

**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

LEANDRO FONTES DE SOUSA

**ANÁLISE MULTIVARIADA DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM MÊS
CHUVOSO EXTREMO NA ÁREA DE PETROLINA, SEMIÁRIDO DO
NORDESTE DO BRASIL**

Campina Grande, março 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

**ANÁLISE MULTIVARIADA DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM
MÊS CHUVOSO EXTREMO NA ÁREA DE PETROLINA, SEMIÁRIDO
DO NORDESTE DO BRASIL**

LEANDRO FONTES DE SOUSA

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO DE 2015

LEANDRO FONTES DE SOUSA

**ANÁLISE MULTIVARIADA DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM
MÊS CHUVOSO EXTREMO NA ÁREA DE PETROLINA, SEMIÁRIDO
DO NORDESTE DO BRASIL**

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
Subárea: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Profa. Dra. Maria Regina da Silva Aragão

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725a Sousa, Leandro Fontes de.
Análise multivariada das condições atmosféricas em mês
chuvoso extremo na área de Petrolina, semiárido do nordeste do
Brasil / Leandro Fontes de Sousa. – Campina Grande, 2015.
88f. : il.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais, 2015.

"Orientação: Prof^a. Dr^a. Maria Regina da Silva Aragão".
Referências.

1. Petrolina. 2. Chuva. 3. Índices de Estabilidade. 4. Análise
de Componentes Principais. 5. Análise de Agrupamentos.
I. Aragão, Maria Regina da Silva . II. Título.

CDU 551.578.1(043)


LEANDRO FONTES DE SOUSA

ANÁLISE MULTIVARIADA DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM MÊS
CHUVOSO EXTREMO NA ÁREA DE PETROLINA, SEMIÁRIDO DO NORDESTE
DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 06/03/2015

BANCA EXAMINADORA


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


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


Prof.ª Dra. ALDINETE BEZERA BARRETO
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento
Universidade Federal de Campina Grande

A meus queridos familiares: Agostinho (Pai),
Socorro (Mãe), Fernando, Marisa, Alexandre,
Bruno, Augusto, Gustavo e Carolina (irmãos);

Aos professores do DCA/UFCG;

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo êxito alcançado neste estudo e por me conceder a oportunidade de realizar mais um sonho da minha vida.

Agradeço imensamente à Prof.^a Dra. Maria Regina da Silva Aragão pela competência, ética, e profissionalismo com que conduziu o processo de orientação. Também agradeço pelos incentivos e contribuições que tornaram possível o êxito desta pesquisa.

Às Professoras Doutoras, Magaly de Fatima Correia e Aldinete Bezerra Barreto, pelas contribuições valiosas no exame de qualificação.

A Alexandra Barbosa Silva pelas informações que auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais José Agostinho e Maria do Socorro por todo incentivo, ensinamentos e valores transmitidos, os quais levarei comigo pelo resto da vida.

Aos meus irmãos, Fernando, Marisa, Alexandre, Bruno, Augusto, Gustavo e Carolina, por toda e qualquer forma de apoio que sempre me deram.

Aos demais familiares e amigos.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia que contribuíram de forma direta ou indireta para minha formação.

Aos amigos do mestrado pela amizade construída ao longo desses dois anos. Agradeço em especial a todos que fizeram parte da turma 2013.1.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela concessão de bolsa de estudos.

À equipe da Biblioteca Central da UFCG pelos serviços prestados à comunidade e que são essenciais para realização dos nossos estudos.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela cessão de dados meteorológicos utilizados nesta Pesquisa.

Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.

Isaac Newton

RESUMO

Neste trabalho as condições atmosféricas na área de Petrolina no mês chuvoso de abril de 2014 são analisadas com foco no evento extremo de chuva do dia 8. A base de dados utilizada é formada por dados de reanálise, imagens realçadas de satélite meteorológico, totais diários e horários de precipitação, valores horários do vento à superfície e sondagens diárias de ar superior. Técnicas de análise meteorológica são empregadas para diagnosticar o ambiente em escala sinótica e mesoescala associado ao evento extremo. Dados em níveis isobáricos padrões e índices de estabilidade são submetidos separadamente a técnicas de análise multivariada para identificar fatores físicos e verificar a adequação dos índices como indicadores de ocorrência de chuva na região semiárida. As chuvas são registradas entre os dias 7 e 12, e no dia 27 de abril, associadas a ventos de sudeste fracos à superfície. O evento extremo de chuva do dia 8 é causado por um sistema convectivo multicelular que se desenvolve em condições de grande escala caracterizada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atuando no extremo norte e ao norte do Nordeste do Brasil, pela alta da Bolívia deslocada para leste de sua posição climatológica, e por um cavado de grande amplitude na alta troposfera, a leste da América do Sul. A aplicação da análise (fatorial) de componentes principais (ACP) permite reduzir um conjunto de nove variáveis em três componentes principais (CPs) que retém acima de 90% da variância total dos dados, em cada nível isobárico analisado. A primeira CP retida explica as variações da temperatura do ar nos níveis de 925 hPa, 850 hPa e 200 hPa, e as variações do teor de umidade no nível de 500 hPa. A aplicação da análise de agrupamentos (AA) aos fatores retidos possibilita identificar seis grupos de dias homogêneos em termos das condições atmosféricas, em cada nível isobárico. A aplicação da ACP aos índices de estabilidade permite reduzir um conjunto de dez índices em três CPs que retém 82,8% da variância total dos dados. A aplicação da AA permite identificar grupos de dias nos quais os índices representam alta ou baixa condição de instabilidade. Os índices CAPE, LI, SI, K, TT e SWEAT são os que melhor representam características termodinâmicas e dinâmicas da atmosfera no mês de estudo, apresentando as maiores variações nos dias que antecedem os eventos de chuva, uma indicação de que podem ser úteis na previsão desses eventos na região semiárida do Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: Petrolina. Chuva. Índices de estabilidade. Análise de componentes principais. Análise de agrupamentos.

ABSTRACT

The present work analyzes the atmospheric conditions found over the area of Petrolina during the rainy month of April, 2014. These conditions have been analyzed focusing on the extreme rainfall event of April 8th. The database used consisted of reanalysis data, enhanced weather satellite images, daily and hourly rainfall totals, wind hourly values taken at the surface and upper air daily soundings. Weather analysis techniques have been used to diagnose the environment at synoptic scale and mesoscale all associated to extreme event. Data based on isobaric standard levels and stability indices have been submitted separately to multivariate analysis techniques in order to identify physical factors and verify the appropriateness of indices such as those of indicative of rain occurrences in the semiarid region. Rainfall was recorded between the 7th and 12th, and also the 27th of April related to weak southeast winds at the surface. The rain extreme event on April 8th was caused by a multicellular convective system which develops along large-scale conditions, characterized by the Inter-tropical Convergence Zone (ITCZ) acting at the far north and north of Northeastern Brazil, the Bolivian high moved east of its climatological position, and a high amplitude trough in the upper troposphere, east of South America. The use of factorial analysis for the principal components (PCA) reduces a set of nine variables along three principal components (PCs) which retain over 90% of the total data variance at all isobaric levels analyzed. The first retained PC accounts for the variations of temperature levels at 925 hPa, 850 hPa and 200 hPa, and also the moisture content variations at 500 hPa level. The application of cluster analysis (CA) to retained factors has helped in the identification of six groups of homogeneous days, considering the atmospheric conditions at each isobaric level. The application of PCA to a set of ten stability indexes results in three retained PCs holding 82.8% of the data total variance. CA application allows us to identify days that belongs to groups on which the indices represent either high or low instability condition. The indices CAPE, LI, SI, K, TT and SWEAT are the ones that best represent the thermodynamic and dynamic features of the atmosphere in the month studied. They have presented the largest variations on the days before rainfall events; an indication that may be useful in forecasting these events in the semiarid region of Northeast Brazil.

Keywords: Petrolina. Rain. Stability indices. Principal component analysis. Cluster analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 4.1 – Regiões geográficas do Brasil com destaque para a Região Nordeste e seus estados (cinza médio). A bacia hidrográfica do Rio São Francisco com suas subdivisões é apresentada na cor branca. A subdivisão 1 é o Alto São Francisco, a 2 o Médio São Francisco, a 3 o Submédio São Francisco (com destaque para a localização da estação de superfície de Petrolina) e a 4 o Baixo São Francisco. Os estados da Região Nordeste estão identificados por suas siglas: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão (MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), e Sergipe (SE)..... 31
- Figura 4.2 – Média mensal climatológica da precipitação do período 1961-1990 para o município de Petrolina-PE. (Fonte dos dados: INMET, 2014) 32
- Figura 5.1 – Totais diários da precipitação (mm) registrada na estação automática de Petrolina no mês de abril de 2014. (Fonte dos dados: INMET, 2014)..... 46
- Figura 5.2 – Totais horários e acumulados da precipitação (mm) registrada na estação automática de Petrolina entre as 0 UTC do dia 7 e as 0 UTC do dia 9 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)..... 46
- Figura 5.3 – Médias diárias da componente zonal (u), componente meridional (v) e da intensidade do vento (|V|) na estação automática de Petrolina no mês de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)..... 47
- Figura 5.4 – Valores horários da componente zonal (u), componente meridional (v) e da intensidade do vento (|V|) na estação automática de Petrolina entre as 00 UTC do dia 7 e as 00 UTC do dia 9 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)..... 48
- Figura 5.5 – Imagens setorizadas do satélite GOES-13 para a Região Nordeste e adjacências no dia 8 de abril de 2014 às: (a) 00:00 UTC, (b) 03:00 UTC, (c) 05:00 UTC, (d) 06:00 UTC, (e) 07:00 UTC e (f) 09:00 UTC. A circunferência branca na área central da imagem (a) está centrada (aproximadamente) em Petrolina. A escala de cores da temperatura do topo de nuvens é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: CPTEC/INPE, 2014)..... 49
- Figura 5.6 – Imagens realçadas do satélite GOES-13 para a região tropical da América do sul no dia 8 de abril de 2014 às: (a) 5:45 UTC e (b) 11:45 UTC. A circunferência branca destaca o sistema convectivo multicelular (SCm) na região de Petrolina. A escala de cores da temperatura do topo de nuvens é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: CPTEC/INPE, 2014) 50
- Figura 5.7 – Pressão reduzida ao nível médio do mar às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014. O intervalo de análise é de 2 hPa. Os centros de alta pressão são indicados pela letra **A** e os de baixa pressão pela letra **B**. A linha tracejada indica o eixo do cavado invertido a leste da Região Nordeste. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)... 52

- Figura 5.8 – Linhas de corrente e intensidade do vento (km h^{-1}) às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A escala de tons de cinza da intensidade do vento é apresentada ao lado dos mapas. O anticiclone da Bolívia é indicado pela sigla **AB**, outros centros anticiclônicos pela letra **A** e centros ciclônicos pela letra **C**. As linhas tracejadas indicam os eixos dos cavados. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014) 52
- Figura 5.9 – Vorticidade relativa às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ em (a) e (b), e de $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ em (c) e (d). As áreas com vorticidade negativa estão sombreadas. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014) 54
- Figura 5.10 – Umidade específica às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo da análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)..... 54
- Figura 5.11 – Movimento vertical na latitude de 10°S às: (a) 12 UTC do dia 7, (b) 18 UTC do dia 7, (c) 00 UTC do dia 8, (d) 06 UTC do dia 8, (e) 12 UTC do dia 8, (f) 18 UTC do dia 8. O intervalo da análise é de $5 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As áreas de movimento ascendente estão sombreadas. A linha contínua perpendicular ao eixo das abscissas marca a longitude de 40°W , próxima e a leste de Petrolina. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)..... 56
- Figura 5.12 – Perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), à esquerda, e da componente zonal (u), componente meridional (v), e intensidade do vento ($|V|$), à direita, obtidos de sondagem de ar superior realizada em Petrolina em abril de 2014 às 12 UTC do dia: (a,b) 7 (dia anterior ao evento extremo); (c,d) 8 (dia do evento extremo); e (e,f) 9 (dia posterior ao evento extremo). (Fonte dos dados: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)..... 58
- Figura 5.13 – Variação diária no mês de abril de 2014 do índice de estabilidade: (a) LI, (b) SI, (c) TT, (d) K, (e) SWEAT, (f) CAPE, (g) CINE, (h) DTel, (i) PII e (j) KO. Os índices foram obtidos de sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Petrolina. 61
- Figura 5.14 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 925 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico. 65
- Figura 5.15 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 925 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) razão de mistura (segunda CP), (c) componente zonal do vento (terceira CP)..... 65
- Figura 5.16 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 850 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico. 66

- Figura 5.17 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 850 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) razão de mistura (segunda CP), (c) componentes zonal e meridional do vento (terceira CP), em que a simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. 67
- Figura 5.18 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 500 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico. 68
- Figura 5.19 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 500 hPa: (a) razão de mistura (primeira CP), (b) Temperatura (segunda CP), (c) componentes zonal e meridional do vento (terceira CP), em que a simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. 68
- Figura 5.20 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 200 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. 69
- Figura 5.21 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 200 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) temperatura do ponto de orvalho (segunda CP), (c) componente zonal do vento (terceira CP). 70
- Figura 5.22 – Curva de inércia para o nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. As flechas nas figuras indicam a ordem do corte feito no dendrograma. 72
- Figura 5.23 – Dendrograma utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A linha tracejada indica o corte no dendrograma. Os grupos de dias homogêneos são indicados pelos números de 1 a 6. 73
- Figura 5.24 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para a matriz em modo-P dos índices de estabilidade, no período de 1 a 29 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. 78
- Figura 5.25 – Série temporal de índices relacionados com as componentes principais: (a) CAPE e LI (primeira CP), (b) TT e K (primeira CP), (c) KO e PII (segunda CP) e (d) SWEAT e CINE (terceira CP). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos. 79
- Figura 5.26 – Curva de inércia do agrupamento aplicado aos fatores rotacionados dos índices de estabilidade. A flecha na figura indica a ordem do corte realizado no dendrograma. 80
- Figura 5.27 – Dendrograma utilizando o método de Ward e a distância euclidiana quadrática para o agrupamento aplicado aos fatores rotacionados dos índices de estabilidade. A linha tracejada indica o corte no dendrograma. Os grupos homogêneos de dias são representados pelos números de 1 a 6. 80

LISTA DE TABELAS

- Tabela 5.1 – Fatores rotacionados dos quatro níveis isobáricos analisados..... 63
- Tabela 5.2 – Grupos de dias dos elementos meteorológicos formados para os quatro níveis isobáricos padrões analisados, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. 72
- Tabela 5.3 – Valores médios dos elementos meteorológicos nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos padrões de 925, 850, 500 e 200 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os números em **negrito** (**negrito e itálico**) são os valores médios máximos (mínimos) dos elementos meteorológicos. As componentes do vento foram consideradas em módulo. 74
- Tabela 5.4 – Fatores rotacionados dos índices de estabilidade no mês de abril de 2014..... 78
- Tabela 5.5 – Grupo de dias dos índices de estabilidade formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. 81
- Tabela 5.6 – Valores médios dos índices de estabilidade nos grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os números em **negrito** (**negrito e itálico**) são os valores médios máximos (mínimos) dos índices de estabilidade. 81

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Gradiente vertical das temperaturas potencial, potencial equivalente, potencial equivalente de saturação e a respectiva condição de estabilidade da atmosfera. .	33
Quadro 4.2 – Valores do índice de levantamento (LI) e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)	34
Quadro 4.3 – Valores do índice de Showalter (SI) e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)	35
Quadro 4.4 – Valores do índice TT e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: SILVA, 2011a)	36
Quadro 4.5 – Valores do índice K e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)	36
Quadro 4.6 – Valores do CAPE e a respectiva condição de estabilidade da atmosfera. (Fonte: DINIZ <i>et al.</i> , 2004)	38
Quadro 4.7 – Valores do índice KO e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: DWD, 2013)	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Análise de Agrupamentos
ACP	Análise de Componentes Principais
AL	Alagoas
AS	América do Sul
BA	Bahia
BRAMS	Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CAPE	Convective Available Potential Energy
CE	Ceará
CINE	Convective Inhibition Energy
CP	Componente Principal
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DTeI	Índice Delta Teta-E
ERSL	Earth System Research Laboratory
GNHSP	Greek National Hail Suppression Program
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEH	Índice de Energia e Helicidade
LI	Índice de Levantamento
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SI	Índice de Showalter
K	Índice K
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
KO	Índice KO
MA	Maranhão
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCE	Nível de Convecção Espontânea
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NE	Nível de Equilíbrio
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PII	Índice de Instabilidade Potencial
RN	Rio Grande do Norte
SCM	Sistema convectivo de mesoescala
SCm	Sistema convectivo multicelular
SE	Sergipe
SF	Sistema frontal
SQD	Soma dos quadrados dos desvios
SWEAT	Severe Weather Threat
TT	Total Totals
UTC	Universal Time Coordinated
VCAN	Vórtice ciclônico de altos níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
z	Altura
v	Componente meridional do vento
u	Componente zonal do vento
$\det()$	Determinante
$=$	É igual a
\geq	É Maior ou igual a
$>$	É maior que
\leq	É menor ou igual a
$<$	É menor que
$\partial\theta/\partial z$	Gradiente vertical da temperatura potencial
$\partial\theta_e/\partial z$	Gradiente vertical da temperatura potencial equivalente
$\partial\theta_{es}/\partial z$	Gradiente vertical da temperatura potencial equivalente de saturação
$g\text{ kg}^{-1}$	Grama por quilograma
$^{\circ}\text{C}$	Graus Célsius
hPa	Hectopascal
hPa s^{-1}	Hectopascal por segundo
J kg^{-1}	Joules por quilograma
K	Kelvin
E	Leste
mm	Milímetros
ω	Movimento vertical
N	Norte
W	Oeste
$\%$	Porcentagem
km h^{-1}	Quilômetros por hora
r	Razão de mistura
s^{-1}	Segundo a menos um
S	Sul
T	Temperatura do ar
Td	Temperatura do ponto de orvalho
TP	Temperatura da parcela
T_v	Temperatura virtual do ambiente
T_{vp}	Temperatura virtual da parcela
θ	Temperatura potencial
θ_e	Temperatura potencial equivalente
θ_s	Temperatura potencial equivalente de saturação
q	Umidade específica
UR	Umidade relativa

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE QUADROS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Principais sistemas meteorológicos atuantes na região de Petrolina	19
3.1.1	Sistemas frontais (SF).....	19
3.1.2	Vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) / Cavado de ar superior	20
3.1.3	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	22
3.1.4	Sistemas convectivos de mesoescala (SCM).....	23
3.2	Índices de estabilidade	25
3.3	Aplicações da análise multivariada	27
4	DADOS E METODOLOGIA	30
4.1	Dados	30
4.2	Metodologia	31
4.2.1	Critérios para seleção do período de estudo	32
4.2.2	Estabilidade da atmosfera.....	32
4.2.3	Análise multivariada.....	40
4.2.4	Análise sinótico-dinâmica e termodinâmica.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Análise do ambiente em escala sinótica e mesoescala	45
5.1.1	Análise da nebulosidade e de condições atmosféricas em superfície.....	45
5.1.2	Análise das condições atmosféricas em altitude.....	50
5.2	Análise multivariada de sondagens de ar superior	62
5.2.1	Análise (fatorial) de componentes principais em níveis isobáricos	62
5.2.1.1	Análise em 925 hPa	64
5.2.1.2	Análise em 850 hPa	66
5.2.1.3	Análise em 500 hPa	67
5.2.1.4	Análise em 200 hPa	69
5.2.2	Análise de agrupamentos em níveis isobáricos	70
5.3	Análise multivariada de índices de estabilidade	76
5.3.1	Análise (fatorial) de componentes principais aplicada a índices de estabilidade.....	76
5.3.2	Análise de agrupamentos de índices de estabilidade.....	79
6	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

Situada no extremo sudoeste de Pernambuco, na porção submédia do vale do Rio São Francisco, Petrolina é um dos mais importantes polos agroindustriais brasileiros, destacando-se especialmente na produção e exportação de frutas para vários países. Conforme o censo demográfico de 2010, o município de Petrolina tem uma população de 293.962 habitantes e ocupa uma área de 4.561,872 km² (IBGE, 2010). O município está inserido na mesorregião do Sertão do São Francisco e integra a microrregião de Petrolina, na região semiárida nordestina, onde o bioma nativo predominante é a Caatinga, um dos mais afetados pelas mudanças decorrentes da ocupação humana.

Na região de Petrolina o período de estiagem e o período chuvoso são bem definidos. A estação chuvosa abrange os meses de novembro a abril quando sistemas meteorológicos de grande e meso escalas interferem diretamente nas condições de tempo da região (com ação conjunta ou não). Nessa época não é raro a ocorrência de chuvas intensas associadas a sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais austrais, vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN)/cavado de ar superior do Nordeste-Atlântico Sul e sistemas convectivos de mesoescala (SCM). No período de estiagem, que abrange os meses de maio a outubro, geralmente não são registradas chuvas.

A alta variabilidade da precipitação, uma das características marcantes do clima da região semiárida nordestina, tem motivado pesquisadores de várias nacionalidades a se dedicarem ao estudo dos fenômenos que atuam na região. Tais estudos são de grande importância para o conhecimento dos sistemas meteorológicos que influenciam o clima nessa área da Região Nordeste, mas ainda não são suficientes para explicar os mecanismos de formação desses sistemas, objetivando melhorias na previsão e detecção dos mesmos. Desse modo, em um município como Petrolina, que se destaca pela produção e exportação de frutas através da agricultura irrigada, eventos de seca prolongada e, principalmente, de precipitação intensa, tem grande potencial para causar transtornos socioeconômicos de magnitude significativa, de modo que estudos mais aprofundados sobre seus mecanismos de formação são justificados.

Neste trabalho é analisado um mês chuvoso extremo da estação chuvosa de Petrolina utilizando técnicas de análise multivariada objetivando investigar a existência de relações entre variáveis dinâmicas e termodinâmicas obtidas de sondagens de ar superior realizadas em Petrolina. Dados representativos da baixa, média e alta troposfera são submetidos à Análise

(Fatorial) de Componentes Principais (ACP) e à Análise de Agrupamentos (AA) para identificar fatores físicos dominantes e grupos de dias com características similares. Essas técnicas também são utilizadas para avaliar o potencial de índices de estabilidade como indicadores da ocorrência de chuvas convectivas na área de Petrolina. Os resultados da análise multivariada são interligados/relacionados com o diagnóstico da estrutura dinâmica e termodinâmica dos sistemas meteorológicos atuantes na região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem o objetivo de analisar a evolução temporal e espacial das condições atmosféricas de um mês com evento extremo de chuva na região de Petrolina.

2.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar os sistemas atmosféricos atuantes no evento de chuva extrema através de técnicas de análise meteorológica.
- Investigar a existência de interrelações entre elementos meteorológicos observados em ar superior.
- Identificar mecanismos físicos atuantes no mês selecionado aplicando técnicas de análise multivariada a dados de ar superior.
- Avaliar a adequação de índices de estabilidade como indicadores da ocorrência de chuva através da análise multivariada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é feita uma revisão dos principais sistemas meteorológicos que atuam na região semiárida nordestina e também de aplicações dos índices de estabilidade e de técnicas de análise multivariada.

3.1 Principais sistemas meteorológicos atuantes na região de Petrolina

Numa revisão dos mecanismos dinâmicos que provocam chuva na Região Nordeste, Molion e Bernardo (2002) destacam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e sistemas frontais. A região também é influenciada por sistemas convectivos de mesoescala (SCM), circulação de brisa e convecção local. Reboita *et al.* (2010) destacam a ZCIT, os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) e os sistemas frontais (SF) como sistemas meteorológicos com chuva associada na área do sertão nordestino.

3.1.1 Sistemas frontais (SF)

Um SF geralmente se forma quando ocorre intensificação do gradiente horizontal de temperatura na região de transição entre duas massas de ar com características distintas. Inicialmente, o SF é composto por uma frente fria e uma frente quente associadas a um ciclone frontal que se forma na baixa troposfera, nas latitudes médias ou subtropicais. À medida que o sistema se desenvolve e se desloca para latitudes baixas há a gradual homogeneização das massas de ar, o que dá origem à frente oclusa na área central do ciclone. Na frente fria, na fronteira entre as massas de ar, o ar quente e úmido é forçado a ascender sobre a massa de ar frio do anticiclone situado na retaguarda da frente. Essa ascendência do ar quente e úmido produz uma banda de nebulosidade característica na área da frente fria que pode ser facilmente identificada em imagens de satélite. As frentes frias são um dos principais mecanismos de mudança do tempo na América do Sul. Elas atuam desde o sul do continente (influência mais marcante), até latitudes equatoriais, onde geralmente chegam enfraquecidas, mas capazes de modificar o tempo local, principalmente no que diz respeito à precipitação. Na revisão dos mecanismos dinâmicos que provocam chuva na Região Nordeste, Molion e Bernardo (2002) destacam que a penetração de sistemas frontais, ou sistemas frontais em dissipação, entre as latitudes de 5°S e 18°S, é um importante mecanismo de produção de chuva no sul e no leste da

Região Nordeste. Silva *et al.* (2011a), com o objetivo de analisar as causas da formação das precipitações intensas e determinar os sistemas meteorológicos envolvidos, verificaram que as frentes frias estão entre os sistemas que mais se relacionam com a ocorrência de chuvas intensas em Alagoas.

De acordo com Kousky (1979), incursões de sistemas frontais em latitudes baixas produzem um efeito pronunciado na atividade convectiva da faixa tropical da América do Sul. O autor estudou incursões de sistemas frontais na Região Nordeste utilizando três observações diárias de superfície do período de 1961 a 1970. Ele mostrou que o avanço de sistemas frontais favorece a diminuição da pressão à superfície nas latitudes baixas e o deslocamento do cavado equatorial para latitudes mais ao sul, o que aumenta a precipitação no setor leste da região, nos meses de outono e inverno.

Souza (2003) investigou as formas de atuação de um sistema de latitudes médias que avançou sobre a região semiárida nordestina no início de junho de 1985. A autora diagnosticou, num cenário de grande escala, que uma ciclogênese iniciada no dia 3 ao longo de uma banda frontal situada a leste da Região Sudeste desencadeou uma sequência de eventos: (a) o avanço até próximo de 7° S de um cavado de latitudes médias com o eixo meridionalmente alinhado na média troposfera em torno de 45°W, estendendo-se desde o Nordeste até o Atlântico Sul, (b) o enfraquecimento dos ventos alísios de leste-sudeste a partir do dia 4, (c) a convergência de umidade em baixos níveis sobre grande parte do Nordeste no dia 6 e (d) uma extensa cobertura de nuvens nos dias 5 e 6, em contraste com os dias anteriores.

3.1.2 Vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) / Cavado de ar superior

Os VCAN que atuam na região Nordeste são sistemas atmosféricos caracterizados por um centro de baixa pressão em altitude cuja área central é mais fria que a periferia. Esses sistemas pertencem à escala sinótica e geralmente se formam sobre o Oceano Atlântico. Eles atuam principalmente nos meses de primavera, verão e outono, havendo uma maior frequência de ocorrência no mês de janeiro. Os VCAN apresentam uma área de nebulosidade em forma de arco que indica a existência de movimento descendente no centro, e movimento ascendente na periferia. No decorrer do seu ciclo de vida eles podem se deslocar para leste, para oeste ou permanecer estacionários por alguns dias. Num estudo sobre VCAN de origem tropical, Kousky e Gan (1981) propuseram um mecanismo para sua formação relacionado com a amplificação do cavado de ar superior sobre o Nordeste-Atlântico Sul. Eles formularam a hipótese de que a penetração de sistemas frontais austrais está diretamente ligada à amplificação do cavado e,

portanto, contribui indiretamente para a formação do VCAN. Anjos (1995) diagnosticou que sistemas frontais austrais exerceram um papel importante no desenvolvimento de um VCAN sobre o Nordeste-Atlântico Sul no período de 15 a 25 de novembro de 1986, corroborando essa hipótese.

Os VCAN são conhecidos como sistemas meteorológicos com dupla atuação; se por um lado são capazes de produzir grandes acumulados pluviométricos devido à convecção ao longo de sua região periférica, por outro podem inibir drasticamente a nebulosidade devido à subsidência de ar frio e seco na sua área central. Costa (2009) aplicou um algoritmo que rastreia o movimento ciclônico utilizando como parâmetro fundamental a direção do vento e a vorticidade relativa, para analisar 57 vórtices identificados nos verões de 2003 a 2008 na região tropical do Atlântico. Os resultados obtidos de balanços de vorticidade e energia sugerem que os vórtices começam a dissipar a partir do centro, e que se expandem na vertical nas fases iniciais, e se comprimem nas fases de dissipação, além de apresentarem tendência a se conectar ao escoamento de latitudes médias, o que fornece ar frio para o seu núcleo mantendo o gradiente térmico entre a periferia e o centro. Costa *et al.* (2014) simularam um evento de VCAN na Região Nordeste aplicando a teoria da máquina térmica baseada na segunda lei da termodinâmica com o objetivo de analisar mecanismos de manutenção desse tipo de sistema. O modelo *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) simulou bem o evento ocorrido no período de 10 a 21 de janeiro de 2011, mostrando sua maior intensidade no período de 16 a 19 de janeiro. Os autores verificaram que a teoria da máquina térmica foi eficaz no estudo de VCAN por ter apresentado boa concordância com as simulações realizadas com o modelo BRAMS.

Silva Aragão *et al.* (2007) investigaram as características em mesoescala e em escala sinótica de um dia chuvoso em janeiro de 1985 na região de Petrolina. Foram utilizados dados do radar meteorológico em banda-C instalado em Petrolina, dados de reanálise e dados observacionais de superfície e de ar superior. As autoras identificaram áreas de precipitação na escala meso- β constituídas por núcleos convectivos profundos inseridos em áreas estratiformes. Na escala sinótica elas mostraram que a área de cobertura do radar foi influenciada por um cavado de grande amplitude na alta troposfera, enquanto que a alta subtropical do Atlântico sul esteve enfraquecida, conforme evidenciado pela inversão de subsidência menos intensa, e pelo alto teor de umidade e vento fraco com direção variável, na baixa e média troposfera.

3.1.3 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma banda de nebulosidade (contínua ou não) identificada nas imagens de satélite, estendendo-se na direção zonal na faixa equatorial do globo. A região de atuação da ZCIT coincide com a zona de confluência dos ventos alísios, onde a convergência de umidade é máxima, com a área de maior temperatura da superfície do mar, e com a área do cavado equatorial. A ZCIT é formada pela confluência entre os ventos alísios de nordeste e os ventos alísios de sudeste, o que resulta em movimento ascendente do ar com alto teor de vapor d'água. Ao ascender o ar esfria, formando nuvens. A ZCIT é o principal mecanismo produtor de chuva no norte da Região Nordeste. Ela atua de fevereiro a maio na região do Ceará, oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco, sendo responsável por grande parte da precipitação registrada na estação chuvosa dessas áreas. Num estudo sobre a relação da ZCIT com a precipitação no Estado do Ceará, Xavier *et al.* (2000) introduziram uma metodologia destinada a determinar as posições latitudinais da ZCIT com base na componente meridional do vento sobre o Atlântico intertropical. Os autores analisaram dados mensais da *pseudotensão* do vento na área limitada pelas latitudes de 30°N e 20°S sobre o Oceano Atlântico, para o período de 1964 a 1999, e dos totais mensais de precipitação de 93 postos distribuídos no Estado do Ceará, para o período de 1964 a 1998. As melhores correlações entre a precipitação e o posicionamento da ZCIT foram encontradas nas regiões homogêneas de precipitação situadas mais ao norte no estado. Nas demais regiões (mais interioranas), as chuvas no quadrimestre fevereiro-março-abril-maio (FMAM) apresentaram uma relação evidente com a migração da ZCIT para latitudes ao sul da linha equatorial, apesar das correlações serem mais baixas.

Alguns estudos realizados para a região semiárida nordestina sugerem que a atuação simultânea da ZCIT e de sistemas meteorológicos de escala sinótica é um dos principais mecanismos presentes na estação chuvosa da região, principalmente nas situações de chuva acima da média. Moscati e Gan (2007) analisaram o vento no nível de 850 hPa e a precipitação no semiárido nordestino com o objetivo de investigar os mecanismos responsáveis pela ocorrência de eventos extremos de chuva nessa área do território brasileiro. Os autores verificaram que a chuva pode ser substancialmente modulada pela atuação simultânea de dois ou mais sistemas de grande escala (por exemplo: ZCIT, sistemas frontais, ZCAS, VCAN, cavados de altos níveis, Alta da Bolívia, entre outros) e que os mesmos se relacionam com a frequência e interações desses sistemas. Seus resultados também sugerem que o deslocamento meridional da ZCIT pode não ser o único fator crítico para definir a qualidade de estação

chuvosa na região semiárida, apesar de que a ZCIT mais próxima do equador pode afetar a precipitação nesta região. A relação entre o vento (à superfície) e a chuva em estações chuvosas contrastantes no Submédio São Francisco também foi analisada por Silva Aragão *et al.* (1997). As autoras verificaram que nos meses com precipitação inferior à climatologia, a região era dominada por ventos associados com a alta subtropical do Atlântico Sul (direção leste/sudeste). Por outro lado, nos meses com chuva acima da média o vento apresentava outras direções devido à atuação de sistemas atmosféricos como a ZCIT, VCAN, e sistemas frontais oriundos de latitudes mais ao sul.

Alves *et al.* (2006), analisando o mês de janeiro de 2004, verificaram que a interação entre a ZCIT, um VCAN, uma frente fria posicionada no centro-sul da Região Nordeste e a Oscilação de Madden-Julian provocou o posicionamento da ZCAS ao norte de sua posição climatológica, favorecendo a ocorrência de chuvas intensas no centro-norte da Região.

3.1.4 Sistemas convectivos de mesoescala (SCM)

Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) também atuam no semiárido da Região Nordeste. Existem dois mecanismos dinâmicos pelos quais os SCM podem se formar: o primeiro é devido ao mecanismo que atua em mesoescala quando uma parcela de ar potencialmente instável, situada próxima à superfície, é mecanicamente forçada a ascender em uma zona frontal, ou ascende devido ao deslocamento de uma corrente de jato nos altos níveis. Isto é mais frequente em regiões baroclínicas. O segundo ocorre nas áreas onde o ambiente é barotrópico, e se deve à dinâmica do próprio sistema convectivo. Após atingir a maturidade, surgem correntes descendentes frias (rajadas de vento da nuvem) nos SCM formando então uma “bolha” de ar frio que funciona como uma rampa para as correntes ascendentes quentes e úmidas que alimentam o processo convectivo. Isto resulta em um movimento ascendente em mesoescala e na formação de uma grande área com nuvens estratiformes características (ANABOR, 2009). Ainda, de acordo com Anabor (2009), os SCM que se formam conforme a primeira situação são sistemas de grandes dimensões favorecidos pelas características da topografia, situações sinóticas e circulações locais. Os SCM que obedecem à segunda condição de formação estão associados à própria convecção e à flutuabilidade das parcelas potencialmente instáveis próximas do SCM, assemelhando-se ao tipo de convecção que se desenvolve localmente, ou aos núcleos que realimentam o sistema. Conforme Orlanski (1975), os SCM tropicais são fenômenos classificados entre as escalas meso- α , meso- β e meso- γ . Frequentemente a evolução desses sistemas está associada à convecção profunda, cujo

desenvolvimento ocorre normalmente devido a aquecimento nos baixos níveis da atmosfera, umedecimento na camada limite e/ou movimento ascendente em grande escala.

O conhecimento sobre a estrutura dos SCM foi consideravelmente ampliado com o advento dos radares meteorológicos. No Nordeste do Brasil, o estudo pioneiro de Correia (1989), com dados de um radar meteorológico em banda-C instalado em Petrolina-PE, gerou as primeiras informações sobre a estrutura de pequena escala e mesoescala e a evolução temporal dos sistemas de chuva do semiárido da Região Nordeste. Observados no primeiro semestre de 1985, os ecos do radar de Petrolina foram posteriormente analisados por Araújo (1996) e Silva Aragão *et al.* (2000). Eles determinaram cinco padrões de ecos que foram relacionados com mecanismos dinâmicos e com o aquecimento radiativo da superfície. A análise de correlação entre a energia convectiva da parcela e o número de ecos em diferentes classes de área horizontal resultou em uma correlação linear positiva para os ecos com área menor ou igual a 400 km².

Barbosa e Correia (2005) investigaram a natureza e distribuição dos sistemas convectivos responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações no submédio do Rio São Francisco no ano de 1985. As autoras estudaram episódios extremos no período chuvoso da região e um evento incomum de atividade convectiva intensa no mês de junho. Seus resultados mostram que o ambiente sinótico foi determinante na evolução dos sistemas precipitantes observados e que a convergência do fluxo de umidade na baixa troposfera foi fundamental para a ocorrência da convecção profunda.

Silva *et al.* (2008) realizaram um estudo sobre sistemas convectivos linearmente organizados dentro de um círculo com raio de 250 km, área de cobertura do radar meteorológico de Petrolina. Os autores analisaram três dias (27, 28 e 29) de março de 1985, investigando o papel desempenhado por fatores locais e de grande escala no desenvolvimento desses sistemas. No cenário de grande escala, a área de cobertura do radar foi influenciada por um cavado de ar superior austral no dia 27 e por um vórtice ciclônico de altos níveis no dia 29. A convergência de umidade próxima à superfície foi favorável ao desenvolvimento de atividade convectiva nos dias 27 e 29, enquanto que divergência de umidade próxima à superfície inibiu a atividade convectiva no dia 28. No cenário de mesoescala foi observado que o aquecimento diurno é um fator importante para a formação de células convectivas, somando-se a ele o papel determinante da topografia.

3.2 Índices de estabilidade

Vários índices obtidos de sondagens de ar superior são convenientemente expressos na forma de um valor numérico chamado de índice de estabilidade. Tais índices foram introduzidos principalmente como auxiliares na previsão juntamente com determinadas técnicas de estudo, e os valores de cada índice estão associados a uma característica do tempo significativo (AWS, 1979). Existem vários trabalhos na literatura utilizando índices de estabilidade, desenvolvidos para diversas regiões do globo.

Benetti e Silva Dias (1986), utilizando dados de ar superior do aeroporto de Congonhas em São Paulo, determinaram valores médios, mínimos e máximos dos índices de estabilidade de Showalter, Galway, Fawbush-Miller, K, Total Totals, SWEAT, Druyan-Sant e CAPE (energia potencial convectiva disponível), apresentando os resultados sob a forma de histogramas de frequência. A maioria dos índices apresentou variabilidade na distribuição de seus valores indicativos de instabilidade, sendo esta maior nos trimestres mais chuvosos da área.

Cardoso (2007) utilizou dados de precipitação e índices de estabilidade da cidade de Porto Alegre obtidos para o período de 1990 a 2005 com o objetivo de investigar as relações estatísticas desses índices com o total de precipitação e verificar a sua confiabilidade. Os dados de precipitação são provenientes da estação de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os dados de ar superior são da estação de altitude localizada no Aeroporto Salgado Filho. A autora verificou que a análise individual dos índices de estabilidade apresentou resultados poucos satisfatórios. Por outro lado, na análise conjunta de vários índices, a relação entre eles e as chuvas foi satisfatória.

Nascimento (2005), com o objetivo de ampliar a discussão sobre a previsibilidade de tempo severo no Brasil fez uma descrição atualizada de índices de estabilidade. Esses índices foram o K, Showalter, SWEAT, Total Totals, IEH (índice energia-helicidade), Fawbush-Miller e *Lifted*. O autor concluiu em uma primeira análise que os parâmetros estudados têm potencial de aplicação para prever atividade convectiva no setor subtropical do Brasil, compreendendo a Região Sul, parte do Sudeste e Mato Grosso do Sul.

Zawadzki *et al.* (1981) encontraram uma alta correlação entre a CAPE e taxas máximas de precipitação convectiva num período de 24 horas. Entretanto, encontraram também um número significativo de dias com valores altos de CAPE sem ocorrência de precipitação convectiva, indicando que a forçante dinâmica exerceu um controle maior na formação e manutenção dos sistemas convectivos extratropicais.

Silva *et al.* (2011b) estudaram índices de instabilidade termodinâmica, conteúdo de água precipitável e fluxos de energia estática associados ao ciclo anual de precipitação no litoral do Rio Grande do Norte no período de 2002 a 2009. A análise dos índices de instabilidade calculados a partir de radiossondagens realizadas em Maxaranguape-RN mostrou maior instabilidade condicional no mês de abril, coincidindo com um máximo secundário de precipitação. Porém, não explicou o máximo principal observado em julho. Isso sugere que os mecanismos termodinâmicos não são suficientes para modular o máximo de chuva, o que é consistente com estudos realizados no Sudeste e Sul do Brasil. Os fluxos de energia estática úmida e saturada mostram que o ciclo anual da precipitação é modulado pelos mecanismos que geram instabilidade termodinâmica associados com a convergência de umidade nos baixos níveis.

Ainda, Barbosa e Correia (2005), com o objetivo de avaliar a natureza de sistemas convectivos intensos detectados na região de alcance do radar de Petrolina - PE, considerando aspectos de grande e meso escalas, analisaram o efeito do cisalhamento vertical do vento e da CAPE na organização dos sistemas convectivos profundos e verificaram que valores da CAPE pouco acima de 1000 J kg^{-1} podem ser um forte indicativo de atividade convectiva intensa nessa região, e que em situações semelhantes deve-se considerar fatores de grande escala na análise de tempo significativo.

Brito *et al.* (2011), tendo como objetivo estudar a frequência de temporais no Estado de Alagoas e elaborar uma metodologia que possibilitasse prevê-los, analisaram os processos sinóticos e termodinâmicos na sua formação. Na análise termodinâmica os autores observaram que as curvas das temperaturas do ar e do ponto de orvalho observadas foram semelhantes às curvas previstas das trajetórias das parcelas de ar simuladas pelo modelo HYSPLIT nas previsões de até 48 e 24h de antecedência, respectivamente. Os índices de estabilidade LI e CAPE+ indicaram uma atmosfera muito instável com 48h de antecedência.

Diniz *et al.* (2004) investigaram as condições de tempo no aeroporto de Petrolina e a sua relação com a atividade convectiva intensa. As autoras utilizaram dados do radar meteorológico banda-C instalado no aeródromo, observações de superfície e dados de ar superior. O grau de estabilidade da atmosfera foi avaliado através de índices de estabilidade e perfis verticais das temperaturas potencial, potencial equivalente e potencial equivalente de saturação. Segundo as autoras, os resultados obtidos com os índices são satisfatórios no sentido de indicar situações favoráveis ao desenvolvimento de tempestades. Entretanto, os índices são insuficientes para determinar a intensidade e a duração desses sistemas. Eles são mais eficientes como previsores de tempestades quando usados em conjunto com outras informações

meteorológicas e considerações de grande escala. Na maioria dos casos analisados foi encontrado que eventos significativos de cisalhamento vertical do vento estiveram associados com inversões térmicas e que valores altos de CAPE é uma condição necessária, mas não suficiente para o desenvolvimento de sistemas convectivos intensos.

3.3 Aplicações da análise multivariada

A análise multivariada é uma técnica muito usada na Meteorologia por permitir reduzir um grande conjunto de dados para um conjunto menor sem perda significativa da informação contida nos mesmos. É grande o número de estudos realizados em todo o mundo, com diferentes finalidades, que fazem uso dessa técnica estatística.

Dalezios e Papamanolis (1991) avaliaram o desempenho de diversos índices de instabilidade atmosférica na previsão operacional da ocorrência de granizo no *Greek National Hail Suppression Program* (GNHSP). A avaliação dos índices foi realizada objetivamente através da análise multivariada em componentes principais. A análise agrupou os índices em três fatores. Segundo os autores, os índices com carga fatorial e escores elevados foram os melhores para prever convecção com formação e queda de granizo no GNHSP.

Com o objetivo de determinar padrões de precipitação na região da Tessália (Grécia Central), Stathis e Myronidis (2009) aplicaram a ACP aos dados de precipitação de 75 estações meteorológicas para um período de 35 anos. As duas primeiras CP's descreveram 87,7% da variância total dos dados. A primeira CP está relacionada com a frequência de ciclones que atingem a região e a segunda está ligada à frequência de anticiclones e tipos de tempo não-gradientes (não tem padrão bem definido ou associado a qualquer sistema de escala sinótica), ou seja, a primeira componente explica o período chuvoso da região e a segunda componente as chuvas de verão.

Escobar (2014) aplicou a ACP a dados de reanálise do período de 1986 a 2011 para fazer uma classificação de campos da circulação atmosférica em superfície e em 500 hPa. O objetivo do estudo era identificar os principais padrões sinóticos que influenciam o tempo na Região Sudeste, especialmente o Estado de Minas Gerais. Em superfície, o autor encontrou três padrões que se relacionam com a chuva em Minas Gerais: o primeiro está associado com uma frente fria atuando no sul da Região Sudeste e os demais se relacionam com uma configuração de bloqueio do tipo “dipolo” no Oceano Atlântico determinado por um anticiclone localizado em torno de (45°S, 50°W) e por uma baixa posicionada ao norte do anticiclone, em torno de 25°S. No nível de 500 hPa o autor encontrou dois padrões de circulação associados com a chuva

em Minas Gerais, que se refletiram nos campos obtidos em superfície; um deles associado ao avanço de um sistema frontal e o outro relacionado com uma situação de bloqueio de tipo “dipolo” no Oceano Atlântico.

Santos (2013) identificou padrões espaciais e temporais e regiões homogêneas da precipitação e do Índice de Precipitação Normalizado (SPI) no Estado do Pará através da ACP e da AA. Foram utilizados dados mensais de 72 postos pluviométricos distribuídos no estado. As três primeiras componentes principais (CP's) explicaram 92,91% da variância total dos acumulados mensais de precipitação. A técnica da AA aplicada aos principais fatores comuns dividiu o Pará em três regiões homogêneas de precipitação. A primeira, situada no norte do estado, apresenta o regime pluviométrico influenciado principalmente pelo deslocamento norte-sul da ZCIT; a segunda está localizada na sua área central, onde a convecção local e a ZCAS são os principais mecanismos atmosféricos com chuva associada, e a terceira está situada no sul do estado, onde as chuvas estão relacionadas com sistemas frontais e convecção local.

Vários autores também utilizaram a análise multivariada em estudos voltados para a região semiárida nordestina. Santos (2011), com o objetivo de quantificar aspectos da dinâmica dos fluxos de água, energia e gás carbônico (CO₂) no bioma da Caatinga utilizaram a Análise de Componentes Principais (ACP) para caracterizar a dependência entre as condições atmosféricas e a disponibilidade hídrica, e detectar padrões relacionados com fontes e sumidouros de CO₂ nesse bioma. A autora verificou que o primeiro fator agrupou as variáveis relacionadas com transportes turbulentos na camada limite convectiva. O segundo fator agregou as variáveis relacionadas à evapotranspiração, que sofrem uma influência marcante da sazonalidade já que, dependendo do período, a evapotranspiração é controlada pelos estômatos da vegetação ou pela disponibilidade de energia. O terceiro fator indica que a transferência de calor para a atmosfera no bioma da Caatinga é modulada pela radiação de ondas longas. O estudo indica que a Caatinga atua como emissor de CO₂ (em taxas mínimas) no período de estiagem, e como sumidouro de carbono (em taxas elevadas de absorção) no período chuvoso.

Diniz *et al.* (2011) analisaram o mês de abril de 1985, mês de ocorrência de eventos de chuvas intensas que resultaram em inundações no Submédio São Francisco. Os autores aplicaram ACP a dados observacionais de superfície e altitude coletados na área de Petrolina-PE, e a dados de reanálises dos *National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)*, com o objetivo de determinar a contribuição relativa de variáveis atmosféricas em várias escalas, e processos físicos envolvidos nos eventos de chuvas intensas. Na escala local, um modelo com três componentes principais foi suficiente para representar a estrutura das variáveis atmosféricas retendo 74% da variância total dos dados.

A técnica da ACP também permitiu identificar dois grupos de processos físicos dominantes nessa escala, dos quais o primeiro está associado com o teor de umidade e a instabilidade atmosférica, e o segundo está relacionado com o aquecimento radiativo da superfície. Na escala sinótica, os autores observaram que as cargas fatoriais mais significativas indicam que as condições atmosféricas nessa escala foram determinantes para a ocorrência de chuvas no período de 9 a 12 de abril, através do elevado teor de umidade na baixa troposfera e de convergência (divergência) de massa na baixa (alta) troposfera.

Queiroz *et al.* (2013) utilizaram a ACP para identificar mecanismos físicos em um mês extremo chuvoso na cidade de Petrolina. Os autores verificaram que no primeiro fator foram agrupadas as variáveis relacionadas com a advecção de temperatura pela componente meridional do vento nos baixos níveis. O segundo fator agregou as variáveis relacionadas com o teor de umidade na baixa troposfera. Já na média troposfera os autores verificaram que o primeiro fator se relaciona com a advecção de umidade pela componente zonal do vento enquanto que o segundo se relaciona com as mudanças de temperatura nos níveis médios. Numa extensão desse estudo, Sousa *et al.* (2013) aplicaram a Análise de Agrupamentos (AA) aos fatores obtidos por Queiroz *et al.* (2013). Essa metodologia permitiu identificar os dias com e sem ocorrência de precipitação. Na baixa troposfera a AA identificou quatro grupos nos quais os Grupos 1 e 2 são formados por dias sem ocorrência de precipitação, enquanto que nos Grupos 3 e 4 estão dias com eventos de precipitação favorecidos pela atuação de VCAN. Na média troposfera foram identificados três grupos cujas características são semelhantes às do nível de 850 hPa.

Os estudos apresentados nesta subseção evidenciam que a ACP e a AA tem ampla aplicabilidade na Meteorologia podendo ser usada para identificar padrões atmosféricos, mecanismos físicos, etc. A revisão apresentada neste capítulo mostra a diversidade de sistemas meteorológicos que influencia as condições de tempo na Região Nordeste, e indica que a realização de estudos voltados para a previsão de eventos intensos de chuva em sua parte semiárida pode trazer bons resultados com a aplicação de técnicas de análise multivariada aos índices de estabilidade atmosférica.

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Dados

Neste trabalho foram utilizados dados de superfície fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com sede em Brasília. Esses dados, coletados na estação automática do INMET instalada em Petrolina (9,38°S; 40,8°W) (Figura 4.1), foram totais horários e diários de precipitação e valores horários da velocidade e direção do vento à superfície. Os dados do vento possibilitaram calcular os valores horários da componente zonal (u) e da componente meridional (v) do vento à superfície. Médias diárias das componentes também foram obtidas.

Dados diários de ar superior da estação de altitude de Petrolina (9°24'S, 40°30'W) também foram utilizados na realização deste estudo. As sondagens, realizadas às 12 UTC, fornecem dados de: pressão, altitude, temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (T_d), umidade relativa (U_r), direção e velocidade do vento. Esses dados possibilitaram calcular as seguintes variáveis: razão de mistura (r), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}), e a componente zonal (u) e meridional (v) do vento.

Dados diários de reanálises do projeto *Reanalysis-2* (KANAMITSU *et al.*, 2002), obtidos do *National Centers for Environmental Prediction - Department of Energy (NCEP-DOE)*, na área geográfica compreendida entre as latitudes de 40°S e 30°N e as longitudes de 100°W e 20°E, com resolução horizontal de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (latitude e longitude), nos horários sinóticos das 06, 12, 18 e 24 UTC, também foram analisados: componentes zonal e meridional do vento, movimento vertical, umidade específica e pressão ao nível médio do mar. Todos os dados, à exceção do último, foram obtidos nos níveis isobáricos padrões disponíveis. Eles formaram a base de dados para a investigação da estrutura atmosférica em escala sinótica.

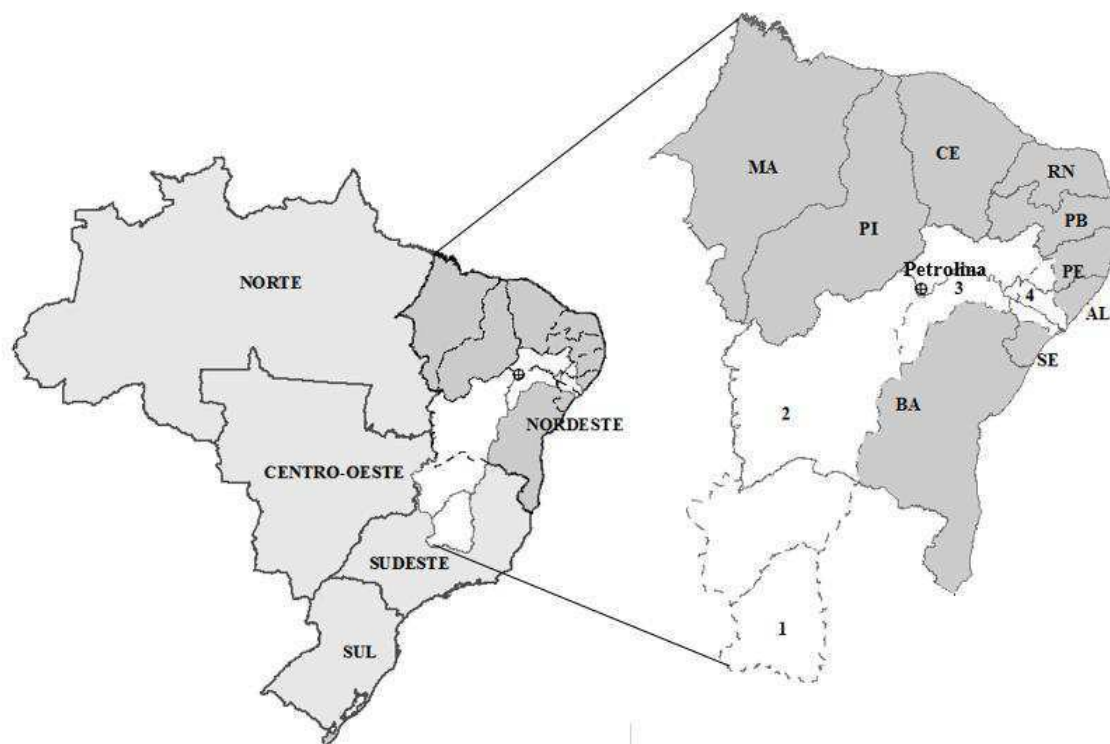


Figura 4.1 – Regiões geográficas do Brasil com destaque para a Região Nordeste e seus estados (cinza médio). A bacia hidrográfica do Rio São Francisco com suas subdivisões é apresentada na cor branca. A subdivisão 1 é o Alto São Francisco, a 2 o Médio São Francisco, a 3 o Submédio São Francisco (com destaque para a localização da estação de superfície de Petrolina) e a 4 o Baixo São Francisco. Os estados da Região Nordeste estão identificados por suas siglas: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão (MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), e Sergipe (SE).

4.2 Metodologia

Esta pesquisa teve início com a seleção do período de estudo realizada com base na climatologia da precipitação em Petrolina que é discutida brevemente a seguir.

A média climatológica anual da precipitação na região de Petrolina é de 577 mm (INMET, 2014). O ciclo anual das chuvas, que apresenta máximos no verão/outono e mínimos no inverno, é ilustrado na Figura 4.2 usando as normais climatológicas 1961-1990 do INMET. A estação chuvosa de Petrolina é de novembro a abril, sendo o mês de março, o mais chuvoso. O mês de abril, que encerra a estação chuvosa, tem média climatológica de 93,6 mm. O período de estiagem abrange os meses de maio a outubro, com totais mensais que variam entre 21,7 mm (maio) e 2,4 mm (agosto).

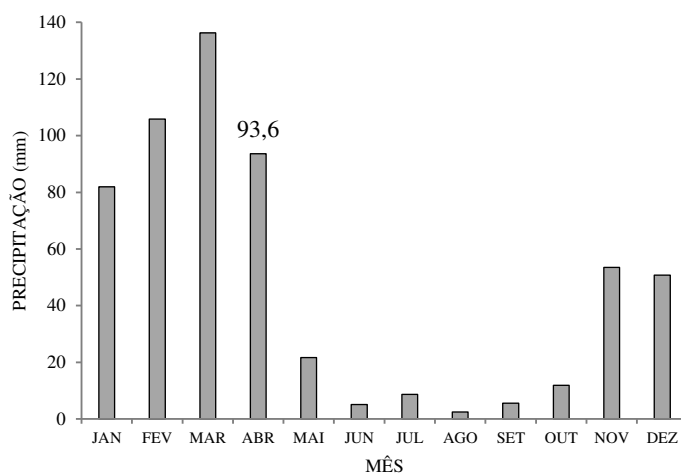


Figura 4.2 – Média mensal climatológica da precipitação do período 1961-1990 para o município de Petrolina-PE. (Fonte dos dados: INMET, 2014)

4.2.1 Critérios para seleção do período de estudo

O mês escolhido para análise foi abril de 2014. Um dos critérios usados para selecionar esse mês foi a ocorrência de um evento extremo de precipitação na região de Petrolina. Além disso, chamou a atenção no ano de 2014 o fato de que nos meses de janeiro a março, que integram a estação chuvosa de Petrolina, os totais mensais de chuva foram abaixo da média climatológica para o período e, exatamente no mês de abril, final da estação chuvosa, um sistema meteorológico provocou em poucas horas um acumulado de 115 mm, maior do que a normal climatológica do mês de abril. Outro critério determinante na seleção do mês de abril de 2014 foi o maior número de dias com disponibilidade de dados de superfície e altitude para a cidade de Petrolina. No caso das sondagens há dados para todos os dias, à exceção do dia 30.

4.2.2 Estabilidade da atmosfera

A convecção surge quando o equilíbrio entre a força de gravidade e a força que atua verticalmente em uma parcela de ar deixa de existir, ou seja, quando o equilíbrio hidrostático da parcela é rompido, ela ganha aceleração vertical. Neste estudo a estabilidade da atmosfera é analisada com o objetivo de prever ou compreender situações favoráveis à convecção no semiárido da Região Nordeste, onde a chuva é predominantemente de natureza convectiva (CORREIA, 1989; ARAÚJO, 1996; SILVA ARAGÃO *et al.*, 2000).

A análise da estabilidade da atmosfera pode ser feita a partir do sinal dos gradientes verticais da temperatura potencial ($\partial\theta/\partial z$), temperatura potencial equivalente ($\partial\theta_e/\partial z$) e

temperatura potencial equivalente de saturação ($\partial\theta_{es}/\partial z$), calculadas usando as equações propostas por Bolton (1980). O comportamento de ($\partial\theta/\partial z$) representa as condições de estabilidade do ambiente sem a presença de umidade, já o comportamento do gradiente vertical da temperatura potencial equivalente ($\partial\theta_e/\partial z$) representa as condições de estabilidade do ambiente da sondagem, e o comportamento do gradiente vertical da temperatura potencial equivalente de saturação ($\partial\theta_{es}/\partial z$) representa as condições de estabilidade do ambiente saturado. Nas situações em que esses gradientes apresentam valores positivos, a atmosfera representada por cada um está associada à condição de estabilidade, quando o gradiente é nulo a condição de estabilidade da atmosfera por eles representada está associada à neutralidade, e quando o sinal desse gradiente é negativo há uma indicação de instabilidade na atmosfera que esses gradientes representam. O Quadro 4.1 contém o sinal dos gradientes e a respectiva condição de estabilidade da atmosfera.

Quadro 4.1 – Gradiente vertical das temperaturas potencial, potencial equivalente, potencial equivalente de saturação e a respectiva condição de estabilidade da atmosfera.

$\partial\theta/\partial z > 0$	Estável	$\partial\theta_e/\partial z > 0$	Convectivamente Estável	$\partial\theta_{es}/\partial z > 0$	Condicionamente Estável
$\partial\theta/\partial z = 0$	Neutra	$\partial\theta_e/\partial z = 0$	Convectivamente Neutra	$\partial\theta_{es}/\partial z = 0$	Neutra
$\partial\theta/\partial z < 0$	Instável	$\partial\theta_e/\partial z < 0$	Convectivamente Instável	$\partial\theta_{es}/\partial z < 0$	Condicionamente Instável

O surgimento dos diagramas termodinâmicos possibilitou o desenvolvimento de outros métodos para analisar a estabilidade da atmosfera. Desde a década de 1950 vários índices de estabilidade tem sido introduzidos e amplamente utilizados na previsão de tempestades e tempo severo. Esses índices constituem parâmetros da instabilidade atmosférica uma vez que as tempestades geralmente estão associadas a convecção intensa. De acordo com Fragozo (1998), a maioria dos índices de estabilidade é obtida a partir de sondagens de ar superior e seus limites críticos, em geral, foram determinados para uma região específica. Conseqüentemente, para utilizá-los em outra área é necessário, às vezes, adotar outros limiares. A estabilidade da atmosfera pode ser inferida através de índices que levam em consideração a diferença das condições de temperatura e/ou umidade entre dois ou mais níveis isobáricos, índices que associam essas diferenças de temperatura e/ou umidade com as características do vento na

troposfera, e índices que se baseiam na determinação da quantidade de energia necessária ao desenvolvimento de convecção.

(a) Índice de Levantamento

O Índice de Levantamento (LI) é calculado pela diferença entre a temperatura do ambiente observada no nível de 500 hPa e a temperatura na qual uma parcela ascende adiabaticamente seca até o nível de convecção espontânea (NCE) e, em seguida, ascende adiabaticamente úmida até o nível de 500 hPa. Algebricamente, o LI pode ser determinado por:

$$LI = T(500 \text{ hPa}) - TP(500 \text{ hPa}) \quad (1)$$

em que $T(500 \text{ hPa})$ é a temperatura do ar no nível de 500 hPa e $TP(500 \text{ hPa})$ é a temperatura que uma parcela de ar teria no nível de 500 hPa, caso ascendesse adiabaticamente seca da superfície até o NCE e, a partir desse nível, ascendesse adiabaticamente úmida até o nível de 500 hPa. Quanto mais instável o ambiente, mais negativo será o índice (FRAGOSO, 1998). O Quadro 4.2 a seguir indica os valores de LI e a respectiva condição de estabilidade atmosférica associada.

Quadro 4.2 – Valores do índice de levantamento (LI) e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)

LI (°C)	Condição de Tempestade
0 a -2	Tempestade possível, forte mecanismo de disparo é necessário.
-3 a -5	Instável, tempestade provável
Menor que -5	Muito instável, potencial para tempestade muito forte

(b) Índice de Showalter

O Índice de Showalter (SI) tem definição similar a do LI; o que muda no seu cálculo é que, em lugar da parcela ascender adiabaticamente seca da superfície até o NCE, ela ascende adiabaticamente seca a partir do nível de 850 hPa até atingir a saturação e, em seguida, ascende por um processo adiabático úmido até o nível de 500 hPa. O SI é calculado por:

$$SI = T(500 \text{ hPa}) - TP'(500 \text{ hPa}) \quad (2)$$

em que $T(500 \text{ hPa})$ é a temperatura do ar em 500 hPa e $TP'(500 \text{ hPa})$ é a temperatura que uma parcela de ar teria caso ascendesse adiabaticamente seca do nível de 850 hPa até atingir a saturação e, a partir daí, seguisse por um processo adiabático úmido até o nível de 500 hPa (FRAGOSO, 1998). O Quadro 4.3 fornece a condição de instabilidade atmosférica conforme os valores do IS.

Quadro 4.3 – Valores do índice de Showalter (SI) e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)

SI (°C)	Condição de Tempestade
3 a 1	Possível tempestade- Forte mecanismo de disparo é necessário
0 a -3	Instável, tempestade provável
-4 a -6	Muito instável, forte potencial para tempestade
Menor que -6	Extremamente instável, forte potencial para tempestade severa

(c) Índice Total Totals

O índice Total Totals (TT) é outro índice de tempo severo. O TT é calculado através das temperaturas do ar no nível de 850 e 500 hPa, e da temperatura do ponto de orvalho no nível de 850 hPa (NASCIMENTO, 2005). O seu cálculo bastante simples faz com que o TT seja amplamente utilizado nos centros de previsão. Segundo Nascimento (2005), não é adequado fazer uma análise isolada do TT na previsão convectiva uma vez que uma taxa de variação vertical de temperatura elevada nos níveis médios pode resultar num valor alto do TT, mesmo sem o suporte de umidade na baixa troposfera. Além disso, o TT é um índice relativamente limitado já que contempla apenas dois níveis isobáricos no seu cálculo. O índice TT pode ser algebricamente determinado por:

$$TT = T(850 \text{ hPa}) + Td(850 \text{ hPa}) - 2T(500 \text{ hPa}) \quad (3)$$

em que $T(850 \text{ hPa})$ e $Td(850 \text{ hPa})$ são a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho no nível isobárico de 850 hPa, respectivamente, e $T(500 \text{ hPa})$ é a temperatura do ar no nível isobárico de 500 hPa. O Quadro 4.4 indica os valores de TT e a respectiva condição de tempestade associada.

Quadro 4.4 – Valores do índice TT e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: SILVA, 2011a)

TT (°C)	Condição de Tempestade
Menor que 43	Improvável
43 a 44	Tempestades isoladas
45 a 46	Tempestades dispersas
47 a 48	Tempestades severas dispersas e isoladas
49 a 50	Tempestades dispersas e tornados isolados
51 a 52	Tempestades dispersas numerosas e tornados isolados
53 a 55	Tempestades numerosas e tornados dispersos
Maior que 56	Tornados

(d) Índice K

Esse índice consiste de uma combinação da diferença de temperatura entre os níveis de 850 e 500 hPa, a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa, e a depressão do ponto de orvalho em 700 hPa, que é uma medida do teor de umidade (KUNZ *et al.*, 2009). O principal objetivo na sua formulação é prever chuvas convectivas e tempestades elétricas. Algebricamente, o índice K pode ser determinado através de:

$$K = [T(850 \text{ hPa}) - T(500 \text{ hPa})] + Td(850 \text{ hPa}) - [T(700 \text{ hPa}) - Td(700 \text{ hPa})] \quad (4)$$

em que os símbolos seguem os critérios usados na equação anterior.

O Quadro 4.5 indica os valores que o índice K pode assumir e a condição de tempestade associada.

Quadro 4.5 – Valores do índice K e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: AWS, 1979)

K (°C)	Condição de Tempestade
< 20	Sem tempestades
20 a 25	Tempestades isoladas
26 a 30	Tempestades muito dispersas
31 a 35	Tempestades dispersas
> 35	Tempestades numerosas

(e) Índice SWEAT

O índice SWEAT (*Severe Weather Threat*) combina parâmetros importantes como indicadores do potencial de tempestades severas. Os cinco parâmetros descrevem a estabilidade da coluna atmosférica, o jato de baixos níveis, o jato de níveis médios e o cisalhamento direcional entre o vento dos níveis baixos e médios. Entretanto, tal formulação é válida apenas para o hemisfério norte devido aos termos que envolvem o vento. Nascimento (2005) apresenta a seguinte equação considerando as definições e adaptações desse índice para o hemisfério sul:

$$\text{SWEAT} = 20 (TT - 49) + 12 Td(850 \text{ hPa}) + 2 V(850 \text{ hPa}) + V(500 \text{ hPa}) + 125[\text{sen}|\text{diffdir}| + 0,2] \quad (5)$$

na qual TT é o índice Total Totals, Td(850 hPa) é a temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa, V(850 hPa) e V(500 hPa) são a velocidade do vento em nós para os níveis isobáricos de 850 e 500 hPa, respectivamente, e |diffdir| é o valor absoluto da diferença entre as direções do vento (em graus) entre 500 hPa e 850 hPa (|diffdir| = |[direção(500 hPa) - direção(850 hPa)]|).

Se o índice TT for menor do que 49 este termo deve ser igualado a zero. Se Td(850 hPa) for menor do que zero, este termo também deve ser igualado a zero. O último termo da equação deve ser desprezado caso pelo menos uma das condições abaixo não seja satisfeita: (i) a direção do vento em 850 hPa deve estar entre 290° e 360° ou entre 0° e 50°; (ii) a direção do vento em 500 hPa deve estar entre 230° e 330°; (iii) diffdir deve ser negativo, com a consideração importante de que caso a direção do vento em 850 hPa esteja entre 0° e 50°, é necessário somar 360 ao valor da direção em 850 hPa antes de calcular diffdir; (iv) tanto V(850 hPa) quanto V(500 hPa) devem ser pelo menos 15 nós. Destas quatro condições, apenas a (iv) é mantida igual a do hemisfério norte.

(f) Índice CAPE

O índice CAPE (*Convective Available Potential Energy*), como o próprio nome diz, é uma medida da quantidade de energia disponível no ambiente para a convecção e, por isso, também é um índice que mede a estabilidade da atmosfera. O CAPE é um indicador do potencial para convecção profunda (processo de ascensão até a alta troposfera de uma parcela de ar aquecida pela superfície) e intensidade convectiva. Ele fornece uma medida da estabilidade integrada na extensão da sondagem, ao contrário de outros índices que utilizam informações de alguns níveis apenas. O CAPE pode ser obtido por (KUNZ *et al.*, 2009):

$$\text{CAPE} = g \int_{Z(\text{NCE})}^{Z(\text{NE})} \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz \quad (6)$$

em que g é a aceleração da gravidade, $T_v = (T + 0,61q)$ e $T_{vp} = (T_p + 0,61q)$ são as temperaturas virtuais do ambiente e de uma parcela de ar que ascende adiabaticamente na atmosfera, respectivamente. O CAPE é a energia que resulta da integração entre o nível de convecção espontânea (NCE) e o nível de equilíbrio (NE) ou nível de perda de empuxo ($T_v = T_{vp}$). O Quadro 4.6 indica os valores do CAPE e a respectiva condição de estabilidade atmosférica.

Quadro 4.6 – Valores do CAPE e a respectiva condição de estabilidade da atmosfera. (Fonte: DINIZ *et al.*, 2004)

CAPE (J kg ⁻¹)	Condição de Estabilidade
500 a 1000	Convecção fraca
1001 a 2500	Convecção moderada
Acima de 2500	Convecção forte

(g) Índice CINE

O índice CINE (*Convective Inhibition Energy*) é definido de forma análoga ao CAPE, porém os limites de integração são a superfície e o NCE. 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 a CINE menor é a probabilidade de ocorrência de tempestades (NASCIMENTO, 2005). O CINE pode ser obtido por:

$$\text{CINE} = g \int_{Z(\text{sup.})}^{Z(\text{NCE})} \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz \quad (7)$$

na qual T_{vp} e T_v já foram descritos anteriormente.

(i) Índice Delta Teta-E

Outro índice de estabilidade utilizado é o Delta Teta-E (DTeI) (ATKINS e WAKIMOTO, 1991). Esse índice é baseado no gradiente da temperatura potencial equivalente entre a superfície e a média troposfera. Ele pode ser obtido através de:

$$\text{DTeI} = \theta_{e\text{MÁX}} - \theta_{e\text{MIN}} \quad (8)$$

em que $\theta_{eMÁX}$ é a temperatura potencial equivalente máxima, obtida próximo à superfície, e $\theta_{eMÍN}$ é a temperatura potencial equivalente mínima, geralmente encontrada entre os níveis de 650 e 500 hPa, ou seja, nos níveis médios.

(j) Índice de Instabilidade Potencial

Esse índice é calculado pela diferença da temperatura potencial equivalente do nível de 925 hPa e a do nível de 500 hPa dividida pela diferença entre as alturas dos níveis de 500 e 925 hPa (VAN DELDEN, 2001). O Índice de Instabilidade Potencial (PII) é obtido por:

$$PII = (\theta_{e925} - \theta_{e500}) / (Z_{500} - Z_{925}) \quad (9)$$

(k) Índice KO

O índice KO pode ser obtido conforme a equação abaixo modificada de DWD (2013), com a substituição de θ_{e1000} por θ_{e970} , o nível mais próximo da superfície em Petrolina:

$$KO = 0,5(\theta_{e700} + \theta_{e500} - \theta_{e970} - \theta_{e850}) \quad (10)$$

na qual θ_{e500} , θ_{e700} , θ_{e850} , θ_{e970} são a temperatura potencial equivalente no nível de 500, 700, 850 e 970 hPa, respectivamente. As condições de tempestades atribuídas ao índice KO são apresentadas no Quadro 4.7 a seguir.

Quadro 4.7 – Valores do índice KO e a respectiva condição de tempestade associada. (Fonte: DWD, 2013)

KO (K)	Condição de tempestade
$KO > 6$	Sem tempestades
$6 \geq KO > 2$	Tempestades elétricas isoladas
$KO \leq 2$	Tempestades numerosas

Neste trabalho os índices de estabilidade são calculados das sondagens diárias para análise de sua evolução temporal e de seu potencial para previsão através de técnicas da análise multivariada discutidas a seguir.

4.2.3 Análise multivariada

A Análise Fatorial (AF) de Componentes Principais (ACP) é um tipo de análise multivariada que consiste em reduzir o número de variáveis de uma base de dados, a partir da identificação do padrão de correlações ou de covariância entre elas, gerando um conjunto mais restrito de variáveis denominadas fatores. A obtenção desses fatores, que são combinações lineares das variáveis originais, pode ser feita através da ACP (HAIR *et al.*, 2005). O principal objetivo da ACP é reduzir o número de variáveis de um conjunto de dados sem que haja perda significativa das informações contidas nos mesmos. Desse modo, as Componentes Principais (CP's) são combinações lineares das variáveis originais e são obtidas em ordem decrescente de importância.

O primeiro passo da ACP é dado com o cálculo dos autovalores e autovetores correspondentes de uma matriz de variância-covariância [**S**] ou uma matriz de correlação entre variáveis. Neste trabalho a ACP é realizada através de uma matriz de correlações. Assim, o teste de esfericidade de *Bartlett* é aplicado para verificar se existe correlação entre as variáveis. Também é aplicado o teste de *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO), para verificar se há adequação dos dados para a realização da ACP. O KMO deve apresentar valores no intervalo de 0,5 a 1 para que a realização da ACP seja viável (HAIR *et al.*, 2005).

A ACP consiste em projetar uma nuvem de indivíduos situados em um espaço afim de dimensão p , em um subespaço afim de dimensão q , de tal forma que sua projeção sofra a menor deformação possível. As CP's ou fatores, fornecem imagens aproximadas dessa nuvem de pontos e a ACP propõe-se a medir a qualidade dessa aproximação. Esse tipo de análise envolve a rotação das componentes principais. O objetivo da rotação dos fatores é aumentar o poder explicativo dos mesmos. Os eixos podem ser girados sem alterar a distância entre os pontos. Todavia, as coordenadas dos pontos em relação aos eixos são alteradas, ou seja, as cargas fatoriais (relação entre fator e variável) são alteradas na rotação. A rotação não altera o total de variância obtida na etapa anterior; o que ocorre é um rearranjo dos autovetores. Neste trabalho é utilizada a rotação ortogonal dos eixos fatoriais via *Varimax*, que possibilita uma melhor distribuição das variáveis em relação aos fatores, para facilitar a sua interpretação.

O critério de *Kaiser*, que considera como mais significativos autovalores maiores que 1, é utilizado para auxiliar na escolha do número de fatores a serem retidos. Entretanto, quando a matriz de dados apresenta um número elevado de variáveis, esse método tende a elevar o número de fatores retidos. Desse modo, o método do *Scree Plot* é utilizado para fazer uma análise gráfica comparativa com o método de *Kaiser*, e assim determinar o número de fatores

a serem analisados. O método do *Scree Plot* é baseado em um gráfico constituído com valores dos autovalores versus seu número. O número de fatores a serem retidos corresponde ao ponto a partir do qual os autovalores são pequenos e têm valores aproximadamente iguais. Ressalta-se que um fator associado a um autovalor pequeno (próximo de zero) terá uma importância pequena, mas indica alguma dependência linear nos dados. A descrição da técnica da ACP aplicada no modo P (RICHMAN, 1986) a uma determinada matriz é apresentada a seguir.

Seja $[X]$ uma matriz de dados de dimensão $(m \times n)$ na qual m representa os dias de um determinado mês, e n as variáveis meteorológicas das quais se deseja extrair as CP's. Os elementos da matriz $[X]$ são normalizados com a média zero e a variância igual a um. A normalização dos desvios garante que cada dia de observação dentro do mês estudado tenha a mesma importância na determinação dos padrões temporais.

A matriz de correlação $[R]$ é obtida a partir da matriz $[X]$ das variáveis padronizadas e de sua transposta $[X]^T$, sendo dada por:

$$[R] = \frac{1}{n} [X]^T [X] \quad (11)$$

A partir da matriz de correlações $[R]$ determina-se os autovalores λ e autovetores associados a essa matriz.

Os autovalores de $[R]$ são as raízes de seu polinômio característico. Eles são obtidos pela seguinte expressão:

$$[R] - \lambda[I] = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\det([R] - \lambda[I]) = \mathbf{0} \quad (13)$$

Já os autovetores da matriz $[R]$ são n escalares de um vetor não nulo $[E]$ de dimensão $(n \times 1)$ que satisfaz a relação:

$$[R][E] = \lambda[E] \quad (14)$$

$$([R] - \lambda[I]) \cdot [E] = [\mathbf{0}] \quad (15)$$

Como a matriz $[R]$ é simétrica, os autovalores e autovetores a ela associados são ortogonais, ou seja:

$$[\mathbf{E}]^T [\mathbf{E}] = [\mathbf{I}] \quad (16)$$

A soma dos autovalores define a variância total dos dados. A variância explicada por cada fator é calculada pela razão entre o autovalor e a soma dos autovalores. Pode-se obter uma nova matriz de dados a partir da combinação linear entre a matriz dos dados originais normalizados e a matriz transposta dos autovalores $[\mathbf{E}]^T$. Os elementos dessa nova matriz serão as CP's, sendo dada por:

$$[\mathbf{C}] = [\mathbf{E}]^T [\mathbf{X}] \quad (17)$$

As CP's são calculadas de modo que a primeira CP (\mathbf{C}_1) tenha variância máxima. A segunda componente \mathbf{C}_2 também é calculada visando maximizar sua variância, e assim por diante. Assim, a variância de $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n$ decresce e frequentemente grande parte da variância dos dados é explicada por um número reduzido de componentes. Assim, as CP's que não retêm uma variância significativa podem ser descartadas sem haver perda significativa das informações contidas na matriz $[\mathbf{X}]$.

Outro método de análise multivariada é a Análise de Agrupamentos (AA). O objetivo da AA é agrupar indivíduos em um número restrito de classes, de modo que os indivíduos pertencentes a cada classe sejam semelhantes em algum aspecto que é diferente das demais classes. Essas classes são obtidas por meio de algoritmos formalizados e não por métodos subjetivos ou visuais. Em síntese, esta técnica evidencia os grupos homogêneos e heterogêneos em uma população. Na obtenção do agrupamento se destacam dois métodos de classificação: hierárquicos e não hierárquicos.

Nos métodos hierárquicos o número de classes não é fornecido inicialmente, ou seja, eles geram o número de classes. Nos métodos não hierárquicos o número de classes K é determinado *a priori*. O principal inconveniente desse método é que a partição final depende do ponto de partida, de modo que é necessário efetuar várias classificações mudando o ponto de partida inicial. A partição escolhida pelo analista constitui os K centros de aglomerações. O ponto de partida desses algoritmos não hierárquicos pode ser determinado de diferentes maneiras como, por exemplo: triagem aleatória, cálculo dos indivíduos mais próximos, cálculo dos indivíduos mais distantes, e análise baseada no conhecimento dos dados. Em contrapartida, a aglomeração hierárquica se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura em forma de árvore. Nos métodos hierárquicos os grupos geralmente são representados por um gráfico denominado de dendrograma. Através dele, do conhecimento prévio a respeito dos

dados e da curva de inércia é escolhida uma distância de corte para definir quais grupos serão formados. Essa decisão é subjetiva e deve ser feita de acordo com o objetivo da análise e o número de grupos desejados.

O critério de agrupamento utilizado foi o método aglomerativo hierárquico denominado Método de Ward que é dado pela Equação (18) abaixo. O método de Ward propõe que, em qualquer fase da análise, a perda de informação que resulta do agrupamento de elementos entre grupos é medida pela soma dos quadrados dos desvios (SQD) de cada ponto em relação à média do grupo ao qual pertence (EVERITT, 1993). Assim, para n observações ordenadas em um número de classes K , o SQD é dado pela seguinte expressão:

$$SQD = \sum_{i=1}^n \left[x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum x_i \right)^2 \right] \quad (18)$$

em que x_i é a observação pertencente a i -ésima classe.

O método da distância euclidiana quadrática é utilizado para medir a similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos de acordo com a seguinte expressão:

$$d_{ij} = \left[\sum_{q=1}^p (x_{iq} - x_{jq})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

na qual q são as variáveis ($q = 1, 2, 3, \dots, p$), x_{iq} é a q -ésima característica da i -ésima observação e x_{jq} é a q -ésima característica da j -ésima observação.

Neste trabalho a ACP é aplicada aos dados das sondagens de ar superior realizadas diariamente às 12 UTC na estação de altitude de Petrolina e a índices de estabilidade obtidos a partir das sondagens. As variáveis nos níveis isobáricos padrões de 925, 850, 500 e 200 hPa são analisadas de forma independente, usando uma matriz para cada nível isobárico, constituída pelas seguintes variáveis: temperatura do ar (T), temperatura do ponto de orvalho (Td), umidade relativa (Ur), razão de mistura (r), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}) e as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Os fatores obtidos através da ACP formam a base de dados para a aplicação da AA. A aplicação da ACP e da AA à matriz constituída pelos índices de estabilidade é feita de forma semelhante ao processo descrito anteriormente.

4.2.4 Análise sinótico-dinâmica e termodinâmica

O diagnóstico do ambiente sinótico no evento extremo de chuva em Petrolina foi realizado através da análise de campos meteorológicos em níveis isobáricos padrões, usando dados de reanálises R-2 do *NCEP-DOE* (KANAMITSU *et al.*, 2002). O desenvolvimento da nebulosidade associada aos sistemas meteorológicos que causaram um episódio de chuva intensa em Petrolina foi diagnosticado através de imagens realçadas do satélite GOES disponibilizadas na página eletrônica do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), e das componentes e intensidade do vento foram obtidos das sondagens de ar superior visando analisar a estabilidade e o cisalhamento do vento ao longo da vertical em Petrolina. As variáveis θ , θ_e e θ_{es} foram calculadas segundo as equações propostas por Bolton (1980) apresentadas a seguir.

$$\theta = T_K \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1-0,28 \times 10^{-3}r)} \quad (20)$$

$$\theta_e = \theta \exp \left(2,675 \frac{r}{T_L} \right) \quad (21)$$

$$\theta_{es} = \theta \exp \left(2,675 \frac{r_s}{T_k} \right) \quad (22)$$

nas quais: r é a razão de mistura (g kg^{-1}), r_s é a razão de mistura à saturação (g kg^{-1}), T_k é a temperatura (K), T_L é a temperatura no nível de condensação por levantamento (K) dada por:

$$T_L = 55,0 + \frac{1}{\frac{1}{T_k - 55} - \frac{\ln \left(\frac{UR}{100} \right)}{2840}} \quad (23)$$

em que **UR** é a umidade relativa em porcentagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados discutidos neste capítulo enfocam o evento extremo de chuva ocorrido no dia 8 de abril de 2014 em Petrolina detalhando aspectos do ambiente em escala sinótica e mesoescala no dia do evento e nos dias anterior e posterior. O evento também é analisado no contexto da variação diária e/ou horária, ao longo do mês, de elementos meteorológicos obtidos de observações realizadas em superfície e ar superior nessa área do semiárido nordestino, utilizando métodos de análise multivariada, entre outros.

5.1 Análise do ambiente em escala sinótica e mesoescala

5.1.1 Análise da nebulosidade e de condições atmosféricas em superfície

A relação entre o vento à superfície e a chuva na área de Petrolina no decorrer do mês, juntamente com a evolução da nebulosidade no evento extremo, são os principais aspectos considerados no conjunto de análises desta subseção.

O mês de abril de 2014 apresenta chuva em 6 dos 30 dias (Figura 5.1), com total mensal de 178 mm, valor que supera em cerca de 90% a média climatológica de Petrolina (93,6 mm) ilustrada na Figura 4.2. As chuvas têm início no dia 7, com um acumulado de 27,6 mm. No dia 8 um sistema convectivo multicelular (SCm) atinge a área provocando 114,6 mm de chuva (Figura 5.2), valor que excede em 21 mm a média climatológica de abril em Petrolina. O total pluviométrico desse dia corresponde a 64% do valor acumulado no mês, e a 122% da média climatológica de abril. Nos dias 10, 11 e 12 os totais pluviométricos são baixos, totalizando 20,4 mm nos três dias (Figura 5.1). No intervalo entre os dias 13 e 26 e entre 28 e 30 não são registradas chuvas. No dia 27 o total pluviométrico diário é de 15,6 mm.

A precipitação horária e acumulada observada na mesma estação entre as 00 UTC do dia 7 e as 00 UTC do dia 9 de abril é ilustrada na Figura 5.2. No intervalo entre as 00 UTC do dia 7 e as 04 UTC do dia 8 a chuva acumulada é de 28 mm. No dia 8, no período entre as 04 UTC e as 11 UTC, o SCm provoca 114,6 mm de chuva em Petrolina. A chuva cessa entre as 11 e as 12 UTC. A precipitação acumulada é de 142 mm no intervalo de tempo ilustrado na Figura 5.2.

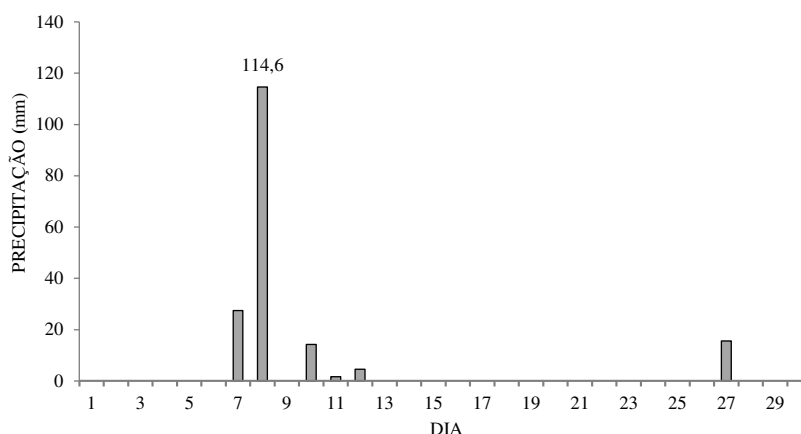


Figura 5.1 – Totais diários da precipitação (mm) registrada na estação automática de Petrolina no mês de abril de 2014. (Fonte dos dados: INMET, 2014)

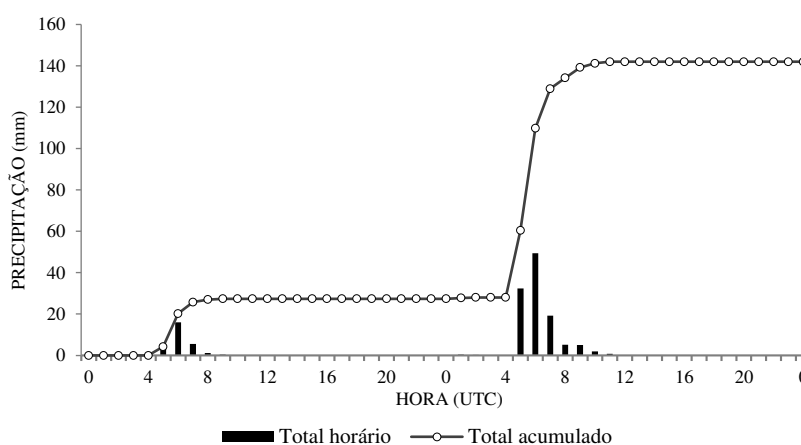


Figura 5.2 – Totais horários e acumulados da precipitação (mm) registrada na estação automática de Petrolina entre as 0 UTC do dia 7 e as 0 UTC do dia 9 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)

A variabilidade da média diária das componentes zonal e meridional e da intensidade do vento na estação automática de Petrolina também foi analisada (Figura 5.3). Ao longo do mês predominam ventos do quadrante sudeste. O vento tem maior intensidade do dia 1 ao dia 6, do dia 12 ao dia 24 e do dia 28 ao dia 30, dias com ausência de chuva na área de Petrolina, à exceção do dia 12 (Figura 5.1). O vento tem intensidade de fraca a muito fraca entre os dias 7 e 11 e entre os dias 25 e 27. Nesses cinco primeiros dias a direção do vento varia entre os quadrantes sudeste, sudoeste, nordeste e sudeste, e é de leste no quinto (dia 11). Nos três outros dias o vento é do quadrante sudeste. Além disso, o gráfico indica que há um decréscimo sistemático na intensidade do vento antes das chuvas da primeira quinzena do mês, e da chuva registrada no dia 27. A comparação entre os gráficos das Figuras 5.1 e 5.3 indica uma estreita ligação entre precipitação e vento à superfície com intensidade fraca e direção variável. Silva

Aragão *et al.* (2007) também observaram essa mesma relação para janeiro de 1985, mês extremo chuvoso na área de Petrolina.

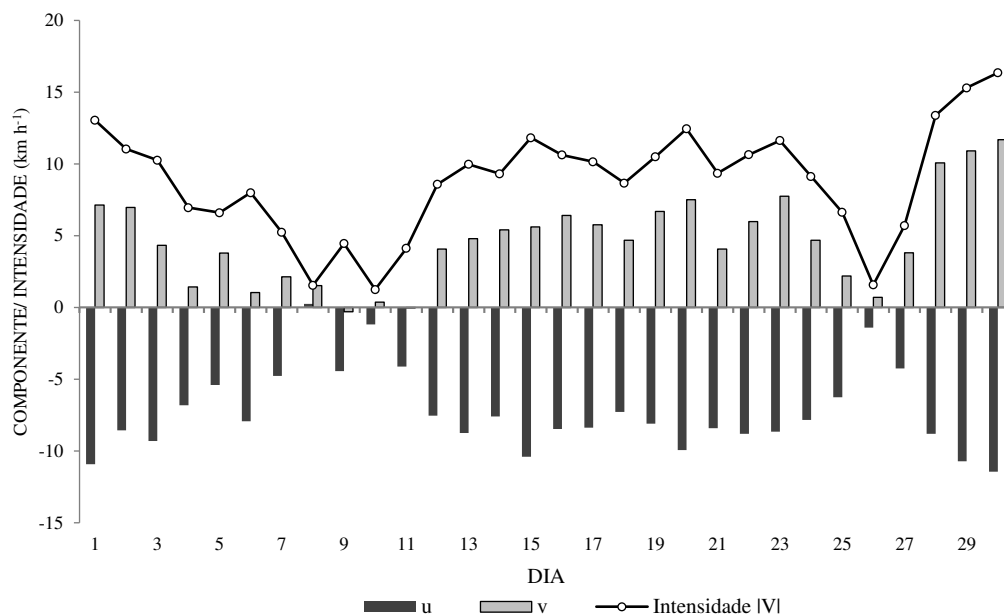


Figura 5.3 – Médias diárias da componente zonal (u), componente meridional (v) e da intensidade do vento (|V|) na estação automática de Petrolina no mês de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)

O comportamento horário das componentes zonal (u) e meridional (v) e da intensidade (|V|) do vento é ilustrado na Figura 5.4, no período de 00 UTC do dia 7 às 00 UTC do dia 9. No dia 7, entre as 00 UTC e as 03 UTC, o vento é do quadrante nordeste, com intensidade que varia de 5 a 10 km h⁻¹. No intervalo entre 04 UTC e 19 UTC do mesmo dia, o vento é do quadrante sudeste. Às 05 UTC, horário em que tem início o primeiro episódio de chuva em Petrolina, o vento tem intensidade máxima, atingindo velocidade em torno de 21 km h⁻¹. Duas horas depois, às 07 UTC, o vento está fraco, com velocidade em torno de 5,7 km h⁻¹. Nas treze horas posteriores o vento permanece de sudeste, com velocidade entre 6 e 12 km h⁻¹. No intervalo entre as 20 UTC do dia 7 e as 03 UTC do dia 8 a direção do vento varia entre os quadrantes sudoeste, sudeste e nordeste, com intensidade entre 0 (zero) e 16 km h⁻¹. Às 04 UTC do dia 8, horário em que começa a chover em Petrolina, a intensidade do vento passa a ser de 14 km h⁻¹ e o vento muda para o quadrante sudoeste. A partir de 05 UTC, o vento é fraco e sua direção varia entre os quadrantes sudeste, sudoeste e nordeste, até as 00 UTC do dia 9.

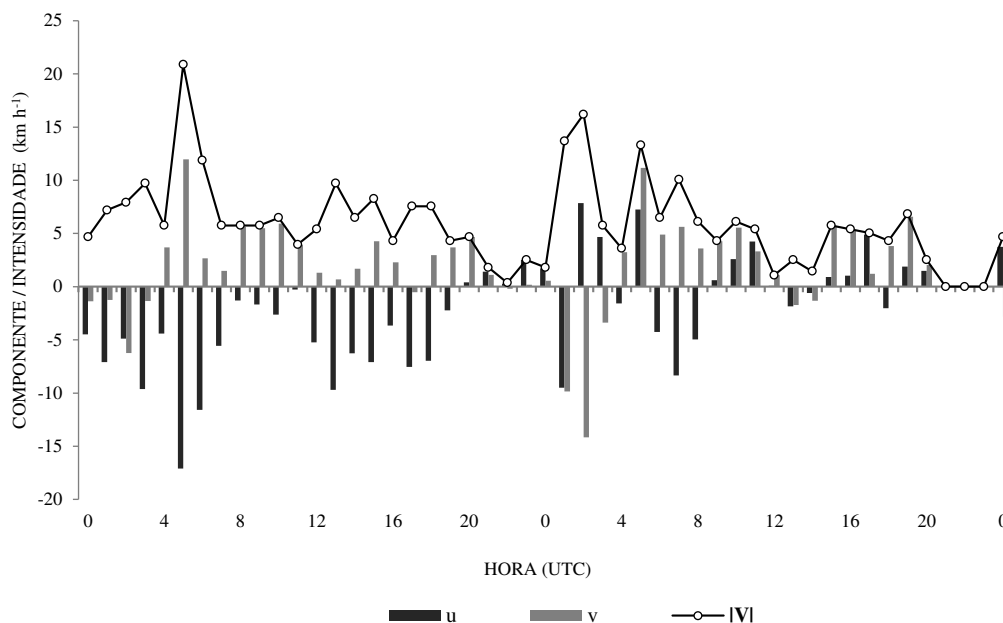


Figura 5.4 – Valores horários da componente zonal (u), componente meridional (v) e da intensidade do vento (|V|) na estação automática de Petrolina entre as 00 UTC do dia 7 e as 00 UTC do dia 9 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: INMET, 2014)

A formação, intensificação e dissipação do sistema convectivo multicelular (SCm) que atinge a região de Petrolina na madrugada do dia 8 de abril de 2014 são ilustradas pelas imagens setorizadas na Figura 5.5. Elas abrangem a Região Nordeste, parte dos estados limítrofes, e parte do Oceano Atlântico ao norte e a leste da região. A nebulosidade da ZCIT é vista sobre a área oceânica ao norte, em todas as imagens. O sistema convectivo em estudo começa a se formar às 00 UTC do dia 8, sobre o extremo nordeste da Bahia e oeste do Estado de Sergipe (Figura 5.5a). Às 03 UTC (Figura 5.5b) o sistema é evidente na forma de núcleos de convecção profunda alinhados no centro-leste da Região Nordeste. O SCm intensifica, se propaga para oeste e atinge a região de Petrolina entre 04 e 05 UTC (Figura 5.5c), apresentando nuvens convectivas profundas organizadas numa estrutura de aglomerado convectivo com temperaturas no topo da ordem de -60°C a -70°C . Na primeira hora de atuação do aglomerado convectivo chove 32,4 mm em Petrolina (Figura 5.2). O sistema continua intensificando e se deslocando para oeste, e na segunda hora (entre 05 e 06 UTC) o total precipitado é de 49,4 mm (Figura 5.2). Na terceira hora de atuação, o sistema continua sua propagação para oeste (Figura 5.5d,e) e provoca um volume de chuva de 19,2 mm (Figura 5.2). A partir das 07 UTC, apenas chuvas estratiformes são registradas (Figura 5.2). O SCm começa a perder intensidade após as 08 UTC. A imagem das 09 UTC (Figura 5.5f) ilustra essa condição devido a menor abrangência da área com temperatura do topo das nuvens no intervalo entre -60°C e -70°C .

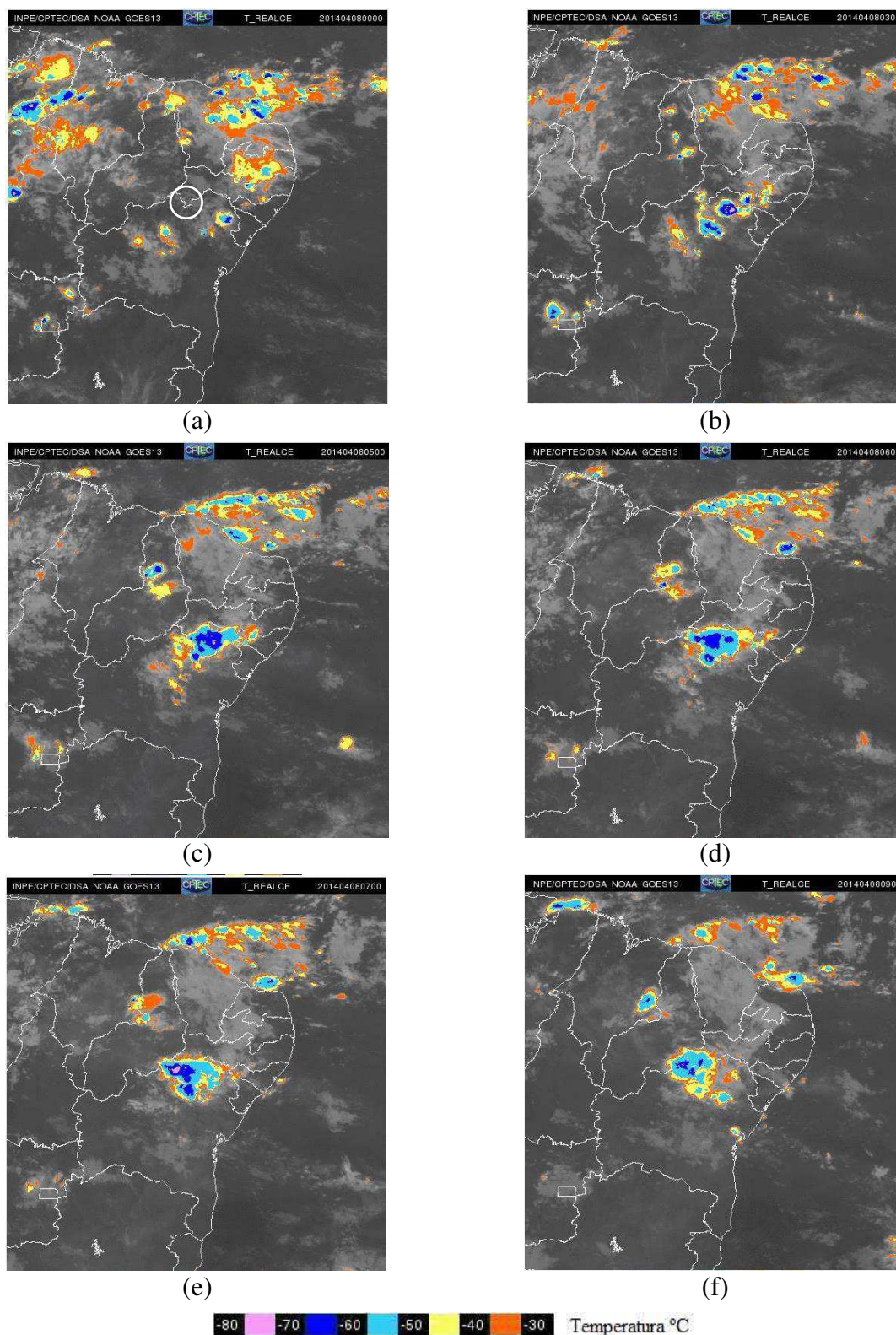


Figura 5.5 – Imagens setorizadas do satélite GOES-13 para a Região Nordeste e adjacências no dia 8 de abril de 2014 às: (a) 00:00 UTC, (b) 03:00 UTC, (c) 05:00 UTC, (d) 06:00 UTC, (e) 07:00 UTC e (f) 09:00 UTC. A circunferência branca na área central da imagem (a) está centrada (aproximadamente) em Petrolina. A escala de cores da temperatura do topo de nuvens é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: CPTEC/INPE, 2014)

5.1.2 Análise das condições atmosféricas em altitude

Variáveis meteorológicas selecionadas são analisadas nesta subseção com o objetivo de diagnosticar características atmosféricas em níveis de pressão constante e as condições de estabilidade no mês de estudo, com foco no evento extremo de precipitação.

As imagens realçadas da Figura 5.6 possibilitam identificar, além da ZCIT e do SCm, uma banda de nebulosidade frontal que se estende sobre o Oceano Atlântico, na faixa latitudinal da Região Sul e Região Sudeste. Também é possível visualizar atividade convectiva intensa sobre o Uruguai e o Estado do Rio Grande do Sul. A primeira imagem (Figura 5.6a), obtida em horário próximo das 06:00 UTC visto na Figura 5.5d, ilustra o SCm no período de máxima intensidade, enquanto que na segunda imagem, obtida às 11:45 UTC (Figura 5.6b), o SCm está em estágio avançado de dissipação.

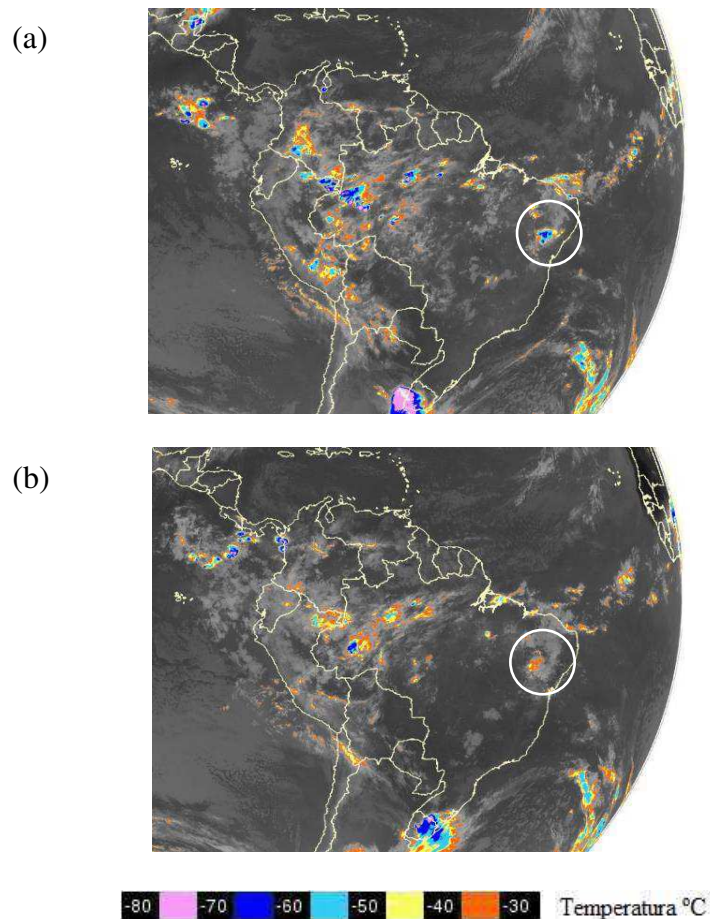


Figura 5.6 – Imagens realçadas do satélite GOES-13 para a região tropical da América do sul no dia 8 de abril de 2014 às: (a) 5:45 UTC e (b) 11:45 UTC. A circunferência branca destaca o sistema convectivo multicelular (SCm) na região de Petrolina. A escala de cores da temperatura do topo de nuvens é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: CPTEC/INPE, 2014)

O campo de pressão ao nível médio do mar para as 06 UTC do dia 8 é ilustrado na Figura 5.7. O cavado equatorial, compreendido entre as latitudes de 5° N e 15° S, é evidenciado pelas isóbaras de 1012 hPa na faixa equatorial. Um núcleo de 1010 hPa está localizado no norte da Região Nordeste, próximo a uma área de confluência no campo do vento nos níveis de 925 e 850 hPa (Figura 5.8a,b). A banda de nebulosidade frontal vista sobre o Atlântico Sul na Figura 5.6a está associada a um cavado nas isóbaras, que se estende sobre o oceano na direção noroeste-sudeste, até próximo do centro-norte da Região Sudeste (Figura 5.7). Um cavado invertido é visto sobre o oceano, a leste da Região Nordeste. Sua formação pode ter sido favorecida pelo avanço do SF para latitudes baixas. Outra consequência do avanço do SF é a posição da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), deslocada para leste da posição climatológica, com centro em torno de (33°S, 5°E).

O campo do vento nos níveis isobáricos de 925, 850, 500 e 200 hPa para as 6 UTC do dia 8 de abril é ilustrado na Figura 5.8. No nível de 925 hPa (Figura 5.8a) há confluência na área central da América do Sul e no Sudeste e Centro-oeste do Brasil. A confluência dos alísios é evidente no centro-norte e ao norte da Região Nordeste, área de atuação da ZCIT vista na imagem de satélite da Figura 5.6a. Na Figura 5.8a também é evidente a presença da circulação anticiclônica associada à Alta Subtropical do Atlântico Sul, com centro em (33°S, 0°W), e o cavado de latitudes médias (cavado frontal) que se estende na direção noroeste-sudeste de (50°S, 15°W) a (20°S, 50°W). A magnitude do vento é inferior a 25 km h⁻¹ na maior parte da Região Nordeste, do Centro-Oeste, e do Sudeste. No nível de 850 hPa (Figura 5.8b) a configuração é, em linhas gerais, semelhante àquela do nível de 925 hPa. No nível de 500 hPa (Figura 5.8c) o anticiclone (alta) da Bolívia está evidente, centrado em torno de (20°S, 60°W), a leste da posição climatológica. O cavado frontal, com eixo meridionalmente alinhado sobre o Atlântico Sul, se estende até a latitude de 10°S. No nível de 200 hPa (Figura 5.8d) o anticiclone da Bolívia também está evidente, posicionado sobre o centro da AS, enquanto que o cavado, com grande amplitude, se estende até o norte do litoral leste da Região Nordeste. Paralelamente, um núcleo de difluência domina o norte da região.

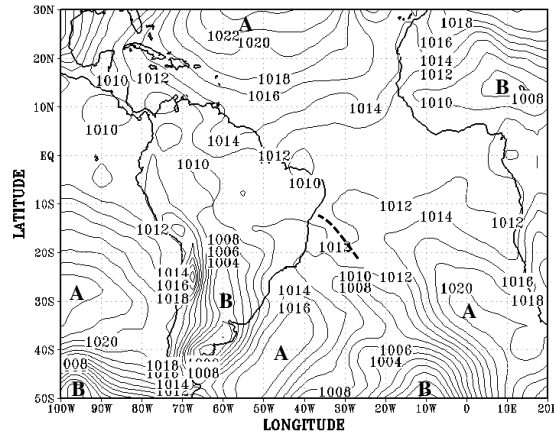


Figura 5.7 – Pressão reduzida ao nível médio do mar às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014. O intervalo de análise é de 2 hPa. Os centros de alta pressão são indicados pela letra **A** e os de baixa pressão pela letra **B**. A linha tracejada indica o eixo do cavado invertido a leste da Região Nordeste. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)

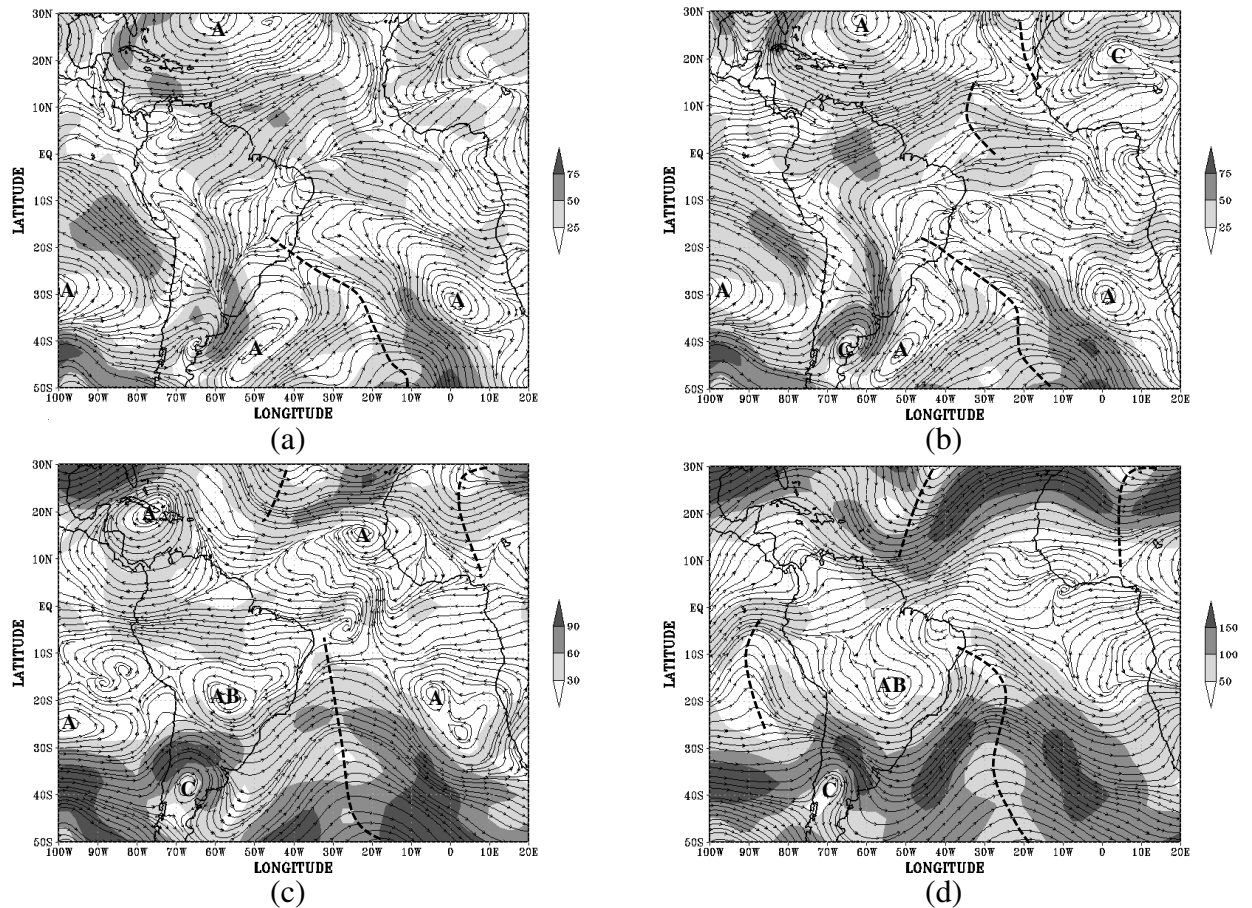


Figura 5.8 – Linhas de corrente e intensidade do vento (km h^{-1}) às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A escala de tons de cinza da intensidade do vento é apresentada ao lado dos mapas. O anticiclone da Bolívia é indicado pela sigla **AB**, outros centros anticiclônicos pela letra **A** e centros ciclônicos pela letra **C**. As linhas tracejadas indicam os eixos dos cavados. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)

A Figura 5.9 ilustra o campo da vorticidade relativa às 06 UTC do dia 8 nos níveis isobáricos padrões de 925, 850, 500 e 200 hPa. As áreas sombreadas têm vorticidade negativa, que está associada a circulação ciclônica no hemisfério sul e anticiclônica no hemisfério norte. No nível de 925 hPa (Figura 5.9a) há um núcleo de vorticidade ciclônica sobre o centro-leste da Região Nordeste, área de atuação do SCm. Outra área de vorticidade ciclônica é vista na área da ZCIT, ao norte-leste da região. O forte núcleo ciclônico associado ao cavado frontal também é evidente no mapa, se estendendo na direção noroeste-sudeste de (20°S, 50°W) na Região Sudeste a (40°S, 20°W) no Atlântico Sul. No nível de 850 hPa (Figura 5.9b) a configuração é semelhante àquela observada no nível de 925 hPa, exceto pela redução em área e magnitude do núcleo de vorticidade ciclônica na região de atuação do SCm. No nível de 500 hPa (Figura 5.9c) há um núcleo intenso de vorticidade anticiclônica na área central da AS, associado ao anticiclone da Bolívia. Também é evidente nesse nível o forte núcleo de vorticidade ciclônica que se estende até a latitude de 10°S associado ao cavado frontal visto na Figura 5.8c. Na área do SCm a vorticidade está em torno de $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. No nível de 200 hPa (Figura 5.9d) há vorticidade ciclônica em grande parte da AS, incluindo a área de atuação do SCm. Na área do cavado frontal situado sobre o Atlântico Sul e que se estende até o norte do litoral leste da Região Nordeste (Figura 5.8d), onde os valores de vorticidade ciclônica também são elevados (da ordem de $-30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). No sul da Região Nordeste há vorticidade anticiclônica.

O conteúdo de umidade na atmosfera para o mesmo dia e horário, 06 UTC do dia 08 de abril de 2014, também foi investigado através da análise do campo da umidade específica nos níveis isobáricos padrões de 850 hPa e 925 hPa (Figura 5.10). O teor de umidade é elevado na Região Nordeste: a umidade específica varia entre 14 e 16 g kg^{-1} no nível de 925 hPa (Figura 5.10a), e entre 10 e 12 g kg^{-1} no nível de 850 hPa (Figura 5.10b). Esses valores são comparáveis àqueles ilustrados na Figura 7 de Silva Aragão *et al.* (2007), cuja configuração também indica valores elevados do gradiente horizontal de umidade específica na Região Sudeste, uma característica que as autoras puderam associar a um episódio de ZCAS.

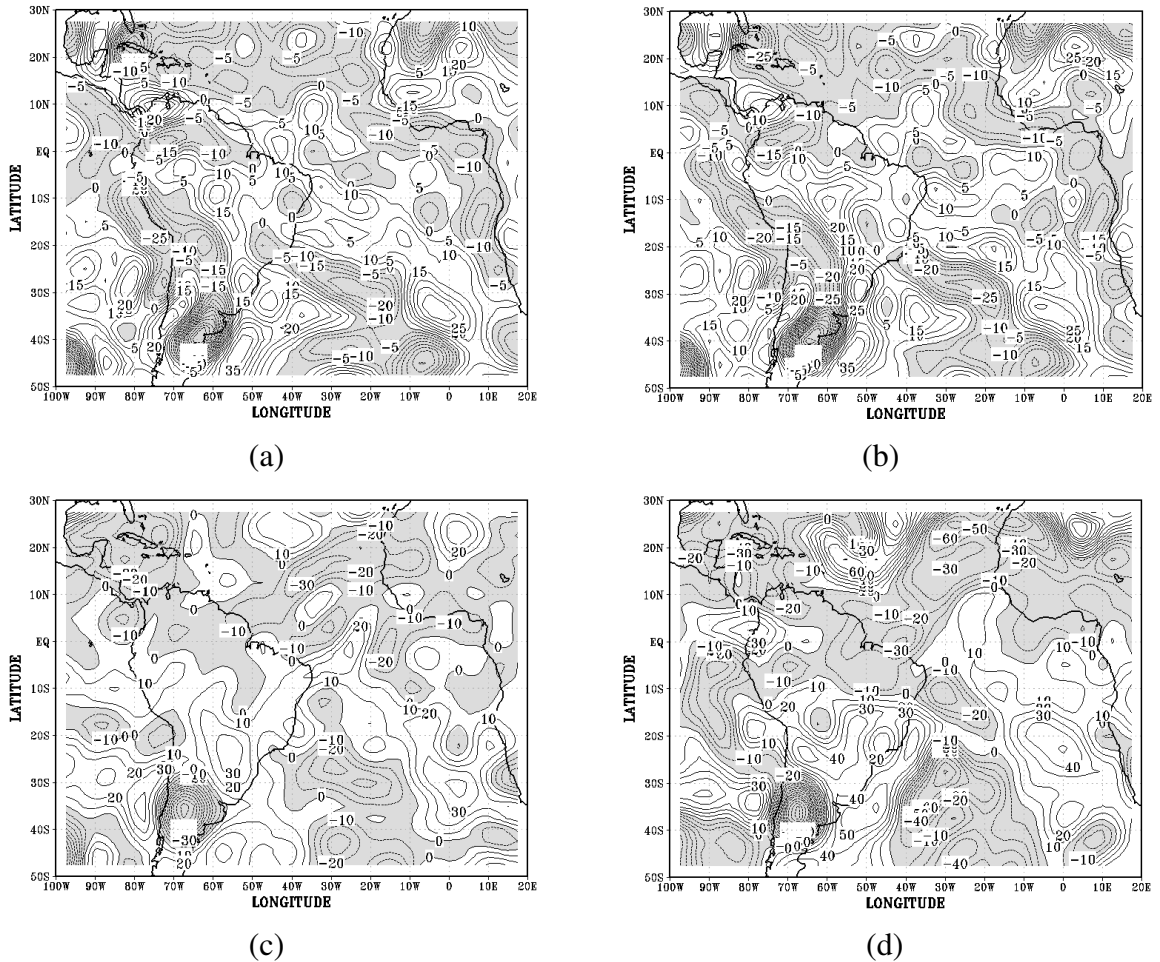


Figura 5.9 – Vorticidade relativa às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. O intervalo de análise é de $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ em (a) e (b), e de $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ em (c) e (d). As áreas com vorticidade negativa estão sombreadas. (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)

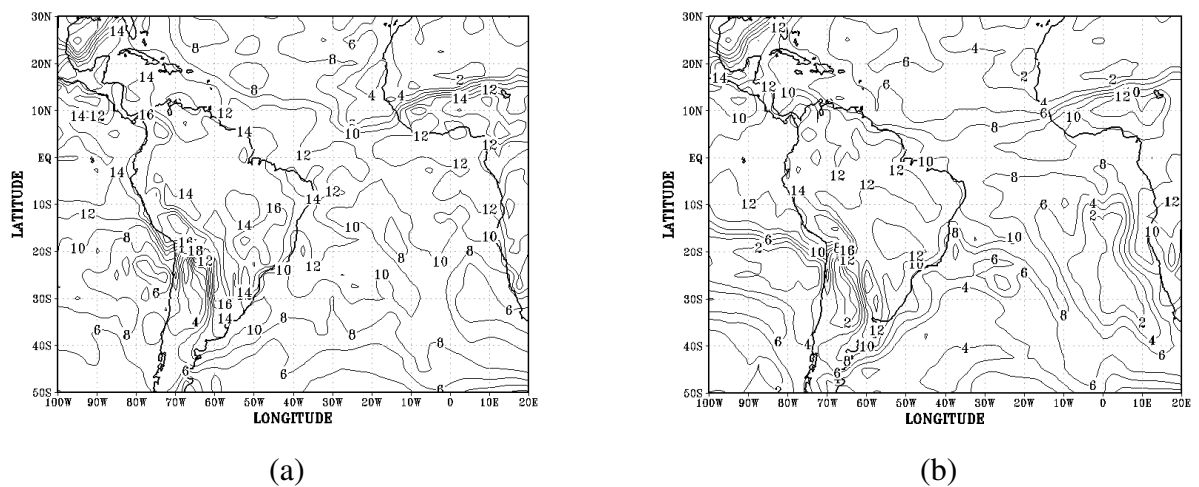


Figura 5.10 – Umidade específica às 06 UTC do dia 8 de abril de 2014 no nível de: (a) 925 hPa e (b) 850 hPa. O intervalo da análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: ERS/NOAA, 2014)

O campo do movimento vertical ao longo da vertical em 10°S (latitude próxima de Petrolina) foi outro aspecto analisado nesta subseção com o objetivo de diagnosticar condições dinâmicas favoráveis ao desenvolvimento de convecção na área de Petrolina. Na Figura 5.11 o campo do movimento vertical é ilustrado para todos os horários sinóticos entre as 12 UTC do dia 7 e as 18 UTC do dia 8 de abril de 2014. Às 12 UTC do dia 7 (Figura 5.11a) há movimento ascendente (fraco) na longitude de 40°W, próxima e a leste de Petrolina. Às 18 UTC do dia 7 (Figura 5.11b) um núcleo intenso de movimento ascendente ($\omega < 0$) é visto centrado ligeiramente a leste da longitude de 40°W. Às 00 UTC do dia 8 (Figura 5.11c), esse núcleo está deslocado para oeste, e o movimento é descendente ($\omega > 0$) na região de Petrolina, exceto próximo à superfície. Na área compreendida entre as longitudes de 30°W e 40°W, faixa longitudinal que coincide com aquela em que o SCm se formou no centro-leste da Região Nordeste, é evidente um núcleo de movimento ascendente ($\omega < 0$). Às 6 UTC (Figura 5.11d) o núcleo ascendente observado na Figura 5.11c está mais intenso e ligeiramente deslocado para oeste, centrado próximo da longitude de 40°W. Às 12 UTC (Figura 5.11e) o campo do movimento vertical mostra núcleos fracos, uma característica que contrasta com o horário anterior (Figura 5.11d). Nesse horário o SCm está em estágio avançado de dissipação conforme indicado pela imagem de satélite da Figura 5.6b. O movimento vertical está mais intenso às 18 UTC (Figura 5.11f); um núcleo de movimento ascendente ($\omega < 0$), que tem magnitude semelhante ao da Figura 5.11b, está centrado ligeiramente a oeste da longitude de 40°W.

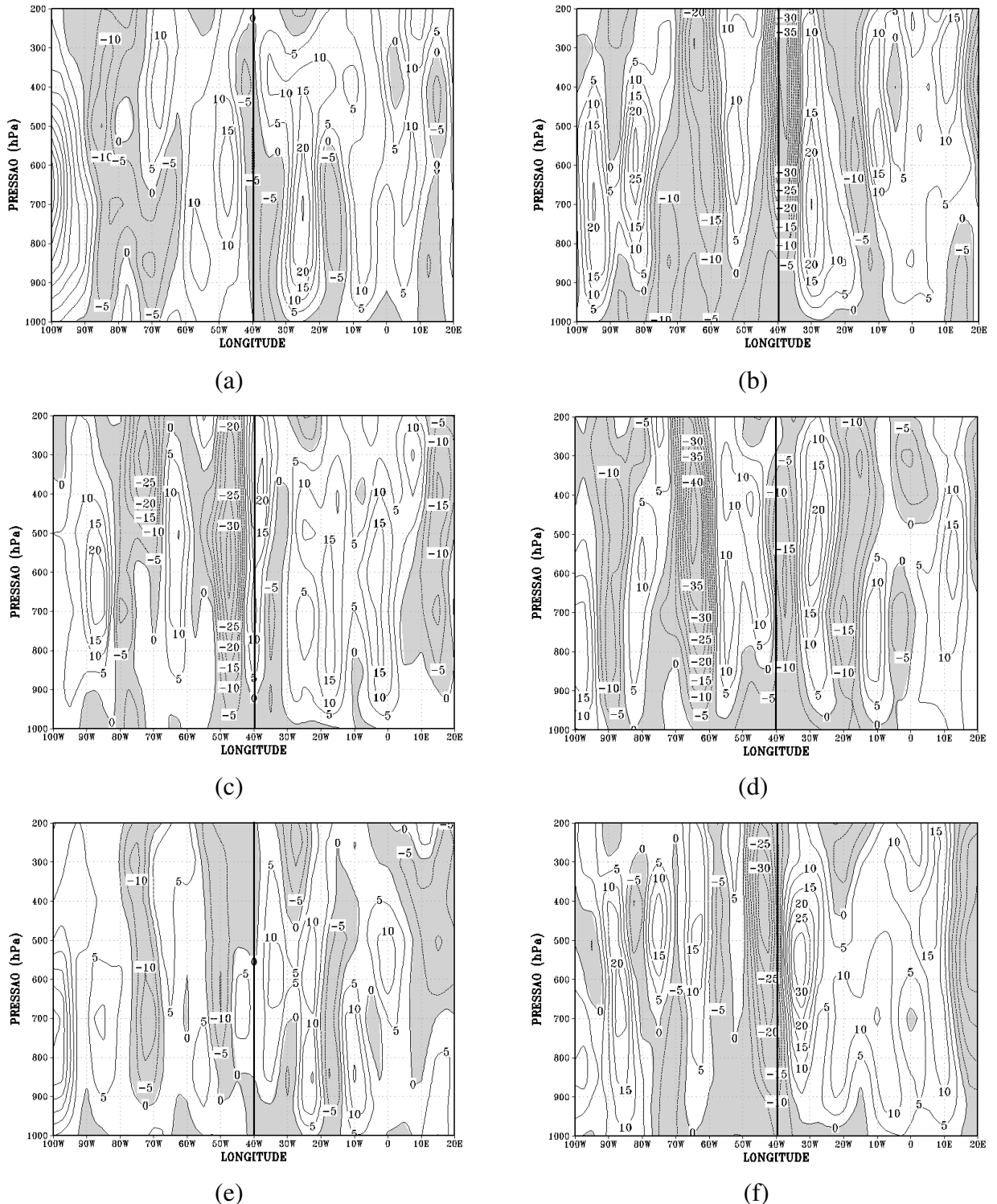


Figura 5.11 – Movimento vertical na latitude de 10°S às: (a) 12 UTC do dia 7, (b) 18 UTC do dia 7, (c) 00 UTC do dia 8, (d) 06 UTC do dia 8, (e) 12 UTC do dia 8, (f) 18 UTC do dia 8. O intervalo da análise é de $5 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As áreas de movimento ascendente estão sombreadas. A linha contínua perpendicular ao eixo das abscissas marca a longitude de 40°W, próxima e a leste de Petrolina. (Fonte dos dados: ERSL/NOAA, 2014)

A evolução temporal da estrutura termodinâmica e do vento ao longo da vertical em Petrolina é ilustrada na Figura 5.12. Nela os perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), e da componente zonal (u), componente meridional (v), e da intensidade do vento estão representados para os dias 7, 8 e 9 de abril de 2014.

Às 12 UTC do dia 07 (Figura 5.12a), dia que antecede o evento extremo de chuva, os perfis termodinâmicos indicam uma atmosfera com teor de umidade consideravelmente elevado, evidenciado pela proximidade das curvas de θ_e e θ_{es} na camada entre a superfície e o nível de 870 hPa. O perfil que representa o ambiente livre de umidade indica uma camada bem misturada ($\partial\theta/\partial z \sim 0$) entre a superfície e o nível de 925 hPa. Acima de 925 hPa, a curva da temperatura potencial indica uma atmosfera estável ($\partial\theta/\partial z > 0$). O perfil de θ_{es} , representativo do ambiente saturado, indica uma atmosfera condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) próximo à superfície; uma inversão térmica compreendida entre 870 e 850 hPa indica que a atmosfera está condicionalmente estável nessa camada. Acima do nível de 850 hPa a atmosfera é condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) até próximo do nível de 500 hPa, na média troposfera.

Acima de 500 hPa, o gradiente vertical de θ_{es} indica baixa instabilidade condicional entre a média e alta troposfera. O perfil representativo do ambiente da sondagem (θ_e) acompanha o comportamento de θ_{es} da superfície até a alta troposfera, o que pode indicar que um mecanismo em grande ou mesoescala atua na área de Petrolina já no dia 7, como a ocorrência de chuva entre as 05 e as 08 UTC desse dia (Figura 5.2) também parece indicar. Na Figura 5.12b o vento é do quadrante sudeste na camada 970 hPa - 799hPa e na camada 566 hPa - 327hPa. Na camada limitada pelos níveis de 799 hPa e 565 hPa o vento é do quadrante nordeste. Na alta troposfera (acima de 330 hPa), o vento varia entre os quadrantes sudoeste e noroeste mas predomina o sudoeste. Outra característica observada nos perfis da Figura 5.12b é a predominância da componente zonal de leste. Ela muda de sinal na alta troposfera indicando cisalhamento nessa componente entre a baixa-média e a alta troposfera.

No dia 8 às 12 UTC (Figura 5.12c), a camada superficial está com umidade elevada, evidenciada pela proximidade das curvas de θ_e e θ_{es} . A camada entre 940 e 925 hPa é condicionalmente estável ($\partial\theta_{es}/\partial z > 0$). Na camada limitada por 925 hPa e 800 hPa o perfil que representa o ambiente saturado indica quase neutralidade já que ($\partial\theta_{es}/\partial z \sim 0$). A atmosfera é condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) entre 799 e 650 hPa. Acima desse nível, o perfil de θ_{es} indica uma atmosfera condicionalmente estável até a alta troposfera, já que ($\partial\theta_{es}/\partial z > 0$).

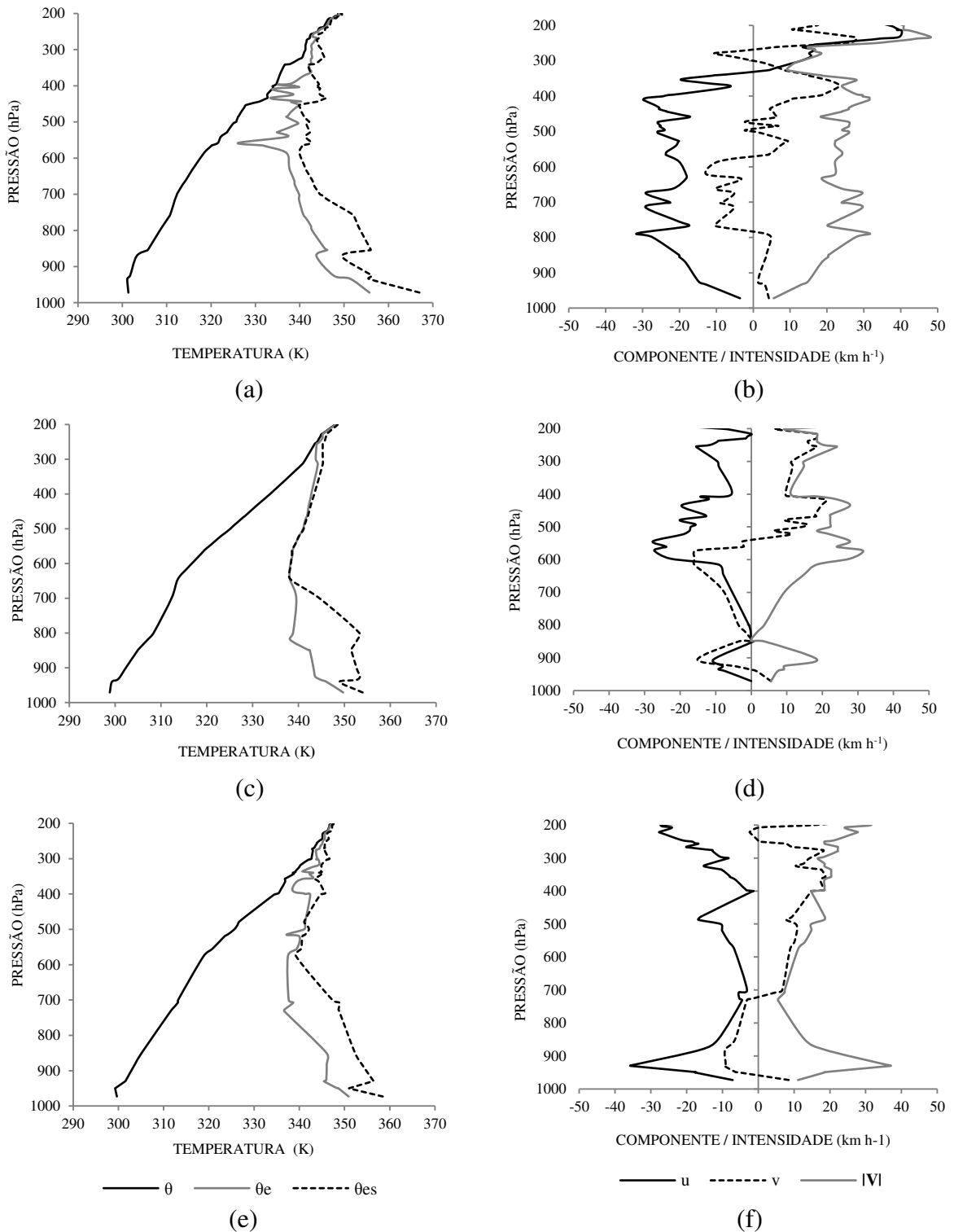


Figura 5.12 – Perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), à esquerda, e da componente zonal (u), componente meridional (v), e intensidade do vento ($|V|$), à direita, obtidos de sondagem de ar superior realizada em Petrolina em abril de 2014 às 12 UTC do dia: (a,b) 7 (dia anterior ao evento extremo); (c,d) 8 (dia do evento extremo); e (e,f) 9 (dia posterior ao evento extremo). (Fonte dos dados: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

O perfil representativo do ambiente da sondagem indica uma atmosfera convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z < 0$) entre a superfície e o nível de 820 hPa. Uma camada convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z \sim 0$) é evidente entre 820 e 650 hPa. Acima de 650 hPa o ambiente está convectivamente estável ($\partial\theta_e/\partial z > 0$) e saturado, o que é evidenciado pela sobreposição das curvas de θ_e e θ_{es} . Essa característica é típica da área de nebulosidade estratiforme do SCm em dissipação na trajetória da radiossonda no momento da medição. O teor de umidade menor indicado pelos perfis abaixo de 650 hPa pode ser atribuído à precipitação que ocorreu antes das 12 UTC na área de Petrolina. Na Figura 5.12d a componente zonal do vento tem, em geral, intensidade consideravelmente menor em comparação com o perfil do dia anterior (Figura 5.12b), e é de leste em toda a coluna atmosférica. A componente meridional tem magnitude comparável à da componente zonal, porém muda de sinal na camada superficial e na média troposfera. O vento é do quadrante nordeste na camada entre a superfície e 560 hPa, com exceção do nível da superfície e do nível de calmaria. Acima de 560 hPa a componente meridional muda de sinal já que o vento passa para o quadrante sudeste. Um máximo de intensidade do vento é observado em 905 hPa, enquanto que há calmaria no nível de 850 hPa.

Às 12 UTC do dia 9 (Figura 5.12e), dia posterior ao evento, uma inversão de subsidência é evidente na camada entre 950 e 925 hPa. O perfil de θ_e (θ_{es}) indica uma atmosfera convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z < 0$) (condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z < 0$)), na camada 850 hPa-732 hPa (925 hPa-576 hPa). O perfil representativo do ambiente da sondagem indica uma atmosfera convectivamente estável ($\partial\theta_e/\partial z \sim 0$) na camada 732 hPa-536 hPa. Acima de 536 hPa o perfil do ambiente da sondagem se aproxima do perfil da atmosfera saturada. A atmosfera é convectivamente estável ($\partial\theta_e/\partial z > 0$). O elevado teor de umidade é evidente pela proximidade das curvas de θ_e e θ_{es} . Semelhantemente ao dia anterior, a componente zonal do vento é de leste em toda a coluna atmosférica (Figura 5.12f). O vento é do quadrante sudeste à superfície e muda para o quadrante nordeste acima, passando novamente ao sudeste na baixa troposfera, no nível de 727 hPa. Na camada de ventos do quadrante nordeste a componente zonal intensifica com a altitude até o nível de 930 hPa, onde o vento atinge velocidade de 38 km h⁻¹, configurando um máximo de velocidade do vento mais intenso do que o do dia anterior (Figura 5.12d).

A estabilidade da atmosfera e sua evolução temporal também foram analisadas através dos índices de estabilidade com o objetivo de verificar sua utilidade no prognóstico de eventos de chuva na área de estudo. O índice LI (Figura 5.13a) apresenta valores negativos durante todo o mês, com exceção dos dias 4, 16 e 29, quando é positivo. Uma característica importante observada na variabilidade desse índice são os valores mínimos nos dias que precedem os

episódios de chuva ilustrados na Figura 5.1. Nos dias 6 e 7, que antecedem o evento extremo do dia 8, os valores do LI são em torno de $-5,5^{\circ}\text{C}$, o que indica uma atmosfera muito instável com forte potencial de tempestade de acordo com o Quadro 4.2. Nos dias chuvosos o LI atinge valores maiores que -4°C . O valor do LI no dia do SCm, em torno de $-3,7^{\circ}\text{C}$, indica uma atmosfera instável com tempestade provável. Nos dias 11 e 26, dias que antecedem episódios de chuva, a atmosfera está instável com probabilidade de ocorrência de tempestades, já que o valor do LI é $-4,4^{\circ}\text{C}$ e $-4,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Nos dias 12 e 27 (dias chuvosos) o valor do LI é maior, $-2,7^{\circ}\text{C}$ e $-2,9^{\circ}\text{C}$, respectivamente, indicando menor probabilidade de tempestades.

O índice SI (Figura 5.13b) apresenta valores negativos, na maioria em torno de -1°C , no período de 6 a 12 de abril, indicando uma atmosfera instável com probabilidade de ocorrência de tempestades (Quadro 4.3). Nos dias 26 e 27 as condições foram semelhantes. Nos outros dias o SI foi positivo, indicando instabilidade atmosférica reduzida na área de Petrolina.

O índice TT (Figura 5.13c) apresenta valores entre 45°C e 46°C no período de 6 a 9 de abril, e no dia 11. Esses valores estão associados com a possibilidade de tempestades dispersas de acordo com o Quadro 4.4. Na maioria dos dias os valores de TT indicam que tempestades são improváveis ($\text{TT} < 43^{\circ}\text{C}$).

Outro índice analisado é o K (Figura 5.13d). Seus valores indicam uma atmosfera instável e favorável ao desenvolvimento de inúmeras tempestades (Quadro 4.5) no período entre 6 e 11 de abril ($\text{K} > 35^{\circ}\text{C}$). Condição semelhante também é vista nos dias 26 e 27.

O índice SWEAT (Figura 5.13e) apresenta valores inferiores a 250 em todo o mês indicando a existência de cisalhamento vertical do vento moderado, uma condição necessária para o desenvolvimento de tempestades com alta eficiência de chuva (SILVA DIAS, 2000). O CAPE apresenta valores elevados nos dias que antecedem os eventos de chuva (Figura 5.13f). Nos dias 6, 7 e 26 o CAPE indica uma atmosfera favorável ao desenvolvimento de convecção forte ($\text{CAPE} > 2500 \text{ J kg}^{-1}$) de acordo com o Quadro 4.6. No dia 11 o CAPE indica uma atmosfera favorável ao desenvolvimento de convecção moderada ($1001 \text{ J kg}^{-1} \leq \text{CAPE} < 2500 \text{ J kg}^{-1}$). Já a inibição convectiva (CINE) foi baixa durante todo o mês (Figura 5.13g). Os demais índices não mostraram relação evidente com os dias chuvosos e dias antecedentes (Figura 5.13h-j).

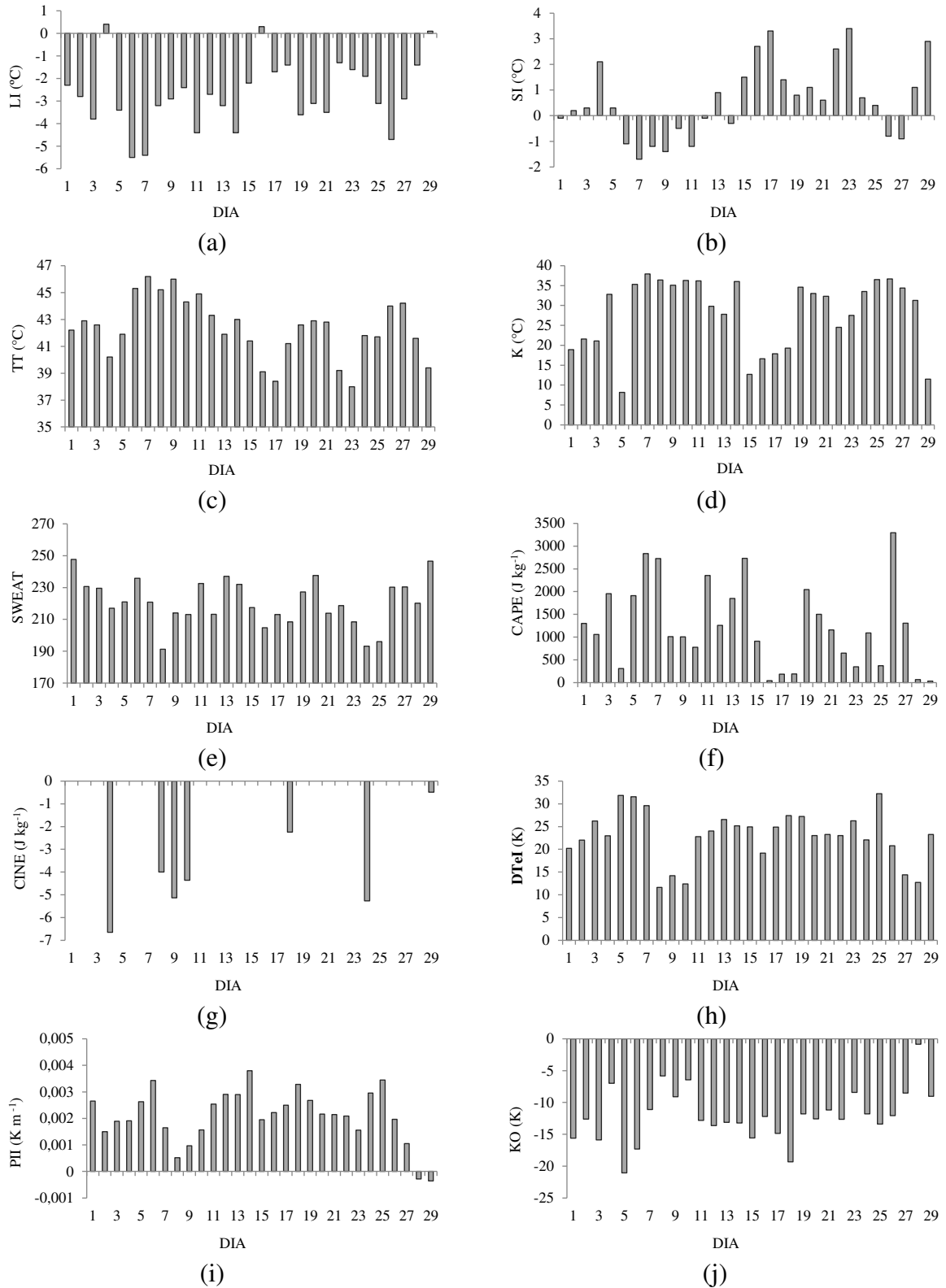


Figura 5.13 – Variação diária no mês de abril de 2014 do índice de estabilidade: (a) LI, (b) SI, (c) TT, (d) K, (e) SWEAT, (f) CAPE, (g) CINE, (h) DTel, (i) PII e (j) KO. Os índices foram obtidos de sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Petrolina.

5.2 Análise multivariada de sondagens de ar superior

Nesta seção duas técnicas de análise multivariada, a Análise (Fatorial) de Componentes Principais e a Análise de Agrupamentos são aplicadas aos dados de sondagens de ar superior para investigar mecanismos físicos atuantes no mês de abril de 2014.

5.2.1 Análise (fatorial) de componentes principais em níveis isobáricos

A aplicação do teste de KMO aos dados de sondagens de ar superior indica que a aplicação da ACP é possível, já que o KMO apresenta valores maiores que 0,5 em todos os níveis analisados. O valor do KMO é de 0,64 em 925 hPa, 0,6 em 850 hPa e 0,66 em 500 e 200 hPa.

Na aplicação da ACP foram retidas três componentes principais (fatores) que representam bem comportamento das variáveis nos níveis isobáricos de 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa e 200 hPa retendo 94,9%, 95,8%, 90,9% e 90,9% da variância total, respectivamente.

Na Tabela 5.1 constam os fatores rotacionados nos níveis isobáricos estudados. Na baixa troposfera (925 e 850 hPa), as variáveis de maior contribuição (peso) na primeira CP, que reteve 42,6% da variância total, estão altamente correlacionadas com a temperatura, e a umidade relativa. No segundo fator, que retém 37,1% da variância total dos dados, as variáveis estão relacionadas com o teor de umidade do ar, incluindo a umidade relativa que tem maior contribuição nesse fator do que na primeira CP. A umidade relativa aparece nas duas primeiras CP's devido a sua dependência com a temperatura e a umidade nesses níveis (925 e 850 hPa). Essa característica da umidade também foi observada por Queiroz *et al.* (2014), que obtiveram um resultado semelhante analisando o mês extremo chuvoso de janeiro de 2004, também na área de Petrolina. A componente zonal ficou retida na terceira CP, com explicação de 15,1% da variância total dos dados.

No nível de 500 hPa (média troposfera), ficaram retidas na primeira CP as variáveis relacionadas com a umidade do ar (Tabela 5.1). Esse fator está associado com variações do teor de umidade e reteve 42% da variância total dos dados. O segundo fator reteve 34,9% da variância total dos dados, e está correlacionado com variações da temperatura do ar. O terceiro fator agrupa as componentes zonal e meridional do vento, com explicação de 13,2% da variância total dos dados.

No nível de 200 hPa, a primeira CP, com explicação de 44,5% da variância total dos dados, reuniu as variáveis relacionadas com a temperatura, juntamente com a temperatura

potencial equivalente, o que indica ausência de umidade nesse nível (Tabela 5.1). A segunda CP explica 34,8% da variância total dos dados e retém variáveis relacionadas com o teor de umidade do ar. A componente zonal do vento ficou retida na terceira CP, com explicação de 11,6% da variância total dos dados.

Tabela 5.1 – Fatores rotacionados dos quatro níveis isobáricos analisados.

Nível (hPa)	Variável	Componentes		
		1	2	3
925	T	0,962	0,197	0,176
	Td	0,211	0,953	0,209
	UR	-0,670	0,741	0,034
	r	0,205	0,957	0,203
	θ	0,962	0,195	0,175
	θ_e	0,497	0,836	0,224
	θ_{es}	0,962	0,191	0,172
	u	0,142	0,195	0,935
	v	-0,504	-0,344	-0,514
850	T	0,957	0,118	0,258
	Td	-0,028	0,983	0,174
	UR	-0,797	0,597	-0,079
	r	-0,032	0,981	0,184
	θ	0,958	0,117	0,258
	θ_e	0,427	0,859	0,273
	θ_{es}	0,958	0,110	0,254
	u	0,313	0,228	0,884
	v	-0,461	-0,425	-0,567
500	T	-0,277	0,951	-0,058
	Td	0,931	-0,255	0,005
	UR	0,906	-0,377	0,136
	r	0,928	-0,327	0,127
	θ	-0,300	0,944	-0,061
	θ_e	0,968	-0,166	0,120
	θ_{es}	-0,284	0,949	-0,059
	u	0,317	0,167	0,697
	v	-0,079	-0,281	0,804
200	T	0,990	-0,133	-0,030
	Td	-0,144	0,931	0,167
	UR	-0,114	0,960	0,124
	r	-0,009	0,972	0,054
	θ	0,990	-0,134	-0,030
	θ_e	0,998	-0,054	-0,026
	θ_{es}	0,990	-0,135	-0,034
	u	0,002	0,260	0,946
	v	0,197	-0,521	-0,312

5.2.1.1 Análise em 925 hPa

A Figura 5.14 ilustra as cargas fatoriais das três CPs retidas no nível de 925 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014. A primeira CP, altamente relacionada com as variações da temperatura do ar, apresenta carga fatorial máxima (maior do que 1,5) nos dias 3, 6 e 26. A carga fatorial é mínima (menor do que -1,5) nos dias 27, 28 e 29. Nos dias em que a primeira CP tem cargas máximas (3, 6, 26), a temperatura do ar apresenta valores máximos, enquanto que nos dias com cargas fatoriais mínimas a temperatura apresenta um decréscimo sistemático, que tem início no dia 26 (Figura 5.15a), o que pode ser indício da incursão de um sistema frontal visualizada em imagens realçadas do satélite GOES 13 (não mostrado).

O segundo fator está altamente relacionado com as variações do teor de umidade na baixa troposfera, apresentando carga fatorial máxima nos dias 11, 14, 25 e 27 e mínima nos dias 2 e 29. Nos dias com cargas máximas, o teor de umidade do ar apresenta valores máximos evidenciados pela curva da razão de mistura (Figura 5.15b). Nos dias com cargas mínimas (2, 29) há mínimos do teor de umidade do ar. O mínimo do final do mês ocorre em associação a um decréscimo sistemático da razão de mistura, semelhante ao que foi visto no gráfico da temperatura do ar (Figura 5.15a), reforçando as evidências da incursão de um sistema frontal na área de Petrolina que provocou a chuva registrada no dia 27 (Figura 5.1).

A terceira CP está relacionada com a componente zonal do vento. Os dias com carga fatorial máxima dessa CP (8, 26) estão associados com a desintensificação da componente zonal (de leste) do vento (Figura 5.15c). O primeiro dia está relacionado com o evento extremo de chuva do dia 8 e o segundo com o evento do final do mês (Figura 5.1). A carga fatorial mínima no dia 11 está associada com a intensificação da componente zonal (de leste) na área de Petrolina. Nesse dia também há um máximo do teor de umidade que, juntamente com a intensificação da componente zonal (de leste), pode ser um indício da advecção horizontal de umidade pela componente zonal do vento.

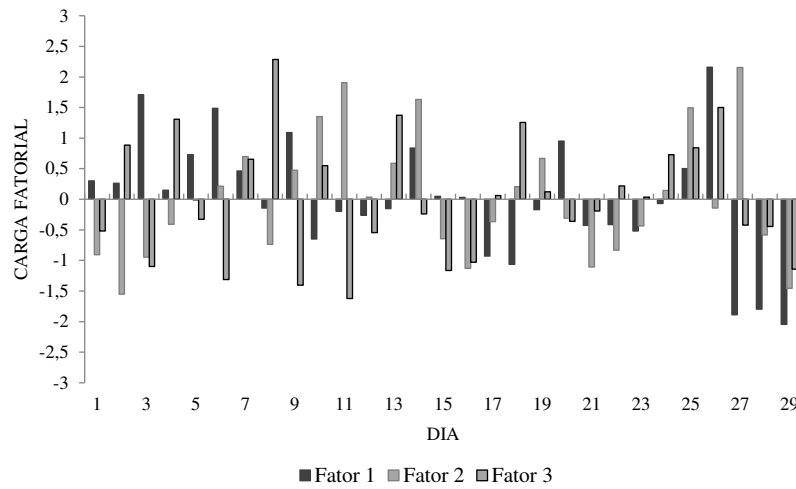


Figura 5.14 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 925 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico.

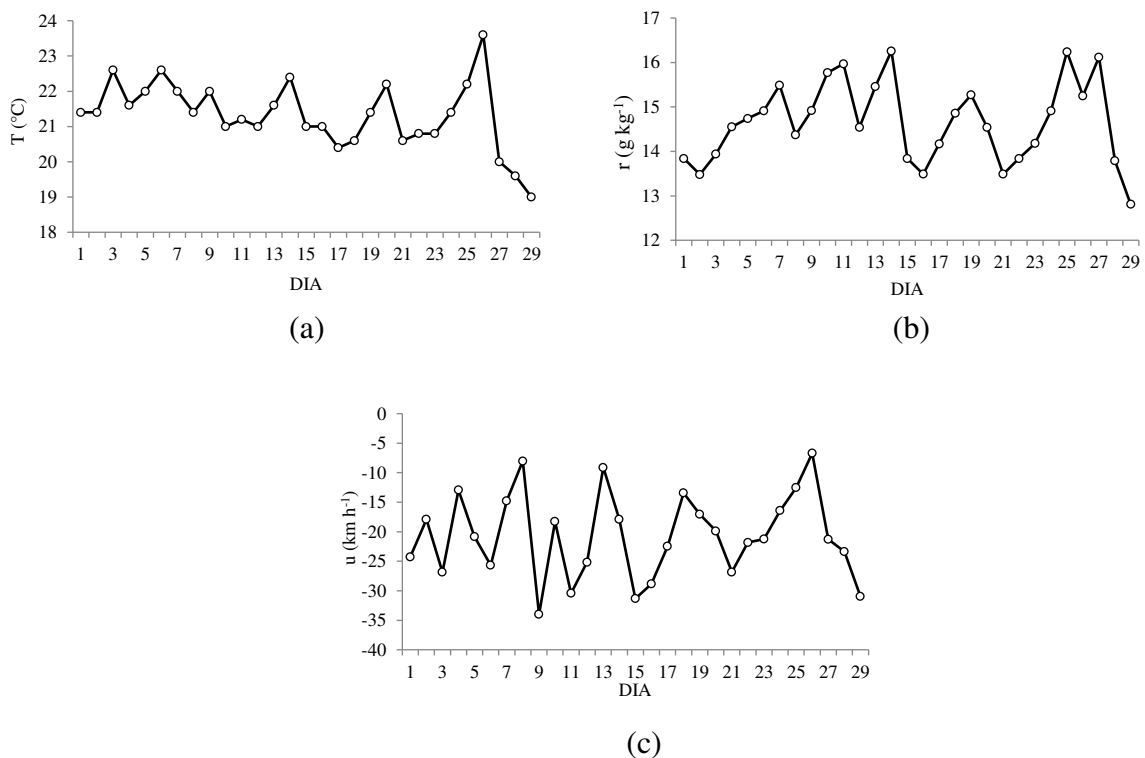


Figura 5.15 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 925 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) razão de mistura (segunda CP), (c) componente zonal do vento (terceira CP).

5.2.1.2 Análise em 850 hPa

As cargas fatoriais das três CPs retidas no nível de 850 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 são mostradas na Figura 5.16. A primeira CP, relacionada com as variações da temperatura do ar, apresenta carga fatorial máxima (maior do que 1,5) nos dias 7, 24 e 25 e carga fatorial mínima (menor do que -1,5) nos dias 22 e 29. Nos dias com cargas fatoriais máximas (7, 24, 25) há valores máximos da temperatura do ar (Figura 5.17a) e nos dias com cargas fatoriais mínimas (22, 29) há mínimos da temperatura do ar, situação semelhante àquela observada no nível de 925 hPa.

A segunda CP está altamente relacionada com as variações do teor de umidade, apresentando carga fatorial máxima nos dias 11 e 26 e cargas fatoriais mínimas nos dias 16, 17 e 23. Os dias com cargas máximas estão associados com valores máximos do teor de umidade indicados pela curva da razão de mistura (Figura 5.17b). Nos dias com cargas mínimas (16, 17, 23) há mínimos do teor de umidade do ar.

A terceira CP está relacionada com as componentes zonal e meridional do vento, sendo que a componente zonal tem contribuição maior (Tabela 5.1). Os dias com carga fatorial máxima (8, 10, 26) estão associados com componentes do vento fracas: a zonal, de leste, e a meridional, de norte (Figura 5.17c). Os dias com carga fatorial mínima (6, 29) têm características distintas: no dia 6 a componente zonal é intensa (de leste) e a componente meridional é quase nula, enquanto que no dia 29 as duas componentes atingem as maiores intensidades do mês, sendo a zonal, de leste, e a meridional, de sul.

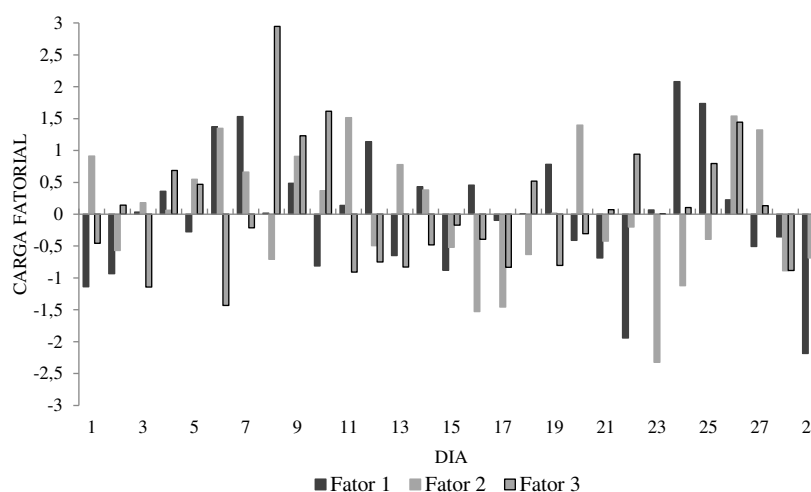


Figura 5.16 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 850 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico.

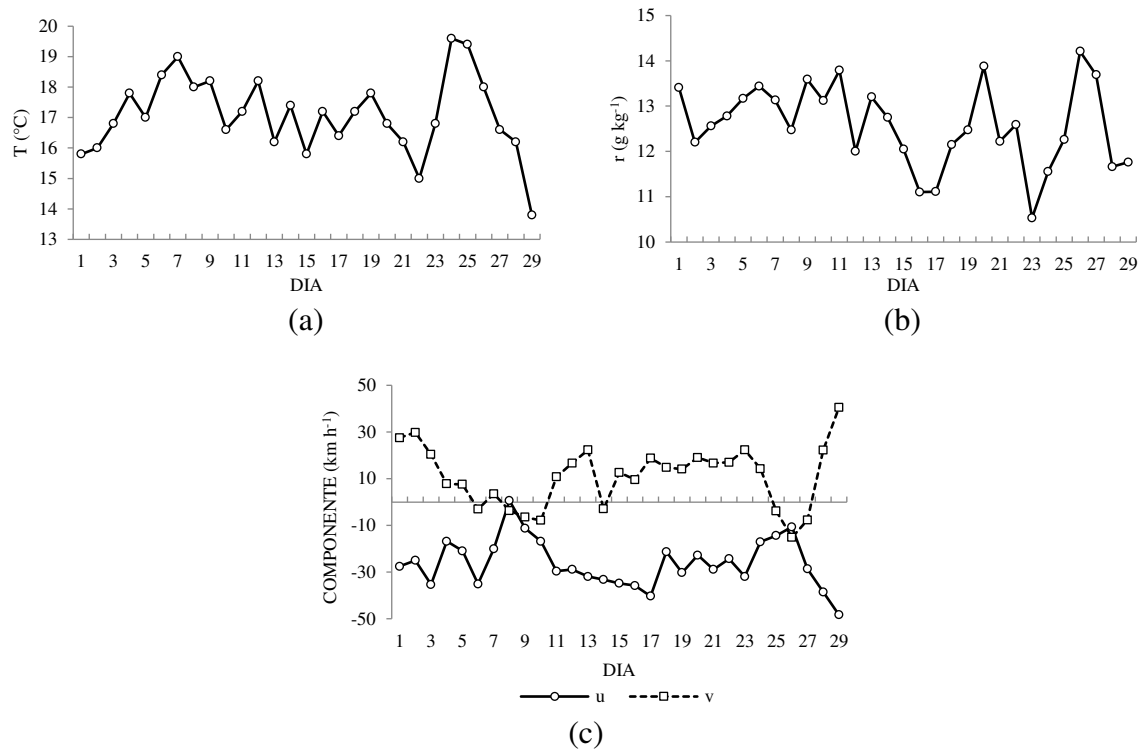


Figura 5.17 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 850 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) razão de mistura (segunda CP), (c) componentes zonal e meridional do vento (terceira CP), em que a simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.

5.2.1.3 Análise em 500 hPa

A Figura 5.18 ilustra as cargas fatoriais das três CPs retidas no nível de 500 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014. A primeira CP, que está relacionada com as variações do teor de umidade do ar, apresenta carga fatorial máxima nos dias 26, 27 e 28 e carga fatorial mínima no dia 18. A razão de mistura é elevada nos dias 26 e 28, e é máxima no dia 27 (Figura 5.19a). No dia 18 o teor de umidade é quase nulo.

A segunda CP está relacionada com as variações da temperatura do ar. Ela apresenta carga fatorial máxima nos dias 4, 25 e 26 e carga mínima nos dias 2 e 21. Nos dias com cargas fatoriais máximas há valores máximos da temperatura do ar nos dias 4 e 25 e valor ligeiramente menor no dia 26 (Figura 5.19b). As cargas fatoriais mínimas nos dias 2 e 21 ocorrem em associação a mínimos da temperatura do ar (Figura 5.19b).

A terceira CP está relacionada com as componentes zonal e meridional do vento, sendo que a componente meridional tem contribuição maior (Tabela 5.1). Nos dias 17, 21, 25 e 28, a carga fatorial é máxima, associada com componente zonal nula e componente meridional (de sul) nos dias 17 e 21 (Figura 5.19c), e componente zonal máxima (de oeste) e componente

meridional nula nos dias 25 e 28. Nos dias 2, 19 e 23 as cargas fatoriais da terceira CP são mínimas, em associação a máximos da componente zonal (de leste) e da componente meridional (de norte). Os ventos do quadrante nordeste mais intensos do mês são observados nos dias 19 e 23.

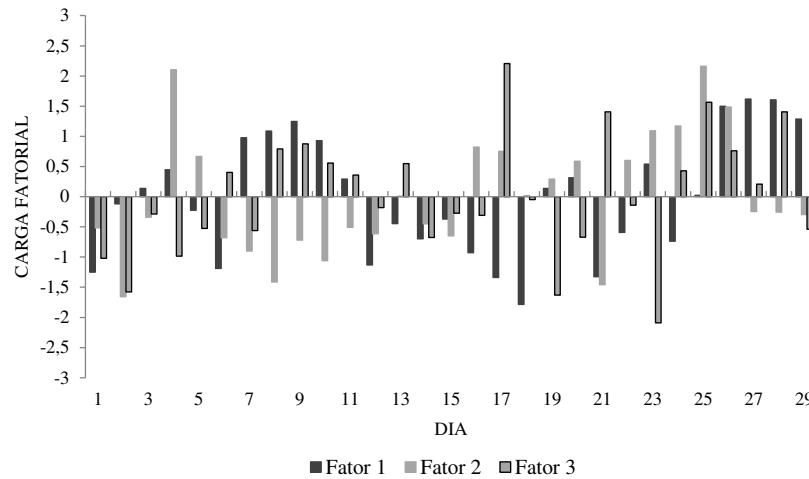


Figura 5.18 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 500 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é apresentada abaixo do gráfico.

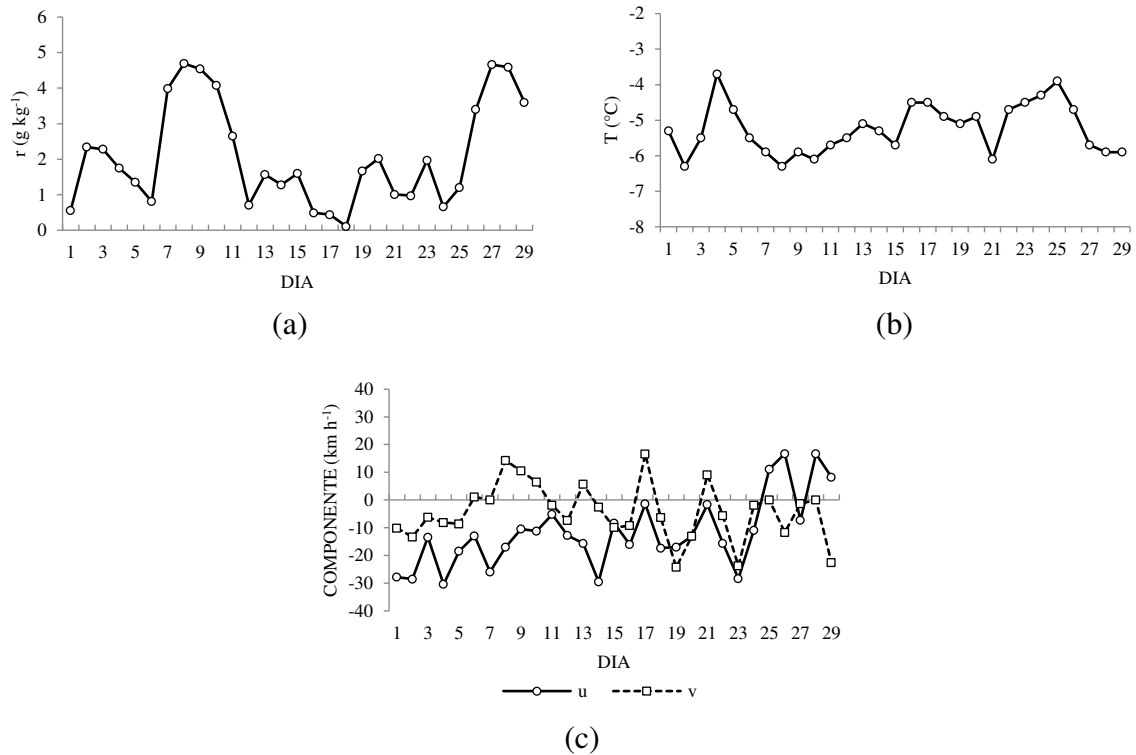


Figura 5.19 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 500 hPa: (a) razão de mistura (primeira CP), (b) Temperatura (segunda CP), (c) componentes zonal e meridional do vento (terceira CP), em que a simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.

5.2.1.4 Análise em 200 hPa

A Figura 5.20 ilustra as cargas fatoriais das três CPs retidas no nível de 200 hPa no período do estudo. A primeira CP reúne as variáveis relacionadas com as variações da temperatura do ar e a temperatura potencial equivalente, indicando a ausência de umidade na alta troposfera. A primeira apresenta carga fatorial máxima nos dias 6 e 21 e carga fatorial mínima no dia 2. Nos dias com cargas fatoriais máximas (6, 21) há máximos da temperatura do ar, enquanto que no dia 2 (carga fatorial mínima) há um mínimo da temperatura do ar (Figura 5.21a).

A segunda CP, que está altamente relacionada com as variações do teor de umidade do ar, apresenta carga fatorial máxima no dia 4, em associação a um máximo da temperatura do ponto de orvalho (Figura 5.21b). Nos dias 2, 6, 13 e 20, nos quais as cargas fatoriais são mínimas, há mínimos da temperatura do ponto de orvalho.

A terceira CP está relacionada com a componente zonal do vento. Nos dias 26 e 29 a carga fatorial é máxima associada com componente zonal de oeste que é a mais intensa do mês no dia 26, véspera do evento de chuva registrado no dia 27. Nos dias 9, 11 e 12 as cargas fatoriais são mínimas, em associação a intensidades máximas da componente zonal (de leste).

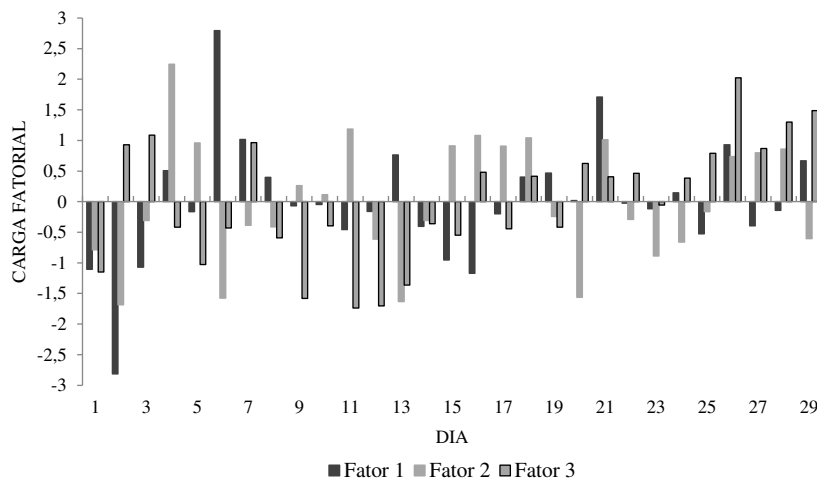


Figura 5.20 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para o nível de 200 hPa no período de 1 a 29 de abril de 2014 em Petrolina-PE. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.

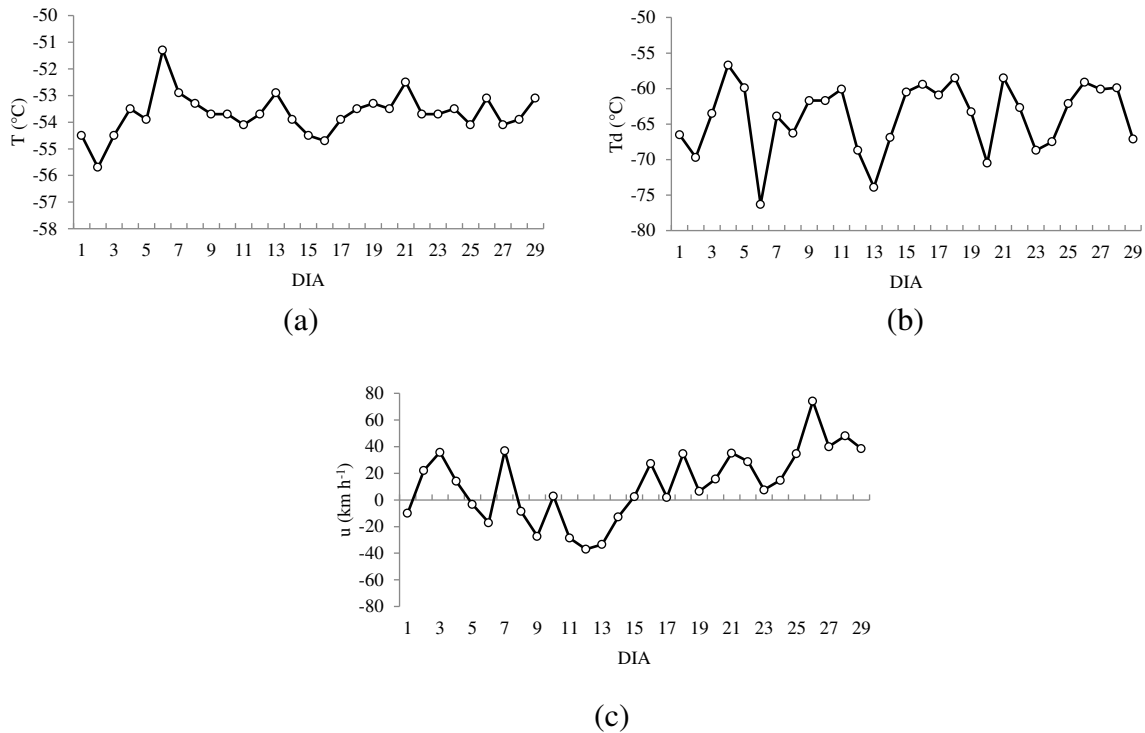


Figura 5.21 – Série temporal das variáveis relacionadas com as componentes principais para o nível de 200 hPa: (a) temperatura (primeira CP), (b) temperatura do ponto de orvalho (segunda CP), (c) componente zonal do vento (terceira CP).

5.2.2 Análise de agrupamentos em níveis isobáricos

As curvas de inércia para o agrupamento nos quatro níveis isobáricos analisados são apresentadas na Figura 5.22. A flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos que, no caso, são seis em todos os níveis isobáricos.

Na Figura 5.23a está representado o dendrograma para o nível isobárico de 925 hPa. No Grupo 1, como mostra a Tabela 5.2, estão três dias da primeira quinzena do mês (1, 12, 15), e cinco dias da segunda quinzena (16, 17, 21, 22, 23). Dos dias reunidos nesse grupo, ocorre chuva apenas no dia 12 (Figura 5.1). Esse grupo reúne dias com condições meteorológicas associadas com valores moderados da temperatura do ar e do teor de umidade, enquanto que a componente zonal é de leste e intensa, e a meridional é de sul e moderada (Tabela 5.3). Em geral, as condições de tempo nos dias do Grupo 1 são desfavoráveis à ocorrência de chuva na área de Petrolina. No Grupo 2 estão os dias 28 e 29 (Tabela 5.2). Nesses dias as condições atmosféricas estão associadas com os valores mais baixos da temperatura e do teor de umidade. Eles estão relacionados com a massa de ar da retaguarda do sistema frontal, que tem temperatura e teor de umidade mais baixos. A média da temperatura do ar é $19,3^{\circ}\text{C}$ e a da razão de mistura é $13,3 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 5.3). O Grupo 3 reúne os dias 3, 5, 6, 9 e 20 (Tabela 5.2). As condições

meteorológicas nesse grupo estão associadas a máximos de temperatura do ar ($22,3^{\circ}\text{C}$), teor de umidade moderado ($14,6\text{ g kg}^{-1}$) e componente zonal de leste e intensa ($23,4\text{ km h}^{-1}$). O Grupo 4 reúne os dias 2, 4, 8 e 26 (Tabela 5.2). As condições meteorológicas estão associadas com a componente zonal (de oeste) menos intensa do mês ($11,4\text{ km h}^{-1}$) e teor de umidade moderado ($14,4\text{ g kg}^{-1}$), de acordo com a Tabela 5.3. No Grupo 5 estão reunidos os dias 7, 10, 13, 14, 18, 19, 24 e 25 (Tabela 5.2). Esse grupo se caracteriza por apresentar valores elevados das variáveis relacionadas com o teor de umidade da atmosfera (T_d , UR, r , θ_e) conforme evidenciado pela Tabela 5.3. O Grupo 6, que reúne os dias 11 e 27 (Tabela 5.2), tem vento semelhante ao do Grupo 1 (forte e do quadrante sudeste), mas sua principal característica é apresentar o valor mais alto das variáveis relacionadas com o teor de umidade da atmosfera (T_d , UR, r , θ_e), dentre todos os grupos (Tabela 5.3). Dentre os 6 grupos formados no nível de 925 hPa, o Grupo 2 é o que reúne as condições atmosféricas menos favoráveis à ocorrência de chuva (temperatura e umidade mais baixas e vento forte), enquanto que o Grupo 6 tem as condições mais favoráveis (alto teor de umidade), à exceção do vento (Tabela 5.3).

O dendrograma para o nível isobárico de 850 hPa é apresentado na Figura 5.23b. Na Tabela 5.2 estão os dias que constituem cada um dos seis grupos. No Grupo 1 há 3 dias da primeira quinzena do mês (1, 11, 13) e dois dias da segunda (20, 27). Nesse grupo, o vento é forte e do quadrante sudeste, mas sua principal característica é apresentar o valor mais alto das variáveis relacionadas com o teor de umidade da atmosfera (T_d , UR, r , θ_e), conforme consta na Tabela 5.3. O Grupo 2 reúne quatro dias da primeira metade do mês (2, 4, 5, 15) e dois dias da segunda metade (18, 21). De maneira geral, os valores desse grupo são próximos daqueles do Grupo 1 (Tabela 5.3). Também neste caso o vento é forte e do quadrante sudeste. No Grupo 3 estão os dias 8, 9, 10, 22 e 26. Nele há dois dias com registro de chuva (8, 10) e dois dias que são véspera de dias chuvosos (9, 26). As principais características desse grupo são os valores elevados de variáveis relacionadas com o teor de umidade do ar (T_d , UR, r , θ_e), valores esses que são próximos daqueles do Grupo 1, e as componentes do vento (quadrante nordeste) fracas, notadamente a componente meridional que é quase nula (Tabela 5.3). O Grupo 4 reúne cinco dias da primeira metade do mês (3, 6, 7, 12 e 14) e um da segunda (19), dos quais dois (7, 12) tem evento de chuva e um (6) é véspera de evento. A principal característica desse grupo é a componente zonal (de leste) intensa e a componente meridional (de sul) fraca (Tabela 5.3). Ele apresenta valores intermediários entre o máximo e o mínimo das demais variáveis. O Grupo 5 tem apenas dois dias (24, 25) e se caracteriza pelo vento fraco do quadrante sudeste e, principalmente, pelos valores mais elevados de variáveis relacionadas com a temperatura do ar (T , θ e θ_{es}), e pelo valor mais baixo da umidade relativa, dentre os grupos (Tabela 5.3).

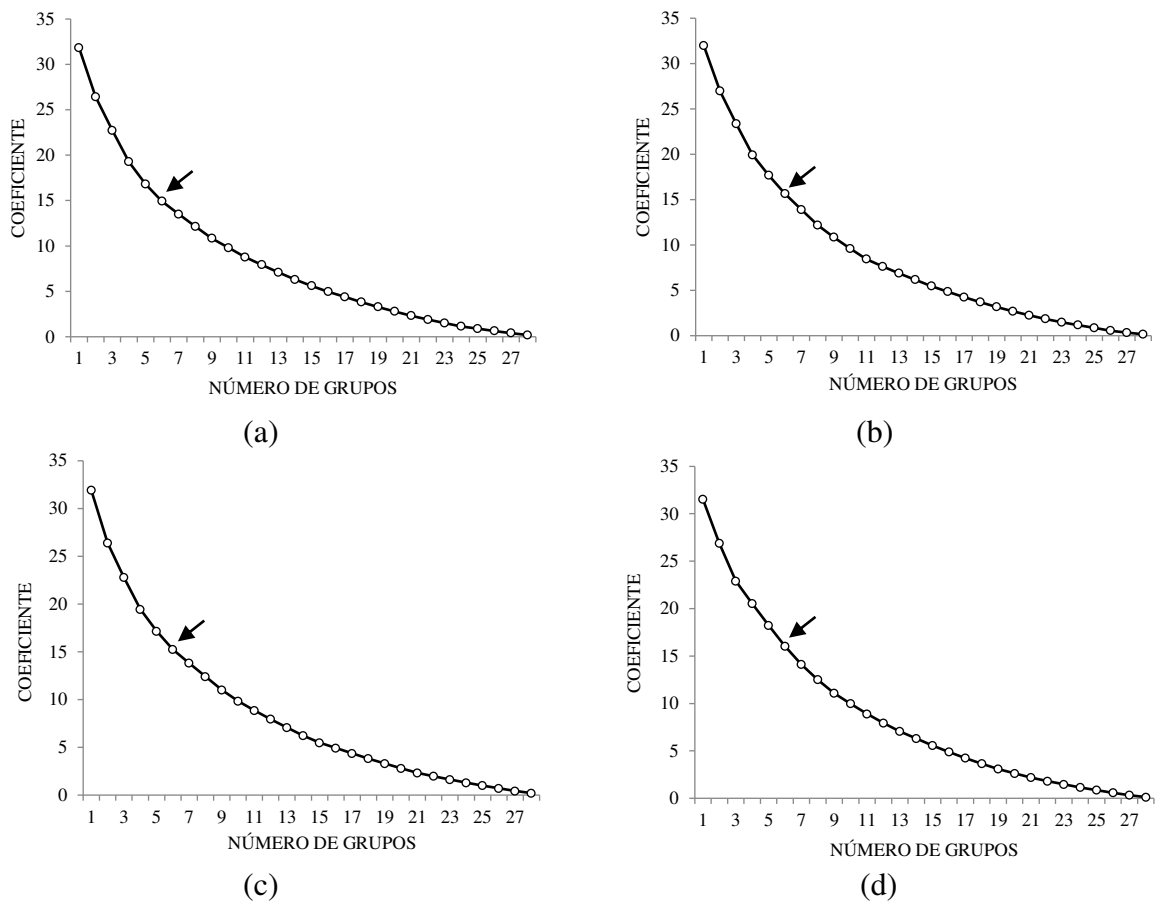


Figura 5.22 – Curva de inércia para o nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. As flechas nas figuras indicam a ordem do corte feito no dendrograma.

Tabela 5.2 – Grupos de dias dos elementos meteorológicos formados para os quatro níveis isobáricos padrões analisados, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática.

Nível (hPa)	Dias nos grupos					
	1	2	3	4	5	6
925	1, 12, 15, 16, 17, 21, 22, 23	28, 29	3, 5, 6, 9, 20	2, 4, 8, 26	7, 10, 13, 14, 18, 19, 24, 25	11, 27
850	1, 11, 13, 20, 27	2, 4, 5, 15, 18, 21	8, 9, 10, 22, 26	3, 6, 7, 12, 14, 19	24, 25	16, 17, 23, 28, 29.
500	1, 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 18	4, 19, 23	5, 16, 20, 22, 24	17, 21	25, 26	7, 8, 9, 10, 27, 28, 29
200	1, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 19	6	2	3, 7, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 29	4, 16, 18, 21, 27, 28	5, 11, 15, 17

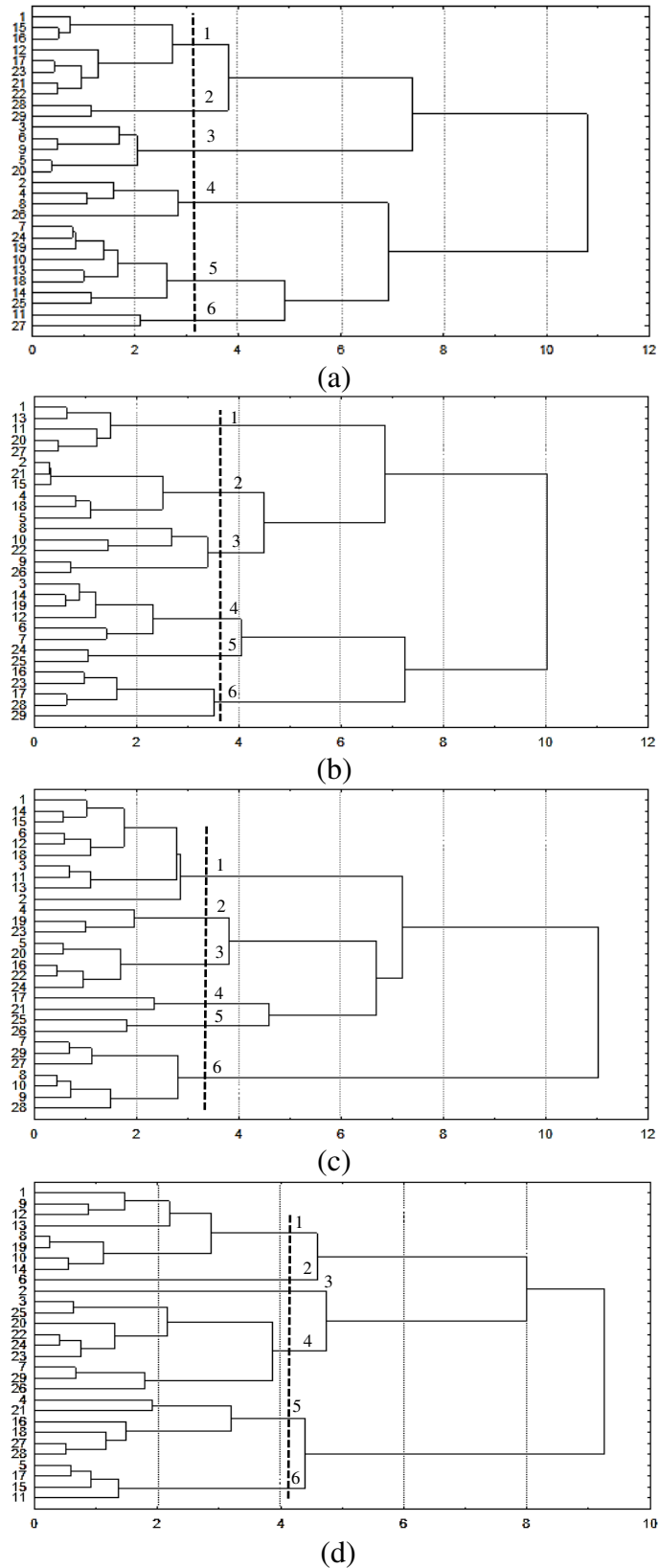


Figura 5.23 – Dendrograma utilizando o método de Ward e distância euclidiana quadrática para o nível de: (a) 925 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa e (d) 200 hPa. A linha tracejada indica o corte no dendrograma. Os grupos de dias homogêneos são indicados pelos números de 1 a 6.

Tabela 5.3 – Valores médios dos elementos meteorológicos nos grupos homogêneos formados para os níveis isobáricos padrões de 925, 850, 500 e 200 hPa, a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os números em negrito (negrito e itálico) são os valores médios máximos (mínimos) dos elementos meteorológicos. As componentes do vento foram consideradas em módulo.

Nível (hPa)	Variável	Grupo					
		1	2	3	4	5	6
925	T (°C)	20,9	19,3	22,3	22,0	21,6	20,6
	Td (°C)	17,7	17,0	18,4	18,2	19,4	20,0
	UR (%)	82,1	86,5	79,0	79,3	87,5	96,0
	r (g kg ⁻¹)	13,9	13,3	14,6	14,4	15,5	16,0
	θ (K)	300,6	299,0	302,1	301,8	301,3	300,3
	θe (K)	341,7	338,0	345,4	344,5	347,3	347,6
	θes (K)	351,0	344,3	357,5	356,3	354,2	349,9
	u (kmh ⁻¹)	-25,2	-27,2	-25,4	11,4	-14,9	-25,8
	v (kmh ⁻¹)	13,2	35,1	9,4	-0,5	3,7	13,0
850	T (°C)	16,5	16,7	17,2	17,9	19,5	16,1
	Td (°C)	16,0	14,6	15,5	15,0	14,1	13,1
	UR (%)	96,8	87,8	90,4	83,0	70,5	83,0
	r (g kg ⁻¹)	13,6	12,4	13,2	12,7	11,9	11,2
	θ (K)	303,4	303,5	304,0	304,9	306,5	302,9
	θe (K)	344,0	340,7	343,6	343,1	342,6	336,5
	θes (K)	345,4	346,1	348,1	351,3	358,1	343,8
	u (kmh ⁻¹)	-28,1	-24,6	-12,4	-30,4	-15,7	-38,9
	v (kmh ⁻¹)	14,4	14,9	-3,2	8,1	5,2	22,7
500	T (°C)	-5,5	-4,4	-4,6	-5,3	-4,3	-6,0
	Td (°C)	-24,0	-18,4	-25,2	-29,3	-16,8	-7,7
	UR (%)	27,7	32,7	20,4	14,5	42,0	87,7
	r (g kg ⁻¹)	1,4	1,8	1,1	0,7	2,3	4,3
	θ (K)	326,2	327,5	327,3	326,4	327,6	325,6
	θe (K)	331,2	333,9	331,3	329,1	335,7	340,2
	θes (K)	343,3	346,0	345,5	343,8	346,3	342,0
	u (kmh ⁻¹)	-17,2	-25,3	-14,8	-1,5	13,9	-6,7
	v (kmh ⁻¹)	-5,1	-18,7	-7,7	12,9	-5,9	1,0
200	T (°C)	-53,6	-51,3	-55,7	-53,6	-53,7	-54,1
	Td (°C)	-66,1	-76,3	-69,7	-65,0	-58,9	-60,4
	UR (%)	22,8	4,0	16,0	25,9	53,7	46,3
	r (g kg ⁻¹)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
	θ (K)	347,5	351,2	344,2	347,6	347,4	346,8
	θe (K)	347,6	351,2	344,2	347,7	347,7	347,0
	θes (K)	348,0	351,9	344,6	348,1	347,9	347,3
	u (kmh ⁻¹)	-14,9	-17,0	22,2	31,9	33,3	-6,8
	v (kmh ⁻¹)	18,6	14,3	0,0	7,1	-13,8	-9,4

O Grupo 6 está constituído pelos dias 16, 17, 23, 28 e 29. Esse grupo tem características marcantes: os valores mais baixos de todas as variáveis, à exceção da umidade relativa e das componentes do vento (quadrante sudeste), que são as mais intensas dentre os grupos (Tabela 5.3). Entre os grupos formados no nível de 850 hPa (Tabela 5.3), o Grupo 1 é aquele cujas variáveis apresentam o teor de umidade mais alto dentre os grupos, indicando uma condição mais favorável à ocorrência de chuva; já o Grupo 6 é o que reúne as condições menos favoráveis à ocorrência de chuva (temperatura e umidade mais baixas e vento forte).

No nível de 500 hPa, o corte no dendrograma também é de ordem 6 (Figura 5.28c), resultando em seis grupos de dias vistos na Tabela 5.2. No Grupo 1 estão os dias 1, 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15 e 18, dos quais dois tem registro de chuva (11, 12). De maneira geral as variáveis têm valores próximos dos mais baixos dentre os grupos (Tabela 5.3). O oposto é visto no caso da componente zonal (de leste) cujo valor ($-17,6 \text{ km h}^{-1}$) é o mais próximo daquele que é o mais intenso dentre os seis grupos (Tabela 5.3). A componente meridional (de norte) é fraca. No Grupo 2 estão os dias 4, 19 e 23. Ele se caracteriza pelo vento mais intenso (quadrante nordeste) dentre os grupos (Tabela 5.3). Esse grupo também apresenta variáveis relacionadas com a temperatura (T , θ e θ_{es}) com valores próximos daqueles mais elevados dentre os grupos. O Grupo 3 é formado pelos dias 5, 16, 20, 22 e 24 (Tabela 5.2). Semelhantemente ao Grupo 2, variáveis relacionadas com a temperatura do ar (T , θ e θ_{es}) tem valores próximos daqueles mais elevados dentre os grupos (Tabela 5.3). Por outro lado, as componentes do vento (quadrante nordeste) têm intensidade próximas daquelas do Grupo 1. O Grupo 4 reúne os dias 17 e 21 e se caracteriza por apresentar os valores mais baixos de variáveis relacionadas com o teor de umidade da atmosfera (T , UR , r e θ_e), e vento do quadrante sudeste cuja componente zonal é a mais fraca dentre os grupos (Tabela 5.3). O Grupo 5 é formado pelos dias 25 e 26, esse último sendo a véspera do evento registrado no dia 27. Nesse grupo estão os valores mais elevados de variáveis relacionadas com a temperatura do ar (T , θ e θ_{es}), e vento do quadrante noroeste cuja componente meridional (de norte) é fraca, semelhantemente ao Grupo 1. O Grupo 6 é formado pelos dias 7, 8, 9, 10, 27, 28 e 29. Esse conjunto envolve o dia do evento extremo do mês (8), a véspera (7), e os dois dias posteriores, 9 e 10, todos com registro de chuva, e também o evento do final do mês (27) e os dois dias posteriores (28 e 29). O Grupo 6 tem características bem distintas: as variáveis relacionadas com a temperatura do ar (teor de umidade) têm o valor mais baixo (mais alto) entre os grupos. O vento (quadrante sudeste) é muito fraco, o mais fraco dentre os grupos.

O dendrograma para o nível de 200 hPa é apresentado na Figura 5.23d e a Tabela 5.2 contém os seis grupos formados. O Grupo 1 é formado pelos dias 1, 8, 9, 10, 12, 13, 14 e 19.

Ele inclui o evento extremo (8) e os cinco dias seguintes (com exceção do dia 11), dos quais dois tem registro de chuva (10, 12). Esse grupo é caracterizado pelo valor mais elevado da componente meridional (de sul) do vento (quadrante sudeste) (Tabela 5.3). No Grupo 2 está o dia 6, que tem características bem diferenciadas: as variáveis relacionadas com a temperatura (teor de umidade) do ar têm os valores mais altos (mais baixos) dentre os seis grupos (Tabela 5.3). O vento é moderado do quadrante sudeste. No Grupo 3 está o dia 2 que se distingue pelos valores mais baixos das variáveis relacionadas com a temperatura do ar (T , θ , θ_{es}), e vento de oeste com intensidade moderada (Tabela 5.3). No Grupo 4 estão nove dias (3, 7, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 29), dos quais apenas um (7) tem registro de chuva. Nesse grupo as variáveis relacionadas com a temperatura e umidade tem valores intermediários e o vento é do quadrante sudoeste, com componente zonal intensa e componente meridional fraca (Tabela 5.3). No Grupo 5 estão seis dias, dentre os quais está o evento do final do mês (27) e o dia subsequente (28): 4, 16, 18, 21, 27, e 28. Esse grupo se caracteriza pelos valores mais elevados de variáveis relacionadas com o teor de umidade (T_d , UR , r) e da componente zonal (de oeste) do vento (quadrante noroeste) de acordo com a Tabela 5.3. No Grupo 6 estão os dias 5, 11, 15 e 17. A característica que distingue esse grupo é a componente zonal (de leste) e o vento (quadrante nordeste) mais fracos dentre os seis grupos (Tabela 5.3).

5.3 Análise multivariada de índices de estabilidade

A Análise (Fatorial) de Componentes Principais e a Análise de Agrupamentos também foram aplicadas à matriz dos índices de estabilidade obtidos das sondagens de ar superior da região de Petrolina. Nesta seção é investigada a adequação dos índices de estabilidade como indicadores da ocorrência de chuva na área de Petrolina.

5.3.1 Análise (fatorial) de componentes principais aplicada a índices de estabilidade

A aplicação da ACP aos índices de estabilidade também foi viável de acordo com o teste de KMO, cujo valor é 0,58. Dessa forma, foram retidas três componentes principais (fatores) que representam o comportamento dos índices de estabilidade no mês de abril de 2014, retendo 82,8% da sua variância total.

Na aplicação da ACP aos índices de estabilidade ficaram retidas na primeira CP os índices relacionados com a umidade do ar, com explicação de 37,8% da variância total dos

dados. A Tabela 5.4 evidencia que os índices LI e SI variam de forma oposta aos índices TT, K e CAPE. O segundo fator reteve 26,8% da variância total dos dados, e está correlacionado com os índices que utilizam temperatura potencial equivalente no seu cálculo; o índice KO tem variação inversa em relação aos índices DTel e PII (Tabela 5.4). O terceiro fator agrupa os índices SWEAT e CINE que tem variação oposta e estão relacionados com a dinâmica atmosférica e a inibição convectiva, com explicação de 18,2% da variância total dos dados (Tabela 5.4).

As cargas fatoriais das três CPs retidas na aplicação da ACP à matriz em modo-P dos índices de estabilidade no período de 1 a 29 de abril de 2014 são ilustradas na Figura 5.24. A primeira CP, relacionada com índices que envolvem as variações do teor de umidade do ar (LI, TT, SI, K, CAPE), apresenta carga fatorial máxima (maior do que 1,5) nos dias 6, 7 e 26 e carga fatorial mínima (menor do que -1,5) nos dias 16, 17, e 29. Os dias com carga fatorial máxima são a antevéspera (6) e a véspera (7, 26) dos eventos de chuva dos dias 8 e 27 (Figura 5.1). A variabilidade diária dos índices envolvidos nessa CP é ilustrada por CAPE e LI na Figura 5.25a e por TT e K na Figura 5.25b. O CAPE (LI) tem máximos (mínimos) nos dias 6, 7 e 26 e mínimos (máximos) nos dias 16, 17 e 29. Os índices TT e K indicam alta (baixa) instabilidade nos dias 6, 7 e 26 (16, 17, 29). Dessa maneira, fica evidente que nos dias com cargas fatoriais máximas, os valores dos índices indicam alta instabilidade.

A segunda CP, altamente relacionada com os índices de estabilidade obtidos da temperatura potencial equivalente (DTel, PII, KO) apresenta carga fatorial máxima nos dias 5 e 25 e carga fatorial mínima nos dias 8, 28 e 29 (Figura 5.24). As cargas fatoriais máximas dessa CP estão associadas com valores elevados do índice PII e valores baixos do índice KO nos dias 5 e 25, o que representa uma condição de instabilidade (Figura 5.25c). As cargas fatoriais mínimas nos dias 8, 28 e 29 estão associadas com condições menos instáveis evidenciadas pela Figura 5.25c.

A terceira CP, que está relacionada com os índices SWEAT e CINE, apresenta carga máxima no dia 29 (Figura 5.24), quando o CINE é quase nulo e o SWEAT é maior do que 240 (Figura 5.25d). A carga fatorial é mínima nos dias 4, 8, e 24 (Figura 5.24), quando o CINE atinge valores máximos (em módulo) e o SWEAT é igual ou menor do que 220, indicando condições menos instáveis.

Tabela 5.4 – Fatores rotacionados dos índices de estabilidade no mês de abril de 2014.

Índice	Fator		
	1	2	3
LI	-0,870	-0,318	-0,251
SI	-0,943	0,059	0,010
TT	0,945	-0,130	-0,010
K	0,734	-0,200	-0,380
SWEAT	0,145	-0,051	0,869
CAPE	0,801	0,325	0,366
CINE	-0,053	0,303	0,770
DTel	-0,078	0,863	0,211
PII	0,160	0,897	-0,145
KO	0,035	-0,878	-0,257

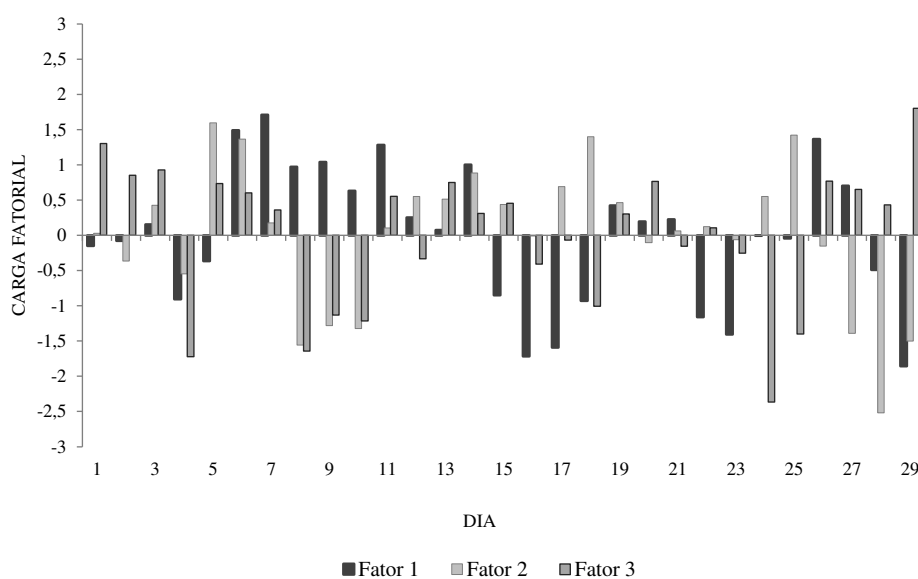


Figura 5.24 – Carga fatorial das componentes principais obtidas para a matriz em modo-P dos índices de estabilidade, no período de 1 a 29 de abril de 2014. A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico.

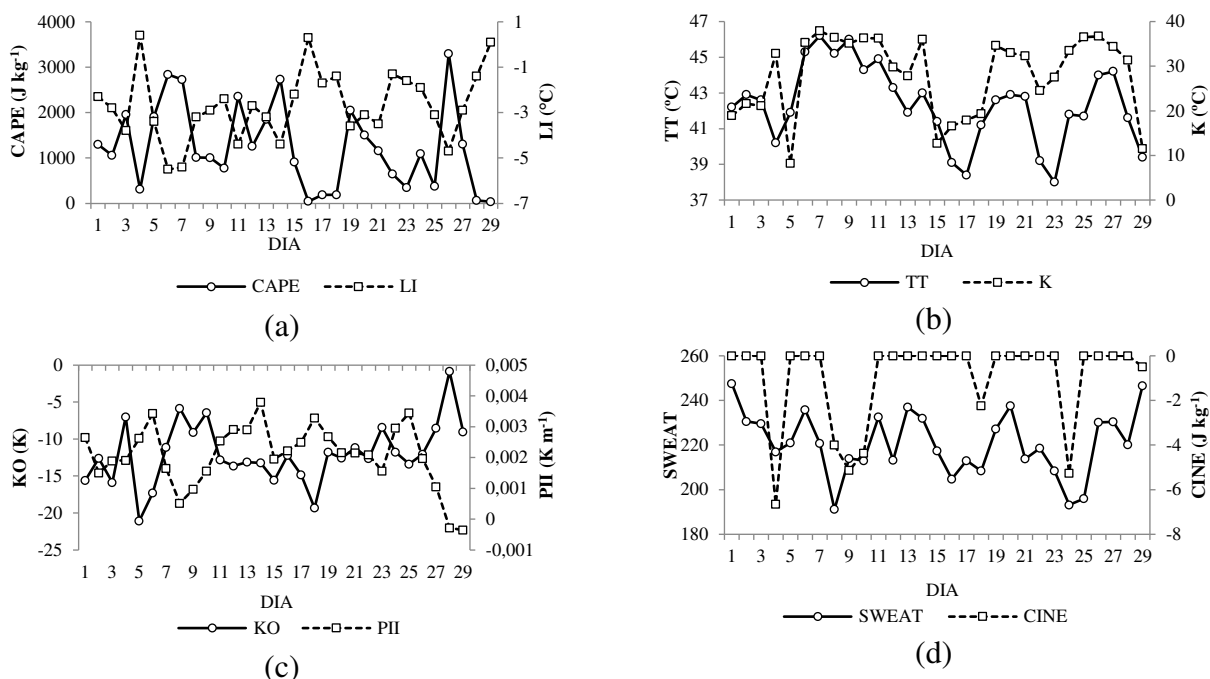


Figura 5.25 – Série temporal de índices relacionados com as componentes principais: (a) CAPE e LI (primeira CP), (b) TT e K (primeira CP), (c) KO e PII (segunda CP) e (d) SWEAT e CINE (terceira CP). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos.

5.3.2 Análise de agrupamentos de índices de estabilidade

A curva de inércia para o agrupamento dos índices de estabilidade está representada na Figura 5.26. A flecha na figura indica o ponto no qual é feito o corte no dendrograma para determinação dos grupos que, no caso, são seis (Tabela 5.5)

O dendrograma para o agrupamento dos índices, utilizando o método de Ward e a distância euclidiana quadrática, está representado na Figura 5.27. No Grupo 1 estão os dias 1, 2, 3, 5, 12, 13, 19, 20 e 21. Esse grupo reúne dias com baixo indicativo de instabilidade de todos os índices à exceção do CAPE e do SWEAT, que apresentam valores consideráveis (Tabela 5.6). O Grupo 2 reúne os dias 6, 7, 11, 14 e 26 (Tabela 5.6), entre os quais estão a antevéspera (6) e a véspera (7 e 26) dos eventos de chuva dos dias 8 e 27 (Figura 5.1). Nesse grupo os índices relacionados com o teor de umidade do ar (LI, SI, TT, K, CAPE) representam alta instabilidade atmosférica, uma indicação de que podem ser úteis na previsão de chuvas na região semiárida do Nordeste do Brasil. O Grupo 3 é formado pelos dias 4, 18, 24 e 25. Esse grupo é caracterizado pelo baixo indicativo de instabilidade dos índices relacionados com o teor de umidade (LI, SI, TT, K e CAPE) mas, em contrapartida, o indicativo de instabilidade dos índices relacionados com a temperatura potencial equivalente é alto (Tabela 5.6). O Grupo 4 é formado pelos dias 15, 16, 17, 22 e 23. A principal característica desse grupo é o baixo

indicativo de instabilidade dos índices relacionados com o teor de umidade. Ele também apresenta valores elevado dos índices relacionados com a temperatura potencial equivalente. O Grupo 5 reúne os dias 8, 9 e 10, cuja instabilidade atmosférica é associada com o comportamento do índice TT, que apresenta valor alto (Tabela 5.6). O Grupo 6 reúne os dias 27, 28 e 29, nos quais os índices indicam baixa instabilidade. (Tabela 5.6).

Dentre os grupos formados com os índices de estabilidade, o indicativo de instabilidade é máximo nos dias do Grupo 2, enquanto que nos dias do Grupo 4, a maioria dos índices indica instabilidade baixa (Tabela 5.6).

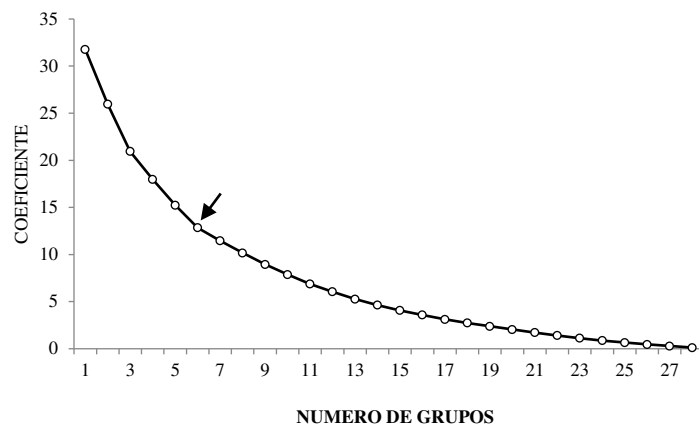


Figura 5.26 – Curva de inércia do agrupamento aplicado aos fatores rotacionados dos índices de estabilidade. A flecha na figura indica a ordem do corte realizado no dendrograma.

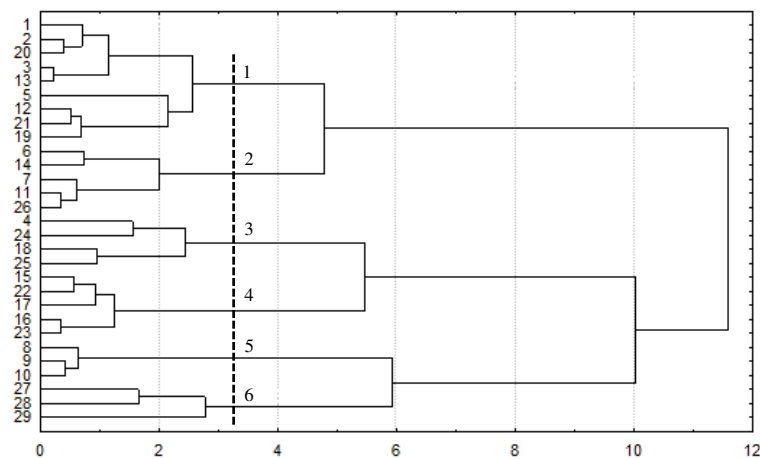


Figura 5.27 – Dendrograma utilizando o método de Ward e a distância euclidiana quadrática para o agrupamento aplicado aos fatores rotacionados dos índices de estabilidade. A linha tracejada indica o corte no dendrograma. Os grupos homogêneos de dias são representados pelos números de 1 a 6.

Tabela 5.5 – Grupo de dias dos índices de estabilidade formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática.

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

Tabela 5.6 – Valores médios dos índices de estabilidade nos grupos homogêneos formados a partir da técnica de agrupamento de Ward com medida de distância euclidiana quadrática. Os números em negrito (negrito e itálico) são os valores médios máximos (mínimos) dos índices de estabilidade.

Variável	Grupo					
	1	2	3	4	5	6
LI (°C)	-3,2	-4,9	-1,5	-1,3	-2,8	-1,4
SI (°C)	0,4	-1,0	1,2	2,7	-1,0	1,0
TT (°C)	42,6	44,7	41,2	39,2	45,2	41,7
K (°C)	25,3	36,4	30,5	19,8	35,9	25,7
SWEAT	228,6	230,3	203,7	212,4	206,1	232,4
CAPE (J kg ⁻¹)	1559,1	2790,0	489,6	426,7	930,2	467,2
CINE (J kg ⁻¹)	0,0	0,0	-3,5	0,0	-4,5	-0,2
DTel (K)	24,9	26,0	26,2	23,7	12,7	16,8
PII (K m ⁻¹)	0,00238	0,00267	0,00290	0,00206	0,00101	0,00014
KO (K)	-14,2	-13,3	-12,9	-12,7	-7,1	-6,1

6 CONCLUSÕES

O mês de abril de 2014 é caracterizado na área de Petrolina por um evento de precipitação intensa ocorrido no dia 8 em associação a um sistema convectivo multicelular (SCm) que se desenvolve em condições de grande escala caracterizada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atuando no extremo norte e ao norte do Nordeste do Brasil, pela alta da Bolívia deslocada para leste de sua posição climatológica e por um cavado de grande amplitude na alta troposfera a leste da América do Sul.

A estrutura vertical da temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial equivalente de saturação indicam um elevado teor de umidade na atmosfera um dia antes, no dia, e um dia após a atuação do SCm.

A aplicação da análise fatorial em componentes principais (ACP) às sondagens diárias de ar superior realizadas às 12 UTC em Petrolina resulta em um modelo com três componentes principais (CPs) nos quatro níveis isobáricos analisados. Nos níveis de 925 e 850 hPa a primeira CP explica as variações da temperatura do ar, a segunda está associada às variações de umidade e a terceira à direção do vento. No nível de 500 hPa a maior parte da variância dos dados está relacionada com as variações de umidade, cujas variáveis ficaram retidas na primeira CP. A segunda CP reteve as variáveis relacionadas com a temperatura e a terceira com a direção do vento. No nível de 200 hPa a primeira CP explica as variações de temperatura, a segunda está relacionada com as variações de umidade, e a terceira com a componente zonal do vento. Os dias com cargas fatoriais máximas estão associados com valores máximos das variáveis relacionadas ao fator que foi dominante, em cada nível. Os dias com cargas mínimas estão relacionados a valores mínimos das variáveis. A aplicação da análise de agrupamentos (AA) aos fatores retidos permite agrupar o mês de abril em seis grupos de dias homogêneos em termos das condições atmosféricas, em cada nível isobárico.

A aplicação da ACP aos valores diários de índices de estabilidade resulta em um modelo com três componentes principais. A primeira CP reúne os índices de estabilidade relacionados com o teor de umidade: CAPE, LI, SI, K e TT. A segunda reúne índices que envolvem a temperatura potencial equivalente (DTeI, PII e KO) e a terceira reúne os índices relacionados com a dinâmica atmosférica e a inibição convectiva (SWEAT e CINE). Os dias com cargas máximas estão relacionados com o máximo indicativo de instabilidade atmosférica dos índices reunidos em cada CP. Os dias com cargas fatoriais mínimas estão associados com a redução da instabilidade atmosférica indicada pelos índices nas três CPs. A aplicação da AA aos fatores

retidos permite agrupar o mês de abril em seis grupos de acordo com o indicativo de instabilidade atmosférica dos índices: os grupos 1, 3 e 6 reúnem dias com baixo indicativo de instabilidade, enquanto que os grupos 2, 4 e 5 reúnem dias com alto indicativo de instabilidade representado pelos índices CAPE, LI, SI, K e TT.

Os índices CAPE, LI, SI, K TT e SWEAT são os que melhor representam mecanismos ou características termodinâmicas e dinâmicas associadas com a atividade convectiva observada em abril de 2014, apresentando as maiores variações nos dias que antecedem os eventos de chuva, uma indicação de que podem ser úteis na previsão desses eventos na região semiárida do Nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B; FILHO, F. A. S; SOUZA, E. B.; DURAN, B. J.; SERVAIN, J.; STUDART, T. M. C. Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o nordeste do Brasil durante janeiro/2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 56-76, 2006
- ANABOR, V. **Análise descritiva dos Sistemas Convectivos de Escala meso- α através de imagens de satélite GOES-8**. 2004. 78p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2004.
- ANJOS, B. L. **Conexões entre a circulação do Hemisfério norte e os Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera na Região Nordeste do Brasil: Um Estudo de Caso**. 1995. 119f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.
- ARAÚJO, H. A. **Padrões de ecos de radar meteorológico no semi-árido brasileiro e condições atmosféricas associadas**. 1996. 130f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1996.
- ATKINS N, WAKIMOTO R. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 6, p. 470-482, 1991
- AWS - AIR WEATHER SERVICE (Estados Unidos). **The Use of the Skew T, Log P Diagram in Analysis and Forecasting**. 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, n. 3, p. 395-410, 2005.
- BENETTI, C.A., DIAS, M.A.F.S. Análise da performance dos índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4 Brasília, out. 1986. Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1986. v. 2, p. 65-70.
- BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 1046-1053, 1980.
- BRITO, B. M.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N.; MOLION, L. C. B.; TENÓRIO, R. S. RODRIGUES, R. N.; SILVA, B. P. Análise do comportamento das trovoadas no estado de Alagoas, previsão à curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 243-256, 2011.
- CAMPOS, C. R. J.; EICHHOLZ, C. W. Características físicas dos sistemas convectivos de mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011.
- CARDOSO, N. K. R. **Relação entre índices de instabilidade e as chuvas ocorridas em Porto Alegre, RS, de 1990 a 2005**. 2007. 94f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Pelotas, 2007.

CORREIA, M. F. **Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro: O evento de 1985**. 1989. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

COSTA, S. B. **Balances de vortacidade e energia aplicados aos Vórtices ciclônicos de altos níveis atuantes no oceano atlântico tropical Sul e adjacências**. 2009. 100f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COSTA, R. L.; SOUZA, E. P.; SILVA, F. D. S. Aplicação de uma teoria termodinâmica no estudo de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 96-104, 2014.

CPTEC/INPE – CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2014, **Banco de dados de imagens**. Disponível em: [http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic](http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes/formulario.logic) Acesso em 21, mai. 2014.

DALEZIOS, N. R.; PAPAMANOLIS, N. K. Objective assessment of 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.

DINIZ, M. C. S.; CORREIA, M. F; SOUSA MELO, E. C.; FARIAS, W. R. G.; SILVA ARAGÃO, M. R. Episódios de cheias na região semi-árida da bacia do Rio São Francisco em abril de 1985: Um estudo das escalas dominantes e condições atmosféricas associadas. **Engenharia Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 277-298, 2011

DWD - DEUTSCHER WETTERDIENST, 2003, **KO index**. Disponível em: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/download.php?file=KO-Index.pdf>, Acesso em 21, out. 2014.

ERSL/NOAA – EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY/ NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2015, **NCEP-DOE Reanalysis 2: Pressure Level**. Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html>. Acesso em 09, set. 2014.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hpa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 105-124, 2014.

EVERITT, B. S. **Cluster Analysis**. London: Edward Arnold, 1993.

FRAGOSO, M. A Utilização de índices de estabilidade no estudo de situações convectivas: o exemplo dos temporais do outono de 1997 em Lisboa. **Finisterra Revista Portuguesa de Geografia**, v. XXXIII, n. 66, p. 59-76, 1998.

HAIR, J. F.; BLACK W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Trad. Adonai S.Sant'Anna e Anselmo C. Neto. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010, **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/amostra/> Acesso em 21, mai. 2014.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2014, **Normais Climatológicas 1961-1990**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normais-climatologicas>. Acesso em 15, mai. 2014.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S-K.; HNILO, J. J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1631-1643, 2002.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1140-1153, 1979

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, p. 538-551, 1981.

KUNZ, M.; SANDER, J.; KOTTMEIER, Ch. Recent trends of thunderstorms and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. **International Journal of Climate**, v. 29, p. 2283–2297, 2009.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B. Structural radiative and characteristics of tropical cloud clusters. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 12, p. 3234–3260, 1993.

MADDOX, R. A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. **Monthly Weather Review**, v. 111, p. 1475 -1493, 1983.

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

MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A. Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of Northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 493–512, 2007.

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, n. 1, p. 121-140, 2005.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 56, p. 529-530, 1975.

QUEIROZ, J. N.; SILVA ARAGÃO, M. R.; SOUSA, L. F.; RIBEIRO, R. E. P.; CORREIA, M. F. Mecanismos físicos em mês extremo chuvoso na cidade de Petrolina. Parte 1: Análise em componentes principais. In: I WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 2013, Campina Grande. **Anais Eletrônicos**. Campina Grande, UFCG, 2013. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/aguanosemiarido/anais.php>. Acesso em 21, mai. 2014.

QUEIROZ, J. N.; SOUSA, L. F.; RIBEIRO, R. E. P.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Fatores físicos na atmosfera do semiárido brasileiro em janeiro de 2004. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 990-1001, 2014.

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

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

SANTOS, S. A. **Análise do controle ambiental nas trocas de energia, vapor d'água e CO₂ em área de caatinga**. 2011. 82f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, S. R. Q. **Determinação de regiões homogêneas do índice de precipitação normalizada (SPI) no Estado do Pará por meio de análise multivariada**. 2013, 97f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A. Characteristics of C-band meteorological radar echoes at Petrolina, Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 20, p. 279-298, 2000.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; SOBRAL, Z. R. Vento à superfície e chuva em anos contrastantes no Submédio São Francisco. **Boletim Climatológico**, Presidente Prudente-SP, n. 3, p. 213-217, 1997.

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, B. F. P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; PERESETSKY, A.; BRITO, B. M. A. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 323-338, 2011a

SILVA, C. M. S.; SILVA, F. R.; LEME, N. P. Ciclo anual da 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, 2011b.

SILVA DIAS, M. A. F., 2000. **Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas**. Disponível em: http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/indice_sweat.pdf. Acesso em 15, mar. 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 de meso e grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 292-304, 2008.

SOUSA, L. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; RIBEIRO, R. E. P.; QUEIROZ, J. N.; CORREIA, M. F. Mecanismos físicos em mês extremo chuvoso na cidade de Petrolina. Parte 2: Análise de agrupamentos. In: I WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 2013, Campina Grande. **Anais Eletrônicos**. Campina Grande, UFCG, 2013. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/revistas/aguanosemiarido/anais.php>. Acesso em 21, mai. 2014.

SOUZA, P. P. **Estudo da atuação de um sistema de latitudes médias no semi-árido do Nordeste do Brasil: Aspectos de meso e grande escalas**. 2003. 102f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

STATHIS, D.; MYRONIDIS, D. Principal component analysis of precipitation in Thessaly Region (Central Greece). **Journal NEST Global**, v. 11, n. 4, p. 467-476, 2009.

XAVIER, T. M. B.; XAVIER, A. F. S.; DIAS, P. L. S.; DIAS, M. A. F. S. A Zona de Convergência Intertropical - ZCIT e suas relações com a chuva no Ceará (1964-98). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 1, p. 27-43, 2000.

ZAWADZKI, I.; TORLARCHI, E.; SAUVAGEAU, R. The relationship between mesoscale thermodynamic variables and convective precipitation. **Journal of the Atmospheric Science**, v. 38, p. 1535-1540, 1981.



UFCG - CTRN - UACA - PPGMet
AV. Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário
58.429-140 Campina Grande - Paraíba
Fone: (83)2101-1054 - Fax: (83)2101-1650