

**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 em componentes principais das condições atmosféricas em episódios de rajadas de vento na Região Metropolitana de Salvador

Alexsandra Barbosa Silva

Campina Grande, Março de 2014.



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 EM COMPONENTES PRINCIPAIS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS
EM EPISÓDIOS DE RAJADAS DE VENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR**

ALEXSANDRA BARBOSA SILVA

CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO DE 2014

ALEXSANDRA BARBOSA SILVA

**ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS
EM EPISÓDIOS DE RAJADAS DE VENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR**

Dissertação 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 Escala

Sub-área: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Profa. Dra. Maria Regina da Silva Aragão

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a

Silva, Alexsandra Barbosa.

Análise em componentes principais das condições atmosféricas em episódios de rajadas de vento na região metropolitana de Salvador / Alexsandra Barbosa Silva. – Campina Grande, 2014.

84f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.

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

1. Evento Extremo de Vento. 2. Área Urbana. 3. Análise Multivariada.
4. Ambiente Sinótico. I. Aragão, Maria Regina da Silva. II. Título.

CDU 551.5(043)

**ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS
EM EPISÓDIOS DE RAJADAS DE VENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR**

ALEXSANDRA BARBOSA SILVA

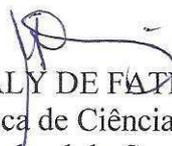
ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM
EPISÓDIOS DE RAJADAS DE VENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11/03/2014

BANCA EXAMINADORA



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



Profa. Dra. MAGALY DE FATIMÁ CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. ALDINETE BEZERRA BARRETO
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento
Universidade Federal de Campina Grande

À minha mãe Maria de Lourdes.

"Mesmo quando tudo parece desabar,
cabe a mim decidir entre
rir ou chorar,
ir ou ficar,
desistir ou lutar;
porque descobri,
no caminho incerto da vida,
que o mais importante é o decidir"

Cora Coralina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelos dons recebidos e que, com estes, me fez brilhar dentre muitos.

A família, que me deu base e me ensinou os valores que precisava para enfrentar a vida.

A Klercio pelo amor, compreensão e incentivo para continuar lutando e vencendo.

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

À professora Dra. Maria Regina da Silva Aragão pelo tempo dedicado e pela orientação deste trabalho mediante paciência, compreensão e estímulo.

À professora Dra. Magaly de Fatima Correia pelas discussões e sugestões para esse trabalho.

Aos professores pelos ensinamentos ao longo do curso. Todos tiveram um alto grau de significância para a minha formação acadêmica. A Divanete Cruz Rocha pela assistência em muitos momentos.

À equipe da Biblioteca Central pela prontidão.

Aos amigos, pessoas raras com as quais compartilhei todas as minhas dificuldades e vitórias, em especial a Milla Nóbrega de Menezes Costa.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O foco deste trabalho são as rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. Variáveis meteorológicas observadas à superfície na área do aeroporto, imagens de satélites meteorológicos e dados em pontos de grade são utilizados para analisar a variabilidade interanual, sazonal e horária das rajadas, identificar escalas e fatores físicos envolvidos através da análise em componentes principais, e diagnosticar as condições sinóticas de dois episódios selecionados. Foram contabilizadas 63 rajadas de vento, sendo 51% em 2003 e 2007. Ventos do setor sul são os mais frequentes e a frequência horária é mínima entre meia noite e 7 horas da manhã. Nos meses de maio de 2007 e 2009 o número de rajadas é máximo. Os fatores retidos na análise em componentes principais indicam a contribuição das escalas de tempo sinótica e diária nesses meses. O mês de maio de 2007 tem cinco registros de rajadas de vento, nos dias 10 e 11. Dentre elas está a mais intensa do período 2003-2011 (68,5 km/h). No mês de maio de 2009 também há cinco registros, todos no dia 22. A análise sinótica desses dias de rajadas evidencia o papel desempenhado por: (a) um sistema frontal austral no primeiro episódio (10-11 de maio de 2007), e (b) um cavado na área dos ventos alísios, no leste do Nordeste do Brasil, no segundo episódio (22 de maio de 2009). À exceção de uma, todas as rajadas de vento ocorreram na presença de nuvens de convecção profunda (cumulus congestus). A Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador (CODESAL) registrou atendimentos nos dias das rajadas de vento associando a ocorrência dos desastres a fatores meteorológicos como ventos fortes.

Palavras-chave: evento extremo de vento, área urbana, análise multivariada, ambiente sinótico, Nordeste do Brasil.

ABSTRACT

The focus in this work is the wind gusts registered at the Salvador International Airport during the period 2003-2011. Surface meteorological variables observed within the airport area, meteorological satellite images and gridpoint data are used to analyze the wind gusts interannual, seasonal and hourly variability, to identify scales and physical factors involved by means of the principal component analysis, and to diagnose the synoptic conditions of two selected episodes. A total of 63 wind gusts were found; 51% occurred in 2003 and 2007, altogether. Gusts on the south sector of the wind rose are the most frequent. The hourly frequency of the gusts has a minimum between midnight and 7 A. M. May 2007 and 2009 have the maximum number of wind gusts. The factor loadings retained in the principal component analysis indicate the contribution of the synoptic and daily time scales in these months. On May 2007 there are five wind gusts, on the 10th and 11th, including the strongest of the period of study (68.5 km/h). On May 2009 there are five wind gusts also, on the 22th. The synoptic analysis of these gust days highlights the role played by: (a) an austral frontal system on the first episode (10-11 May 2007), and (b) a trough on the trades over the Northeast Brazil eastern area on the second episode (22 May 2009). All wind gusts, with exception of one, occurred in the presence of deep cumulus clouds (cumulus congestus). The Civil Defense of Salvador (CODESAL) indicates that the disasters registered on these days are due to meteorological factors such as strong winds.

Keywords: extreme wind event, urban area, multivariate analysis, synoptic environment, Northeast Brazil

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

I. –	LISTA DE FIGURAS.....	11
II. –	LISTA DE TABELAS.....	16
III. –	LISTA DE QUADROS.....	17
IV. –	LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	18
V. –	LISTA DE SÍMBOLOS.....	19
1.0 –	INTRODUÇÃO.....	20
2.0 –	OBJETIVOS.....	21
2.1 –	OBJETIVO GERAL.....	21
2.2 –	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3.0 –	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.0 –	DADOS E METODOLOGIA.....	26
4.1 –	DADOS.....	26
4.2 –	METODOLOGIA.....	27
4.2.1 –	Análise de Características do Vento.....	28
4.2.1.1 –	Frequência de Direções em Setores da Rosa dos Ventos.....	29
4.2.1.2 –	Velocidade Média em Setores da Rosa dos Ventos.....	31
4.2.1.3 –	Velocidade Média Horária.....	33
4.2.1.4 –	Eventos de Rajadas de Vento.....	33
4.2.2 –	Análise em Componentes Principais.....	34
4.2.2.1 –	Descrição do Método.....	36
4.2.2.2 –	Rotação dos Fatores.....	37
4.2.3 –	Análise Sinótico-Dinâmica e Termodinâmica.....	37

5.0 –	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 –	ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO.....	40
5.2 –	ESTATÍSTICA DAS RAJADAS DE VENTO.....	44
5.3 –	O EPISÓDIO DE MAIO DE 2007.....	46
5.3.1 –	Análise em Componentes Principais.....	47
5.3.2 –	Análise da variação de elementos meteorológicos observados à superfície.....	49
5.3.3 –	Análise da nebulosidade e da circulação atmosférica.....	52
5.4 –	O EPISÓDIO DE MAIO DE 2009.....	61
5.4.1 –	Análise em Componentes Principais.....	62
5.4.2 –	Análise da variação de elementos meteorológicos observados à superfície.....	64
5.4.3 –	Análise da nebulosidade e da circulação atmosférica.....	66
6.0 –	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

I. LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1 – (a) Região Nordeste do Brasil e localização aproximada da Região Metropolitana de Salvador (RMS) (círculo vermelho) e (b) Divisão das 18 regiões administrativas da RMS. (Lei n° 7.400/2008; n° 8.167/2012).....27
- Figura 5.1 – Distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o ano de: (a) 2003, (b) 2004, (c) 2005, (d) 2006, (e) 2007, (f) 2008, (g) 2009, (h) 2010, (i) 2011 e (j) média do período 2003-2011. Os valores das circunferências representam simultaneamente a velocidade (km/h) e a frequência de direção (em porcentagem). Os valores dos raios representam a direção central dos setores de direção do vento. O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....41
- Figura 5.2 – Distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro e (l) dezembro. Os valores das circunferências representam simultaneamente a velocidade (km/h) e a frequência de direção (em porcentagem). Os valores dos raios representam a direção central dos setores de direção do vento. O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....42
- Figura 5.3 – Distribuição horária (UTC) da velocidade média do vento observado (km/h) no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro e (l) dezembro. Observe que Hora Local = Hora UTC - 3 horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....43
- Figura 5.4 – Distribuição anual do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....44
- Figura 5.5 – Distribuição mensal do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....45

- Figura 5.6 – Distribuição horária do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. Observe que a hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....45
- Figura 5.7 – Distribuição por setor do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....46
- Figura 5.8 – Distribuição do número percentual de casos de direção (a) e velocidade média (km/h) (b) nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2007 (contínua) e para a média de maio do período 2003-2011 (tracejado). O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo do gráfico de direção. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....49
- Figura 5.9 – Distribuição dos valores médios diários de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2007: (a) pressão (P), (b) temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....51
- Figura 5.10 – Distribuição dos valores horários da velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em 10 de maio de 2007. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....51
- Figura 5.11 – Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 10 de maio de 2007 às (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC e (c) 1800 UTC, e para o dia 11 de maio de 2007 às (d) 0000 UTC. A circunferência preta está aproximadamente centrada sobre Salvador. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).....54
- Figura 5.12 – Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-10 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para o dia 10 de maio de 2007 às: (a) 1215 UTC, (b) 1800 UTC, (c) 2100 UTC, (d) 2130 UTC, (e) 2145 UTC, (f) 2215 UTC, (g) 2300 UTC e (h) 2345 UTC. A escala de cores da temperatura de brilho é vista abaixo das imagens (Fonte das imagens: Adaptado de http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp).....55

- Figura 5.13 – Pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa) para as 0000 UTC do dia (a) 10/05/2007 e (b) 11/05/2007. O intervalo de análise é de 2 hPa. A letra A (B) assinala um centro de alta (baixa) pressão. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....56
- Figura 5.14 – Análise de linhas de corrente e velocidade do vento para as 0000 UTC do dia 11 de maio de 2007 nos níveis de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa. A intensidade do vento está representada por: cinza escuro para $60 \text{ m/s} \leq V$ ($30 \text{ m/s} \leq V$) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$ ($20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa), e cinza claro para $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$ ($10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa). A linha tracejada vermelha em (a,b) assinala um eixo de cavado. A letra A assinala um centro anticiclônico. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....57
- Figura 5.15 – Componente vertical da vorticidade relativa para as 0000 UTC do dia 10 de maio de 2007 no nível de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa e no dia 11 no nível de: (d) 850 hPa, (e) 500 hPa e (f) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). O traço vermelho indica um núcleo de vorticidade ciclônica no Hemisfério Sul. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....58
- Figura 5.16 – Umidade específica em 11 de maio de 2007 às 0000 UTC no nível de (a) 850 hPa e (b) 925 hPa. O intervalo de análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....59
- Figura 5.17 – Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 13°S no dia 10/05/2007 às: (a) 0000UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC e (d) 1800 UTC, e no dia 11/05/2007 às: (e) 0000 UTC e (f) 0600 UTC. O intervalo de análise é de $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). A linha contínua vermelha marca a longitude de Salvador (38°W). (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....60
- Figura 5.18 – Distribuição do número percentual de casos de direção (a) e velocidade média (km/h) (b) nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2009 (contínua) e para os meses de maio do período 2003-2011 (tracejado). O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo do gráfico de direção. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....64

- Figura 5.19 – Distribuição dos valores médios diários de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2009: (a) pressão (P), (b) temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....65
- Figura 5.20 – Distribuição dos valores horários da velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em 22 de maio de 2009. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).....66
- Figura 5.21 – Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 22 de maio de 2009 às (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC e às (d) 1800 UTC. A circunferência preta está aproximadamente centrada sobre Salvador. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).....68
- Figura 5.22 – Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-10 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para o dia 21 de maio de 2009 às: (a) 1800 UTC, (b) 2100 UTC e, para o dia 22 às (c) 0000 UTC, (d) 0130 UTC, (e) 0200 UTC, (f) 0400 UTC, (g) 0500 UTC e às (h) 1800 UTC. A escala de cores da temperatura de brilho é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: Adaptado de http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp).....69
- Figura 5.23 – Pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa) para as 0000 UTC do dia: (a) 21/05/2009 e (b) 22/05/2009. O intervalo de análise é de 2 hPa. A letra A (B) assinala um centro de alta (baixa) pressão. A linha tracejada vermelha assinala um eixo de cavado. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....70
- Figura 5.24 – Análise de linhas de corrente e velocidade do vento para as 0000 UTC do dia 22 de maio de 2009 nos níveis de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa. A intensidade do vento está representada por: cinza escuro para $60 \text{ m/s} \leq V$ ($30 \text{ m/s} \leq V$) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$ ($20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa), e cinza claro para $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$ ($10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa). A linha tracejada vermelha em (a) assinala um eixo de cavado. A letra A (C) assinala um centro anticiclônico (ciclônico). (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....71

- Figura 5.25 – Componente vertical da vorticidade relativa para as 0000 UTC do dia 21 de maio de 2009 no nível de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa e no dia 22 no nível de: (d) 850 hPa, (e) 500 hPa e (f) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). O traço vermelho indica um núcleo de vorticidade ciclônica no Hemisfério Sul. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....73
- Figura 5.26 – Umidade específica em 22 de maio de 2009 às 0000 UTC no nível de (a) 850 hPa e (b) 925 hPa. O intervalo de análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....74
- Figura 5.27 – Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 13°S no dia 21/05/2009 às: (a) 1200 UTC e (b) 1800 UTC, e 22/05/2009 às: (c) 0000 UTC, (d) 0600 UTC, (e) 1200 UTC e (f) 1800 UTC. O intervalo de análise é de $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). A linha contínua vermelha marca a longitude de Salvador (38°W). (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).....75
- Figura 5.28 – Perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e), potencial equivalente de saturação (θ_{es}), e das componentes zonal (u), meridional (v) e velocidade (V) do vento obtidos de sondagem realizada na estação de altitude de Salvador-BA às 12 UTC do dia: (a, c) 21/05/2009 e (b,d) 22/05/2009. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam a componente de sul (norte). Observe que a hora local (HL) é $\text{HL} = \text{UTC} - 3 \text{ horas}$. (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).....76

II. LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada de maio de 2007.....	48
Tabela 5.2 – Matriz dos componentes rotacionados de maio de 2007.....	48
Tabela 5.3 – Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada de maio de 2009.....	63
Tabela 5.4 – Matriz dos componentes rotacionados de maio de 2009.....	63

III. LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Decodificação da quantidade de nuvens das mensagens METAR e SPECI.....	28
Quadro 4.2 – Classificação dos setores de direção do vento.....	29
Quadro 4.3 – Categorias de nebulosidade na matriz da análise em componentes principais.....	35
Quadro 5.1 – Data, horário, direção/setor e velocidade das rajadas de vento registradas em maio de 2007 nas mensagens METAR/SPECI do Aeroporto Internacional de Salvador. (Fonte dos dados: http://www.redemet.aer.mil.br).....	46
Quadro 5.2 – Distribuição horária (UTC) em três grupos de cobertura (%) acrescido do grupo adicional e altura da base (m) de nuvens existentes na área do Aeroporto Internacional de Salvador no dia 10 e nas primeiras horas de 11 de maio de 2007. As camadas são numeradas da mais baixa para a mais alta. A abreviatura usada para o tipo de nuvem representa TCU = Torre de Cumulus Congestus. Observe que hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: http://www.redemet.aer.mil.br).....	53
Quadro 5.3 – Data, horário, direção/setor e velocidade das rajadas de vento registradas em maio de 2009 nas mensagens METAR do Aeroporto Internacional de Salvador. (Fonte dos dados: http://www.redemet.aer.mil.br).....	61
Quadro 5.4 – Distribuição horária (UTC) em três grupos de cobertura (%) acrescido do grupo adicional e altura da base (m) de nuvens existentes na área do Aeroporto Internacional de Salvador nas últimas horas de 21 de maio de 2009 e no dia 22. As camadas são numeradas da mais baixa para a mais alta. A abreviatura usada para o tipo de nuvem representa TCU = Torre de Cumulus Congestus. Observe que hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: http://www.redemet.aer.mil.br).....	67

IV. LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Análise de Agrupamento
ACP	Análise em Componentes Principais
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CB	Cumulonimbus
CODESAL	Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
FOE	Funções Ortogonais Empíricas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KMO	Kayser - Meyer - Olkin
MSA	Measure of Sampling Adequacy
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Predictions
NCL	Nível de condensação por levantamento
NEB	Nordeste do Brasil
OMJ	Oscilação de Madden e Julian
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RMS	Região Metropolitana de Salvador
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
TCU	Cumulus congestus
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

V. LISTA DE SÍMBOLOS

a	ano
d	dia
E	matriz de autovetores
e	pressão real de vapor
e_s	pressão de vapor à saturação
h	hora
i	número de linhas
j	número de colunas
M	matriz de dados
m	mês
θ	temperatura potencial
θ_e	temperatura potencial equivalente
θ_{es}	temperatura potencial equivalente de saturação
P	pressão
q	umidade específica
R	matriz de correlação
r	razão de mistura
r_s	razão de mistura de saturação
T	temperatura
Td	temperatura do ponto de orvalho
T_L	temperatura no nível de condensação por levantamento
u	componente zonal do vento
U	matriz de componentes principais
UR	umidade relativa
v	componente meridional do vento

1.0 INTRODUÇÃO

O vento é uma variável de grande importância prática, cuja variabilidade no tempo e no espaço está relacionada com fatores como a época do ano, o relevo, a cobertura vegetal, etc. O conhecimento da sua variabilidade pode ter aplicações como a validação de modelos, o monitoramento e controle da dispersão de poluentes, a utilização como fonte de energia renovável ou em operações de pouso e decolagem de aeronaves, além de ser subsídio para avaliação de riscos relacionados à ocorrência de eventos extremos (JIMÉNEZ et al., 2008).

Há duas condições de vento que merecem atenção especial pelo risco potencial que representam: a rajada de vento (“*wind gust*”) e a cortante de vento (“*wind shear*”). As rajadas de vento são fenômenos meteorológicos caracterizados pela mudança repentina na velocidade e/ou direção do vento em um pequeno intervalo de tempo, enquanto que a cortante de vento é definida como uma variação local na direção e velocidade em dada camada, a baixa altura. Eventos de rajadas e cortantes de vento são fundamentais para a Segurança de Voo e Defesa Civil, uma vez que eles são mais frequentes próximo à superfície e favorecem a ocorrência de acidentes aeronáuticos e desastres em superfície.

O número de estudos sobre eventos extremos de vento (rajadas) registrados em áreas com grande densidade populacional é escasso, embora a ocorrência de tais eventos meteorológicos interfira no cotidiano das pessoas por acarretar transtornos quando causam destelhamento de imóveis, tombamento de árvores, etc. As rajadas de vento são ventos fortes que podem ser originados por nuvens de convecção profunda, isoladas ou organizadas, correntes de jato de baixos níveis, sistemas frontais, linhas de instabilidade, sistemas de brisas, fortes inversões de temperatura, etc.

Segundo Confalonieri (2003), os registros de ocorrências de desastres são mais frequentes em grandes aglomerados urbanos devido a sua infraestrutura deficiente e ocupação desordenada, o que aumenta a sua vulnerabilidade. No Brasil, a Região Metropolitana de Salvador (RMS), com 3.573.973 habitantes e extensão de 4.375 km², exemplifica como a ação antrópica sobre o meio ambiente representada pela urbanização tem impactos intensos e diversificados que maximizam a ação de fenômenos naturais adversos (COSTA e GIUDICE, 2012). A Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador (CODESAL) disponibiliza informações com o histórico de acidentes na cidade e, em muitos casos, associa a ocorrência dos desastres a fatores meteorológicos como chuva ou ventos fortes. Assim, a motivação para esta pesquisa se baseou no pressuposto de que estudos sobre o vento na Região Metropolitana de Salvador podem gerar informações que possibilitem prevenir ou minimizar desastres nessa região.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade do vento na Região Metropolitana de Salvador (RMS), com ênfase em meses com eventos de rajadas de vento e mecanismos físicos envolvidos, através da análise em componentes principais e análise meteorológica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (a) Determinar características médias do vento,
- (b) Determinar a frequência das rajadas de vento e a sua variabilidade interanual, sazonal e horária,
- (c) Identificar os fatores físicos dominantes em meses selecionados pela magnitude e frequência dos eventos de rajadas.
- (d) Diagnosticar os sistemas meteorológicos que atuaram nos dias com eventos de rajadas.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao estudar o clima de uma região é importante conhecer as características climatológicas de vários elementos tais como precipitação, temperatura, velocidade e direção do vento e outros. Entretanto, a precipitação ainda é a variável meteorológica que tem motivado mais estudos, principalmente em áreas metropolitanas e cidades de grande porte, a exemplo das localizadas na Região Nordeste.

Segundo Andreoli e Kayano (2006) e Ferreira e Mello (2005), entre outros, os oceanos Pacífico e Atlântico influenciam a distribuição das chuvas no Nordeste do Brasil. O El Niño/La Niña ou o Dipolo do Atlântico podem alterar a frequência de ocorrência, a intensidade e a duração dos sistemas meteorológicos que atuam na região durante o período chuvoso. Na mesma escala espacial, a Oscilação de Madden e Julian (OMJ) também influencia os totais pluviométricos da região (SOUZA e AMBRIZZI, 2006).

Um importante sistema precipitante no Nordeste é o VCAN, porém sua atuação pode resultar em chuva abaixo ou acima da média, dependendo de sua localização. Num estudo direcionado para os VCAN no Atlântico Tropical Sul, Kousky e Gan (1981) observaram que tais sistemas são mais frequentes durante o verão, e que podem se formar ou intensificar quando sistemas frontais penetram em latitudes baixas. O avanço de vórtices em direção à costa brasileira, próximo a Salvador-Bahia, modifica o tempo em todo o Nordeste do Brasil.

Bandeira e Melo (2006) avaliaram a atuação de VCAN sobre o Nordeste do Brasil para casos de janeiro de 2004 e 2006, observando excesso de chuva em 2004 e déficit em 2006. Os eventos foram associados ao posicionamento da alta da Bolívia, que em 2004 contribuiu para que a borda convectiva do VCAN favorecesse a chuva sobre o NEB, enquanto que no ano de 2006 contribuiu para que o centro do VCAN permanecesse sobre o NEB, reduzindo o total pluviométrico. No estudo de um evento de janeiro de 2004, Silva e Silva (2006) evidenciaram o deslocamento do sistema para o interior do continente e seu posicionamento sobre o extremo sul da Bahia durante o período de intensificação.

Correia et al. (2013) avaliaram o processo de desestabilização da atmosfera e a evolução da atividade convectiva na região do semiárido brasileiro e observaram, através da análise em componentes principais, que o grau de instabilidade atmosférica aliado ao teor e transporte zonal de umidade na baixa troposfera foi fundamental na ocorrência da convecção profunda e chuva intensa em janeiro de 2004. No mesmo mês, foi registrado um grande volume de precipitação na maior parte do Nordeste do Brasil, o que Alves et al. (2006)

associaram à interação da ZCIT com incursões de frentes frias no centro-sul do NEB, e a episódios de VCAN e da oscilação de 30-60 dias.

Molion e Bernardo (2002) estudaram a dinâmica das chuvas no NEB classificando os mecanismos produtores de chuva em mecanismos de grande escala e mecanismos de mesoescala ou pequena escala. Os autores indicaram ainda que o principal mecanismo de precipitação em parte do Nordeste (praticamente toda a Bahia, sul do Maranhão e Piauí e extremo sudoeste de Pernambuco) é o avanço de sistemas frontais sobre a área, enquanto que a precipitação na faixa costeira do leste do Nordeste (conhecida como Zona da Mata) está relacionada com a convergência de umidade associada aos ventos alísios, aos distúrbios ondulatórios de leste, aos sistemas de brisa, e à convecção local associada à topografia.

De acordo com Kousky (1979), a Região Nordeste é frequentemente influenciada por sistemas frontais que favorecem o alto índice de precipitação na parte sul (interior da Bahia) da região. O deslocamento e avanço de tais sistemas provocam mudanças significativas no vento (para a direção sul) e nos valores de temperatura e pressão (redução dos valores), a exemplo das variações observadas nesses elementos meteorológicos na cidade de Caravelas (sul da Bahia) durante as passagens frontais que foram investigadas.

Rocha et al. (2011) estudaram dois eventos extremos de chuva registrados em maio de 2006, na cidade de Salvador. Eles diagnosticaram que o primeiro foi favorecido pelo posicionamento da ZCIT mais ao sul, associado à circulação de brisa e linhas de instabilidade, enquanto que o segundo foi relacionado com um sistema frontal que avançou sobre o continente intensificando a convecção.

Santos et al. (2012) estudaram um evento extremo de chuva de Salvador buscando caracterizar as condições atmosféricas e os impactos causados na cidade. Tal episódio foi associado a um distúrbio ondulatório de leste (DOL) que atingiu a costa leste do Nordeste desenvolvendo convecção profunda organizada na área. O período de chuva intensa favoreceu a ocorrência de deslizamentos de encosta, desabamento de casas e inundações registrados pela CODESAL, fazendo com que o governo municipal decretasse situação de emergência no dia 13 de junho de 2006. A presença de nuvens cumuliformes profundas e precipitação de moderada a forte também foi diagnosticada em eventos de DOL no litoral norte do Nordeste por Coutinho e Fish (2007).

Já é fato a vulnerabilidade das áreas urbanas aos eventos extremos de precipitação. No entanto, poucos estudos tem relatado os eventos extremos de vento para essas regiões. No caso da Região Metropolitana de Salvador, Oliveira Silva et al. (2009) discutiram algumas das características associadas ao episódio de rajadas de vento registrado no mês de maio de 2007.

Recentemente, Barbosa Silva et al. (2013) analisaram a variabilidade interanual, sazonal e horária das rajadas, e diagnosticaram as condições sinóticas associadas ao evento mais intenso do período 2003-2011, registrado em 11 de maio de 2007. As autoras associaram o evento extremo de vento à passagem de um sistema frontal em Salvador, evidenciada pela variação diária de elementos atmosféricos observados à superfície na estação meteorológica do aeroporto da cidade. Na investigação de episódios de rajadas de vento registrados no mês de setembro de 2006, Barbosa Silva et al. (2011) evidenciam que as rajadas de vento registradas ocorreram após a passagem de sistemas frontais, sob o domínio do centro de alta pressão situado na retaguarda desses sistemas.

Alguns autores utilizam as técnicas da Análise Multivariada para estudar características do vento. Os estudos têm sido realizados com o objetivo de identificar regiões homogêneas e regimes climáticos do vento à superfície em escala regional; nestes a Análise em Componentes Principais (ACP) e Análise de Agrupamento (AA) são as mais utilizadas.

Jiménez et al. (2008) empregaram a análise multivariada para caracterizar a variabilidade do vento em terreno acidentado na Espanha concluindo que ambas as técnicas, ACP e AA, produziram resultados semelhantes detectando padrões nas componentes zonal (u) e meridional (v) do vento de acordo com as características do terreno. Segundo os autores, a regionalização pode ser utilizada para validar simulações de modelos sobre a região, analisar a dispersão de poluentes e possibilitar uma melhor compreensão da interação entre os movimentos de escala sinótica e os fluxos de superfície. Nos Estados Unidos, Klink (1999) analisou os dados médios de vento do período entre 1961 e 1990 com o objetivo de obter informações que pudessem ser acrescentadas à climatologia de superfície do país. Assim como Jiménez et al. (2008), a autora indica que a topografia exerce grande influência no comportamento do vento e chama a atenção para as variações de direção do vento, que são maiores nas estações de transição da primavera e outono.

Correia (2000) investigou as componentes zonal e meridional do vento à superfície na Região Nordeste com técnicas da análise multivariada, ACP e AA. O autor mostrou que apesar do sinal da grande escala ser representado pelos primeiros fatores e ser associado à atuação de sistemas com características distintas, existe um sinal de interação entre a grande escala e as circulações locais nos componentes que explicam uma menor porcentagem da variância, assim identificando padrões temporais que foram associados principalmente à circulação média de grande escala (ASAS) e às características do terreno.

Utilizando as técnicas da ACP e AA, Oliveira Silva (2011) investigou as características do vento na área costeira do Nordeste do Brasil. A autora discutiu padrões do

vento médio mensal associados à atuação da ASAS e outros sistemas de grande escala. As técnicas multivariadas identificaram regiões homogêneas e padrões sazonais do vento à superfície, além de meses com características distintas. Num estudo semelhante, Oliveira Silva et al. (2011) evidenciaram regiões homogêneas de vento caracterizadas por velocidades máximas e mínimas, e uma região com padrão de direção diferente das demais. Todas foram relacionadas com sistemas meteorológicos que atuam na área.

Barreto (2001), buscando identificar regiões com características semelhantes, também utilizou as técnicas da ACP e AA para investigar o ciclo diário do vento à superfície em 77 estações no Nordeste do Brasil no período de 1979 a 1981 e observou que os quatro primeiros fatores explicaram 89,9% da variância total dos dados. O estudo indicou que a escala de tempo diária está diretamente relacionada com processos de circulação de mesoescala e que todas as circulações locais interagem com o escoamento de grande escala.

No estudo direcionado para a variabilidade do vento na RMS, Oliveira Silva et al. (2008) observaram um ciclo diário nas séries de velocidade média horária, que apresenta valores máximos no período diurno e valores mínimos à noite e início da manhã. Tal padrão foi associado à interação entre a circulação de grande escala (ventos alísios associados a ASAS) e a circulação local (sistema de brisas). Outra indicação dessa interação resultou do estudo de Silva Aragão et al. (2008), realizado com totais horários de precipitação, que evidenciou frequência mínima de chuva no período da tarde, e máxima na madrugada e início da manhã, favorecida pela convergência entre a brisa terrestre e os ventos alísios.

A revisão apresentada evidencia a escassez de estudos relacionados a eventos extremos de vento em áreas densamente povoadas, que são aquelas que mais sofrem transtornos devido a variações nas características médias do vento, seja na direção e/ou velocidade. Neste sentido torna-se imprescindível o estudo deste elemento meteorológico e seus eventos extremos na Região Metropolitana de Salvador.

4.0 DADOS E METODOLOGIA

4.1 DADOS

Neste trabalho foram utilizados diversos conjuntos de dados. Um deles são as mensagens com codificação METAR e SPECI, que são informações meteorológicas sobre condições do tempo em um aeródromo (BRASIL, 2008; BRASIL, 2012; CORREIA, 1995). Elas se encontram disponíveis na Internet através da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). As mensagens METAR são informes registrados em intervalos regulares de uma hora, enquanto que as SPECI descrevem informações meteorológicas com variações significativas nos intervalos das observações regulares (BRASIL, 2012).

As observações meteorológicas utilizadas foram os dados de superfície de velocidade e direção do vento, visibilidade, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão e nebulosidade referentes ao período de janeiro de 2003 a dezembro de 2011. Esses dados foram usados nas várias análises descritas na próxima seção. Eles foram observados na estação meteorológica de superfície com coordenadas (12°54'S, 38°19'W, 15m), indicador SBSV e número sinótico 83248 do Aeroporto Internacional Deputado Luís Eduardo Magalhães, que dista 28 km da capital Salvador e está localizado no município de Lauro de Freitas - Região Metropolitana de Salvador (Figura 4.1).

Outro conjunto utilizado foram os dados de altitude obtidos das sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Salvador (13°01'S, 38°51'W, 51m), cujo número sinótico é 83229, disponíveis para um dos casos selecionados. Eles foram analisados de acordo com a metodologia discutida na subseção 4.2.3.

Os sistemas meteorológicos na área em estudo foram acompanhados através das imagens dos satélites meteorológicos METEOSAT e GOES-E disponíveis em intervalos de três horas no canal do infravermelho térmico, na página eletrônica <http://www.sat.dundee.ac.uk/>, e de imagens realçadas que possibilitam a fácil visualização de áreas de convecção profunda, organizada ou não, disponibilizadas na página eletrônica <http://www.cptec.inpe.br/> pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

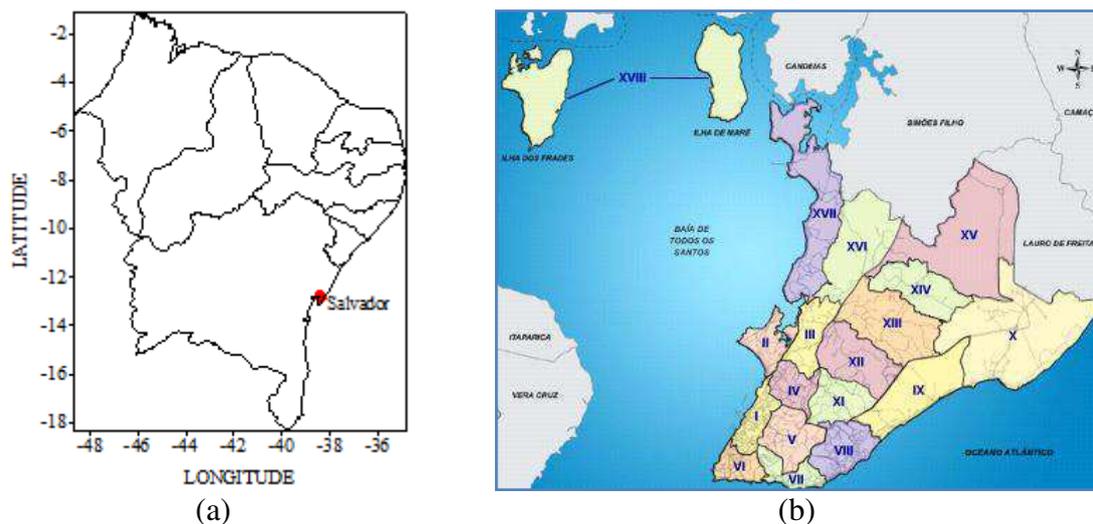


Figura 4.1 – (a) Região Nordeste do Brasil e localização aproximada da Região Metropolitana de Salvador (RMS) (círculo vermelho) e (b) Divisão das 18 regiões administrativas da RMS. (Lei n° 7.400/2008; n° 8.167/2012).

Foram utilizados ainda dados de pressão reduzida ao nível médio do mar e umidade específica, movimento vertical e componentes do vento em coordenadas de pressão obtidos do conjunto de dados de reanálise dos National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (KALNAY et al., 1996), cuja resolução é de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ de longitude-latidade, para os horários das 00, 06, 12 e 18 UTC, na área geográfica delimitada por $30^{\circ}N - 55^{\circ}S$ e $0^{\circ} - 120^{\circ}W$. Esses dados foram usados para diagnosticar o ambiente sinótico em dias com ocorrência de eventos de rajadas de vento.

4.2 METODOLOGIA

Inicialmente as mensagens METAR foram decodificadas, processadas e passaram por um controle de qualidade para a identificação dos valores horários de direção e velocidade do vento. As mensagens METAR e SPECI contêm em sequência informações de identificação (data, local e hora), vento à superfície (direção, velocidade, e rajada - quando a velocidade máxima do vento excede a velocidade média em 18 km/h ou mais), visibilidade horizontal predominante (alcance visual da pista), nuvens (cobertura e altura da base), temperatura do ar e do ponto de orvalho, pressão, e informações suplementares de inclusão condicional que podem ser condições de tempo recente, cortante do vento, temperatura da superfície do mar e

estado do mar, visibilidade mínima (50% inferior à visibilidade horizontal em determinada direção), além de informações de previsão de tendência para o período de duas horas (BRASIL, 2012; BRASIL, 2008).

De acordo com Brasil (2012) e Sonnemaker [199-], a quantidade de nuvens, estimada em oitavos, pode ser decodificada conforme o Quadro 4.1.

Código	Nebulosidade	Cobertura (em oitavos)	Cobertura (%)
FEW	Poucas nuvens	1 a 2	25
SCT	Nuvens esparsas	3 a 4	50
BKN	Céu nublado	5 a 7	75
OVC	Céu encoberto	8	100

Quadro 4.1 – Decodificação da quantidade de nuvens das mensagens METAR e SPECI.

A altura da base das nuvens é informada em centenas de pés ou unidades de 30 metros até o limite de 10.000 pés ou 3.000 metros, de modo que o número de camadas não ultrapasse três, exceto quando existirem nuvens convectivas significativas do tipo cumulonimbos (CB) ou cumulus congestus (TCU) que são sempre informadas. Os grupos foram decodificados de acordo com os seguintes critérios:

- 1° Grupo é o mais baixo, independentemente da quantidade de nuvens,
 - 2° Grupo é o próximo, em altura, com três oitavos de céu encoberto ou mais,
 - 3° Grupo é o seguinte, em altura, com cinco oitavos de céu encoberto ou mais,
- Grupo adicional = TCU ou CB, com qualquer quantidade.

4.2.1 Análise de Características do Vento

A série temporal dos dados horários de vento obtidos a partir das mensagens METAR disponibilizadas pela REDEMET para o período de 2003 a 2011 teve sua distribuição horária, mensal e anual avaliada para obtenção de suas características médias. Na análise da direção e velocidade do vento foram considerados, além dos casos de calmaria, 16 setores de 22,5° da rosa dos ventos classificados de acordo com o Quadro 4.2.

Setor	Código	Direção Central	Intervalo de Direção
calmaria	C	0°	0°
norte	N	360°	348,75° 360° U 0° 11,25°
norte-nordeste	NNE	22,5°	11,25° 33,75°
nordeste	NE	45°	33,75° 56,25°
leste-nordeste	ENE	67,5°	56,25° 78,75°
leste	E	90°	78,75° 101,25°
leste-sudeste	ESE	112,5°	101,25° 123,75°
sudeste	SE	135°	123,75° 146,25°
sul-sudeste	SSE	157,5°	146,25° 168,75°
sul	S	180°	168,75° 191,25°
sul-sudoeste	SSW	202,5°	191,25° 213,75°
sudoeste	SW	225°	213,75° 236,25°
oeste-sudoeste	WSW	247,5°	236,25° 258,75°
oeste	W	270°	258,75° 281,25°
oeste-noroeste	WNW	292,5°	281,25° 303,75°
noroeste	NW	315°	303,75° 326,25°
norte-noroeste	NNW	337,5°	326,25° 348,75°

Quadro 4.2 – Classificação dos setores de direção do vento.

4.2.1.1 Frequência de Direções em Setores da Rosa dos Ventos

A partir dos dados METAR nos horários inteiros foram calculados os seguintes números percentuais de casos (frequências percentuais), *por setor de direção*: (a) a frequência mensal (D_m) e (b) a frequência do período de estudo (D_p).

A obtenção da frequência mensal do período de estudo (D_m), *por setor de direção*, foi feita em três etapas. A primeira consiste no cálculo da frequência diária ($D_{d,m,a}$) definida pela equação (1),

$$D_{d,m,a} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h(i)} D_{h,d,m,a}}{NH_{d,m,a}} 100(\%) \quad (1)$$

em que:

$D_{h,d,m,a}$ = setor de direção na h -ésima hora, do d -ésimo dia, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

$D_{d,m,a}$ = percentual do setor de direção no d -ésimo dia, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

$NH_{d,m,a}$ = número de horas com observação no d -ésimo dia, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

$h = 1, 2, 3, \dots, h(i)$ determinada hora do d -ésimo dia,

$d = 1, 2, 3, \dots, d(j)$ determinado dia do m -ésimo mês,

$m = 1, 2, 3, \dots, m(k)$ determinado mês do a -ésimo ano,

$a = 1, 2, 3, \dots, a(l)$ determinado ano do período.

A segunda etapa consiste na obtenção da frequência mensal de cada ano ($D_{m,a}$) obtida através da equação (2),

$$D_{m,a} = \frac{\sum_{d=1}^{d=d(j)} D_{d,m,a}}{ND_{m,a}} \quad (2)$$

em que:

$D_{m,a}$ = percentual do setor de direção no m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

$ND_{m,a}$ = número de dias com observação de direção no m -ésimo mês, do a -ésimo ano.

Na terceira etapa o percentual mensal do período de estudo (D_m) foi calculado com a equação (3),

$$D_m = \frac{\sum_{a=1}^{a=a(l)} D_{m,a}}{NA_m} \quad (3)$$

em que:

D_m = percentual do setor de direção no m -ésimo mês,

NA_m = número de anos com observação de direção no m -ésimo mês.

A obtenção da frequência do período de estudo (D_p), *por setor de direção*, foi feita em duas etapas, a partir dos resultados da equação (2). Assim, na primeira etapa a frequência de cada ano do período de estudo (D_a) foi calculada pela equação (4),

$$D_a = \frac{\sum_{m=1}^{m=m(k)} D_{m,a}}{NM_a} \quad (4)$$

em que:

D_a = percentual do setor de direção no a -ésimo ano,

NM_a = número de meses com observação de direção no a -ésimo ano.

Na segunda etapa o percentual do período de estudo (D_p) foi calculado pela equação (5),

$$D_p = \frac{\sum_{a=1}^{a=a(l)} D_a}{NA} \quad (5)$$

em que:

D_p = percentual do setor de direção do período de estudo,

NA = número de anos com observação de direção no período de estudo.

4.2.1.2 Velocidade Média em Setores da Rosa dos Ventos

A velocidade do vento foi analisada, *por setor de direção*, a partir dos dados METAR nos horários inteiros. Foram calculadas a velocidade média mensal (\bar{V}_m) e a velocidade média de todo o período (\bar{V}_p). A obtenção da velocidade média mensal do período de estudo (\bar{V}_m), *por setor de direção*, foi feita em três etapas.

A primeira consiste na obtenção da velocidade média diária ($\bar{V}_{d,m,a}$) que foi calculada com a equação (6),

$$\bar{V}_{d,m,a} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h(i)} V_{h,d,m,a}}{NH_{d,m,a}} \quad (6)$$

em que:

$V_{h,d,m,a}$ = velocidade na h -ésima hora, do d -ésimo dia, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

$\bar{V}_{d,m,a}$ = velocidade média do setor de direção no d -ésimo dia, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano.

Na segunda etapa foi obtida a velocidade média mensal de cada ano ($\bar{V}_{m,a}$) de acordo com a equação (7),

$$\bar{V}_{m,a} = \frac{\sum_{d=1}^{d=d(j)} \bar{V}_{d,m,a}}{ND_{m,a}} \quad (7)$$

em que:

$\bar{V}_{m,a}$ = velocidade média do setor de direção no m -ésimo mês, do a -ésimo ano,

A terceira etapa consiste na obtenção da velocidade média mensal do período de estudo (\bar{V}_m) calculada com a equação (8),

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{a=1}^{a=a(l)} \bar{V}_{m,a}}{NA_m} \quad (8)$$

em que:

\bar{V}_m = velocidade média do setor de direção no m -ésimo mês.

A obtenção da velocidade média do período de estudo (\bar{V}_p), *por setor de direção*, foi feita em duas etapas, a partir dos resultados da equação (7). Logo, na primeira etapa a velocidade média de cada ano do período de estudo (\bar{V}_a) foi calculada de acordo com a (9),

$$\bar{V}_a = \frac{\sum_{m=1}^{m=m(k)} \bar{V}_{m,a}}{NM_a} \quad (9)$$

em que:

\bar{V}_a = velocidade média do setor de direção no a -ésimo ano.

Na segunda etapa, a velocidade média do período de estudo (\bar{V}_p) foi calculada pela equação (10),

$$\bar{V}_p = \frac{\sum_{a=1}^{a=a(l)} \bar{V}_a}{NA} \quad (10)$$

em que:

\bar{V}_p = velocidade média do setor de direção no período de estudo.

4.2.1.3 Velocidade Média Horária

A velocidade do vento também foi analisada a partir dos dados METAR nos horários inteiros visando obter as médias horárias mensais do período de estudo e, assim, caracterizar a variabilidade sazonal do ciclo diário dessa variável. Os setores de direção não foram considerados nessa análise, sendo as velocidades médias horárias mensais calculadas com a equação (11),

$$\bar{V}_{h,m,a} = \frac{\sum_{d=1}^{d=d(j)} V_{h,d,m,a}}{ND_{h,m,a}} \quad (11)$$

em que:

$\bar{V}_{h,m,a}$ = velocidade média na h -ésima hora, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano.

$ND_{h,m,a}$ = número de dias com observação de velocidade na h -ésima hora, do m -ésimo mês, do a -ésimo ano.

As velocidades médias horárias mensais do período de estudo ($\bar{V}_{h,m}$) foram calculadas através da equação (12),

$$\bar{V}_{h,m} = \frac{\sum_{a=1}^{a=a(j)} \bar{V}_{h,m,a}}{NA_m^*} \quad (12)$$

em que:

NA_m^* = número de anos com observação de velocidade no m -ésimo mês.

4.2.1.4 Eventos de Rajadas de Vento

Esta etapa do trabalho teve início com a determinação da frequência de rajadas de vento e sua variabilidade interanual, sazonal e horária na Região Metropolitana de Salvador. A etapa seguinte consistiu em selecionar meses pela magnitude e frequência dos eventos de rajadas e, na sequência, foi aplicada a Análise em Componentes Principais (ACP) ao conjunto de variáveis dos meses selecionados, de acordo com a metodologia da subseção 4.2.2, e assim identificar fatores físicos dominantes. Os dias com eventos de rajadas de vento nos meses

selecionados também foram analisados separadamente de acordo com a metodologia da subseção 4.2.3 visando identificar os sistemas meteorológicos que contribuíram para a ocorrência das rajadas.

4.2.2 Análise em Componentes Principais

Técnicas estatísticas multivariadas têm sido cada vez mais utilizadas para análise de grandes conjuntos de dados em diversos campos do conhecimento como na medicina, finanças, construção civil (engenharia e arquitetura), etc. A análise multivariada compreende um conjunto de técnicas estatísticas com o propósito de medir, explicar e prever o grau de correlação entre variáveis (HAIR Jr. et al., 2009; FÁVERO et al., 2009; CORRAR et al., 2007). Entre as principais técnicas estão a análise fatorial e a análise de agrupamento.

O principal objetivo da análise multivariada é encontrar um modo de resumir a informação existente em um grupo de variáveis originais, em um conjunto menor com perda mínima de informação. Assim, a técnica estatística é aplicada para identificação de fatores que podem ser usados para explicar o relacionamento entre as variáveis utilizadas.

O método de extração de fatores utilizado foi a Análise em Componentes Principais (ACP) que busca uma combinação linear entre as variáveis de modo que o máximo de variância seja explicado por essa combinação (HAIR Jr. et al., 2009; FÁVERO et al., 2009; CORRAR et al., 2007).

De acordo com Richman (1986), a ACP pode ser realizada em, pelo menos, seis modos, ou seja, a organização dos dados pode ser feita de seis modos diferentes. Neste trabalho foi utilizado o Modo-P, em que a matriz com dados horários obtidos das mensagens METAR foi organizada para cada mês selecionado com o tempo ocupando as linhas e as variáveis ocupando as colunas. O mesmo modo foi utilizado por Bentley et al. (2012) na AA com o objetivo de identificar diferentes grupos com ambientes sinóticos e termodinâmicos comuns favoráveis ao desenvolvimento de tempestades na cidade de Atlanta-Georgia e por Dalezios e Papamanolis (1991) que utilizaram a ACP e a AA para avaliar o desempenho de diversos índices de instabilidade atmosférica na previsão de queda de granizo na Grécia.

As variáveis que compuseram inicialmente as matrizes usadas na ACP são: componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), umidade específica (q), pressão (P), visibilidade, presença de nuvens do tipo TCU ou CB, quantidade de céu encoberto e altura da base das nuvens. Na matriz de dados a

quantidade de céu encoberto (em porcentagem) é denominada nebulosidade e a altura da base das nuvens (m) é denominada base. Essas variáveis foram classificadas em três categorias, definidas em intervalos de altura de base, de acordo com o Quadro 4.3.

Hair Jr. et al. (2009) e Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010) sugerem que o conjunto de dados deve ser superior a 50 observações e que a razão entre o número de observações e variáveis deve ser maior do que 5, o que é satisfeito em cada mês de estudo pois foi utilizado um total de 744 observações em cada mês.

Categoria	Intervalo de altura da base das nuvens (m)	Variáveis na matriz
1	0 - 310	nebulosidade 1, base 1
2	311 - 610	nebulosidade 2, base 2
3	611 - 9150	nebulosidade 3, base 3

Quadro 4.3 – Categorias de nebulosidade na matriz da análise em componentes principais

Quando o conjunto de variáveis é transformado em fatores, o método extrai as combinações de variáveis que explicam a variância máxima e, em seguida, as combinações que explicam as menores variâncias. O melhor ajuste dos dados é obtido a partir da explicação da variância pela ordem decrescente dos autovalores que correspondem a quanto o fator é capaz de explicar da variância ou, ainda, quanto da variância total dos dados pode ser associada ao fator.

Inicialmente foi realizada a inspeção visual da matriz de correlação para verificação dos valores de correlação que devem ser, em sua maioria, superiores a 0,3 para que a análise fatorial seja apropriada (HAIR Jr. et al., 2009; FÁVERO et al., 2009). Também foram realizados testes de aplicabilidade da análise fatorial. Um deles, que mede o grau de correlação parcial entre as variáveis - Measure of Sampling Adequacy (MSA), varia no intervalo de 0 a 1, e cresce à medida que o tamanho da amostra aumenta, as correlações médias aumentam, o número de variáveis aumenta ou o número de fatores extraídos aumenta. O MSA próximo de 1 é uma indicação de que os fatores encontrados na análise fatorial conseguem descrever satisfatoriamente as variações dos dados originais (HAIR Jr. et al., 2009; FÁVERO et al., 2009).

Na análise também foi avaliado o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que é uma medida do grau de adequação dos dados para a realização da ACP e indica o uso da técnica quando seu valor está entre 0,5 e 1,0, e o teste de esfericidade de Bartlett que indica o quanto

as variáveis estão correlacionadas e se elas são significativas, recomendando a aplicação da análise fatorial apenas se o teste de significância for inferior a 0,05 (HAIR Jr. et al., 2009; FÁVERO et al., 2009; CORRAR et al., 2007).

Na análise do número de fatores a serem retidos foi utilizado o método de Kaiser, segundo o qual apenas os fatores com autovalores acima de 1,0 são considerados, e o método Scree Plot no qual é realizada a análise gráfica comparativa.

Na maioria dos casos o poder de explicação dos fatores pode ser aumentado através da rotação de fatores. As novas soluções explicarão o mesmo grau de variância total, porém com resultados melhores em relação à sua interpretação. O método utilizado neste trabalho foi o tipo de rotação ortogonal conhecido como Varimax, que mantém os fatores ortogonais entre si e minimiza a possibilidade de uma variável possuir altas cargas fatoriais para diferentes fatores (HAIR Jr. et al., 2009; CORRAR et al., 2007).

4.2.2.1 Descrição do Método

Na Análise em Componentes Principais (ACP) foi definida uma matriz de dados M ($i \times j$), com i representando o tempo (horas) nas linhas e j as variáveis nas colunas. Os elementos da matriz M foram normalizados com média zero e variância um, o que garante que cada informação dentro do grupo de dados tem a mesma importância na determinação dos padrões temporais, e que a solução para a ACP seja definida em termos de autovetores unitários e normalizados, solução também conhecida como cargas vetoriais ou Funções Ortogonais Empíricas (FOEs). A partir da matriz normalizada obtêm-se a matriz de correlações $R = \frac{1}{m} zz^T$ simétrica positiva de dimensão ($j \times j$) e diagonalizável por uma matriz E de mudança de base, denominada de autovetores. A matriz diagonal D cujos elementos diagonais são os autovalores de R é obtida por $D = E^{-1}RE$. Mas $E^{-1}E = E^T$, então as componentes principais U_1, U_2, \dots, U_i são obtidas pela combinação linear entre a matriz transposta dos autovetores de (E^T) e a matriz de observações M . Assim sendo, cada U é dada por $U = E^T M$ e representa séries temporais que são associadas aos autovetores. As variáveis da matriz U são combinações lineares dos dados originais e ortogonais entre si, cada uma explicando uma parcela da variância total dos dados.

4.2.2.2 Rotação dos fatores

Inicialmente desenvolvida por Kaiser (1958), a técnica de rotação Varimax não altera o total de variância obtida na seleção inicial dos fatores, porém proporciona o aumento do poder de explicação das componentes retidas. O novo arranjo dos autovetores facilita a interpretação das componentes pois minimiza a ocorrência de uma variável possuir altas cargas fatoriais para diferentes fatores permitindo que cada variável seja facilmente identificada com um único fator. A solução da rotação Varimax pode ser encontrada através da maximização da medida da variância determinada por v^* que é definida como (Kaiser, 1958):

$$v^* = \sum_{i=1}^y v_i^* = \sum_{i=1}^y \left[\frac{x \sum_{j=1}^x (a_{ji}^2)^2 - \left(\sum_{j=1}^x a_{ji}^2 \right)^2}{x^2} \right] \quad (13)$$

em que

$j = 1, \dots, x$ = número de elementos em cada autovetor

$i = 1, \dots, y$ = número de componentes depois da redução da dimensão

a_{ij} = cargas vetoriais da i -ésima variável na j -ésima componente rotacionada.

Neste ponto a ACP é usada como uma solução inicial, em que cada carga vetorial é definida como o autovetor multiplicado pela raiz quadrada do valor próprio correspondente, de forma que $a_i^T a_i = d_i$.

4.2.3 Análise Sinótico-Dinâmica e Termodinâmica

O desenvolvimento de sistemas meteorológicos foi visualizado a partir de imagens dos satélites meteorológicos METEOSAT e GOES-E disponíveis em intervalos de três horas no canal do infravermelho térmico, além de imagens realçadas disponibilizadas pelo CPTEC. Também foram utilizados os dados METAR de pressão, temperatura e temperatura do ponto de orvalho, direção e velocidade do vento e nebulosidade coletados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador. As médias diárias da pressão reduzida ao nível médio do mar, do

vento (componente zonal e meridional) e das temperaturas foram calculadas para filtrar as variações devidas ao ciclo diário.

As condições sinóticas da atmosfera foram estudadas através de dados de pressão reduzida ao nível médio do mar, e componentes do vento, umidade específica e movimento vertical em coordenadas de pressão, obtidos das reanálises do NCEP/NCAR exibidos através do Sistema de Visualização e Análise de Dados em Pontos de Grade (GrADS). Também foram construídos os perfis verticais do vento e das temperaturas potencial (θ) (i), potencial equivalente (θ_e) (ii) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) (iii), calculadas de acordo com as equações a seguir apresentadas por Bolton (1980). Tais perfis foram úteis na investigação da condição de estabilidade atmosférica, na avaliação do teor de umidade e na identificação de camadas de inversões térmicas.

(i) Temperatura Potencial (θ)

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1-0,28 \cdot 10^{-3} r)} \quad (14)$$

em que:

T é a temperatura em Kelvin,

P é a pressão em hPa,

r é a razão de mistura (g/kg) definida por

$$r = \frac{0,622e}{P - e}$$

na qual e é a pressão real de vapor expressa através de

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

em que UR é a umidade relativa e e_s é a pressão de vapor à saturação calculada de acordo

$$\text{com } e_s(T) = 6,112 \times \exp\left(\frac{17,67T}{T+243,5}\right)$$

(ii) Temperatura Potencial Equivalente (θ_e)

$$\theta_e = \theta \exp\left[\frac{2,675r}{T_L}\right] \quad (15)$$

em que:

T_L é a Temperatura no Nível de Condensação por Levantamento (NCL) obtida através de

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

(iii) Temperatura Potencial Equivalente de Saturação (θ_{es})

$$\theta_{es} = \theta \exp\left(\frac{2,675r_s}{T}\right) \quad (16)$$

na qual r_s é a razão de mistura de saturação (g/kg) definida por

$$r_s = \frac{0,622e_s}{P - e_s}$$

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO

A variabilidade do vento na área do Aeroporto Internacional de Salvador tem a contribuição de circulações atmosféricas como a alta subtropical do Atlântico Sul, sistemas frontais (SANTOS, 2008), ciclones de altos níveis, distúrbios ondulatórios de leste (SANTOS et al., 2012), sistemas convectivos de mesoescala e sistemas de brisa.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição anual do número percentual de casos da direção do vento à superfície e respectivas velocidades médias. Ela mostra que ventos do setor leste (E) predominam em todos os anos do período, com maior percentual (29%) em 2003 (Fig. 5.1a). A seguir, em importância, estão os ventos do setor leste-sudeste (ESE), que tem frequências de até 20%. Os maiores percentuais de calmaria (6%) são vistos em 2003 (Fig. 5.1a). Alguns setores pouco frequentes se caracterizam por valores de velocidades relativamente elevados, a exemplo do sul-sudoeste (SSW).

A ilustração da distribuição mensal do número percentual de casos da direção do vento à superfície e respectivas velocidades médias (Fig. 5.2) evidencia que ventos do setor leste (E) são os mais frequentes no primeiro e último trimestre do ano (Fig. 5.2a-c,j-l), com maior percentual em novembro (47%) (Fig. 5.2k). Os setores sul (S) e sul-sudeste (SSE) predominam no meio do ano: junho (22%) e julho (17,8%) (Fig. 5.2f,g). Os setores sul (S) e sudeste (SE) são predominantes nos meses de maio e agosto (23%) (Fig. 5.2e,h), respectivamente. Os setores leste (E) e leste-sudeste (ESE) apresentam frequências muito próximas em abril (16 e 17%) e setembro (22 e 24%) (Fig. 5.2d,i), o que sugere que esses meses são de transição. As maiores frequências médias mensais de calmaria (3 e 4%) são observadas de fevereiro a maio (Fig. 5.2b-e). Assim como na análise anual, os setores mais frequentes são também aqueles com os maiores valores de velocidade, embora alguns setores pouco frequentes se caracterizem por valores de velocidade elevados.

Na Figura 5.3 é ilustrada a velocidade média horária evidenciando o ciclo diário do vento, com valores maiores durante a tarde e menores no período da madrugada e início da manhã. Os meses de novembro e dezembro (Fig. 5.3k,l) apresentam a maior amplitude diária na velocidade: no início da manhã a intensidade fica em torno de 10 km/h, enquanto que no período da tarde ela é próxima de 25 km/h. A amplitude diária é mínima em junho e julho (Fig. 5.3f,g), quando a velocidade mínima (máxima) fica em torno de 13 (19) km/h.

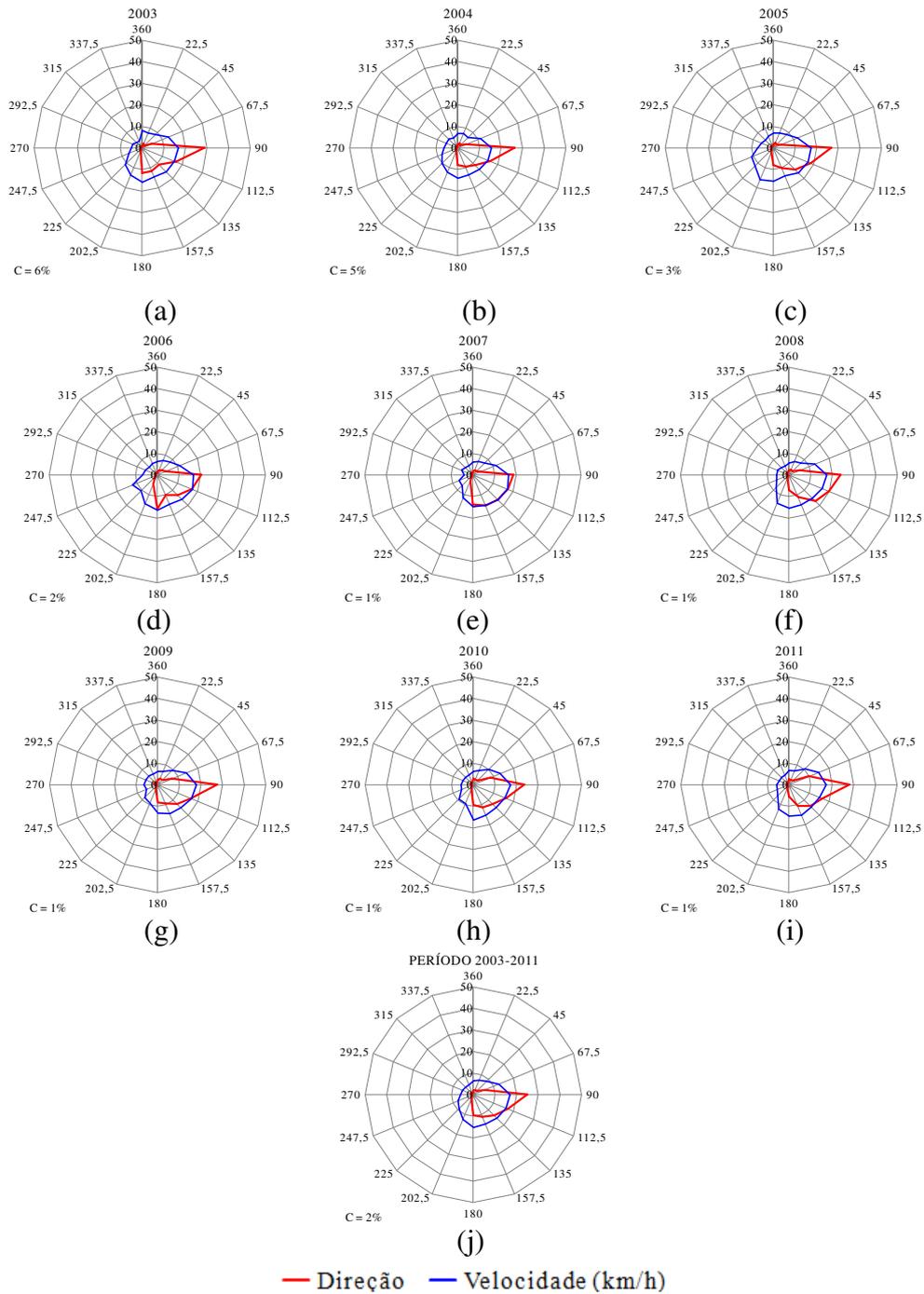


Figura 5.1 – Distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o ano de: (a) 2003, (b) 2004, (c) 2005, (d) 2006, (e) 2007, (f) 2008, (g) 2009, (h) 2010, (i) 2011 e (j) média do período 2003-2011. Os valores das circunferências representam simultaneamente a velocidade (km/h) e a frequência de direção (em porcentagem). Os valores dos raios representam a direção central dos setores de direção do vento. O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

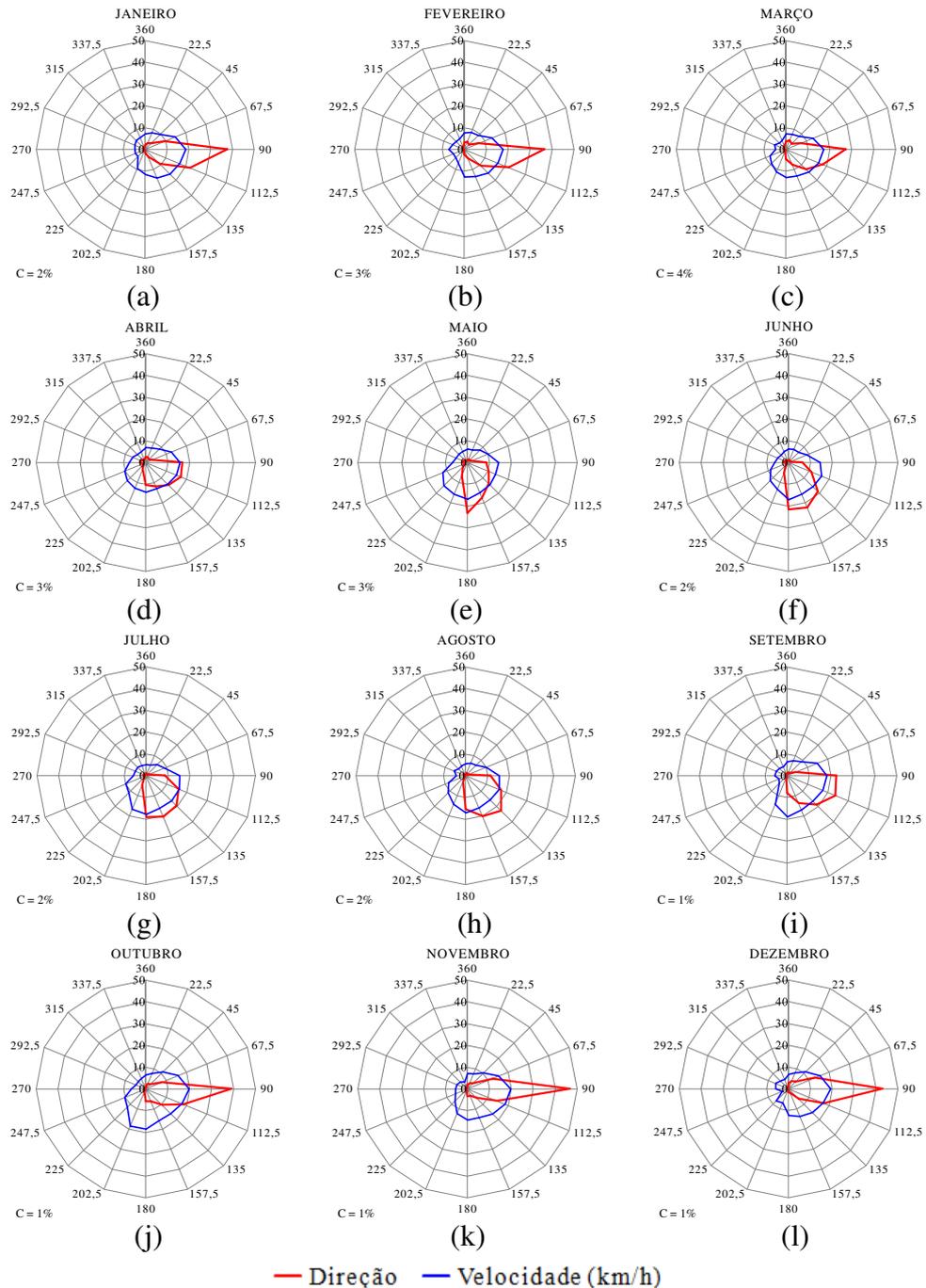


Figura 5.2 – Distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro e (l) dezembro. Os valores das circunferências representam simultaneamente a velocidade (km/h) e a frequência de direção (em porcentagem). Os valores dos raios representam a direção central dos setores de direção do vento. O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

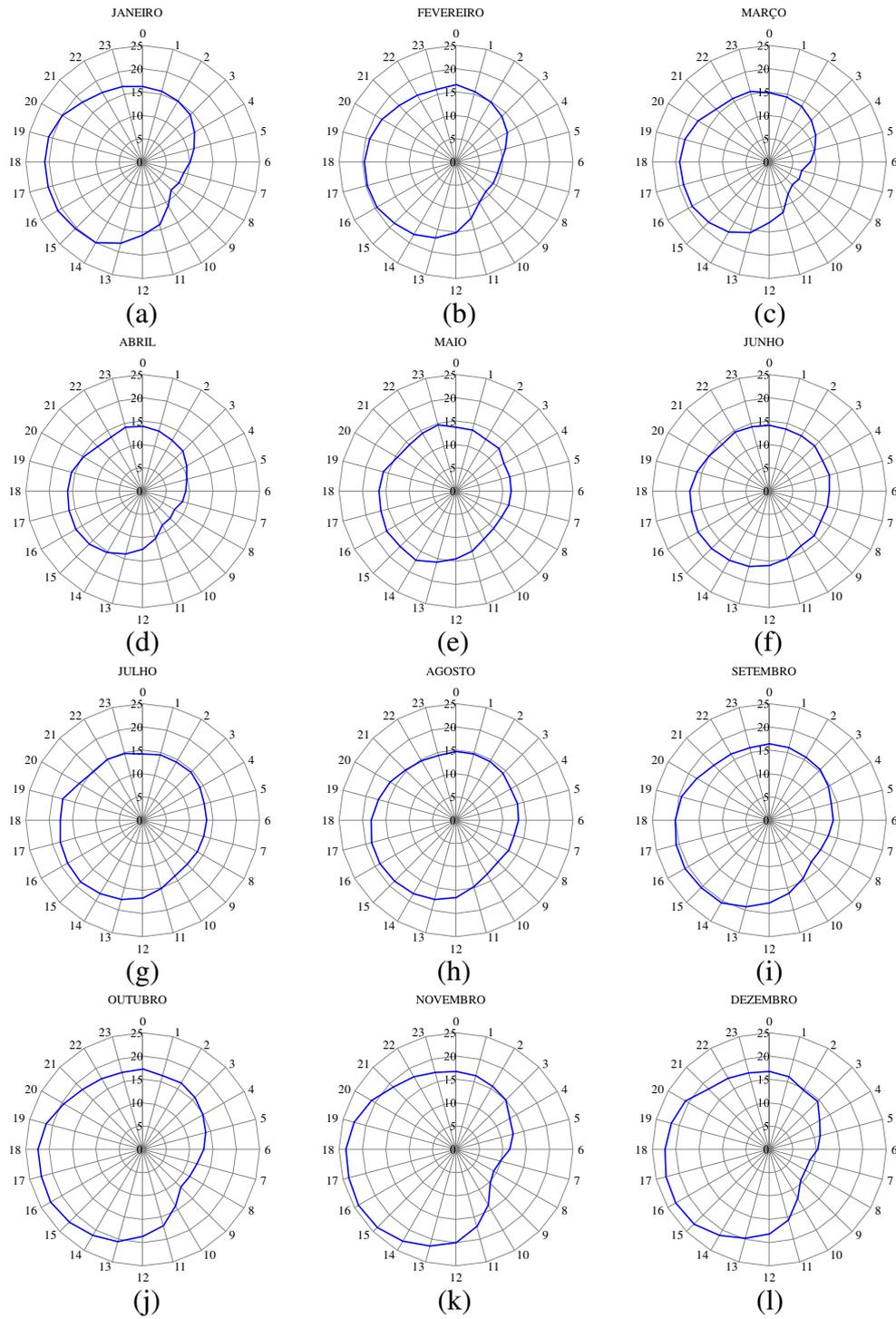


Figura 5.3 – Distribuição horária (UTC) da velocidade média do vento observado (km/h) no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de: (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro e (l) dezembro. Observe que Hora Local = Hora UTC - 3 horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

5.2 ESTATÍSTICA DAS RAJADAS DE VENTO

No período entre 2003 e 2011 houve 63 registros de rajadas de vento no Aeroporto Internacional de Salvador. A distribuição anual ilustrada na Figura 5.4 mostra os anos de 2004 e 2008 com o menor número de registros (1), enquanto que os maiores valores, 17 e 16, são vistos nos anos de 2003 e 2007, respectivamente. A distribuição anual para o período de 2003 a 2010 obtida por Silva Aragão et al. (2011) é semelhante a da Figura 5.4, tendo em vista que não houve registro de rajadas de vento em 2011.

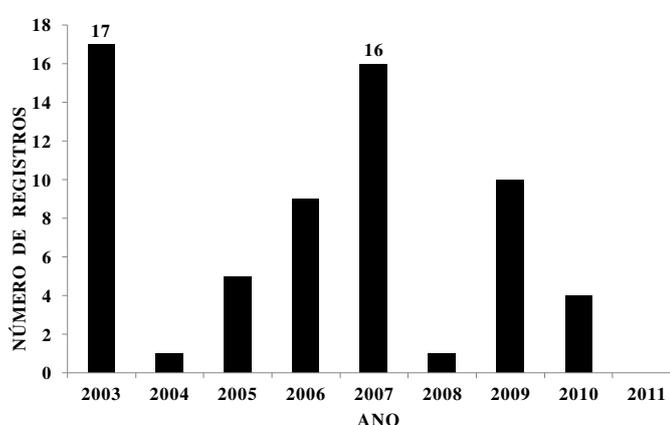


Figura 5.4 – Distribuição anual do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

A distribuição mensal do número de rajadas de vento (Fig. 5.5) evidencia que o maior número foi registrado em maio, 14 casos, dos quais dez ocorreram, em número igual (5), nos anos de 2007 e 2009 (não mostrado). Além do número elevado de casos no mês de maio de 2007 e 2009, os máximos de velocidade de 68,5 km/h e 50 km/h, respectivamente, motivaram a escolha desses meses para estudo. Os menores valores são vistos nos meses de fevereiro, março e dezembro, que tem apenas um caso.

A ilustração da variação horária do número de registros de rajadas de vento (Fig. 5.6) indica que a frequência é mínima entre a meia noite e 7 horas da manhã (3 e 10 UTC no gráfico), e é máxima durante a tarde, entre meio dia e 16 horário local (15 e 19 UTC no gráfico). Esses horários preferenciais sugerem uma relação com o ciclo diário do vento na área analisada.

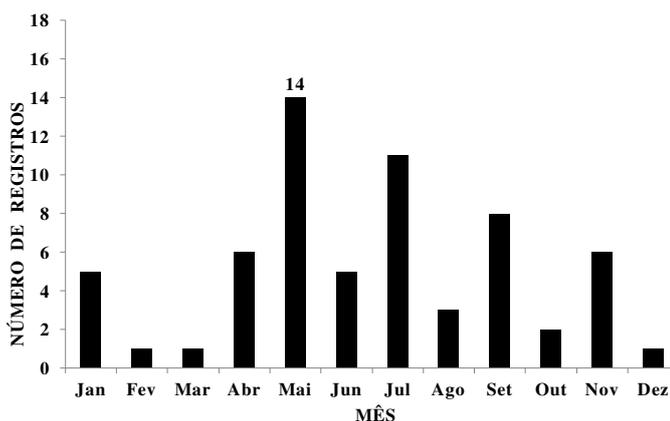


Figura 5.5 – Distribuição mensal do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

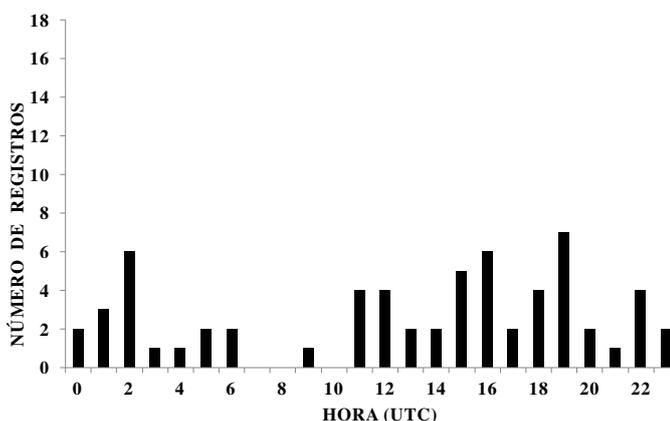


Figura 5.6 – Distribuição horária do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. Observe que a hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

A Figura 5.7 ilustra a distribuição do número de rajadas de vento por setor de direção do vento de acordo com o Quadro 4.2. Nela é possível observar que há setores preferenciais para a ocorrência de rajadas: o setor sul (S), com 32 casos, 51% do total de 63 registros do período, e os setores leste (E) e sul-sudoeste (SSW) com 9 (14%) e 7 (11%), respectivamente. O número de registros nos demais setores não ultrapassa 3 (5%). Esse setor preferencial na Região Metropolitana de Salvador sugere situações de passagens frontais, já que nelas prevalecem ventos com componente de sul, característica também observada por Barbosa Silva et al. (2013).

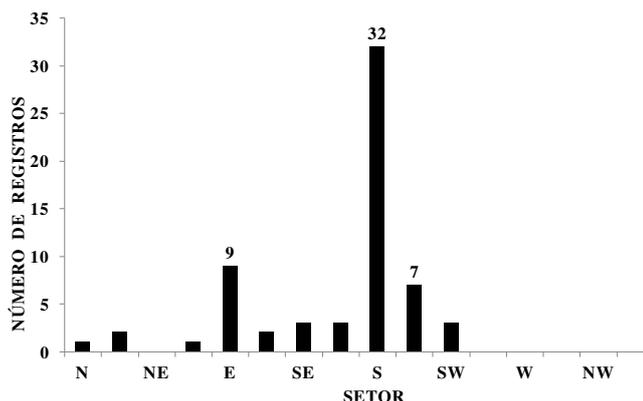


Figura 5.7 – Distribuição por setor do número de rajadas de vento registradas no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

5.3 O EPISÓDIO DE MAIO DE 2007

Um dos casos selecionados a partir das mensagens METAR disponibilizadas pela REDEMETS tem cinco registros de rajadas de vento, nos dias 10 e 11 de maio de 2007, todos no período da noite (Quadro 5.1). A rajada mais forte do período 2003 a 2011, de 68,5 km/h, foi registrada às 01 UTC do dia 11. Ainda no Quadro 5.1, observa-se que a direção das rajadas variou entre 170 e 200 graus.

Neste episódio também houve registro de cortantes de vento (“wind shear”), num total de 7, entre os 13 casos mensais, todos com a presença de nuvens do tipo cumulus congestus. As cortantes ocorreram no dia 11, entre 01 e 05 UTC, e entre 17 e 18 UTC. De acordo com o histórico de acidentes da Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador (CODESAL) (<http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/>), foram registrados casos de desabamento e destelhamento de imóveis no dia 11, causados possivelmente por ventos fortes, o que também foi diagnosticado por Barbosa Silva et al. (2011) no episódio de 8 de setembro de 2006.

Data	Horário (UTC)	Direção (°) / Setor	Velocidade (km/h)
10/05/2007	21h35min	180 / S	51,9
10/05/2007	22h00min	200 / SSW	50,0
10/05/2007	23h00min	170 / S	48,2
11/05/2007	00h00min	180 / S	44,4
11/05/2007	01h00min	190 / S	68,5

Quadro 5.1 – Data, horário, direção/setor e velocidade das rajadas de vento registradas em maio de 2007 nas mensagens METAR/SPECI do Aeroporto Internacional de Salvador. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

O total pluviométrico da cidade de Salvador no ano de 2007 foi de 1382,3 mm (CODESAL) o que representa 64% da normal climatológica do período 1961-1990 (2144,0 mm) (RAMOS et al., 2009), caracterizando-o como um ano seco. Essa classificação foi confirmada por Santos (2013), que utilizou a técnica dos quantis para analisar a série histórica dos totais de precipitação da estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Salvador. Na análise mensal, Santos identificou o mês de maio de 2007 como muito seco.

5.3.1 Análise em Componentes Principais

A aplicação da ACP ao conjunto de dados do mês de maio de 2007 foi iniciada com a verificação da adequabilidade da base de dados. Os resultados iniciais foram aceitáveis, porém a componente zonal do vento foi retirada da matriz de dados por não mostrar correlação com nenhuma outra variável. Grande parte das correlações supera 0,30 fazendo com que o determinante da matriz de correlações seja muito pequeno ($1,78 \times 10^{-6}$). Além disso, o teste que avalia o grau de correlação parcial entre as variáveis (MSA) é maior que 0,4 para todas as variáveis. Logo, seguindo a recomendação de Hair Jr. et al. (2009) e Fávero et al. (2009) os dados são adequados à utilização da análise fatorial. O valor do KMO da amostra é de 0,634, ou seja, superior ao patamar crítico de 0,50 e, da mesma forma, o teste de Bartlett é estatisticamente significativo ($p < 0,05$). Os dois testes sugerem que os dados são adequados à análise fatorial e, dessa forma, o passo seguinte foi determinar o número de fatores a serem extraídos, a partir da Tabela 5.1.

De acordo com o critério de Kaiser e o Scree Plot (não mostrado) foram extraídos cinco fatores (Tabela 5.1) que explicam 82,8% da variância total dos dados. As duas primeiras componentes retidas explicam 46,9% da variância. Na primeira estão correlacionadas o grupo de nuvens mais próximo da superfície, as TCU e, com sinal inverso, a visibilidade (Tabela 5.2). A segunda componente reteve a pressão e as variáveis ligadas ao teor de umidade da atmosfera, associações na escala de tempo sinótica provocadas pela aproximação e passagem de sistemas frontais que alcançaram a Região Metropolitana de Salvador no mês de maio (CLIMANÁLISE, 2007) conforme é evidenciado mais adiante. Por outro lado, os três últimos fatores foram compostos pelos grupos de nuvens das duas camadas mais altas, componente meridional do vento e temperatura (Tabela 5.2). As variáveis correlacionadas indicam variações na escala local.

Tabela 5.1 – Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada de maio de 2007.

CP	Autovalores iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	4,037	31,054	31,054	3,432	26,398	26,398
2	2,727	20,980	52,034	2,660	20,463	46,861
3	1,499	11,529	63,563	1,883	14,482	61,342
4	1,343	10,328	73,891	1,619	12,450	73,792
5	1,164	8,954	82,845	1,177	9,053	82,845
6	0,563	4,329	87,174			
7	0,522	4,015	91,190			
8	0,468	3,597	94,787			
9	0,257	1,974	96,760			
10	0,235	1,805	98,566			
11	0,133	1,022	99,588			
12	0,052	0,403	99,991			
13	0,001	0,009	100,000			

Tabela 5.2 – Matriz dos componentes rotacionados de maio de 2007.

Variáveis	Componentes				
	1	2	3	4	5
v	0,394	- 0,495	0,121	0,076	0,645
T	- 0,345	0,271	- 0,118	- 0,104	0,831
Td	0,143	0,959	- 0,037	0,007	0,103
q	0,136	0,962	- 0,040	0,003	0,113
P	0,270	- 0,686	0,074	0,217	0,166
TCU	0,626	- 0,050	0,454	0,147	0,008
visibilidade	- 0,807	- 0,010	- 0,086	0,071	0,101
nebulosidade 1	0,934	0,009	0,111	- 0,103	- 0,022
base 1	0,888	0,026	0,082	- 0,020	0,015
nebulosidade 2	0,145	- 0,083	0,081	0,931	0,010
base 2	- 0,425	- 0,061	- 0,145	0,805	- 0,078
nebulosidade 3	0,375	- 0,105	0,856	- 0,033	- 0,013
base 3	0,002	- 0,032	0,924	- 0,021	- 0,028

5.3.2 Análise da variação de elementos meteorológicos observados à superfície

A distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média (km/h) do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2007 é comparada à distribuição correspondente dos valores médios do período de estudo através da Figura 5.8. É possível observar que o setor mais frequente em maio de 2007 (setor sul) coincide com aquele predominante no período, porém alcança um percentual ainda maior (31,9%) (Fig. 5.8a). A Figura 5.8b mostra que os valores de velocidade mais elevados são dos setores sul-sudoeste (SSW), sudoeste (SW) e oeste-sudoeste (WSW), todos do quadrante sudoeste, que apresentam baixo percentual (Fig. 5.8a).

A Figura 5.9, que ilustra a distribuição da média diária de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2007, evidencia que os valores de pressão diminuem nos dias que antecedem 8 e 24, quando atingem mínimo de 1012 hPa (Fig. 5.9a) e que, em seguida, aumentam até atingir máximos de 1019 e 1015 hPa, em 12 e 27, respectivamente. A magnitude e o sinal dessas variações sugerem o avanço de sistemas frontais sobre a Bahia, o que é confirmado por mudanças nas temperaturas e no vento em Salvador.

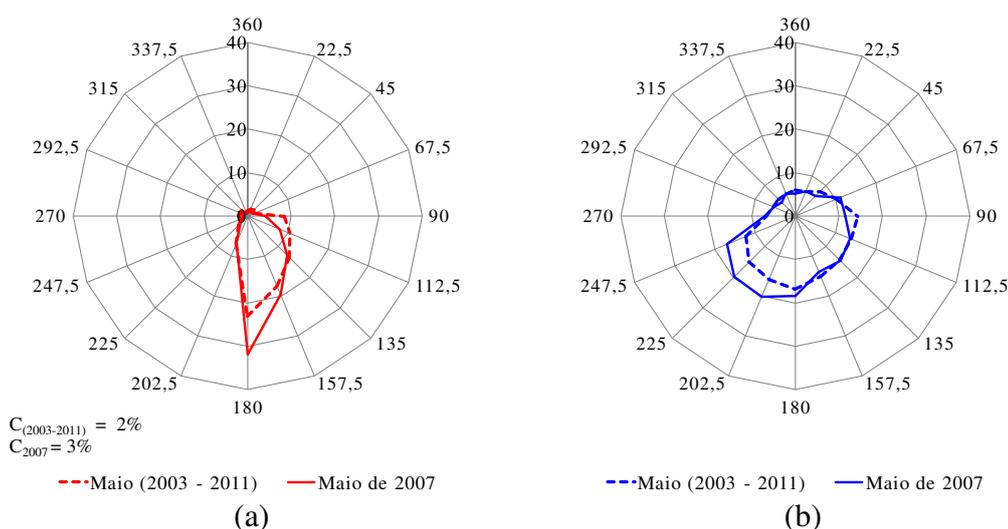


Figura 5.8 – Distribuição do número percentual de casos de direção (a) e velocidade média (km/h) (b) nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2007 (contínua) e para a média de maio do período 2003-2011 (tracejado). O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo do gráfico de direção. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

Na ilustração das temperaturas a curva da temperatura do ponto de orvalho (T_d) (Fig. 5.9b) indica aumento da umidade atmosférica entre os dias 4 e 8 e posterior decréscimo até o dia 12. A relação inversa entre a temperatura do ponto de orvalho e a pressão (Fig. 5.9a,b) também foi observada através das variáveis retidas na segunda componente da ACP (Tabela 5.2). De maneira geral, a curva da temperatura também mostra variações opostas em relação à curva da pressão, mas de menor magnitude. A Figura 5.9c evidencia que a componente meridional é a mais intensa durante todo o mês, em concordância com os setores predominantes na Figura 5.8a, e que ventos do quadrante sudeste dominam nos dias que antecedem a chegada da frente, que ocorre no dia 8, quando o vento muda para o quadrante sudoeste, ilustrado na Figura 5.8b com valores elevados. O maior valor de velocidade média diária (33,1 km/h) é visto no dia 11.

A Figura 5.10 ilustra a distribuição horária da velocidade e das componentes do vento observado à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em 10 de maio de 2007. Ela mostra grande variabilidade, tanto na direção quanto na velocidade. É possível observar que até as 9 UTC os ventos são fracos e do quadrante sudeste ou noroeste, e que ocorre calmaria às 10 UTC. A partir de 11 UTC o vento se intensifica e prevalece o quadrante sudoeste. A velocidade máxima horária, 38,9 km/h, ocorre às 17 UTC.

Também há indícios da passagem de outro sistema frontal observados através dos valores da pressão e das temperaturas (Fig. 5.9a,b) nos primeiros dias de maio de 2007 que, assim como a passagem frontal ocorrida entre os dias 24 e 27, teve menor influência sobre a região. De acordo com Kousky (1979), as frentes frias chegam durante todo o ano no sul da Bahia (Caravelas), porém são mais frequentes de março a dezembro. Há casos em que esses sistemas provocam mudanças significativas no tempo em localidades ao norte de Caravelas, a exemplo do caso de 21 de abril de 2006 estudado por Santos (2008), o caso de setembro de 2006 avaliado por Barbosa Silva et al. (2011) e da passagem frontal da primeira quinzena de maio de 2007.

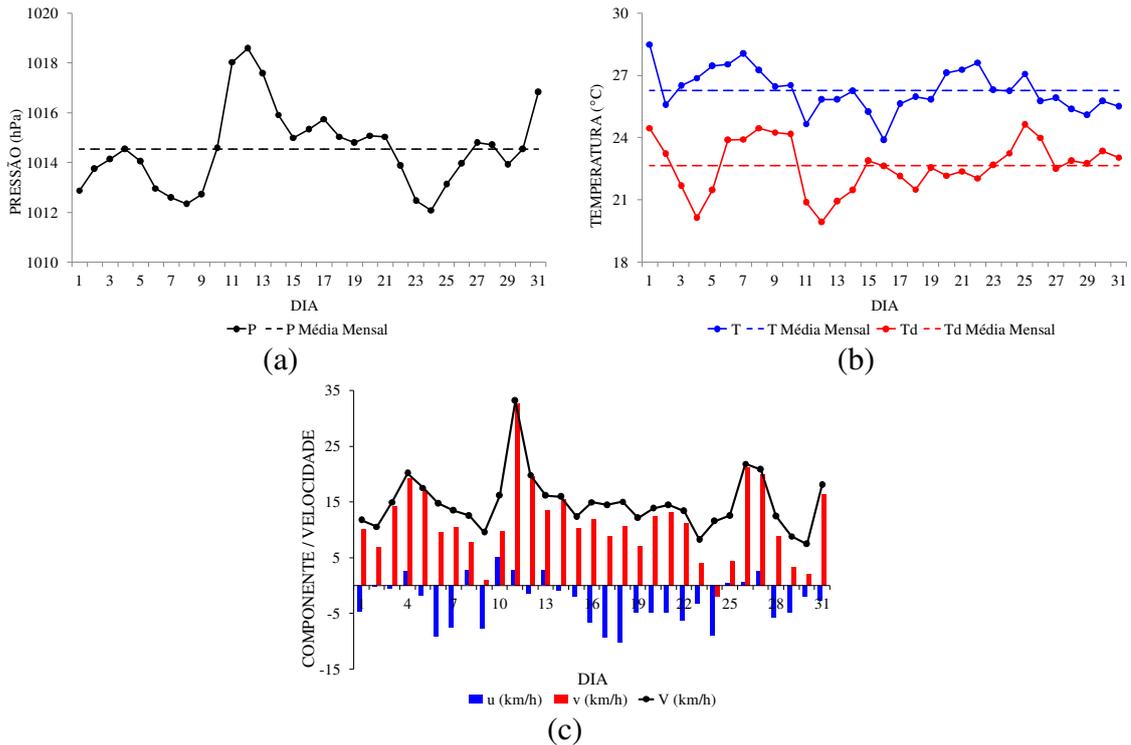


Figura 5.9 – Distribuição dos valores médios diários de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2007: (a) pressão (P), (b) temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

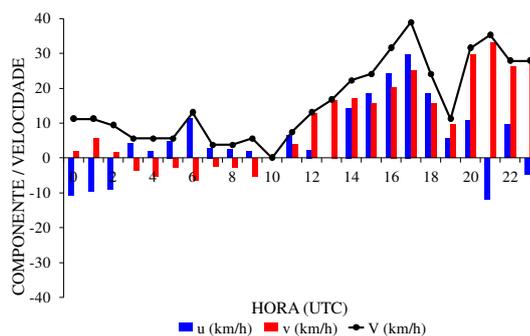


Figura 5.10 – Distribuição dos valores horários da velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em 10 de maio de 2007. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

5.3.3 Análise da nebulosidade e da circulação atmosférica

A distribuição horária, em três camadas acrescido do grupo adicional, da quantidade de nuvens existente na área do Aeroporto Internacional de Salvador em 10 de maio de 2007 é apresentada no Quadro 5.2. Ela evidencia que até as 11 UTC há 50% do céu encoberto e que a partir das 12 UTC há presença de nuvens do tipo cumulus congestus (TCU) em todos os horários, com exceção das 21 UTC. Todos os casos de rajadas de vento do mês ocorrem com a presença de nuvens cumulus congestus.

O avanço do sistema frontal que ocorreu na segunda semana de maio de 2007 pode ser acompanhado através de imagens do satélite GOES-E obtidas em intervalos de 3 horas. Nas imagens da Figura 5.11 é possível observar uma banda de nebulosidade posicionada na direção noroeste-sudeste sobre o oceano e parte sul do Nordeste, configurando uma zona frontal, e as nuvens de convecção profunda situadas na faixa equatorial associadas à ZCIT. A nebulosidade registrada no aeroporto de Salvador a partir das 12 UTC (Quadro 5.2) mostra relação com as imagens da Figura 5.11c e 5.11d.

Na sequência, são apresentadas imagens realçadas do satélite GOES - 10 (Fig. 5.12) para o período entre as 1215 UTC e as 2345 UTC do dia 10. Nelas é possível notar o aumento da área de nebulosidade sobre o estado da Bahia e a mudança no posicionamento do sistema frontal, porém não há indicação de nuvens com grande desenvolvimento vertical como as da faixa equatorial, onde podem ser observados núcleos convectivos profundos com temperaturas que atingem - 60°C. Vale lembrar que as rajadas de vento foram registradas no intervalo entre as imagens (d) e (h) da Figura 5.12 conforme mostra o Quadro 5.1. No decorrer da manhã do dia 11 o sistema frontal perde intensidade e ocorre a redução da área de nebulosidade sobre a Bahia (não mostrado) e, por consequência, sobre a Região Metropolitana de Salvador.

Dia/Hora (UTC)	Grupos							
	1		2		3		Adicional	
	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)
10/00	25	518						
01	50	518						
02	50	518						
03	50	518						
04	50	518						
05	50	518						
06	50	518						
07	50	518						
08	50	518						
09	50	518						
10	50	518	50	3049				
11	50	518	50	3049				
12	50	518	50	3049			TCU	610
13	50	518	50	3049			TCU	610
14	50	518	75	3049			TCU	610
15	50	305	50	518	75	3049	TCU	610
16	75	366	50	518	75	3049	TCU	610
17	75	366	50	518	75	3049	TCU	610
18	25	366	75	396			TCU	518
19	25	366	75	396			TCU	518
20	50	366	75	396	75	3049	TCU	518
21	50	366	75	396	75	3049		
22	75	213	75	305	75	2134	TCU	518
23	75	305	75	396	75	2439	TCU	518
11/00	75	305	75	396	75	2134	TCU	518
01	75	213	75	396	75	2134	TCU	518
02	75	305	75	396	75	2134	TCU	518
03	75	305	75	457	75	2134	TCU	518
04	75	305	75	457	75	2134	TCU	518
05	75	305	75	457	75	2134	TCU	518

Quadro 5.2 – Distribuição horária (UTC) em três grupos de cobertura (%) acrescido do grupo adicional e altura da base (m) de nuvens existentes na área do Aeroporto Internacional de Salvador no dia 10 e nas primeiras horas de 11 de maio de 2007. As camadas são numeradas da mais baixa para a mais alta. A abreviatura usada para o tipo de nuvem representa TCU = Torre de Cumulus Congestus. Observe que hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

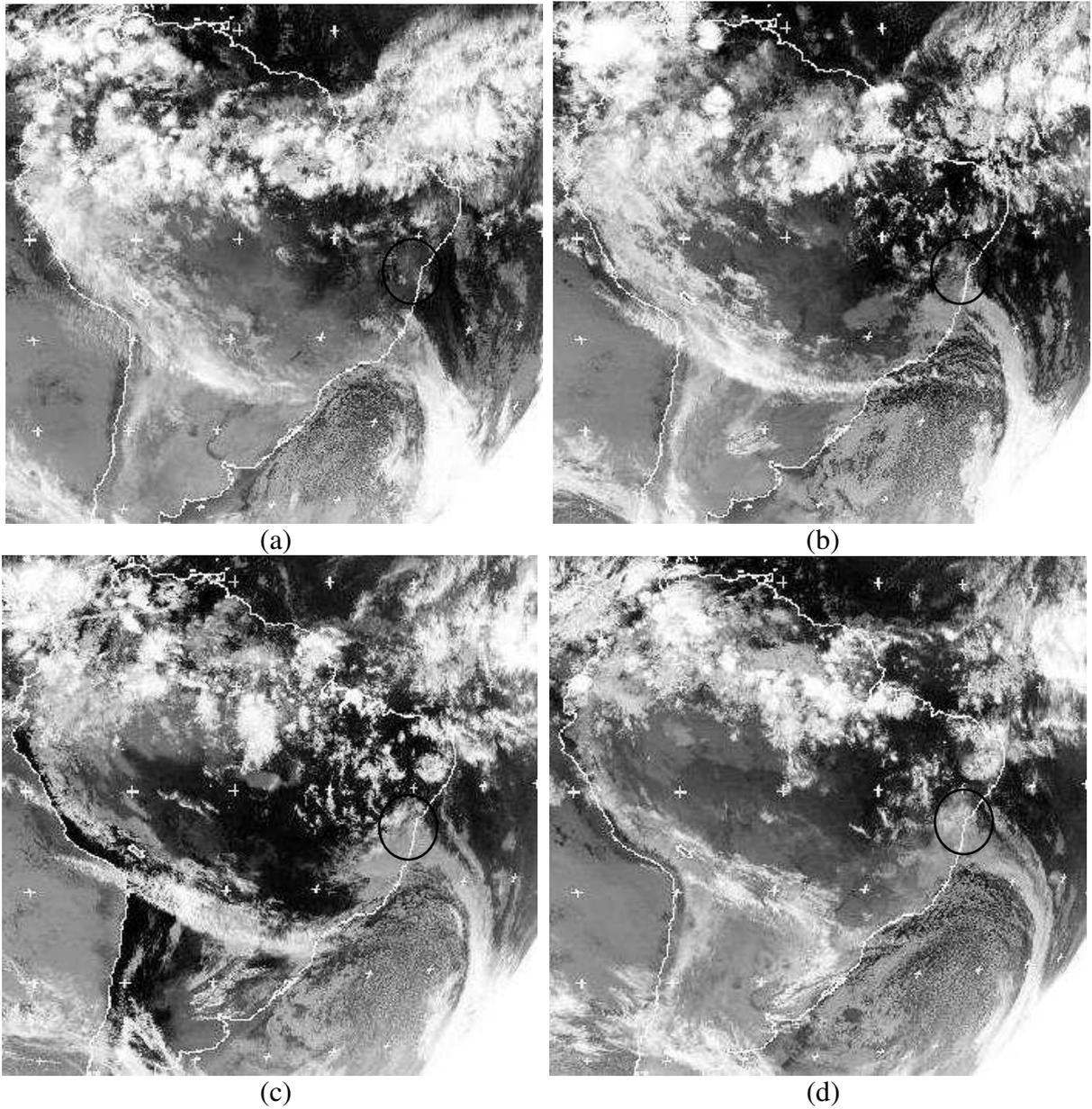


Figura 5.11 – Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 10 de maio de 2007 às (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC e (c) 1800 UTC, e para o dia 11 de maio de 2007 às (d) 0000 UTC. A circunferência preta está aproximadamente centrada sobre Salvador. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

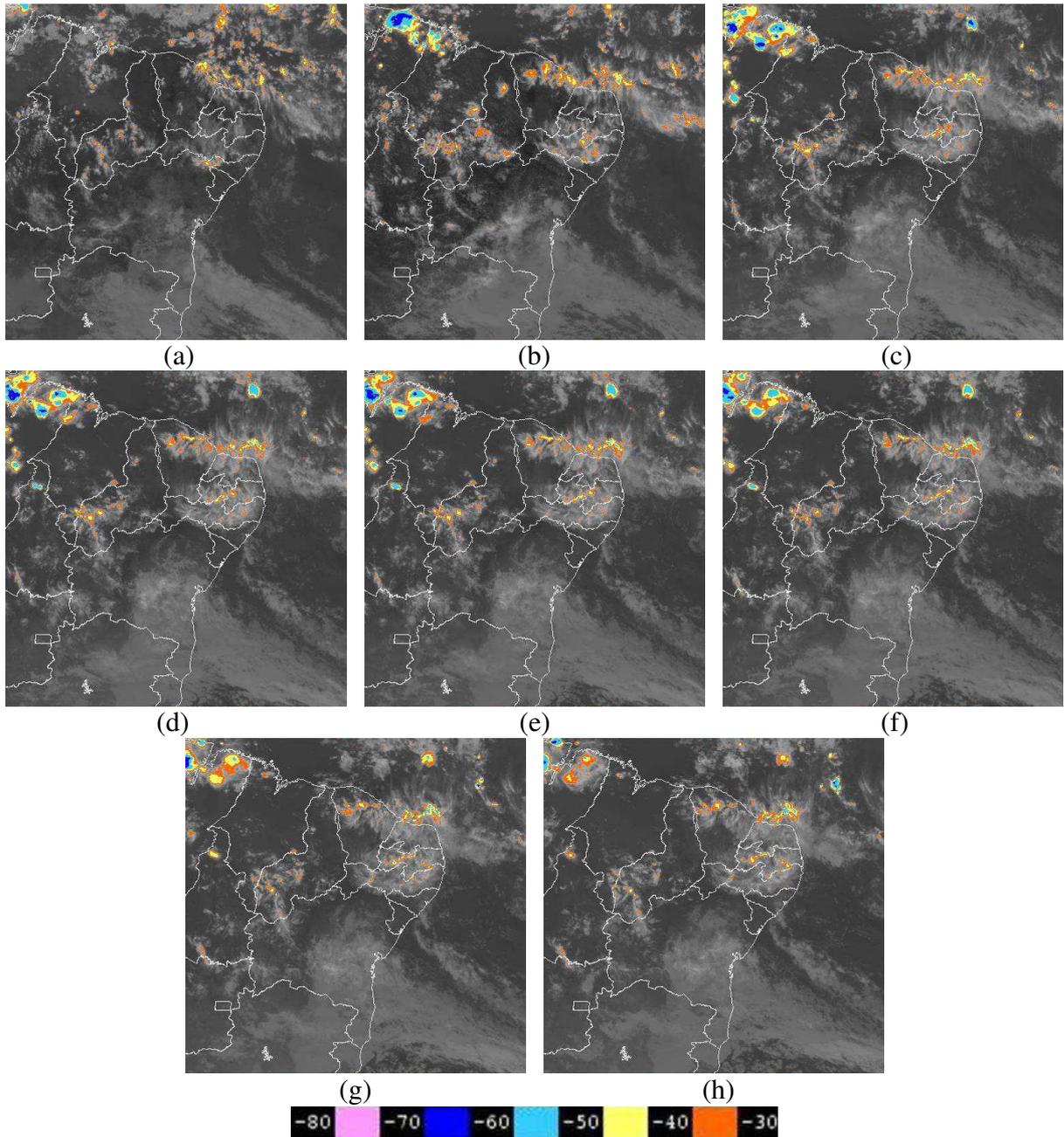


Figura 5.12 – Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-10 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para o dia 10 de maio de 2007 às: (a) 1215 UTC, (b) 1800 UTC, (c) 2100 UTC, (d) 2130 UTC, (e) 2145 UTC, (f) 2215 UTC, (g) 2300 UTC e (h) 2345 UTC. A escala de cores da temperatura de brilho é vista abaixo das imagens (Fonte das imagens: Adaptado de http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp).

Nos campos da pressão ao nível médio do mar dos dias que antecedem o caso de rajadas de vento (não mostrado), é possível observar sobre a Bahia o deslocamento do sistema frontal e do forte centro de alta pressão na sua retaguarda, que também pode ser observado às 00 UTC dos dias 10 (Fig. 5.13a) e 11 (Fig. 5.13b). Na mesma figura os valores de pressão relativamente baixos na faixa equatorial indicam a presença do cavado equatorial, área com atividade convectiva associada à ZCIT nas imagens de satélite (Fig. 5.11).

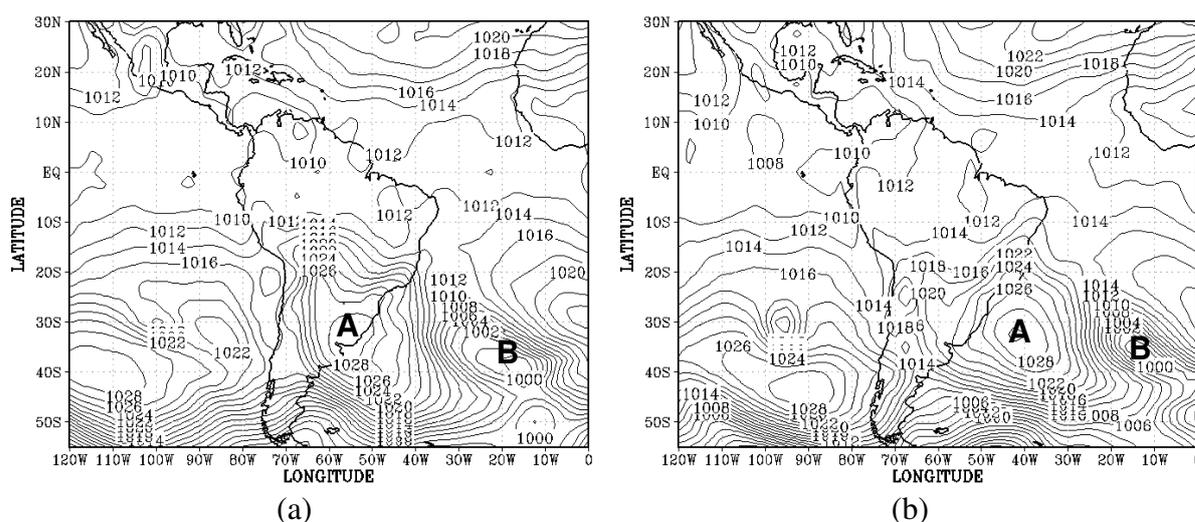


Figura 5.13 – Pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa) para as 0000 UTC do dia (a) 10/05/2007 e (b) 11/05/2007. O intervalo de análise é de 2 hPa. A letra A (B) assinala um centro de alta (baixa) pressão. (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).

A Figura 5.14, que ilustra o campo do vento para as 00 UTC do dia 11, evidencia no nível de 850 hPa (Fig. 5.14a) o anticiclone intenso centrado no Oceano Atlântico, associado ao centro de alta pressão na retaguarda da baixa frontal visto no mapa de superfície das 00 UTC (Fig. 5.13b). O sinal desse sistema no campo da vorticidade relativa (Fig. 5.15) é o centro ciclônico situado sobre o Oceano Atlântico Sul, visto às 00 UTC em todos os níveis de pressão nos dias 10 e 11. Ainda no nível de 850 hPa, é evidente o cavado com eixo na área dos ventos alísios (Fig. 5.14a), induzido pelo avanço do cavado frontal para latitudes baixas sobre o Oceano Atlântico. A presença do cavado na área dos alísios é confirmada pelo núcleo de vorticidade ciclônica observado às 00 UTC do dia 11 sobre a faixa costeira leste do Nordeste (Fig. 5.15d).

No nível de 500 hPa (Fig. 5.14b), o cavado na área dos alísios é visto sobre o Nordeste, enquanto que o cavado frontal se estende sobre o Oceano Atlântico, até o litoral sul do Nordeste, em torno de 18°S. Duas áreas de vorticidade ciclônica assinalam a presença

desses sistemas na Figura 5.15e. No nível de 200 hPa (Fig. 5.14c), o cavado frontal é evidente até a latitude de 30°S e um anticiclone atua sobre o Nordeste do Brasil, favorecendo a divergência nos altos níveis sobre a região. Áreas bem definidas de vorticidade anticiclônica/ciclônica são vistas na Figura 5.15f em associação a esses sistemas. De maneira geral, os campos da vorticidade relativa das 00 UTC do dia 10 (Fig. 5.15a-c) mostram as mesmas configurações, com exceção daquelas associadas ao cavado na área dos ventos alísios.

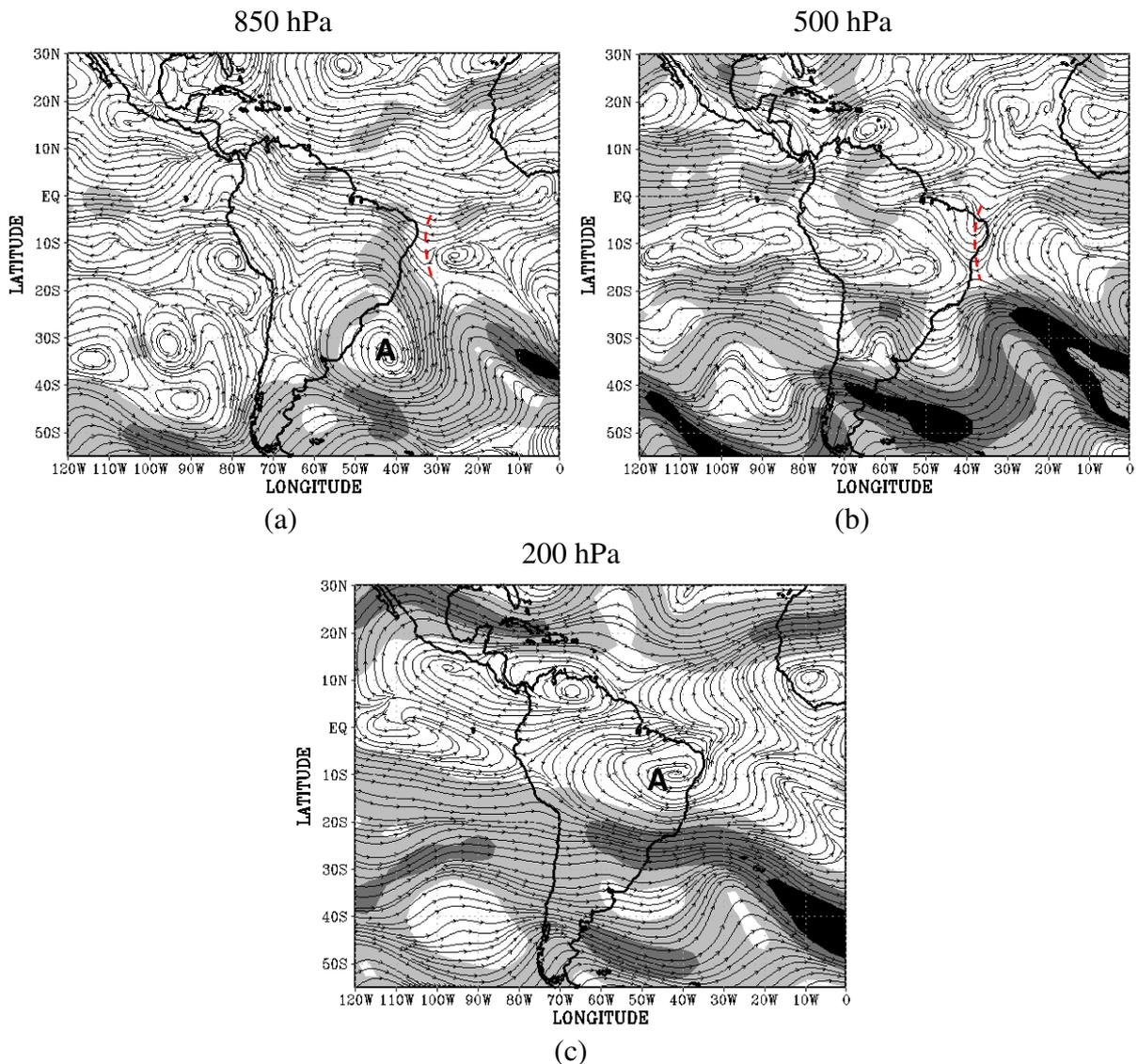


Figura 5.14 – Análise de linhas de corrente e velocidade do vento para as 0000 UTC do dia 11 de maio de 2007 nos níveis de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa. A intensidade do vento está representada por: cinza escuro para $60 \text{ m/s} \leq V$ ($30 \text{ m/s} \leq V$) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$ ($20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa), e cinza claro para $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$ ($10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa). A linha tracejada vermelha em (a,b) assinala um eixo de cavado. A letra A assinala um centro anticiclônico. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

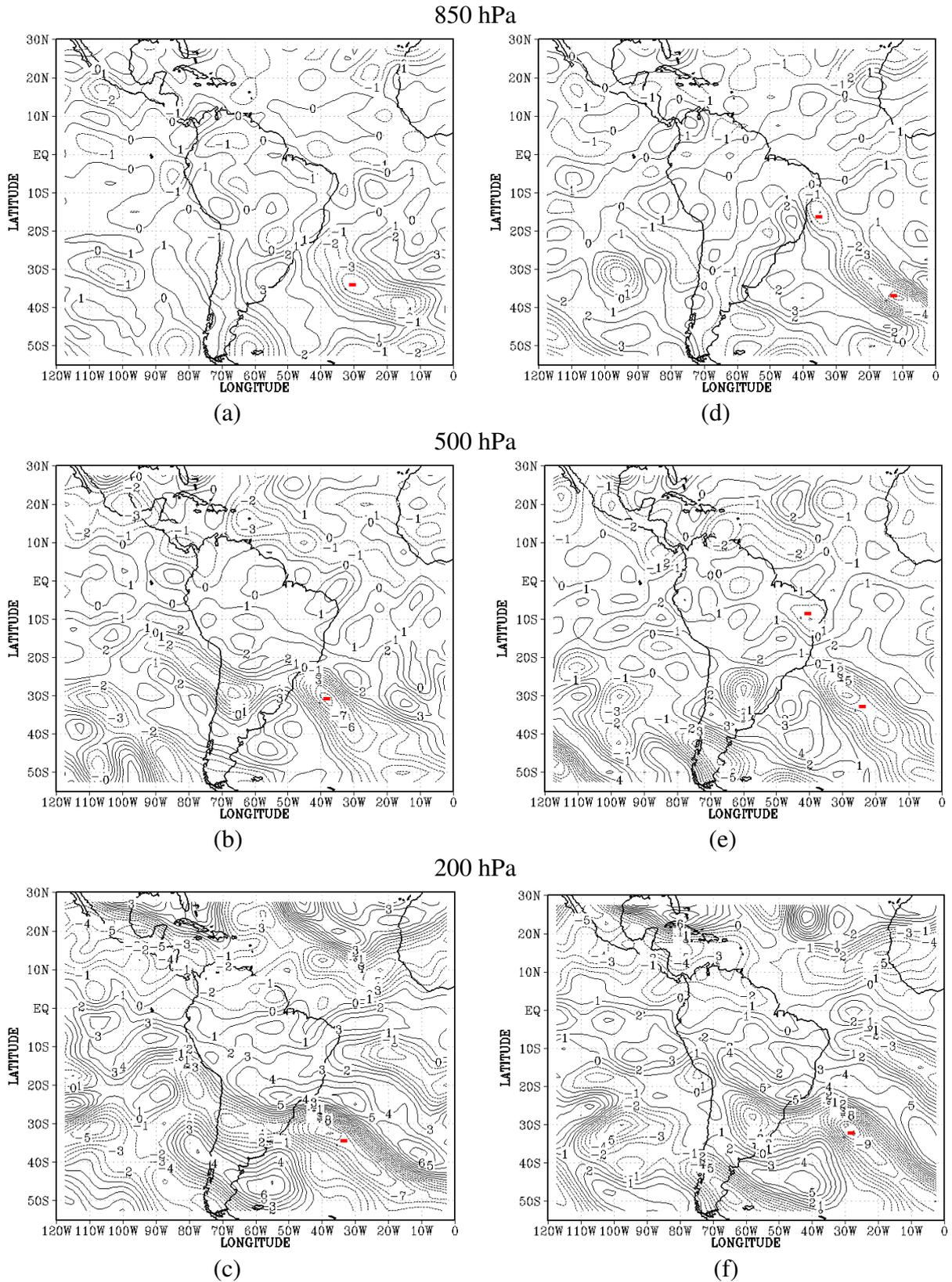


Figura 5.15 – Componente vertical da vorticidade relativa para as 0000 UTC do dia 10 de maio de 2007 no nível de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa e no dia 11 no nível de: (d) 850 hPa, (e) 500 hPa e (f) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). O traço vermelho indica um núcleo de vorticidade ciclônica no Hemisfério Sul. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

O sistema frontal que influenciou parte do Nordeste, em especial a Região Metropolitana de Salvador, observado nos campos da pressão e do vento (Fig. 5.13 e 5.14) também pode ser identificado nos campos de umidade específica das 00 UTC do dia 11, nos níveis de 850 e 925 hPa, apresentados na Figura 5.16. Os elevados valores de umidade e o forte gradiente horizontal evidenciados pelas isolinhas posicionadas na direção noroeste-sudeste sobre o oceano e costa leste do Nordeste (Fig. 5.16a) coincidem com a banda de nebulosidade localizada na mesma área (Fig. 5.11d). Os valores são elevados no nível mais próximo à superfície (Fig. 5.16b).

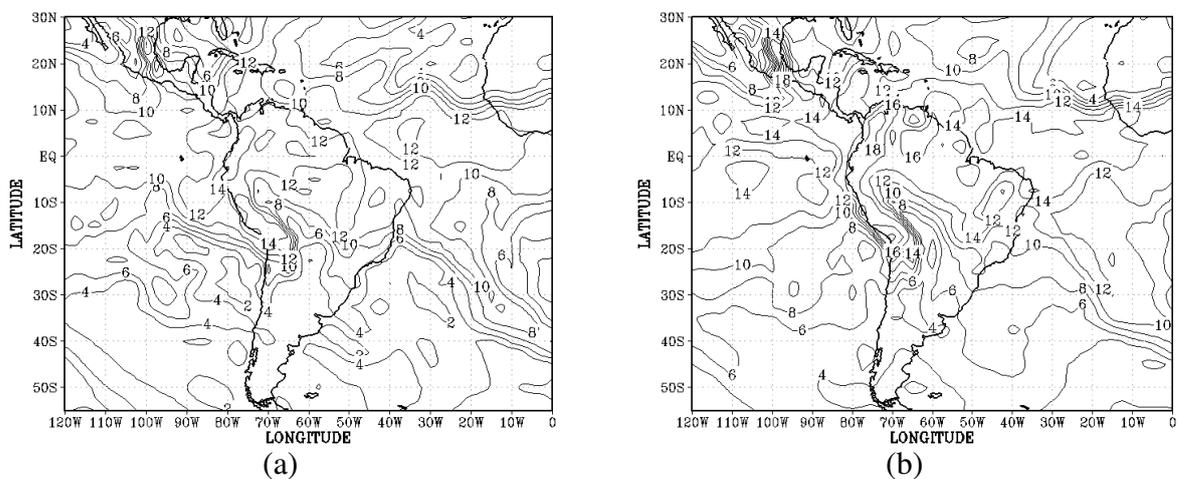


Figura 5.16 – Umidade específica em 11 de maio de 2007 às 0000 UTC no nível de (a) 850 hPa e (b) 925 hPa. O intervalo de análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).

A condição de ascensão na área litorânea foi investigada para horários sinóticos mais próximos dos horários de ocorrência de rajadas de vento dos dias 10 e 11 através de seções pressão-longitude do movimento vertical, ao longo de 13°S , latitude de Salvador (Fig. 5.17). No primeiro dia de ocorrência de rajadas de vento (dia 10) é possível observar às 00 UTC um núcleo ascendente intenso centrado aproximadamente no nível de 500hPa que se estende desde a superfície até a alta troposfera (Fig. 5.17a), enquanto que às 06 UTC (Fig. 5.17b) o movimento vertical ascendente está bastante enfraquecido. Na faixa oceânica próxima de Salvador há movimentos ascendentes em todos os horários, embora atinjam níveis distintos. Na longitude de Salvador (38°W) há um núcleo ascendente na baixa e média troposfera, em concordância com a área de nebulosidade observada nas imagens de satélite (Fig. 5.11b-d) e com a presença do cavado na área dos ventos alísios na região de Salvador (Fig. 5.14a,b).

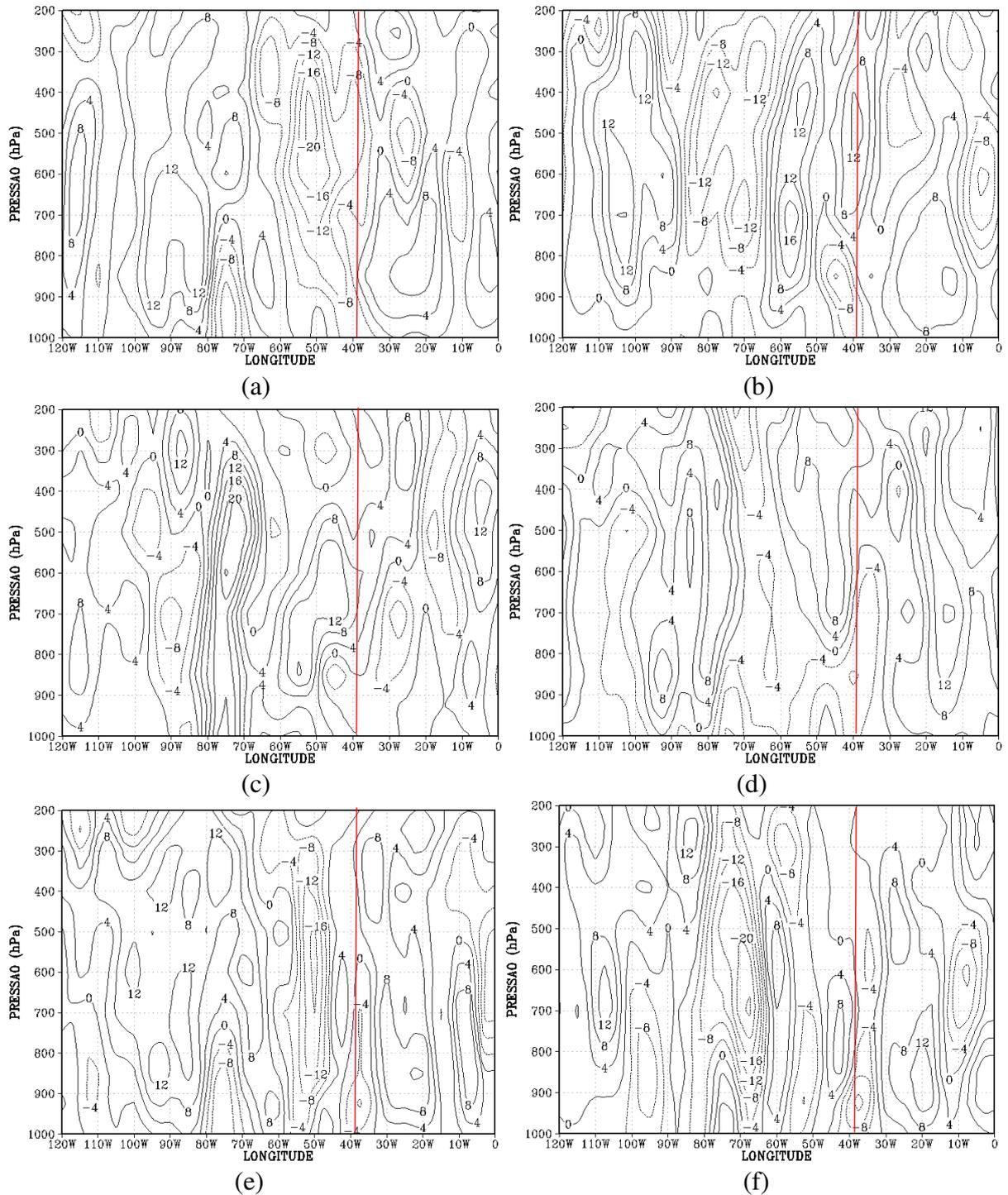


Figura 5.17 – Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 13°S no dia 10/05/2007 às: (a) 0000UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC e (d) 1800 UTC, e no dia 11/05/2007 às: (e) 0000 UTC e (f) 0600 UTC. O intervalo de análise é de $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). A linha contínua vermelha marca a longitude de Salvador (38°W). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

5.4 O EPISÓDIO DE MAIO DE 2009

O outro caso selecionado com base nas mensagens METAR disponibilizadas pela REDEMET tem cinco registros de rajadas de vento, no dia 22 de maio de 2009 (Quadro 5.3), sendo dois na noite do dia 21 (horário local). A rajada mais intensa foi registrada às 04 UTC com velocidade de 50 km/h. No mesmo quadro é observado que as rajadas foram dos setores leste-sudeste (ESE) (início da noite) ou sul (S) (madrugada), o que contribuiu para o elevado número de registros obtido para o setor sul (S) (32 casos) na Figura 5.7. Nos dias 21 e 22 houve 13 registros de cortantes de vento (“wind shear”) do total de 23 casos registrados no mês (não mostrado).

Data	Horário (UTC)	Direção (°) / Setor	Velocidade (km/h)
22/05/2009	01h35min	170 / S	46,3
22/05/2009	02h00min	180 / S	46,3
22/05/2009	04h00min	180 / S	50,0
22/05/2009	05h00min	180 / S	42,6
22/05/2009	18h00min	120 / ESE	46,3

Quadro 5.3 – Data, horário, direção/setor e velocidade das rajadas de vento registradas em maio de 2009 nas mensagens METAR do Aeroporto Internacional de Salvador. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

A Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador (CODESAL) (<http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/>) registrou em seu histórico de acidentes cinco atendimentos entre os dias 21 e 22. Um deles foi uma queda de árvore que teve como provável causa ventanias e enxurradas. O ano de 2009 apresentou total pluviométrico em torno da média climatológica do período 1961-1990 (RAMOS et al., 2009), caracterizando-o como um ano normal, o que foi confirmado por Santos (2013) através da investigação da série histórica dos totais mensais de precipitação da estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Salvador. Ainda de acordo com a autora, o quadrimestre chuvoso da cidade de Salvador (abril-julho) foi classificado como chuvoso e o mês de maio, em particular, como muito chuvoso.

5.4.1 Análise em Componentes Principais

Seguindo o modelo de matriz utilizada para análise dos dados do mês de maio de 2007, os dados horários das mensagens METAR do mês de maio de 2009 (744 horários) foram organizados no modo-P, de modo que a razão entre o número de observações e variáveis é maior do que 5, como sugerido por Hair Jr. et al. (2009) e Figueiredo Filho e Silva Júnior (2010). As variáveis utilizadas e analisadas são as mesmas do caso anterior.

A adequabilidade dos dados à análise em componentes principais foi testada através do grau de correlação entre as variáveis. A matriz de correlação apresenta em sua maioria valores superiores a 0,30 fazendo com que o determinante da matriz seja muito pequeno ($1,84 \cdot 10^{-6}$), o que possibilita a avaliação dos dados com a ACP. Os outros testes utilizados também justificam o uso da técnica, uma vez que o grau de correlação parcial entre as variáveis (MSA) é, em sua maioria, próximo de 1. O menor valor observado foi de 0,535, maior do que o nível indicado por Hair Jr. et al. (2009) e Fávero et al. (2009), de forma que os dados são adequados à utilização da análise fatorial. O valor do KMO do conjunto de dados é de 0,739, ou seja, superior ao patamar crítico de 0,50 e, da mesma forma, o teste de Bartlett é estatisticamente significativo ($p < 0,05$).

A Tabela 5.3 apresenta o número de fatores extraídos e os percentuais da variância total explicada e acumulada. De acordo com o critério de Kaiser e o Screeplot (não mostrado) foram extraídos três fatores que explicam 67,5% (Tabela 5.3) da variância total dos dados. Na primeira componente retida, que explica 31,4% da variância, estão correlacionadas a temperatura, a visibilidade, que apresentam contribuição negativa, além das torres de cumulus congestus (TCU) e dos dois grupos de nuvens mais próximos da superfície (Tabela 5.4). É possível que os grupos de nuvens 1 e 2 tenham sido retidos pelo primeiro fator devido à proximidade entre as alturas das bases das nuvens que puderam ser observadas no conjunto de dados utilizado (não mostrado).

O segundo fator explica 19,3% da variância dos dados e nele foram retidas a temperatura do ponto de orvalho e a umidade específica com contribuições positivas e a pressão com sinal negativo (Tabela 5.4). As variáveis retidas neste fator são as mesmas do segundo fator do caso anterior, indicando a influência de sistemas de latitudes médias. O fator de menor contribuição, que explica 16,8% da variância total dos dados, pode estar relacionado à variabilidade da escala local.

Tabela 5.3 – Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Total Explicada e Acumulada de maio de 2009.

CP	Autovalores iniciais Cargas não rotacionadas			Cargas Rotacionadas (VARIMAX)		
	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)	Valor Próprio	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	4,854	37,340	37,340	4,078	31,370	31,370
2	2,496	19,200	56,540	2,513	19,331	50,701
3	1,425	10,963	67,503	2,184	16,802	67,503
4	0,956	7,355	74,858			
5	0,804	6,188	81,046			
6	0,633	4,872	85,917			
7	0,525	4,037	89,954			
8	0,443	3,407	93,361			
9	0,385	2,965	96,326			
10	0,291	2,242	98,568			
11	0,108	0,835	99,402			
12	0,077	0,590	99,992			
13	0,001	0,008	100,000			

Tabela 5.4 – Matriz dos componentes rotacionados de maio de 2009.

Variáveis	Componentes		
	1	2	3
v	- 0,144	- 0,528	0,508
T	- 0,789	0,153	0,100
Td	0,119	0,943	0,146
q	0,098	0,952	0,126
P	0,294	- 0,588	0,219
TCU	0,568	0,233	0,454
visibilidade	- 0,850	0,031	- 0,152
nebulosidade 1	0,872	0,014	0,174
base 1	0,714	0,070	0,208
nebulosidade 2	0,602	0,067	0,313
base 2	- 0,639	- 0,063	- 0,113
nebulosidade 3	0,454	- 0,007	0,807
base 3	0,177	0,027	0,876

5.4.2 Análise da variação de elementos meteorológicos observados à superfície

A Figura 5.18 ilustra a distribuição do número percentual de casos de direção e velocidade média (km/h) do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2009 e para a média de maio do período em estudo. Nela é possível observar que o setor sul (S) é predominante, apresentando um percentual elevado (39,1%) em 2009, que supera a frequência média do período (Fig. 5.18a). A Figura 5.18b mostra que os valores de velocidade no mês de maio de 2009 apresentam comportamento semelhante à média do período 2003-2011.

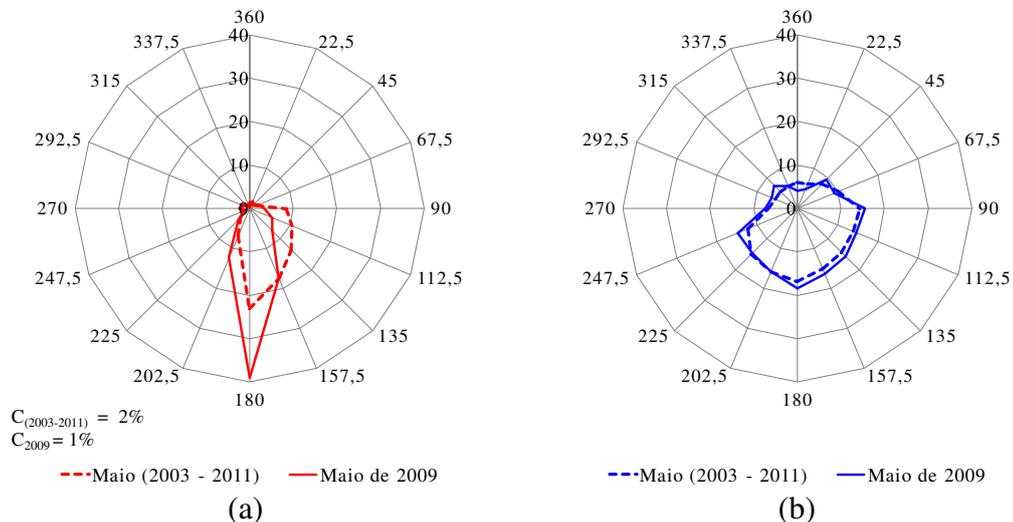


Figura 5.18 – Distribuição do número percentual de casos de direção (a) e velocidade média (km/h) (b) nos 16 setores de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador para o mês de maio de 2009 (contínua) e para os meses de maio do período 2003-2011 (tracejado). O percentual de calmaria é visto no canto inferior esquerdo do gráfico de direção. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

A Figura 5.19 ilustra a série temporal da média diária de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2009. Ela mostra que, de maneira geral, os valores da pressão diminuem até o dia 15, quando atingem o mínimo de 1010,6 hPa (Fig. 5.19a), configuração semelhante àquela observada em maio de 2007 durante a aproximação e passagem de sistemas frontais na área da Região Metropolitana de Salvador. Nos dias posteriores, a pressão aumenta até atingir o valor máximo de 1017,0 hPa no dia 23. No gráfico das temperaturas (Fig. 5.19b) observa-se que a curva da temperatura do ponto de orvalho (Td) indica aumento da umidade atmosférica entre os dias 01 e 07 e 11 e 17.

É importante ressaltar que as curvas da pressão e da temperatura do ponto de orvalho apresentam comportamento inverso.

A Figura 5.19c, que ilustra a variação da média diária das componentes do vento, mostra que a componente meridional é a mais intensa, e que direções do quadrante sudeste são predominantes. Ventos do quadrante sudoeste ocorrem em alguns dias e apenas no dia 16 os ventos são do nordeste. A média mais elevada, 26,5 km/h, ocorre no dia 21 (Fig. 5.19c).

Na Figura 5.20, que ilustra a distribuição horária da velocidade (v_m) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado à superfície no dia das rajadas de vento (22), é possível observar que a componente meridional é predominante e intensa no período da noite e madrugada (entre 1 e 6 UTC), horário em que houve registros de rajadas de vento. Durante a manhã ocorrem os menores valores horários de velocidade (mínimo de 3,7 km/h às 11 UTC), enquanto que o maior, 31,5 km/h, é visto em três horários noturnos: 0, 3 e 6 UTC.

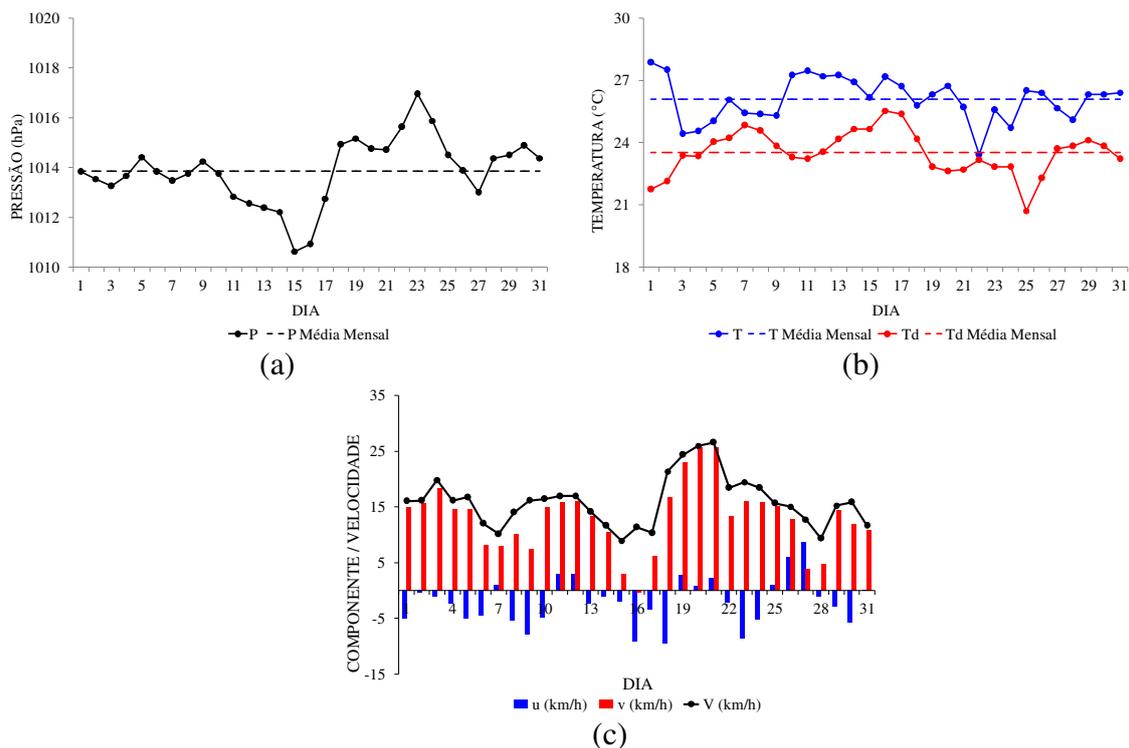


Figura 5.19 – Distribuição dos valores médios diários de elementos meteorológicos observados à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em maio de 2009: (a) pressão (P), (b) temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), e (c) velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo dos gráficos. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

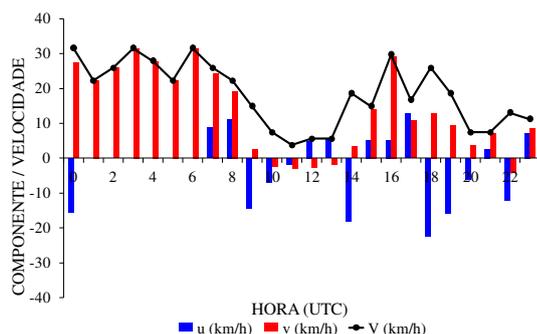


Figura 5.20 – Distribuição dos valores horários da velocidade (V) e componentes zonal (u) e meridional (v) do vento observado à superfície no Aeroporto Internacional de Salvador em 22 de maio de 2009. Os valores positivos (negativos) da componente zonal representam escoamento de oeste (leste). Os valores positivos (negativos) da componente meridional representam escoamento de sul (norte). A simbologia utilizada é vista abaixo do gráfico. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

5.4.3 Análise da nebulosidade e da circulação atmosférica

O Quadro 5.4 apresenta a distribuição horária, em três camadas acrescido do grupo adicional, da quantidade de nuvens existente na área do Aeroporto Internacional de Salvador em 22 de maio de 2009. De maneira geral, as camadas mais próximas da superfície (Grupo 1 e 2) apresentam pelo menos 50% de céu encoberto, em todos os horários, com altura da base das nuvens de até 457 metros, enquanto que a camada acima apresenta o céu 75% ou 100% encoberto. Vale salientar que existe torre de cumulus congestus em todos os horários inteiros do dia 22, inclusive nos horários de ocorrência de rajadas de vento.

Na Figura 5.21 são mostradas imagens do satélite GOES - E para os quatro horários sinóticos do dia 22 de maio. Nessa sequência de imagens é possível observar células de convecção profunda sobre as regiões Norte e Nordeste do Brasil que podem ser associadas a ZCIT. É importante destacar a área encoberta no nordeste da Bahia, que apresenta áreas de convecção profunda em todos os horários (Fig. 5.21), em concordância com a informação da presença de nuvens do tipo cumulus congestus (TCU) nos mesmos horários na área do aeroporto (Quadro 5.4).

Dia/Hora (UTC)	Grupos							
	1		2		3		Adicional	
	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)	cobertura (%)	altura (m)
21 /18	75	213	50	457	100	2439	TCU	610
19	75	152	50	457	100	2439	TCU	610
20	75	91	50	457	100	2439	TCU	610
21	75	274	75	396	75	2134	TCU	610
22	50	305	75	396	75	2134	TCU	610
23	50	305	75	396	75	2134	TCU	610
22 /00	50	305	75	366	75	2134	TCU	610
01	75	244	75	396	75	2134	TCU	610
02	50	274	75	366	75	2134	TCU	610
03	50	183	75	305	75	2134	TCU	610
04	50	244	75	396	75	2134	TCU	610
05	50	274	75	396	75	2134	TCU	610
06	50	213	75	396	75	2134	TCU	610
07	50	183	75	366	100	2134	TCU	610
08	50	183	75	366	100	2134	TCU	610
09	75	274	75	366	100	2134	TCU	610
10	75	152	75	305	100	2134	TCU	610
11	75	274	75	305	100	2134	TCU	610
12	50	457	50	518	75	2134	TCU	610
13	75	61	75	396	100	2134	TCU	610
14	75	152	75	396	100	2134	TCU	610
15	75	61	75	396	100	2134	TCU	610
16	75	91	75	396	100	2134	TCU	610
17	75	274	75	396	100	2134	TCU	610
18	75	183	75	396	100	2134	TCU	610
19	75	244	75	396	100	2134	TCU	610
20	75	274	75	396	100	2134	TCU	610
21	75	305	75	396	100	2134	TCU	610
22	50	366	50	457	100	2134	TCU	610
23	50	396	50	457	75	2134	TCU	610

Quadro 5.4 – Distribuição horária (UTC) em três grupos de cobertura (%) acrescido do grupo adicional e altura da base (m) de nuvens existentes na área do Aeroporto Internacional de Salvador nas últimas horas de 21 de maio de 2009 e no dia 22. As camadas são numeradas da mais baixa para a mais alta. A abreviatura usada para o tipo de nuvem representa TCU = Torre de Cumulus Congestus. Observe que hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: <http://www.redemet.aer.mil.br>).

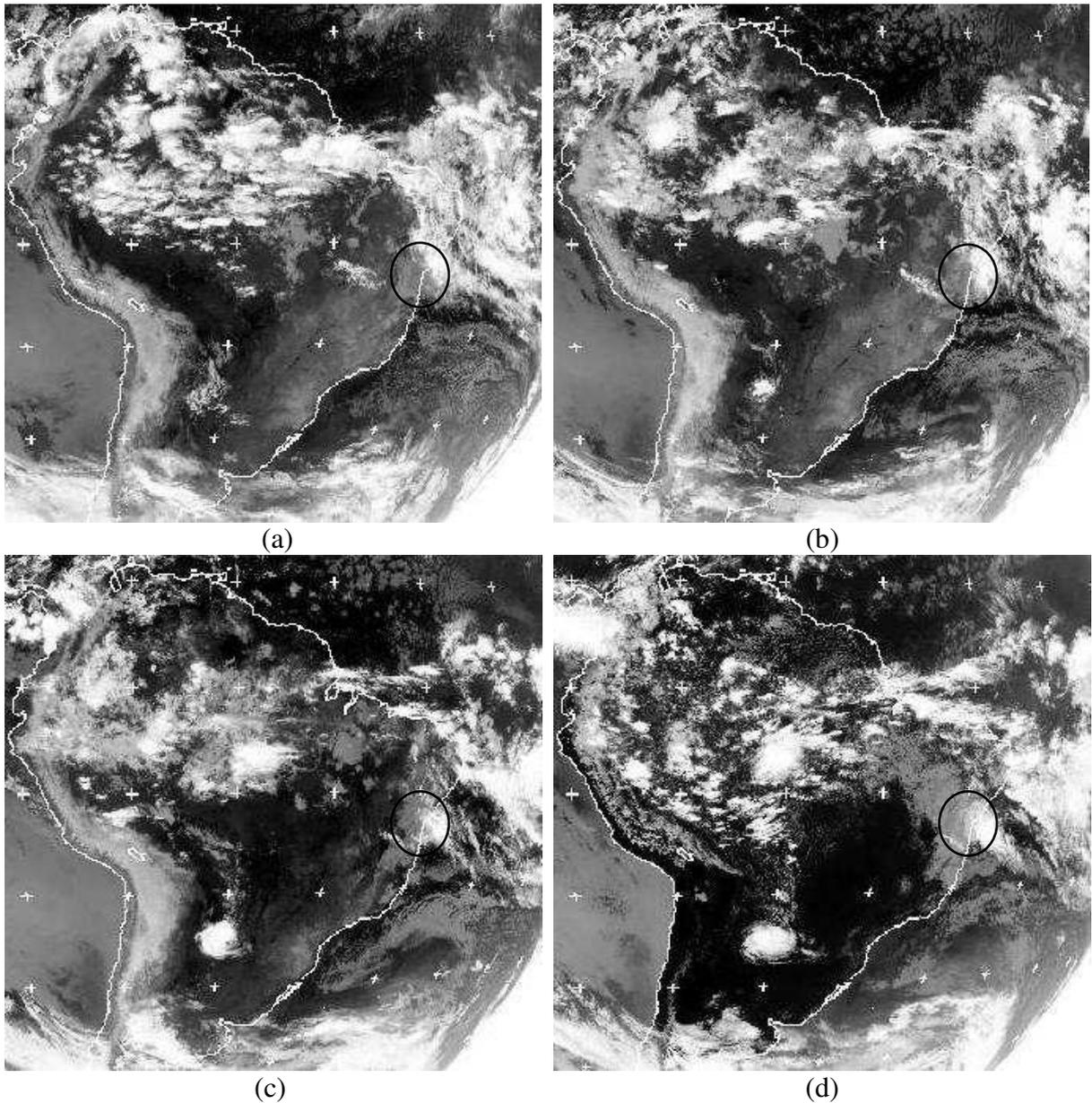


Figura 5.21 – Imagens do satélite meteorológico GOES-E na banda do infravermelho térmico para o dia 22 de maio de 2009 às (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC e às (d) 1800 UTC. A circunferência preta está aproximadamente centrada sobre Salvador. (Fonte das imagens: Adaptado de <http://www.sat.dundee.ac.uk>).

Nas imagens realçadas do satélite GOES - 10 (Fig. 5.22) para o período entre o dia 21 e 22 (ocorrência de rajadas) de maio de 2009 verifica-se a presença generalizada de nuvens convectivas sobre parte do Nordeste e área oceânica adjacente, que podem ser associadas às áreas de nebulosidade observadas nas imagens da Figura 5.21. É possível notar a presença de núcleos convectivos profundos com topos frios de até -50°C sobre o nordeste da Bahia e, em particular, sobre a RMS e área oceânica próxima no período das rajadas de vento (Fig. 5.22d-

h). A presença desses núcleos está em concordância com as nuvens do tipo cumulus congestus observadas na área do aeroporto durante todo o dia 22 (Quadro 5.4).

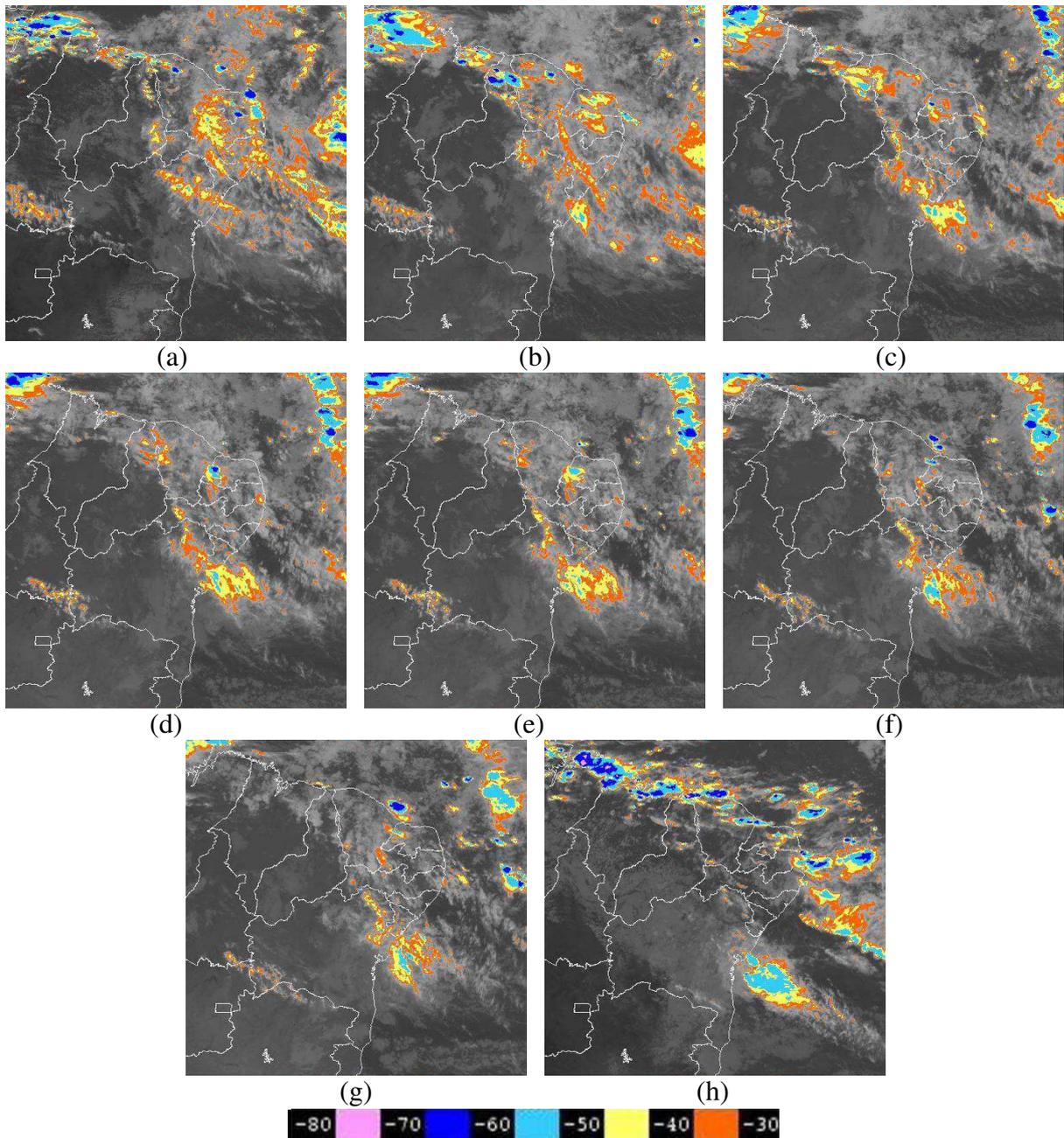


Figura 5.22 – Imagem realçada do satélite meteorológico GOES-10 da área do Nordeste do Brasil e adjacências para o dia 21 de maio de 2009 às: (a) 1800 UTC, (b) 2100 UTC e, para o dia 22 às (c) 0000 UTC, (d) 0130 UTC, (e) 0200 UTC, (f) 0400 UTC, (g) 0500 UTC e às (h) 1800 UTC. A escala de cores da temperatura de brilho é vista abaixo das imagens. (Fonte das imagens: Adaptado de http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes_anteriores.jsp).

Na Figura 5.23, que ilustra o campo da pressão para o dia das rajadas e anterior, observa-se sobre o Oceano Atlântico uma baixa frontal e o forte centro de alta pressão na sua retaguarda. Também é possível observar um cavado na área dos ventos alísios, na área costeira leste do Nordeste, e valores de pressão relativamente baixos na faixa equatorial que podem ser associados a ZCIT. Nestas áreas é vista atividade convectiva nas imagens de satélite (Figuras 5.21 e 5.22). Segundo Barreto (comunicação pessoal), a estação climatológica principal do INEMET em Salvador registrou às 12 UTC do dia 22 um total pluviométrico diário de 68,1 mm, caracterizando um evento extremo de chuva na cidade. Vale destacar ainda que mapas e imagens de satélite de dias anteriores (não mostrado) indicam que o desenvolvimento do cavado na área dos alísios foi favorecido pela passagem frontal do dia 15 indicada pela Figura 5.19.

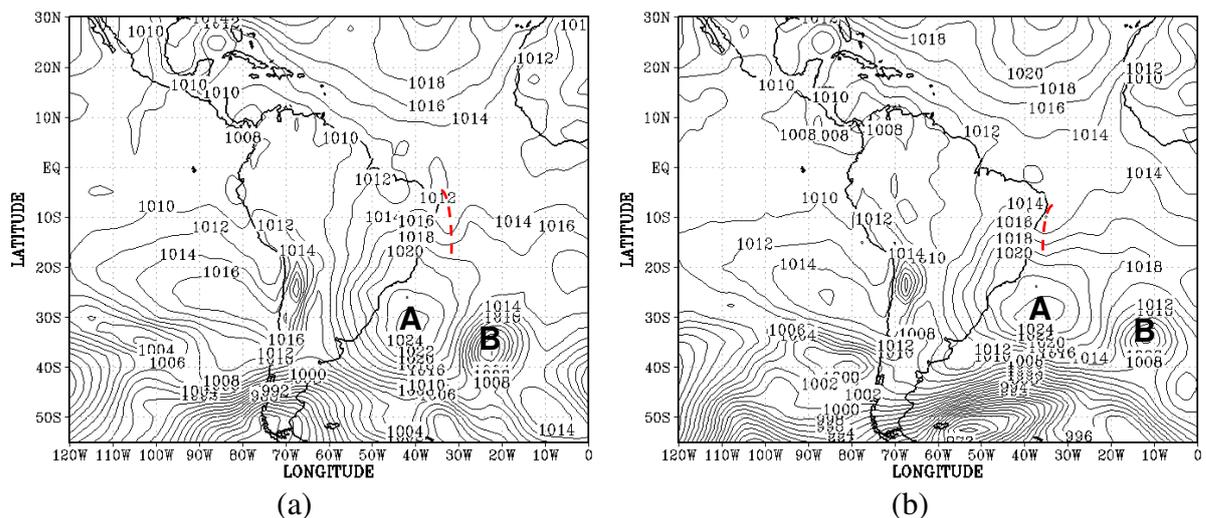


Figura 5.23 – Pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa) para as 0000 UTC do dia: (a) 21/05/2009 e (b) 22/05/2009. O intervalo de análise é de 2 hPa. A letra A (B) assinala um centro de alta (baixa) pressão. A linha tracejada vermelha assinala um eixo de cavado. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

O campo do vento para as 00 UTC do dia 22 de maio de 2009 é apresentado na Figura 5.24. Na baixa troposfera (Fig. 5.24a), há sobre o Nordeste e área oceânica próxima um cavado de pequena amplitude na área dos alísios, onde os ventos atingem entre 10 e 20 m/s. Nessa área a nebulosidade é evidente nas imagens de satélite (Figs. 5.21 e 5.22). Nota-se também o cavado frontal que se estende até próximo de 20°S e o anticiclone na sua retaguarda, porém menos intenso do que aquele visto no episódio de maio de 2007 (Fig. 5.14a). No nível de 500 hPa (Fig. 5.24b) é possível observar o cavado frontal se estendendo

até aproximadamente 15°S, no litoral nordestino. Nos altos níveis ele está presente sobre o continente, onde alcança latitudes próximas do Equador. Ainda chama atenção no nível de 200 hPa a corrente de jato sobre a América do Sul que, conforme o CLIMANÁLISE (2009), apresentou maior intensidade a partir do dia 22.

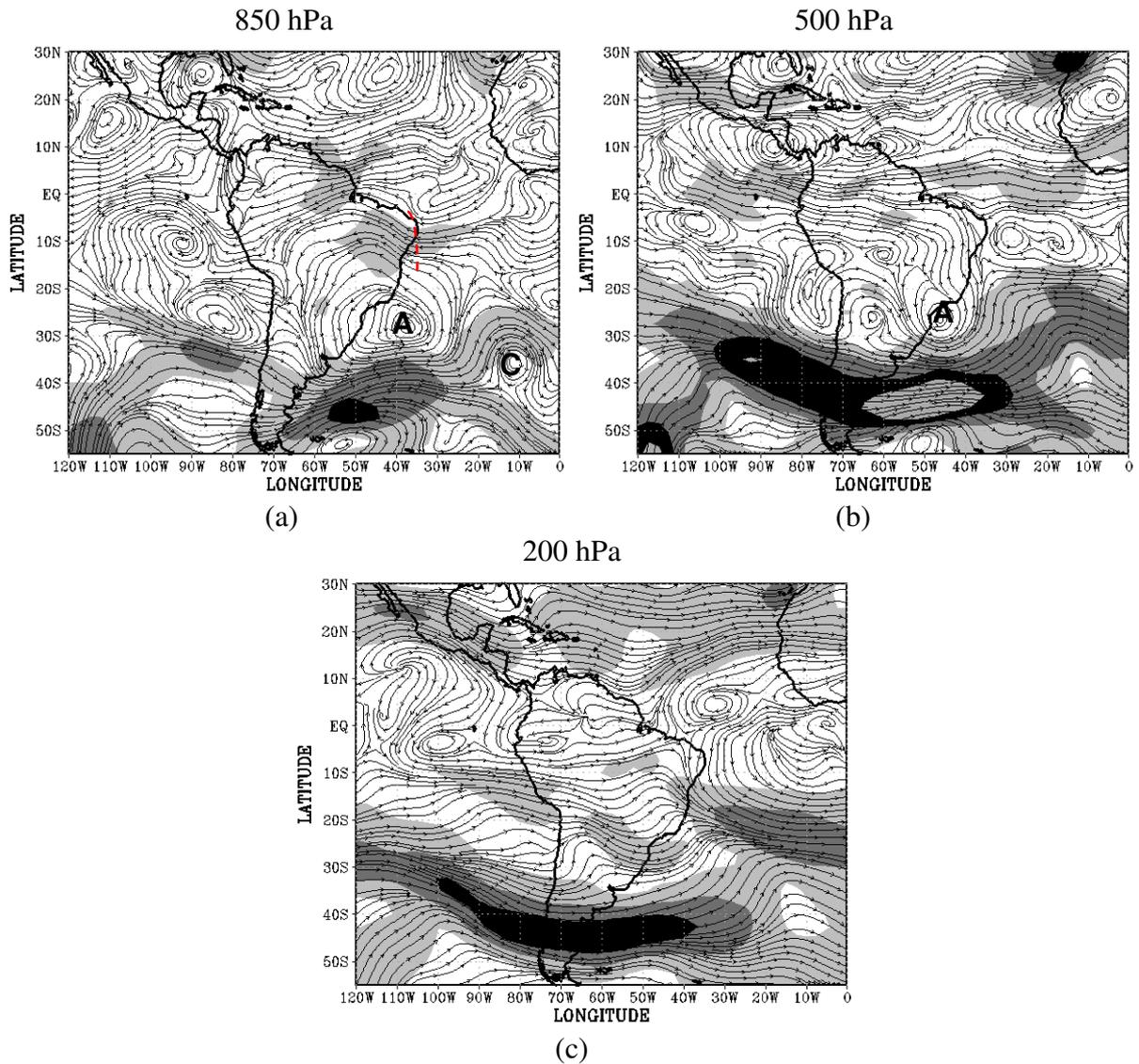


Figura 5.24 – Análise de linhas de corrente e velocidade do vento para as 0000 UTC do dia 22 de maio de 2009 nos níveis de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa. A intensidade do vento está representada por: cinza escuro para $60 \text{ m/s} \leq V$ ($30 \text{ m/s} \leq V$) em 200 hPa (500 hPa), cinza médio para $40 \text{ m/s} \leq V < 60 \text{ m/s}$ ($20 \text{ m/s} \leq V < 30 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa), e cinza claro para $20 \text{ m/s} \leq V < 40 \text{ m/s}$ ($10 \text{ m/s} \leq V < 20 \text{ m/s}$) em 200 hPa (500 e 850 hPa). A linha tracejada vermelha em (a) assinala um eixo de cavado. A letra A (C) assinala um centro anticiclônico (cyclônico). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

O campo da componente vertical da vorticidade relativa para as 00 UTC dos dias 21 e 22 de maio de 2009 apresenta no nível de 850 hPa (Fig. 5.25a,d) um núcleo de vorticidade ciclônica sobre a costa do Nordeste, coincidindo com o cavado na área dos ventos alísios visto no campo da pressão (Fig. 5.23) e com a área onde há nuvens convectivas evidenciadas nas imagens realçadas (Fig. 5.22). O núcleo negativo situado sobre a área subtropical do Oceano Atlântico (Fig. 5.25d-f) está associado ao cavado frontal observado em todos os níveis na Figura 5.24. Esse núcleo negativo também é visto nos mapas do dia anterior (Fig. 5.25a-c). É importante observar que ele se estende sobre o continente no nível de 200 hPa, nos dois dias (Fig. 5.25c,f). O centro de vorticidade anticiclônica situado na retaguarda do sistema frontal pode ser visto em todos os níveis da atmosfera, embora seja mais intenso no dia 21 (Fig. 5.25a-c).

A Figura 5.26 mostra o campo da umidade específica para as 00 UTC do dia 22 de maio de 2009. Nela é possível observar uma área com alto teor de umidade na área costeira do Nordeste com máximo de 14 g kg^{-1} no nível de 925 hPa (Fig. 5.22b), o que pode ser associado à atividade convectiva desenvolvida na área dos ventos alísios e, conseqüentemente, às nuvens do tipo cumulus congestus (TCU) observadas na área do aeroporto durante todo o dia 22 (Quadro 5. 4).

A Figura 5.27 apresenta seções retas verticais do movimento vertical ao longo da latitude de Salvador (13°S), cuja longitude (38°W) é indicada pela linha vertical vermelha. As seções verticais correspondem aos horários sinóticos, das 12 UTC do dia 21 (Fig. 5.27a) às 18 UTC do dia 22 (Fig. 5.27f). Na longitude de Salvador é evidente, em todos os horários, um núcleo ascendente centrado na baixa troposfera, que é mais intenso às 06 e 18 UTC do dia 22 (Fig. 5.27d,f). Na média e alta troposfera o sinal do movimento vertical varia no decorrer do tempo. A presença de estruturas de mesoescala bem definidas é evidenciada pela extensão horizontal e vertical das áreas de ascendência e descendência centradas a oeste e a leste de Salvador, às 06 e 12 UTC do dia 22 (Fig. 5.27d,e). Em particular, merece destaque o núcleo ascendente intenso centrado na média troposfera, próximo de 38°W , às 06 UTC do dia 22 (Fig. 5.27d).

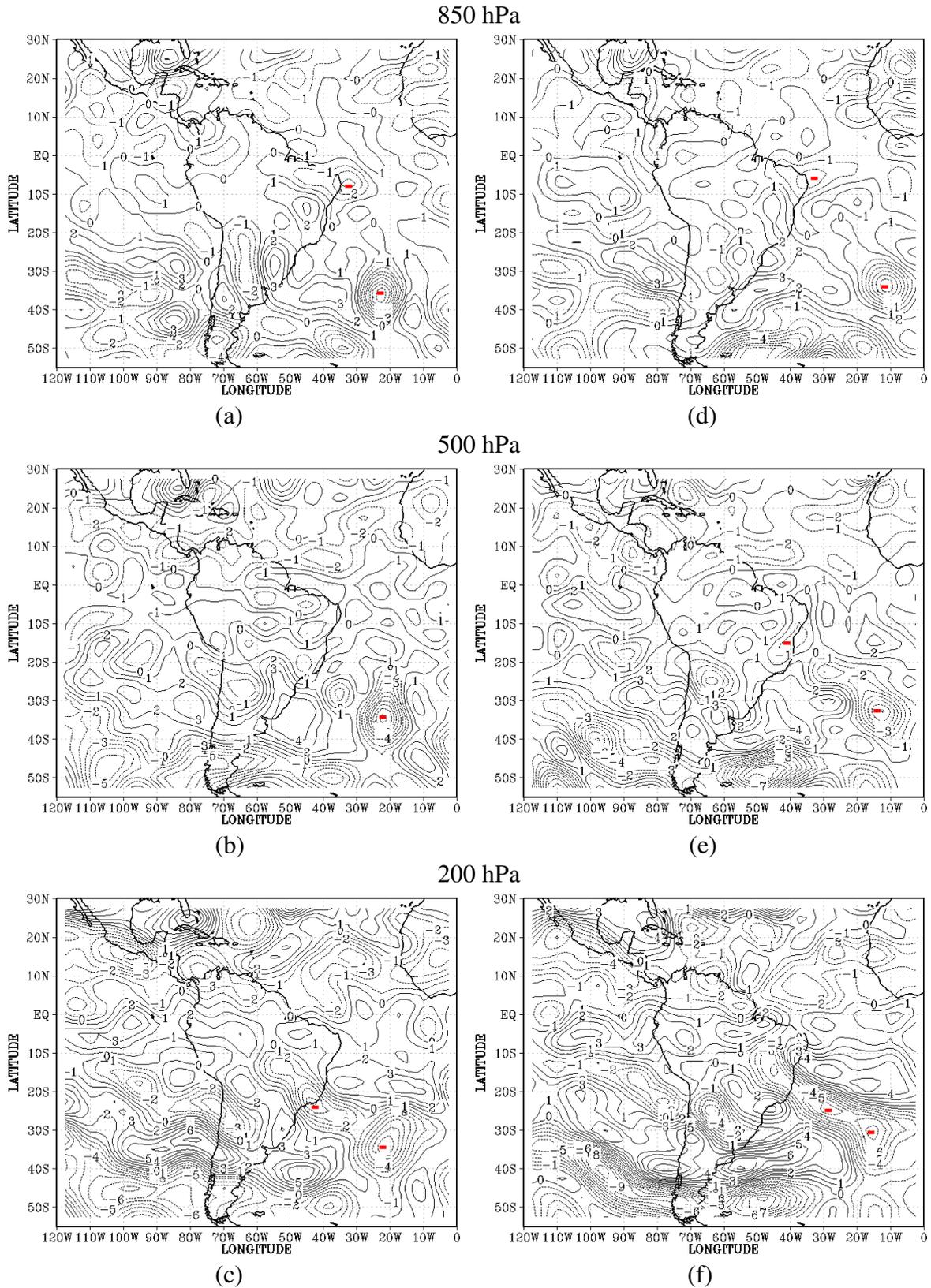


Figura 5.25 – Componente vertical da vorticidade relativa para as 0000 UTC do dia 21 de maio de 2009 no nível de: (a) 850 hPa, (b) 500 hPa e (c) 200 hPa e no dia 22 no nível de: (d) 850 hPa, (e) 500 hPa e (f) 200 hPa. O intervalo de análise é de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos). O traço vermelho indica um núcleo de vorticidade ciclônica no Hemisfério Sul. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

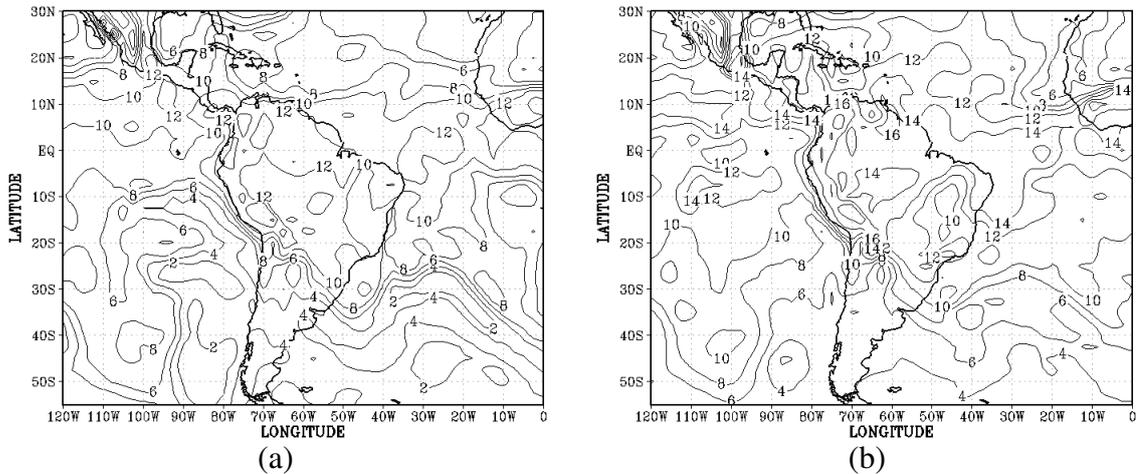


Figura 5.26 – Umidade específica em 22 de maio de 2009 às 0000 UTC no nível de (a) 850 hPa e (b) 925 hPa. O intervalo de análise é de 2 g kg^{-1} . (Fonte dos dados: *NCEP/NCAR*).

As condições de estabilidade da atmosfera em Salvador nos dias 21 e 22 são avaliadas com base nos perfis verticais da temperatura potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) obtidos das sondagens de ar superior realizadas às 1200 UTC (Figura 5.28). No dia anterior ao evento de rajadas de vento (21), a atmosfera se encontra relativamente seca entre a superfície e 600 hPa, aproximadamente (Figura 5.28a), conforme evidencia o afastamento entre as curvas de θ_e e θ_{es} . Nessa camada a atmosfera é convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z < 0$). No dia dos registros de rajadas de vento (22) a proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es} indica que a atmosfera tem alto teor de umidade até níveis mais elevados (Fig. 5.28b), em consequência do transporte vertical de umidade nas células de convecção profunda organizadas em mesoescala sobre a RMS e área oceânica próxima (Fig. 5.22b-g). Contrastando com o dia anterior, a atmosfera está convectivamente neutra ($\partial\theta_e/\partial z = 0$) na camada que se estende da superfície até próximo de 600 hPa.

Os perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) e da velocidade do vento (V) são apresentados na Figura 5.28 c,d. Eles indicam que no dia 21 (Fig. 5.28c), o vento alterna entre os quadrantes sudoeste, próximo à superfície, e sudeste até, aproximadamente, a média troposfera, onde o vento passa a ser do quadrante noroeste e mais intenso. No dia 22 (Fig. 5.28d) predominam ventos do quadrante nordeste até o nível de 870 hPa; acima deste nível é possível observar que o vento é do quadrante sudeste até 390 hPa onde muda para noroeste. De maneira geral, o vento é mais intenso na alta troposfera, em torno de 150 hPa, onde atinge velocidades acima de 60 km/h. A velocidade do vento à

superfície ilustrada nesses gráficos confirma a velocidade elevada do dia 21 vista na Figura 5.19c e o vento fraco doze horas após, evidenciado na Figura 5.20.

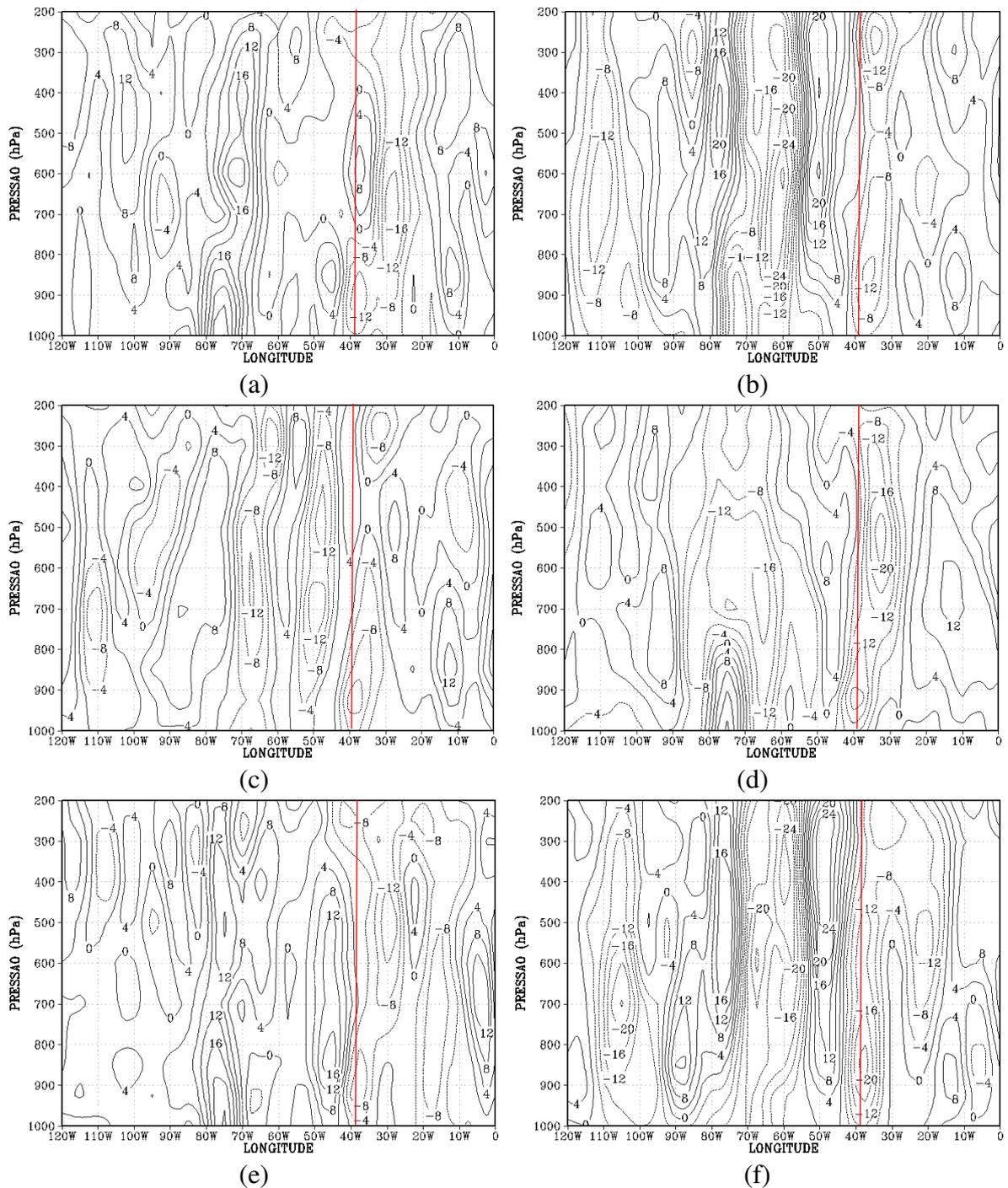


Figura 5.27 – Seção reta vertical do movimento vertical ao longo da latitude de 13°S no dia 21/05/2009 às: (a) 1200 UTC e (b) 1800 UTC, e 22/05/2009 às: (c) 0000 UTC, (d) 0600 UTC, (e) 1200 UTC e (f) 1800 UTC. O intervalo de análise é de $4 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a movimento vertical descendente (ascendente). A linha contínua vermelha marca a longitude de Salvador (38°W). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

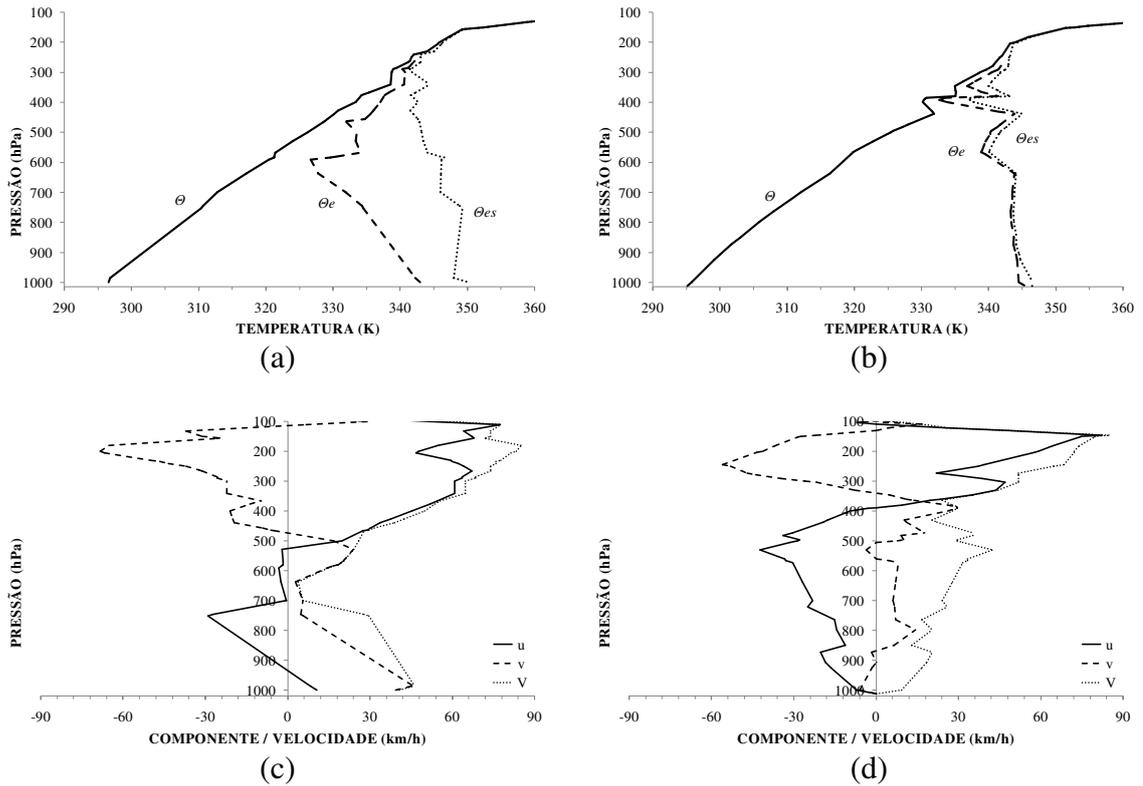


Figura 5.28 – Perfis verticais das temperaturas potencial (θ), potencial equivalente (θ_e), potencial equivalente de saturação (θ_{es}), e das componentes zonal (u), meridional (v) e velocidade (V) do vento obtidos de sondagem realizada na estação de altitude de Salvador-BA às 12 UTC do dia: (a, c) 21/05/2009 e (b,d) 22/05/2009. Valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam a componente de sul (norte). Observe que a hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte dos dados: www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

6.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados episódios de rajadas de vento observados no Aeroporto Internacional de Salvador no período 2003-2011, com ênfase na identificação de mecanismos físicos envolvidos e condições sinóticas de casos selecionados a partir da intensidade e frequência das rajadas.

No período de estudo ventos do setor leste predominam em todos os anos e são os mais frequentes no primeiro e último trimestre do ano. Nos demais, ventos do setor sul, sul-sudeste e/ou sudeste são os de maior frequência. Também foi constatado que setores menos frequentes se caracterizam por valores de velocidade elevados. A análise horária evidenciou o ciclo diário do vento e mostrou que os maiores (menores) valores são registrados no período da tarde (madrugada e início da manhã).

Foram contabilizados 63 casos de rajadas de vento, sendo que 51% foram registrados nos anos de 2003 (17) e 2007 (16). Os meses de maio de 2007 e 2009 apresentaram o maior número de registros mensais, e os valores de velocidade mais elevados, 68,5 km/h e 50 km/h, respectivamente, o que motivou a investigação desses meses. Ventos do setor sul ocorrem em 51% dos casos de rajadas. A frequência das rajadas é mínima entre meia noite e 7 horas da manhã, o que contrasta com as observações dos meses selecionados.

Maio de 2007 teve 5 registros de rajadas de vento nos dias 10 e 11, sendo um deles o mais intenso do período 2003-2011 (68,5 km/h). Torres de nuvens cumulus congestus foram observadas em todos os horários, com exceção de um. A ACP aplicada ao conjunto de variáveis das observações de superfície reteve 5 fatores que explicam 82,8% da variância total. As variáveis retidas pelos dois primeiros fatores indicam associações na escala de tempo sinótica provocadas pela aproximação e passagem de sistemas frontais que alcançaram a RMS. Esse resultado foi confirmado através de variações de elementos meteorológicos observados à superfície, da nebulosidade e da circulação atmosférica.

No caso de maio de 2009 também houve 5 registros de rajadas de vento, todos no dia 22, e na presença de torres de nuvens cumulus congestus. A ACP extraiu 3 fatores que explicam 67,5% da variância dos dados. As variáveis retidas nas duas primeiras componentes indicam mecanismos que favorecem o desenvolvimento de um cavado na área dos ventos alísios, após uma passagem frontal na Região Metropolitana de Salvador.

A CODESAL, em seu histórico de acidentes na cidade de Salvador, sede da região metropolitana, registra atendimentos realizados nos dias de ocorrência das rajadas e relaciona a ocorrência dos desastres a fatores meteorológicos como ventos fortes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; 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.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Tropical Pacific and South Atlantic effects on rainfall variability over Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1895-1912, 2006.

BANDEIRA, M. M.; MELO, E. C. S. Atuação do vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil no mês de janeiro nos anos de 2004 e 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC: SBMET, 2006. 1 CD-ROM.

BARBOSA SILVA, A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; Condições Sinóticas em Episódio de Rajadas de Vento na Região Metropolitana de Salvador. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 4, p. 635-651, 2013.

BARBOSA SILVA, A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; OLIVEIRA SILVA, P. K. Características de Episódios de Rajadas de Vento no Aeroporto Internacional de Salvador. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa/PB. **Anais...** João Pessoa/PB, 1 CD-ROM, 2011.

BARRETO, A. B. **Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil**. 2001. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2001.

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

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

BRASIL. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Departamento de controle do espaço aéreo. Manual do Especialista em Informação Aeronáutica. **MCA 53-1**. BCA, n. 150. [Rio de Janeiro], 2008.

BRASIL. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Departamento de controle do espaço aéreo. Manual de Códigos Meteorológicos. **MCA 105-10**. BCA, n. 001. [Rio de Janeiro], 2012.

CONFALONIERI, U. E. C. Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil. **Terra Livre**, São Paulo, ano 19, v. 1, n. 20, p. 193-204, 2003.

CORRAR, L. J.; PAULO, E; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. Ed. Atlas. São Paulo, 2007.

CORREIA, A. A. **Padrões de variabilidade do vento à superfície no Nordeste do Brasil**. 2000. 66 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande/PB, 2000.

CORREIA, M. F. **Meteorologia Aplicada I**. Códigos Meteorológicos (Versão Preliminar), Parte 2, 1995.

CORREIA, M. F.; COSTA, M. N. M.; BARBOSA SILVA, A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; QUEIROZ, J. N. Processos de desestabilização atmosférica e convecção profunda na semiárido brasileiro. **Ciência e Nature**, Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, v. Especial, ed. Suplementar, p. 274-276, 2013.

COSTA, J. J.; GIUDICE, D. S. Fenômenos naturais e ação antrópica: Problemática de Salvador - BA. **Revista Geonorte**, v.2, p. 477-486, 2012.

COUTINHO, E. C.; FISH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do centro de lançamento de Alcântara – MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 193-203, 2007.

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

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de dados: Modelagem multivariada para tomada de decisões**. Ed. Elsevier. 4ª Ed., Rio de Janeiro, 2009.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010.

HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Ed. Bookman, 6ª Ed., Porto Alegre, 2009.

JIMÉNEZ, P. A.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; MONTÁVEZ, J. P.; NAVARRO, J.; GARCIA-BUSTAMANTE, E.; VALERO, F. Surface wind regionalization in complex terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, p. 308-325, 2008.

KAISER, H. F. 1958. The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOSIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

KLINK, K. Climatological mean and interannual variance of United States surface wind speed, direction and velocity. **International Journal of Climatology**, v. 19, p. 471-488, 1999.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Boston, 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.

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.

OLIVEIRA SILVA, P. K. **Análise multivariada aplicada ao vento na área costeira do Nordeste do Brasil**, 2011. 61 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2011.

OLIVEIRA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Variabilidade do vento à superfície em meses extremos de chuva na área metropolitana de Salvador, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: SBMET, 2008. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Rajadas de vento na região metropolitana de Salvador, Bahia. **Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, v. Especial, ed. Suplementar, p. 185-188, 2009.

OLIVEIRA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; BARBOSA SILVA, A. Detecção de padrões homogêneos de vento. Parte 2: Análise de agrupamento. **Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, v. Especial, ed. Suplementar, p. 347-350, 2011.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G. **Normais Climatológicas do Brasil. 1961-1990** / DF: INMET, p. 279, 2009.

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

ROCHA, F. G.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A. Análise de eventos extremos de chuva ocorridos em maio de 2006 em Salvador. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa/PB. **Anais...** João Pessoa/PB: SBMET, 2011. 1 CD-ROM.

SANTOS, A. H. M. **Eventos extremos de chuva em Salvador, Bahia: Condições atmosféricas e impactos ambientais**. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2008.

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

SANTOS, A. P. P. **Precipitação na cidade de Salvador: Classificação em quantis e análise de um evento climático extremo**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2013.

SILVA ARAGÃO, M. R.; BARRETO, A. B.; CORREIA, M. F. Variabilidade sazonal e horária da chuva na cidade de Salvador, Bahia. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador/BA. **Anais...** Salvador/BA: ABRH, 2008. 1 CD-ROM.

SILVA ARAGÃO, M. R.; BARBOSA SILVA, A.; CORREIA, M. F.; OLIVEIRA SILVA, P. K. Episódios de Rajadas de Vento no Aeroporto Internacional de Salvador. In: BRAZILIAN MICROMETEOROLOGY WORKSHOP, 7., 2011. Santa Maria/RS. **Anais...** Santa Maria/RS, 2011. 1 CD-ROM.

SILVA, J. M.; SILVA, A. E. Atuação de um vórtice ciclônico de altos níveis no Nordeste brasileiro entre os dias 27 e 30 de janeiro de 2004. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC: SBMET, 2006. 1 CD-ROM.

SONNEMAKER, J. B. **Meteorologia**. São Paulo: Editora Asa. 203 p., [199-].

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden-Julian oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1759-1776, 2006.

PÁGINAS ELETRÔNICAS

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 22, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Maio/2007. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf07/mai07.pdf>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2014, 09:00:00.

CLIMANÁLISE, **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Volume 24, Número 05. Cachoeira Paulista/SP. INPE/CPTEC, 1986. Publicação Mensal. Maio/2009. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/pdf/pdf09/mai09.pdf>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2014, 08:30:00.

CODESAL – Coordenadoria da Defesa Civil de Salvador. Prefeitura Municipal de Salvador. Disponível em: <<http://www.defesacivil.salvador.ba.gov.br/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2013, 10:00:00.

SALVADOR. Lei nº 7.400/2008, de 20 de fevereiro de 2007. Dispõe sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município do Salvador – PDDU e dá outras providências. **Diário Oficial do Município de Salvador**, Salvador, Bahia. 2008. Disponível em: <http://www.desenvolvimentourbano.salvador.ba.gov.br/lei7400_pddu/index.php>. Acesso em: 07 de agosto de 2013, 16:15:00.

SALVADOR. Lei nº 8.167/2012, de 29 de dezembro de 2011. Dispõe sobre a Lei de Ordenamento do Uso e da Ocupação do Solo do Município de Salvador – LOUOS. **Diário Oficial do Município de Salvador**, Salvador, Bahia. Ano XXIV, nº 5.534, 2012. Disponível em: <http://www.desenvolvimentourbano.salvador.ba.gov.br/lei8167_nova_louos/>. Acesso em: 07 de agosto de 2013, 16:30:00.