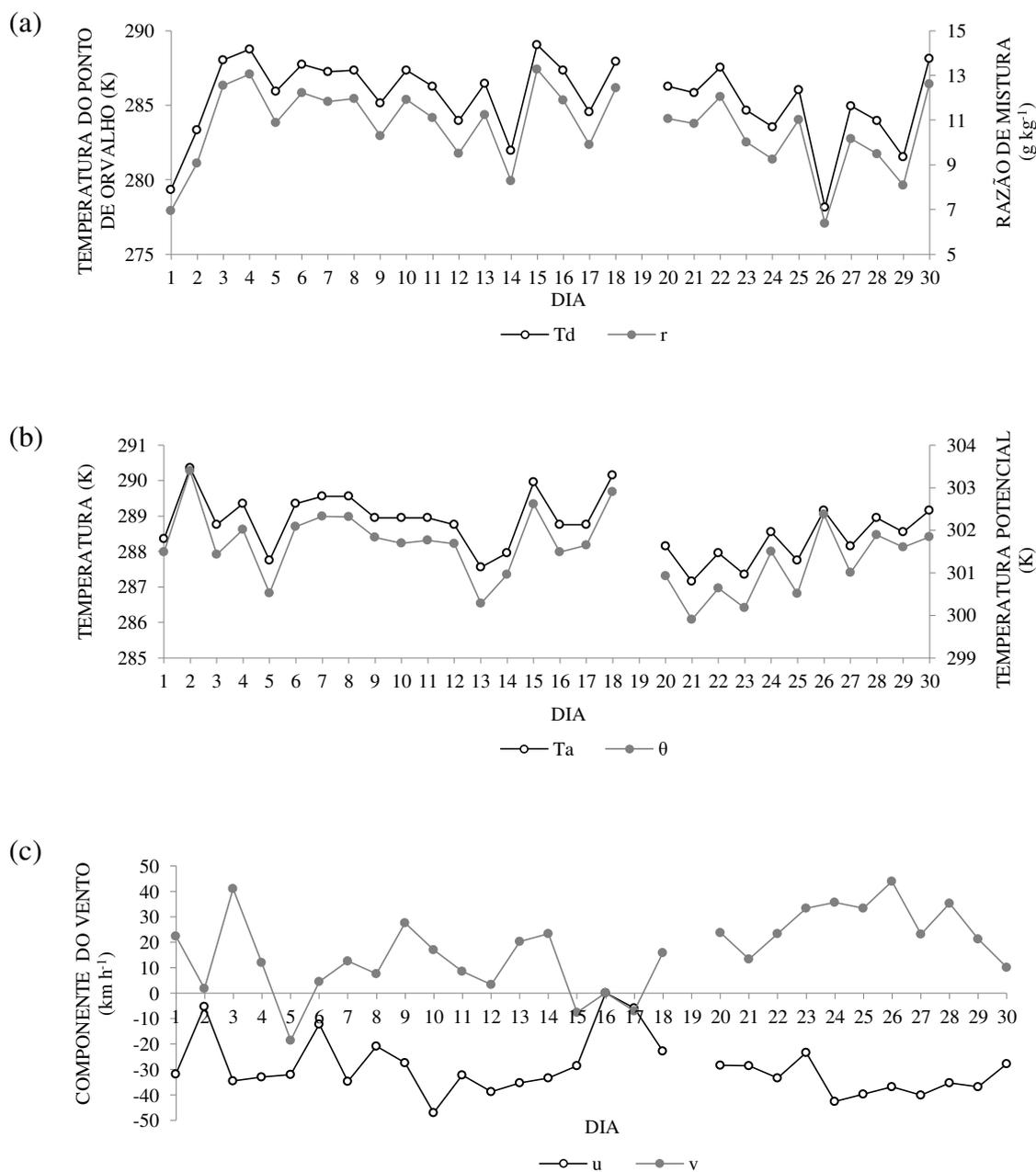


Figura 5.18 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 850 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d), (b) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

No nível de 500 hPa o fator 1, que está relacionado com a umidade, apresenta máximo no dia 3 e mínimos nos dias 1, 18, 21 e 24. As séries temporais (Fig. 5.19a) indicam que as condições de tempo nesses dias estão associadas a um máximo (mínimos) no dia 3 (1, 18, 21 e 24) da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho. O fator 2, que está relacionado com a temperatura, tem máximos nos dias 3, 4, 20 e 30 e mínimos nos dias 10 e 14. As séries temporais (Fig. 5.19b) indicam que as condições de tempo nos dias 3, 4, 20 e 30 (10 e 14) têm máximos (mínimos) da temperatura do ar e temperatura potencial. O fator 3, que está associado com as componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 1, 2, 5 e 16 e mínimos nos dias 28 e 30. Os dias 1, 2, 5 e 16 são aqueles que apresentam os ventos mais intensos (quadrante sudeste) de acordo com a Figura 5.19c. Por outro lado, os mínimos do fator 3 estão associados a ventos fracos.

No nível de 300 hPa o fator 1, que está relacionado com temperatura e umidade (através da temperatura potencial equivalente), tem máximos nos dias 5 e 25 e mínimo no dia 17. As séries temporais (Fig. 5.20a) ilustram máximos (mínimo) da temperatura do ar e temperatura potencial equivalente nesses mesmos dias. O fator 2, que está relacionado com a umidade, apresenta máximos nos dias 15, 16 e 23. As séries temporais da razão de mistura e temperatura do ponto de orvalho (Fig. 5.20b) tem no dia 15 o valor mais elevado do mês, precedendo o evento de chuva intensa do dia 16. O fator 3, que está associado com as componentes zonal e meridional do vento, tem máximos nos dias 13, 14 e 30, e mínimos nos dias 5 e 6. Os mínimos correspondem a ventos do quadrante sudeste cuja componente de sul é a mais intensa do mês, com velocidade em torno de 67 km h^{-1} , enquanto que os máximos dos dias 13 e 14 correspondem a ventos do quadrante noroeste, cuja componente de norte tem o valor mais elevado do mês, em torno de 77 km h^{-1} . Esse valor é atingido ao final de um período de três dias durante o qual o vento intensifica. O período de intensificação tem início no dia 11, quando o vento muda do quadrante sudoeste para o noroeste.

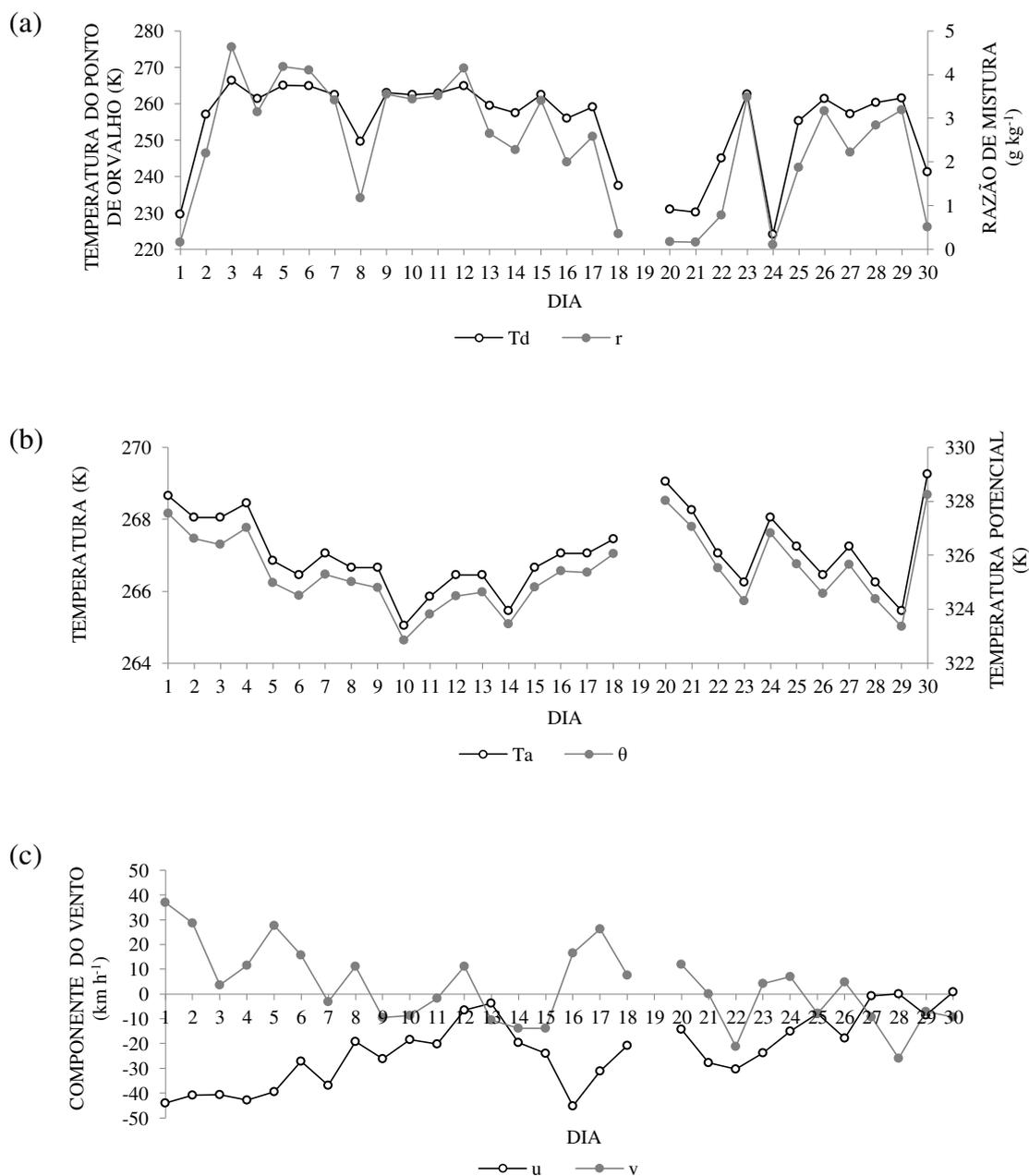


Figura 5.19 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 500 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d), (b) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial (θ) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

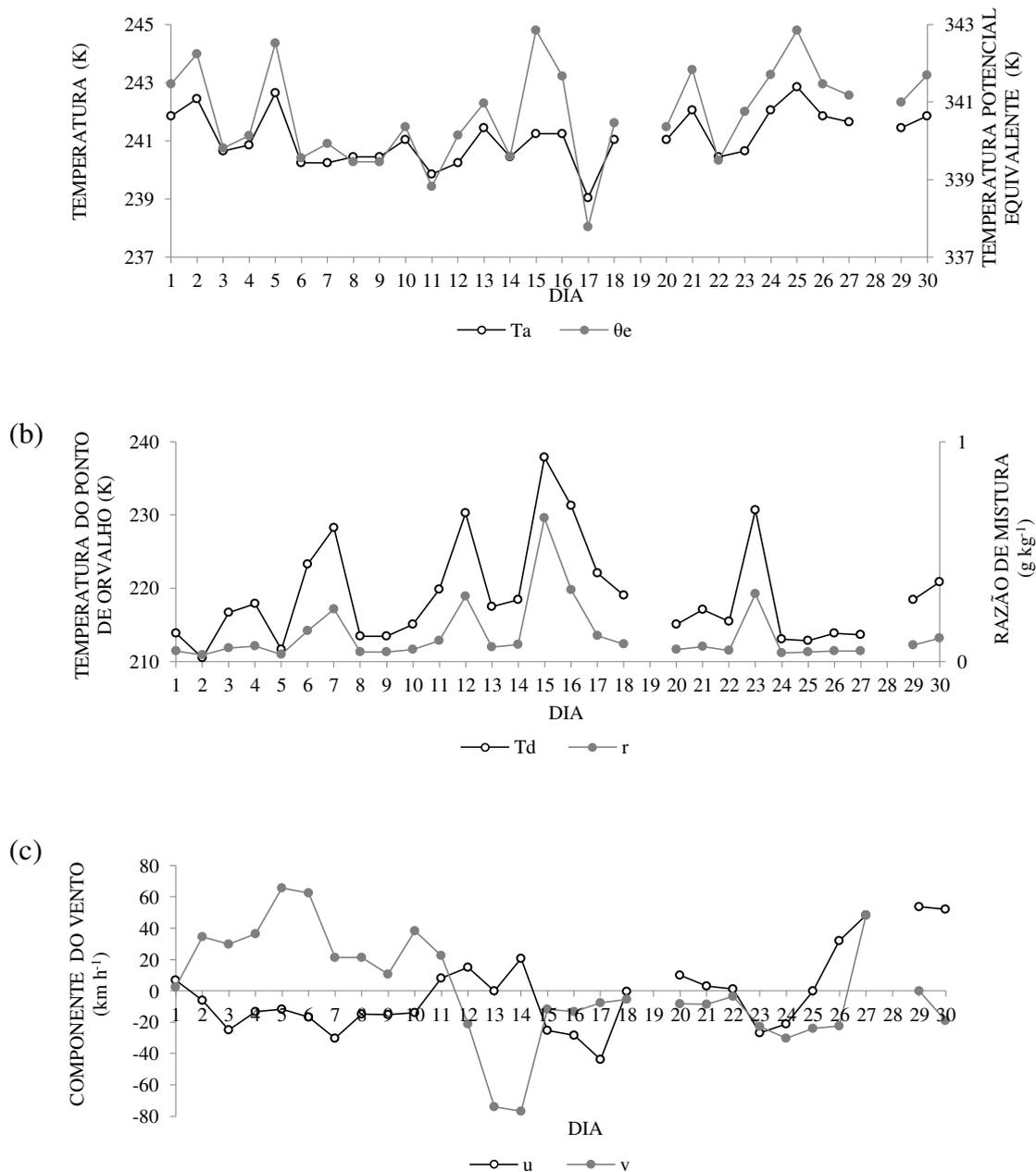


Figura 5.20 – Série temporal de elementos meteorológicos às 12 UTC no nível isobárico de 300 hPa para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) temperatura do ar (T_a) e temperatura potencial equivalente (θ_e), (b) razão de mistura (r) e temperatura do ponto de orvalho (T_d) e (c) componente zonal (u) e meridional (v) do vento. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (19) e no dia sem dados no nível de 300 hPa (28). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

Na segunda etapa da análise multivariada foi aplicada a análise de agrupamentos aos fatores obtidos nos dois horários sinóticos, separadamente. A curva de inércia para o agrupamento dos níveis analisados para as 00 UTC é mostrada na Figura 5.21. A flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos. Todos os níveis analisados, conforme indicado na curva de inércia (Fig. 5.21a-d), tem o corte no dendrograma de ordem 8, agrupando os dias em oito grupos.

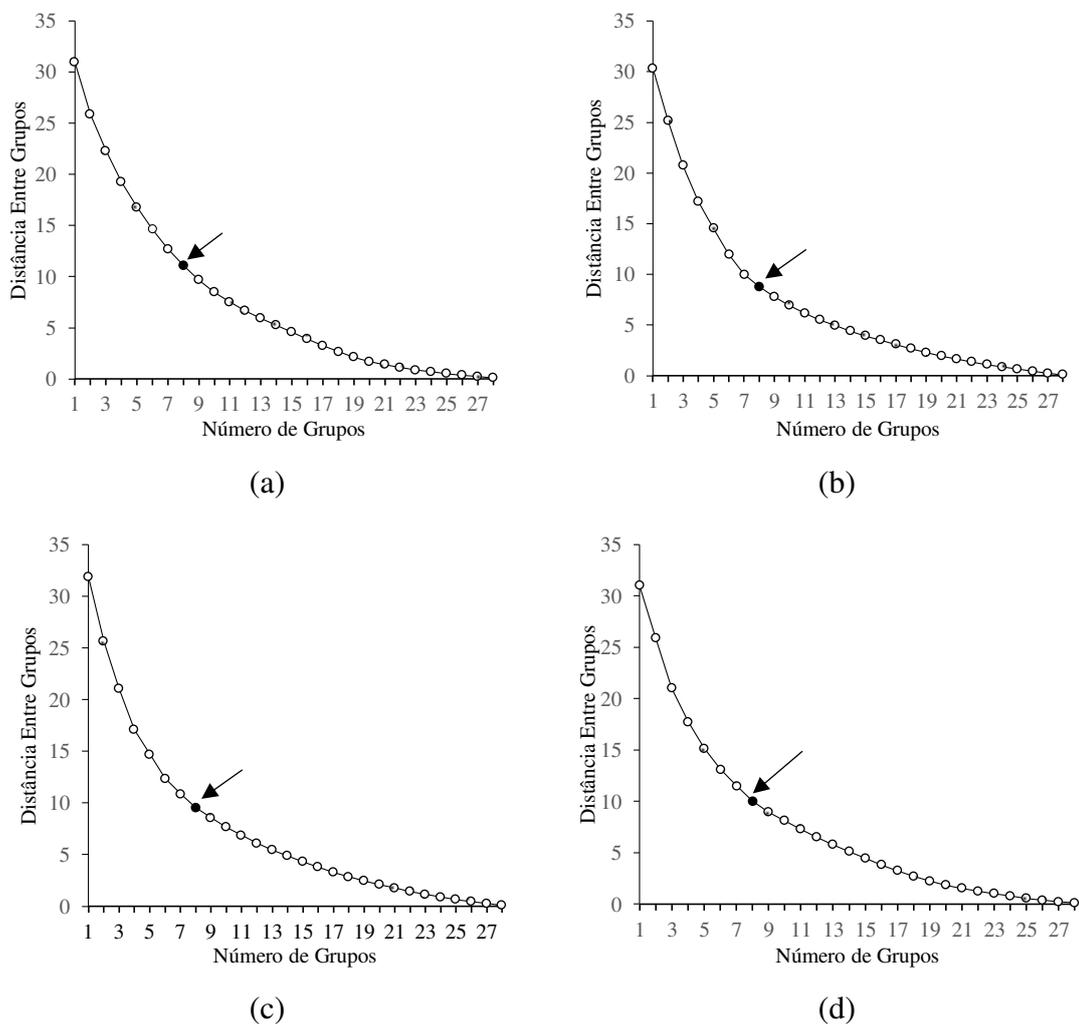


Figura 5.21 - Curva de inércia das 00 UTC para o nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.

A curva de inércia para o agrupamento dos níveis analisados para as 12 UTC é mostrada na Figura 5.22. Semelhantemente ao que foi discutido para a Figura 5.21, a flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos. Todos os níveis analisados, conforme indicado na curva de

inércia (Fig. 5.22a-d), tem o corte no dendrograma de ordem 7, agrupando os dias em sete grupos.

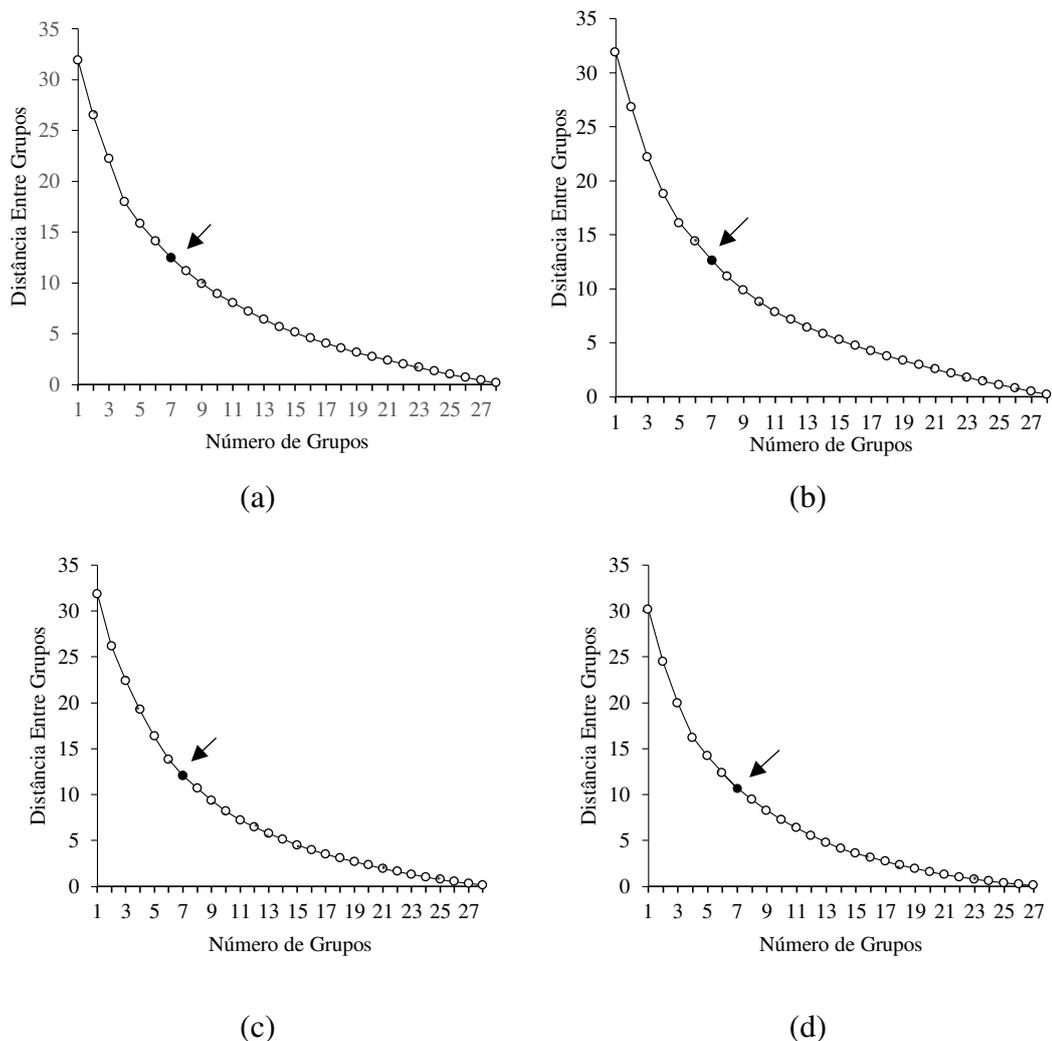


Figura 5.22 - Curva de inércia das 12 UTC para o nível de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.

Na Figura 5.23 estão representados os dendrogramas das 00 UTC para os níveis isobáricos analisados. A informação contida nos dendrogramas é sintetizada pela Tabela 5.2, que contém os dias que constituem cada grupo, e pelo Quadro 5.3, que contém as médias dos elementos meteorológicos em cada grupo. No nível de 1000 hPa (Fig. 5.23a) os grupos 1 e 2 (Tab. 5.2) reúnem dias que, em sua maioria, tem temperatura mais elevada (Fig. 5.12b). A média das temperaturas nesses grupos tem valores muito próximos (Quadro 5.3). O grupo 3 (Tab. 5.2) reúne dias com valores baixos de

temperatura e razão de mistura (Fig. 5.12a,b). A média dessa última variável é a mais baixa dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 4 (Tab. 5.2) reúne os dias com vento do quadrante sudoeste, com velocidade elevada (Fig. 5.12c). Esse grupo tem a segunda maior média da componente meridional do vento (Quadro 5.3). No grupo 5 (Tab. 5.2) está o dia que tem os valores mais elevados da razão de mistura e temperatura no mês (Fig. 5.12a,b). Esse grupo tem o valor mais alto da razão de mistura, temperatura e componente meridional do vento (Quadro 5.3). Os grupos 6 e 7 (Tab. 5.2) reúnem os dias com os valores mais altos da razão de mistura (Fig. 5.12a), com exceção dos dias 3 e 28 que não fazem parte desses grupos, cuja média da razão de mistura é elevada (Quadro 5.3). O dia com o maior total de precipitação registrado (16) está no grupo 7. Os dias que compõem o grupo 8 (Tab. 5.2) não apresentam características que, em conjunto, o destaquem entre os grupos (Quadro 5.3).

No nível de 850 hPa às 00 UTC, o grupo 1 (Tab. 5.2) reúne dias com valores baixos da razão de mistura (Fig. 5.13a). O grupo 1 tem a segunda menor média dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 2 reúne dias cujos valores elevados de razão de mistura foram precedidos por um mínimo dessa variável (à exceção do dia 23) (Fig. 5.13a). Ele tem a segunda maior média dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 3 reúne dias com valores elevados da razão de mistura e valores baixos de temperatura (Fig. 5.13a,b). Esse grupo tem a média mais baixa de temperatura (Quadro 5.3). O grupo 4 reúne os dias com os menores valores de razão de mistura (Fig. 5.13a). Sua média é a mais baixa dentre os oito grupos (Quadro 5.3). O grupo 5, composto pelo dia 28, tem os valores máximos de razão de mistura e temperatura do mês (Fig. 5.13a,b). Ele tem os valores mais elevados dessas variáveis, e também das componentes do vento (Quadro 5.3). O grupo 6 reúne os dias com as componentes do vento mais fracas (Fig. 5.13c). Esse grupo tem as médias mais baixas (em módulo) das componentes do vento (Quadro 5.3). O grupo 7 é composto por dias em que a razão de mistura e a temperatura são relativamente elevadas (Fig. 5.13a,b e Quadro 5.3). O grupo 8 reúne dias em que as componentes do vento, zonal e/ou meridional, são fracas (Fig. 5.13c e Quadro 5.3).

No nível de 500 hPa às 00 UTC (Fig. 5.23c), o grupo 1 reúne dias com valores elevados da razão de mistura (Fig. 5.14a). O grupo 1 tem a média mais alta dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 2 reúne os dias com os valores mínimos de temperatura (Fig. 5.14b). Esse grupo tem a média mais baixa de temperatura (Quadro 5.3). O grupo 3 é composto por dias com valores elevados da

razão de mistura e valores baixos de temperatura (Fig. 5.14a,b). Ele tem a segunda maior (menor) média da razão de mistura (temperatura) dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 4 reúne dias com valores altos da razão de mistura (Fig. 5.14a), e tem a terceira média mais elevada dessa variável (Quadro 5.3). No grupo 5 estão dias com valores baixos (altos) da razão de mistura (temperatura) (Fig. 5.14a,b). Esse grupo tem a segunda média mais baixa da razão de mistura e a média mais elevada da temperatura (Quadro 5.3). O grupo 6 é composto por dias com valores elevados de temperatura (Fig. 5.14b); sua média é a segunda mais alta dentre os grupos (Quadro 5.3). O grupo 7 reúne dias com mínimos da razão de mistura, valores elevados de temperatura e componentes do vento intensas (Fig. 5.14a-c). Esse grupo tem a média mais baixa da razão de mistura e as médias mais elevadas (em módulo) das componentes do vento (Quadro 5.3). O grupo 8 é composto por dias com valores baixos da razão de mistura e valores relativamente elevados de temperatura (Fig. 5.14a,b). Esse grupo tem a terceira média mais baixa da razão de mistura (Quadro 5.3).

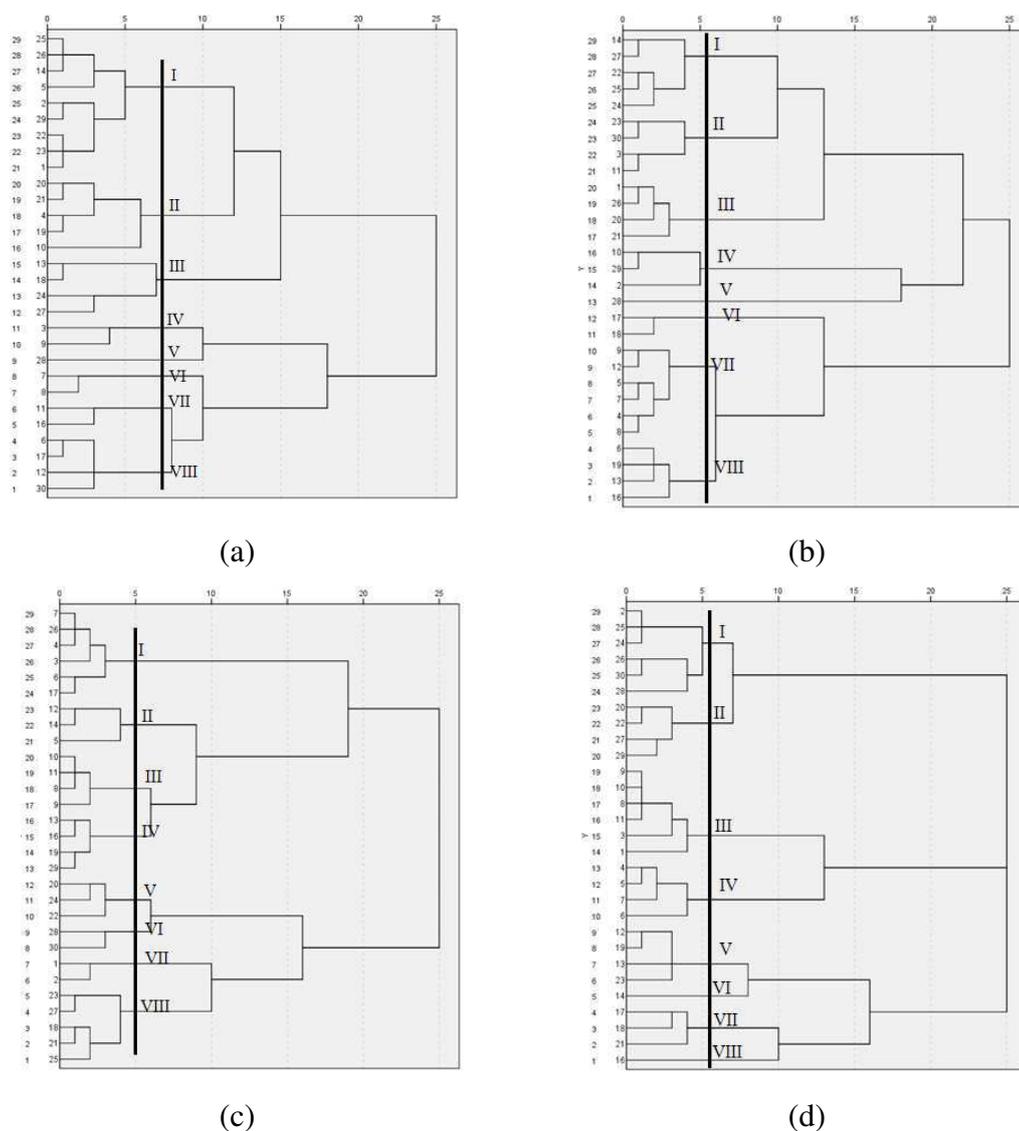


Figura 5.23 - Dendrograma para as 00 UTC utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível isobárico de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.

No nível de 300 hPa às 00 UTC (Fig. 5.23d), o grupo 1 reúne dias (Tabela 5.2) com os maiores valores de temperatura do mês (Fig. 5.15a). Esse grupo tem a maior média de temperatura (Quadro 5.3). No grupo 2 estão dias com valores baixos de temperatura (Fig. 5.15a). O grupo 3 é composto por dias com valores baixos de temperatura e razão de mistura (Fig. 5.15a,b), e componente meridional (zonal) do vento positiva (negativa) ou nula (Fig. 5.15c). Esse grupo tem a média mais baixa da temperatura do ponto de orvalho (Quadro 5.3). O grupo 4 reúne dias com valores relativamente elevados (baixos) de temperatura (razão de mistura) (Fig. 5.15a,b). Esse grupo tem a segunda maior (menor) média da temperatura (temperatura do ponto de

orvalho), e componentes do vento (Fig. 5.15c) com características semelhantes às daquelas do grupo 3 (Quadro 5.3). O grupo 5 é composto por dias que tem valores baixos de temperatura (Fig. 5.15a), e componente zonal positiva (fraca) ou nula. Esse grupo tem a média mais baixa (em módulo) dessa componente (Quadro 5.3). O grupo 6 tem apenas um dia, aquele do máximo (em módulo) da componente meridional do vento, e razão de mistura relativamente elevada (Fig. 5.15b,c, e Quadro 5.3). No grupo 7 estão dias com valores baixos (altos) de temperatura (razão de mistura) (Fig. 5.15a,b). Esse grupo tem a menor média de temperatura e a segunda maior média da razão de mistura (Quadro 5.3). No grupo 8 há um dia apenas, aquele do máximo mensal da razão de mistura (Fig. 5.15b, e Quadro 5.3).

Tabela 5.2 – Grupo de dias dos elementos meteorológicos das 00 UTC formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-P.

Grupo	Dias em 1000 hPa	Dias em 850 hPa	Dias em 500 hPa	Dias em 300 hPa
1	1,2,5,14,22,23,25,26,29	14,22,24,25,27	3,4,6,7,17,26	2,24,25,26,28,30
2	4,10,19,20,21	3,11,23,30	5,12,14	20,22,27,29
3	13,18,24,27	1,20,21,26	8,9,10,11	1,3,8,9,10,11
4	3,9	2,10,29	13,16,19,29	4,5,6,7
5	28	28	20,22,24	12,13,19,23
6	7,8	17,18	28, 30	14
7	11,16	4,5,7,8,9,12	1,2	17,18,21
8	6,12,17,30	6,13,16,19	18,21,23,25,27	16

Quadro 5.3 - Valores médios dos elementos meteorológicos às 00 UTC nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos elementos meteorológicos.

(*) As componentes do vento foram consideradas em módulo.

Nível	Variável	Grupo							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1000 hPa	Ta (K)	297,3	297,6	295,9	296,3	299,4	298,3	295,8	296,7
	Td (K)	293,8	293,7	293,0	295,4	296,8	296,0	295,8	294,9
	UR (%)	81,1	79,2	84,3	95,0	86,0	87,5	100,0	89,8
	r (g kg ⁻¹)	15,3	15,2	14,5	16,9	18,4	17,5	17,3	16,3
	θ (K)	296,0	296,3	294,6	294,8	297,8	296,8	294,3	295,3
	θe (K)	340,0	340,0	336,3	343,2	351,3	347,5	343,7	342,2
	θes (K)	351,1	352,5	344,8	346,4	361,0	355,5	344,1	348,2
	u (km h ⁻¹)	-5,3	-11,0 (*)	-2,6	3,2	0,0 (*)	-8,4	-10,6	-5,3
	v (km h ⁻¹)	24,0	20,3	24,1	25,7	29,6(*)	8,1	18,4	17,6
850 hPa	Ta (K)	288,8	289,8	287,9	289,3	294,0	289,9	289,3	289,2
	Td (K)	284,3	288,9	286,9	278,6	293,3	286,8	288,5	287,2
	UR (%)	74,6	94,8	94,0	49,0	96,0	82,5	95,0	88,3
	r (g kg ⁻¹)	9,8	13,2	11,6	6,6	17,5	11,6	12,9	11,8
	θ (K)	301,7	302,4	300,6	302,5	306,4	302,7	302,0	301,9
	θe (K)	330,7	341,5	334,7	322,2	359,1	337,0	340,1	336,9
	θes (K)	340,9	344,1	337,1	342,9	361,8	344,6	342,4	341,9
	u (km h ⁻¹)	-36,8	-31,9	-25,7	-31,1	-38,3 (*)	-1,1 (*)	-28,8	-20,3
	v (km h ⁻¹)	25,2	30,3	28,6	29,9	32,1 (*)	1,5 (*)	10,5	5,6
500 hPa	Ta (K)	267,1	265,0	266,6	266,4	269,3	269,1	268,8	267,3
	Td (K)	265,0	263,3	264,2	263,4	235,6	255,1	229,3	241,9
	UR (%)	85,8	88,0	83,8	79,8	6,7	33,0	3,5	18,4
	r (g kg ⁻¹)	4,2	3,7	3,9	3,7	0,4	1,9	0,2	0,9
	θ (K)	325,3	322,8	324,7	324,4	328,2	327,9	327,7	325,9
	θe (K)	339,3	334,9	337,8	336,7	329,7	334,4	328,4	329,0
	θes (K)	341,7	336,6	340,5	339,9	347,6	347,0	346,3	342,6
	u (km h ⁻¹)	-36,6	-23,4	-25,4	-7,4	-22,2	-6,0 (*)	-46,2 (*)	-19,8
	v (km h ⁻¹)	12,1	1,1	-0,5 (*)	-6,1	-4,3	-17,3	24,5 (*)	8,3
300 hPa	Ta (K)	242,9	241,8	241,1	242,5	240,4	240,3	240,2	241,3
	Td (K)	216,8	217,1	215,2	215,8	219,9	227,3	230,2	237,9
	UR (%)	6,0	7,0	6,7	6,0	11,5	26,0	37,0	72,0
	r (g kg ⁻¹)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,7
	θ (K)	342,8	341,2	340,1	342,2	339,2	339,0	338,9	340,4
	θe (K)	343,0	341,5	340,4	342,4	339,6	339,8	340,1	342,8
	θes (K)	346,8	344,8	343,5	346,1	342,4	342,1	342,0	343,8
	u (km h ⁻¹)	19,6	24,7	-7,4	-18,2	3,8 (*)	7,7	-24,8	-25,2 (*)
	v (km h ⁻¹)	-14,3	-12,8	17,7	21,4	-20,5	-88,5 (*)	-6,3 (*)	-11,7

Na Figura 5.24 estão representados os dendrogramas das 12 UTC para os níveis isobáricos analisados. A informação contida nos dendrogramas é sintetizada pela Tabela 5.3, que contém os dias que constituem cada grupo, e pelo Quadro 5.4, que contém as médias dos elementos meteorológicos em cada grupo. No nível de 1000 hPa o grupo 1 reúne dias com valores elevados das componente meridional do vento (Fig. 5.17c). Esse grupo tem a segunda média mais elevada dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.4). No grupo 2 está o dia das componentes do vento mais fortes (Fig. 5.17c), e valores elevados de temperatura e razão de mistura (Fig. 5.17a,b), o que se reflete nos valores máximos dessas variáveis vistos no Quadro 5.4. O grupo 3 reúne dias, em sua maioria, com temperatura e razão de mistura relativamente elevados (Quadro 5.4). O grupo 4 é composto por dias que tem valores mais altos (baixos) de temperatura (razão de mistura) (Fig. 5.17a,b). Esse grupo tem a segunda média mais elevada de temperatura e a média mais baixa da razão de mistura (Quadro 5.4). O grupo 5 reúne dias com componente zonal do vento fraca (Fig. 5.17c), e valores elevados da razão de mistura (Fig. 5.17a,b). Esse grupo tem a média mais elevada da razão de mistura e a média mais baixa (em módulo) da componente zonal do vento (Quadro 5.4). No grupo 6 estão dias com valores baixos de temperatura e componente zonal do vento fraca (Fig. 5.17a,c). Esse grupo tem a segunda média mais baixa dessas variáveis (Quadro 5.4). O grupo 7 reúne dias com valores baixos de temperatura, componente zonal fraca e componente meridional entre fraca e moderada (Fig. 5.17a,c). Esse grupo tem a média mais baixa da temperatura e da componente meridional do vento (Quadro 5.4). Nele esta o dia da chuva intensa e o dia posterior (16 e 17).

No nível de 850 hPa o grupo 1 reúne dias com valores relativamente elevados da razão de mistura, e componente zonal (meridional) do vento intensa (moderada a intensa) (Fig. 5.18a,c). Esse grupo tem as médias mais elevadas (em módulo) das componentes do vento, e a segunda média mais elevada da razão de mistura (Quadro 5.4). O grupo 2 é composto por dias que tem valores relativamente baixos da razão de mistura, e componente zonal do vento intensa (Fig. 5.18a,c). Esse grupo tem a segunda média mais baixa da razão de mistura e a terceira média mais elevada (em módulo) da componente zonal do vento (Quadro 5.4). O grupo 3 reúne dias que tem valores elevados da razão de mistura e temperatura (Fig. 5.18a,b). Esse grupo tem as médias mais elevadas dessas variáveis (Quadro 5.4). No grupo 4 estão dias com valores relativamente baixos da temperatura (Fig. 5.18b). Ele tem a segunda média mais baixa dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.4). O grupo 5 reúne dias com valores mais

baixos da temperatura (Fig. 5.18b). Ele tem a média mais baixa dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.4). No grupo 6 estão os dias com os valores mínimos da razão de mistura (Fig. 5.18a). Esse grupo tem a média mais baixa dessa variável (Quadro 5.4). O grupo 7 reúne os dias com as componentes do vento mais fracas do mês ((Fig. 5.18c e Tabela 5.3). Esse grupo tem as médias mais baixas (em módulo) das componentes do vento e a segunda média mais elevada de temperatura (Quadro 5.4). O dia do evento intenso de chuva e o dia posterior (16 e 17) são parte integrante desse grupo.

No nível de 500 hPa o grupo 1 reúne dias com valores elevados da razão de mistura e valores relativamente baixos da temperatura (Fig. 5.19a,b). Esse grupo tem a segunda média mais baixa da temperatura e a segunda média mais elevada da razão de mistura (Quadro 5.4). No grupo 2 estão dias com valores elevados da razão de mistura e temperatura, e componente zonal do vento intensa (Fig. 5.19a-c). O grupo 2 tem a média mais elevada da razão de mistura e da componente zonal (em módulo), e a segunda média mais elevada da temperatura (Quadro 5.4). O grupo 3 reúne os dias com os valores mínimos da temperatura (Fig. 5.19b). Ele tem a média mais baixa dessa variável dentre os grupos (Quadro 5.4). No grupo 4 estão dias nos quais a componente zonal do vento é nula ou muito fraca (Fig. 5.19c). A média dessa variável é a segunda mais baixa (em módulo) dentre os grupos (Quadro 5.4). No grupo 5 está o dia que tem o valor mais alto da temperatura, valor baixo da razão de mistura e componente zonal do vento fraca (Fig. 5.19a-c). Esse grupo se destaca pelo valor máximo (mínimo) da temperatura (módulo da componente zonal), e segundo valor mais baixo da razão de mistura (Quadro 5.4). O grupo 6 reúne dias com componentes do vento intensas (Fig. 5.19c). Ele apresenta ainda valores baixos da razão de mistura e valores relativamente elevados da temperatura (Fig. 5.19a,b). Esse grupo tem a média mais elevada da componente meridional, a segunda média mais elevada (em módulo) da componente zonal, e a segunda média mais baixa da razão de mistura (Quadro 5.4). No grupo 6 está o dia no qual foi registrado o evento intenso de chuva(16), e o dia posterior (17). Nos dias que compõem o grupo 7 o que se de destaca são os valores muito baixos da razão de mistura e da componente meridional (em módulo) do vento (Fig. 5.19a,c). Nesse grupo estão as médias mais baixas (em módulo, para a componente meridional) dessas variáveis (Quadro 5.4).

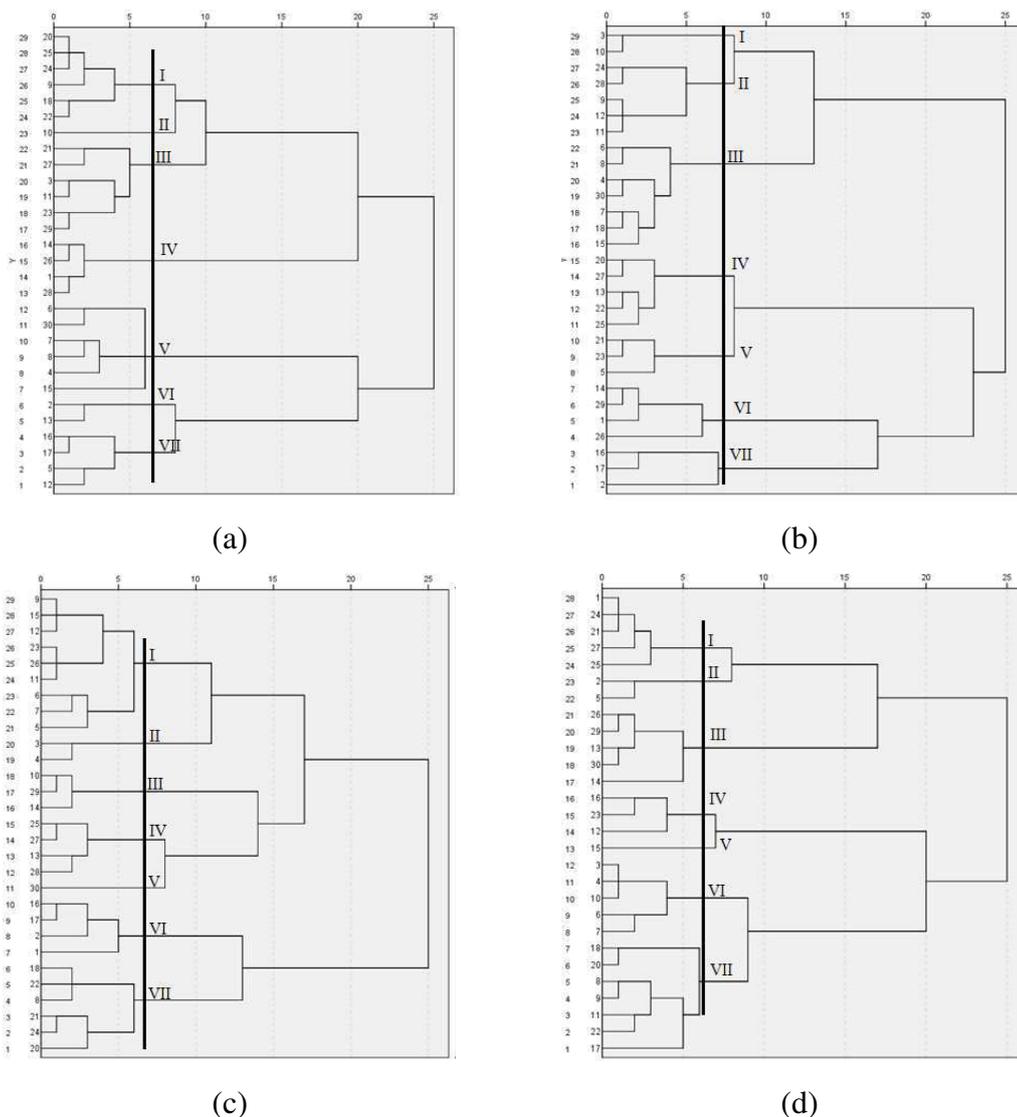


Figura 5.24 - Dendrograma das 12 UTC utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível isobárico de: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 300 hPa.

No nível de 300 hPa o grupo 1 reúne dias com valores elevados da temperatura, valores baixos da razão de mistura, e componentes do vento fracas a moderadas (Fig. 5.20a-c). Esse grupo apresenta uma das médias mais baixas da razão de mistura, as médias mais baixas (em módulo) das componentes do vento, e a segunda média mais elevada da temperatura (Quadro 5.4). No grupo 2 estão dias com valores elevados da temperatura, valores baixos da razão de mistura, e componente meridional do vento moderada a forte (Fig. 5.20a-c). Nesse grupo estão as médias mais elevadas da temperatura e da componente meridional, e uma das médias mais baixas da razão de

mistura (Quadro 5.4). O grupo 3 é composto por dias com valores baixos da razão de mistura e componentes do vento intensas (Fig. 5.20b,c). Esse grupo tem uma das segundas médias mais baixas da razão de mistura, a média mais elevada da componente zonal, e a segunda média mais elevada (em módulo) da componente meridional (Quadro 5.4). O grupo 4 reúne dias com valores relativamente elevados da razão de mistura (Fig. 5.20b), um dos quais é aquele em que o evento intenso de chuva foi registrado (16). Esse grupo tem a segunda média mais elevada dessa variável (Quadro 5.4). No grupo 5 está o dia 15, véspera do evento intenso de chuva. Nele a razão de mistura é máxima, e a componente zonal do vento tem o segundo valor mais alto (em módulo) dentre os grupos (Fig. 5.20b,c e Quadro 5.4). O grupo 6 reúne dias com valores baixos da temperatura e razão de mistura, e valores relativamente elevados (em módulo) das componentes do vento (Fig. 5.20a-c). Esse grupo tem a segunda média mais baixa da temperatura, e a terceira média mais alta (em módulo) das componentes do vento. Ele é também um dos grupos com o segundo valor mais baixo da razão de mistura (Quadro 5.4). O grupo 7 está constituído por dias com valores baixos da temperatura e razão de mistura, e componentes do vento fracas a moderadas (Fig. 5.20a-c). Esse grupo tem a média mais baixa da temperatura e a segunda média mais baixa (em módulo) das componentes do vento. Ele também é um dos grupos com o segundo valor mais baixo da razão de mistura (Quadro 5.4).

Tabela 5.3 - Grupo de dias dos elementos meteorológicos das 12 UTC formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para matriz de dados no modo-P.

Grupo	Dias em 1000 hPa	Dias em 850 hPa	Dias em 500 hPa	Dias em 300 hPa
1	9,18,20,22,24,25	3, 10	5,6,7,9,11,12,15,23,26	1,21,24,25,27
2	10	9,11,12,24,28	3,4	2,5
3	3,11,21,23,27,29	4,6,7,8,15,18,30	10,14,29	13,14,26,29,30
4	1,14,26,28	13,20,22,25,27	13,25,27,28	12,16,23
5	4,6,7,8,15,30	5,21,23	30	15
6	2,13	1,14,26,29	1,2,16,17	3,4,6,7,10
7	5,12,16,17	2,16,17	8,18,20,21,22,24	8,9,11,17,18,20,22

Quadro 5.4 - Valores médios dos elementos meteorológicos às 12 UTC nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos de 1000, 850, 500 e 300 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos elementos meteorológicos. (*) As componentes do vento foram consideradas em módulo.

Nível	Variável	Grupo						
		1	2	3	4	5	6	7
1000 hPa	Ta (K)	297,6	298,8	297,0	298,2	297,1	295,3	295,2
	Td (K)	293,1	294,8	293,0	291,9	294,9	293,6	293,7
	UR (%)	76,2	79,0	78,8	68,0	87,7	90,5	91,5
	r (g kg ⁻¹)	14,6	16,3	14,6	13,5	16,3	15,1	15,2
	θ (K)	296,4	297,4	295,7	297,0	295,7	294,0	293,9
	θe (K)	338,5	344,6	337,6	336,0	342,6	337,2	337,2
	θes (K)	352,6	358,1	349,7	355,5	350,0	342,2	341,8
	u (kmh ⁻¹)	-8,3	-17,2 (*)	-7,1	-7,6	-3,6 (*)	-4,6	5,1
	v (kmh ⁻¹)	32,5	36,9 (*)	21,5	19,1	11,9	20,8	10,9 (*)
850 hPa	Ta (K)	288,9	288,8	289,6	287,9	287,4	288,5	289,3
	Td (K)	287,7	284,6	288,0	286,3	285,5	280,3	285,1
	UR (%)	93,0	73,8	90,6	89,8	88,3	58,3	80,3
	r (g kg ⁻¹)	12,2	9,6	12,5	11,1	10,6	7,4	11,1
	θ (K)	301,6	301,7	302,3	300,7	300,2	301,6	302,6
	θe (K)	337,7	330,3	339,3	333,4	331,3	323,7	335,6
	θes (K)	340,7	340,8	343,5	337,4	335,7	339,9	344,3
	u (kmh ⁻¹)	-40,7 (*)	-35,2	-25,7	-35,3	-28,0	-34,7	-3,7 (*)
	v (kmh ⁻¹)	29,1 (*)	22,1	7,9	24,8	9,4	27,7	-1,7 (*)
500 hPa	Ta (K)	266,5	268,3	265,3	266,8	269,3	267,7	267,8
	Td (K)	263,3	263,9	260,5	258,1	241,3	250,5	236,3
	UR (%)	78,7	78,2	69,7	42,2	34,8	34,8	2,7
	r (g kg ⁻¹)	3,7	3,9	3,0	2,0	1,7	1,7	0,1
	θ (K)	324,7	325,6	323,2	325,7	326,2	326,2	327,3
	θe (K)	337,2	338,7	333,2	332,6	332,2	332,2	327,9
	θes (K)	340,5	342,4	337,5	342,4	343,4	343,4	345,5
	u (kmh ⁻¹)	-24,7	-41,7 (*)	-15,6	-3,1	0,8 (*)	-40,3	-21,2
	v (kmh ⁻¹)	3,9	7,5	-9,8	-13,4	-9,2	27,0 (*)	2,7 (*)
300 hPa	Ta (K)	242,1	242,6	241,4	240,7	241,3	240,6	240,3
	Td (K)	214,1	211,1	217,8	230,7	237,9	220,2	216,9
	UR (%)	5,0	3,0	8,0	36,0	72,0	13,4	8,4
	r (g kg ⁻¹)	0,0	0,0	0,1	0,3	0,7	0,1	0,1
	θ (K)	341,6	342,2	340,6	339,6	340,4	339,5	339,1
	θe (K)	341,8	342,4	340,9	340,9	342,8	340,0	339,4
	θes (K)	345,3	346,1	344,1	342,9	343,8	342,7	342,3
	u (kmh ⁻¹)	7,5 (*)	-8,8	31,7 (*)	-13,5	-25,2	-19,9	-7,8
	v (kmh ⁻¹)	-2,4 (*)	50,1 (*)	-38,4	-19,0	-11,7	37,7	4,2

5.2.2-Índices de Estabilidade

Na Análise Multivariada dos índices de estabilidade calculados para o mês de julho de 2011 nos horários das 00 UTC e 12 UTC foi aplicada a ACP inicialmente, seguida pela AA. Primeiramente foram aplicados os testes de KMO e o teste de esfericidade de Bartlett. Os testes com as matrizes contendo todos os índices não foram satisfatórios, já que o determinante foi igual a zero. O passo seguinte foi realizar testes retirando os índices com comunalidade baixa, para obter a matriz que se adequasse à aplicação da ACP. Assim, o índice VT (VT e PII) foi excluído da matriz das 00 UTC (12 UTC). Foi encontrado um KMO de 0,65 para as 00 UTC e 0,56 para as 12 UTC, sendo assim possível a aplicação da ACP. Um modelo de três componentes (fatores) foi adequado para explicar a variabilidade dos dados das 00 UTC, retendo 76% da variância dos dados, enquanto que um modelo de quatro componentes (fatores) foi adequado para explicar a variabilidade dos dados das 12 UTC, retendo 84% da variância dos dados.

O Quadro 5.5 mostra a matriz dos fatores rotacionados para os índices de estabilidade. No horário das 00 UTC os índices de maior peso na primeira componente envolvem temperatura, umidade e vento no seu cálculo, retendo 36% da variância total dos dados. A contribuição negativa do SI significa que ele varia de forma oposta aos demais índices; quanto menor for o valor do SI, maior é a probabilidade de ocorrência de tempestades, ao contrário dos demais índices da primeira componente. A segunda componente corresponde aos índices que estão relacionados com temperatura e umidade, retendo 24% da variância total dos dados. De forma semelhante ao que foi visto na primeira componente, o LI tem contribuição negativa; quanto menor for o seu valor, maior é a probabilidade de tempestades, ao contrário dos demais índices da segunda componente. A terceira componente, também relacionada com temperatura e umidade, retém 16% da variância total dos dados. O PII tem contribuição negativa; quanto menor for o valor do PII, menor é a probabilidade de ocorrência de tempestade, uma variação contrária a dos demais índices da terceira componente.

No horário das 12 UTC os índices de maior peso na primeira componente estão relacionados com umidade, temperatura e vento, retendo 33% da variância total dos dados. O índice de maior peso nessa componente é o SWEAT, o que indica um forte cisalhamento vertical. A segunda componente corresponde a índices relacionados com temperatura e umidade, retendo 23% da variância total dos dados. Essa componente envolve os mesmos índices discutidos para a segunda componente das 00 UTC, porém

as contribuições são diferentes. A terceira componente está relacionada com umidade, e retém 15% da variância total dos dados. A quarta componente está relacionada com temperatura, e retém 13% da variância dos dados.

Quadro 5.5- Fatores rotacionados para os índices de estabilidade das 00 UTC e 12 UTC.

Horário	Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
00 UTC	CT	0,903	0,286	-0,119	-
	TT	0,880	0,403	-0,101	-
	SI	-0,876	-0,388	0,181	-
	K	0,812	-0,071	0,188	-
	SWEAT	0,772	0,226	-0,056	-
	CAPE	0,199	0,886	-0,245	-
	DTeI	0,258	0,736	-0,133	-
	LI	-0,493	-0,719	-0,100	-
	PII	-,0,044	0,346	-0,805	-
	KO	-0,020	0,346	0,735	-
	CINE	-0,120	-0,359	0,664	-
12 UTC	SWEAT	0,985	0,061	-0,026	-0,054
	CT	0,983	-0,017	-0,005	0,048
	TT	0,953	0,184	0,048	-0,154
	LI	0,009	-0,868	0,039	0,273
	CAPE	-0,055	0,838	-0,041	0,149
	DTeI	0,296	0,770	-0,040	0,114
	KO	-0,340	-0,102	0,879	-0,193
	K	0,452	-0,009	0,827	0,169
	SI	-0,243	-0,336	-0,089	0,768
	CINE	0,085	0,376	0,038	0,727

A Figura 5.25a ilustra o peso dos três fatores dos índices de estabilidade para as 00 UTC no período de 1 a 30 de julho de 2011. Foi escolhido como máximo (mínimo) do fator valores acima (abaixo) de 1,5 (-1,5). O fator 1 tem máximo no dia 5 e mínimos nos dias 1, 2, 10 e 29. As séries temporais (Fig. 5.26a) indicam máximo (mínimos) do

índice TT e mínimo (máximos) do índice SI no dia 5 (1, 2, 10 e 29). O fator 2 tem máximos nos dias 9 e 28, e mínimos nos dias 18 e 24. As séries temporais (Fig. 5.26b) ilustram máximos (mínimos) do índice CAPE e mínimos (máximos) do índice LI nos dias 9 e 28 (18 e 24). O fator 3 tem mínimos nos dias 18 e 28. As séries temporais (Fig. 5.26c) evidenciam máximos do índice PII e mínimos do índice KO nesses dias.

A Figura 5.25b ilustra o peso dos quatro fatores dos índices de estabilidade para as 12 UTC no período de 1 a 30 de julho de 2011. Foi escolhido como máximo (mínimo) do fator valores acima (abaixo) de 1,5 (-1,5). O fator 1 tem máximo no dia 10 e mínimos nos dias 1 e 26. As séries temporais (Fig. 5.27a) ilustram máximo (mínimos) dos índices SWEAT e CT no dia 10 (1 e 26). O fator 2 tem máximos nos dias 9, 10 e 29, e mínimo no dia 5. As séries temporais (Fig. 5.27b) indicam máximos (mínimo) do CAPE e mínimos (máximo) do índice LI nos dias 9, 14 e 29 (5). O fator 3 tem máximo no dia 2 e mínimos nos dias 24, 25, 27 e 28. As séries temporais (Fig. 5.27c) indicam máximo (mínimos) dos índices KO e K no dia 2 (24, 25, 27 e 28). O fator 4 tem máximos nos dias 18 e 20 e mínimos nos dias 15, 23 e 26. As séries temporais (Fig. 5.27d) evidenciam máximos (mínimos) dos índices SI e CINE nos dias 20 e 28 (15, 23 e 26).

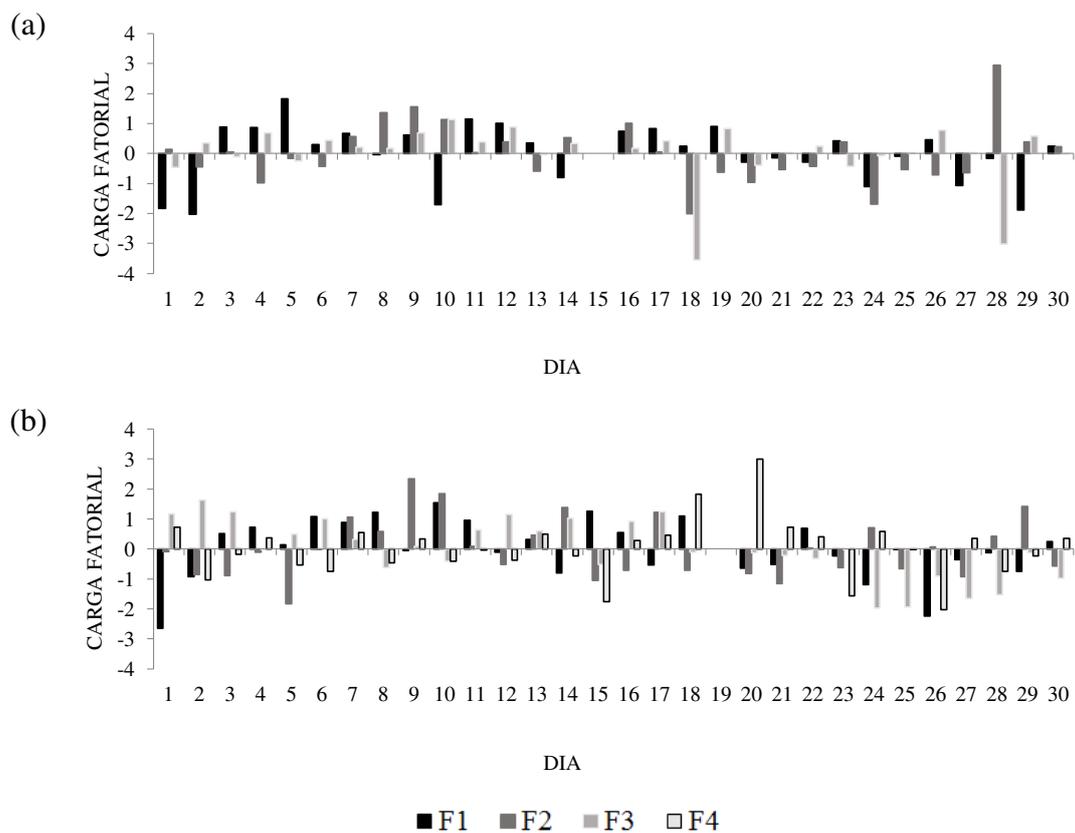


Figura 5.25- Peso dos fatores obtidos dos índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC. A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

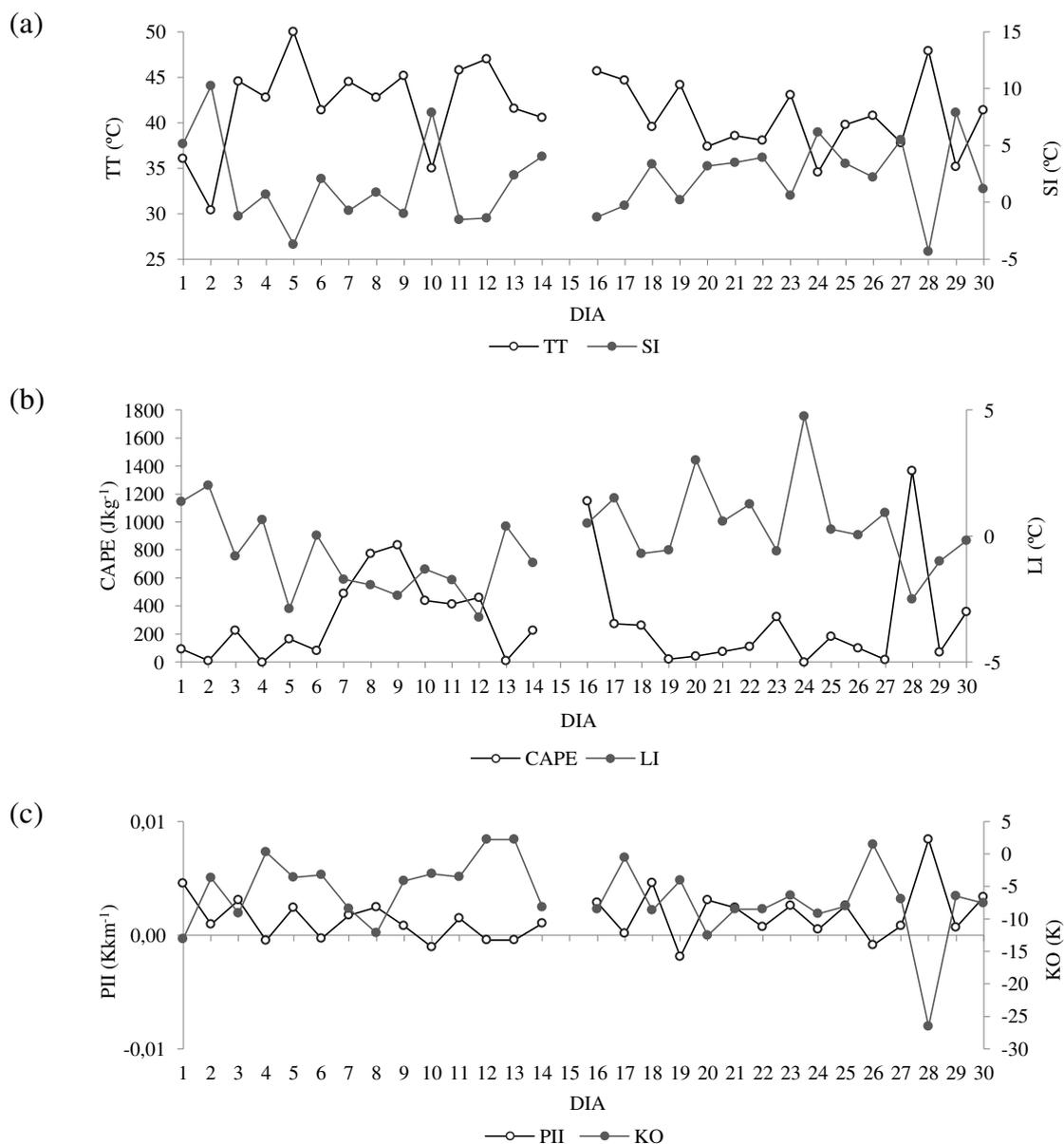


Figura 5.26 – Série temporal dos índices de estabilidade das 00 UTC para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) TT e SI, (b) CAPE e LI e (c) PII e KO. Note a ausência de marcadores no dia sem sondagem (15). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

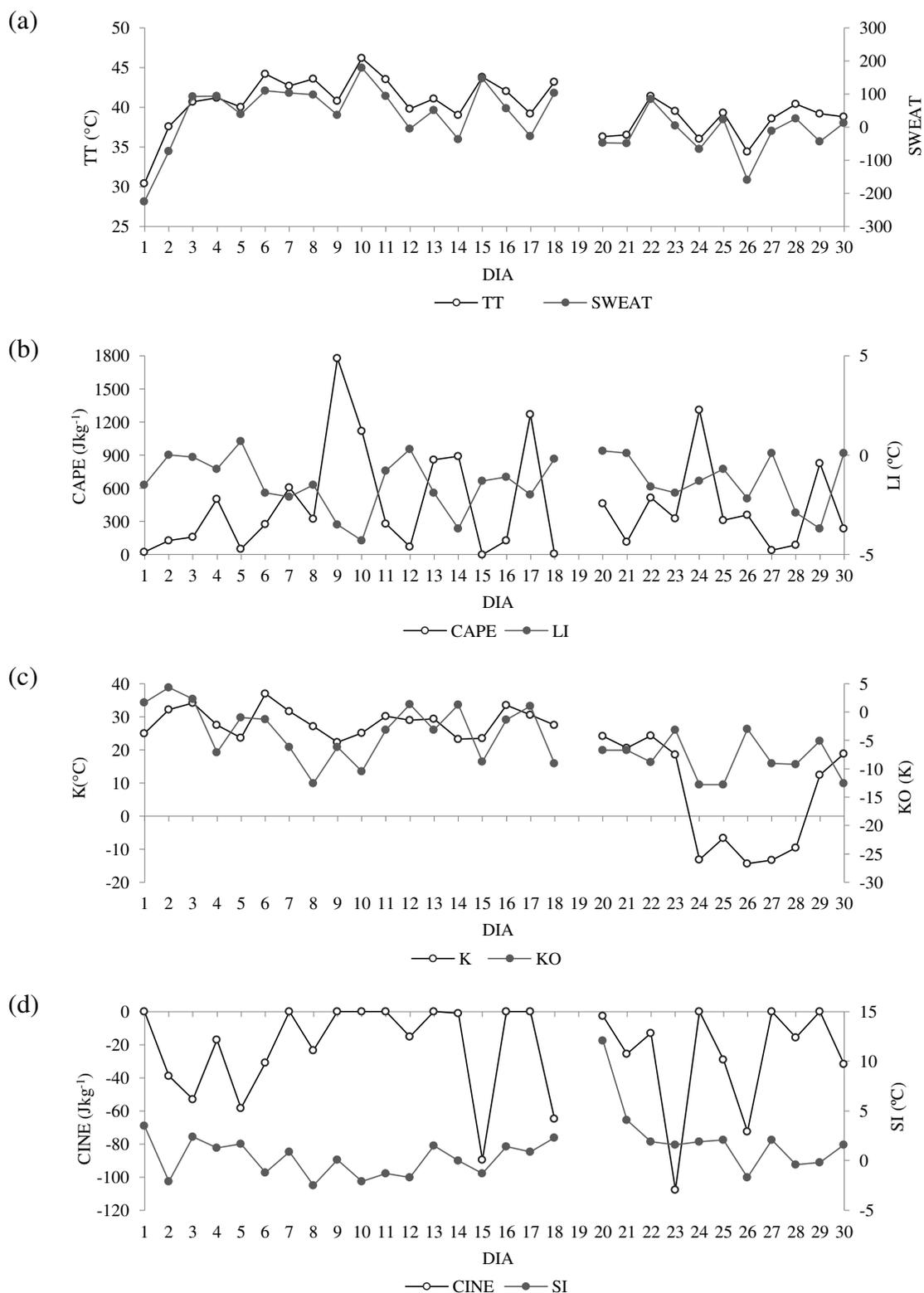


Figura 5.27 – Série temporal dos índices de estabilidade das 12 UTC para o período de 1 a 30 de julho de 2011 em Natal-RN: (a) TT e SWEAT, (b) CAPE e LI, (c) K e KO e (d) CINE e SI. Note a ausência de marcadores nos dias sem sondagem (19). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

Na segunda etapa da análise multivariada, foi aplicada a análise de agrupamentos aos fatores obtidos nos dois horários sinóticos, separadamente. As curvas de inércia para o agrupamento dos índices de estabilidade das 00 e 12 UTC são mostradas na Figura 5.28. A flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos. Às 00 UTC, o corte no dendrograma é de ordem 7 (Fig. 5.28a), agrupando os dias em sete grupos, enquanto que às 12 UTC é de ordem 8 (Fig. 5.28b), agrupando os dias em oito grupos.

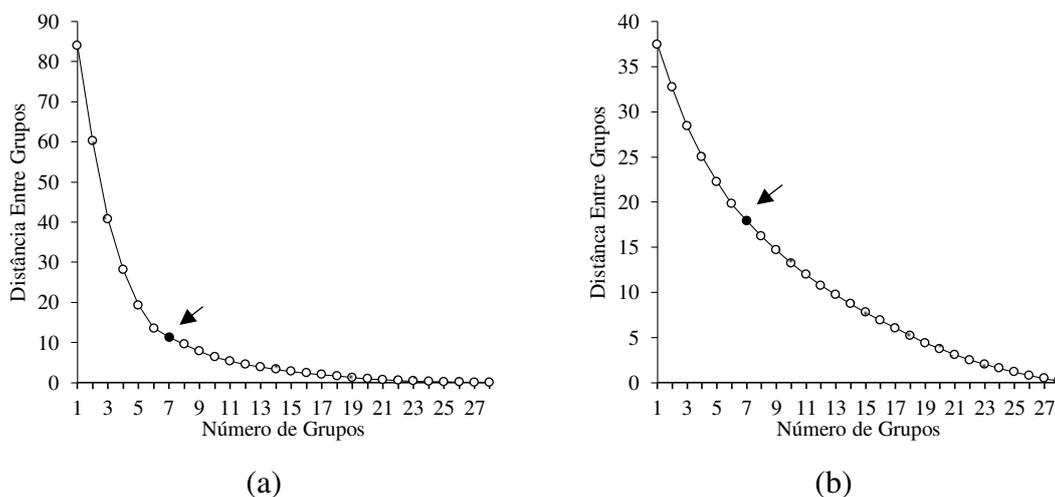


Figura 5.28 - Curva de inércia para os índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC.

Na Figura 5.29 estão representados os dendrogramas das 00 UTC e 12 UTC para os índices de estabilidade analisados. Esse resultado é sintetizado pela Tabela 5.4, que contém os dias com características similares pertencentes a cada grupo, e pelo Quadro 5.6, que contém as médias dos índices de estabilidade em cada grupo. No horário das 00 UTC, o grupo 1 tem a maioria dos índices ilustrados na Figura 5.26 indicando que a probabilidade de ocorrência de tempestades é baixa (TT, SI, LI, CAPE). Esse grupo tem o mínimo (máximo) de CT (LI), a segunda média mais baixa de CAPE, TT, SWEAT e KO, e a segunda média mais alta de CINE e SI. O indicativo de instabilidade do grupo 2 é semelhante ao do grupo 1, ou seja, a probabilidade de ocorrência de tempestades é baixa. O grupo 2 tem o máximo de CINE e SI, o mínimo de TT e SWEAT, e a segunda média mais baixa de CT, K e PII. No grupo 3, composto por um único dia, a maioria dos índices é indicativa de condições estáveis. Nesse grupo está o segundo valor mais baixo do CINE, e o segundo valor mais alto de LI e PII. No grupo 4, também composto

por um único dia, a maioria dos índices indica que há probabilidade de ocorrência de tempestades. Esse grupo tem o máximo de CAPE, CT, TT, SWEAT, DTel e PII, e o mínimo de CINE, K, SI, LI e KO. No conjunto de dias que compõem o grupo 5, a maioria dos índices ilustrados na Figura 5.26 indica que há probabilidade de ocorrência de tempestades (SI, TT, LI, CAPE). O grupo 5 tem a segunda média mais alta de CAPE, K e DTel. Nesse grupo, que inclui o evento intenso de chuva, houve registro de precipitação em todos os dias, com exceção de um (Fig. 5.2a). Nos dias do grupo 6, a maioria dos índices na Figura 5.26 indica que não há probabilidade de ocorrência de tempestades (SI, TT, LI, CAPE). Esse grupo tem a média mínima (máxima) de CAPE (KO), e a segunda média mais baixa de DTel. Nos dias do grupo 7, os índices TT, SI, LI e KO indicam a possibilidade de ocorrência de tempestades, enquanto que CAPE indica o oposto. Esse grupo tem a média máxima de K, a segunda média mais alta de CT, TT, SWEAT e KO, e a segunda média mais baixa de SI e LI.

No horário das 12 UTC, o grupo 1 (Tab. 5.4) reúne os dias que resultam nas maiores médias dos índices SWEAT, CT, TT e DTel (Quadro 5.6), com probabilidade de ocorrência de tempestades. Na maioria dos dias desse grupo houve precipitação (Fig. 5.2a). O grupo 2 (Tab. 5.4) reúne os dias relacionados com a maior média do índice SI (Tab. 5.10), com ocorrência de tempestades improvável. Não houve chuva nos dias desse grupo (Fig. 5.2a). O grupo 3 (Tab. 5.4) contem os dias que resultam na menor média dos índices KO e K (Tab. 5.6), com ocorrência de tempestades improvável. Na maioria dos dias desse grupo não houve registro de chuva (Fig. 5.2a). No grupo 4 (Tab. 5.4) estão os dias relacionados com a maior média do CAPE e CINE (Quadro 5.6), com probabilidade de ocorrência de tempestades. Houve precipitação na maioria dos dias desse grupo (Fig. 5.2a). No grupo 5 (Tab. 5.4) estão os dias relacionados com a menor média dos índices SWEAT, CT e TT (Fig. 5.6), com ocorrência de tempestades improvável. Nos dias desse grupo não houve precipitação (Fig. 5.2a). O grupo 6 (Tab. 5.4) contem os dias que resultam na menor média dos índices CINE, SI e DTel (Quadro 5.6), com ocorrência de tempestades improvável. Não choveu nos dias desse grupo (Fig. 5.2a). No grupo 7 (Tab. 5.4) estão dias que resultam na menor média do CAPE e maior do índice K (Quadro 5.6), sendo de difícil análise, já que os índices K e CT indicam probabilidade de tempestades. Houve precipitação em cinco dos oito dias desse grupo, que inclui o dia 16 (Fig. 5.2). Vale salientar que, de maneira geral, a precipitação observada em julho de 2011 não está necessariamente associada a um sistema convectivo profundo em todos os dias com registro de chuva.

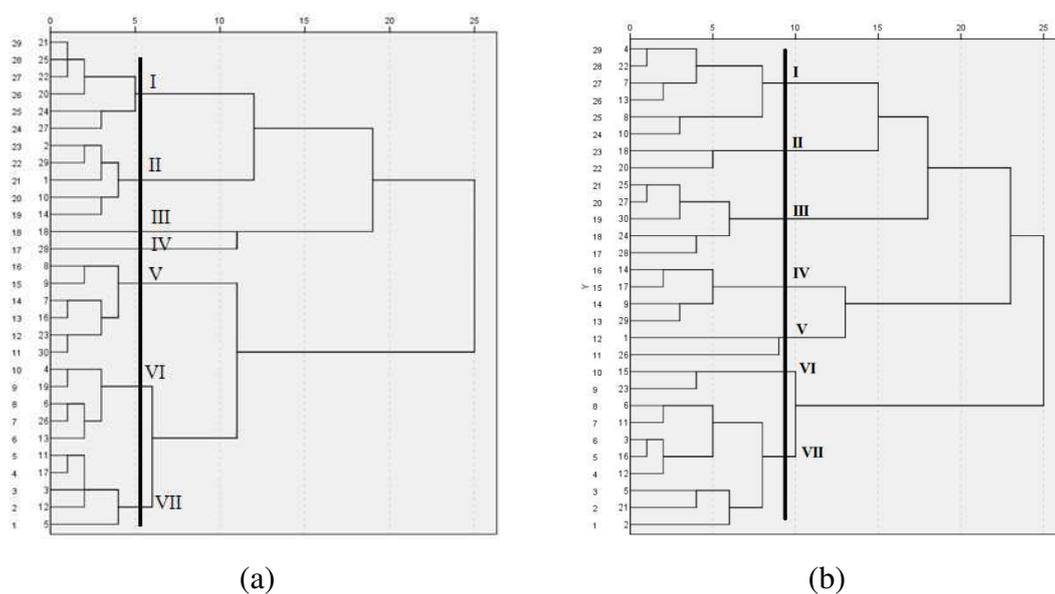


Figura 5.29- Dendrograma utilizando o método de Ward com medida de distância euclidiana quadrática para os índices de estabilidade das (a) 00 UTC e (b) 12 UTC.

Tabela 5.4 - Grupos de dias com características similares obtidos através da análise de agrupamentos para os índices de estabilidade.

Grupos	Dias às 00 UTC	Dias às 12 UTC
1	20,21,22,24,25,27	4,7,8,10,13,22
2	1,2,10,14,29	18, 20
3	18	24,25,27,28,30
4	28	9,14,17,29
5	7,8,9,16,23,30	1,26
6	4,6,13,19,26	15,23
7	3,5,11,12,17	2,3,5,6,11,12,16,21

Quadro 5.6 - Valores médios dos índices de estabilidade das 00 e 12 UTC nos grupos homogêneos obtidos a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os valores em negrito são o máximo e o mínimo (itálico) dos índices de estabilidade.

Hora	Variável	Grupo						
		1	2	3	4	5	6	7
00 UTC	CAPE (Jkg^{-1})	70,8	167,1	261,3	1366,7	599,5	42,5	301,9
	CINE (Jkg^{-1})	-9,8	-9,0	-55,9	-206,2	-17,4	-32,0	-24,1
	CT ($^{\circ}\text{C}$)	20,3	21,7	21,9	24,3	22,5	22,0	23,5
	TT ($^{\circ}\text{C}$)	37,7	35,5	39,6	47,9	43,8	42,2	46,4
	K ($^{\circ}\text{C}$)	12,3	2,2	23,3	-4,6	32,6	31,3	36,4
	SWEAT	-19,2	-257,6	-15,2	279,2	133,8	77,3	162,7
	SI ($^{\circ}\text{C}$)	4,3	7,0	3,4	-4,3	0,0	1,5	-1,6
	LI ($^{\circ}\text{C}$)	1,8	0,0	1,0	-2,5	-1,5	0,1	-1,9
	KO (K)	-9,0	-6,9	-8,7	-26,5	-7,9	-0,7	-2,9
	DTeI (K)	-2,1	1,5	2,0	6,4	5,1	0,2	1,8
	PII (Kkm^{-1})	0,0008	0,0006	0,0023	0,0042	0,0011	-0,0004	0,0007
12 UTC	CAPE (Jkg^{-1})	652,8	233,5	395,9	1190,3	190,7	163,1	148,9
	CINE (Jkg^{-1})	-8,9	-33,7	-15,2	-0,2	-36,2	-98,4	-27,7
	CT ($^{\circ}\text{C}$)	20,7	18,9	17,7	17,2	11,2	19,9	18,9
	TT ($^{\circ}\text{C}$)	42,7	39,8	38,6	39,6	32,4	41,7	40,5
	K ($^{\circ}\text{C}$)	27,5	25,9	-4,7	22,2	5,4	21,1	30,1
	SWEAT	101,8	28,4	-3,2	-17,7	-192,3	76	33,3
	SI ($^{\circ}\text{C}$)	0,2	7,2	1,5	0,2	0,9	0,2	0,4
	LI ($^{\circ}\text{C}$)	-2	0	-0,9	-3,2	-1,9	-1,6	-0,4
	KO (K)	-8	-7,9	-11,3	-2,2	-0,6	-6	-0,7
	DTeI (Kkm^{-1})	8,1	3,1	4,3	7,5	2,8	1,9	2,5

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste estudo as condições atmosféricas que influenciaram o Estado do Rio Grande do Norte em julho de 2011 são investigadas através de análise multivariada e meteorológica, dando destaque ao dia 16, o de maior total diário de precipitação (60,4 mm) na cidade de Natal, capital do estado. Esse total acumulado foi consequência de um Distúrbio Ondulatório de Leste que atuou na noite do dia 15 na área de Natal e adjacências, visualizado nas imagens de satélite meteorológico como uma banda de nebulosidade com núcleos de convecção profunda. Também houve registro de precipitação em outras áreas do estado, nos dias 16 e 17. A propagação do distúrbio para oeste sobre o Oceano Atlântico, e a chegada ao Nordeste do Brasil no dia 15 foram detectadas em diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento ao longo da latitude de 5°S, no nível de 600 hPa. Na análise do ambiente sinótico, foi observada confluência nos baixos níveis, difluência nos altos níveis, e movimento ascendente em toda a troposfera, na área de Natal e adjacências, no dia da chegada do distúrbio.

A estrutura termodinâmica diagnosticada doze horas antes da entrada do distúrbio era de uma atmosfera condicionalmente e convectivamente instável próximo à superfície, com elevado teor de umidade na baixa troposfera e com baixa probabilidade de tempestades. Às 00 UTC do dia 16 a atmosfera encontrava-se saturada à superfície, com probabilidade de ocorrência de tempestades.

O vento em superfície variou nos quadrante sudoeste e sudeste, em Natal. No dia 16, dia posterior à entrada do distúrbio no continente, a intensidade do vento diminuiu. A estrutura vertical do vento também mostrou mudanças acentuadas: ventos do quadrante sudeste (noroeste) de intensidade moderada (forte), que dominavam a baixa e média (alta) troposfera doze horas antes da noite do dia 15, foram substituídos na baixa troposfera por ventos fracos com direção variável, uma indicação do enfraquecimento dos ventos alísios.

A aplicação da análise fatorial em componentes principais aos dados de altitude de quatro níveis isobáricos padrões resultou em um modelo com três componentes nos dois horários disponíveis (00 e 12 UTC), retendo mais de 90% da variância dos dados. O primeiro fator às 00 UTC está relacionado com a umidade, na baixa e média troposfera, e com a temperatura, na alta troposfera. Às 12 UTC, o primeiro fator tem

relação com a temperatura em 1000 e 300 hPa, e com a umidade em 850 e 500 hPa. A aplicação aos fatores da técnica de análise de agrupamentos possibilitou agrupar os dias de acordo com as características meteorológicas. Nos níveis isobáricos analisados, foram identificados oito grupos às 00 UTC, e sete grupos às 12 UTC.

A aplicação da análise fatorial em componentes principais aos índices de estabilidade resultou em um modelo com três componentes no horário das 00 UTC, retendo 76% da variância dos dados, e quatro componentes no horário das 12 UTC, retendo 84 % da variância dos dados. Às 00 UTC e 12 UTC os índices de maior peso na primeira componente estão relacionados com temperatura, umidade e vento; e na segunda componente estão relacionados com temperatura e umidade. Às 00 UTC a terceira componente envolve índices obtidos da temperatura e umidade. Às 12 UTC a terceira componente está relacionada com a umidade, e a quarta componente com a temperatura. A aplicação da técnica da análise de agrupamentos aos fatores obtidos da ACP agrupou os dias de acordo com a probabilidade de ocorrência de tempestades. Foram identificados sete grupos para cada horário sinótico: quatro grupos agruparam os dias com baixa probabilidade de tempestades, sem registro de precipitação na maioria dos dias; dois grupos agruparam os dias com probabilidade de tempestades, com registro de precipitação na maioria dos dias; e um grupo foi de difícil interpretação.

Os índices de estabilidade CAPE e K foram os que melhor explicaram a mudança na atmosfera, com um aumento significativo nas 12 horas que precederam o evento de chuva intensa do dia 16 de julho de 2011 em Natal-RN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, T.; ANDERSSON, M.; JACOBSSON, C.; NILSSON, S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in Southern Sweden. **Meteorological Magazine**, v. 116, p. 141-146, 1989.

ARAÚJO, W. S.; SOUSA, F. A. S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Nordeste do Brasil usando análise multivariada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, p. 136-152, jan/jun 2012.

ATKINS, N.; WAKIMOTO, R. Wet microburst activity over the Southeastern United States: implications for forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 6, n. 4, p. 470-482, 1991.

AWS - AIR WEATHER SERVICE. The use of the Skew T, Log P diagram in analysis and forecasting. Scott Air Force Base, Illinois, dezembro de 1979 (revisado em março de 1990).

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. Sistemas convectivos intensos no semiárido brasileiro: o controle da grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 395-410, 2005.

BENTLEY, M. L.; STALLINS, J. A.; ASHLEY, W. S. Synoptic environments favorable for urban convection in Atlanta, Georgia. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 8, p. 1287- 1294, 2012.

BLUESTEIN, H. B. **Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems**. Oxford University Press, New York, EUA, 1993. 594 p.

BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 1046-1053, 1980.

BRAGA, C. C.; MACEDO, M. J. H.; SILVA, B. B.; BRAGA, R. C. Aplicação dos componentes principais na simulação e consistência de séries temporais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 29, n. 1, p. 113-125, 2012.

BRISTOT, G.; PINHEIRO, J.; U.; SANTOS, M. F. As condições da pluviometria no Estado do Rio Grande do Norte e as consequências da estiagem na produção de feijão neste estado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro (RJ). **Anais...**, Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p. 68-72.

CARDOSO, N. K. R.; DINIZ, G. B.; MARQUES, J. L.; PRESTERS, S. D. Relações entre índices de instabilidade e as chuvas em Porto Alegre-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA.14. **Anais ...**, Florianópolis: SBMET, 2006.

CASTOR, A. D. J.; SILVA, A. B.; SILVA ARAGÃO, M. R. Regimes do vento à superfície no aeroporto internacional de Natal. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. 8. **Anais...**, Campina Grande: PIBIC/CNPq/UFCG, 2012.

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES - Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Rio Grande do Norte**. CEPED UFSC, Florianópolis, 2011. 57 p., il. color.; 30 cm.

CORREIA, M. F.; GONÇALVES, W. A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; DINIZ, M. C. S. 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**, Recife-PE, v. 4, p. 877-890, 2012.

DALEZIOS, N. R.; PAPAMANOLIS, N. K. Objective assessment of instability indices for operational hail forecasting in Greece. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 45, p. 87-100, 1991.

DINIZ, M. C. S; CORREIA, M. F; SILVA ARAGÃO, M. R. 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. 273-285, 2004.

GALWAY, J. G. The lifted index as a predictor of latent instability. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 43, p. 528-529, 1956.

GEORGE, J. J. **Weather Forecasting for Aeronautics**. Academic Press, New York and London, 1960. 673 p.

IBGE: Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19/05/2014.

KASZNAR, I. K.; GONÇALVES, B. M. L. Técnicas de agrupamento clustering. **EletroRevista: Revista Científica e Tecnológica**, n. 19, p. 1-5, mai. 2007. Disponível em: <http://www.ibci.com.br/20Clustering_Agrupamento.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2014.

MAIA, A. G.; LUCIO, P. S. Determinação dos diferentes padrões de precipitação no Estado do Rio Grande do Norte através de análise de componentes principais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. 2013, Bento Gonçalves (RS). **Anais...**, Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 1-8.

MANLY, B. J. F. **Métodos Estatísticos Multivariados: Uma Introdução**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. **Tech. Report 200**, Air Weather Service, United States Air Force, 190 pp., 1972.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOTA, G. V.; GANDU, A. W. Estrutura e propriedades dos distúrbios ondulatórios de leste no Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília (DF). **Anais...**, Brasília: SBMET. 1998.

MOURÃO, C. E. F.; MENEZES, W. F. Estudo do comportamento de indicadores de tempo severo em caso de tempestades sobre o Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis (SC). **Anais...**, Florianópolis: SBMET, 2006. p. 1-6.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 121-140, 2005.

PAIVA NETO, A. C.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Distúrbio de leste no Nordeste do Brasil: o caso de fevereiro de 2000. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz de Iguaçu (PR). **Anais...**, Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. p. 3695- 3702

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RIBEIRO, R. E. P.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Distúrbio ondulatório de leste e linhas de instabilidade: impacto na precipitação no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 6, n. 4, p. 837-856, 2013.

RICHMAN, M. B. Rotation of Principal Components. **Journal of Climatology**, v. 6, p. 293-335, 1986.

SANTOS, A. H. M.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A.; BARBOSA SILVA, A. Distúrbio ondulatório de leste e seus impactos na cidade de Salvador. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, p. 355-364, 2012.

SANTOS E SILVA, C. M.; LÚCIO, P. S.; SPYRIDES, M. H. C. Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélite e medidas por pluviômetros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, p. 337-346, 2012.

SANTOS E SILVA, C. M.; SILVA, F. R.; LEME, N. P. Ciclo anual de precipitação como função de índices de instabilidade termodinâmica e fluxos de energia estática: análises em Maxaranguape-RN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 235-242, 2011.

SEPLAN - SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E DAS FINANÇAS. Perfil do Rio Grande do Norte. Natal-RN 2014. Disponível em: <<http://www.seplan.rn.gov.br/arquivos/download/PERFIL%20DO%20RN%202014.pdf>> Acesso em: 19 maio 2014.

SHOWALTER, A. K. A stability index for forecasting thunderstorms. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 34, p. 250-252, 1947.

SILVA ARAGÃO, M. R.; MENDES, M. C. D.; CAVALCANTI, I. F. A.; CORREIA, M. F. 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, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F. **Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas.** 2000. Disponível em: <http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/indice_sweat.pdf>. Acesso em: 04 maio 2015.

SILVA, F. D. S.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; SILVA, J. M. 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, 2008.

TAVARES, J. P. N.; MOTA, M. A. S. Condição termodinâmica de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa. **Revista Brasileira de**

Meteorologia, v. 27, n. 2, p. 207-218, 2012.

van DELDEN, A. The synoptic setting of thunderstorms in Western Europe. **Atmospheric Research**, v. 56, p. 89–110, 2001.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2 ed. California: Elsevier Science & Technology Books. Academic Press, 2006. 627 p.