

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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**TESE DE DOUTORADO**

**Nilzele de Vilhena Gomes Jesus**

**Padrões atmosféricos de condições meteorológicas  
adversas no Aeroporto Internacional de Belém**

**Campina Grande, Dezembro de 2016**



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

**NILZELE DE VILHENA GOMES JESUS**

**PADRÕES ATMOSFÉRICOS DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS NO  
AEROPORTO INTERNACIONAL DE BELÉM**

**Campina Grande – PB  
2016**

NILZELE DE VILHENA GOMES JESUS

**PADRÕES ATMOSFÉRICOS DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS NO  
AEROPORTO INTERNACIONAL DE BELÉM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Departamento de Ciências Atmosféricas, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia Aplicada

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Magaly de Fátima Correia

Campina Grande – PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

J58p

Jesus, Nilzele de Vilhena Gomes.

Padrões atmosféricos de condições meteorológicas adversas no aeroporto internacional de Belém / Nilzele de Vilhena Gomes Jesus. – Campina Grande-PB, 2016.

131 f. : il. color.

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

"Orientação: Profa. Dra. Magaly de Fátima Correia".

Referências.

1. Condições Meteorológicas Adversas – Aeroporto – Belém-PA. 2. Análise Fatorial – Aeroporto – Belém-PA. I. Correia, Magaly de Fátima. II. Título.


CDU 551.510.411.3 (043)

NILZELE DE VILHENA GOMES JESUS

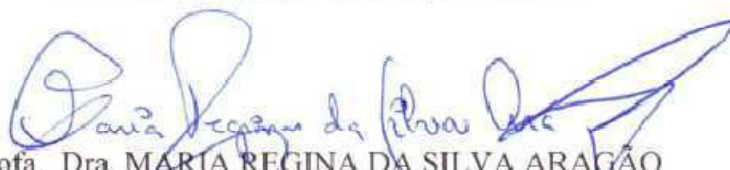
PADRÕES ATMOSFÉRICOS DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS NO  
AEROPORTO INTERNACIONAL DE BELÉM

TESE APROVADA EM 29/08/2014


BANCA EXAMINADORA



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



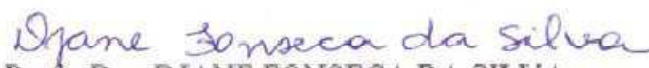
Profª. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Profª. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. WENDELL RONDINELLI GOMES FARIAS  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Santa Catarina



Profª. Dra. DJANE FONSECA DA SILVA  
Universidade Federal do Ceará  
Campus Cariri

Dedico este trabalho ao Senhor Jesus pelo seu infinito amor, misericórdia e por ter me dado forças para não desistir dos meus objetivos, mesmo diante dos obstáculos que pareciam ser intransponíveis. E a minha família pelo apoio e amor incondicional dispensado durante esta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo seu infinito amor e por sempre se fazer presente na minha vida.

Meus agradecimentos a minha orientadora Prof. Dra. Magaly de Fátima Correia, pela orientação, paciência, e pelo enorme aprendizado através do qual eu adquiri. Aos membros da banca avaliadora pelas valiosas contribuições no aprimoramento desse estudo.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela oportunidade de realizar este curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para realização da pós-graduação.

À INFRAERO e ao SIPAM pelo apoio no período de realização deste estudo. Ao DTCEA-BE e NCEP pela disponibilidade dos dados utilizados nessa análise.

À Divanete pela amizade, competência, profissionalismo e atenção apresentada durante o curso.

Ao servidor do SIPAM Alen Vieira pelo auxílio no processamento dos dados utilizados neste estudo.

À minha família amada, na pessoa do meu Pai Manoel, Minha mãe Nilzete e meu irmão Fábio pela renúncia de suas próprias vontades para me acompanhar no decorrer do curso; pelo amor, carinho, apoio e dedicação em todos os momentos da minha vida. Ao meu amado esposo Edmir pelo amor e apoio dedicados à minha pessoa.

Aos meus amigos de curso e de vida Alexandra Tavares, Andréia Cerqueira, Cláudia Wanzeler, Daniele Nogueira, Eliene Rodrigues, Jonathan Amanajás, Márcia Marques e Roberta Araújo que foram importantes nesta caminhada.

A todos que contribuíram de forma positiva nesta minha jornada.

## RESUMO

A ocorrência de condições meteorológicas adversas em aeroportos determina situações desfavoráveis ao tráfego aéreo, como restrição de visibilidade e teto, além de condições de pista escorregadia, que constituem um fator de grande risco à segurança das operações. Estes contratempos podem acarretar prejuízos vultosos para as empresas envolvidas e desconforto ao usuário da aeronavegação. Por isso, este estudo teve como objetivo a determinação de padrões atmosféricos que originam a ocorrência de condições meteorológicas adversas no Aeroporto Internacional de Belém (SBBE), através da aplicação da análise fatorial (AF) em análises de componentes principais (ACP). Foram usados os dados meteorológicos de superfície do SBBE e de Radiação de Onda Longa (ROL), em ponto de grade sobre Belém, proveniente das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Através dos indicadores estatísticos, foi selecionado o conjunto de variáveis adequadas para a aplicação da ACP. Os dados utilizados foram dos períodos chuvosos de 2003 a 2012, pois na estação chuvosa foi detectado o maior número de emissões de mensagens especiais (código SPECI) no SBBE. O fator dominante está associado à variação diária do aquecimento/resfriamento da superfície. O segundo fator representa as alterações no teor de umidade próximo da superfície, decorrente da variabilidade climática associada com anomalias da temperatura da superfície do mar nos Oceanos Atlântico e Pacífico. E o outro fator igualmente importante, tem relação com a presença de convecção profunda, e conseqüentemente, de tempestades, as quais foram desenvolvidas por mecanismos das circulações locais dinâmicos em mesoescala, tais como circulações de brisa marítima e/ou fluvial sobre a área em que se localiza o SBBE. Este último fator foi o qual apresentou o maior número de ocorrência das variáveis que apresentam relação com o estabelecimento das situações meteorológicas adversas que limitam as operações de pousos e decolagens no SBBE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Condições meteorológicas adversas. Belém. Aeroporto. Análise Fatorial.



## **ABSTRACT**

The occurrence of adverse weather conditions at airports determines unfavorable situations to air traffic, as visibility and ceiling restriction, and slippery track conditions, which are a major risk factor for safety operations. These setbacks can cause sizeable losses for the companies involved and discomfort to the airworthiness of the users. Therefore, this study aimed at determining weather patterns that cause the occurrence of adverse weather conditions in Belem International Airport (SBBE) through the application of factor analysis (FA) on principal components analysis (PCA). It was used meteorological surface data from the SBBE and outgoing longwave radiation (OLR), in grid point over Belém (Brazil), from the reanalysis of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Through statistical indicators, it was selected the appropriate set of variables for the application of the PCA. The data used were in the rainy periods of 2003 to 2012, as the rainy season has been detected as many reports of the SPECI code in the SBBE. The dominant factor is associated with the daily variation of the heating/cooling of the surface. The second factor is the changes in the moisture content near the surface as a result of climate variability associated with temperature anomalies of the sea surface in the Atlantic and Pacific Oceans. And another equally important factor is related to the presence of deep convection, and consequently storms, which were developed by mechanisms of dynamic local mesoscale circulations such as circulations of maritime and/or fluvial breeze over the area in which is located the SBBE. This last factor was the one which had the highest number of occurrences of the variables that have relation with the establishment of the adverse weather conditions that limit of takeoffs and landings operations in the SBBE.

**KEYWORDS:** Adverse weather conditions. Belém. Airport, Factor Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema da circulação de brisa. (a) Brisa marítima e (b) Brisa terrestre. Fonte: Sills (1998).....	33
Figura 4.1 Mapas com a localização da área de estudo. (a) Mapa da América do Sul com destaque para o estado do Pará; (b) Mapa do estado do Pará com destaque em Belém e (c) Mapa do norte e nordeste paraense, com destaque para o Aeroporto Internacional de Belém.....	39
Figura 4.2 Imagem da localização das pistas do Aeroporto Internacional de Belém e a localização do Rio Pará a oeste do sítio aeroportuário. Em destaque está a localização das cabeceiras (CAB) da pista principal e secundária.....	40
Figura 4.3 Distribuição anual da precipitação na Amazônia em mm/ano, segundo Figueroa e Nobre (1990) .....	41
Figura 4.4 Distribuição sazonal da precipitação na Amazônia em mm/3meses. (a) dezembro-janeiro-fevereiro, (b) março-abril-maio segundo Figueroa e Nobre (1990).....	42
Figura 4.4. Continuação.....	43
Figura 4.5 Distribuição anual da precipitação média em Belém baseada na normal climatológica do INMET de 1961 a 1990. Adaptado de Ramos et al., (2009).....	44
Figura 4.6 Localização geográfica do ponto de grade utilizado para extração de radiação de onda longa emergente (ROL) sobre Belém.....	46
Figura 5.1 Acumulado médio mensal de precipitação e média mensal de umidade relativa do ar em superfície no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 no Aeroporto Internacional de Belém. ....	60
Figura 5.2 Acumulado médio mensal de precipitação e média mensal das temperaturas média, máxima e mínima em superfície no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 no Aeroporto Internacional de Belém.....	60
Figura 5.3 Número de mensagens especiais (SPECI) emitidas pelo Aeroporto Internacional de Belém no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012.....	61
Figura 5.4 Número de ocorrência dos fenômenos meteorológicos no Aeroporto Internacional de Belém no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012.....	62
Figura 5.5 Distribuição do número percentual de casos de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) nos anos de: (a) 2003, (b) 2004, (c) 2005, (d) 2006, (e) 2007, (f) 2008, (g) 2009, (h) 2010, (i) 2011 e (j) 2012. Os valores das circunferências representam a frequência de direção do vento (em porcentagem).....	63
Figura 5.6 Frequência percentual horária de cada setor de direção do vento no Aeroporto Internacional de Belém durante os meses do período chuvoso de 2003 a 2012: (a) 2003, (b) janeiro, (c) fevereiro, (d) março, (e) abril e (f) maio.....	66
Figura 5.7 Ciclo diurno da temperatura média do ar na superfície no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) de 2003 a 2012.. ....	68

Figura 5.8 Ciclo diurno da ocorrência de chuva no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) de 2003 a 2012. ....	68
Figura 5.9 Série temporal dos escores que representam o primeiro fator rotacionado (F1) no período de 2003 a 2012 no Aeroporto Internacional de Belém em: (a) todos os horários; e nos intervalos de (b) 21:00 às 03:00 hora local (HL); (c) 03:00 às 09:00HL; (d) 09:00 às 15:00HL e (e) 15:00 a às 21:00HL. (continua). ....	73
Figura 5.9. Continuação.....	74
Figura 5.10 Série temporal dos escores que representam o segundo fator rotacionado (F2) no período de 2003 a 2012 no Aeroporto Internacional de Belém em: (a) todos os horários; e nos intervalos de (b) 21:00 às 03:00 hora local (HL); (c) 03:00 às 09:00HL; (d) 09:00 às 15:00HL e (e) 15:00 a às 21:00HL. (continua). ....	77
Figura 5.10. Continuação.....	78
Figura 5.11 Série temporal dos escores que representam o terceiro fator rotacionado (F3) no período de 2003 a 2012 no Aeroporto Internacional de Belém em: (a) todos os horários; e nos intervalos de (b) 21:00 às 03:00 hora local (HL); (c) 03:00 às 09:00HL; (d) 09:00 às 15:00HL e (e) 15:00 a às 21:00HL. (continua). ....	80
Figura 5.11. Continuação.....	81
Figura 5.12 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao primeiro fator (F1).....	84
Figura 5.13 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao segundo fator (F2).....	85
Figura 5.14 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao terceiro fator (F3).....	87
Figura 5.15 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 26 de abril de 2003 às 1811Z (15:11 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	90
Figura 5.16 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 26 de abril de 2003 às 2039Z (17:39 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA. ....	91
Figura 5.17 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.....	92
Figura 5.18 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.....	92
Figura 5.19 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.....	93

Figura 5.20 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3), obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 20 a 30 de abril de 2003.....	94
Figura 5.21 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 27 de abril de 2011 às 1800Z (15:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	79
Figura 5.22 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 27 de abril de 2011 às 2000Z (17:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	97
Figura 5.23 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no centro e norte do Brasil.....	98
Figura 5.24 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no norte do Brasil.....	99
Figura 5.25 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no norte do Brasil.....	99
Figura 5.26 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3), obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 20 a 30 de abril de 2011.....	100
Figura 5.27 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 02 de dezembro de 2011 às 0000Z (21:00 HL de 01/12/2011): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	103
Figura 5.28 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 02 de dezembro de 2011 às 0300Z (00:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	103
Figura 5.29 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no centro e norte do Brasil.....	104
Figura 5.30 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no norte do Brasil.....	105
Figura 5.31 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no norte do Brasil.....	105
Figura 5.32 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3) obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 1 a 10 de dezembro de 2011.....	106
Figura 5.33 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 06 de março de 2012 às 1800Z (15:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	109
Figura 5.34 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 06 de março de 2012 às 1930Z (16:30 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.....	109
Figura 5.35 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no centro e norte do Brasil.....	110

Figura 5.36 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no norte do Brasil.....	111
Figura 5.37 Divergência de massa e umidade e circulação do vento em 200 hPa, 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no norte do Brasil.....	111
Figura 5.38 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3) obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 1 a 10 de março de 2012.....	112

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 Categorias para a operação do Instrument Landing System – Sistema de Pousos por Instrumentos classificadas através dos mínimos valores de Teto e Visibilidade no aeródromo (adaptada de BRASIL, 2011).....	23
Quadro 4.1 Relação das variáveis utilizadas neste estudo.....	48
Quadro 4.2 Critério dos dados utilizado na adequabilidade dos dados considerando intervalos sinóticos (0000-0600Z, 0600-1200Z, 1200-1800Z e 1800-0000Z).....	51
Quadro 4.3 Intervalos dos registros de direção do vento (em graus) associado com cada setor de direção do vento, com referência ao norte verdadeiro.....	52
Quadro 4.4 Intervalos das taxas de chuva acumulado por hora $\text{mm h}^{-1}$ ) usados para classificação da intensidade de chuva de acordo com o BRASIL (2014b).....	52
Quadro 4.5- Matriz de entrada formada pelos dados das variáveis pelo escala temporal de tempo utilizada.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Frequência da velocidade do vento no Aeroporto Internacional de Belém nos períodos chuvosos (dezembro a maio) de 2003 a 2012 nos intervalos de 1,8 a 9,2 KT, de 11,1 a 18,5 KT, de 20,3 a 27,7 KT, de 29,6 a 37,0 KT e 38,6 a 55,5 KT.....	65
Tabela 5.2 Matriz de correlação do conjunto de variáveis selecionadas para a aplicação da análise fatorial.....	69
Tabela 5.3 Valores das comunalidades das variáveis selecionados para a aplicação da análise fatorial.....	70
Tabela 5.4 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Explicada para o período chuvoso entre janeiro de 2003 a dezembro de 2012.....	71
Tabela 5.5 Carga fatorial referente aos três fatores rotacionados obtidos na Análise Fatorial dos dados meteorológicos do Aeroporto Internacional de Belém, durante o período chuvoso de 2003 a 2012.....	71
Tabela 5.6 Valor absoluto dos casos que totalizaram 10% dos maiores valores dos escores temporais, em módulo, associados aos três fatores obtidos através da análise fatorial.....	82
Tabela 5.7 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 26 e 27 de abril de 2003. Fonte: REDEMET.....	89
Tabela 5.8 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 26 e 27 de abril de 2003 sobre o SBBE.....	94
Tabela 5.9 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 27 e 28 de abril de 2011. Fonte: REDEMET.....	95
Tabela 5.10 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 27 de abril de 2011 sobre o SBBE.....	100
Tabela 5.11 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 01 e 02 de dezembro de 2011. Fonte: REDEMET.....	102
Tabela 5.12 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 01 e 02 de dezembro de 2011 sobre o SBBE.....	106
Tabela 5.13 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 06 e 07 de março de 2012. Fonte: REDEMET.....	107
Tabela 5.14 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 06 de março de 2012 sobre o SBBE.....	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CB	Cumulonimbus
WS	Wind Shear
SBSL	Aeroporto Internacional de São Luís
SBBE	Aeroporto Internacional de Belém
HL	Hora Local
LI	Linha de Instabilidade
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
OACI	Organização de Aviação Civil Internacional
MCA	Manual do Comando da Aeronáutica
VFR	Visual Flight Rules
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
ILS CAT I	ILS de categoria um
ILS CAT II	ILS de categoria dois
ILS CAT III A	ILS de categoria três tipo A
ILS CAT III B	ILS de categoria três tipo B
ILS CAT III C	ILS de categoria três tipo C
METAR	Meteorological Aerodrome Report
SPECI	Special Weather Report
AMS	American Meteorological Society
UR	Umidade Relativa
ATL	Aeroporto Internacional de Atlanta
SFO	Aeroporto Internacional de São Francisco
FRA	Aeroporto Internacional de Frankfurt
HN	Hemisfério Norte
PDTO	Pontualidade nos horários de partida e chegada de voos
SBGR	Aeroporto Internacional de Guarulhos
HS	Hemisfério Sul
SBPL	Aeroporto Internacional de Petrolina
CAPE	Energia Potencial Disponível para Convecção
SBMQ	Aeroporto Internacional de Macapá



TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
FAV	Favorável
DESFAV	Desfavorável
OMJ	Oscilação de Madden e Julian
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
AB	Alta da Bolívia
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
CN	Cavado do Nordeste
NW	Noroeste
SE	Sudeste
NZCAS	Não Zona de Convergência do Atlântico Sul
SF	Sistema Frontal
DOLs	Distúrbios Ondulatórios de Leste
NEB	Nordeste Brasileiro
ACP	Análise em Componentes Principais
AF	Análise Fatorial
LAX	Aeroporto Internacional de Los Angeles
EMS	Estação meteorológica de Superfície
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
DJF	Dezembro-janeiro-fevereiro
MAM	Março-abril-maio
JJA	Junho-julho-agosto
SON	Setembro-outubro-novembro
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NCEP	National Centers for Environmental Predictions
Z	Zulu
ROL	Radiação de Onda Longa
NCAR	National Center for Atmospheric Research
MCONV	Convergência de Umidade
MCG	Modelo de Circulação Geral
GOES	Geoestacionary Operation Enviromental Satellite
IR	Infravermelho
NCL	Nível de Condensação por Levantamento
TL	Temperatura do NCL
DDZERO	Frequência em seis horas da velocidade do Vento igual a zero

KMO	Teste de Kaiser-Meyer-Olkin
TSB	Teste de Significância de BARTLETT
<b>10%E</b>	10% dos maiores valores da série temporal dos escores
CINE	Convective Inhibition Energy
CISZ	Cisalhamento do vento zonal entre os níveis de 500 e 1000 hPa
Chuv	Chuva
E	Leste
ZCA	Zona de Confluência dos Ventos Alísios
DDN	Frequência em seis horas da direção do Vento de Norte
DDNE	Frequência em seis horas da direção do Vento de Nordeste
DDE	Frequência em seis horas da direção do Vento de Leste
DDSE	Frequência em seis horas da direção do Vento de Sudeste
DDS	Frequência em seis horas da direção do Vento de Sul
DDSW	Frequência em seis horas da direção do Vento de Sudoeste
DDW	Frequência em seis horas da direção do Vento de Oeste
DDNW	Frequência em seis horas da direção do Vento de Noroeste
THETA E	Temperatura Potencial Equivalente
Velmed	Velocidade média do vento
VelMax	Velocidade máxima do vento
TempMed	Temperatura média do ar
TemMax	Temperatura máxima do ar
TetoMed	Altura média da base da nuvem mais baixa
VisMed	Visibilidade horizontal média
F1	Primeiro fator
F2	Segundo fator
F3	Terceiro fator
CLN	Camada Limite Noturna
CLC	Camada Limite Convectiva

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
3.1 METEOROLOGIA E AS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS .....	22
3.2 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA.....	27
3.2.1 Zona de Convergência Intertropical.....	29
3.2.2 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, Cavado do Nordeste e Alta da Bolívia .....	30
3.2.3 Zona de Convergência do Atlântico Sul e Sistemas Frontais.....	31
3.2.4 Circulação de Brisa e Linhas de Instabilidade (LIs) .....	32
3.2.5 Distúrbios Ondulatórios de Leste.....	35
3.3 ANÁLISE FATORIAL EM COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADAS A VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS .....	36
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1.1 Climatologia de Belém.....	40
4.2 DADOS.....	45
4.2.1 Seleção das variáveis e processamento dos dados. ....	47
4.3 METODOLOGIA .....	48
4.3.1 Obtenção de parâmetros.....	48
4.3.2 Análise Fatorial em Componentes Principais (ACP).....	53
4.4 LIMITAÇÕES NOS DADOS .....	57
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
5.1 ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS NO SBBE .....	59
5.2 ANÁLISE FATORIAL .....	69

5.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	82
5.3.1 Histograma de frequência.....	82
5.3.2 Estudos de casos .....	88
5.3.2.1 Caso 1: 26 de abril de 2003 .....	88
5.3.2.2 Caso 2: 27 de abril de 2011 .....	94
5.3.2.3 Caso 3: 02 de dezembro de 2011 .....	101
5.3.2.4 Caso 4: 06 de março de 2012 .....	107
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>114</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO A – SEQUÊNCIA DE MENSAGENS METEOROLÓGICAS DE AERÓDROMO REGULAR (METAR) E ESPECIAL (SPECI) PARA OS PERÍODOS DOS ESTUDOS DE CASOS ANALISADOS, QUE ORIGINARAM AS TABELAS 5.10, 5.11. 5.12 E 5.13.....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento socioeconômico do país tem desencadeado um considerável crescimento no transporte aéreo brasileiro e vem resultando na necessidade de rápida locomoção de pessoas, bens e serviços. Em localidades remotas, como na Amazônia, o único meio do deslocamento de bens e serviços, de forma rápida e segura, é por meio da aviação. Os dados apresentados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) mostram que o Brasil caminha para um crescimento efetivo de fluxos nacionais e internacionais.

Alguns estudos mostram que, a variação das condições atmosféricas determina situações desfavoráveis ao tráfego aéreo, como restrição de visibilidade, teto e condições de pista escorregadia, que constituem fatores de grande risco à segurança das operações (PIVA; FEDOROVA, 1999; FOGACCIA; PEREIRA FILHO, 2002; CERQUEIRA et al., 2005). Estes contratempos podem acarretar prejuízos vultosos para as empresas envolvidas e desconforto ao usuário da aeronavegação.

Segundo Mccrea et al. (2008), um dos maiores custos na indústria do transporte aéreo está associado aos atrasos de voos. Existem os custos operacionais tais como: a tarifa de permanência em solo, horas extras de tripulação e de funcionários de pátios. Além disso, cada vez mais os órgãos de defesa do consumidor criam obrigações de compensação por danos sofridos pelos passageiros.

As condições meteorológicas adversas também afetam a segurança das atividades aeroportuárias. Levantamentos do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) mostram que o total de acidentes na aviação civil tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Em 2011 houve um aumento de aproximadamente 42% no total de ocorrência de acidentes em relação ao ano anterior. Segundo o CENIPA, dos acidentes aeronáuticos que aconteceram no Brasil de 2001 a 2010, cerca de 13% foram devido a condições meteorológicas, embora a meteorologia aeronáutica tenha passado por um grande avanço tecnológico e profissional nesta década.

Diante da importância das condições de tempo nas atividades aeroportuárias, é essencial o conhecimento da variabilidade dos elementos e dos sistemas meteorológicos atuantes em um aeroporto e sua vizinhança, além de entender melhor os padrões atmosféricos que promovem as condições adversas de tempo nos aeroportos. Entretanto, poucos estudos têm sido desenvolvidos na área.

A variabilidade na atividade convectiva e precipitação é uma característica intrínseca da região Amazônica (MOHR et al., 1999; FIGUEROA; NOBRE, 1990) e favorece a ocorrência de fenômenos adversos de tempo que impactam as operações aeroportuárias,

como formação de nuvens *Cumulonimbus* (CB), cortante de vento (ou wind shear - WS), trovoadas, gelo, granizo, dentre outros.

Uma situação típica da influência de condições adversas na operação aeronáutica pode ser ilustrada pela ocorrência do acidente aeronáutico registrada em 1 de julho de 2003. Nesta data uma aeronave que decolou do Aeroporto Internacional de São Luiz - MA (SBSL), com destino ao Aeroporto Internacional de Belém - PA (SBBE), não conseguiu chegar ao local de destino, pois a mesma caiu na Ilha das Onças, que fica cerca de 9 km do SBBE, por volta das 20:00 hora local (HL). Tavares (2004) analisou as condições de tempo na ocasião deste acidente aeronáutico e verificou as características do tempo mudaram rapidamente. Uma das variações mais significativas ocorreu na visibilidade horizontal que reduziu abruptamente para 1800 metros, em decorrência de chuva forte e trovoadas provocadas pela presença de uma Linha de Instabilidade (LI) que atuava no momento do acidente. Portanto, há um indicativo que as condições de tempo foi um fator contribuinte para ocorrência deste acidente aeronáutico.

Neste contexto é evidente a necessidade de estudos que analisem as principais características meteorológicas que estão por trás da ocorrência de condições adversas de tempo em aeroportos, identificando quais os padrões atmosféricos que estão associados à ocorrência de tempo significativos que interferem diretamente nas operações aeronáuticas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicação de técnicas de estatística multivariada na determinação de padrões atmosféricos que determinam a ocorrência de condições meteorológicas adversas no Aeroporto internacional de Belém (SBBE).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as condições médias das variáveis meteorológicas durante o período de estudo.
- Descrever os padrões atmosféricos que predominam no período chuvoso no SBBE.
- Identificar os padrões atmosféricos associados às condições de tempo presente que limitaram as operações de pousos e decolagens no SBBE.
- Validar os padrões atmosféricos associados às condições de tempo adverso no SBBE, através de histogramas de ocorrências e estudos de casos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 METEOROLOGIA E AS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS

Desde os primórdios da aviação, a informação meteorológica tem sido vital para a segurança das operações aéreas, contribuindo para o conforto dos passageiros, o estabelecimento de rotas mais rápidas, econômicas e de voos regulares. No Brasil, a atividade de Meteorologia Aeronáutica é de competência do Comando da Aeronáutica e desenvolvida pelo Sistema de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB), sob a responsabilidade do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que é filiada internacionalmente a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI).

Fenômenos atmosféricos como, tempestades, rajadas, névoa úmida, nevoeiros e chuvas influenciam as atividades aeroportuárias. Por isso, em aeroportos, existem equipamentos de auxílio à navegação aérea que determinam as condições de operações em um aeroporto na ocorrência de condições meteorológicas adversas. Segundo Brasil (2008) existe dois tipos de operações para a aviação, que são definidas baseadas nas condições meteorológicas.

Voos visuais (*Visual Flight Rules* – VFR) é o tipo de operação que o piloto realiza com o auxílio da sua própria visão, de modo que as formações meteorológicas abaixo do nível de voo não obstruam mais da metade da área de visão do piloto. Nas operações VFR para pouso as condições no aeródromo são de visibilidade horizontal maior que 5000 m e teto (base de nuvens mais baixa que tenha quantidade maior ou igual a 5/8) maior que 450 m (1500 ft);

Voos por instrumento (*Instrument Flight Rules* - IFR) é o tipo de operação que o piloto realiza quando as condições de tempo estão adversas, e necessita de instrumentos que o auxiliem nos procedimentos de pouso. Nesses casos os limites são:

- a) teto igual ou inferior a 450m (1500 pés) ou;
- b) visibilidade horizontal no solo igual ou inferior a 5000m.

O instrumento mais sofisticado que auxilia nos pousos de aeronaves é o *Instrument Landing System* – Sistema de Pousos por Instrumentos (ILS). O ILS é definido como um sistema de precisão que proporciona à aeronave orientação segura de alinhamento e ângulo de descida na aproximação para o pouso. Para que uma aeronave possa operar utilizando o ILS é necessário que ela seja homologada e a tripulação habilitada para este tipo de procedimento (BRASIL, 2008).



O ILS pode ser classificado como CAT I, CAT II, CAT III A, CAT III B e CAT III C de acordo com as condições de teto e visibilidade (BRASIL, 2011), conforme descrição apresentada no Quadro 3.1. Caso o aeródromo não tenha instrumentação adequada para operação IFR, a aeronave não poderá operar enquanto as condições de tempo permanecerem adversas.

<b>CATEGORIA</b>	<b>DESCRIÇÃO DE TETO</b>	<b>DESCRIÇÃO DE VISIBILIDADE</b>
<b>ILS CAT I</b>	200 ft (60 m)	800 m
<b>ILS CAT II</b>	100 ft (30 m)	400 m
<b>ILS CAT III A</b>	0ft	200m
<b>ILS CAT III B</b>	0ft	50m
<b>ILS CAT III C</b>	ZERO	ZERO

Quadro 3.1 Categorias para a operação do *Instrument Landing System* – Sistema de Pousos por Instrumentos classificadas através dos mínimos valores de Teto e Visibilidade no aeródromo (adaptada de BRASIL, 2011).

Mesmo quando um aeródromo é equipado com o ILS, existem padrões mínimos baseados nas condições de tempo em superfície que limitam as operações IFR. Estes limites estão associados à categoria do instrumento. Por isso, as operações IFR ocorrem somente se o teto e visibilidade estejam acima dos mínimos operacionais do aeródromo, com exceção ao ILS CAT III C que permite uma aeronave operar com condições de teto e visibilidade zero.

Para monitorar e prever as condições adversas de tempo para aviação, boletins em formas de códigos meteorológicos são confeccionados contendo informações meteorológicas de superfície e de ar superior para auxiliar o aeronavegante, principal usuário e beneficiário da meteorologia aeronáutica.

Os códigos meteorológicos de aeródromos reportados em superfície ou os *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) são regularmente elaborados de hora em hora (METAR), com informações gerais das condições de tempo no aeródromo (raio de 8 km tendo como ponto de referência a estação meteorológica) e sua vizinhança (mais 8 km de raio em relação ao aeródromo), totalizando um raio de 16 km. Caso haja alguma mudança de tempo significativa dentro do período de uma hora, são reportados informes especiais ou *Special Weather Report* (SPECI). Os critérios para a elaboração de um SPECI estão associados com as principais variações atmosféricas que podem levar um aeródromo operar

com restrições, afetando a segurança e a qualidade do serviço aeroportuário prestado (BRASIL, 2014b).

De forma geral, as principais variações atmosféricas que interferem nas operações aeroportuárias estão relacionadas às variações no vento, visibilidade horizontal e teto. As variações no vento que ocorrem em um aeródromo influenciam fortemente nas operações de pousos e decolagens de aeronaves. As mudanças bruscas na intensidade e velocidade provocam a perda de sustentação das aeronaves. As principais variações do vento em aeródromos são as rajadas que são definidas como uma variação brusca na velocidade máxima do vento. Uma rajada caracteriza-se como sendo o máximo pico de vento em 10 minutos, com duração de 1 a 2 segundos e cuja velocidade é pelo menos 10 nós acima da velocidade do vento médio (BRASIL, 2014b).

O fenômeno meteorológico denominado “Cortante de vento”, “*Wind shear*” é outra variação no vento muito comum nos aeródromos. O *Wind shear* é definido como a variação local do vetor vento, em qualquer de suas componentes, numa dada distância. A cortante do vento pode ter várias origens: correntes de jato a baixa altitude, frentes, brisas marítima e terrestre, ondas de montanha, linhas de instabilidade, inversões de temperatura, florestas, edificações entre outros (OACI, 2005).

Segundo o Brasil (2014a) as informações sobre a existência de cortante do vento ao longo das trajetórias de decolagem ou de aproximação significativas para as operações aéreas são as que ocorrem entre o nível da pista e 500 metros (1.600 pés). O gradiente do vento altera a velocidade de uma aeronave e, portanto, sua sustentação. Em geral, os eventos de cisalhamento de vento que apresentam o maior risco para aeronaves são aqueles associados à atividade convectiva, especificamente frentes de rajada e *microbursts* que se formam em nuvens do tipo CB (POTTS, 2002).

A precipitação é um dos principais fatores atuantes na redução de visibilidade. As gotas d’água ou partículas de gelo tornam a atmosfera obscura, e a visibilidade depende de seus tamanhos e do volume de água que cai na unidade de tempo em um dado volume de ar.

Com alta umidade relativa (acima de 80%) é possível que haja a condensação do vapor d’água em suspensão na baixa troposfera, contribuindo para que haja a ocorrência de redução da visibilidade horizontal, com a presença de névoa úmida ou nevoeiro. A névoa úmida: é identificada com a restrição da visibilidade horizontal entre 1000 m e 5000 m e com a umidade relativa do ar alta (maior que 80%). Já o nevoeiro, de acordo com o Glossário da *American Meteorological Society* (AMS) é definido como gotículas de água em suspensão na camada atmosférica contígua à superfície terrestre, ou ainda, uma nuvem com base em contato com o solo, reduzindo a visibilidade horizontal a menos de 1000 m. Nestas

condições define-se o nevoeiro, sob o ponto de vista operacional, quando a visibilidade horizontal é menor que 1000 m e a umidade relativa do ar (UR) maior ou igual que 80%.

A restrição de visibilidade horizontal também pode ocorrer em situações em que a umidade relativa do ar esteja baixa (menor que 80%), como por exemplo, temos os fenômenos de névoa seca e fumaça. A névoa seca é um litometeoro resultante da mistura de fumaça, queimadas ou poeira levantada pelo vento em períodos de seca. É caracterizada por UR inferior a 80% e visibilidade horizontal menor ou igual a 5000 m. Caso a visibilidade horizontal seja restrita a valores menores que 1000 m e a UR esteja inferior a 80% o fenômeno é caracterizado apenas como fumaça.

Além da visibilidade horizontal, a altura da base e a quantidade das nuvens, ou simplesmente teto, também define o tipo de operações que podem ser realizadas em um aeródromo. As restrições de teto são provocadas pela ocorrência de nebulosidade com base da nuvem abaixo de 1500 pés (BRASIL, 2011, 2014a). As restrições de teto estão associadas à ocorrência de nuvens baixas, especialmente de *stratus*, a qual sua base pode chegar até o nível da superfície no caso de nevoeiro.

O sistema de tráfego aéreo (incluindo os controles de aeronaves, o aeroporto e as companhias aéreas) é vulnerável as variações de tempo, apesar dos avanços nos suportes técnicos que auxiliam nas tomadas de decisões. Portanto, uma pequena mudança no tempo pode levar na redução da capacidade de escoamento do aeroporto, assim como uma diminuição na sua eficiência, confiabilidade e pontualidade nas operações de pousos e decolagens das aeronaves.

Nos Estados Unidos diversos estudos foram desenvolvidos com o objetivo de analisar e quantificar o impacto das condições meteorológicas nas operações aeroportuárias. Robinson (1989) analisou as condições atmosféricas associadas aos atrasos de pousos e decolagens no Aeroporto Internacional de Atlanta (ATL) e constatou que nos dias em que ocorreram tempestades e nevoeiros, estes atrasos eram maiores que em dias definidos como dias claros (sem chuva, temperatura mínima acima de 0°C e nenhum tipo de condição de tempo registrado). Estes atrasos geraram um custo de US\$ 6 milhões por ano para as empresas envolvidas.

Allan e Gaddy (2000) analisando os dados de um ano coletados no Aeroporto Internacional de Newark (região metropolitana de Nova York) mostraram que, a atuação de sistemas convectivos, devido a redução de teto e visibilidade, contribui com aproximadamente 67% dos atrasos nos pousos e decolagens. Aproximadamente 13% dos atrasos estão associados a ventos fortes à superfície e estima-se que os 20% restantes dos atrasos não estejam associados com as condições de tempo no aeródromo, entretanto não se descarta a possibilidade que neste percentual esteja incluso os atrasos de voos devido a condições meteorológicas adversas em rota ou no aeroporto de origem.

As condições de tempo que influenciam nas operações aeroportuárias podem também variar sazonalmente. Por exemplo, no Aeroporto Internacional de São Francisco (SFO), nos Estados Unidos, as principais causas meteorológicas que provocam atrasos são a presença de nuvens stratus (formação é favorecida devido a proximidade do SFO da região costeira) durante o verão no Hemisfério Norte (HN). Já durante o inverno do HN, a maioria dos atrasos nos voos estão associados aos fenômenos adversos provocados por sistemas convectivos (wind shear e precipitação) provenientes da atuação dos sistemas frontais na região (CLARK ; WILSON, 1996; EVANS et al., 1999).

Na Europa, Sasse e Hauf (2003) constataram que a presença de nuvens CB estão entre os fenômenos meteorológicos que mais afetam as operações aeroportuárias no Aeroporto Internacional de Frankfurt (FRA), na Alemanha. Os autores compararam o período total de atrasos nos voos para os dias com tempestades e sem tempestades no verão dos anos de 1997 e 1998. Suas conclusões indicaram que tempestades provocaram em média um atraso de 740 minutos por dia nos dias de verão dos anos de 1997 e 1998 em FRA. Para o mesmo período, o atraso médio não provocado por condições meteorológicas no FRA é de apenas 280 minutos por dia.

Na tentativa de quantificar e modelar as influências das condições adversas na redução da capacidade operacional, utilizando dados do Aeroporto Internacional de Frankfurt, Markovic et al. (2008) analisaram estatisticamente a relação entre condições atmosféricas (variáveis meteorológicas) e a pontualidade nos horários de partida e chegada de voos (PDTO). A PDTO foi definida como a razão entre o número diário de voos que não apresentaram atrasos em suas operações de pouso ou decolagem e o número total de voos. Os resultados mostraram que as variáveis de maior impacto nos atrasos de pousos e decolagens no FRA são visibilidade, velocidade do vento, altura da base das nuvens e neve.

No Brasil, os estudos voltados para as variações das condições meteorológicas e o impacto nas atividades operacionais nos aeroportos vêm ganhando importância. O incentivo é percebido através da aquisição de novos equipamentos de alta tecnologia e do crescimento da mão de obra especializada por parte das instituições de formação.

O Aeroporto Internacional de Guarulhos-SP (SBGR), é o mais movimentado do país e tem alta incidência de ventos fortes, rajadas e condições de teto e visibilidade restritos, que afetam sobremaneira as operações naquele aeródromo. A direção predominante no aeródromo de SBGR é de leste, no entanto, os ventos de média ou forte intensidade são de noroeste, o que favorece a ocorrência de WS de origem orográfica na aproximação das pistas de SBGR (FOGACCIA, 2001). Quanto à ocorrência de nevoeiros em SBGR, a climatologia mostra que o inverno no hemisfério sul (HS) é o período mais frequente de ocorrência desse fenômeno provocando maior incidência de condições meteorológicas para

operação de pouso por auxílio de instrumentos ou mesmo abaixo dos mínimos operacionais (COSTA, 2008).

Em setores operacionais e principalmente em atividades aeronáuticas, como nas previsões de aeródromo e de rota, é fundamental a utilização de ferramentas ou métodos que permitam conhecer em tempo real a formação, desenvolvimento e propagação de sistemas meteorológicos significativos para navegação aérea. Diniz et al. (2004) analisaram aspectos da convecção profunda no Aeroporto de Petrolina - PE (SBPL) e verificaram a ocorrência de episódios significativos de variação no vento, incluindo os casos associados a ocorrência de tempestades. As autoras concluíram que a utilização de índices de instabilidade foi satisfatória no sentido de indicar situações favoráveis ao desenvolvimento de tempestades. Entretanto, são insuficientes para determinar a intensidade e durabilidade desses sistemas. São mais eficientes como previsores de tempestades quando usados em conjunto com outras informações meteorológicas e considerações de grande escala. O cálculo da Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE) indica que valores altos desse parâmetro representam condições necessárias, mas não suficientes para o desenvolvimento de sistemas convectivos profundos na área do aeroporto de Petrolina.

Gomes e Carvalho (2011) e Gomes et al. (2011) analisaram a variação anual e diurna da precipitação e suas influências nas operações aeronáuticas no Aeroporto Internacional de Macapá-AP (SBMQ). A precipitação é um dos fenômenos que restringem a visibilidade nos aeroportos. No SBMQ os horários de máxima precipitação variam ao longo do ano, ocorrendo no período da madrugada durante o período chuvoso. Já no período menos chuvoso em SBMQ, os máximos de chuva diurna ocorrem em média, em dois horários: no início da noite e durante a madrugada.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA

A condição atmosférica na região Amazônica é caracterizada pela intensa atividade convectiva. Isso ocorre devido a grande disponibilidade de energia solar que chega à superfície e o alto teor de vapor d'água disponível no ar, sendo assim uma das mais importantes fontes de calor latente. (MOHR et al., 1999).

As variações do tempo e do clima na Amazônia são principalmente moduladas por mecanismos de escala interanual como o El Niño Oscilação Sul (ENOS). O ENOS é aquecimento ou resfriamento anômalo das águas do Pacífico equatorial. A fase negativa do fenômeno, denominada de El Niño representa o aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico Equatorial e a fase positiva do ENOS, denominado La Niña, é por

sua vez o resfriamento anômalo das águas superficiais do Pacífico Equatorial. O El Niño/La Niña está associado com as anomalias negativas/positivas de precipitação na Amazônia, principalmente no verão austral (ACEITUNO, 1988, NOBRE; SHUKLA, 1996). A influência desses fenômenos também implica na qualidade da estação chuvosa na região. Marengo et al. (2001) notaram que em anos de El Niño a estação chuvosa teve seu início atrasado e o final antecipado resultando em déficits de chuvas sobre a Amazônia. Ronchail et al. (2002) verificaram que o efeito das anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico apresentaram relação mais significativas com as anomalias de precipitação sobre o nordeste da região Amazônica, mostrando que nesta porção da região os efeitos das anomalias da TSM são mais evidentes entre o verão e o outono do HS.

A convecção e a distribuição de chuva sobre a Amazônia também sofre a influência da variabilidade interanual dos modos climáticos de grande escala dominantes sobre o Oceano Atlântico. O aquecimento ou resfriamento anômalo das águas superficiais das bacias do Atlântico Norte e Sul podem favorecer ou desfavorecer a ocorrência de chuvas sobre o norte do Brasil. Há também o efeito combinado das anomalias de TSM, conhecido como Padrão de Dipolo do Atlântico, o qual é caracterizado pela manifestação simultânea de anomalias de TSM configurando-se por sinais destas anomalias opostas sobre as Bacias Norte e Sul do Atlântico Tropical. Este padrão gera o aparecimento de um gradiente térmico meridional sobre o Atlântico Equatorial, o qual exerce influências no deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O padrão Dipolo apresenta duas fases opostas, denominadas de fase do Dipolo negativo a qual caracteriza-se pela presença simultânea de anomalias positivas/negativas de TSM sobre a Bacia norte/sul do Oceano Atlântico Tropical; e fase denominada Dipolo positivo que apresenta a configuração oposta (NOBRE; SHUKLA, 1996; SOUZA et al., 2000; LIEBMANN; MARENGO, 2001; PEZZI; CAVALCANTI, 2001).

Em um estudo desenvolvido por Souza et al. (2004) para avaliar a variabilidade de precipitação sobre a Amazônia Oriental, considerando a concepção do efeito combinado Pacífico + Atlântico, definiram dois contrastantes cenários climáticos caracterizados como favorável (FAV) e desfavorável (DESFAV) ao regime chuvoso para a região. A manifestação simultânea de El Niño sobre o Pacífico e do gradiente térmico apontando para o Atlântico norte, caracteriza o cenário DESFAV. Por outro lado, a ocorrência concomitante de La Niña sobre o Pacífico e do gradiente térmico apontando para o Atlântico sul, caracteriza o cenário FAV. O cenário DESFAV (FAV) formou um padrão oceano-atmosfera anômalo de grande escala que originou mudanças significativas nos padrões troposféricos de ambas as circulações de Walker e Hadley, as quais resultaram na inibição (intensificação) da ZCIT ao sul (norte) do equador e, conseqüentemente, contribuíram diretamente para a redução (o aumento) do acumulado de chuvas durante o período chuvoso, ou seja, de janeiro a maio.

Mecanismos de escala intrasazonal, como a oscilação de Madden e Julian (OMJ) também modulam a atividade convectiva sobre a Amazônia. A OMJ é definida como uma onda troposférica de baixa frequência que se desloca para leste pelos trópicos em um período de 40 a 50 dias e essa onda atua sob a forma de uma grande célula de circulação zonal, tendo como principal mecanismo de movimento a convecção profunda. A OMJ se forma sobre a Oceania e se desloca para leste sobre a faixa equatorial, favorecendo ou desfavorecendo a formação de nebulosidade, e conseqüentemente, precipitação local (MADDEN; JULIAN, 1971). Na Região Amazônica, Souza e Ambrizzi (2006) estudaram as variações da precipitação no Brasil e observaram que a OMJ é responsável pelo aumento da precipitação sobre a região, interagindo com os sistemas responsáveis por variações submensais, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e ZCIT (SOUZA et al., 2005).

Portanto, estes mecanismos de escalas interanual e intrasazonal modulam a convecção inibindo ou favorecendo a sua atividade na região. Além disso, estes mecanismos interferem a atuação dos sistemas meteorológicos que influenciam as condições de tempo sobre a Amazônia, região em que está situada Belém. Os principais sistemas meteorológicos atuantes na Amazônia, mais especificamente na porção leste da Amazônia que influenciam as condições de tempo em Belém serão descritos a seguir:

### **3.2.1 Zona de Convergência Intertropical**

A ZCIT é um dos sistemas meteorológicos que mais influencia na distribuição espacial da precipitação na porção norte da Amazônia. Hastenrath e Lamb (1977) definiram a ZCIT como um sistema de grande escala que apresenta baixa pressão em superfície, confluência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste nos baixos níveis da atmosfera dentro do ramo ascendente da célula de Hadley, convergência máxima de massa, cobertura máxima de nuvens convectivas e áreas com elevadas TSM sobre o oceano.

A estação chuvosa na maior parte da Amazônia ocorre quando a ZCIT atua sobre a região, no caso de Belém, em média, os meses de fevereiro, março e abril são os mais chuvosos e coincidem com o período de atuação direta da ZCIT. Por outro lado, no período considerado como menos chuvoso (de junho a novembro), a ZCIT encontra-se nas latitudes mais ao norte (RAO; HADA, 1990). Portanto, no deslocamento zonal sobre o Atlântico Equatorial, a ZCIT em geral migra de sua posição extrema mais ao norte (em torno de 14°N) durante os meses de agosto-setembro, e para sua posição extrema mais ao sul (em torno

de 2°S), nos meses de março e abril, período de chuvas intensas na Amazônia (HASTENRATH; LAMB, 1977).

A ZCIT promove impactos na variabilidade espacial da precipitação, associados à grandes volumes de chuvas na Amazônia Oriental, afetando principalmente os estados do Amapá, Maranhão e Pará (FERREIRA, 2008). O autor relacionou a ocorrência de eventos extremos de chuvas durante os meses de atuação da ZCIT, aos impactos socioambientais em Belém e concluiu que as principais áreas afetadas, na ocasião de chuvas persistentes, foram os bairros localizados nas regiões mais baixas e próximas de canais de drenagem, onde ocorreram os transbordamentos dos mesmos, resultando no alagamento de ruas e casas.

### **3.2.2 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, Cavado do Nordeste e Alta da Bolívia**

A Alta da Bolívia (AB) é definida como um anticiclone em altos níveis e está associada com a convergência em baixos níveis gerada pelo forte aquecimento diurno em superfície, que leva à formação de nuvens estando associada à liberação de calor sensível e latente (MOLION, 1987). Possui variação sazonal, tanto em intensidade quanto em posição, que está diretamente relacionada a distribuição de chuvas na Amazônia (KOUSKY; KAGANO, 1981).

O Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) é caracterizado por um centro de baixa pressão na alta troposfera que pode influenciar a distribuição espacial e intensidade da precipitação a precipitação na região Amazônica, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. Em períodos que o vórtice não está configurado esse sistema é denominado de cavado do nordeste (CN) O VCAN ou CN apresentam subsidência de ar frio e seco no centro, inibindo assim a formação de nuvens, porém, nas regiões periféricas ocorrem intensos movimentos convectivos, transformando energia potencial em energia cinética (GAN, 1982). Esses sistemas meteorológicos são observados nas estações de primavera, verão e outono, com máxima frequência no mês de janeiro, já nos meses de inverno esse sistema é pouco comum (RAMÍREZ et al., 1999).

Frequentemente, a região periférica do VCAN ou ainda do CN encontra-se sobre os estados do Pará e Maranhão, favorecendo a ocorrência de tempo adverso nestas localidades, como visto por Ferreira e Pereira (2010) e Ferreira et al. (2011). Em outras palavras, a influência da AB e do VCAN ou CN nas condições de tempo em Belém ocorre devido a AB favorecer a formação do cavado corrente abaixo nos altos níveis da troposfera sobre o nordeste do Brasil ou no oceano adjacente, que pode fechar-se, constituindo o VCAN com circulação direta. A borda do VCAN ou do CN adquire grande vorticidade,



causando instabilidade em baixos níveis, borda esta que em geral se localiza sobre o Nordeste do Pará, resultando no aumento da nebulosidade convectiva, e conseqüentemente pode provocar chuvas no Nordeste do Pará (GAN; KOUSKY, 1986; LOPES et al., 2013).

### 3.2.3 Zona de Convergência do Atlântico Sul e Sistemas Frontais

Outro sistema meteorológico que influencia o tempo e o clima na Amazônia Oriental é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é definida como uma zona de confluência na baixa troposfera na América do Sul, orientada no sentido NW-SE, com uma faixa de nebulosidade que se estende do noroeste da Amazônia ao Oceano Atlântico, sendo um sistema meteorológico típico dos meses de verão no HS (KODAMA, 1992). Figueroa e Nobre (1990) observaram que os máximos de precipitação no sul da Amazônia, durante o verão austral, estão aparentemente relacionados com a influência da ZCAS.

Na porção sul da Amazônia, Herdies et al. (2002), associaram os períodos de ventos de oeste com a presença da ZCAS e os períodos de ventos de leste com a ausência da ZCAS (NZCAS). Carvalho et al (2002) mostram que durante os períodos que apresentaram o regime de ventos de leste os sistemas convectivos são mais profundos e possuem tamanho menor em comparação aos sistemas convectivos formados durante os períodos que apresentaram o regime dos ventos de oeste. Embora haja especulações observacionais, que a ZCAS influencie de forma remota as condições de tempo em Belém, ainda não existem estudos que comprovem a relação entre as condições de tempo com o regime de ventos associados a atuação de ZCAS nas proximidades da região.

O Sistema Frontal (SF) é definido como uma região de encontro de duas massas de ar com características de pressão, temperatura, vento e umidade diferentes e costuma influenciar as condições de tempo na região sul da Amazônia. A interação dos sistemas frontais com a convecção tropical é mais frequente nos meses de forte convecção sobre o continente (OLIVEIRA, 1986).

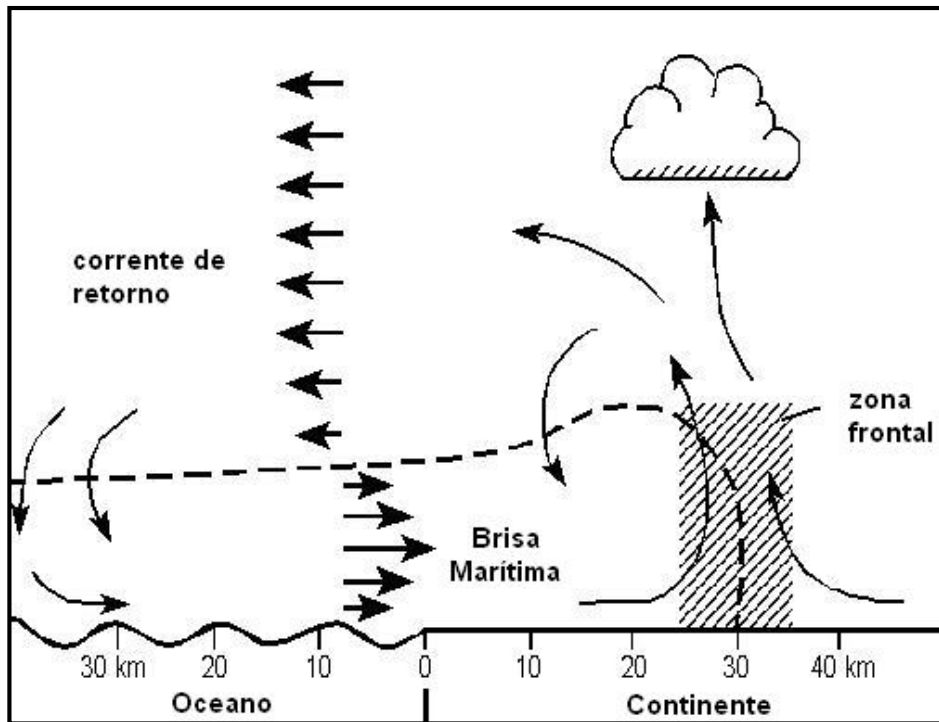
Estudos observacionais mostram que a ZCAS ou os sistemas frontais avançam continente adentro, alcançando latitudes mais baixas, causando influência remota sobre as localidades situadas próximas a linha do equador. Souza e Nechet (2004) mostraram mudanças significativas nas condições tempo, principalmente na direção dos ventos (na alta e baixa troposfera) que ocorreram em Santarém, Belém e Macapá, as quais os autores associaram a incursão de um sistema frontal do Hemisfério Sul que ocorreu durante o período analisado.

### 3.2.4 Circulação de Brisa e Linhas de Instabilidade (LIs)

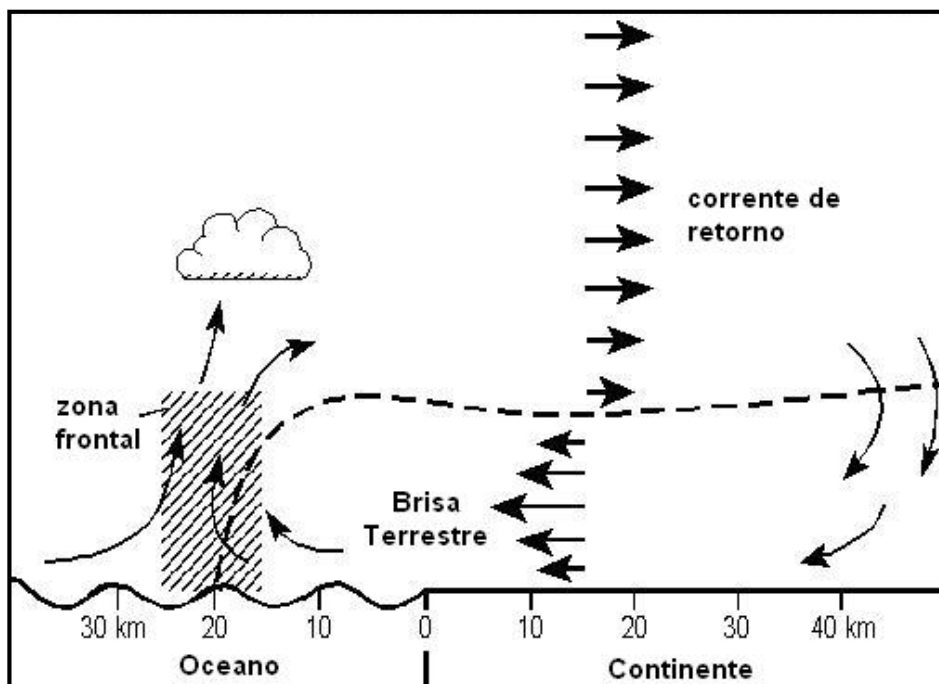
A circulação de brisa surge devido ao contraste térmico entre a água (rio ou oceano) e o continente. Como a superfície líquida (oceano, rio ou lago) possui uma capacidade térmica maior, aquece e resfria mais lentamente que o continente, favorecendo o surgimento de gradientes de temperatura e densidade, gerando a circulação de brisa (AVISSAR; PIELKE, 1989; CORREIA; SILVA DIAS, 2003; FREITAS, 2003; CORREIA et al., 2006).

A diferente capacidade de armazenar calor resulta no aumento da temperatura, redução da densidade e redução da pressão atmosférica sobre o ar situado no continente. Por outro lado, o ar que está sobre a água, terá uma temperatura mais baixa, maior densidade do ar e conseqüentemente uma alta pressão. Esta diferença de pressão entre o continente e a superfície gradiente de pressão com sentido continente-superfície líquida e conseqüentemente uma força devido a este gradiente de pressão, com sentido oposto. A força gerada a partir do gradiente de pressão levará o ar mais frio que está sobre a superfície líquida em direção ao continente, originando a circulação de brisa marítima. O escoamento do ar sobre a superfície líquida causa uma divergência em baixos níveis, o que acarreta em movimento subsidente, trazendo o ar mais frio proveniente dos altos níveis. Por continuidade de massa, a divergência em superfície criará uma convergência sobre este mesmo ponto na alta troposfera. Sobre o continente o ar que está convergindo tenderá a subir e criará uma zona de divergência em altos níveis. Todo este sistema criará uma circulação com escoamento em direção ao continente em baixos níveis e uma corrente de retorno, com sentido continente-superfície líquida em níveis mais elevados (SILLS, 1998). O esquema de brisa marítima está ilustrado na Figura 3.1a.

A Figura 3.1b mostra o esquema da brisa terrestre. Este tipo de circulação ocorre durante a noite e madrugada (aproximadamente entre 23:00HL e 07:00HL), pois durante estes turnos a superfície do continente tenderá a resfriar-se mais rapidamente em relação à superfície líquida, em função da sua menor capacidade de armazenamento calor. Desta forma, surge um gradiente de pressão, mas no sentido contrário ao que é formado na brisa marítima, ou seja, no sentido superfície líquida-continente, e por sua vez uma força devido ao gradiente de pressão com sentido continente-superfície líquida, que levará o ar mais frio e denso que está sobre o continente em direção a água. Este processo dará origem a circulação de brisa terrestre, que é semelhante a brisa marítima, tanto em altos como em baixos níveis, porém com sentidos opostos e intensidade do vento menos intensa, em virtude do menor amplitude de temperatura entre o continente e a superfície líquida (SILLS, 1998; SOUZA, 2007).



(a)



(b)

FIGURA 3.1 Esquema da circulação de brisa. (a) Brisa marítima e (b) Brisa terrestre. Fonte: Sills (1998).

A região Amazônica é composta de diversos rios e baías e está sujeita aos efeitos da brisa fluvial, que é o efeito semelhante a brisa marítima e terrestre, onde a superfície líquida

é um rio. Autores como Oliveira e Fitzjarrald (1993) e Silva Dias et al. (2004) comprovaram a existência desta circulação fluvial nos baixos níveis (entre 1500 e 2000 m), possuindo o sentido floresta/rio durante a noite e início da manhã, revertendo o sentido (rio/floresta) durante a tarde e início da noite na região de confluência entre os rios Solimões e Negro, próximo a Manaus. Os autores sugerem que estas influências são mais intensas nas regiões que a largura do rio é considerável, e inclui Belém como uma dessas regiões que sofrem influência deste tipo de circulação.

Souza Júnior et al. (2006) realizaram simulações de alta resolução das circulações locais no leste da Amazônia e mostraram que na foz dos rios que banham Belém existem variações na circulação local. Estas variações ocorreram em função da canalização e deflexão da direção do vento, associadas às características fisiográficas encontradas entre a Ilha do Marajó e a margem oeste do nordeste paraense, indicando a influência dos rios na variação da direção do vento sobre Belém. Além disso, Betts et. al (2009) sugeriram também que nas proximidades de Belém os efeitos da brisa marítima e fluvial influenciam significativamente na formação de nuvens.

Os efeitos da brisa marítima devido a presença do Oceano Atlântico no norte e nordeste da Amazônia é observada mesmo a uma distância a cerca de 130 Km, conforme indicado nos resultados de Santos et. al. (2012) que observaram em Belém o predomínio dos ventos do setor norte-nordeste à tarde e noite (no sentido oceano- continente) e pela madrugada e manhã os ventos de sudeste (no sentido continente- oceano). Belém está situada a aproximadamente 130 Km da costa oceânica. Estes resultados corroboraram com os estudos de Atkinson (1981) que indicam que o escoamento de brisa marítima pode adentrar até 150 Km do continente.

Em virtude da proximidade do Oceano Atlântico, a brisa marítima também contribui para a forte variação diurna do desenvolvimento de nuvens convectivas no norte e nordeste da Amazônia (MACHADO et al., 2004). Kousky (1980) analisando dados observacionais sugeriu que o efeito de brisa marítima induz o surgimento de LI na costa nordeste do Brasil.

A LI é um sistema convectivo de mesoescala que se desenvolve a partir do contraste de temperatura entre o continente e o oceano na região costeira do norte do Brasil (HASTENRATH; HELLER, 1977; KOUSKY, 1980; COHEN et al., 1995). Estudos preliminares feitos por Cutrin (1987) apud Cohen et al. (1989) mostraram que estas Lis contribuem com 45% da chuva que cai durante o período chuvoso no nordeste paraense (de cinco anos analisados); podem permanecer ativas por mais de 48 horas, tendo o seu deslocamento ente 6° a 13° de longitude por dia e sua maior ocorrência se dá nos meses de abril e agosto. Durante a noite sua atividade convectiva diminui, voltando a intensificar-se durante o dia devido ao aquecimento solar (MOLION; KOUSKY, 1981).

Cohen et al. (2004) classificaram as LIs em dois tipos: de origem costeira, que se formam paralelamente à costa; e de origem continental, que se formam no interior do continente (entre o Pará e o Maranhão) e se orientam quase perpendicularmente à costa. Para as LIs de origem costeira, a iniciação está associada à circulação de brisa marítima, com formação em torno de 18:00 UTC, enquanto a propagação para o interior do continente depende de fatores como ação de distúrbios ondulatórios de leste e/ou a presença de fonte de calor (convecção), e está associada a um forte cisalhamento do vento em baixos níveis (BARBOSA et al., 2006).

Alcântara et al. (2011) afirmam que a situação ideal para a formação de LI no norte e nordeste da Amazônia é um perfil de vento com jato em baixos níveis com intensidade moderada, jato em altos níveis bastante intenso e pouco cisalhamento direcional do vento em baixos e médios níveis. Além disso, um perfil com instabilidade convectiva e uma quantidade de CAPE pelo menos moderada também é importante, assim como um alto teor de umidade em baixos níveis.

### **3.2.5 Distúrbios Ondulatórios de Leste**

Os Distúrbios de Ondulatórios de Leste (DOLs) são oscilações nos campos de pressão e vento, imersas na corrente dos ventos alísios, que se deslocam de leste para oeste, em movimento quase zonal. As ondas não mudam com o tempo e sua velocidade de propagação é em média de  $6\text{ms}^{-1}$  e o comprimento de onda médio é de 1650 km (RIEHL, 1945). O autor também verificou que o cavado da onda se inclina para leste com a altura e que, geralmente, apresenta intensidade máxima entre 700 e 500 hPa. Além disso, seus estudos também mostraram que na vanguarda do eixo do cavado ocorrem divergência e tempo bom, enquanto que na retaguarda, ocorre convergência e mau tempo.

A maioria das DOLs identificadas sobre o Atlântico Tropical se originam na costa da África, ou além, no interior do continente africano. Por apresentar uma atividade convectiva muito intensa, a região da ZCIT também oferece condições favoráveis à formação dessas ondas (RIEHL, 1954; MERRIT, 1964). Além disso, é possível verificar Ondas de Leste induzidas a partir da penetração de Frentes Fria em latitudes tropicais (BARRY; CHORLEY, 1982; MOLION; BERNARDO, 2002; SILVA, 2002), pois é comum a porção da frente voltada para o equador se romper no setor entre as duas células de alta pressão subtropicais, gerando uma onda que se move para oeste.

As DOLs podem promover eventos extremos de chuvas. Santos et al. (2012) estudaram o caso ocorrido no dia 12 de junho de 2006 na área de Salvador, Bahia, com o

objetivo de caracterizar as condições atmosféricas e os impactos causados na cidade. O total diário de precipitação na capital baiana foi de 95 mm, valor que representa 40% da normal climatológica do mês de junho. A chuva forte foi causada por convecção profunda organizada, cujo desenvolvimento foi favorecido por um DOL que atingiu a costa leste do Nordeste. A propagação desse sistema, com velocidade de fase estimada em  $10 \text{ m s}^{-1}$ , foi detectada no campo da componente meridional do vento no nível de 700 hPa e em imagens de satélite meteorológico. Deslizamentos de encosta e suas consequências foram os principais danos causados por esse evento extremo de chuva.

Coutinho (2001) verificou a passagem das DOLs em Alcântara, no Maranhão, para o período entre 1988 e 1997. Utilizou-se de dados de radiossondagens, e notou uma periodicidade de 3-10 dias. Além disso, o estudo ainda indicou a presença das ondas na costa Nordeste Brasileiro (NEB) com comprimento de onda de 3000-6000 km e velocidade de fase em torno de  $10 \text{ m s}^{-1}$ . A precipitação gerada pelos DOL tende a ser mais esparsa a oeste do cavado (próxima ao seu eixo), mais intensa e frequente sobre o eixo e de moderada a forte a leste do eixo do cavado (COUTINHO; FISCH, 2007). Além disso, os DOLs podem intensificar perturbações convectivas como, por exemplo, as linhas de instabilidade, favorecendo sua propagação continente adentro (BARBOSA, 2005).

### 3.3 ANÁLISE FATORIAL EM COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADAS A VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS

O conceito de Análise Fatorial (AF) em componentes principais (ACP) ou Funções Ortogonais Empíricas foi introduzido por Lorenz (1956) em estudos meteorológicos, com a finalidade de encontrar uma maneira eficaz de extrair uma representação simplificada ou compacta de um conjunto de dados. A ACP é um método fatorial, pois a redução do número de variáveis não se faz por uma simples seleção de algumas variáveis, mas pela construção de novas variáveis sintéticas, obtidas pela combinação linear das variáveis iniciais, por meio dos fatores (BOUROCHE; SAPORTA, 1982). É um método bastante usado em meteorologia, pois permite que a descrição de um campo seja feita por um número relativamente pequeno de funções e coeficientes temporais associados.

Villar et al. (2009) estudaram a variabilidade espaço-temporal da precipitação na Bacia Amazônica através do uso de ACP. Os autores diagnosticaram que as maiores variabilidades interdecadais e interanuais da chuva ocorrem no período chuvoso da região (dezembro a maio) e estão relacionadas a mudanças de longo prazo do Oceano Pacífico e a eventos de El Niño/La Niña, respectivamente. A variabilidade interanual caracteriza mais

especificamente o regime de chuvas da Amazônia Oriental, que também sofre influência do padrão de Dipolo do Atlântico Tropical.

Com a finalidade de identificar padrões da estrutura vertical local da atmosfera na ocorrência de situações de eventos extremos de precipitação diária em Belém-PA, Camponogara (2012) aplicou ACP em dados de radiossondagens e verificou, através do uso dos escores temporais associados a cada fator obtido, que nos dias com acumulados extremos de precipitação, o padrão atmosférico nos trimestres janeiro-fevereiro-março, abril-maio-junho e julho-agosto-setembro foi associado à velocidade de intensidade leve em todos os níveis da atmosfera. No trimestre outubro-novembro-dezembro os dias que ocorreram anomalias positivas do total diário de precipitação, o padrão atmosférico associado foi de ventos de leste mais intensos em baixos níveis, ventos de oeste mais fortes (ou ventos de leste mais fracos) em médios níveis e ventos de leste mais fortes (ou ventos de oeste mais fracos) em altos níveis.

Santos et al. (2012) evidenciaram a relação de dependência da precipitação com o vento horizontal em Belém-PA. Os resultados indicaram que o máximo de precipitação observada nas estações chuvosa e menos chuvosa durante o período diurno em dois anos estão diretamente relacionado com o giro do vento horizontal o qual ocorre devido a o efeito a brisa marítima na região analisada.

Amanajás e Braga (2012) usaram ACP para investigar os padrões pluviométricos da Amazônia Oriental. De acordo com os resultados apresentados pelos autores, três padrões definem o regime de chuvas na região. O primeiro padrão representa a estação chuvosa, de janeiro a abril, e é influenciado diretamente pela atuação da ZCIT. O segundo padrão está associado ao período de estação de transição entre a estação chuvosa e menos chuvosa, de maio a agosto, e está possivelmente relacionado a sistemas de grande e mesoescala. Já o terceiro padrão agrupa os meses da estação menos chuvosa, de setembro a dezembro e está associado com a atuação da ZCAS e a sistemas frontais que eventualmente alcançam a região sul da Amazônia Oriental.

Resultados de um estudo recente sobre ocorrências de vento de través no aeroporto internacional de Petrolina PE, utilizando ACP, mostram uma relação positiva entre a atuação de VCAN (vórtices ciclônicos de altos níveis) e aumento na frequência de ventos de través do quadrante Noroeste (BARBIERI, 2016).

Para auxiliar no desenvolvimento de um modelo que aperfeiçoasse a qualidade e eficiência dos aeroportos, Adler e Berechman (2001) utilizaram dados obtidos através da aplicação de questionários aos funcionários de 61 linhas aéreas, que operam em 29 aeroportos distribuídos na América do Norte, Europa, África e Ásia. Estes dados mediram o grau de conforto, segurança e desempenho operacional dos aeroportos, a partir da perspectiva das linhas aéreas. Os resultados mostraram, através do uso da ACP, que o

padrão que explica 35% dos dados estavam relacionados com a adequação dos aeroportos, no que diz respeito a logística e manutenção, além dos custos de utilização dos mesmos. O padrão secundário foi associado à confiabilidade do serviço operacional do aeroporto (serviço de tráfego aéreo, acolhimento de passageiros e aeronaves), adicionado ao grau de satisfação e qualidade das linhas aéreas em relação ao aeroporto. O terceiro padrão, que respondeu por 19% da variação dos dados, estava correlacionado negativamente com o sistema de onda (coordenação dos voos que pousam em um determinado aeroporto e tem conexão com todos os voos que decolam do mesmo) e com a demanda de passageiros.

As condições de tempo em aeroportos também determina a qualidade do serviço operacional e as técnicas baseadas na estatística multivariada permitem também a extração informações interessantes, com relação aos efeitos das variações meteorológicas nas atividades aeroportuárias. Hansen e Bolic (2001) em um estudo desenvolvido para o aprimoramento na infraestrutura aeroportuária no Aeroporto de Los Angeles (LAX), aplicaram a AF em ACP em 8 variáveis meteorológicas, mais especificamente, temperatura média, visibilidade média, velocidade média do vento, total de precipitação, proporção do tempo em operação VFR, proporção do tempo com nuvens baixas, média e alta. Cada variável foi calculada numa resolução temporal de seis horas (00:00 a 06:00, 06:00 a 12:00, 12:00 a 18:00 e 18:00 a 00:00), resultando em 32 variáveis por dia. Através da AF em ACP foram obtidos nove fatores dos quais, quatro apresentaram correlação positiva com o maior tempo de atraso dos voos. Estes fatores foram o quinto, sexto, sétimo e oitavo, que representam, teto devido a presença de nuvens médias ao longo do dia, altas velocidades do vento ao longo do dia, teto devido a presença de nuvens altas ao longo do dia e precipitação pela manhã e tarde, respectivamente. Além disso, os autores verificaram que 75% dos atrasos de um voo em LAX esteve associado as condições de tempo, demanda de voos e aos atrasos de embarque no aeroporto de origem. Os demais 25% não foram explicados estatisticamente e podem estar associados à variáveis não utilizadas no estudo, como ventos e condições de tempo em rota, restrições operacionais impostas pelas companhias aéreas e outras variáveis de infraestrutura como fechamento das pistas e restrições nos sistemas de navegação aérea.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

As análises apresentadas neste trabalho foram concentradas na região do aeroporto Internacional de Belém ( $1^{\circ} 22' 45''\text{S}$ ;  $48^{\circ} 28' 33''\text{W}$ , 16 m). A localização geográfica do aeroporto é mostrada na Figura 4.1.

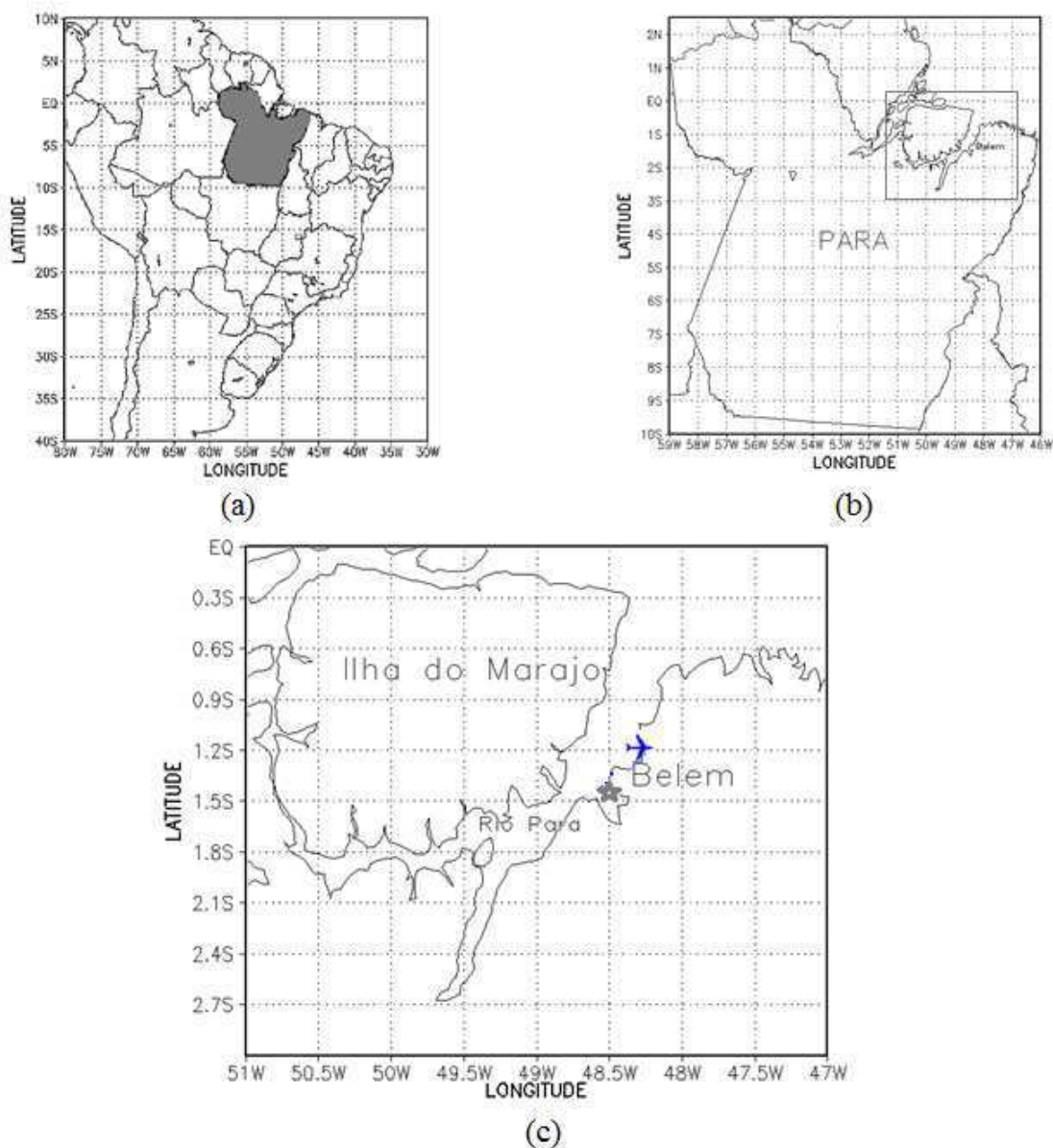


FIGURA 4.1 Mapas com a localização da área de estudo. (a) Mapa da América do Sul com destaque para o estado do Pará; (b) Mapa do estado do Pará com destaque em Belém e (c) Mapa do norte e nordeste paraense, com destaque para o Aeroporto Internacional de Belém.

De forma geral, os aeródromos são construídos distantes das áreas urbanas e/ ou próximos às margens dos rios, para evitar a interferência de edificações ou de pessoas na rota das aeronaves e no sítio aeroportuário. O aeroporto Internacional de Belém fica situado às margens do Rio Pará, mais especificamente da Baía do Guajará com duas pistas de pouso cruzadas, nomeadas de acordo com a direção das suas cabeceiras como 06/24 e 02/20, conforme ilustração apresentada na Figura 4.2.



Figura 4.2 Imagem da localização das pistas do Aeroporto Internacional de Belém e a localização do Rio Pará a oeste do sítio aeroportuário. Em destaque está a localização das cabeceiras (CAB) da pista principal e secundária.

A pista principal é a 06/24 ( $60^{\circ}/240^{\circ}$ ) e a cabeceira principal é a 06 por ser mais adequada para os procedimentos de pousos e decolagens por representar o sentido oposto à direção dos ventos predominantes na região que é de nordeste (RAMOS et al., 2009). Por ser a cabeceira mais usada, nas proximidades encontram-se instalados, o sistema de pouso por instrumentos, o ILS e a Estação Meteorológica de Superfície (EMS).

#### 4.1.1 Climatologia de Belém

A cidade de Belém, capital do estado do Pará, faz divisa ao norte com a Baía de Santo Antônio a oeste com a Baía do Guajará, ao sul com o Rio Guamá, e a leste com o

município de Ananindeua, possuindo uma área territorial de 1.065 km<sup>2</sup> e população estimada de 1.393.399 habitantes (IBGE, 2010).

Figuroa e Nobre (1990) estudaram a distribuição de precipitação na América do Sul tropical e mostraram a variação anual entre 1500 mm/ano a 3500 mm/ano dentro da Região Amazônica, em Belém este acumulado de chuvas é cerca de 3000 mm/ano. Os autores mostraram que no período de dezembro-janeiro-fevereiro (DJF) no sul e oeste da região ocorrem, em média, elevados acumulados de chuva (cerca de 900 mm/3meses). Em março-abril-maio (MAM) os centros de máxima precipitação localizaram-se no setor norte da região, onde se situa a capital paraense, devido a atuação da ZCIT sobre esta área durante este período do ano. Em junho-julho-agosto (JJA) foi verificado o trimestre menos chuvoso em grande parte da região, entretanto, no nordeste da Amazônia, onde se situa Belém a chuva ainda chega a 750 mm/3meses. E o trimestre setembro-outubro-novembro (SON) embora seja o período que os acumulados de precipitação começam a aumentar novamente em grande parte da Amazônia, na sua porção norte e nordeste observou-se que este trimestre apresentou os menores totais pluviométricos (Figura 4.3 e Figura 4.4a-d).

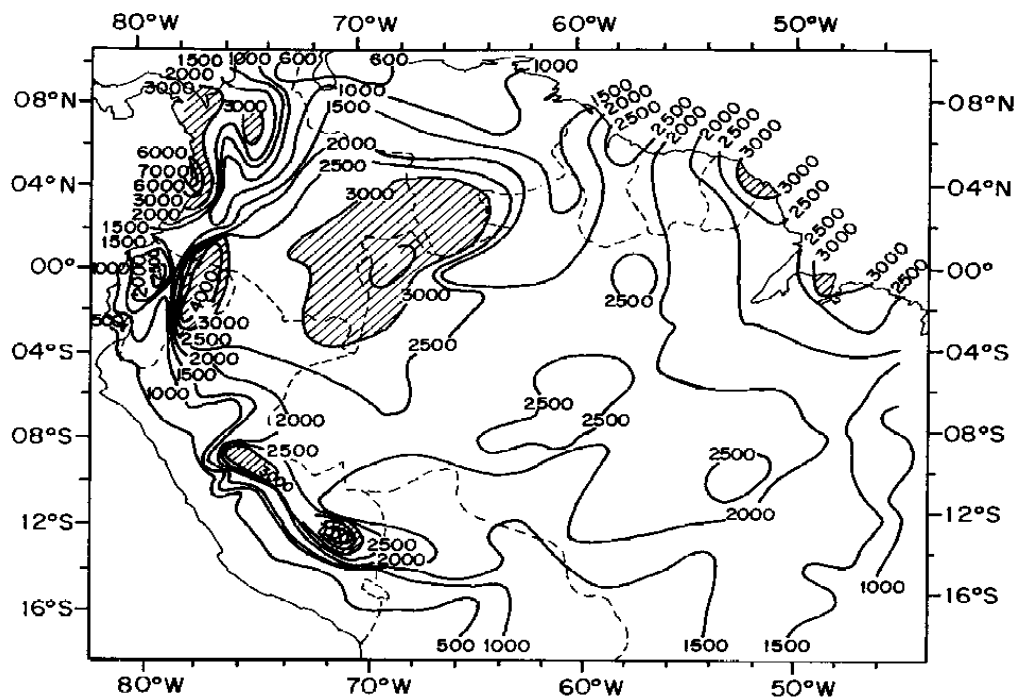
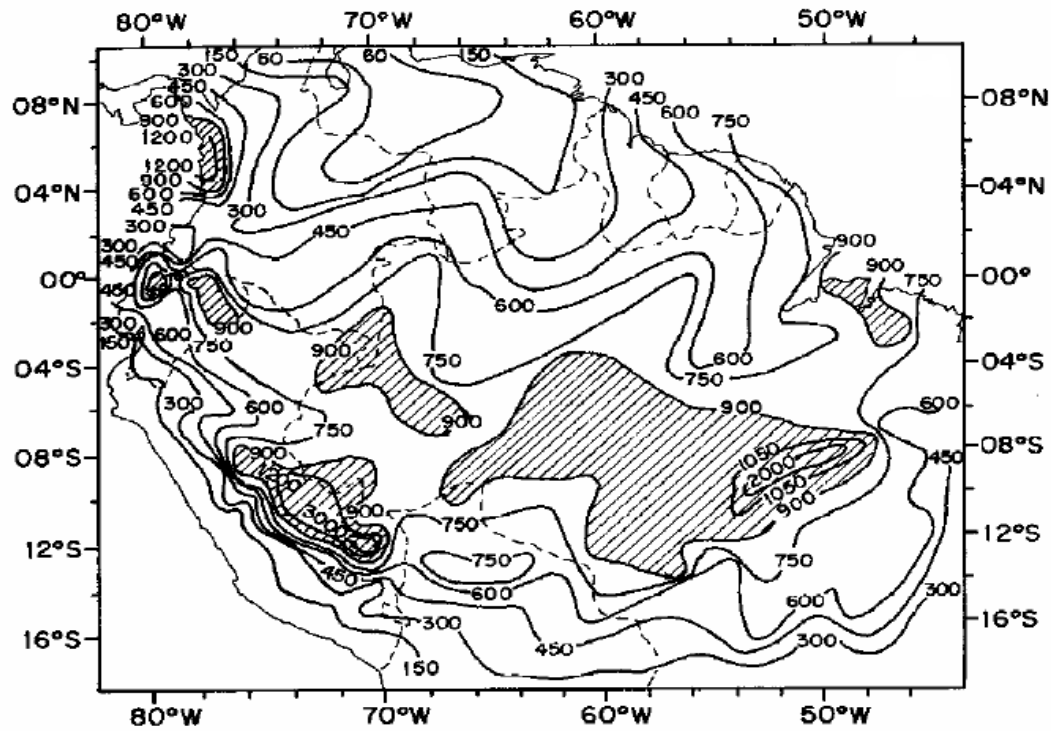
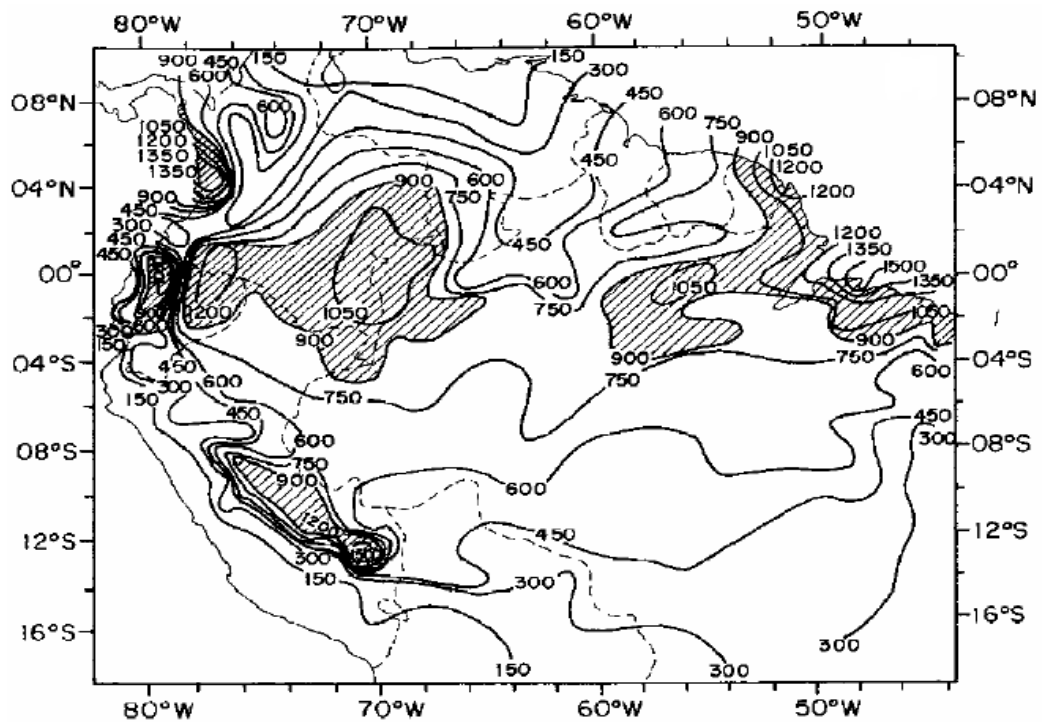


FIGURA 4.3 Distribuição anual da precipitação na Amazônia em mm/ano, segundo Figuroa e Nobre (1990).

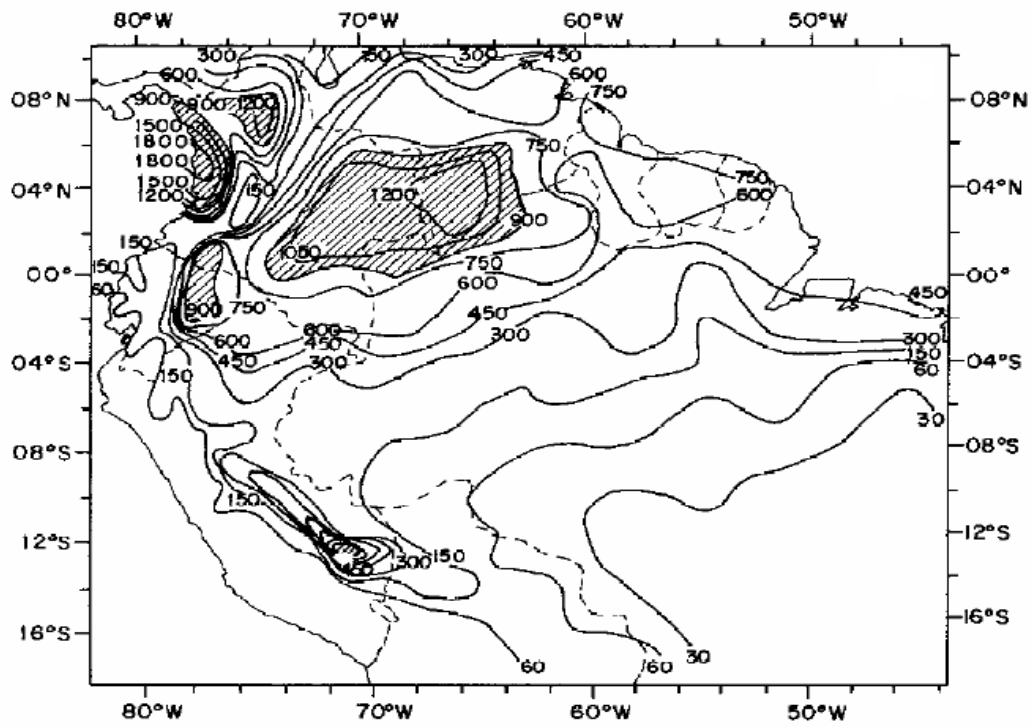


(a)

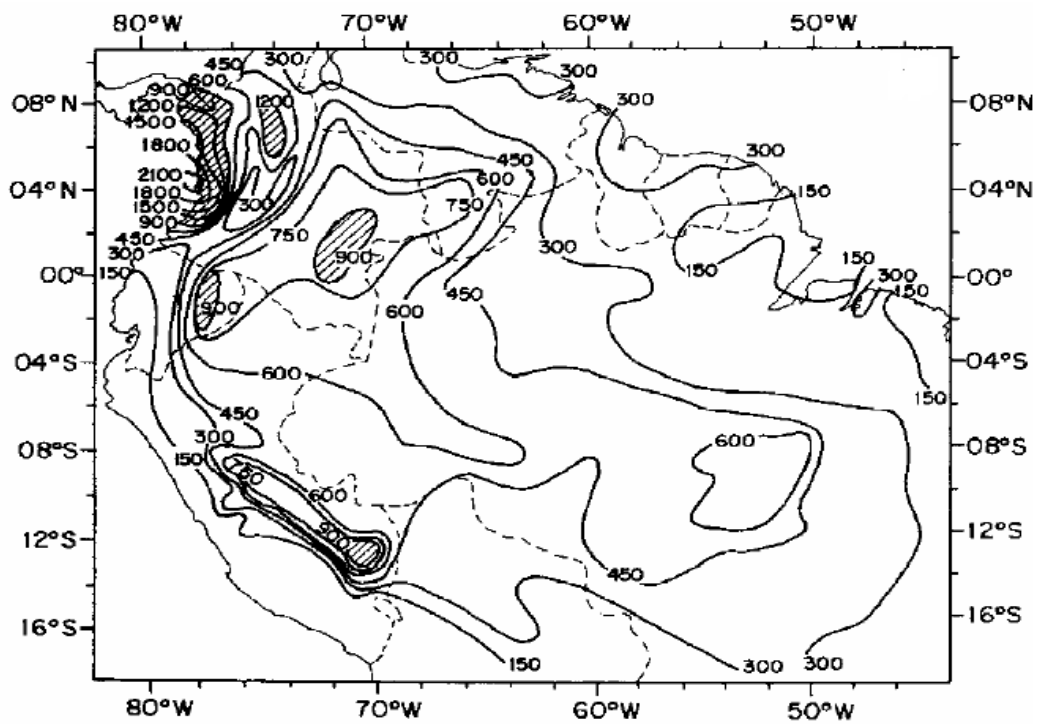


(b)

FIGURA 4.4 Distribuição sazonal da precipitação na Amazônia em mm/3meses. (a) dezembro-janeiro-fevereiro, (b) março-abril-maio segundo Figueroa e Nobre (1990) Continua.



(c)



(d)

FIGURA 4.4 Continuação

A Figura 4.5 ilustra distribuição anual média da precipitação em Belém baseada na normal climatológica do instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 1961 a 1990

(RAMOS et al., 2009). A cidade de Belém apresenta uma distribuição de chuvas bem definida ao longo do ano, com dois períodos distintos: de dezembro a maio o período chuvoso, com máximo valor no mês de março (447 mm) e o período menos chuvoso, de junho a novembro, com valores mínimos no mês de outubro e novembro (115 mm e 118 mm, respectivamente). Esta distribuição está associada com a marcha anual da ZCIT, pois sua influência determina a quantidade de chuvas, coincidindo o período de atuação deste sistema meteorológico de grande escala com os meses que apresentam os maiores valores de precipitação média em Belém (RAO; HADA, 1990; FIGUEROA; NOBRE, 1990)

Segundo Nimer (1979), a temperatura máxima anual na região nordeste do estado do Pará, onde se situa a capital, alcança valores em torno de 34,0°C, enquanto que a mínima atinge valores na faixa dos 23,0°C. Ao longo dos meses, as variações da temperatura em Belém são fortemente condicionadas pelas chuvas sendo que, as temperaturas mais elevadas ocorrem em média entre os meses de agosto a novembro (estação menos chuvosa). Segundo Bastos et al. (2002), a temperatura média do ar ao longo do ano é de 25,6°C no mês de fevereiro à 26,7°C em novembro, baseado em uma série de dados dos anos de 1971 a 2000. Além disso, a temperatura máxima média é menor em março (30,1 °C) e maior em setembro e outubro (33,0°C).

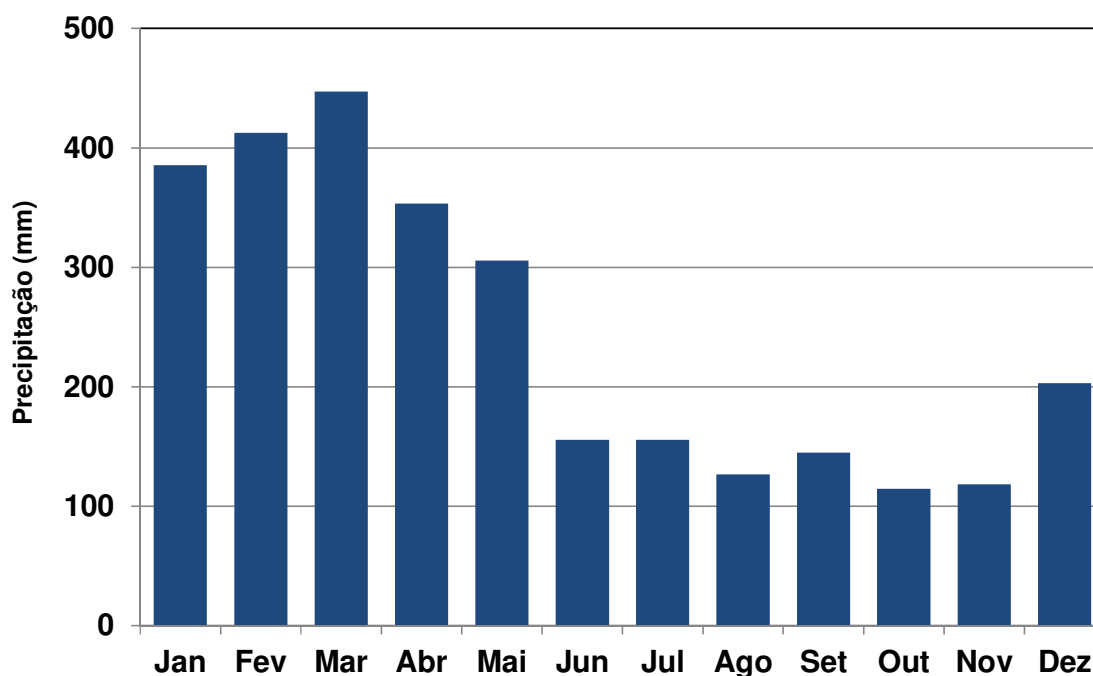


FIGURA 4.5 Distribuição anual da precipitação média em Belém baseada na normal climatológica do INMET de 1961 a 1990. Adaptado de Ramos et al. (2009).

A umidade relativa do ar apresenta altos valores ao longo do ano em Belém, embora não apresente grande amplitude nas médias mensais, variando de 79% em novembro a 89% em março. O máximo valor médio de umidade relativa ocorre no período chuvoso, assim como os menores valores médios acontecem no período menos chuvoso (RAMOS et al., 2009).

A velocidade média do vento a 2 metros de altura em Belém é baixa, com valor anual de 1,5 m/s, com pequena variação ao longo dos meses, verificando a menor média (1,3 m/s) nos meses mais chuvosos (janeiro, fevereiro, março e abril) e maior velocidade média mensal (1,6 m/s) na estação menos chuvosa (setembro, outubro e novembro). A direção do vento predominante é dos setores nordeste/leste, havendo uma maior frequência dos ventos da direção nordeste durante os meses chuvosos, enquanto que nos meses menos chuvosos os ventos de leste são mais frequentes (RAMOS et al., 2009).

## 4.2 DADOS

Para alcançar os objetivos propostos na pesquisa foram utilizadas duas fontes de dados. A EMS do SBBE com registros disponíveis no período de 2003 a 2012 (10 anos) e o NCEP (*National Centers for Environmental Predictions*) para obtenção dos dados de radiação de onda longa emergente (ROL). A análise desta variável permite verificar a diferença na variabilidade da cobertura de nuvens e precipitação em situações atmosféricas extremas cujos valores estão disponíveis em médias de 6 horas nos horários de 0000Z, 0600Z, 1200Z e 1800Z, os quais correspondem na hora local (HL) à 03:00 HL, 09:00HL, 15:00HL e 21:00HL. A resolução espacial dos dados de ROL são numa grade gaussiana T62 que corresponde aproximadamente a 1,904° de latitude e 1,875° de longitude.

Na região tropical o uso da variável ROL permite ponderar sobre o comportamento da convecção. Áreas com valores elevados de ROL significam áreas com ausência de nuvens profundas, ou regiões sobre a influência de mecanismos inibidores da convecção. Por outro lado, regiões com baixos valores de ROL (inferiores a 240 W/m<sup>2</sup>) indicam a presença de convecção profunda (KOUSKY, 1988; ZHANG, 1993; LAU et al., 1997).

Os dados de ROL foram extraídos de observações no ponto de grade que está localizada Belém, com as coordenadas de 1,4°S de latitude e 48,5°W de longitude. A localização geográfica dos pontos de grade é apresentada na Figura 4.6. O período analisado foi de janeiro de 2003 a dezembro de 2012. Foram extraídas as médias



aritméticas de ROL (Equação 1) a cada seis horas, do ponto de grade, para chuvoso de acordo com a equação:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_{ij} \quad (1)$$

Em que  $P_{ij}$  é uma grade de latitude/longitude para o dia “i” e para o ano “j”.  $P_i$  são os valores médios de ROL considerados em cada ponto de grade para o dia “i” e N o número de anos utilizados.

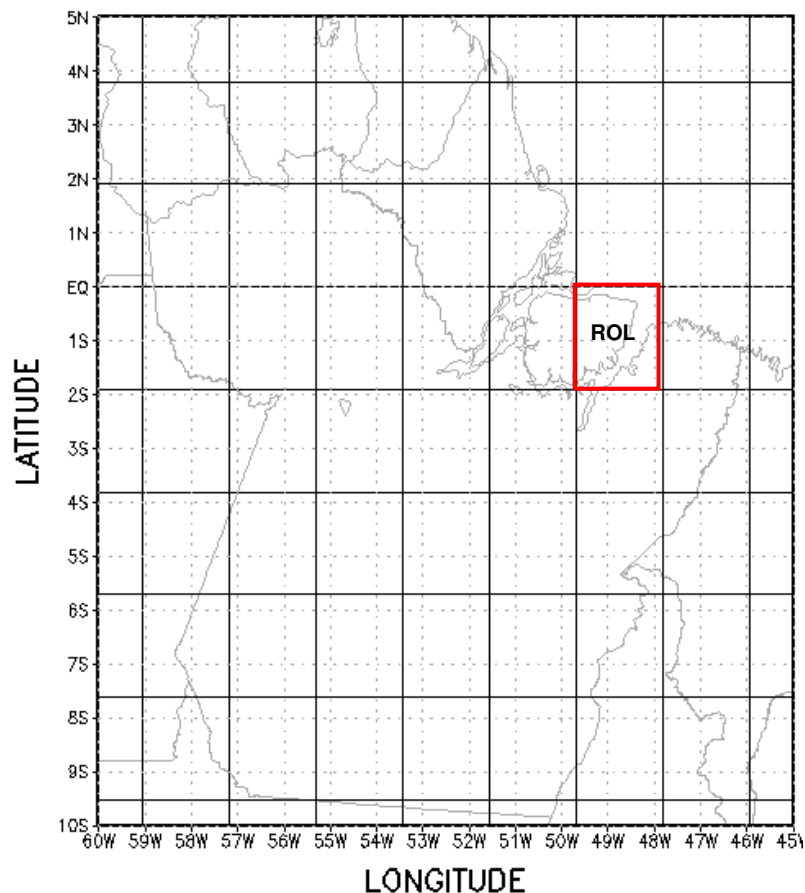


FIGURA 4.6 Localização geográfica do ponto de grade utilizado para extração de radiação de onda longa emergente (ROL) sobre Belém.

Além dos dados de ROL, foram utilizadas as médias a cada seis horas das componentes zonal e meridional do vento, a temperatura do ar e a umidade relativa, obtidas do projeto de reanálise do *National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR). Estes dados foram gerados através de um consistente sistema de assimilação de dados empregado no modelo de circulação geral (MCG) do NCEP com resolução T62L28 (aproximadamente 210 Km em latitude/longitude e 28 níveis verticais). Basicamente, este sistema consiste em assimilar uma base global de



dados diários coletados por estações convencionais e automáticas de superfície, de ar superior e de navios, além de dados estimados por satélites de órbita geostacionária e polar. Todo esse volume de dados digitais é fornecido ao MCG que faz o pré-processamento/assimilação (que incluem módulos de controle de qualidade, análise objetiva e interpolação) e posterior geração do *first guess* (a reanálise propriamente dita) contendo o estado da atmosfera global próxima à superfície e em vários níveis verticais para os horários de 0000Z, 0600Z, 1200Z e 1800Z. Os detalhes completos da reanálise NCEP/NCAR encontram-se documentados em Kalnay *et al* (1996).

Imagens do *Geostacionary Operation Enviromental Satellite* (GOES) está localizado a 35800 km acima da superfície da Terra, em uma órbita com a mesma velocidade de rotação do planeta, girando no plano do equador. O satélite GOES é equipado por uma série de sensores. Neste estudo serão utilizadas as imagens no canal infravermelho, que apresenta uma resolução espacial de 4 km. O canal infravermelho (IR) está relacionado com a temperatura da superfície, denominada como temperatura de brilho. Machado e Rossow (1993) mostraram que temperaturas de brilho do topo das nuvens menores que  $-30^{\circ}\text{C}$  determinam a presença de convecção profunda em uma imagem de satélite no canal IR.

Também foram utilizados dados medidos na EMS do SBBE. Os instrumentos instalados na EMS do SBBE permitem coletar dados representativos das condições atmosféricas locais. A EMS é equipada com sensores que medem direção e velocidade do vento, temperaturas do ar e do ponto de orvalho, alcance visual da pista, pressão ao nível do mar para ajuste do altímetro e altura da base das nuvens. Estes dados são disponibilizados na forma bruta (original) ou na forma codificada através do METAR e SPECI.

#### **4.2.1 Seleção das variáveis e processamento dos dados.**

Após o processamento dos dados brutos, disponibilizados numa resolução temporal horária, foram incluídos os registros de variação nas condições de tempo, que permitiram a elaboração de mensagens SPECI. Os registros foram organizados em planilhas para reprocessamento, elaboração de programas computacionais, cálculo de parâmetros termodinâmicos e realização de análises estatísticas.

Com base no conjunto de dados disponíveis e considerando os objetivos do estudo a técnica da ACP foi aplicada a diferentes grupos de variáveis atmosféricas representativas de condições de tempo significativo na região do aeroporto SBBE. Os indicadores estatísticos possibilitaram selecionar 12 variáveis para análise conforme descrição apresentada no

Quadro 4.1. A defasagem entre a resolução temporal dos dados coletados na EMS do SBBE e valores disponíveis da variável ROL (horários sinóticos) impossibilitou o uso de informações horárias nas análises estatísticas. Para contornar o problema e possibilitar a inclusão de informações significativas relacionadas com condições atmosféricas adversas, foram definidos critérios diferenciados de acordo com o tipo de variável observada.

Em suma, o conjunto de dados iniciais para este estudo são médias e frequências percentuais das seis horas dos períodos de 0000Z às 0600Z, 0600Z às 1200Z, 1200Z às 1800Z e 1800Z às 0000Z, ou na hora local (HL) os intervalos são de 03:00 às 09:00, 09:00 às 15:00, 15:00 às 21:00 e 21:00 às 03:00.

VARIÁVEL	Símbolo/Sigla
Temperatura do ar	Tar
Temperatura do ponto de orvalho	Td
Umidade relativa	UR
Visibilidade horizontal	VIS
Altura da base da nuvem	TETO
Velocidade do vento	VV
Velocidade Máxima	VVmax
Direção do vento	DD
Chuva	Chuv
Névoa Úmida	Numi
Nevoeiro	Nvo
Pressão Atmosférica	Press

Quadro 4.1 Relação das variáveis utilizadas neste estudo.

Os dados apresentaram alguns períodos com falhas, os quais representaram cerca de 3% do total de dados utilizados neste estudo. No período com três ou mais registros consecutivos sem dados horários, o dia em questão foi eliminado da análise. Vale ressaltar que, o maior período consecutivo de dados eliminados foi de 31 dias. Mais especificamente o mês de dezembro de 2004, por não ter sido disponibilizado nenhum registro de dados meteorológicos no SBBE.

### 4.3 METODOLOGIA

#### 4.3.1 Obtenção de parâmetros

Somente com a utilização de variáveis conservativas (conservadas em movimentos adiabáticos secos e úmidos) é possível analisar o comportamento e evolução de parcelas em processos convectivos turbulentos. No entanto, em geral as variáveis meteorológicas não são consideradas conservativas se há processos de condensação e evaporação. Na atmosfera amazônica os processos meteorológicos dependem fundamentalmente da grande quantidade de vapor d'água e da variação de energia decorrente de mudanças de fase (GARSTANG; FITZJARRALD, 1999).

Em estudos de ambientes de grande atividade convectiva as variáveis conservativas mais utilizadas são: razão de mistura, temperaturas potencial, potencial equivalente, potencial equivalente de saturação e pressão de saturação. O uso destas variáveis representa uma alternativa ou método para facilitar a visualização e/ou análise da estrutura termodinâmica da atmosfera e evolução da camada de mistura convectiva. Neste contexto, dados meteorológicos coletados no SBBE foram usados na determinação da razão de mistura e das temperaturas potencial e potencial equivalente, conforme descrição abaixo.

- Razão de mistura ( $r$ )

O cálculo da razão de mistura  $r$  (g/kg) foi feito com base na equação 2.

$$r = 0,622 \frac{e}{P-e} \quad (2)$$

Em que:  $r$  = Razão de mistura (g/kg)  
 $P$  = Pressão Atmosférica (hPa)  
 $e$  = Pressão de vapor (hPa)

De forma análoga, a razão de mistura saturada é dada pela equação 3:

$$r_s = 0,622 \frac{e_s}{P-e_s} \quad (3)$$

A Pressão de Vapor é calculada através da equação 4

$$e = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5 td}{237,3+td}} \quad (4)$$

Em que  $td$  é a Temperatura do Ponto de Orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ );

Pressão de Saturação de Vapor (hPa), calculada através da equação 5:

$$e_s = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5 t}{237,3+t}} \quad (5)$$

Em que  $t$  = Temperatura do ar em ( $^{\circ}\text{C}$ )

- Temperatura potencial ( $\theta$ )

A temperatura potencial foi calculada através da equação 6.

$$\theta = T \times \left(\frac{1000}{p}\right)^{0,2854(1-0,28 \times 10^{-3}r)} \quad (6)$$

Em que: T = Temperatura do ar em K

p = Pressão Atmosférica em hPa

r = 287 J/K kg (constante específica para o ar seco)

- Temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ )

A temperatura potencial equivalente foi calculada utilizando a equação proposta por Bolton (1980), conforme descrito na equação 7.

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{2,675r}{T_L}\right) \quad (7)$$

Em que:  $\theta_e$  = Temperatura Potencial Equivalente (K)

$\theta$  = Temperatura Potencial (K)

r = Razão de Mistura (g/kg)

$T_L$  = Temperatura do Nível de Condensação por Levantamento (NCL) em K.

O Nível de Condensação por Levantamento (NCL) é o nível no qual uma parcela em ascensão adiabática atinge a saturação. Com os valores da temperatura de um nível T e da UR, a temperatura do NCL ( $T_L$ ) pode ser obtida da equação 8, proposta por Bolton (1980).

$$T_L = 55,0 + \frac{1}{\frac{1}{T-55} - \frac{\ln\left(\frac{UR}{100}\right)}{2840}} \quad (8)$$

Para analisar o ambiente dinâmico, foi calculada através de diferenças finitas, a convergência de umidade em 1000 hPa (Equação 9) e a divergência de massa em 200 hPa (Equação 10), pois os padrões de convergência e divergência efetivamente regulam o movimento vertical e a circulação atmosférica nos trópicos (HASTENRATH, 2001).

$$MCONV = -1 * \left(\frac{\partial u * r}{\partial x} + \frac{\partial v * r}{\partial y}\right) * 10^4 \quad (9)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{V} = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) * 10^5 \quad (10)$$

Em que:  $MCONV$  = Convergência de Umidade ( $s^{-1}$ )

u = Componente zonal do vento (m/s)

v = Componente meridional do vento (m/s)

$\bar{\nabla} \cdot \bar{V}$  = Divergência de massa ( $s^{-1}$ )

r = Razão de Mistura (g/kg)

x = distância zonal (m)

y = distância meridional (m)

Além disso, foram obtidas outras variáveis com base nos parâmetros das operações aeronáuticas. Regras ou mínimos operacionais para VFR e IFR estão entre os principais critérios usados na seleção de variáveis representativas de condições atmosféricas adversas. Os cálculos e critérios utilizados para a adequabilidade dos dados utilizados são apresentados no quadro 4.2.

VARIÁVEIS	ADEQUAÇÃO
TempMed, TetoMed, VisMed, VelMed, r, UR THETA E, Press	Média aritmética no período de 6 horas.
VelMax, TempMax	Máximo valor no período de 6 horas
DD (direção do vento)	Frequência de ocorrência horária no período de seis horas (valores percentuais). Portanto, cada vez que a variável ocorreu foi atribuído o valor 1 (um) e quando não ocorreu foi atribuído o valor zero. O valor de ocorrência em seis horas foi calculado através de uma regra de três simples expressa na equação 11. $y = \frac{n^{\circ} \text{ de ocorrência } s}{6} \times 100 \quad [\%] \quad (11)$ <p>Em que: <math>n^{\circ} \text{ de ocorrência } s</math> = número de vezes que a variável ocorreu no período de seis horas  <math>y</math> = percentual de ocorrência da variável em seis horas.</p>
DD (direção do vento)	Novas variáveis de frequência percentual da ocorrência da direção do vento horário nos períodos de seis horas para os setores norte (DDN), nordeste (DDNE), leste (DDE), sudeste (DDSE), sul (DDS), sudoeste (DDSW), oeste (DDW) e sudoeste (DDSW) e vento calmo (DDZERO).
Teto, Vis e R06	A frequência de ocorrências $Vis \leq 5000$ , foi definida pelo número de vezes que em seis horas a visibilidade horizontal foi igual ou menor que 5000m. Também foi criada a variável $Teto \leq 450m$ para frequência de ocorrência em seis horas de teto igual ou menor a 450m. O R06 foi definido como o número de vezes, em seis horas, que o alcance visual do piloto em relação às luzes de borda ou de eixo da pista principal foi restringido, em condições de visibilidade horizontal menor que 2000m.

Quadro 4.2 Critério dos dados utilizado na adequabilidade dos dados considerando intervalos sinóticos (0000-0600Z, 0600-1200Z, 1200-1800Z e 1800-0000Z).

Os dados de direção do vento foram originalmente medidos em graus. Para determinar o setor da direção da direção do vento associado a cada valor medido foram utilizados os intervalos descritos no quadro 4.3. Vale ressaltar que o vento denominado de calmo foi contabilizado sempre que a direção e a velocidade do vento registrada foram iguais à zero (DDZERO).

SETOR	INTERVALO DE DIREÇÃO (°)
Norte (DDN)	340-360 e 10-20
Nordeste (DDNE)	30-60
Leste ou Este (DDE)	70-110
Sudeste (DDSE)	120-150
Sul (DDS)	160-200
Sudoeste (DDSW)	210-240
Oeste (DDW)	250-290
Noroeste (DDNW)	300-330
Vento Calmo (DDZERO)	000

Quadro 4.3 Intervalos dos registros de direção do vento (em graus) associado com cada setor de direção do vento, com referência ao norte verdadeiro.

A intensidade de chuva foi categorizada de acordo com o BRASIL (2014b), que usa a taxa acumulada em milímetro por hora ( $\text{mm h}^{-1}$ ). O quadro 4.4 mostra os intervalos de taxa de chuva e sua respectiva intensidade.

INTENSIDADE DA CHUVA	TAXA ( $\text{mm h}^{-1}$ )
Leve	0,1 - 2,4
Moderada	2,5 – 9,9
Forte	Acima de 9,9

Quadro 4.4 Intervalos das taxas de chuva acumulado por hora ( $\text{mm h}^{-1}$ ) usados para classificação da intensidade de chuva de acordo com o BRASIL (2014b).

### 4.3.2 Análise Fatorial em Componentes Principais (ACP)

A AF em ACP é aplicada aos dados meteorológicos com o intuito de encontrar funções matemáticas que expliquem o máximo das variações existentes entre as variáveis e que possam descrever e reduzir o número dessas variáveis.

A ACP é usada para explicar a estrutura da covariância entre as variáveis. Os fatores extraídos com a técnica expressam o que existe de comum entre as variáveis originais. Portanto, o método permite determinar as variáveis que pertencem a um determinado fator e quanto cada uma destas explica esse fator (PREISENDORFER, 1988).

O resultado básico de informações na análise fatorial é a matriz de dados (PANDZIC, 1988). Em  $n$  observações existem  $m$  variáveis, cuja matriz de dados é normalizada (com média zero e variância um). Os dados analisados são apresentados por uma matriz  $m \times n$ , e designada  $\mathbf{Z}$ , a partir da qual é obtida a matriz de correlação  $\mathbf{R}$  dada pela equação 12:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{n-1} (\mathbf{Z})(\mathbf{Z})' \quad (12)$$

Em que,  $(\mathbf{Z})'$  é a matriz transposta de  $\mathbf{Z}$ .

Sendo  $\mathbf{R}$  uma matriz simétrica positiva de dimensão  $(k \times k)$ , ela é diagonalizável por uma matriz  $\mathbf{A}$ , de mudança de base, denominada de autovetores e por  $\lambda$ , o autovalor associado, dado por:

$$(\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{A} = 0 \quad (13)$$

$$|\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I} = 0| \quad (14)$$

Em que,  $\mathbf{I}$  é matriz identidade. Assim, para que  $\mathbf{A}$  tenha soluções não triviais o  $\det|\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I}| = 0$ .

O determinante produz uma matriz diagonal, cujos elementos são os autovalores  $\lambda_m$  correspondentes aos autovetores de  $a_m$  de cada coluna  $k$  de  $\mathbf{A}$ . Como  $\mathbf{R}$  é simétrica, o somatório dos elementos da sua diagonal principal ( $r_{ii}$ ) é igual à soma dos autovalores, ou seja:

$$\sum_{i=1}^m r_{ii} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (15)$$

O cálculo dos autovetores é dado pela seguinte expressão:

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{A} \quad (16)$$

Em que,  $\mathbf{D}$  é a matriz diagonal, cujos elementos  $\lambda_i$  são os autovalores de  $a_i$ . Pela ortogonalidade dos autovetores, a inversa de  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{A}^{-1}$ ) é igual a sua transposta ( $\mathbf{A}^t$ ). Logo, os

fatores  $U_1, U_2, \dots, U_p$  são obtidas por combinações lineares entre a transposta dos autovetores ( $\mathbf{A}^t$ ) e a matriz de observações ( $\mathbf{X}$ ), ou seja:

$$U = A^t X \quad (17)$$

$$X = AU \quad (18)$$

Cada linha de  $\mathbf{U}$  corresponde a um fator que forma as séries temporais associadas aos autovalores. Os valores de  $\mathbf{X}$  do  $n$ -ésimo local são calculados por:

$$X_i = a_{j1}U_1 + a_{j2}U_2 + \dots + a_{jk}U_k + a_{jp}U_p \quad (19)$$

A solução desta equação é única. Esta solução considera a variação total presente no conjunto das variáveis iniciais, onde o primeiro fator explica o máximo possível da variância dos dados iniciais, enquanto o segundo fator explica o máximo possível da variância ainda não explicada e assim por diante, até a última com que contribui com a menor parcela de explicação da variância total dos dados iniciais.

Cada fator tem uma porção da variância total dos dados meteorológicos, e são ordenadas por ordem decrescente dos autovalores mais significativos de  $a_j$  em  $\mathbf{A}$ , dada por:

$$U_k = \sum_{j=1}^m a_{j,k} X_j \quad (20)$$

Tomando  $\mathbf{F}$  como funções lineares das variáveis observadas normalizadas ( $\mathbf{X}$ ), temos:

$$F = X.B \quad (21)$$

Em que,  $\mathbf{F}$  é a matriz dos escores fatoriais, constituída de  $n$  valores para cada um dos fatores, e  $\mathbf{B}$  é a matriz ( $p \times p$ ) dos coeficientes dos escores fatoriais dos fatores.

$$B = A.D^{-1/2} \quad (22)$$

Multiplicando a matriz dos autovetores ( $\mathbf{A}$ ) pela raiz quadrada da matriz dos autovalores ( $\mathbf{D}$ ), temos a matriz  $\mathbf{W}$  ( $p \times p$ ), das cargas fatoriais, dada por:

$$W = A.D^{1/2} \quad (23)$$

Relacionando  $\mathbf{F}$  e as CPs tem-se:

$$Y = A.X = B.D^{1/2} = F.D^{1/2} \quad (24)$$

Em que,  $\mathbf{F}$  são as cargas fatoriais para as fatores  $\mathbf{Y}$ .

O número escolhido de fatores foi baseado no critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores a unidade (KAISER, 1958). A distribuição dos escores facilita as interpretações físicas correspondentes aos fatores. Se a interpretação física for o principal objetivo da ACP, então



se faz a rotação da solução inicial para uma nova coordenada de vetores, através de uma transformação linear (RICHMAN, 1986)

Neste estudo, utilizou-se uma rotação ortogonal mantendo a correlação entre as componentes igual a zero, portanto independentes. Um dos métodos de rotação mais utilizados que maximiza a variância em cada componente é o Varimax, dado por:

$$Var = \sum_{j=1}^r \left( m \sum_{i=1}^m (a_{ij})^2 - \left( \sum_{i=1}^m a_{ij}^2 \right)^2 \right) / m^2 \quad (25)$$

Em que,  $r$  é o número de fatores que representam as informações físicas e  $m$  o número de variáveis.

O objetivo da utilização dos fatores rotacionados foi obter a maior concentração dos dados originais da série temporal dos fatores pela máxima variância, e não à característica normalizada da série temporal como ocorre nos fatores não rotacionados (CORRAR et. al, 2007). Os escores são importantes por descrever a evolução temporal dos autovetores e permitem avaliar a representatividade dos padrões como situações reais. Valores maiores que 1 representam sequências de situações meteorológicas similares às sequencias dos padrões obtidos (ESCOBAR, 2007). Nesse estudo foram elaboradas séries temporais dos escores associados a cada fator que representam a contribuição destes em relação à variância total, do conjunto de dados meteorológicos e dos dados de ROL em Belém.

A AF em ACP possui modos de análise que são caracterizados com base na forma em que está organizado o conjunto de dados e dos objetivos a serem alcançados (RICHMAN, 1986). Como as análises desse estudo são de dados meteorológicos pontuais o modo mais adequado para ser utilizado foi o modo P. O Modo-P visa agrupar variáveis com base numa estrutura de relacionamento entre as mesmas. Uma ilustração da matriz de entrada dos dados é mostrada no Quadro 4.5. Na coluna devem ser colocadas as variáveis meteorológicas e nas linhas o tempo.

		PARÂMETROS				
		V1	V2	V3	...	Vn
TEMPO	T1	X <sub>1,1</sub>	X <sub>1,2</sub>	X <sub>1,3</sub>		X <sub>1,n</sub>
	T2	X <sub>2,1</sub>	X <sub>2,2</sub>	X <sub>2,3</sub>		X <sub>2,n</sub>
	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.
	Tn	X <sub>n,1</sub>	X <sub>n,2</sub>	X <sub>n,3</sub>		X <sub>n,n</sub>

Quadro 4.5- Matriz de entrada formada pelos dados das variáveis pelo escala temporal de tempo utilizada.

Para avaliar se os dados meteorológicos utilizados nesse estudo estavam adequados para o uso da ACP, foi aplicado os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o teste de significância de BARTLETT (TSB). O KMO foi calculado conforme Equação 26 e valores maiores que 0,5 indicam que as amostras selecionadas são apropriadas para a aplicação da técnica. De igual forma o TSB, calculado através da equação 27, deve apresentar valores inferiores a 0,05 para validar o uso da ACP (HAIR JÚNIOR et. al, 1995; CORRAR et. al, 2007).

$$KMO = \frac{\sum_{j \neq k} r_{jk}^2}{\sum_{j \neq k} r_{jk}^2 + \sum_{j \neq k} q_{jk}^2} \quad (26)$$

Em que:  $r_{jk}^2$  = Quadrado dos elementos da matriz de correlação original fora da diagonal.

$q_{jk}^2$  = Quadrado da correlação parcial entre as variáveis.

$$TSB = - \left[ (n-1) - \frac{2p+5}{6} \right] \ln |R| \quad (27)$$

Em que: n = Tamanho da amostra

p = número de variáveis

|R| = determinante da matriz de correlação

Foi utilizada também a matriz de correlação como critério de seleção do conjunto de dados adequados para a aplicação da AF. Hair Júnior et al. (2006) recomendam que a maior parte das variáveis selecionadas apresentem coeficientes da matriz de correlação maiores (em módulo) que 0,3. Outro indicador estatístico analisado foram as comunalidades. De acordo com Schawb (2007), as comunalidades representam a proporção da variância para cada variável incluída na análise que é explicada pelos componentes extraídos. Usualmente o valor mínimo aceitável é de 0,50. Numa perspectiva mais conservadora, seria aconselhável excluir da análise e realizar novamente a AF, em casos que a variável abaixo do valor aceitável, no entanto, dependendo dos objetivos propostos deve ser cuidadosamente avaliada a retirada da mesma.

#### 4.4 LIMITAÇÕES NOS DADOS

Para realizar uma análise mais objetiva e refinada dos padrões encontrados através da AF foi necessário a utilização de variáveis que estivessem associadas aos impactos operacionais do aeroporto. A ideia inicial deste estudo foi usar os registros de atrasos e cancelamentos de pousos e decolagens provenientes da ANAC. Os dados da ANAC categorizados como atrasos e cancelamentos de voos, são classificados em função do aeroporto de origem ou destino e quando estão abaixo dos limites operacionais. Os limites operacionais de aeroportos são determinados através das condições mínimas de teto e visibilidade que permitam as operações os pousos e decolagens de aeronaves, sem o auxílio de equipamentos de orientação de navegação aérea (denominadas operações visuais). Porém, na prática existem outras condições que determinam os limites operacionais do aeroporto e que necessariamente não apresentam uma relação direta com as condições de tempo. Por exemplo, existem em Belém atrasos ou cancelamentos de voos em condições de pista molhada devido a falta de drenagem na pista. Normas operacionais de algumas empresas aéreas não permitem operações nessas situações e registram tais imprevistos (cancelamentos ou atrasos) como decorrentes da atuação de fenômenos meteorológicos. No entanto, se observados os boletins meteorológicos, é possível verificar que no período em questão não há registro de condições de tempo adverso. Este fato inviabilizou a quantificação precisa de condições adversas associadas com perturbações meteorológicas e conseqüentemente a validação dos resultados e análises dos possíveis impactos nas atividades aeroportuárias.

Para contornar esta situação, optou-se por escolher variáveis meteorológicas que indicam a presença de tempo significativo, as quais geralmente também estão vinculadas ao estabelecimento das operações IFR, e identificar os padrões atmosféricos associados. Na aplicação da técnica estatística, são determinadas cargas fatoriais, que indicam quanto cada variável esteve associada a cada fator. Como já discutido anteriormente, a representatividade dos fatores é verificada através dos escores.

Para realizar uma análise mais objetiva de cada fator e analisar os períodos que os mesmos apresentaram maior representatividade, foram selecionados 10% dos maiores valores dos respectivos escores (**10%E**). Para que não houvesse equívocos na escolha dos períodos, optou-se selecionar esta amostra dos escores para quantificar a ocorrência das variáveis que indicaram a presença da condição de tempo significativo no SBBE, nos períodos que o fator foi dominante. Camponogara (2012) realizou uma análise semelhante, utilizando as variáveis precipitação, vento zonal, CAPE, Convective Inhibition Energy (CINE) e cisalhamento do vento zonal entre os níveis de 1000 e 700 hPa (CISZ), para verificar qual

dos padrões atmosféricos obtidos através da aplicação da AF, nos dados de vento, temperatura e umidade no perfil vertical da atmosfera, estiveram associados com os extremos chuvosos diários em Belém.

Exatamente por isso, optou-se usar, somente nesta fase do estudo as variáveis medidas no aeródromo que representam o estabelecimento de fenômenos de tempo significativo no SBBE. As variáveis selecionadas para esta fase são aquelas que podem limitar as operações de pousos e decolagens no aeroporto, levando em consideração principalmente a redução de teto e/ou visibilidade no aeródromo (BRASIL, 2008). As variáveis analisadas foram: visibilidade horizontal menor ou igual a 5000 metros ( $Vis \leq 5000m$ ), teto igual ou menor que 450 metros ( $teto \leq 450m$ ), alcance visual do piloto em relação as luzes de borda ou de eixo da pista principal em condições de visibilidade horizontal menor que 2000 metros (R06), nevoeiro, névoa úmida, chuva leve, chuva moderada e chuva forte.

Numa segunda etapa da pesquisa, considerando as limitações intrínsecas dos dados disponíveis para análise e o objetivo principal do trabalho desenvolvido, verificou-se a importância de validar os resultados estatísticos através da realização de estudos de casos. O critério de escolha dos estudos de casos foi baseado nos períodos que a série de METAR e SPECI do SBBE (de janeiro de 2003 a dezembro de 2012) apresentou limitação operacional, devido à restrição de teto e visibilidade. Através do maior valor do escore temporal associado ao padrão atmosférico (obtido pela AF) durante o caso estudado, foi identificado qual o fator foi responsável pelo estabelecimento das condições de tempo adverso.

No desenvolvimento das análises, além dos dados do METAR/SPECI, foram também utilizadas imagens do Satélite GOES no IR, o escoamento do vento em baixos níveis e em altos níveis, a convergência de umidade em baixos níveis, divergência de massa em altos níveis, identificando o ambiente atmosférico de grande escala e de escala local que promoveram as limitações operacionais no SBBE.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS NO SBBE

Neste item serão discutidos os principais aspectos das condições médias das variáveis meteorológicas dentro do período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 em Belém, mais especificamente no SBBE.

A Figura 5.1 mostra o acumulado médio mensal de chuva (Chuv) e a média mensal de UR em superfície, ambos no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 no SBBE. A precipitação apresenta uma distribuição anual bem definida, com dois períodos distintos: um período chuvoso de dezembro a maio, com máximo acumulado no mês de março (total mensal médio de 460 mm) e um período menos chuvoso, de junho a novembro, com menor acumulado médio no mês de novembro (total mensal médio de 132 mm). Essa variação também foi notada nos valores médios mensais da UR, embora não apresente uma amplitude na distribuição anual tão expressiva quanto a observada na Chuv. Os maiores valores médios mensais de UR ocorreram no período chuvoso (de dezembro a maio) e menores valores médios mensais de junho a novembro. Esta distribuição apresentou comportamento semelhante à climatologia (RAMOS et al., 2009) e está associada principalmente com a marcha anual da ZCIT (RAO; HADA, 1990; FIGUEROA; NOBRE, 1990).

A Figura 5.2 mostra que a média mensal das temperaturas máxima, mínima e média variou pouco se comparada com o total médio mensal de precipitação, mesmo assim, esta pequena variação foi influenciada pela distribuição anual de chuvas. Além disso, a temperatura média e a temperatura máxima são inversamente proporcionais aos totais médios mensais de chuvas, ou seja, os menores valores de temperatura média e máxima ocorreram nos meses chuvosos, enquanto que os maiores valores foram registrados nos meses menos chuvosos. Já a média da temperatura mínima mensal teve a menor diferença entre o maior e o menor valor médio mensal, quando comparada à temperatura máxima e média mensal. Estes resultados também estão de acordo com Ramos et al. (2009).

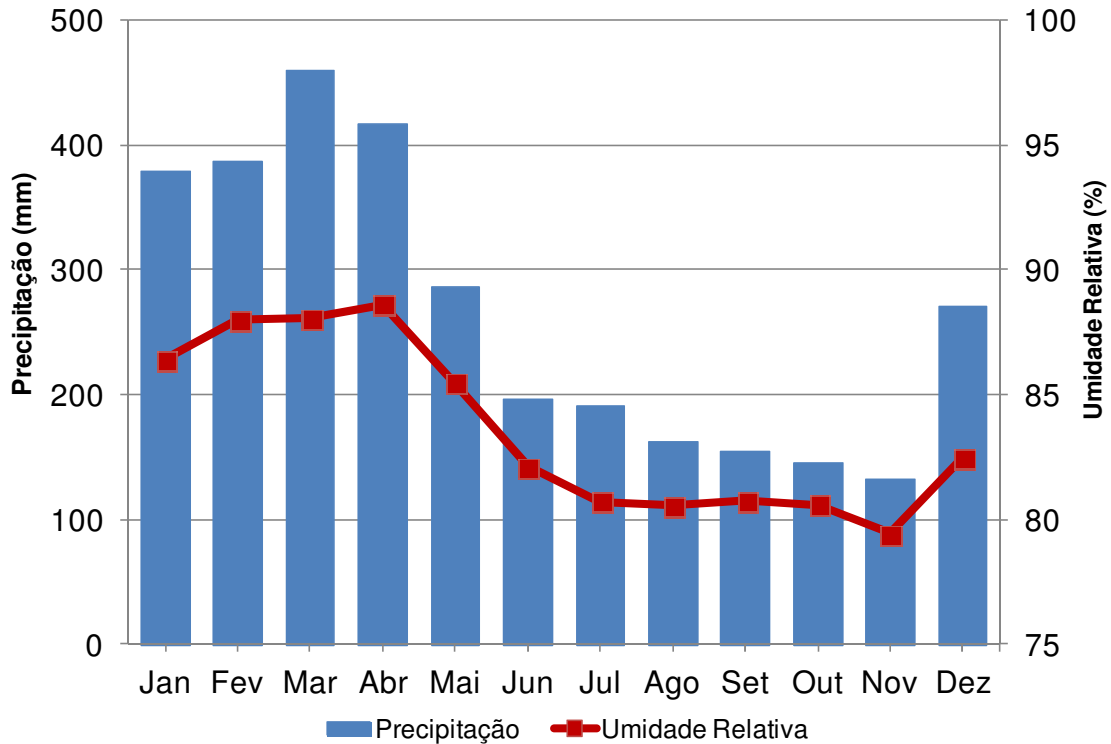


Figura 5.1 Acumulado médio mensal de precipitação e média mensal de umidade relativa do ar em superfície no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 no Aeroporto Internacional de Belém.

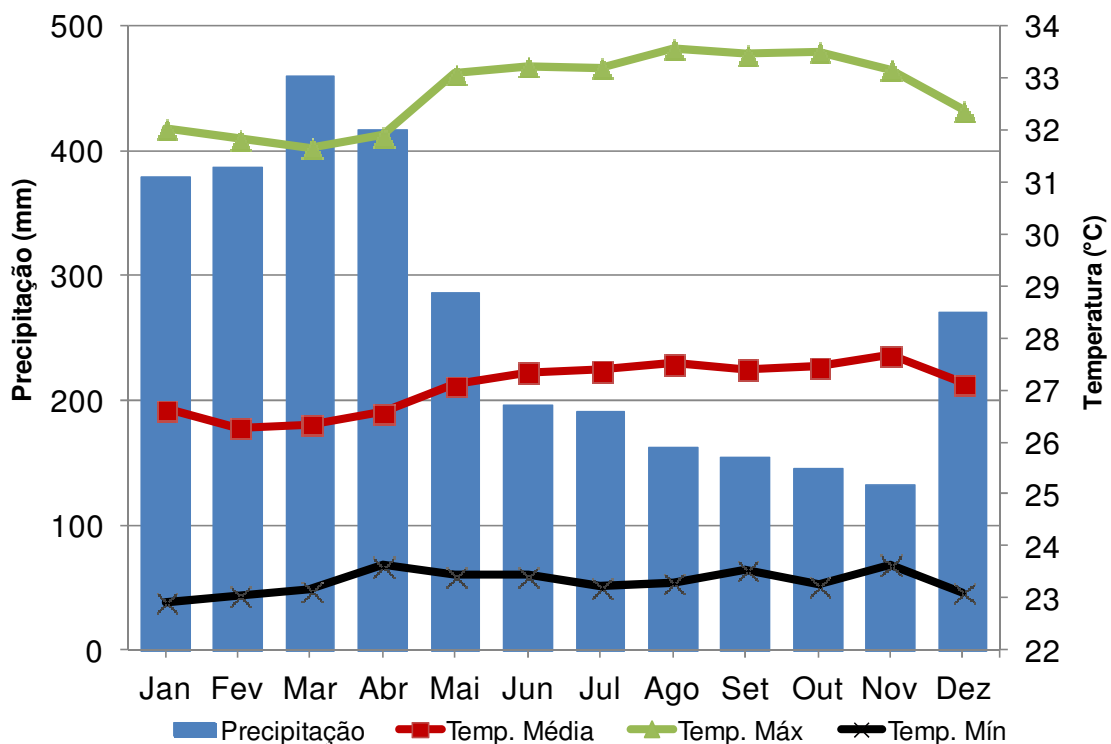


Figura 5.2 Acumulado médio mensal de precipitação e média mensal das temperaturas média, máxima e mínima em superfície no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012 no Aeroporto Internacional de Belém.

A frequência das condições significativas de tempo no SBBE pode ser avaliada através da contabilização de mensagens SPECI. O SPECI é emitido a qualquer momento que tenha ocorrido condição de tempo significativo, indicando a piora ou melhora da mesma no aeródromo e suas vizinhanças (BRASIL, 2014b).

De janeiro de 2003 a dezembro de 2012, 3765 SPECIs foram emitidos no SBBE, sendo que deste total, 65% ocorreram durante o período chuvoso (dezembro a maio). A Figura 5.3 mostra que a distribuição mensal do percentual de SPECI emitido no SBBE, foi diretamente proporcional ao comportamento anual médio de precipitação, ou seja, os meses que apresentaram os maiores percentuais mensais de SPECI são os mesmos que tiveram os maiores acumulados médios mensais de precipitação (dezembro a maio). Nos meses menos chuvosos no SBBE (junho a novembro), os percentuais mensais de SPECI também foram reduzidos, com valores entre 5% e 7% do total emitido durante todo o período analisado.

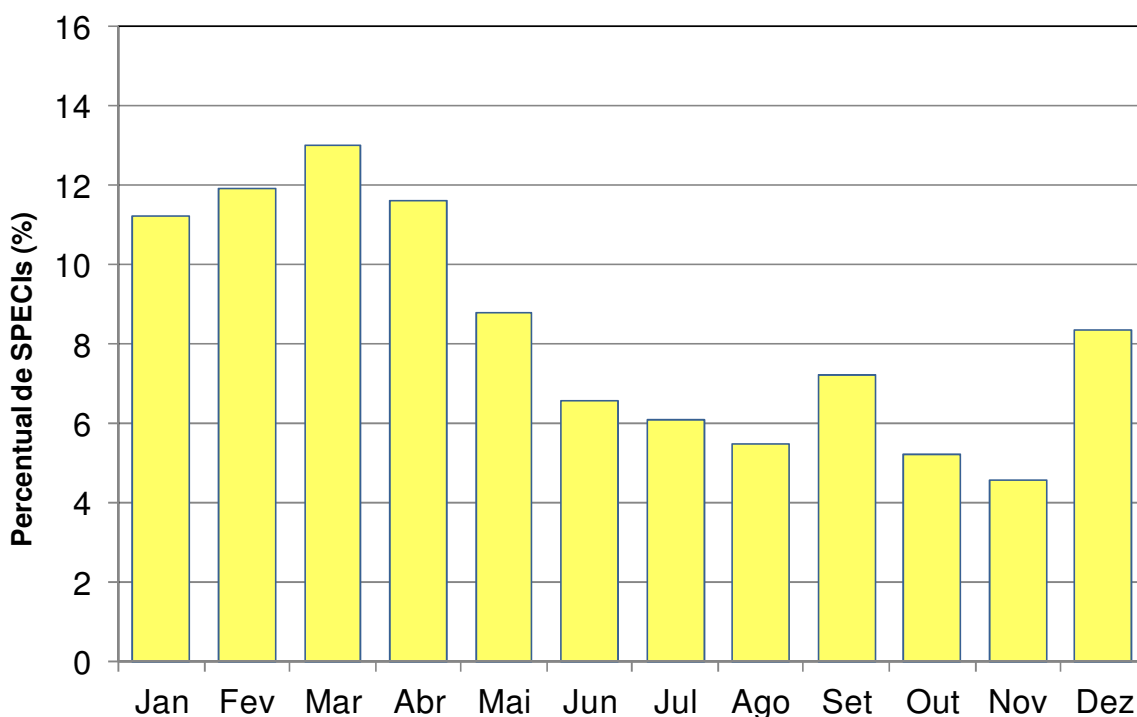


Figura 5.3 Percentual mensal do total de mensagens especiais (SPECI) emitidas no Aeroporto Internacional de Belém no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012.

Das mensagens SPECI e METAR emitidas de 2003 a 2012 foi identificada a ocorrência de seis fenômenos meteorológicos, que estiveram associados com a presença de condições de tempo significativos no SBBE. Estes seis fenômenos foram: névoa úmida, chuva leve, nevoeiro, trovoada, chuva moderada e chuva forte. Os fenômenos meteorológicos névoa úmida e nevoeiro foram pouco frequentes, ao contrário dos demais

fenômenos identificados, com destaque para a ocorrência de trovoada, chuva leve e chuva forte (Figura 5.4).

Por isso, a obtenção dos padrões atmosféricos que estiveram associadas à ocorrência das condições de tempo significativos no SBBE se limitará ao período chuvoso.

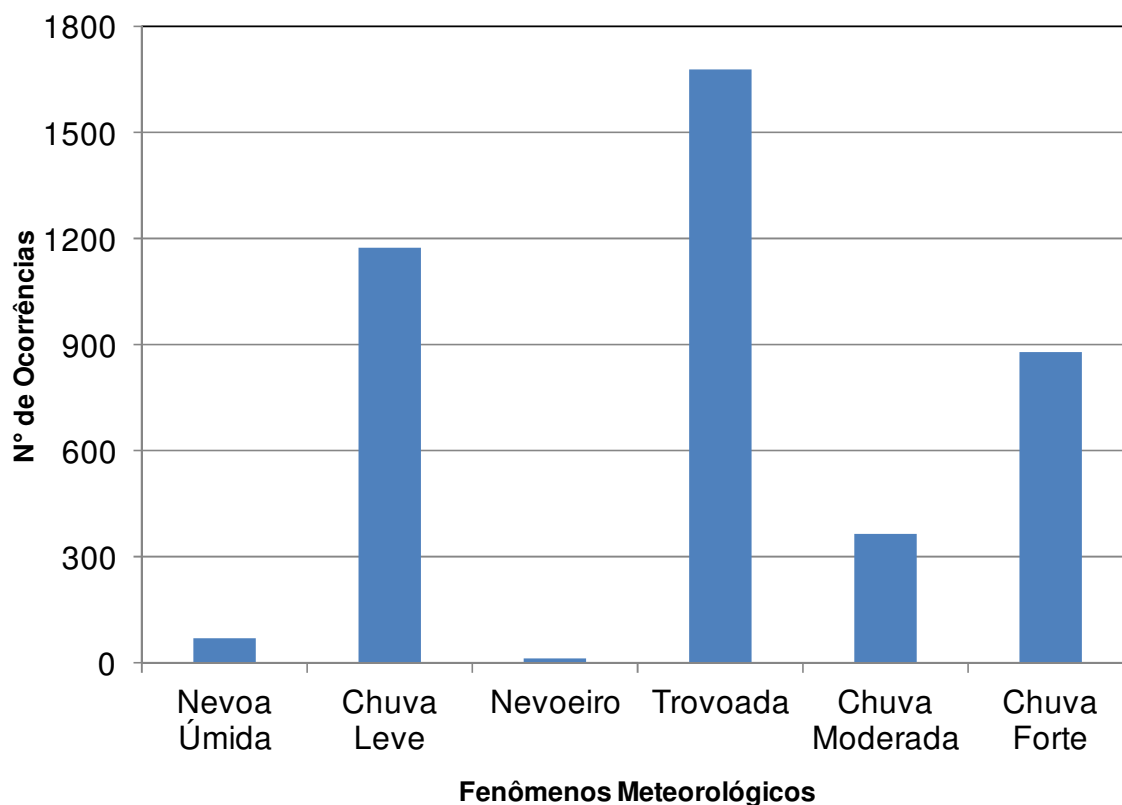


Figura 5.4 Número de ocorrência dos fenômenos meteorológicos no Aeroporto Internacional de Belém no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2012.

Outra variável importante para a análise das condições de tempo no aeroporto é o vento. A Figura 5.5 mostra a distribuição anual do número percentual da direção do vento à superfície para o período chuvoso (dezembro a maio) de 2003 a 2012. Os ventos da direção leste (E) foram os mais frequentes no período analisado, com frequência entre 30% a 40% na grande maioria dos anos estudados.

Por outro lado, os ventos nos setores nordeste (NE) e ocorrem com percentuais entre 20% e 10%. Os ventos sudeste apresentaram um percentual de ocorrência em torno de 20% e 10%, respectivamente. Os ventos de NE e SE poderiam estar associadas com a circulação de grande escala dos alísios de nordeste e de sudeste, assim como está sob a influência da circulação de brisa marítima e terrestre em função da proximidade do Oceano Atlântico.



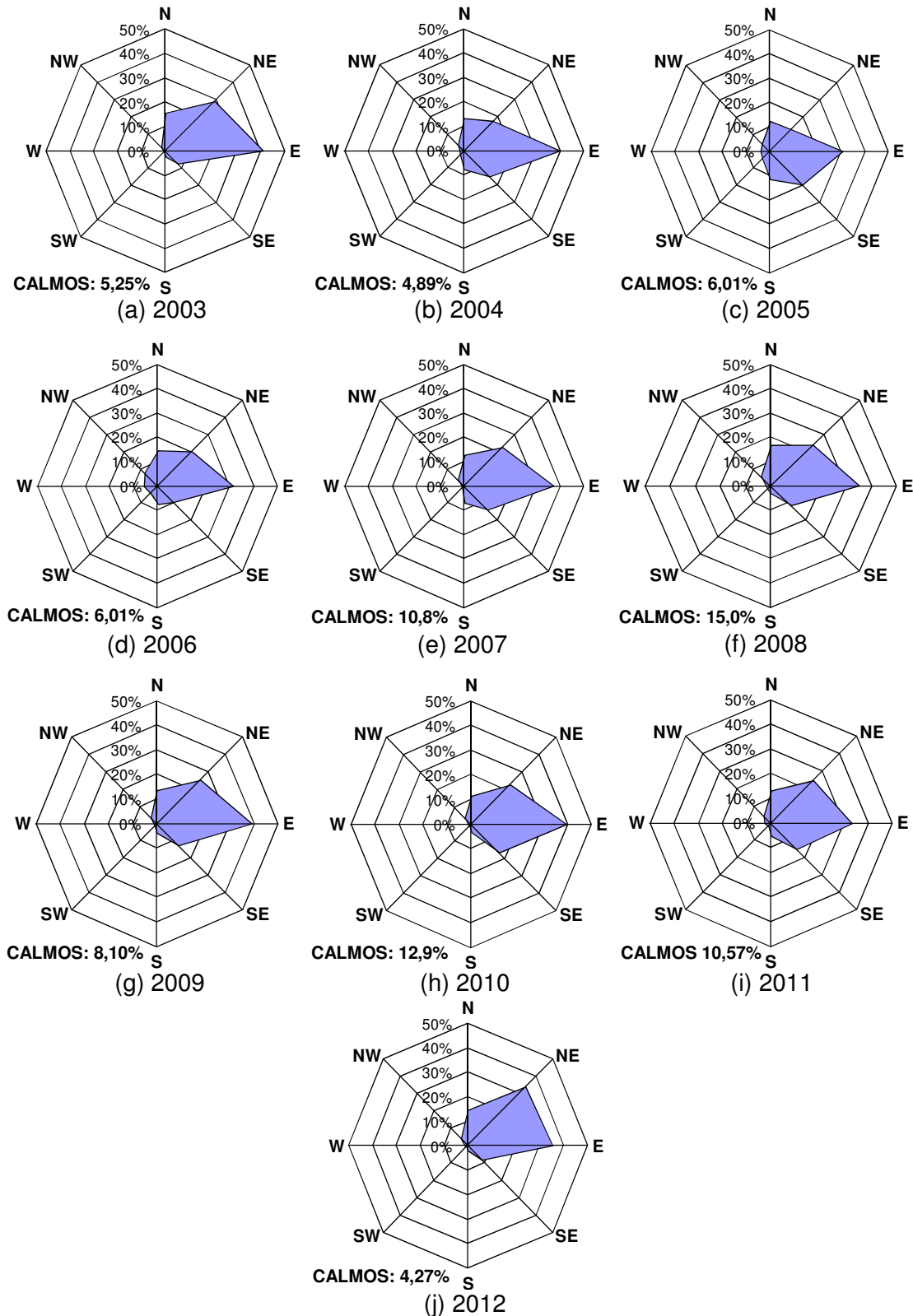


Figura 5.5 Distribuição do número percentual de casos de direção do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) nos anos de: (a) 2003, (b) 2004, (c) 2005, (d) 2006, (e) 2007, (f) 2008, (g) 2009, (h) 2010, (i) 2011 e (j) 2012. Os valores das circunferências representam a frequência de direção do vento (em porcentagem).

Cerca de 10% dos ventos ocorrem na direção Norte (N) e 5% da direção Noroeste (NW). Os ventos dos setores NW e N estão associados com a brisa fluvial, decorrente da presença do Rio Pará à oeste-noroeste de Belém (SOUZA JÚNIOR, et. al.,2006).

Vale ressaltar que, no ano de 2005 a distribuição anual do percentual de ocorrência do vento da direção sudeste foi mais frequente em relação aos demais anos (Figura 5.5c). Vários estudos apontam 2005 como um ano anômalo na Região Amazônica, em virtude do aquecimento das águas superficiais do Atlântico Norte. Este aquecimento anômalo modificou a circulação geral da atmosfera, mantendo a ZCIT ao norte de sua posição normal, refletindo nas mudanças da direção do vento, além da redução de chuvas na região (GOMES, 2008; ZENG et al., 2008; MARENGO et al., 2011).

No ano de 2012 também foram observadas diferenças na distribuição da frequência percentual do vento, com maior quantidade de ventos da direção nordeste (Figura 5.5j). Neste caso, estas diferenças também estiveram associadas a modificações na circulação geral da atmosfera, associada principalmente ao surgimento de anomalias positivas de TSM no Atlântico Norte. Este cenário climático favoreceu a manutenção da ZCIT ao norte de sua posição climatológica, assim como a entrada dos ventos alísios de sudeste, através da costa oceânica, no estado do Pará. Com isso, os alísios de sudeste se tornaram ventos da direção nordeste, corroborando com os resultados encontrados neste estudo (BOLETIM CLIMÁTICO DA AMAZÔNIA, 2012).

Quanto a velocidade do vento, os intervalos de 1 a 5 nós (KT) foram mais frequentes em todos os anos analisados (de 2003 a 2012), variando de 84,18% a 91,65%. A frequência dos ventos calmos (igual a 0 KT) alternou de 3,65% a 12,71%. Os ventos com velocidades entre 6 a 10 KT de 0,83% a 9,45%, já as velocidades superiores a 11 KT foram menores que 1% (Tabela 5.1). Estes resultados estão de acordo com os estudos climatológicos de Bastos et al. (2002) e Ramos et al. (2009), que também mostraram que os ventos apresentam baixos valores de velocidade no período chuvoso, pois neste período há a atuação da ZCIT na área de estudo, sistema meteorológico, que é caracterizado por ventos de intensidade leve (VIANELLO; ALVES, 2000).

Tabela 5.1 Frequência da velocidade do vento no Aeroporto Internacional de Belém nos períodos chuvosos (dezembro a maio) de 2003 a 2012 nos intervalos de 1,8 a 9,2 KT, de 11,1 a 18,5 KT, de 20,3 a 27,7 KT, de 29,6 a 37,0 KT e 38,6 a 55,5 KT.

ANO	FREQUENCIA PERCENTUAL DA VELOCIDADE DO VENTO EM NÓS (KT)					
	Calmos	1-5	6-10	11-15	16-20	21-30
2003	4,85	87,15	7,75	0,23	0,02	0,00
2004	4,42	90,93	4,51	0,12	0,00	0,03
2005	3,57	91,65	4,61	0,14	0,00	0,02
2006	5,41	90,99	3,43	0,13	0,00	0,04
2007	9,95	89,52	0,83	0,00	0,00	0,00
2008	12,71	86,34	0,92	0,02	0,00	0,00
2009	7,27	88,83	3,86	0,00	0,00	0,03
2010	11,32	84,18	4,44	0,07	0,00	0,00
2011	9,02	86,18	4,63	0,04	0,07	0,07
2012	3,94	86,45	9,45	0,13	0,00	0,02

A frequência percentual mensal dos setores de direção do vento para cada hora está ilustrada na Figura 5.6. Os ventos da direção leste são os quais apresentam maior frequência na maioria dos meses entre o final da noite e período da manhã (entre 23:00 e 12:00 HL), com frequências de até 60% durante este intervalo de tempo, os quais são predominantes na região. Entre 23:00 e 07:00 HL ocorre o efeito de brisa terrestre (SILLS, 1998), o que parece reduzir a frequência dos ventos predominantes de grande escala. Por outro lado, nos horários de transição entre as circulações de brisa marítima e terrestre (08:00 às 11:00) percebe-se um aumento da frequência dos ventos predominantes da grande escala (leste), com pico às 09:00 HL.

Os ventos de norte apresentam a frequência inversa em relação aos ventos de leste, sendo mais evidenciado nos meses de dezembro a fevereiro (Figuras 5.6a-c). Sua maior frequência se deu entre às 13:00 e 18:00 HL. A direção noroeste apresentou maior frequência (em torno de 10%) por volta de 13:00HL a 14:00HL. Os horários de maior frequência destes ventos coincidiram com horário típico do predomínio da circulação de brisa marítima (SILLS, 1998).

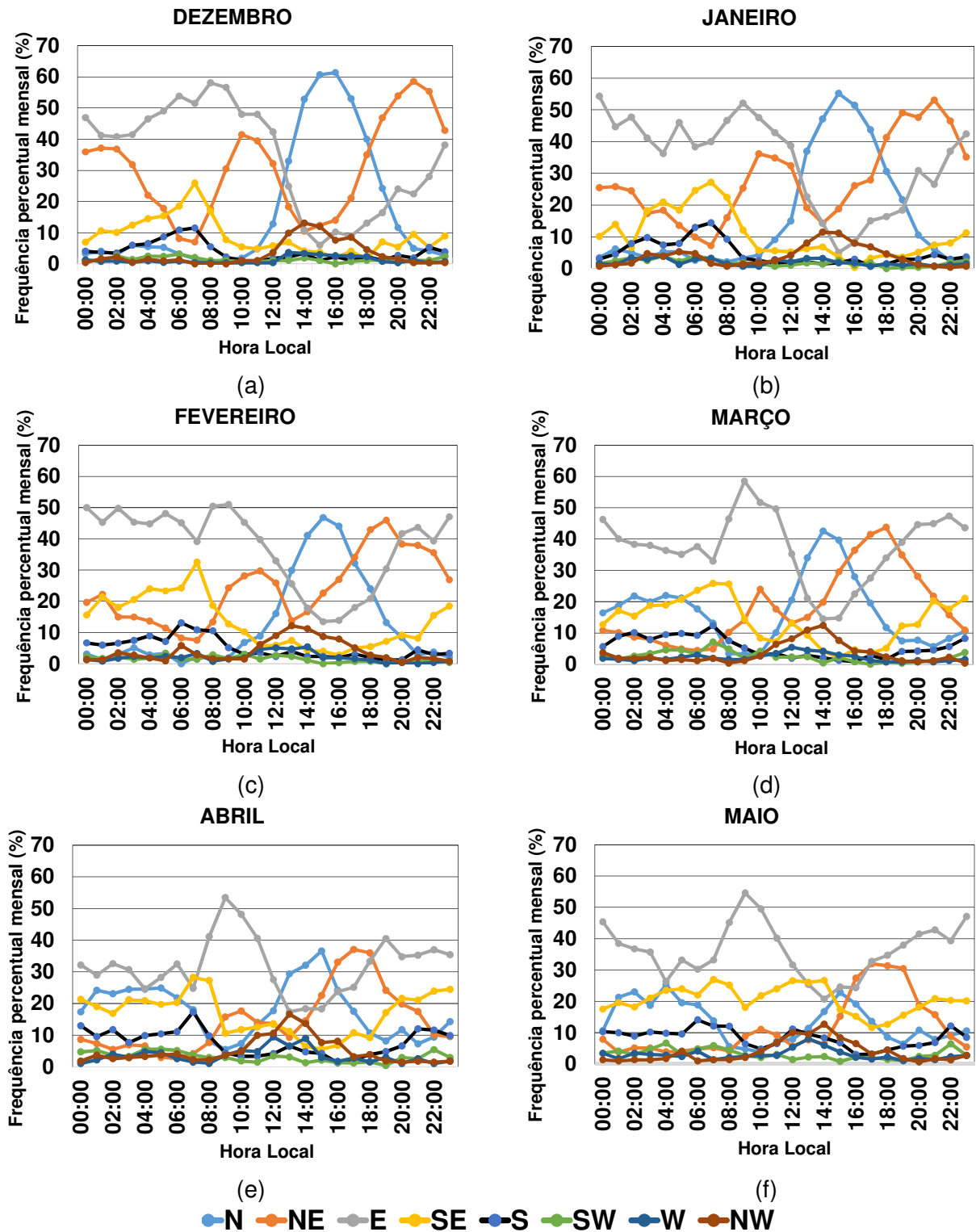


Figura 5.6 Frequência percentual horária de cada setor de direção do vento no Aeroporto Internacional de Belém durante os meses do período chuvoso de 2003 a 2012: (a) 2003, (b) janeiro, (c) fevereiro, (d) março, (e) abril e (f) maio.

A frequência percentual da direção nordeste apresentou dois máximos diurnos: o primeiro às 10:00 HL em todos os meses. Já o segundo apresentou diferença ao longo dos

meses. De dezembro a fevereiro (Figuras 5.6a-c) a maior frequência diurna dos ventos de nordeste ocorreu entre 19:00 HL e 21:00 HL e de março a maio se deram mais cedo, entre 17:00 HL e 18:00 HL. A diferença entre estes máximos diurnos vespertino/noturno podem estar associadas com a variação sazonal da circulação de brisa em função da proximidade do Oceano Atlântico. Kousky (1980) sugeriu que o horário da brisa marítima ocorre mais cedo quando o escoamento de grande escala é paralelo com o escoamento da circulação local, o qual ocorre quando a zona de confluência dos ventos alísios (ZCA) está sobre ou ao sul de Belém (março a maio). Caso contrário, quando a ZCA encontra-se a norte de Belém (dezembro a fevereiro) não há a contribuição do escoamento de grande escala na circulação local, retardando o período de transição das brisas, corroborando com os resultados encontrados em relação a maior frequência dos ventos de nordeste.

Os ventos da direção sudeste e de sul, apresentam frequências em média de 25% a 10%, respectivamente, e ocorreram mais vezes no período da noite e madrugada, certamente associados ao escoamento da brisa terrestre. As demais direções apresentam frequências muito pequenas, com percentuais menores que 5%.

O ciclo diurno da temperatura média do ar na superfície durante o período chuvoso apresentou uma amplitude de aproximadamente 6°C. O menor valor médio ocorreu às 06:00 hora local (HL), já a maior temperatura foi verificada às 12:00 HL, conforme pode ser visto na Figura 5.7. Estes horários corroboram com os horários peculiares de ocorrência de temperaturas máximas e mínimas (VIANELLO; ALVES, 2000).

A Figura 5.8 apresenta o ciclo diurno do número de vezes em que houve o registro de chuva no SBBE no período chuvoso. Há registro de chuvas em todos os horários, sendo que o maior número de ocorrência se deu no decorrer da tarde e período da noite. Os máximos valores foram registrados nos horários de 15:00 e 16:00 HL. Kousky (1980) e Ferreira et al. (2013) encontraram resultados semelhantes, analisando o acumulado médio de chuvas ao longo do dia para Belém, e este ciclo diurno é característico de áreas continentais, com precipitação originada pela convergência diurna na baixa troposfera e consequente formação de nuvens convectivas nos períodos da tarde e noite.

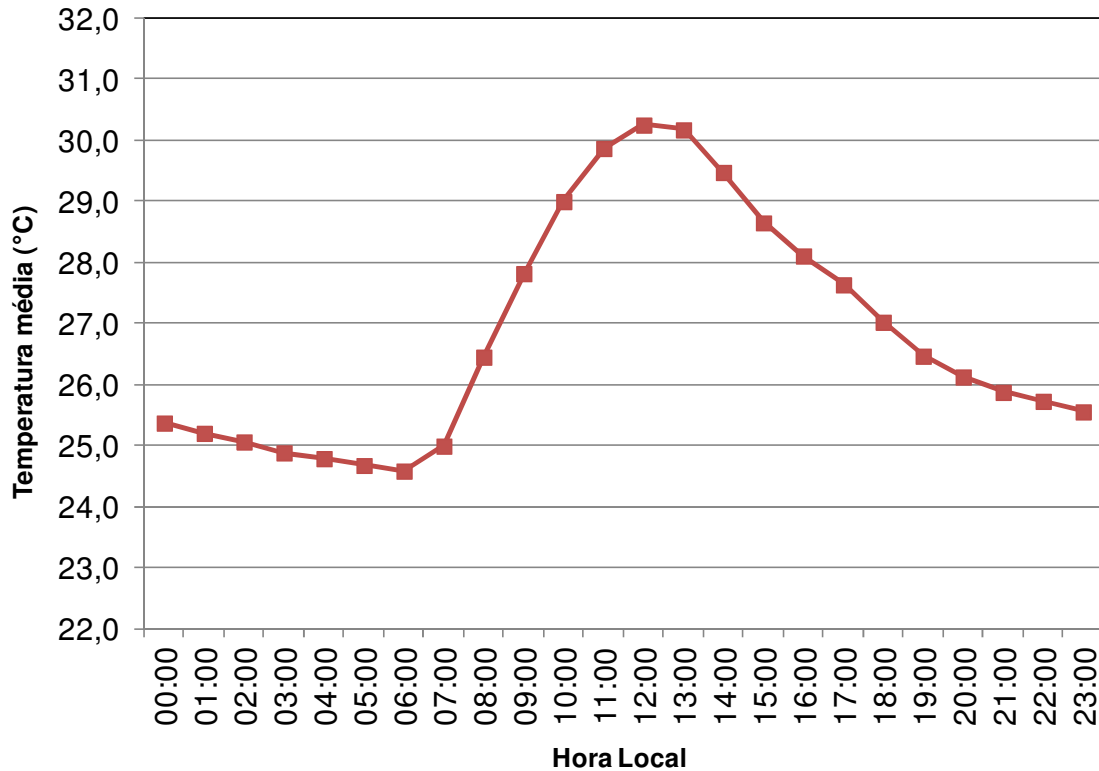


Figura 5.7 Ciclo diurno da temperatura média do ar na superfície no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) de 2003 a 2012.

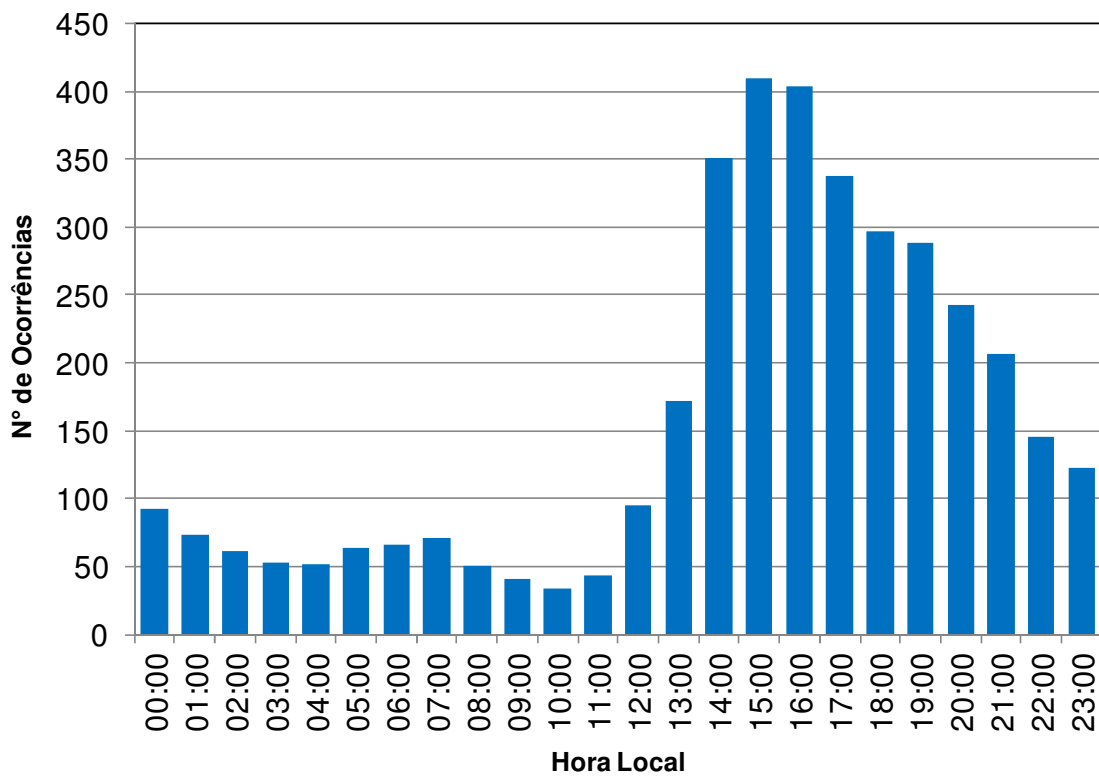


Figura 5.8 Ciclo diurno da ocorrência de chuva no Aeroporto Internacional de Belém durante o período chuvoso (dezembro a maio) de 2003 a 2012.

## 5.2 ANÁLISE FATORIAL

O conjunto inicial de dados utilizados na análise fatorial (AF) foi composto de variáveis médias de seis horas de 21 variáveis: DDN, DDNE, DDNW, DDE, DDW, DDS, DDSE, DDSW, DDZERO, Trovoada, r, UR, THETAE, Pressão, VelMed, VelMed, TempMed, TempMax, TetoMed, VisMed e ROL.

Estes dados foram cuidadosamente avaliados e selecionados com o auxílio dos indicadores estatísticos, objetivando tornar o conjunto de dados adequados para a aplicação da AF. O conjunto final dos dados foi composto por 9 variáveis que são: DDN, UR, r, VelMed, VelMax, ROL, THETAE, TempMax, TempMed, TetoMed e Trovoada. A maior parte das variáveis selecionadas apresentaram coeficientes na matriz de correlação maiores (em módulo) que 0,3 (Tabela 5.2), como recomendado por Hair Júnior et al. (2006).

Tabela 5.2 Matriz de correlação do conjunto de variáveis selecionadas para a aplicação da análise fatorial.

	r	UR	THETAE	VelMax	TempMax	TempMed	DDN	ROL	Trovoada
r	1,0								
UR	0,3	1,0							
THETAE	0,9	-0,2	1,0						
VelMax	0,1	-0,3	0,2	1,0					
TempMax	0,3	-0,8	0,7	0,5	1,0				
TempMed	0,3	-0,8	0,7	0,4	0,9	1,0			
DDN	0,2	-0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	1,0		
ROL	-0,1	0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	1,0	
Trovoada	0,1	0,1	0,9	0,4	0,1	0,1	0,2	-0,3	1,0

A Tabela 5.3 mostra que as comunalidades apresentaram em sua grande maioria, valores acima do mínimo aceitável, que é de 0,5 (SCHAWB, 2007), exceto DDN, que teve comunalidade igual a 0,4, ou seja, abaixo do valor crítico. No entanto, optou-se por manter DDN no conjunto de variáveis utilizadas na AF, pois foi a direção do vento que apresentou os maiores valores de correlação com os fatores obtidos, quando comparados às demais direções do vento analisadas.

O teste de significância de Bartlett obtido foi inferior a 0,05 validando o uso do conjunto de dados para a aplicação da AF em ACP (HAIR JUNIOR et al. 1995; CORRAR et al. 2007). Da mesma forma, a estatística KMO apresentou 0,71, valor que indica que o conjunto dos dados é satisfatório para a aplicação da AF.

Tabela 5.3 Valores das comunalidades das variáveis selecionados para a aplicação da análise fatorial.

<b>Variável</b>	<b>Comunalidades</b>
r	1,0
UR	1,0
THETAEB	1,0
VelMax	0,6
TempMax	0,9
TempMed	1,0
DDN	0,4
ROL	0,5
Trovoada	0,6

A aplicação da AF no conjunto de dados do SBBE mostrou que a maior parte da variação total dos dados foi explicada através dos três primeiros fatores, os quais juntos representaram 77,6% desta variação total, tanto no modo sem rotação quanto no modo com rotação, conforme mostra a Tabela 5.4. Optou-se utilizar o modo com rotação, pois este modo obtém a maior concentração dos dados originais da série temporal dos fatores pela máxima variância (CORRAR et. al, 2007).

O primeiro fator rotacionado (F1) foi responsável por 32,1% da variabilidade dos dados e agrega as variáveis UR, TempMax, TempMed. Como esperado, observa-se a relação inversa entre a temperatura e a UR, com altas cargas fatoriais de sinais diferentes. As variáveis agrupadas em F1 representam processos de aquecimento e resfriamento do ar e sua dependência relativa com a variação da umidade na superfície (Tabela 5.5).

O segundo fator rotacionado (F2) explicou 24% da variabilidade dos dados (Tabela 5.4) e agrega as variáveis r e THETAEB (Tabela 5.5), ratificando a forte dependência positiva entre estas variáveis. O F2 possui forte correlação positiva com a presença do teor de umidade próximo à superfície, relação que também foi observada por Machado et al. (2002), Lima (2001), Silva et al. (2008) e Queiroz et al. (2014). O aumento do THETAEB em superfície ocorre devido ao acréscimo no teor de umidade, que por sua vez é influenciado pelo aumento da temperatura do ar nos baixos níveis da atmosfera. A THETAEB na superfície é fortemente correlacionada a CAPE (MACHADO; LAURENT, 2000), porém os elevados valores de THETAEB na superfície ou de CAPE, embora seja condição necessária, não é suficiente para indicar a presença de convecção profunda, pois esta depende também da estabilidade atmosférica nos médios e altos níveis.

As variáveis agrupadas no terceiro fator (F3) são ROL, DDN, Trovoada e VelMax (Tabela 5.5). O F3 explica 21,6% da variabilidade dos dados no modo com rotação (Tabela 5.3). Este fator tem correlação negativa com ROL, sendo que maiores valores de ROL



representam a ausência de nuvens e menores valores de ROL estão associados a maior quantidade de nuvens, particularmente as que possuem grande desenvolvimento vertical.

Tabela 5.4 Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Explicada para o período chuvoso entre janeiro de 2003 a dezembro de 2012.

FATOR	SEM ROTAÇÃO			COM ROTAÇÃO		
	V.P.	V. E. (%)	V.E.A. (%)	V.P.	V. E. (%)	V.E.A. (%)
1	3,9	42,8	42,8	2,9	32,1	32,1
2	1,7	19,0	61,9	2,2	23,9	56,0
3	1,4	15,8	77,6	1,9	21,6	77,6

\* V.P – Valor Próprio

V.E. – Variância explicada

V.E.A. – Variância explicada Acumulada

Tabela 5.5 Carga fatorial rotacionada referente aos três fatores obtidos na Análise Fatorial aplicada aos dados meteorológicos do Aeroporto Internacional de Belém, durante o período chuvoso de 2003 a 2012.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3
r	-0,06	<b>0,99</b>	0,09
UR	<b>-0,95</b>	0,23	-0,11
THETA E	0,37	<b>0,91</b>	0,15
VelMax	0,34	-0,02	<b>0,68</b>
TempMax	<b>0,87</b>	0,33	0,25
TempMed	<b>0,91</b>	0,37	0,14
DDN	0,30	0,15	<b>0,54</b>
ROL	-0,15	-0,10	<b>-0,68</b>
Trovoada	-0,17	0,06	<b>0,78</b>

Por outro lado, o F3 apresentou correlação positiva com a maior frequência de ventos da direção norte. Os ventos de norte em Belém estão associados ao efeito de brisa marítima, devido à presença do Oceano Atlântico e dos rios que banham a capital paraense (SOUZA JÚNIOR et al., 2006; SANTOS et al., 2012). VelMAX e Trovoada também apresentaram correlação positiva com F3. Vários estudos identificaram o aumento da velocidade do vento, associado à presença de rajadas próximo da superfície, quando há a atuação de sistemas convectivos (COHEN, 1989, BARBOSA et al., 2006; ALCÂNTARA et al., 2011). Já a maior frequência de trovoada está diretamente relacionada com a presença de nuvens CB no local de estudo. Assim, levando em consideração as variáveis que

agregam F3, notou-se que o mesmo esteve relacionado com presença de convecção profunda, que promovem tempestades sobre o SBBE.

Os escores temporais permitem observar o período em que o fator encontrado, através da análise fatorial, foi representativo. Quanto maior for o módulo do escore temporal mais representativo é o fator, e se o sinal do escore temporal for negativo inverte-se completamente o sinal dos padrões identificados por este fator.

A Figura 5.9a mostra os escores temporais representativos do F1. Foi observado que há uma grande variação entre os valores positivos e negativos ao longo do período analisado, porém os resultados indicam que a partir do período chuvoso de 2007 a contribuição positiva de F1 foi mais evidente, em relação aos períodos chuvosos de 2003 até 2006. Para identificar os turnos do dia que F1 apresentou o modo dominante os escores temporais foram separados por períodos de seis horas, de acordo com a resolução temporal dos dados de entrada para a aplicação da AF, ou seja, de 21:00 HL a 03:00 HL, 03:00 HL a 09:00 HL, 09:00 HL a 15:00 HL e 15:00 HL a 21:00 HL (Figuras 5.9b-e).

Os escores negativos de F1 predominaram entre 21:00 HL e 03:00 HL (Figura 5.9b) e entre 03:00 HL e 09:00 HL (Figura 5.9c), períodos que coincidem com o turno do resfriamento da superfície. Tendo em vista que, a UR é definida pela razão entre a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar no ponto de saturação, sob a mesma temperatura e que na Amazônia os gradientes de temperatura no espaço são muito pequenos, o aumento da UR está associado ao incremento de ar úmido no período da noite em função do estabelecimento da camada limite noturna (CLN). Vale resaltar que, na CLN a intensidade do vento é fraca ou nula, o que favorece o aprisionamento da umidade em baixos níveis, e por sua vez, causa o acúmulo de ar úmido, elevando a UR, alcançando por vezes, à condição de saturação (STULL, 1988; LYRA et al., 1994; ROCHA et al., 2002).

Por outro lado, a maior frequência de F1 positivo foi durante o período diurno, de 09:00 HL a 15:00 HL (Figura 5.9d), corroborando com os horários que geralmente a temperatura está em elevação, devido ao maior aquecimento da superfície (ver na Figura 5.7), relacionada com o estabelecimento da camada limite convectiva (CLC). Além de ser uma camada mais aquecida, a CLC apresenta maior velocidade do vento em relação à CLN, o que favorece a redução da UR (STULL, 1988; GARSTANG; FITZJARRALD, 1999).

Já entre 15:00 HL e 21:00 HL os escores temporais estiveram bastantes variáveis entre valores positivos e negativos (Figura 5.9e), pois esse período representa a transição entre o aquecimento e o resfriamento da superfície (ver a Figura 5.7). Além disso, este período do dia é característico da ocorrência do máximo diurno de chuva (KOUSKY, 1980), conforme foi visto na Figura 5.8. Quando ocorre chuva há a diminuição da temperatura do ar próximo à superfície (resfriamento) em resposta à intrusão de ar com baixa temperatura potencial equivalente na camada limite (MOTA; NOBRE, 2006).

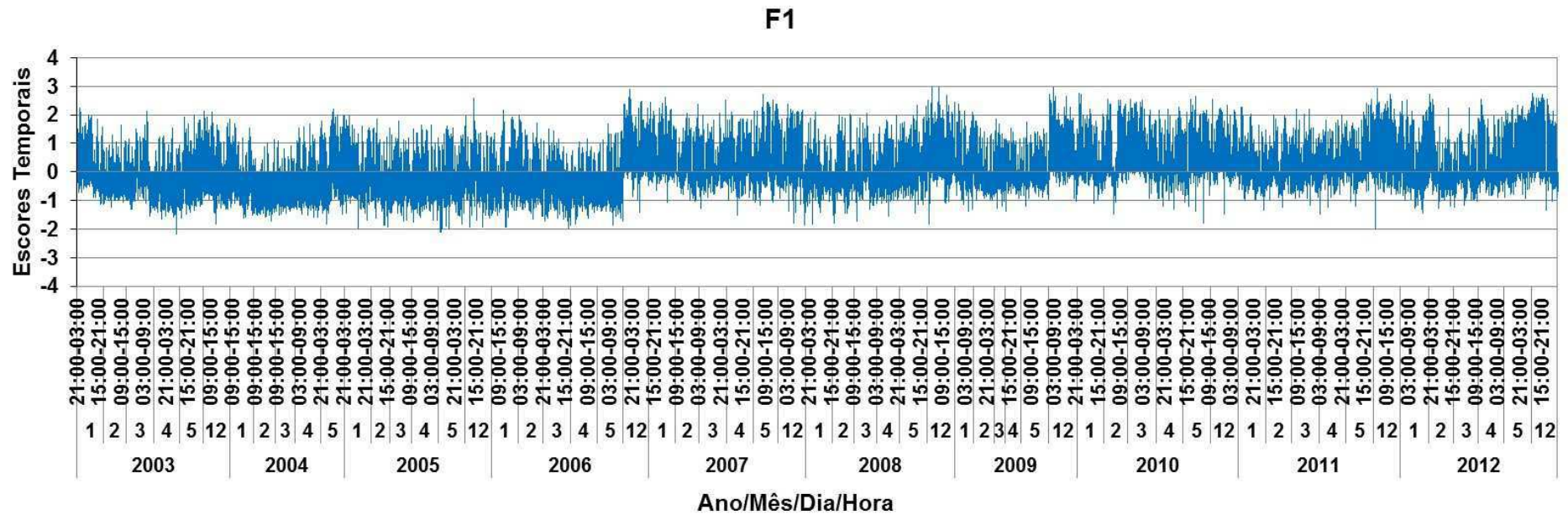
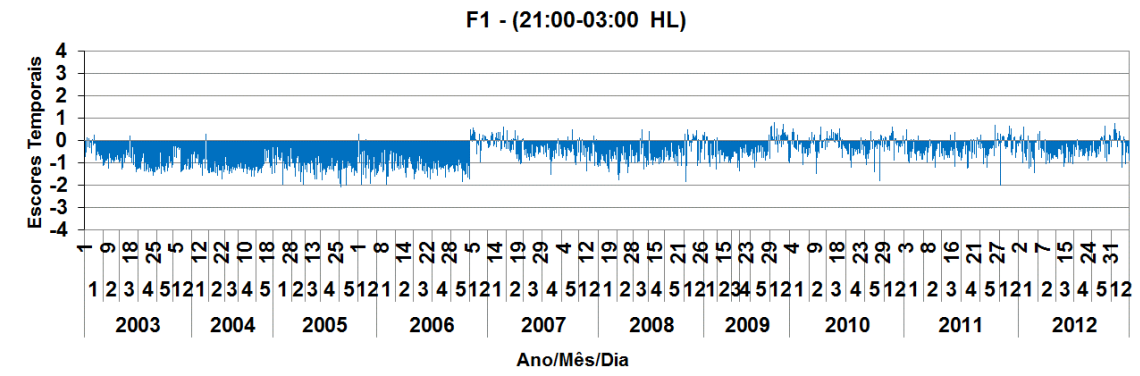
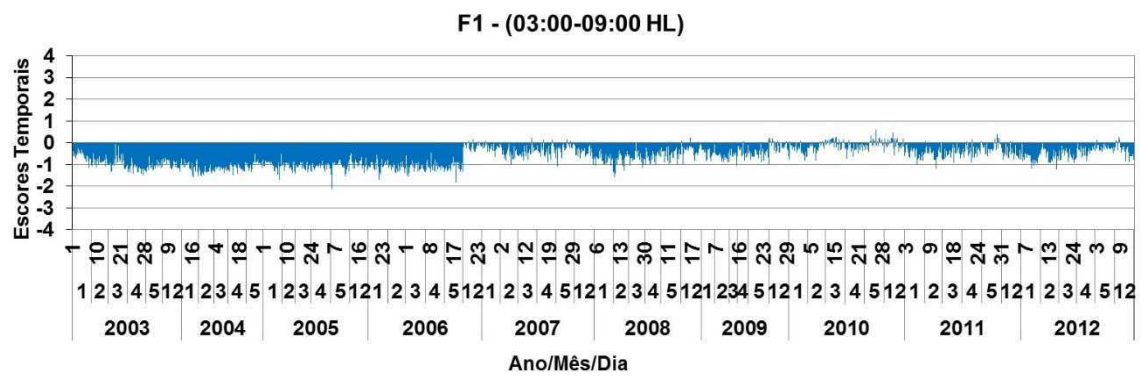


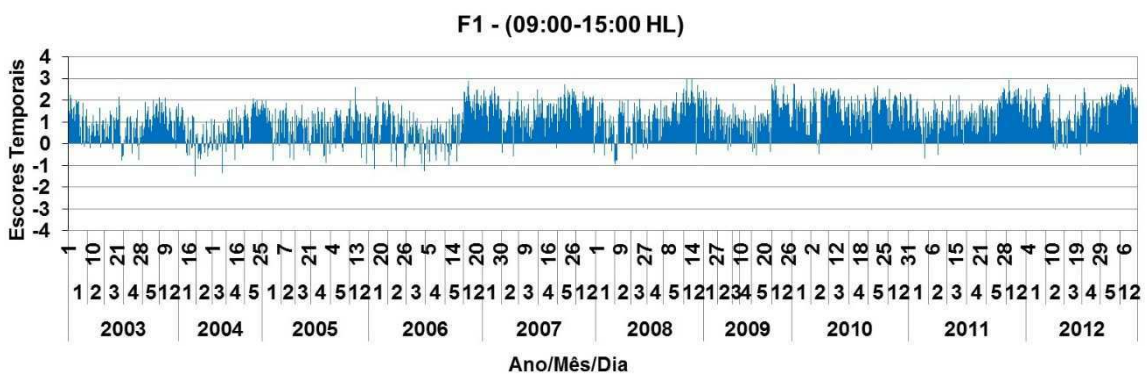
Figura 5.9 Série temporal dos escores que representam o primeiro fator rotacionado (F1) no período de 2003 73a 2012 no Aeroporto Internacional de Belém em: (a) todos os horários; e nos intervalos de (b) 21:00 às 03:00 hora local (HL); (c) 03:00 às 09:00HL; (d) 09:00 às 15:00HL e (e) 15:00 a às 21:00HL. (continua)



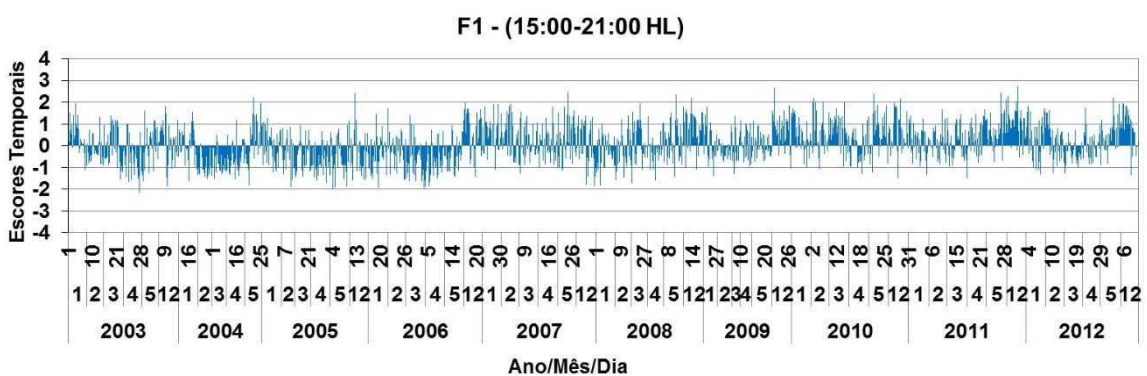
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.9. Continuação.

Os escores temporais de F2 (Figura 5.10a) apresentam predomínio de sinal em períodos específicos. Em períodos que a combinação das anomalias oceânicas gerou um cenário favorável à convecção sobre Belém, os escores negativos associados ao F2 foram dominantes. Estes períodos foram: começo de 2003 e estação chuvosa de 2008 a 2011. No começo de 2003 o Pacífico Tropical e o Atlântico Norte apresentavam anomalias negativas de TSM, enquanto o Atlântico Sul apresentava TSM acima da média. Na maior parte dos períodos chuvosos de 2008 a 2011 o Pacífico apresentou anomalias negativas de TSM, enquanto o Atlântico Tropical Norte e Sul apresentava TSM ligeiramente acima da média (NCEP, 2014).

Durante o cenário favorável a convecção sobre a Amazônia Oriental, o ramo ascendente da circulação de Walker se intensifica sobre a região. Simultaneamente, o dipolo negativo no Atlântico favorece o deslocamento da ZCIT para o sul da sua posição climatológica, implicando também no fortalecimento do movimento ascendente na Amazônia Oriental (SOUZA et al., 2004). No entanto, em regiões propícias à ocorrência de convecção profunda, a precipitação e as correntes descendentes (*downdrafts*) diminuem a temperatura potencial equivalente na camada limite (GRABOWSKI; MONCRIEFF, 2004). Além disso, o fortalecimento da convecção profunda também impulsiona o ar mais frio e seco dos altos níveis para os baixos níveis, através das correntes descendentes de ar. Este efeito influencia a termodinâmica da atmosfera local, promovendo também a redução de THETA<sub>e</sub> e  $r$  (BETTS; SILVA DIAS, 1979; BETTS et al., 2002).

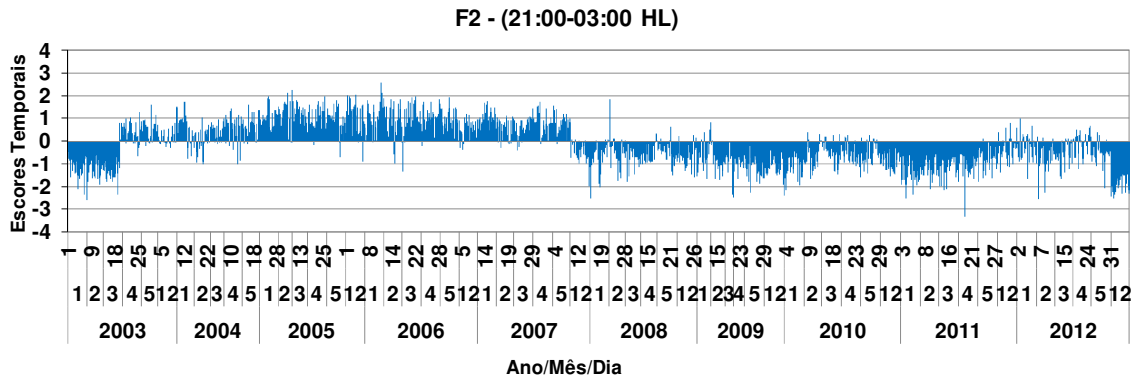
Por outro lado, em períodos que a combinação das anomalias oceânicas gerou o cenário climático desfavorável à convecção sobre Belém, prevaleceram os escores de F2 positivo e estes períodos foram: entre o final do período chuvoso de 2003 e o período chuvoso de 2007, além dos períodos chuvosos de 2010 e 2012 (Figura 5.10a). Entre o final do período chuvoso de 2003 e o período chuvoso de 2007 houve a persistência de TSMs acima da média no Pacífico Tropical e Atlântico Norte, enquanto o Atlântico Sul apresentava neutralidade em relação às anomalias de TSM. No período chuvoso de 2010 o Pacífico Tropical, Atlântico Norte e Sul apresentaram anomalia positiva de TSM. No período chuvoso de 2012 as águas superficiais do Pacífico Tropical e Atlântico Norte estavam ligeiramente acima da média, enquanto o Atlântico Sul apresentava anomalias negativas de TSM.

As alterações na circulação atmosférica no cenário desfavorável a convecção na região Amazônica (incluindo a capital paraense) resultam no deslocamento do ramo subsidente da célula de Walker para a região e na manutenção da ZCIT ao norte da sua posição climatológica, dificultando os movimentos ascendentes sobre a região (RONCHAIL et al., 2002; SOUZA et al., 2004). A presença do movimento subsidente

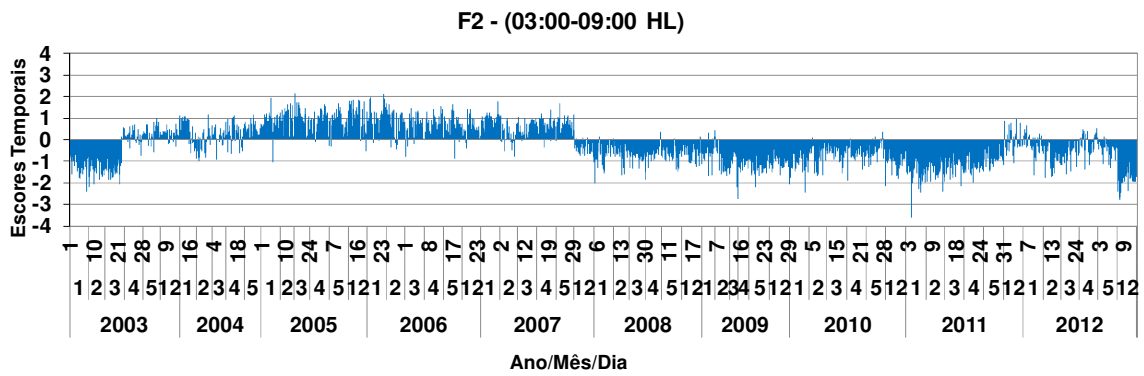
sobre a área de estudo mantém a umidade local aprisionada nos baixos níveis da atmosfera, haja vista que a Amazônia apresenta alto teor de umidade na superfície em função da presença da floresta e dos grandes rios que cortam a região. Além disso, a convecção pode não permanecer inibida numa área dominada por correntes descendentes em grande escala, pois para manter a circulação em grande escala, a perturbação da temperatura potencial virtual (THETA<sub>V</sub>) da troposfera livre (na área com subsidência de grande escala) deve ser negativa, isso implica em uma taxa de variação positiva da CAPE na região com convecção inibida. Vale ressaltar que, a diferença de 1 K de THETA<sub>V</sub> ao longo da troposfera, resulta em uma mudança da CAPE de algumas centenas de J.kg<sup>-1</sup> (GRABOWSKI; MONCRIEFF, 2004). Por sua vez, o aumento da CAPE está relacionada com o aumento de THETA<sub>E</sub> em superfície (MACHADO; LAURENT, 2000), por isso, os escores positivos de F2 foram predominantes durante estas condições.

A variação temporal dos escores de F2 nos turnos de seis horas é representada nas Figuras 5.10b-e. Ao longo dos turnos não foram observadas variação no sinal dos escores, como foi verificado na distribuição dos escores temporais de F1. Em outras palavras, em todos os turnos analisados, o sinal dos escores foram os mesmos durante os períodos chuvosos dos anos que apresentaram predomínio de sinais positivos ou negativos. Foi notado apenas uma pequena diferença no módulo dos escores de F2, com maiores valores dos escores, quando estes foram positivos (negativos), durante o diurno e vespertino (noite e madrugada). Isto ocorreu porque neste mesmo período do dia, em média, são observados os maiores (menores) valores de THETA<sub>E</sub> (BETTS et al.,2002). Apesar disso, notou-se que o padrão atmosférico associado ao F2 é de uma maior escala temporal em relação a F1, indicando assim a pouca dependência do F2 com as variações diurnas.

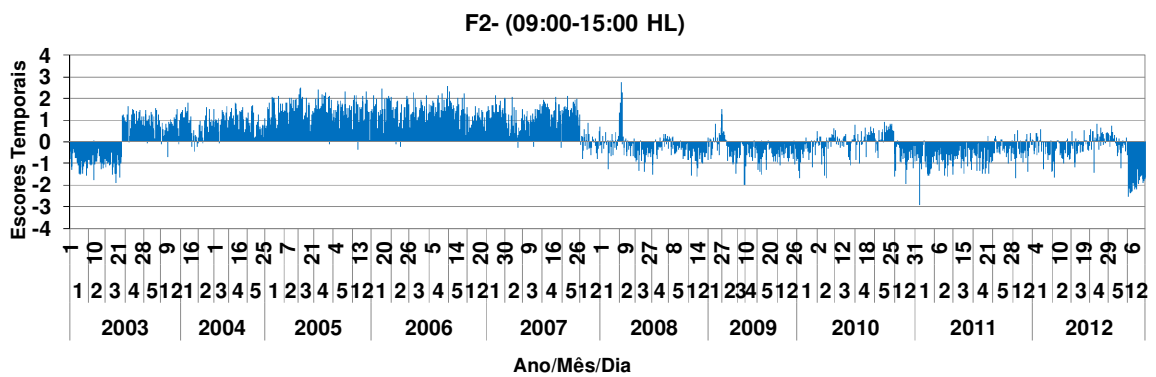




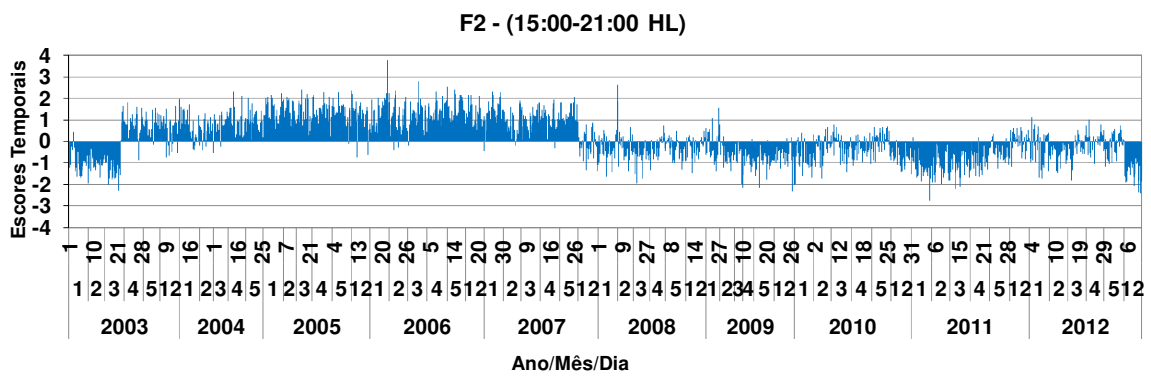
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.10. Continuação.

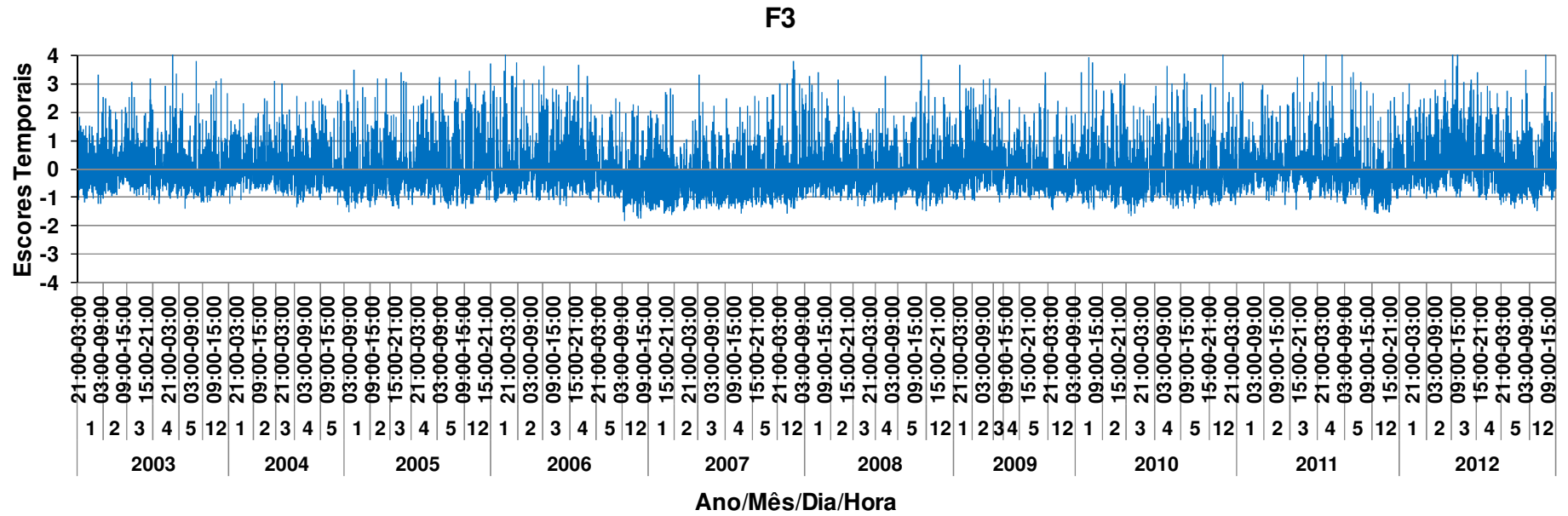


Os escores associados ao F3 apresenta variação com valores positivos e negativos durante todo o período analisado, no entanto em módulo, os escores positivos apresentam elevados valores em relação aos escores negativos de F3 e em relação aos escores de F1 e F2. Isso mostra a forte influência deste fator no decorrer do período analisado (Figura 5.11a). As Figuras 5.11b-e mostra, separadamente, a distribuição temporal dos escores de F3 em turnos de seis horas. É possível visualizar que no período noturno e madrugada (21:00 HL -03:00 HL e 03:00 HL -09:00 HL) os escores negativos são maioria (Figuras 5.11b-c). No período de transição entre a manhã e tarde (09:00 HL -15:00HL) há alternância entre os valores positivos e negativos, ainda assim, os escores positivos apresentam elevados valores em módulo (maiores ou igual a 2) quando comparados aos escores negativos (Figura 5.11d).

Entre 15:00 HL e 21:00HL (Figura 5.11e) os escores positivos são predominantes e apresentam valores elevados, ressaltando a forte representatividade de F3 neste turno. Como visto na Figura 5.8 e corroborando com os resultados de Kousky (1980) e Ferreira et al. (2013), neste período ocorre o máximo diurno de chuva em Belém, a qual está relacionada com a máxima atividade convectiva (MACHADO et al., 2004). Na Tabela 5.5 observam-se as cargas fatoriais para as variáveis selecionadas, sendo que o F3 representa 15,8% da variância total em relação aos dados brutos e engloba as variáveis DDN, ROL, VelMax e trovoadas. A relação negativa F3 com ROL e positiva com a maior frequência de trovoadas e Velmax estão de acordo com a intensa atividade convectiva do período (KOUSKY, 1988).

Este fator, interpretado simultaneamente com a evolução dos escores, com pesos predominantemente positivos e acima de 0,5 no período diurno, indica a influência da brisa marítima, uma vez que DDN também teve correlação positiva com o F3. Como já foi visto na frequência horária da direção dos ventos durante o período chuvoso (Figura 5.5), pela manhã o vento de leste foi mais frequente, já no começo da tarde a maior frequência da direção do vento foi de norte. Esta variação corrobora com o período de mudança da circulação local, com a entrada da brisa marítima sobre Belém à tarde (SOUZA JÚNIOR et al., 2006; SANTOS et al., 2012), devido a presença dos rios que banham Belém e da proximidade do Oceano Atlântico. Estes resultados sugerem que a entrada dos ventos de norte é determinante para o desenvolvimento da convecção profunda sobre o SBBE.

Portanto, as variáveis que estão agrupadas em F3, assim como a distribuição dos escores temporais indicam que este fator está associado com a presença de convecção profunda promovida pela influência das circulações locais que está submetida a área em que se localiza o aeroporto de Belém.



(a)

Figura 5.11 Série temporal dos escores que representam o terceiro fator rotacionado (F3) no período de 2003 a 2012 no Aeroporto Internacional de Belém em: (a) todos os horários; e nos intervalos de (b) 21:00 às 03:00 hora local (HL); (c) 03:00 às 09:00HL; (d) 09:00 às 15:00HL e (e) 15:00 a às 21:00HL. (continua)

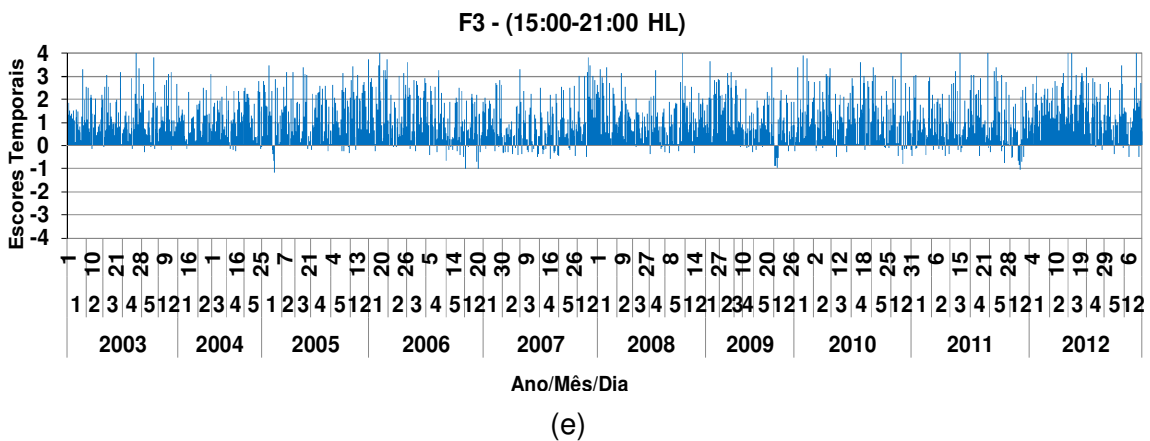
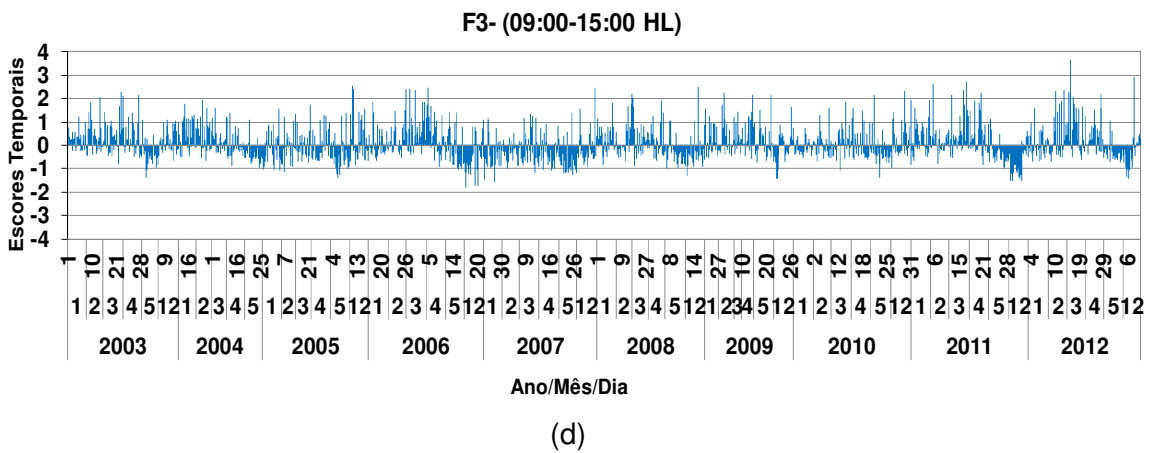
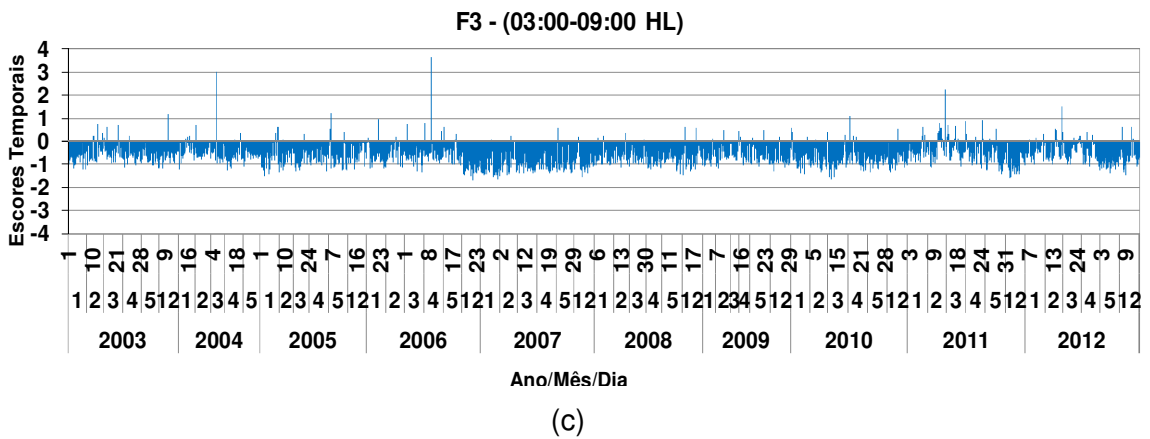
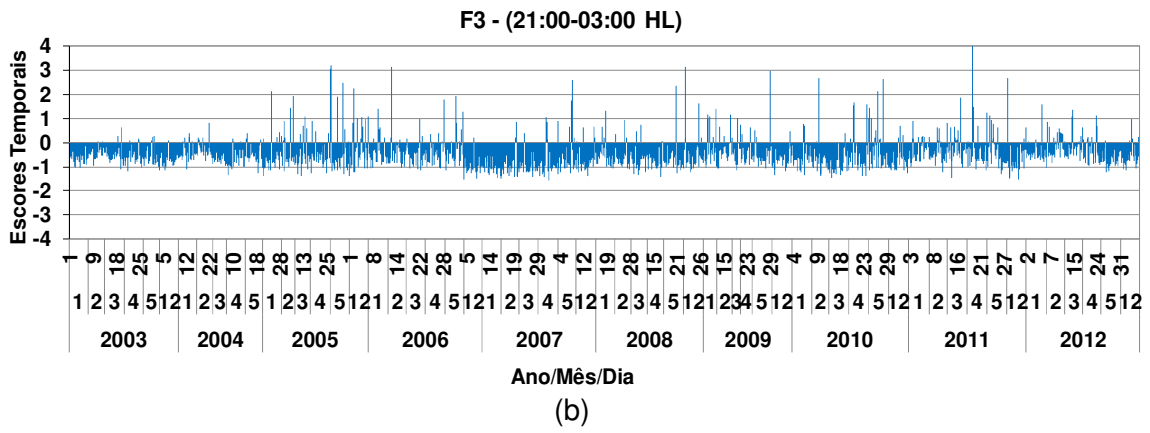


Figura 5.11. Continuação.

### 5.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para validar os resultados obtidos na AF e identificar os padrões que estão associados com o estabelecimento das condições de tempo adversas no SBBE foram feitos histogramas das variáveis meteorológicas indicadoras da presença dos fenômenos de tempo que limitam as operações de pousos e decolagens no SBBE durante o período que cada padrão atmosférico foi representativo. Vale ressaltar que o período representativo de cada fator foi identificado através dos maiores valores de seus escores temporais.

Além disso, neste tópico serão apresentados também estudos de casos, selecionados através dos maiores escores temporais dos fatores que estiveram a maior frequência de ocorrência das condições de tempo adverso no SBBE.

#### 5.3.1 Histograma de frequência

Através dos resultados obtidos com a AF, optou-se selecionar os períodos que apresentaram 10% dos maiores valores dos escores temporais representativo de cada fator (**10%E**). Foi utilizado este critério, porque em alguns casos o escore apresentou um elevado valor associado a mais de um fator, porém sempre um deles era maior. Então, para que não houvesse equívocos na escolha dos períodos, foi escolhida esta amostra dos escores, para quantificar a ocorrência das variáveis que indicaram a presença da condição de tempo significativo no SBBE, nos períodos que de fato o fator foi dominante. Dentro deste período foram feitos histogramas da frequência em seis horas dos registros das variáveis meteorológicas, que representam o estabelecimento das condições de tempo adverso no SBBE. A Tabela 5.6 apresenta o valor absoluto do número de escores de **10%E** utilizados nesta análise.

Tabela 5.6 Valor absoluto dos casos que totalizaram 10% dos maiores valores dos escores temporais (**10%E**), associados aos três fatores obtidos através da análise fatorial.

FATOR	N° CASOS DE 10%E
1	130
2	129
3	102

As variáveis que indicaram a presença da condição de tempo significativo e que poderiam limitar as operações de pousos e decolagens no aeroporto foram definidas levando em consideração principalmente a redução de teto e/ou visibilidade no aeródromo, de acordo com Brasil (2008). As variáveis analisadas foram:  $Vis \leq 5000m$ ,  $teto \leq 450m$ , R06, nevoeiro, névoa úmida, chuva leve, chuva moderada e chuva forte.

As Figuras 5.12a-h mostram a frequência em seis horas das variáveis que representam o estabelecimento de condições de tempo adverso durante o período chuvoso de 2003 a 2012 nos períodos que **10%E** para o F1. Praticamente não houve registro de  $Vis \leq 5000m$  (Figura 5.12a),  $teto \leq 450m$  (Figura 5.12b), R06 (Figura 5.12c), nevoeiro (Figura 5.12d), névoa úmida (Figura 5.12e), chuva leve (Figura 5.12f), chuva moderada (Figura 5.12g) e chuva forte (Figura 5.12h), confirmando que o padrão atmosférico de F1, não teve relação com condições de tempo adversas no SBBE.

Estes resultados corroboraram com aqueles apresentados por Hassen e Bolic (2001), que analisaram através da AF a relação das variáveis meteorológicas com as atividades aeroportuárias no LAX, cujo primeiro fator obtido também esteve associado a aquecimento da superfície. Os autores encontraram relação positiva de F1 com boa condição meteorológica para as operações aeronáuticas (tempo aberto e ensolarado), que por sua vez, estiveram diretamente proporcionais a redução de atrasos dos pousos e decolagens de aeronaves no aeroporto.

A Figura 5.13 apresenta a frequência em seis horas das variáveis que representam o estabelecimento de condições de tempo adverso durante o período chuvoso de 2003 a 2012 nos períodos que **10%E** para o F2. Nos períodos que F2 foi dominante, ocorreram alguns poucos registros em seis horas de  $teto \leq 450m$  (Figura 5.13a),  $Vis \leq 5000m$  (Figura 5.13b) e chuva leve (Figura 5.13f), mesmo assim, os totais não superaram o número de vezes que estas mesmas variáveis apresentaram zero ocorrência. O F2 está altamente correlacionado com o elevado teor de umidade presente no ar e responde aos efeitos das anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico. Os períodos de **10%E** de F2 coincidiram com os períodos que os movimentos descendentes predominavam em grande escala, condições que são desfavoráveis para o desenvolvimento vertical das nuvens, resultando na formação de nuvens estratiformes, que em geral, promovem chuva de leve intensidade (ATLAS INTERNACIONAL DE NUVENS, 1972).

### FREQUENCIA 10% DOS MAIORES ESCORES DO 1º FATOR (F1)

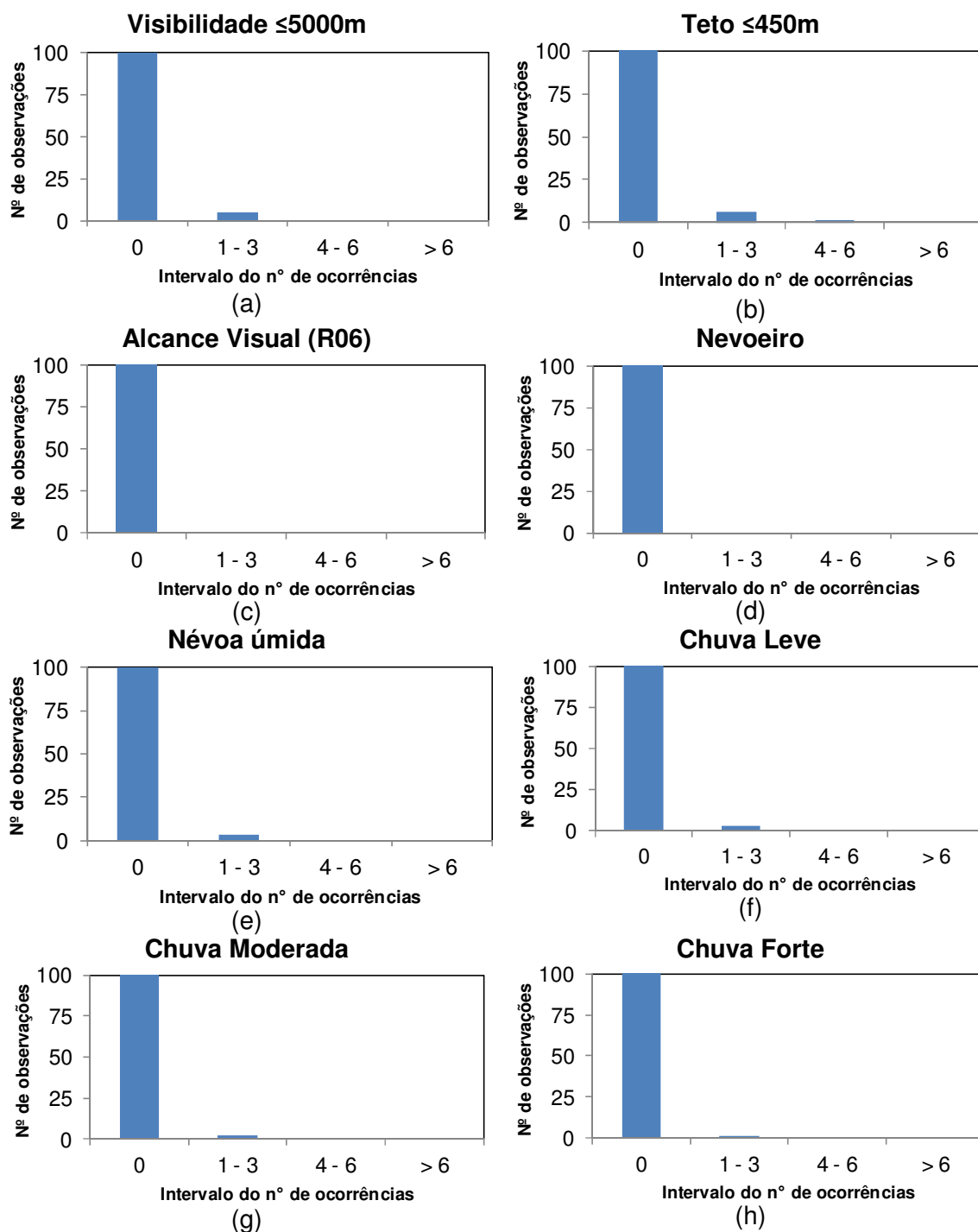


Figura 5.12 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao primeiro fator (F1).

### FREQUENCIA 10% DOS MAIORES ESCORES DO 2º FATOR (F2)

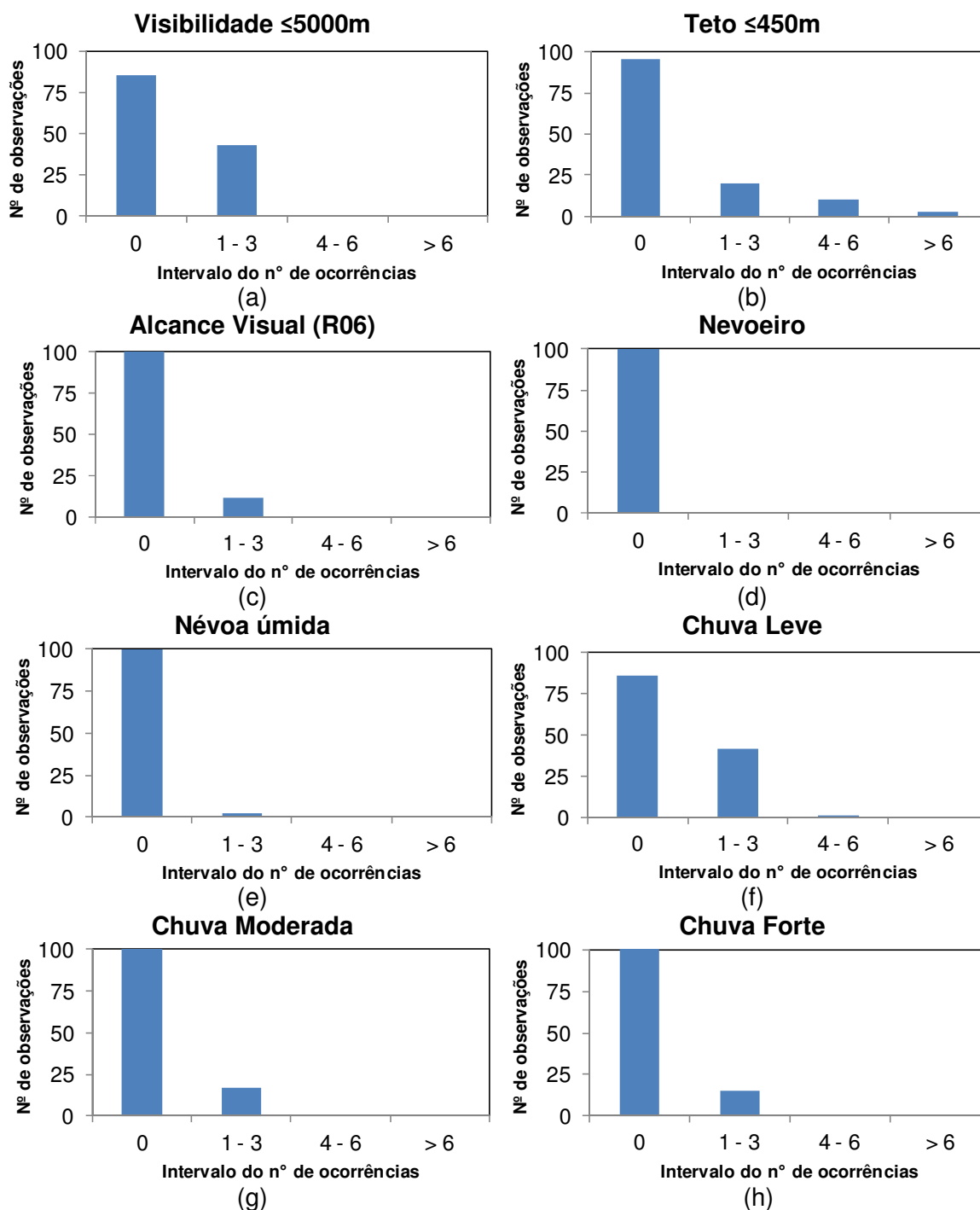


Figura 5.13 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao segundo fator (F2).

Os períodos que os **10%E** apresentaram efetivamente a maior frequência do registro de variáveis associadas a condições de tempo significativo no SBBE foram os quais estavam associados ao padrão atmosférico de F3 (Figura 5.14). A exceção foi a ocorrência de nevoeiro (Figura 5.14d), névoa úmida (Figura 5.14e) e chuva moderada (Figura 5.14g), que teve pouco ou nenhum registro, haja vista que estes fenômenos não apresentam relação com os processos convectivos e a sua ocorrência pode estar associada aos demais fatores, que apresentaram uma pequena contribuição na variância total dos dados analisados pela AF. Por outro lado, as demais variáveis meteorológicas associadas ao estabelecimento das condições meteorológicas adversas foram bastante frequentes.

Vale ressaltar que, a ocorrência de restrição de visibilidade na pista principal (R06) ocorreu muito mais vezes nos casos de **10%E** de F3 (Figura 5.14c), em relação aos períodos que os demais fatores foram representativos. Os limites operacionais de teto e visibilidade, que determinam a ocorrência de operação IFR, foram mais vezes ultrapassadas nos períodos que os escores de F3 apresentaram maiores valores (Figura 5.14a-b).

Portanto, foi evidente que as condições de tempo significativo promotoras das limitações nas operações de pousos e decolagens no SBBE estiveram ligadas aos mecanismos de convecção profunda, os quais estão por trás do padrão revelado pelo F3. Estudos prévios realizados em aeroportos dos Estados Unidos e da Europa também apontaram que a presença de nuvens convectivas foi responsável por limitações operacionais, sendo representados pelo aumento dos atrasos de pousos e decolagens de aeronaves (ALLAN; GADDY, 2000; EVANS et al., 1999; SASSE; HAUF, 2003). Em outras palavras, F3 foi o padrão atmosférico que representou a presença de condições de tempo adverso em Belém. Este resultado corroborou com os estudos feitos por Hassen e Bolic (2011), que dentre os 9 padrões atmosféricos encontrados através da aplicação da AF nos dados meteorológicos do aeroporto de LAX, também identificou fatores associados a condições de tempo adverso somente a partir do quinto fator (HASSEN; BOLIC, 2001)

Em suma, durante os períodos representativos dos fatores encontrados através da AF, as condições de tempo significativo no SBBE foram mais bem rastreadas pelo padrão atmosférico associado ao terceiro fator, o qual representa a ocorrência de convecção profunda, aliado às circulações de mesoescala sobre o no SBBE.



### FREQUENCIA 10% DOS MAIORES ESCORES DO 3° FATOR (F3)

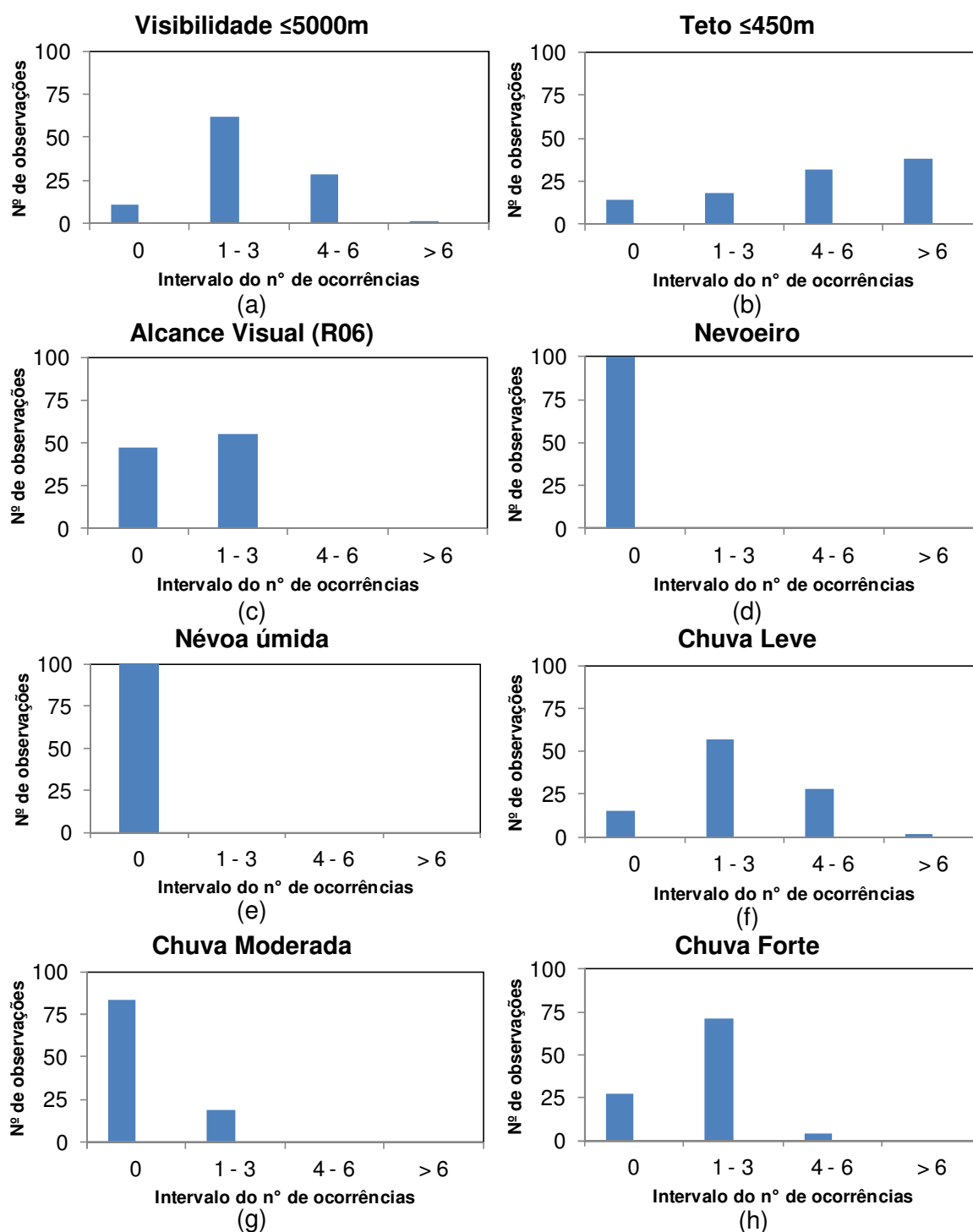


Figura 5.14 Histograma de frequência do número de ocorrência em seis horas de (a) Visibilidade menor ou igual a 5000m, (b) Teto menor ou igual a 450m, Alcance visual da pista com visibilidade abaixo de 2000m (R06), (d) Nevoeiro, (e) Névoa úmida, (f) Chuva leve, (g) Chuva moderada e (h) Chuva forte, durante os casos dos 10% maiores valores dos escores associados ao terceiro fator (F3).

### 5.3.2 Estudos de casos

Para dar continuidade a validação dos resultados estatísticos foram selecionados quatro estudos de casos, nos períodos que foram verificadas condições adversas de tempo sobre o SBBE. O critério de escolha dos estudos de casos foi baseado nos períodos que a série de METAR e SPECI (de janeiro de 2003 a dezembro de 2012) apresentou restrição de teto e visibilidade, limitando o aeródromo a operar IFR. Além disso, para ratificar a influência dos padrões atmosféricos obtidos na análise fatorial ao estabelecimento das condições tempo adverso, foi verificado qual fator foi dominante durante os eventos, através dos escores associados.

Os estudos de casos analisados ocorreram dos dias: 26 de abril de 2003, 27 de abril de 2011, 01 de dezembro de 2011 e 06 de março de 2012.

#### 5.3.2.1 Caso 1: 26 de abril de 2003

A Tabela 5.7 descreve os dados observados SBBE, emitidos através das mensagens codificadas METAR/SPECI do dia 26 de abril de 2003 (os METAR/SPECI, que deram origem à tabela 5.10 podem ser visualizados no ANEXO A). Os METAR/SPECI do SBBE mostraram no começo do dia a ocorrência de chuva leve (entre 0700Z e 0900Z ou 04:00 HL a 06:00 HL), com restrição de teto entre 0700Z e 0800Z (04:00 a 06:00 HL), porém neste período não houve registro de trovoadas, nuvens TCU ou CB. Ao longo da manhã a temperatura do ar (Tar) esteve em elevação, apresentando a temperatura mínima de 23°C às 1000Z (07:00 HL) e temperatura máxima de 30°C às 1700Z (14:00 HL). A UR apresentava declínio, observado pelo aumento da amplitude entre a Tar e a temperatura do ponto de orvalho (Td), que variou entre 0°C às 07:00 HL até 5°C às 14:00HL.

A direção do vento mudou de sudeste/leste para norte/oeste a partir das 1600Z (13:00 HL), com maior frequência da direção norte durante à tarde, verificando a influência da circulação local de brisa marítima (COHEN et al., 1995; SILVA DIAS et al., 2004; SOUZA JÚNIOR, et al., 2006). A condição de tempo “chuva” ocorreu entre 1715Z do dia 26 até 0000Z do dia 27 (14:15 HL até 21:00 HL do dia 26), com trovoadas e nuvens CB na maior parte do período, ratificando a presença de atividade convectiva sobre o SBBE (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 26 e 27 de abril de 2003. Fonte: REDEMET.

Dia/ Hora (UTC)	Vento			Visibilidade horizontal			Tempo presente		Nebulosidade			Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (KT)	Rajada (KT)	Total (m)	Setorizada (m/setor)	Alcance visual Pista Principal (m)	1ª	2ª	Base mais baixa (ft)	Quantidade e base mais baixa (oitavos)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
26/0600	120	6	não	>10000	não	>2000	não	não	1200	3 a 4	não	23	23	1012
26/0700	100	4	não	>10000	não	>2000	Chuva Leve	não	1200	5 a 6	não	23	23	1012
26/0800	090	3	não	6000	não	>2000	Chuva Leve	não	1200	5 a 6	não	23	23	1012
26/0900	110	5	não	8000	não	>2000	Chuva Leve	não	1500	3 a 4	não	23	23	1012
26/1000	150	4	não	>10000	não	>2000	não	não	1500	1 a 2	não	23	23	1012
26/1100	110	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1500	1 a 2	não	24	24	1013
26/1200	110	5	não	>10000	não	>2000	não	não	1500	1 a 2	não	25	24	1014
26/1300	110	6	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	1 a 2	não	26	24	1014
26/1400	100	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	1 a 2	não	27	25	1014
26/1500	090	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	1 a 2	não	28	25	1013
26/1600	020	2	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	29	25	1013
26/1700	270	4	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	30	25	1012
26/1715	290	4	não	2000	não	>2000	Chuva Moderada	não	1700	3 a 4	não	28	26	1012
26/1730	230	2	não	>10000	4000/E	>2000	Trovoada	não	1500	5 a 6	CB	27	26	1012
26/1740	340	2	não	2000	não	>2000	Trovoada	Chuva Moderada	1500	5 a 6	CB	27	26	1012
26/1800	020	12	não	3000	não	>2000	Trovoada	Chuva Moderada	1500	5 a 6	CB	27	26	1011
26/1830	010	4	não	4000	não	>2000	Trovoada	Chuva Moderada	1500	5 a 6	CB	25	25	1011
26/1900	040	5	não	>10000	não	>2000	Trovoada	não	1700	3 a 4	CB	24	24	1011
26/2000	020	3	não	>10000	4000E	>2000	Trovoada	Pancada vizinhança	1700	3 a 4	CB	25	25	1011
26/2100	070	3	não	>10000	não	>2000	Trovoada	não	1700	3 a 4	CB	25	25	1012
26/2200	070	3	não	5000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1700	3 a 4	CB	25	25	1013
26/2300	080	4	não	5000	não	>2000	Chuva Leve	não	1700	3 a 4	não	25	25	1013
27/0000	090	3	não	7000	não	>2000	Chuva Leve	não	1700	3 a 4	não	24	24	1013
27/0100	100	2	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	24	24	1014
27/0200	090	2	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	24	24	1014

Durante a tempestade houve mudança de operações de pouso e decolagens de VFR para IFR, limitando o SBBE a receber somente as aeronaves que possuíam equipamentos adequados para estas condições adversas de tempo. As limitações operacionais ocorreram entre 1715Z e 1830Z, devido à redução de visibilidade e de teto, chegando a valores mínimos de até 2000m e 1500 ft (450m), respectivamente. Vale ressaltar que entre 2200Z e 2300Z (19:00 HL e 20:00 HL) a ocorrência de chuva também reduziu a visibilidade horizontal para 5000m (Tabela 5.7).

A imagem do GOES no canal IR do dia 26 de abril de 2003 às 1811Z (15:11 HL) sobre a América do Sul (Figura 5.15a) mostra que a maior parte da nebulosidade encontrava-se no centro e norte do continente, com duas bandas principais: a primeira no norte do Amazonas, passando pelo litoral da Bahia, até o Oceano Atlântico, associada a presença de um canal de umidade; e a segunda sobre o Oceano Atlântico, nas proximidades da linha do equador, referente à presença da ZCIT. Às 1811Z (15:11 HL) não era observada nebulosidade com maior desenvolvimento vertical sobre Belém (Figura 5.15b), todavia cerca de duas horas depois, a imagem do GOES no IR das 2030Z (17:39 HL) mostrava o aumento da quantidade de nuvens e vários núcleos convectivos, indicado pelos topos mais brancos de nuvens, sobre o Maranhão, norte do Pará e norte do Amazonas (Figura 5.16a), inclusive um destes pequenos núcleos estava sobre Belém, como destacado na Figura 5.16b. Neste horário foi registrada no SBBE chuva moderada, trovoada e nuvem CB (Tabela 5.7).

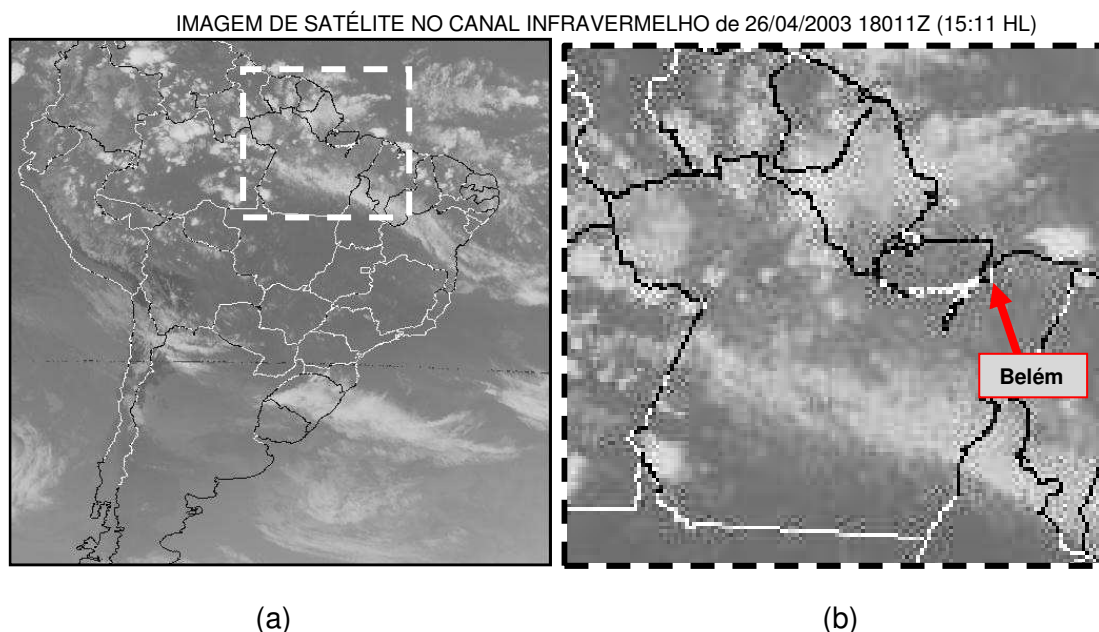


Figura 5.15 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 26 de abril de 2003 às 1811Z (15:11 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

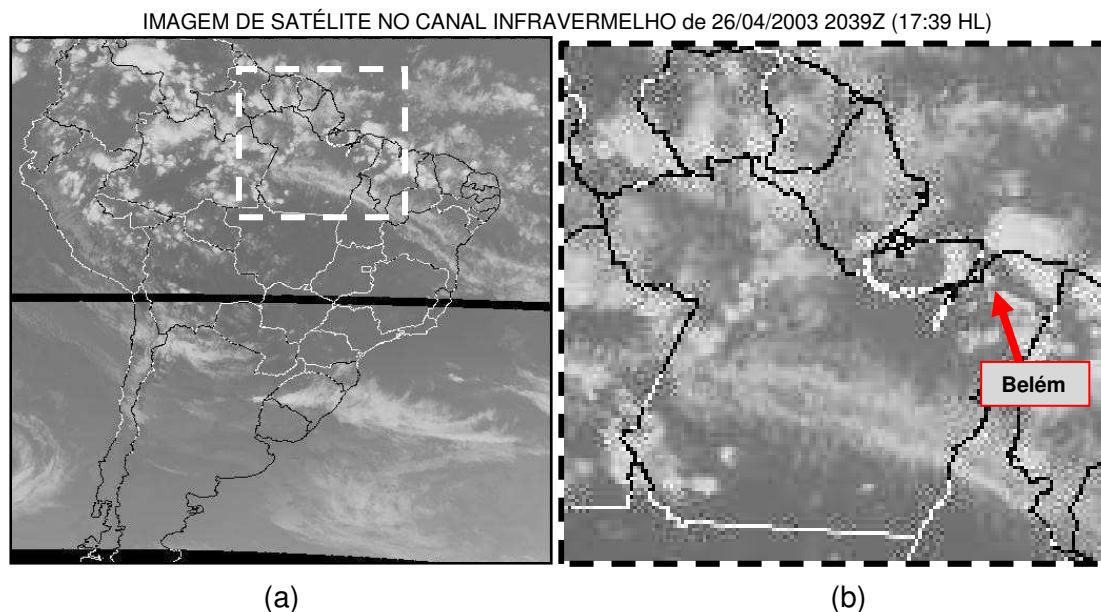


Figura 5.16 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 26 de abril de 2003 às 2039Z (17:39 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

A Figura 5.17 apresenta a média em seis horas (1800Z a 2359Z) de ROL no norte do Brasil. Os menores valores de ROL ocorreram no norte de Roraima, Amazonas, Oceano Atlântico (sobre a linha do equador) e no nordeste brasileiro. Em Belém também foi verificada uma área com ROL médio de  $200 \text{ W.m}^{-2}$ , associado à presença de convecção profunda (KOUSKY, 1988; ZHANG, 1993; LAU et al., 1997) coincidente com a presença dos aglomerados convectivos vistos na Figura 5.16b.

Sobre Belém a circulação dos ventos em 1000 hPa era da direção NE, que favoreceu a entrada de mais umidade em Belém, em conformidade aos valores máximos de convergência de umidade identificados sobre a região (Figura 5.18). Nos altos níveis da atmosfera (nível de 200 hPa) foi verificado máximos valores de divergência de massa (Figura 5.19).

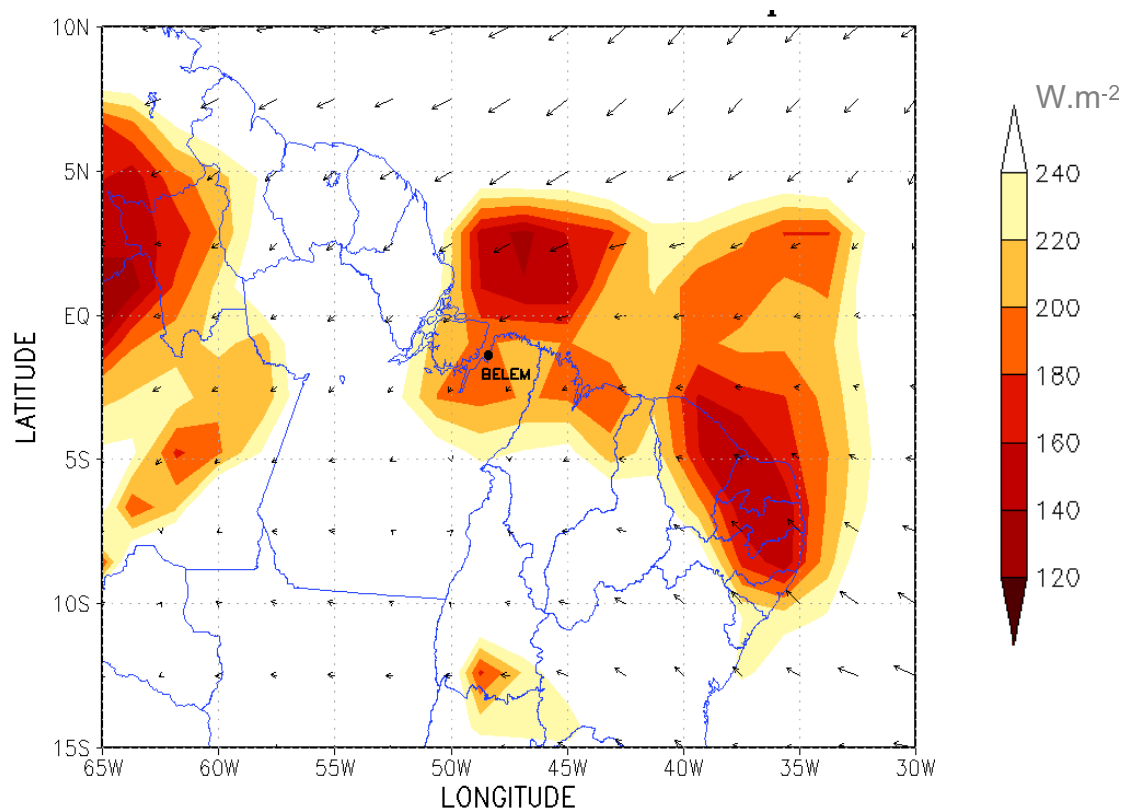


Figura 5.17 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.

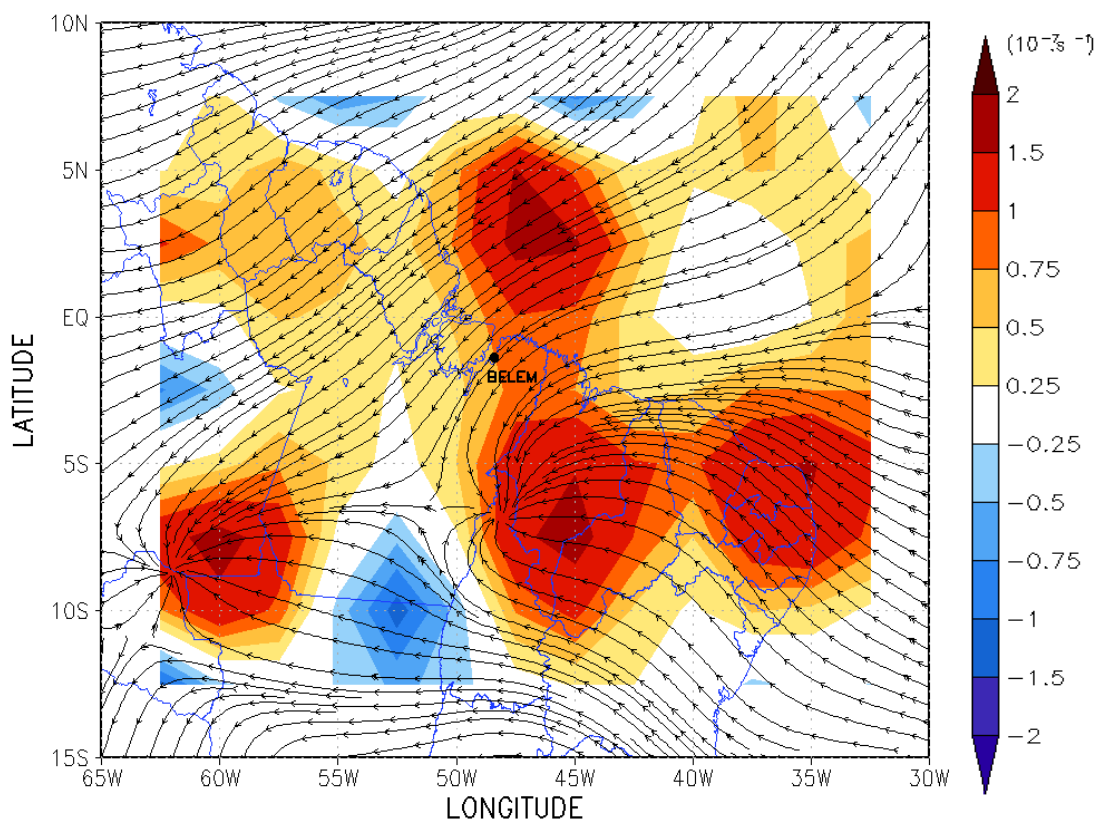


Figura 5.18 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.

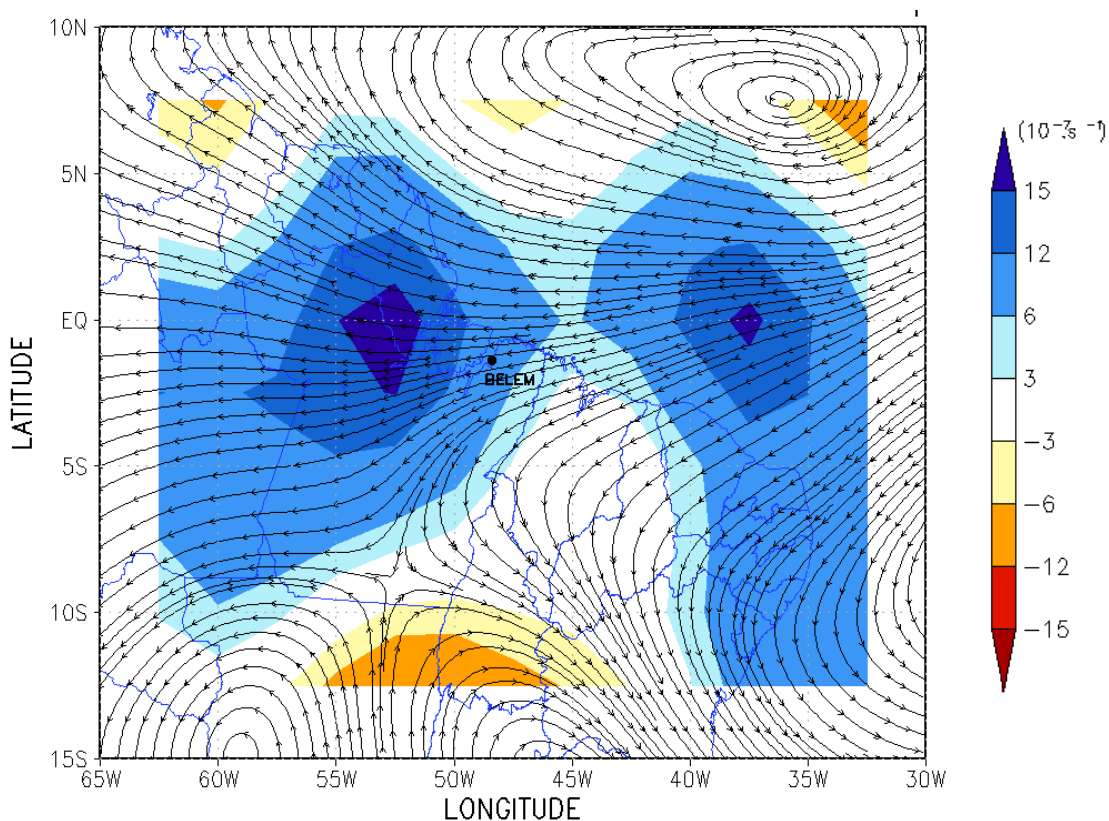


Figura 5.19 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 26 de abril de 2003 no norte do Brasil.

Durante o período de restrição operacional sobre o SBBE, o resultado da AF indicou que o padrão atmosférico predominante foi o F2 de 1200Z a 1800Z (09:00HL a 15:00HL) e de F3 entre 1800Z a 0000Z (15:00HL a 21:00HL). Isto pode ser visto através dos maiores valores dos escores (pesos), associados aos respectivos fatores, conforme mostra a Tabela 5.8.

No período que o F2 foi dominante, foi observado o aumento da temperatura do ar, que implicou no acréscimo de THETA<sub>E</sub>, e por sua vez esteve associado ao acréscimo no teor de umidade próximo a superfície. Por se tratar do período que antecedeu a tempestade, o aumento de THETA<sub>E</sub> em superfície esteve relacionado com o aumento da CAPE (MACHADO; LAURENT, 2000). Maiores valores de THETA<sub>E</sub> na superfície ou de CAPE, aliado a presença de uma forçante dinâmica criou um ambiente atmosférico favorável para disparar a convecção profunda, corroborando com o começo da tempestade no final deste turno (1715Z ou 14:15 HL).

O próximo turno de seis horas compreendeu a maior parte da tempestade e teve F3 dominante, com escore associado de 3,4 (Tabela 5.8 e Figura 5.20). Este turno coincidiu com o período que houve implicações nas operações no SBBE, com relação à restrição de teto e visibilidade. Os dados de superfície do aeroporto e as



imagens de satélite no canal IR confirmam a presença de convecção profunda e a sua interação com a circulação de brisa marítima durante o período analisado. Portanto, estas informações ratificam que o F3 foi fator físico responsável pela redução de visibilidade e teto durante o período de maior restrição operacional no SBBE.

Tabela 5.8 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 26 e 27 de abril de 2003 sobre o SBBE.

DATA					ESCORE ASSOCIADO AO		
ANO	MES	DIA	HORA (Z)	HORA (LOCAL)	F1	F2	F3
2003	04	26	1200-1800	0900-1500	0,0	1,0	0,3
2003	04	26	1800-0000	1500-2100	-2,2	0,2	3,4

\*F1 – Primeiro fator,  
 F2 – Segundo fator  
 F3 – Terceiro fator

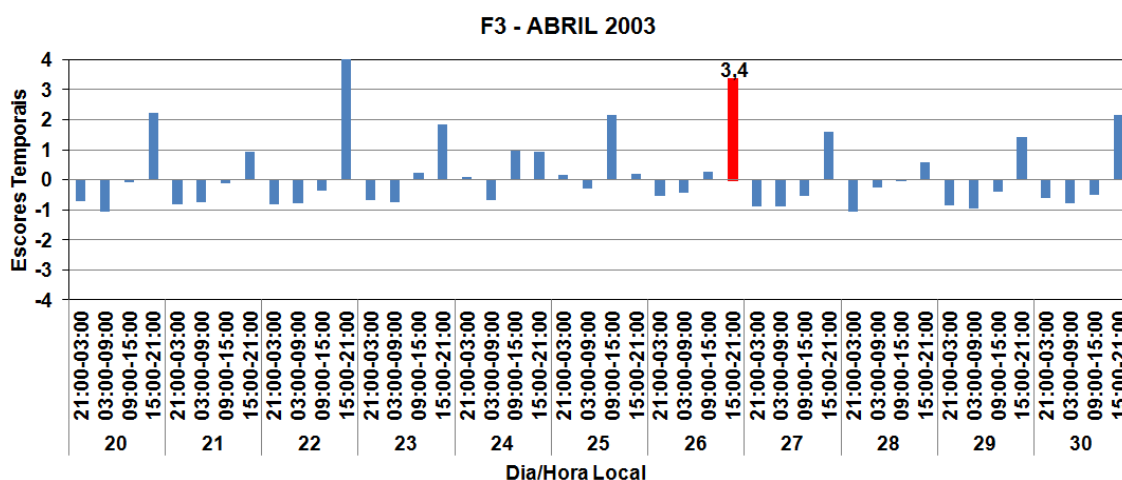


Figura 5.20 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3), obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 20 a 30 de abril de 2003.

### 5.3.2.2 Caso 2: 27 de abril de 2011

Os dados meteorológicos observados no SBBE, emitidos através das mensagens codificadas METAR e SPECI do dia 27 de abril de 2011 são apresentados



na Tabela 5.9 (os METAR/SPECI que deram origem à Tabela 5.9 podem ser visualizados no ANEXO A). As direções do vento em superfície, nas primeiras horas do dia, foram dos setores sudeste/leste, passando para a direção norte às 1100Z (08:00 HL), sendo esta última direção mais frequente até às 1800Z ou 15:00 HL.

A presença da convecção no SBBE foi confirmada através do registro de trovoadas e conseqüentemente, de nuvens CB de 1948Z a 2200Z (16:48HL a 19:00 HL). Além disso, foi registrada também a condição de tempo “chuva leve”, que restringiu a visibilidade horizontal total no aeroporto para 2000 m e o alcance visual na pista principal para apenas de 500 m. Estes baixos valores de visibilidade horizontal, limitaram as operações de pousos e decolagens de aeronaves no SBBE, que não possuíam instrumentos para navegação aérea, apropriados para estas condições adversas, por cerca de duas horas (1948Z até às 2143Z). Embora tenha sido observada a presença de nebulosidade baixa, não houve registro de base de nuvens de 1500 ft ou menos, com quantidade acima de 4 oitavos, ou seja, não houve restrição operacional por conta de teto baixo no SBBE durante o caso analisado (Tabela 5.9).

Nuvens convectivas foram identificadas sobre a Amazônia, no norte e nordeste do Brasil, através das baixas temperaturas do topo (de até  $-60^{\circ}\text{C}$ ) na imagem do satélite GOES no canal IR do dia 27 de abril de 2011 às 1800Z (15:00 HL), conforme pode ser visto na Figura 5.21a. No litoral do norte do País, foi observado que estas nuvens convectivas estavam alinhadas e paralelas à região costeira, semelhante à formação de uma LI (COHEN, 1989). Às 1800Z (15:00 HL) não havia nuvens com grande desenvolvimento vertical sobre Belém (Figura 5.21b).

Duas horas depois, às 2000Z (17:00 HL), as nuvens estavam em maior quantidade sobre a Amazônia e norte do nordeste brasileiro e mais intensas, com temperatura do topo das nuvens de até  $-70^{\circ}\text{C}$ , ou seja, num estágio de convecção mais profunda em relação ao observado às 18:00Z (15:00HL). No litoral norte do Brasil, a LI se fortaleceu e se propagou para o interior, alcançando as cidades do norte do Pará, Maranhão, Piauí e Ceará (Figura 5.22a), inclusive os aglomerados convectivos mais intensos da LI estavam sobre a capital paraense (Figura 5.22b).

Tabela 5.9 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 27 e 28 de abril de 2011. Fonte: REDEMET

Dia/ Hora (UTC)	Vento			Visibilidade horizontal			Tempo presente		Nebulosidade			Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (KT)	Rajada (KT)	Total (m)	Setorizada (m/setor)	Alcance visual Pista Principal (m)	1ª	2ª	Base mais baixa (ft)	Quantidade base mais baixa (oitavos)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
27/0600	120	4	não	4000	não	>2000	Chuva Leve	não	1000	3 a 4	não	24	22	1010
27/0700	140	2	não	>10000	não	>2000	não	não	800	3 a 4	não	25	23	1010
27/0800	000	0	não	>10000	não	>2000	não	não	800	5 a 6	não	25	22	1011
27/0900	080	1	não	>10000	não	>2000	não	não	1000	3 a 4	não	25	23	1010
27/1000	000	0	não	>10000	não	>2000	não	não	900	5 a 6	não	25	23	1012
27/1100	330	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1300	3 a 4	não	26	23	1012
27/1200	330	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1300	3 a 4	não	28	23	1013
27/1300	360	4	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	5 a 6	não	28	23	1013
27/1400	330	5	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	28	23	1013
27/1500	330	6	não	>10000	não	>2000	não	não	2000	3 a 4	não	29	23	1012
27/1600	330	5	não	>10000	não	>2000	não	não	2000	3 a 4	não	30	23	1011
27/1700	330	5	não	>10000	não	>2000	não	não	2000	3 a 4	TCU	30	23	1009
27/1800	340	4	não	>10000	não	>2000	não	não	2000	3 a 4	TCU	31	23	1008
27/1900	320	6	não	>10000	não	>2000	não	não	2000	3 a 4	TCU	32	24	1008
27/1948	110	13	não	3000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1200	3 a 4	CB	27	23	1009
27/2000	110	15	não	2000	não	500	Trovoada	Chuva Leve	800	3 a 4	CB	26	23	1009
27/2100	030	3	não	3000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	800	3 a 4	CB	24	22	1010
27/2143	010	6	não	5000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	800	1 a 2	CB	25	23	1011
27/2200	010	6	não	7000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	800	1 a 2	CB	25	22	1011
27/2300	350	3	não	7000	não	>2000	Chuva Leve	não	800	1 a 2	TCU	25	23	1012
28/0000	300	4	não	7000	não	>2000	Chuva Leve	não	1700	5 a 6	não	25	22	1012
28/0100	310	2	não	>10000	não	>2000	Chuva Leve	não	1300	3 a 4	não	26	23	1013
28/0200	290	3	não	>10000	não	>2000	não	não	900	3 a 4	não	26	23	1013

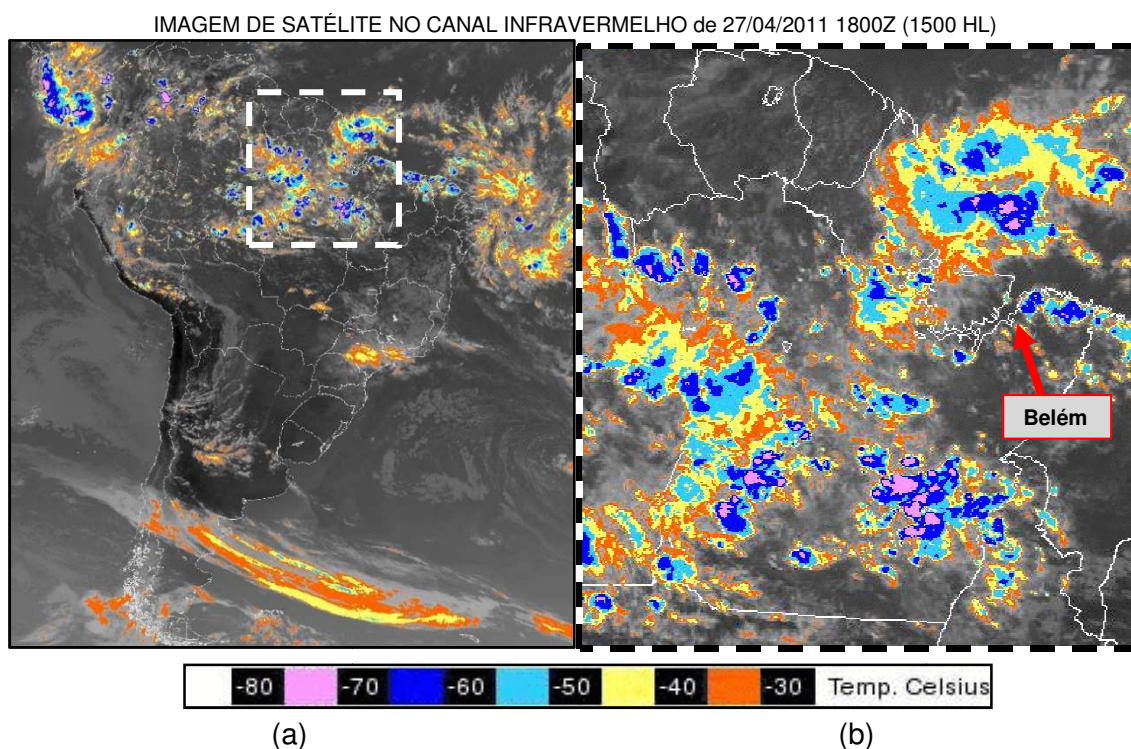


Figura 5.21 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 27 de abril de 2011 às 1800Z (15:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

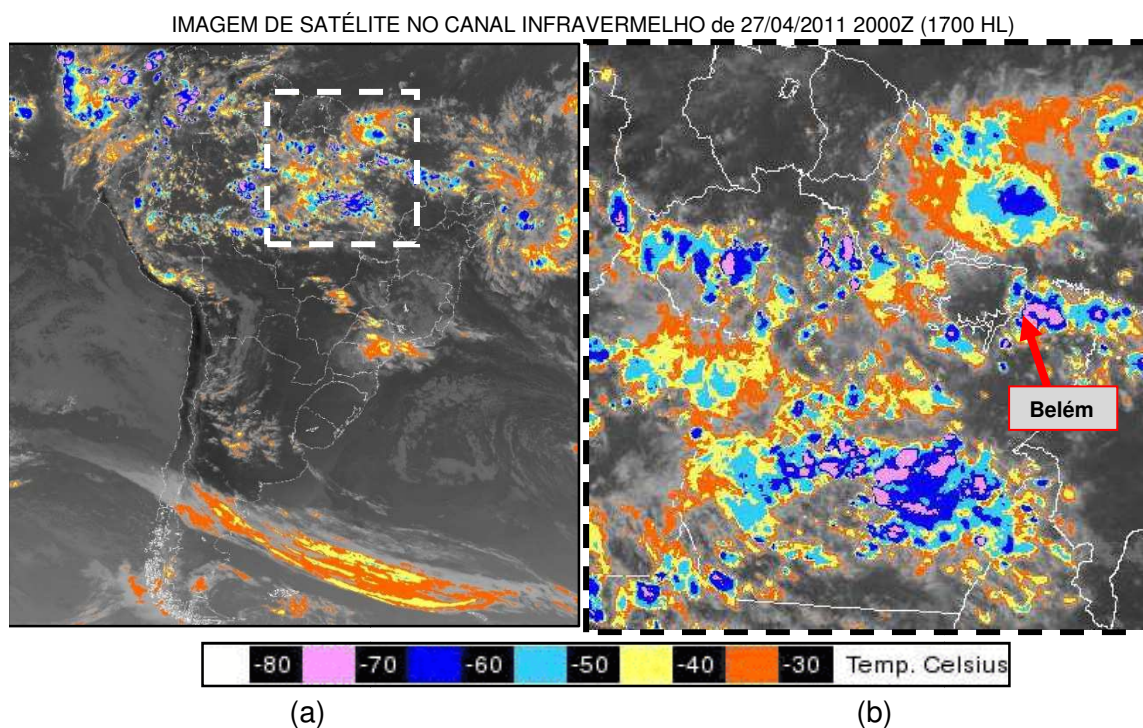


Figura 5.22 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 27 de abril de 2011 às 2000Z (17:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

A distribuição espacial da média de ROL de 1800Z a 2359Z (15:00 a 20:59 HL) de 27 de abril de 2011 também indicaram a presença de nuvens convectivas na Região Amazônica, assim como no norte e leste do nordeste do Brasil, através dos baixos valores de ROL, os quais coincidiram com as regiões de maior atividade convectiva no decorrer deste período. Valores de ROL muito baixos foram identificados sobre Belém, alcançando o mínimo de  $120 \text{ W.m}^{-2}$ , que esteve associado a presença de intensa atividade convectiva (Figura 5.23). Vale ressaltar que, valores de ROL iguais ou menores que  $240 \text{ W.m}^{-2}$  indicam a presença de convecção profunda (KOUSKY, 1988; ZHANG, 1993; LAU et al.,1997).

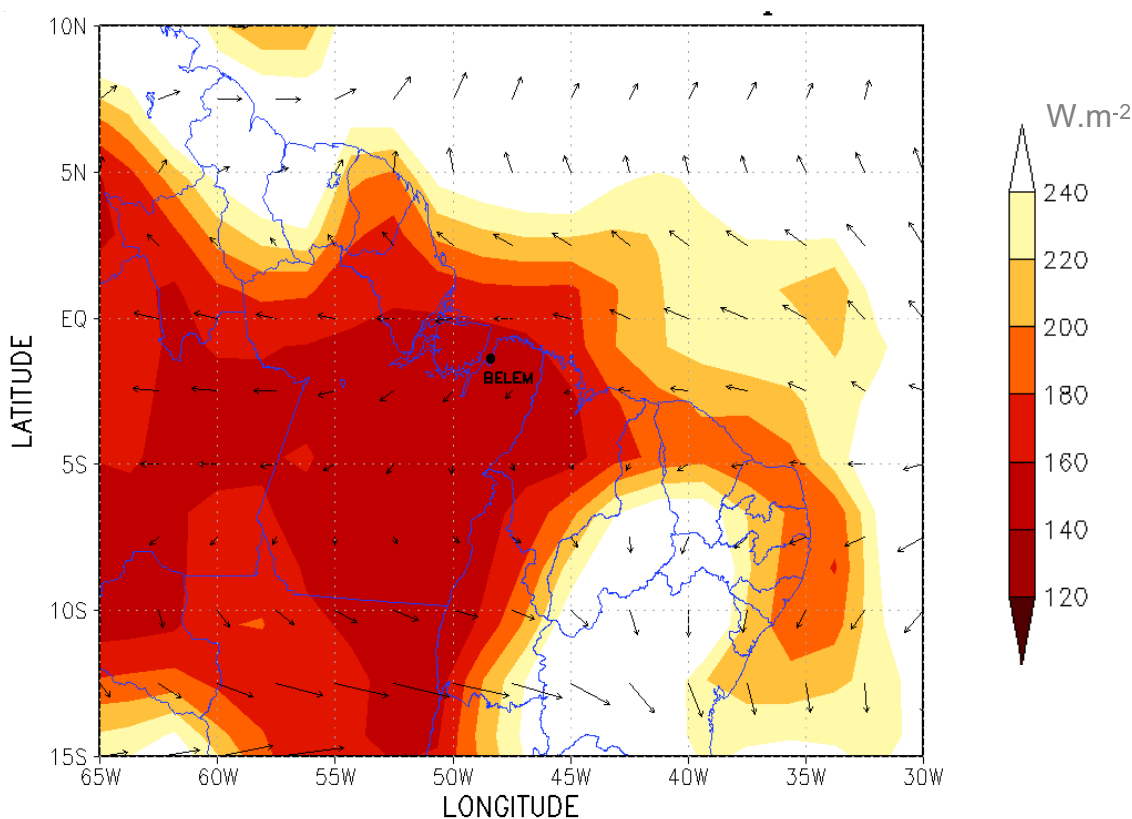


Figura 5.23 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no centro e norte do Brasil.

Em média, entre 1800Z a 2359Z (15:00 HL a 20:59 HL) de 27 de abril de 2011 no nível de 1000 hPa notou-se uma faixa de confluência dos ventos e convergência de umidade, situada entre as latitudes de  $2^{\circ}\text{S}$  a  $0^{\circ}$  (Figura 5.24). Em paralelo, a circulação em 200 hPa apresentou a configuração de difluência dos ventos no norte do Pará, incluindo Belém, aliada à forte divergência de massa neste mesmo nível (Figura 5.25). Em outras palavras, o escoamento de grande escala estava favorável à convecção profunda sobre o norte do Brasil.



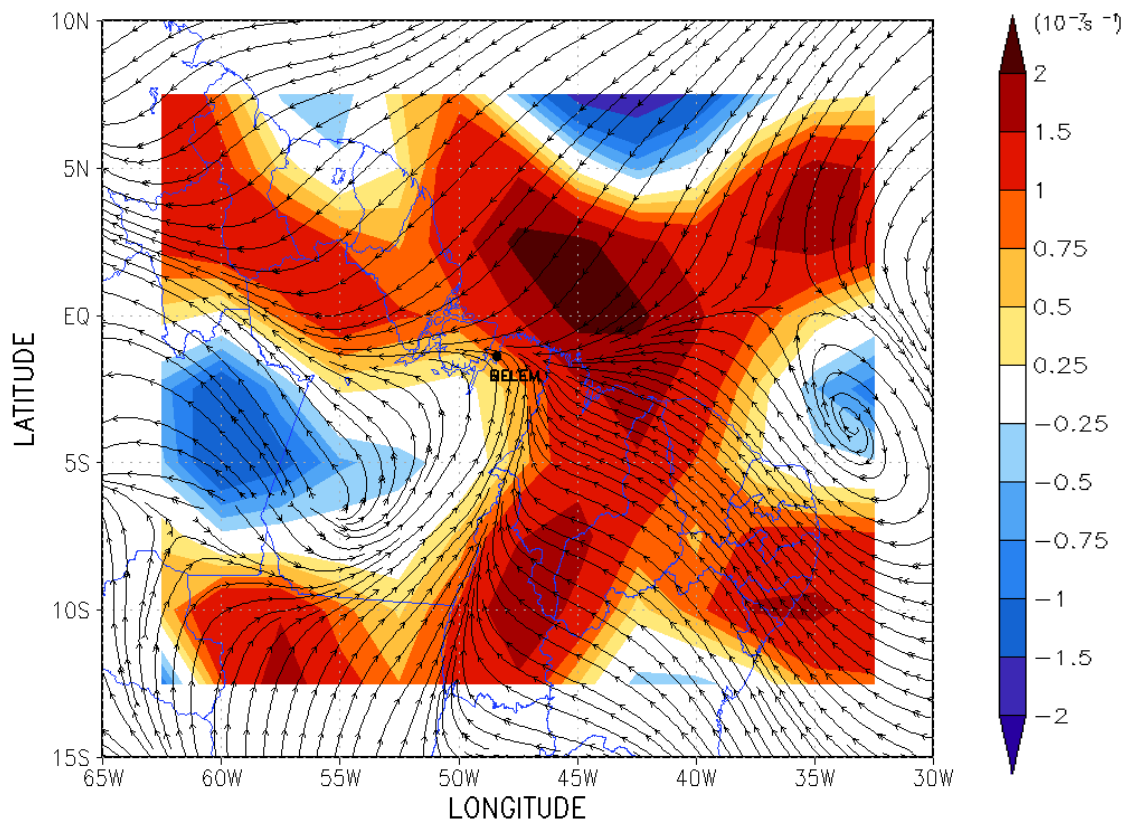


Figura 5.24 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no norte do Brasil

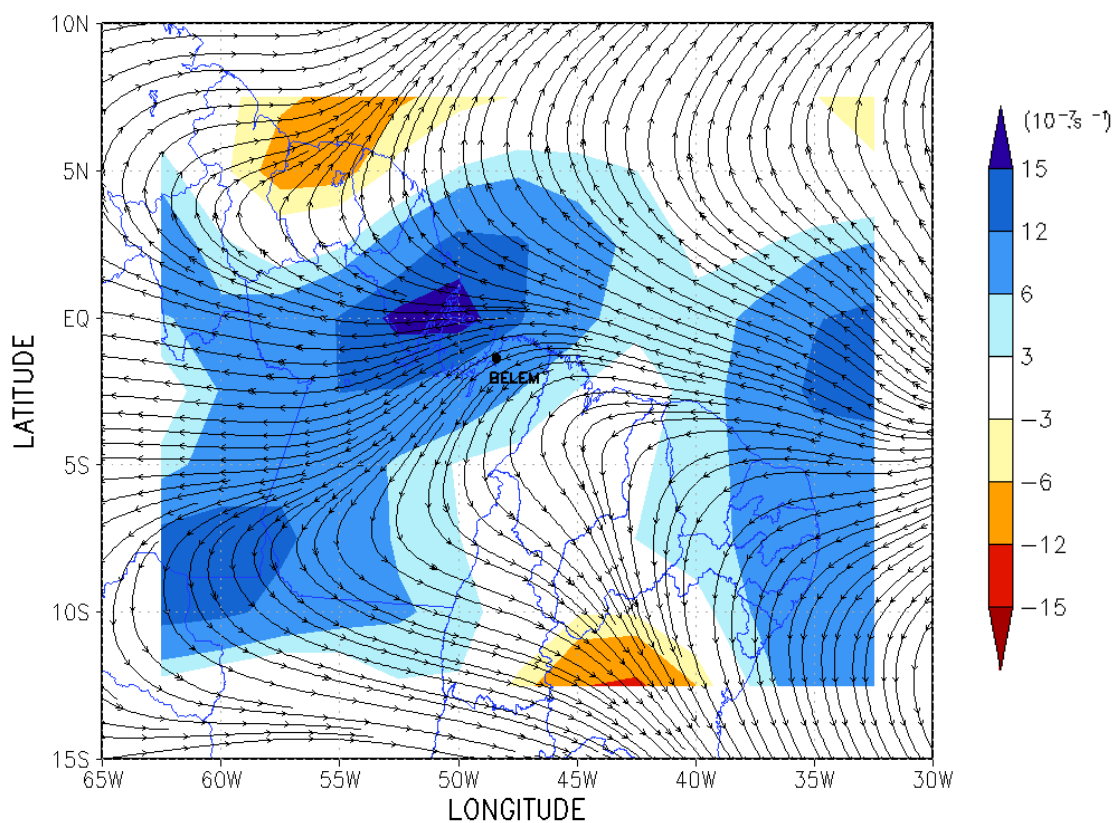


Figura 5.25 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, 1800Z à 2359Z em 27 de abril de 2011 no norte do Brasil

Entre 1200Z e 1800Z (09:00 HL e 15:00HL) o fator associado aos processos de aquecimento e resfriamento da atmosfera (F1), foi dominante. O maior valor do escore de F1 neste período (em relação aos escores de F2 e F3) é coerente com o aumento progressivo da Tar e a redução da UR, que ocorreu neste turno (Tabela 5.10).

No próximo turno, de 1800Z a 0000Z (15:00 HL a 21:00HL) ocorreu a tempestade no SBBE e o F3 foi dominante, com escore de 6,1 (Tabela 5.10 e Figura 26). Durante este período houve restrição de visibilidade horizontal do aeródromo, operando IFR por 1 hora e 55 minutos. Deste modo, as características atmosféricas ratificam a presença da convecção profunda sobre o SBBE durante o período que F3 foi representativo. Além disso, pode ser identificada a influência da ZCIT, que normalmente atua sobre a região neste período do ano (RAO; HADA, 1990) e a sua interação com a circulação de mesoescala, que disparou o desenvolvimento da LI.

Tabela 5.10 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 27 de abril de 2011 sobre o SBBE.

DATA					ESCORE ASSOCIADO AO		
ANO	MES	DIA	HORA (Z)	HORA (LOCAL)	F1	F2	F3
2011	04	27	1200-1800	0900-1500	1,2	-0,7	0,1
2011	04	27	1800-0000	1500-2100	0,3	-1,8	6,1

\*F1 – Primeiro fator,

F2 – Segundo fator

F3 – Terceiro fator

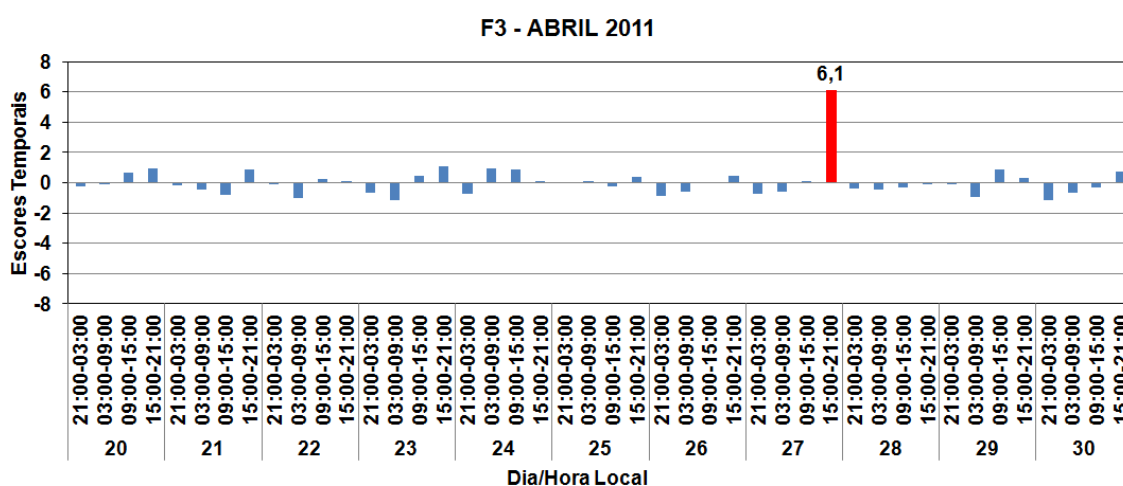


Figura 5.26 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3), obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 20 a 30 de abril de 2011.

### 5.3.2.3 Caso 3: 02 de dezembro de 2011

Os dados meteorológicos observados no SBBE, emitidos através do METAR de 1 e 2 de dezembro de 2011 são apresentados na Tabela 5.11 (os METAR que deram origem à tabela 5.11 podem ser visualizados no ANEXO A). Notou-se Tar acima da média durante o final da manhã e no período da tarde. Por exemplo, às 2200Z (19:00 HL) a Tar era de 29°C, enquanto que a média para este horário é de aproximadamente 26,5°C (ver Figura 5.7). A partir de 2300Z (20:00 HL), foi observada a diminuição da Tar em 3°C em função do início da tempestade. Houve registro de trovoadas e CB de 2300Z (20:00 HL) de 01/12/2011 até 0600Z (03:00 HL) de 02/12/2011, além de chuva leve de 0200Z a 0600Z (23:00 HL do dia 01 a 03:00 HL do dia 02). No período da tempestade, a chuva leve reduziu a visibilidade horizontal para 5000 m por uma hora (0500Z a 0600Z ou 02:00 a 03:00 HL) no aeroporto. Não houve restrição operacional devido a teto baixo no SBBE durante o caso analisado.

Às 0000Z do dia 02 de dezembro de 2011 (01/12/2011 às 21:00 HL) foi observada atividade convectiva intensa à norte e leste da capital paraense, indicada pela presença de topos de nuvens com baixa temperatura de até -60°C (Figura 5.27b). Neste mesmo horário, a maior concentração de nuvens sobre o Brasil aparecia alinhada desde o sul da região Amazônica, passando pelo sudeste do Brasil, até o Oceano Atlântico, associado com a presença de um sistema frontal. Outras nuvens convectivas foram identificadas também, através das temperaturas de seus topos menores que -30°C (MACHADO; ROSSOW, 1993), sobre o norte do Tocantins, centro e sul dos estados do Maranhão e Piauí (Figura 5.27a). Três horas depois, às 0300Z (00:00 HL) do dia 02, o sistema convectivo que estava situado nas proximidades de Belém estava mais intenso, com temperatura mínima do topo da nuvem de -70°C, e posicionado sobre o Rio Pará e a Ilha do Marajó, afetando também boa parte da capital paraense (Figura 5.28a-b).

Tabela 5.11 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 01 e 02 de dezembro de 2011. Fonte: REDEMET.

Dia/ Hora (UTC)	Vento			Visibilidade horizontal			Tempo presente		Nebulosidade			Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (KT)	Rajada (KT)	Total (m)	Setorizada (m/setor)	Alcance visual Pista Principal (m)	1ª	2ª	Base mais baixa (ft)	Quantidade base mais baixa (oitavos)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
01/0800	100	5	não	>10000	não	>2000	não	não	>30000	não	não	25	24	1009
01/0900	000	0	não	>10000	não	>2000	não	não	>30000	não	não	25	24	1010
01/1000	050	4	não	8000	não	>2000	não	não	>30000	não	não	25	24	1010
01/1100	070	8	não	>10000	não	>2000	não	não	>30000	não	não	27	23	1011
01/1200	050	10	não	>10000	não	>2000	não	não	1700	3 a 4	não	28	24	1012
01/1300	060	11	não	>10000	não	>2000	não	não	2300	5 a 6	não	30	23	1012
01/1400	050	7	não	>10000	não	>2000	não	não	2300	5 a 6	não	30	23	1011
01/1500	060	3	não	>10000	não	>2000	não	não	2300	5 a 6	TCU	31	23	1011
01/1600	160	3	não	>10000	não	>2000	não	não	2300	5 a 6	TCU	31	23	1010
01/1700	260	5	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	5 a 6	TCU	31	23	1010
01/1800	310	5	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	3 a 4	TCU	31	24	1009
01/1900	310	7	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	3 a 4	TCU	30	24	1008
01/2000	350	9	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	1 a 2	TCU	29	24	1008
01/2100	010	7	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	3 a 4	não	29	24	1009
01/2200	020	5	não	>10000	não	>2000	não	não	2500	1 a 2	não	29	24	1009
01/2300	050	6	não	>10000	não	>2000	Trovoada	não	2500	3 a 4	CB	26	24	1010
02/0000	050	9	não	>10000	não	>2000	Trovoada	não	1500	3 a 4	CB	26	23	1011
02/0100	100	9	não	>10000	não	>2000	Trovoada	não	1500	3 a 4	CB	26	23	1011
02/0200	060	9	não	>10000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1500	3 a 4	CB	25	24	1011
02/0300	050	4	não	>10000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1000	3 a 4	CB	25	25	1011
02/0400	020	4	não	>10000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1000	3 a 4	CB	25	25	1010
02/0500	030	3	não	5000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	0900	3 a 4	CB	25	25	1010
02/0600	010	3	não	6000	não	>2000	Trovoada	Chuva Leve	1100	3 a 4	CB	25	25	1010
02/0700	050	3	não	>10000	não	>2000	não	não	1100	3 a 4	não	25	25	1009
02/0800	080	4	não	>10000	não	>2000	não	não	1500	3 a 4	não	25	25	1009



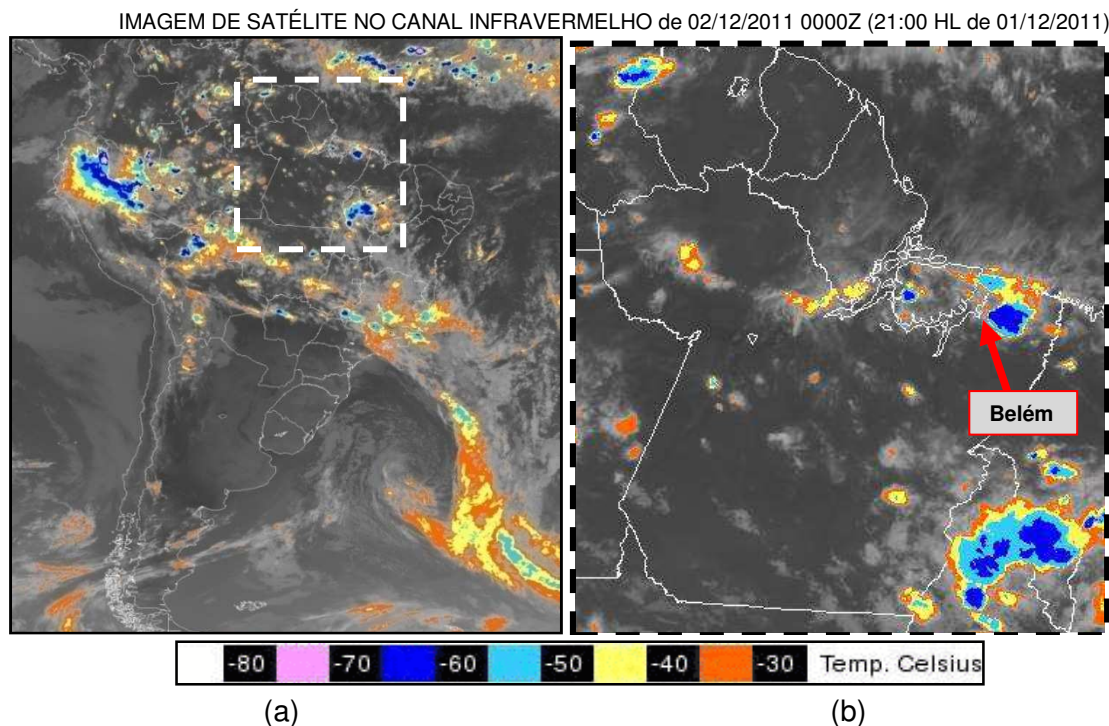


Figura 5.27 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 02 de dezembro de 2011 às 0000Z (21:00 HL de 01/12/2011): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

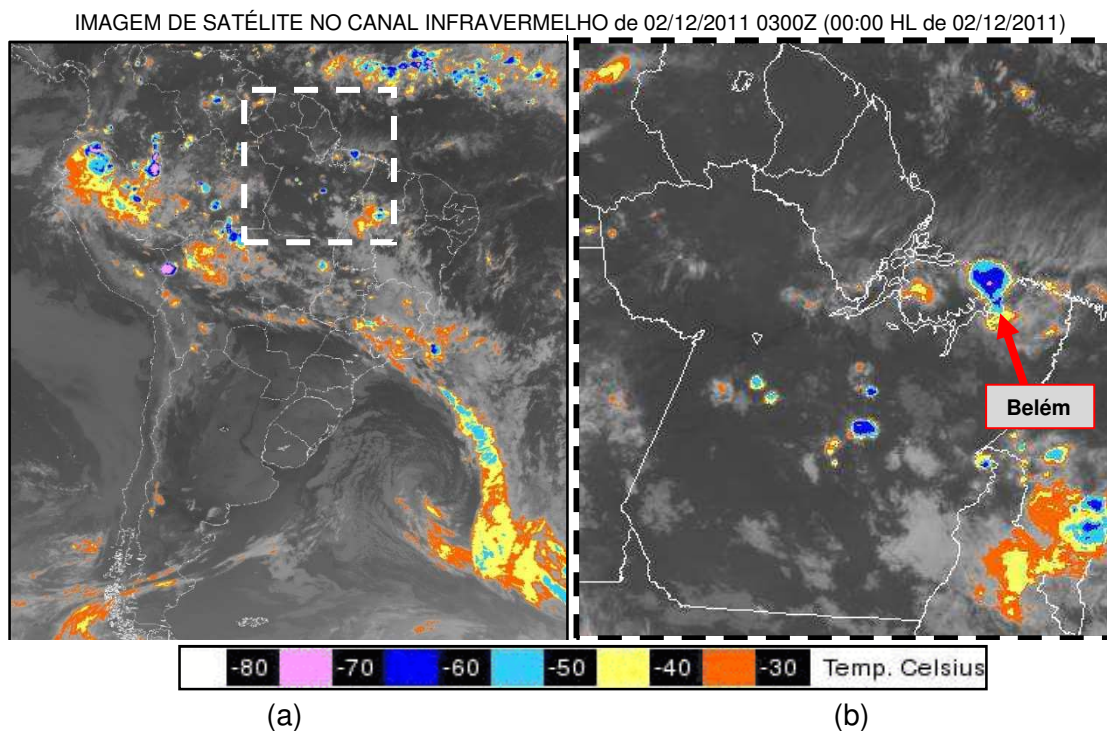


Figura 5.28 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 02 de dezembro de 2011 às 0300Z (00:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

A Figura 5.29 mostra a média de ROL entre 0000Z e 0559Z do dia 02/12/2011 (21:00 HL do dia 01 e 03:00 HL do dia 02) sobre o centro e norte do Brasil. Os menores valores de ROL ocorreram sobre o centro e sul do Amazonas, Rondônia, Tocantins, além do centro e sul dos estados do Pará e Maranhão. No norte paraense (incluindo Belém) a média de ROL é superior a  $240 \text{ W.m}^{-2}$ , indicando a ausência ou pequena presença de convecção profunda na região durante o período analisado.

A Figura 5.30 apresenta o escoamento e a convergência de umidade em 1000 hPa. A área de convergência de umidade em baixos níveis abrangeu todo o nordeste brasileiro, assim como o centro e norte paraense, corroborando com a presença do escoamento de nordeste sobre a região, que contribuiu para transportar a umidade do Oceano Atlântico para o continente. Em altos níveis foi observada divergência de massa sobre a porção central do Maranhão e Piauí (Figura 5.31), mostrando um ambiente atmosférico favorável à convecção profunda, coincidindo com a área de baixos valores de ROL (Figura 5.29). Já em Belém, embora tenha sido observada convergência de umidade em baixos níveis, em 200 hPa não evidenciada a presença de divergência de massa, indicando um ambiente de grande escala desfavorável para a ocorrência de convecção, em conformidade aos baixos valores de ROL na região (Figura 5.29).

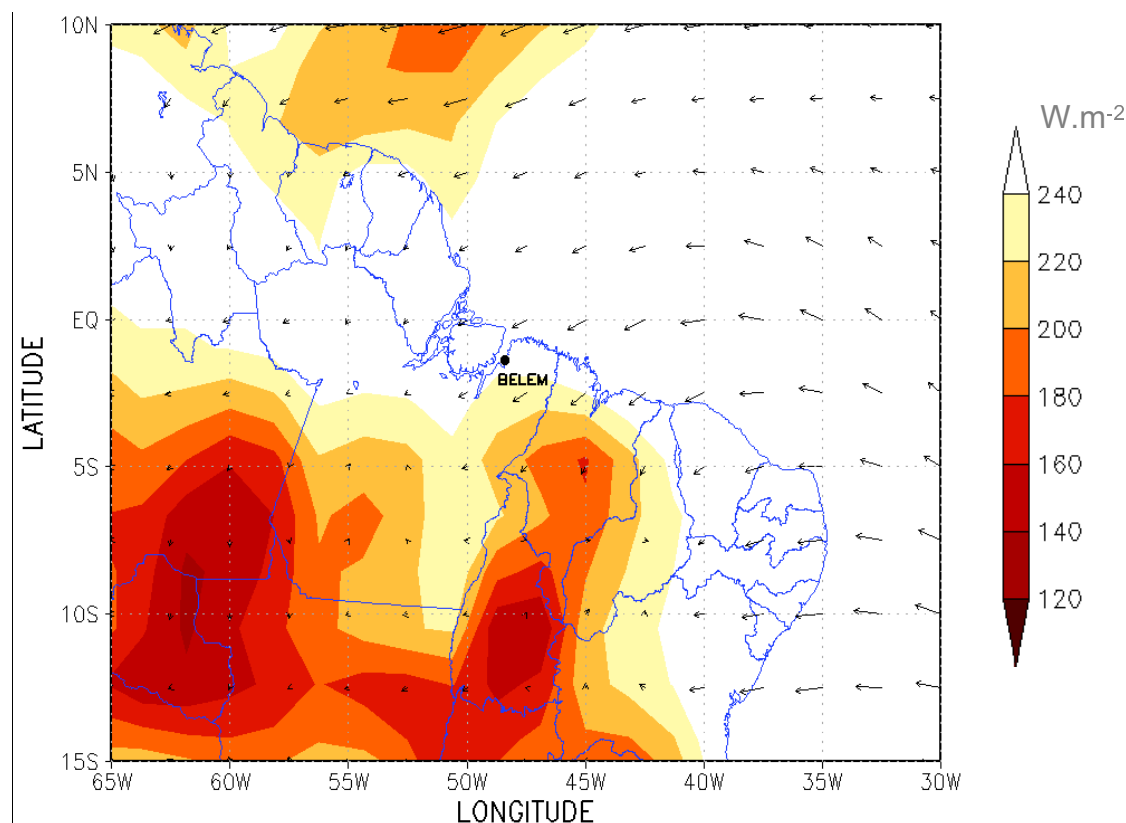


Figura 5.29 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no centro e norte do Brasil.

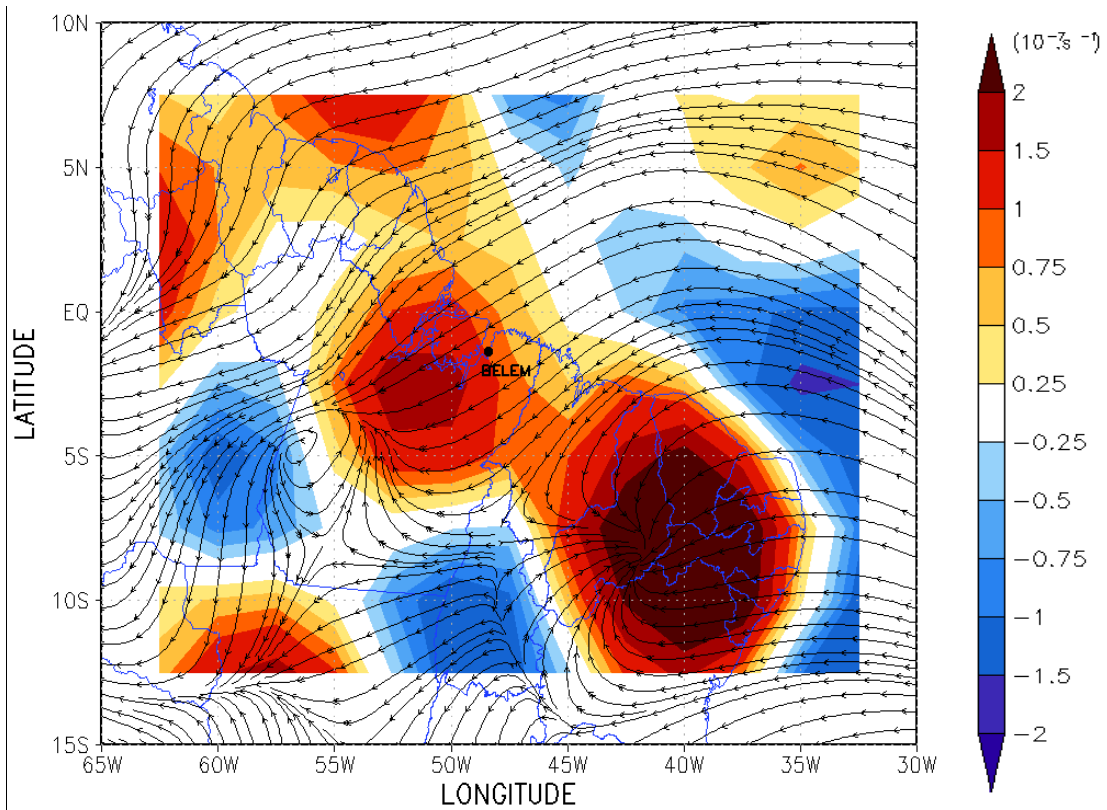


Figura 5.30 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no norte do Brasil.

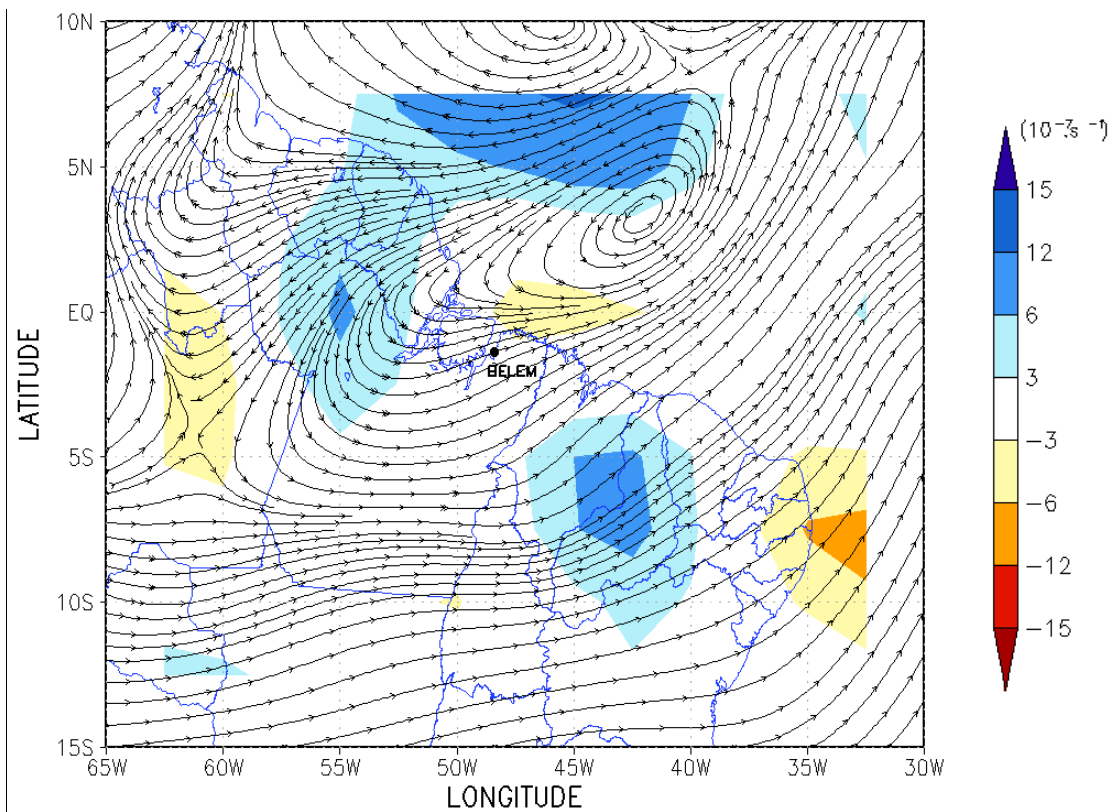


Figura 5.31 Divergência de massa e circulação do vento em 200 hPa, média de 0000Z à 0559Z em 02 de dezembro de 2011 no norte do Brasil.

Entre 1800Z e 0000Z (15:00HL e 21:00HL) o F1 foi o fator físico predominante, conforme mostra a Tabela 5.12. O F1 é o padrão atmosférico que representou os processos de aquecimento e resfriamento do ar e sua dependência relativa com a variação da umidade na superfície, produto da manutenção das elevadas temperaturas durante este turno.

No período que a tempestade se estabeleceu no SBBE (0000Z e 0600Z ou 21:00HL e 03:00HL) o F3 prevaleceu, indicado através do escore de 2,7 (Tabela 5.12 e Figura 5.32). Durante este turno a visibilidade horizontal total do aeródromo, alcançou o valor mínimo de 5000m (Tabela 5.10). Portanto, mesmo com as condições de grande escala desfavoráveis à convecção profunda, certamente as nuvens observadas na Figura 5.21b sobre o SBBE, eram compostas por formações convectivas locais, menores que a resolução espacial dos dados do NCEP e das imagens de satélite, mas eficientes para gerar trovoadas e chuva leve sobre o SBBE.

Tabela 5.12 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 01 e 02 de dezembro de 2011 sobre o SBBE.

DATA					ESCORE ASSOCIADO AO		
ANO	MES	DIA	HORA (Z)	HORA (LOCAL)	F1	F2	F3
2011	12	01	1800-0000	1500-2100	1,0	0,1	0,8
2011	12	02	0000-0600	2100-0300	-2,0	0,1	2,7

\*F1 – Primeiro fator,

F2 – Segundo fator

F3 – Terceiro fator

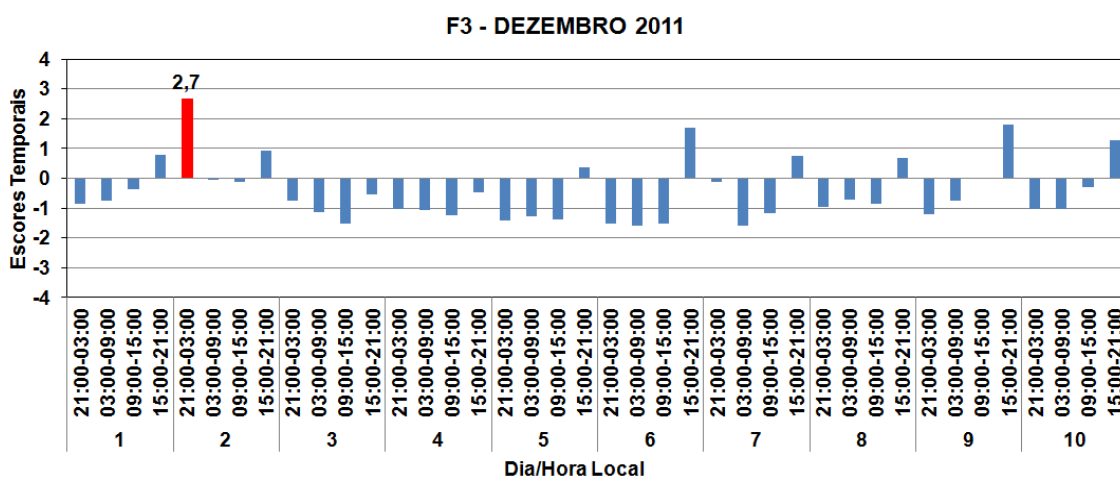


Figura 5.32 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3) obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 1 a 10 de dezembro de 2011.

#### 5.3.2.4 Caso 4: 06 de março de 2012

As observações no SBBE, emitidas através dos METAR/ SPECI do dia 06 de março de 2012 são apresentados na Tabela 5.13 (os METAR/SPECI que deram origem à tabela 5.13 podem ser visualizados no ANEXO A). Pela manhã a direção do vento em superfície era dos setores sudeste/leste, passando para nordeste/norte a partir das 1500Z (12:00 HL), mantendo estes setores até as 1850 (16:50 HL). Das 1700Z (14:00 HL) até às 1920Z (16:20 HL), foi registrada a presença de nuvens CB e trovoadas, além da ocorrência de chuvas, com variação de intensidade de leve a forte. Houve também três registros de rajadas, cuja máxima velocidade alcançou os 35 KT ( $65 \text{ Km.h}^{-1}$ ) às 1705Z (14:05 HL).

O registro destas variáveis indicou a presença da intensa convecção sobre o SBBE, a qual restringiu a visibilidade horizontal total e o alcance visual da pista para valores mínimos de 2000 m e 1000 m, respectivamente, às 1900Z (16:00 HL). O teto alcançou apenas 800 ft de altura, com céu nublado (5 a 6 oitavos). Estas condições de baixa visibilidade e teto baixo limitaram o SBBE a realizarem apenas operações IFR por duas horas e vinte minutos, ou seja, 1700Z até 1920Z (Tabela 5.13).

Na imagem do satélite GOES de 1800Z (15:00 HL) do dia 06 de março de 2012 são observados vários núcleos convectivos sobre todo o centro e norte do País, realçados pela temperatura do topo das nuvens de até  $-60^\circ$  (Figura 5.33a). Na Figura 5.33b destacou-se uma formação convectiva, menor em extensão horizontal se comparado aos demais núcleos, paralela a linha costeira do Rio Pará e perpendicular à costa Oceânica, mais precisamente sobre as microrregiões paraenses do Salgado, Castanhal, Cametá, além da Região Metropolitana de Belém. A temperatura de brilho do topo das nuvens neste horário indicava a presença de nuvens CB sobre a área do SBBE, com temperatura do topo de apenas  $-40^\circ\text{C}$ .

Após 1 hora e 30 minutos, às 1930Z (16:30 HL) foi observado o aumento da quantidade de nuvens convectivas sobre toda a Região Amazônica (Figura 5.34a), no entanto, sobre Belém as nuvens convectivas haviam reduzido e estavam menos intensas, com temperatura de brilho do topo de  $-30^\circ\text{C}$  (Figura 5.34b).



Tabela 5.13 Dados observados em superfície no Aeroporto Internacional de Belém em 06 e 07 de março de 2012. Fonte: REDEMET.

Dia/ Hora (UTC)	Vento			Visibilidade horizontal			Tempo presente		Nebulosidade			Temperatura		Pressão atmosférica (hPa)
	Direção (°)	Velocidade (KT)	Rajada (KT)	Total (m)	Setorizada (m/setor)	Alcance visual Pista Principal (m)	1ª	2ª	Base mais baixa (ft)	Quantidade base mais baixa (oitavos)	TCU ou CB	Ar (°C)	Ponto de Orvalho (°C)	
06/0700	090	3	não	>10000	não	>10000	não	não	1700	1 a 2	não	25	23	1009
06/0800	100	2	não	>10000	não	>10000	não	não	2000	1 a 2	não	25	23	1009
06/0900	110	3	não	>10000	não	>10000	não	não	1700	1 a 2	não	25	23	1010
06/1000	110	3	não	>10000	não	>10000	não	não	1700	1 a 2	não	25	23	1010
06/1100	120	2	não	>10000	não	>10000	não	não	1500	1 a 2	não	26	24	1011
06/1200	060	5	não	>10000	não	>10000	não	não	1500	1 a 2	não	28	24	1012
06/1300	050	9	não	>10000	não	>10000	não	não	1800	3 a 4	não	29	24	1012
06/1400	060	9	não	>10000	não	>10000	não	não	2000	5 a 6	não	30	23	1012
06/1500	040	9	não	>10000	não	>10000	não	não	2500	5 a 6	não	31	23	1011
06/1600	050	6	não	>10000	não	>10000	não	não	2500	5 a 6	TCU	33	22	1010
06/1700	340	14	não	3000	não	3000	Trovoada	Chuva Moderada	1000	5 a 6	CB	30	24	1009
06/1705	060	25	35	1000	não	2000	Trovoada	Chuva Forte	800	5 a 6	CB	24	19	1010
06/1735	360	8	não	>10000	3000/SW	>10000	Trovoada	Chuva Leve	1500	3 a 4	CB	25	23	1008
<b>06/1800*</b>	<b>340</b>	<b>4</b>	<b>não</b>	<b>&gt;10000</b>	<b>não</b>	<b>&gt;10000</b>	<b>não</b>	<b>não</b>	<b>2000</b>	<b>5 a 6</b>	<b>CB</b>	<b>27</b>	<b>24</b>	1008
06/1850	070	14	30	2000	não	2000	Trovoada	Chuva Forte	800	5 a 6	CB	26	24	1009
06/1900	080	16	26	2000	não	1000	Trovoada	Chuva Forte	800	5 a 6	CB	25	22	1009
06/1920	070	4	não	6000	não	>10000	Trovoada	Chuva Leve	1500	5 a 6	CB	24	21	1008
06/2000	060	4	não	>10000	não	>10000	não	não	2500	1 a 2	TCU	25	22	1007
06/2100	050	9	não	>10000	não	>10000	não	não	2000	1 a 2	não	26	22	1007
06/2200	090	10	não	>10000	não	>10000	não	não	1500	3 a 4	não	26	23	1009
06/2300	020	7	não	>10000	não	>10000	não	não	1500	3 a 4	não	26	23	1009
07/0000	060	3	não	>10000	não	>10000	não	não	<30000	não	não	25	23	1010
07/0100	050	9	não	>10000	não	>10000	não	não	<30000	não	não	25	22	1010
07/0200	030	2	não	>10000	não	>10000	não	não	<30000	não	não	25	23	1012

\* A observação foi mantida como o divulgado na REDEMET, no entanto a mensagem encontra-se com erro de codificação, pois segundo o MCA 105-2, quando há inserção de CB no grupo de nuvens, também deveria ser inserido “trovoada (TS)” no grupo de condição de tempo.

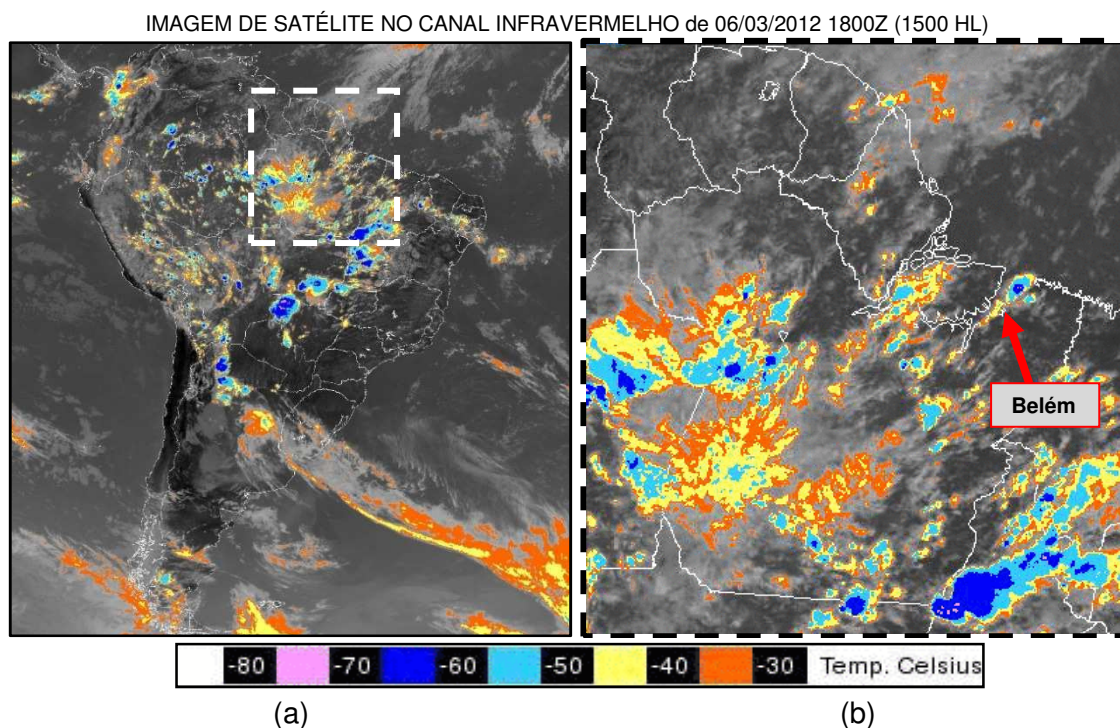


Figura 5.33 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 06 de março de 2012 às 1800Z (15:00 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

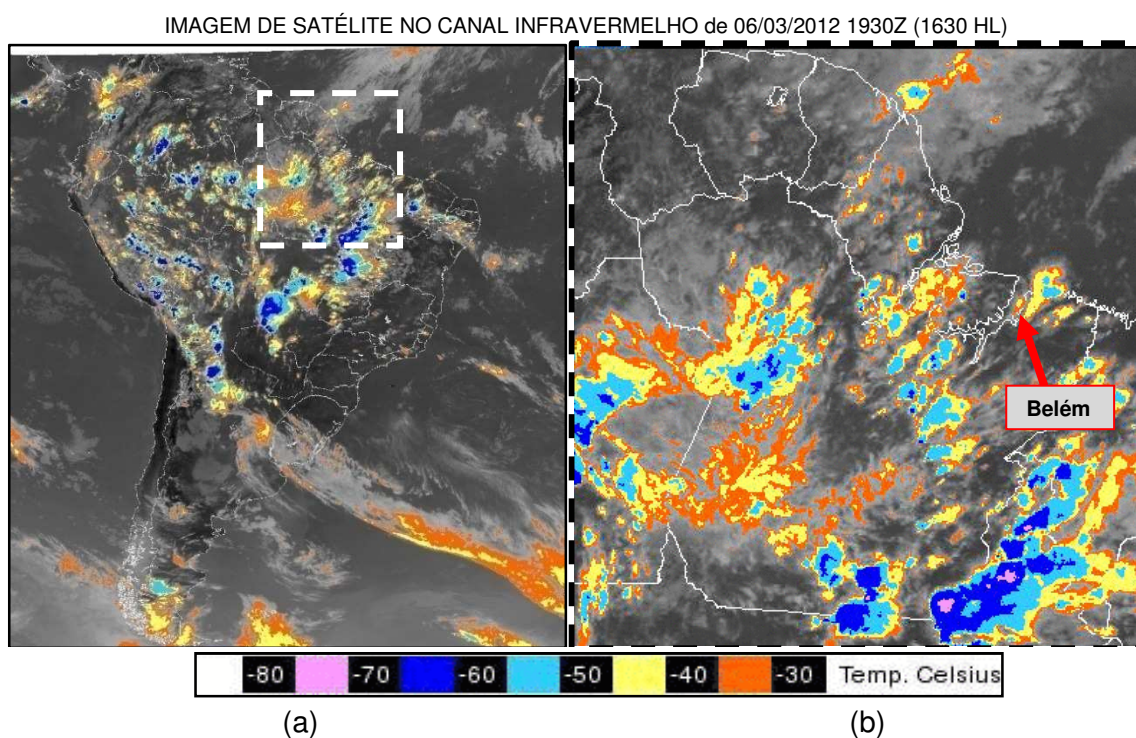


Figura 5.34 Imagem do Satélite GOES no canal infravermelho do dia 06 de março de 2012 às 1930Z (16:30 HL): (a) América do Sul e (b) Norte do Brasil, com destaque para Belém-PA.

A distribuição espacial de ROL, média de seis horas (1800Z a 2359Z ou 15:00 HL a 20:59 HL) é apresentada na Figura 5.35 e mostrou valores menores que  $180 \text{ W.m}^{-2}$  na maior parte do Pará, incluindo Belém. Este baixo valor de ROL é peculiar da presença de nuvens densas e de convecção profunda (KOUSKY, 1988; ZHANG, 1993; LAU et al.,1997).

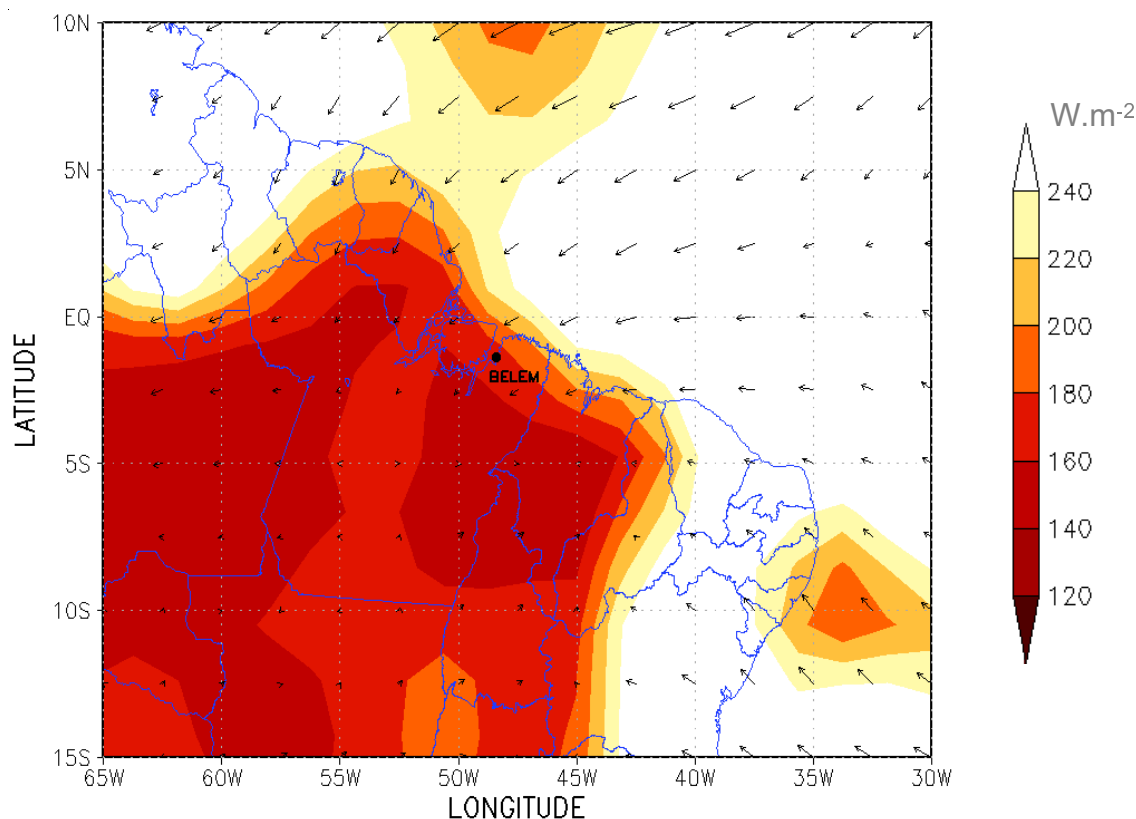


Figura 5.35 Radiação de onda longa emergente e vento em 1000 hPa média de 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no centro e norte do Brasil.

Na média de 1800Z a 2359Z (15:00 HL a 20:59 HL) da circulação e convergência de umidade próximo da superfície (1000 hPa) notou-se uma área de confluência dos ventos no Oceano Atlântico desde  $2^{\circ}\text{N}$  até a costa nordeste paraense e noroeste maranhense. A convergência de umidade média apresentou elevados valores da faixa que vai deste desde a Guiana Francesa até o Maranhão. Sobre Belém o fluxo dos ventos foi de nordeste, favorecendo o transporte de umidade do Oceano Atlântico para o continente, coincidindo com os máximos valores de convergência de umidade sobre Belém e em todo o norte e nordeste paraense (Figura 5.36).

A Figura 5.37 ilustra a média de seis horas (1800Z a 2359Z ou 15:00 HL a 20:59 HL) da circulação e divergência de massa no nível de 200hPa, onde observou-se uma área de difluência no centro-norte do estado do Pará, com máximos valores de divergência de massa na região, incluindo a área de Belém.



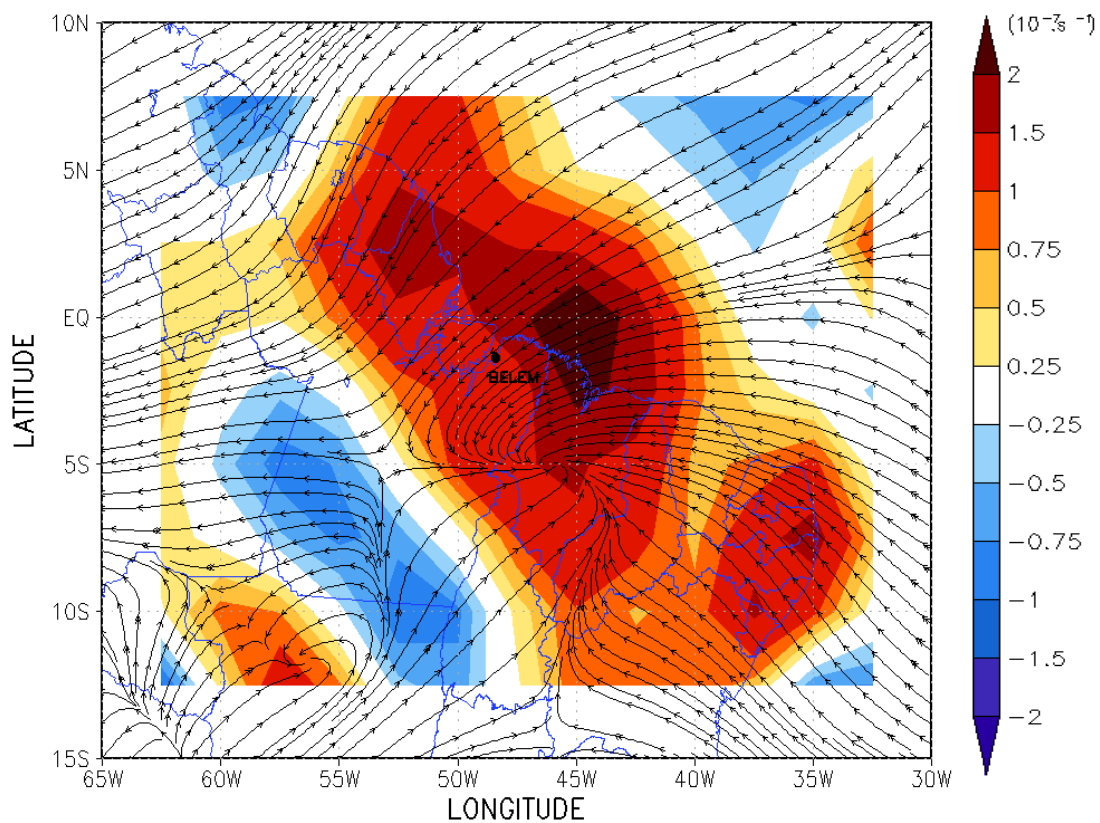


Figura 5.36 Convergência de umidade e circulação do vento em 1000 hPa, média de 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no norte do Brasil

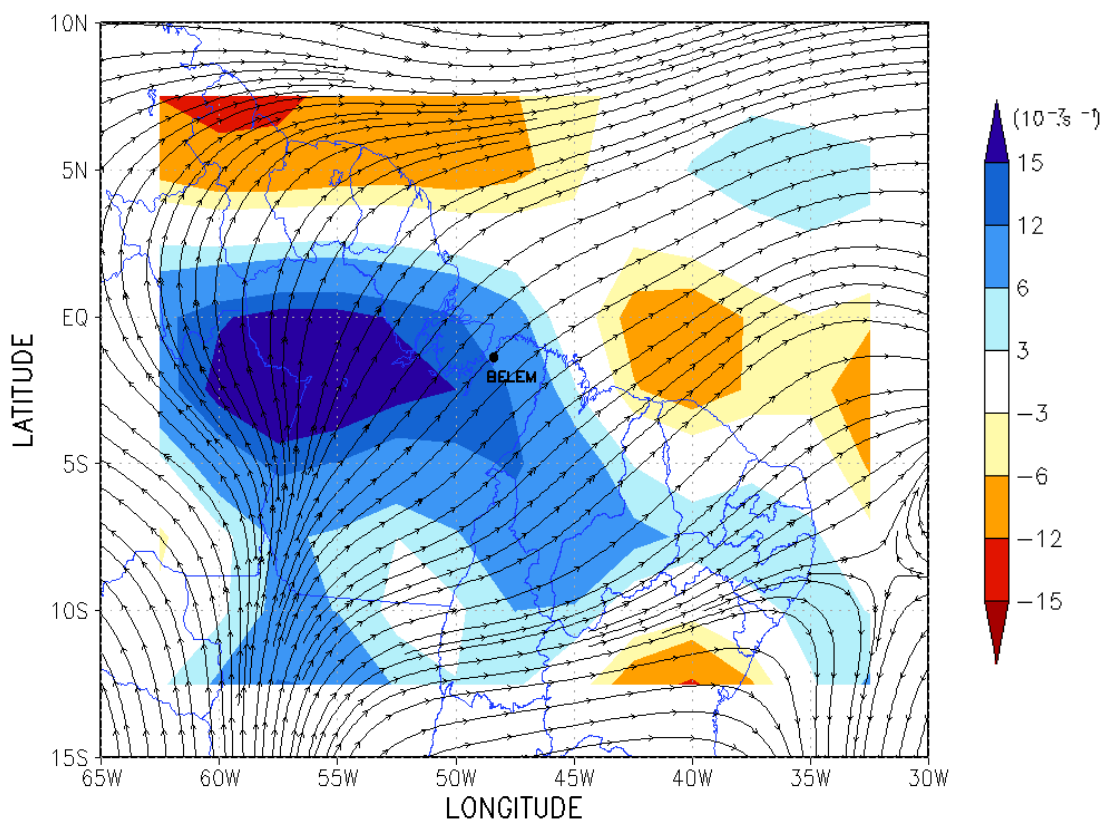


Figura 5.37 Divergência de massa e umidade e circulação do vento em 200 hPa, 1800Z à 2359Z em 06 de março de 2012 no norte do Brasil

Nos turnos de 1200Z a 1800Z (09:00 HL a 15:00HL) e 1800Z a 0000Z (15:00 HL a 21:00HL) do dia 06 de março de 2012, o F3 foi dominante, indicado pelos maiores escores associados a este fator, em relação a F1 e F2 (Tabela 5.14 e a Figura 5.38). Em ambos os turnos foi notada a presença de convecção profunda, identificada através do registro de CB e trovoadas no SBBE (Tabela 5.13). Além disso, durante o período que F3 foi representativo a dinâmica da atmosfera estava favorável à ocorrência de convecção em Belém.

Tabela 5.14 Escores temporais associados aos fatores obtidos através da análise fatorial, no dia 06 de março de 2012 sobre o SBBE.

DATA					ESCORE ASSOCIADO AO		
ANO	MES	DIA	HORA (Z)	HORA (LOCAL)	F1	F2	F3
2012	03	06	1200-1800	0900-1500	1,4	-1,2	2,1
2012	03	06	1800-0000	1500-2100	-0,2	-2,1	4,8

- \*F1 – Primeiro fator,
- F2 – Segundo fator
- F3 – Terceiro fator

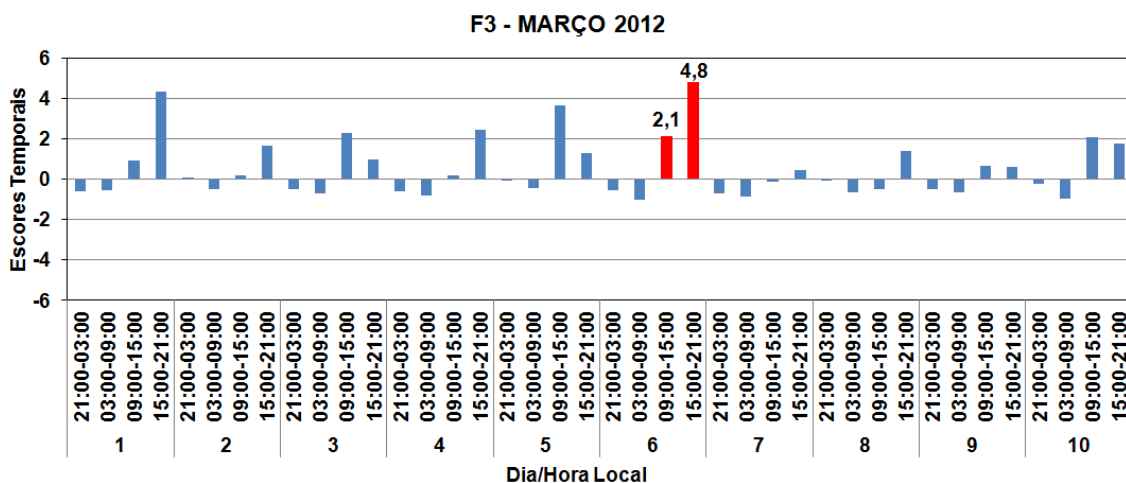


Figura 5.38 Série temporal dos escores em turnos de seis horas, que representam o terceiro fator rotacionado (F3) obtidos através da análise fatorial aplicada aos dados do Aeroporto Internacional de Belém de 1 a 10 de março de 2012.

De acordo com as características de grande escala e de escala local, notou-se que o desenvolvimento da convecção sobre o SBBE se deu pela interação da ZCIT com a circulação da brisa marítima, proveniente da proximidade do Atlântico e da

presença do Rio Pará à oeste/noroeste de Belém. Oliveira e Fitzjarrald (1993), Silva Dias et al. (2004) e Souza Júnior, et al. (2006), também identificaram a ocorrência da circulação de brisa fluvial em rios da Amazônia. Portanto, o F3 foi o fator físico responsável pela restrição operacional do SBBE, associado com a redução de teto e visibilidade ocorrida no dia 06 de março de 2012.

## 6 CONCLUSÃO

Os padrões atmosféricos encontrados através da aplicação da AF aos dados meteorológicos do SBBE durante o período chuvoso de 2003 a 2012 (período escolhido devido terem sido computados maiores valores ocorrência de mensagens SPECI) foram três.

- O F1 apresentou o domínio do aquecimento/resfriamento diurno da superfície.
- O padrão secundário F2 que regeu as condições de tempo ao longo do período chuvoso dos anos estudados foi o qual representou a presença do teor de umidade próximo à superfície, através dos mecanismos da variabilidade climática, as quais foram associadas com as anomalias de TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico.
- E o terceiro padrão atmosférico F3 foi associado com a presença de convecção profunda, e conseqüentemente, de tempestades, as quais foram promovidas pela influência das circulações locais sobre área em que se localiza do SBBE.

Através da avaliação da frequência de ocorrência dos fenômenos meteorológicos associados ao estabelecimento das condições de tempo adverso, que são visibilidade horizontal menor ou igual a 5000 metros, teto igual ou menor que 450 metros, alcance visual do piloto em relação as luzes de borda ou de eixo da pista principal em condições de visibilidade horizontal menor que 2000 metros, nevoeiro, névoa úmida, chuva leve, chuva moderada e chuva forte, pode ser identificado os padrões atmosféricos que estavam associados ao estabelecimento dos mesmos.

O terceiro fator obtido pela AF (F3) foi o qual apresentou as maiores frequências do registro das variáveis, que tem relação com o estabelecimento das condições meteorológicas adversas no SBBE. Em outras palavras, o fator associado à convecção profunda, e conseqüentemente aos episódios de tempestades foi o qual melhor rastreou a ocorrência de condições adversas de tempo, associados com a restrição de teto e visibilidade no SBBE.

Além disso, os quatro estudos de casos selecionados através da ocorrência de condições adversas de tempo e restrições operacionais, validaram os resultados obtidos através da AF, ratificando que de fato o F3 foi dominante durante os períodos de maior limitação de teto e visibilidade, que permitiram a mudança nas operações de VFR para IFR no SBBE.

Na sequencia deste trabalho, pode-se sugerir que a mesma metodologia seja aplicada para outros locais do Brasil no intuito de identificar outros padrões atmosféricos que promovem as condições de tempo nos aeroportos, assim como dos

padrões que estão associados com as condições de tempo adversos que impactam nas operações aeronáuticas. Outra sugestão é a inserção de dados do perfil vertical da atmosfera, sejam de radiossondagens ou provenientes de radar meteorológico em estudos que detectem padrões atmosféricos relacionados com condições adversas de tempo em aeroporto, pois certamente serão encontrados padrões atmosféricos que evidenciem o grau de instabilidade atmosférica, por exemplo, que influenciam nas operações aeronáuticas nos aeroportos.

## REFERÊNCIAS

ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 166, n. 3, p. 505-524, Mar. 1988.

ADLER, N.; BERECHMAN, J. Measuring airport quality from the airlines' viewpoint: an application of data envelopment analysis. **Transport Policy**, Amsterdam, v.8, n. 3, p. 171-181, Jul. 2001.

ALCÂNTARA, C. R. et al. Verification of the role of the low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, New York, v.100, n. 1, p. 36-44, Apr. 2011.

ALLAN, S. S.; GADDY, S. G. Delay Reduction at Newark International Airport Using Terminal Weather Information Systems. In: CONFERENCE ON AVIATION RANGE AND AEROSPACE METEOROLOGY, 9, 2002, Orlando, **Anais...** Orlando: AMS, 2000, p. 3.21 -3.27.

AMANAJÁS, J.C.; BRAGA, C. C. Padrões Espaço-Temporal Pluviométricos na Amazônia Oriental Utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.27, n.4, p.423-434, dez. 2012.

ATKINSON, B.W. **Meso-scale atmospheric circulations**, London, Academic Press, 1981, 495 p.

ATLAS INTERNACIONAL DE NUVENS. Brasília: Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Meteorologia, 1972.

AVISSAR, R; PIELKE, R. A. A Parameterization of Heterogeneous Land Surfaces for Atmospheric Numerical Models and Its Impact on Regional Meteorology. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 117, n. 10, p. 2113-2136, Oct. 1989.

BARBIERI, L.F.P. **Episódios significativos de ventos de través no aeroporto de Petrolina: um estudo de condições meteorológicas adversas em operações de pouso e decolagem**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

BARBOSA, R. L. **Interação das perturbações convectivas iniciadas na costa Norte do Brasil com distúrbios ondulatórios de leste**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, R. L.; OYAMA, M. D.; MACHADO, L. A. T. Climatologia das perturbações convectivas Iniciadas na Costa Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.21, n.1, p.107-117, abr. 2006.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, Weather and Climate**. 4th edition. Methuen, New York, 1982, 407p.

BASTOS, T. X.; et al. **Aspectos Climáticos de Belém nos Últimos Cem Anos**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 31p. 21cm.

BETTS, A.; SILVA DIAS M.A.F. Unsaturated downdraft ther-modynamics in cumulonimbus. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 36, n. 6, p. 1916-1971, Jun. 1979.

BETTS, A. et al. Surface Diurnal Cycle and Boundary Layer Structure over Rondônia During the Rainy Season. **Journal Geophysic Reseach**. Washington, v.107, n. D20, p.32 1-14, Oct. 2002.

BETTS, A. et al. The Amazonian Boundary Climate: Main Features. In: Amazonia and Global Change, 2009, Washington, **Anais...** Washington: AGU, 2009, v. 186, p. 163-181.

BOLETIM CLIMÁTICO DA AMAZÔNIA. Manaus: Sistema de Proteção da Amazônia - SIPAM. Mensal. Disponível em:< <http://www3.sipam.gov.br/teste/boletim.html>>. Acesso em jun. de 2014.

BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**, Boston, v.108, n.7, p.1046-1053. Jul. 1980.

BOUROCHE, J- M; SAPORTA, G. **Análise de Dados**. Rio de Janeiro: Zahar, 1982. 117p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Manual do Comando da Aeronáutica 53-1. **Manual do especialista em informação aeronáutica**, Brasília, DF, 2008. 285p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Instrução do Comando da Aeronáutica 100-16 - **Sistema de pouso por instrumentos (ILS)**, Brasília, DF, 2011. 31p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Manual do Comando da Aeronáutica 105-10. **Manual de Códigos Meteorológicos**, Brasília, DF, 2014a. 170p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Manual do Comando da Aeronáutica 105-2. **Manual de Estações Meteorológicas de Superfície**, Brasília, DF, 2014b. 58p.

CAMPONOGARA G. **Extremos de precipitação diária em Belém, Pará, e estrutura vertical da atmosfera**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; SILVA DIAS, M. A. F. Intraseasonal large-scale circulations and mesoscale convective activity in tropical South America during the TRMM-LBA campaign. **Journal Geophysic Reseach**. Washington, v.107, n. 9, p.1-20, Oct. 2002.

CERQUEIRA, F. S. et al. Ameaça à Aviação. **Revista CFOE**, Belo Horizonte, v. 3, n. 2, p. 93-99, set-dez. 2005.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS. **Estatística dos acidentes da aviação civil**. 2011. Disponível em: <<http://www.cenipa.aer.mil.br>>. Acesso em 12 de dezembro de 2011

CLARK, D.A.; WILSON, F.W. **The Marine Stratus Initiative at San Francisco International Airport**, Lexington: Federal Aviation Administration, 1996, 56p.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F; NOBRE C. A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 4, n.11, p. 34-40, nov. 1989.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F; NOBRE C. A.: Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 123, n.11, p. 3163-3174, Nov. 1995.

COHEN, J.C.P. et al. Linhas de Instabilidade formadas ao longo da costa Atlântica e no Interior do continente: Estudo de casos com modelo de alta resolução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. 1 CD-ROM.

CORRAR, L. J. et a., **Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, 2007.

CORREIA, M.F.; SILVA DIAS, M.A.F. Variação do Nível do Reservatório de Sobradinho e Seu Impacto Sobre o Clima da Região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n.1, p. 157-168, jan/mar, 2003.

CORREIA, M.F.; SILVA DIAS, M.A.F; SILVA ARAGÃO, M.R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho Lake area. Part two: a regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Netherlands, v. 94, n.1, p. 115 – 128. Nov. 2006.



COSTA, M. M. G. Meteorologia aeronáutica no Aeroporto de Guarulhos. In: SIMPÓSIO DE TRANSPORTE AÉREOS, 7, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COMAER, 2008. p 539-550.

COUTINHO, E. C. **Estudo das características atmosférica na região do Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA)**. 2001. 141 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

COUTINHO, E. C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste na região do centro de lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 22, n. 2, p.193–203, ago. 2007.

DINIZ, M. C. S.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S. Convecção profunda no submédio do Rio São Francisco: uma avaliação das condições atmosféricas na área do aeroporto de Petrolina – PE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n.3 p. 273-285, dez. 2004.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 22, n. 2. p. 241-254, Aug. 2007.

EVANS, J. E. et al. **Weather Sensing and Data Fusion to Improve Safety and Reduce Delays at Major West Coast Airports**, Lexington: Federal Aviation Administration, 1999, 81 p.

FERREIRA, D. B. da S. **Eventos extremos da Zona de Convergência Intertropical sobre o Atlântico durante o período chuvoso da Amazônia Oriental**. 2008. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

FERREIRA, W. R. S.; PEREIRA, P. L. Análise Sinótica do Verão/Outono de 2009/10 da Cidade de Belém, relacionado com padrões oceânicos adjacentes. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBMET, 2010. 1 CD ROM.

FERREIRA, M. M. et al. Climatologia da Precipitação Anual e Sazonal no Leste da Amazônia. In. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBMET, 2011. 1 CD-ROM.

FERREIRA, D. B da S; SOUZA, E. B.; MORAES B. C. Ciclo Horário da precipitação no leste da Amazônia durante o período chuvoso. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v.13. n. 9, jul-dez. 2013.

FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western tropical South America. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 5, n.6 p. 36-44, jun. 1990.

FOGACCIA, C. V. C. Análise de eventos de turbulência e cisalhamento do vento na área do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 2001. 128f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FOGACCIA, C. V. C.; PEREIRA FILHO, A. J. Turbulência e cisalhamento do vento na área do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. 1 CD-ROM.

FREITAS, E. D. **Circulações Locais em São Paulo e sua Influência na Dispersão de Poluentes**. 2003. 176f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GAN, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera nas latitudes subtropicais da América do Sul e leste do Brasil**. 1982. 65 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.1, n.1, p.19-28. jun. 1986.

GARSTANG, M.; FITZJARRALD, D.R. **Observations of surface to atmosphere interactions in the tropics**. New York: Oxford-University-Press, 1999. 405p. Glossário da *American Meteorological Society* (AMS). Disponível em: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main\\_Page](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page)>. Acesso em: 20 maio 2014

GOMES, N. de V. **Estudo Comparativo da distribuição espaço-temporal da precipitação na Amazônia Oriental**. 2008. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

GOMES, N. V.; CARVALHO, M. A. V. Eventos Extremos de Precipitação e Sua Influência na Operação Aeronáutica: uma Análise Preliminar para o Aeroporto de Macapá-AP. In. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBMET, 2011. 1 CD-ROM.

GOMES, N. V.; CARVALHO, M. A. V.; JESUS, E. S. Padrões de Precipitação no Aeródromo de Macapá-AP: Análise dos Principais Aspectos da Variação Diurna. In. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4., 2011, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBMET, 2011. 1 CD-ROM.

GRABOWSKI, W. W.; MONCRIEFF, M. W. Moisture-convection feedback in the tropics. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 130, n. 640, p. 3081–3104. Dec, 2004.

HAIR JUNIOR, J.F. et al. **Multivariate data analysis with readings**. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 745 p.

HAIR JUNIOR, J. F. et al. **Multivariate Data Analysis**. 6<sup>a</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006. 899 p.

HANSEN, M.; BOLIC, T. Normalization of Airport and Terminal Area Operational Performance: A Case Study of Los Angeles International Airport. In: USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT R&D SYMPOSIUM, 4, 2001, New México. **Anais...**, New México: University of California, Berkeley, 2001. 1 CD ROM.

HASTENRATH, S., HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*. San Francisco, v.103, n.435. p.77-92, Jan.1977.

HASTENRATH, S.; LAMB, P. Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial Atlantic. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 105, n.8, p. 1019-1023, Aug. 1977.

HASTENRATH, S. In search of zonal circulations in the equatorial Atlantic sector from the NCEP-NCAR reanalysis. **International Journal of Climatology**, Washington, v.21, n. 1, p.37-47. Jan. 2001.

HERDIES, D. L. et al. The moisture budget of the bi-modal pattern of the summer circulation over South America. **Journal Geophysic Reseach**. Washington, v.107, n. D20, p.1-20. Oct. 2002.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Populacional 2010**. 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados\\_do/PA2010.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_do/PA2010.pdf)> Censo Populacional 2010. Acesso em: 11 de dezembro de 2010.

KAISER, H. F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. **Psychometrika**, New York, v. 23, n.3, p. 187–200, Sep.1958.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Washington, v.77, n.3, p. 437-471, Mar. 1996.

KODAMA, Y. M. Large -scale common features of sub-tropical precipitations zone (The Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Tokyo, v. 70, n.4 p. 813-835, Aug.1992.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n.4, p. 488-4984, Apr. 1980.

KOUSKY, V. E. Pentad out going long wave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.3, n. 1, p. 217-231, jun. 1988.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T. A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. **Acta Amazonia**, Manaus, v. 11, n. 4, p. 743–753, set.1981.

LAU K.M., WU , H.T.; BONY, S. The Role of Large-Scale Atmospheric Circulation in the Relationship between Tropical Convection and Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, New York, v. 10, n.5, p. 381–392, Mar.1997.

LIEBMANN, B.; MARENGO J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, New York, v.14, n. 22, p. 4308-4318, nov. 2001.

LIMA, A. A. **A variabilidade da precipitação e suas relações com as medidas por satélite, radar e divergência do vento em altos níveis durante o LBA-WETAMC. 2001.** 164 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B.; FERREIRA D. B. da S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v.12. n. 9, jan-jul. 2013.

LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction.** Cambridge: Statistical Forecasting Project, 1956, 48 p.

LYRA, R. F. F. et al. Efeitos do desmatamento sobre a Termodinâmica da Baixa Atmosfera. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO E IBÉRICO DE METEOROLOGIA, 2., 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1994. p. 8184.

MACHADO, L. A. T., ROSSOW, W. B. Structural Characteristics and Radiative Properties of Tropical Cloud Clusters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 121, n.12, p. 3234-3260, Dec. 1993.

MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H. Características dinâmicas e termodinâmica da convecção observadas na Amazônia durante o AMC/LBA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 1 CD-ROM.

MACHADO, L. A. T., LAURENT, H., LIMA, A. A. The diurnal march of the convection observed during TRMM-WETAMC/LBA. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, Washington, v. 107, n. D20, Sept-Oct. 2002.

MACHADO, L. A. T. et al. Seasonal and diurnal variability of convection over the Amazonia: a comparison of different vegetation types and large scale forcing. **Theoretical and Applied Climatology**, New York, v. 78, n.1, p. 61-77, Jun. 2004.

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 28, n. 5, p. 702-708, Jul. 1971.

MARENGO, J. A. et al. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, Boston, v.14, n. 5, p.833-852. Mar. 2001.

MARENGO, J. et al. Eventos extremos sazonais: secas de 2005 e 2010 e enchentes de 2009. MARENGO, JA. E BETTS, R. (Coord.). **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE/MOHC, 2011, p. 21-24.

MARKOVIC, D., HAUF, T.; ROHNER, P.; SPEHR, U. A statistical study of the weather impact on punctuality at Frankfurt Airport. **Meteorological Applications**, New York, v.15, n.2 p. 293-303, Jun. 2003.

MCCREA, M. V.; SHERALI, H. D.; TRANI, A. A. A probabilistic framework for weather based rerouting and delay estimations within an Airspace Planning model. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, New York, v.16, n. 4, p. 410-431, Aug. 2008.

MERRIT, E. S. Easterly waves and perturbations: a reappraisal. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.3, n. 4, p. 367-382, Aug.1964.

MOHR, K. I.; FAMIGLIETTI, J.S.; ZIPSER, E.J. The contribution to tropical rainfall with respect to convective system type, size, and intensity estimated from the 85-GHz ice scattering signature. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 38, n. 5, p. 596-606, May. 1999.

MOLION, L. C. B.; KOUSKY, V. E. **Uma contribuição à climatologia de dinâmica da troposfera tropical sobre a Amazônia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1981.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 107-117, dez. 1987.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 17, n.1, p. 1-10, jun. 2002.

MOTA, M. A. S.; NOBRE, C. A. Relação da variabilidade da energia potencial convectiva disponível (CAPE) com a precipitação e a alta da Bolívia durante a campanha Wet-AMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 21, n. 3b, p. 344-355, dez. 2006.

NCEP/NCAR. National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric. Research. Disponível em: <[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)>. Acesso em: junho de 2014.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. São Paulo, Brasil: Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente. SUPREN/IBGE, 1979. 421 p.

NOBRE P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, Boston, v. 9, n. 10, p. 2464-2479. Oct.1996.

Organização de Aviação Civil Internacional. **Manual on Low-level Windshear and Turbulence**, Montréal, 2005, 211 p.

OLIVEIRA, A. S., **Interações entre sistemas na América do sul e convecção na Amazônia**. 1986. 246 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OLIVEIRA, A.P.; FITZJARRALD, D. R. The Amazon River breeze and the local boundary layer: Observations. **Boundary Layer Meteorology**, Netherlands, v.63, n. 1-2, p.141-162, Feb. 1993.

PANDZIC, K. Principal Component analysis of precipitation in the Adriatic-Pannonian area of Yugoslavia. **Journal of Climatology**, New York, v.8, n. 4 p. 357-370, Jul/Aug. 1988.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. **Climate Dynamics**, Netherlands, v. 17, n. 2, p.205-212, Jan. 2001.

PIVA, E. D.; FEDOROVA, N. Um estudo sobre a formação de nevoeiro de radiação em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 14, n.2 p. 47-62, dez.1999.

POTTS, R. J. Low altitude wind shear at major Australian airports and the risks to aviation. In: CONFERENCE ON AVIATION, RANGE, AND AEROSPACE METEOROLOGY, 10, 2002, Portland. Anais... Portland: American Meteorological Society, 2002. 1 CD-ROM.

PREISENDORFER, R. **Principal Component analysis in meteorology and oceanography**. Amsterdam: Elsevier, 1988. 425 p.

QUEIROZ, J. N. et al. Fatores físicos na atmosfera do Semiárido Brasileiro em janeiro de 2004. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 7, n. 5, p. 990-1001, 2014.

RAMÍREZ, M. C. V.; KAYANO, M. T.; FERREIRA, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989. **Atmosfera**, México, v. 12, n. 2, Abr.1999.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A.; FORTES, L. T. G. (Ed.). Normais climatológicas do Brasil, 1961-1990, 2009.

RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with Southern oscillations. **Theoretical and Applied Climatology**, Netherlands, v. 42, n. 2, p.81-91, Jun. 1990.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, New York, v.6, n.3, p. 293-335, Jan.1986.

RIEHL, H. **Waves in the easterlies and polar front in the tropics**. Chicago: Chicago University, Department of Meteorology, 1945. 79p.

RIEHL, H.. **Tropical meteorology**. New York: McGraw-Hill, 1954. 392p.

ROBINSON, P. The influence of weather on flight operations at Atlanta hartsfield international airport. **Weather and Forecasting**, Boston, v.4, n. 4, Dec, 1989.

ROCHA, C H. E. A. et al. Evolução da camada limite atmosférica no Oeste da Amazônia – comparação entre as estações seca e chuvosa - parte 1: em área de floresta nativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. p. 21652169.

RONCHAIL, J. et al. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the Equatorial Pacific and the Tropical Atlantic Oceans. **International Journal of Climatology**, New York, v.22, n. 9, p. 1663-1686, Jun. 2002.

SANTOS, A H M. et al. Distúrbio Ondulatório de Leste e seus impactos na cidade de Salvador. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 27, n.3, p. 355-364, set. 2012.

SANTOS, S. R. Q. et al. Efeito de Brisas Marítimas na Cidade de Belém-PA: Utilizando Análise em Multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 5, n. 5, p. 1110-1120, 2012.

SASSE, M., HAUF, T. A study thunderstorm-induced delays at Frankfurt Airport, Germany. **Meteorological Applications**. New York, v.10, n.1 p. 21-30, Mar. 2003.

SHAWB, A.J. **Eletronic Classroom**, 2007. Disponível em:  
<<http://www.utexas.edu/ssw/eclassroom/schwab.html>> Acesso em: 22 junho de 2014.

SILLS, D.M.L. **Lake and land breezes in southwestern Ontario: observations, analyses and numerical modeling**. 1998. 338f. Tese (PhD) - York University, Canadá, 1998.

SILVA. A. B. P. **Estudos de dois casos extremos de precipitação sobre a Costa Leste do Nordeste do Brasil**. 2002, 102 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2002.

SILVA DIAS, M.A.F. et al. River Breeze Circulation in Eastern Amazonia: Observations and Modeling Results. **Theoretical and Applied Climatology**, Netherlands, v.78, n. 1, p. 111-121. Jun. 2004.

SILVA, F. D. S. et al. Convecção linearmente organizada na área de Petrolina, Semi-árido do Nordeste do Brasil: aspectos em meso e grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p 292-304, set. 2008.

SOUZA, E. et al. On the influences of the el Niño, la Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazônica**, Manaus, v.30, n. 2, p. 305-318, abr/jun. 2000.



SOUZA, A. S.; NECHET, D. Influência de sistema frontal na Amazônia Oriental: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. 1 CD-ROM.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n. 2, p 133-122, dez 2004.

SOUZA, E. B, KAYANO, M. T., AMBRIZZI T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theoretical and Applied Climatology**. Netherlands, v. 81, n. 3, p. 177–191, Jul. 2005.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the Intraseasonal Rainfall over Tropical Brazil by the Madden– Julian Oscillation. **International Journal of Climatology**, New York, v.26, n.13, p. 1759-1776, Apr. 2006.

SOUZA JÚNIOR, J. A. et al. Simulação de alta resolução das circulações locais no leste da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBMET, 2006. 1 CD ROM.

SOUZA, D. O. **Simulação de alta resolução das circulações atmosféricas locais na região da foz do rio Amazonas**. 2007. 175f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

STULL, R. B. Na **Introduction on Boundary Layer Meterology**. 1ª Ed. London: Kluwer Academic Publishers, 1988. p. 666.

TAVARES, J. P. N. Acidente aéreo ocorrido em Belém em 1º de julho de 2003: um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. 1 CD-ROM.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 2ª Ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Imprensa universitária, 2000. p. 499.

VILLAR, J. C. E. et al. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, New York, v. 29, n. 11, p. 1574-1594, Sep. 2009.

ZENG, N. et. al. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, Londres, v. 3, n. 1, p. 1-6, Jan. 2008.

ZHANG C. Large-scale variability of atmospheric deep convection in relation to sea surface temperature in the tropics. **Journal of Climate**, Boston, v. 6, n. 10, p. 1898-1913. Oct.1993.

**ANEXO A – Sequência de mensagens meteorológicas de aeródromo regular (METAR) e especial (SPECI) para os períodos dos estudos de casos analisados, que originaram as Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.**

- Caso 1: 26 de abril de 2003

SBBE 260600Z 12006KT 9999 SCT012 BKN070 23/23 Q1012=  
 SBBE 260700Z 10004KT 9999 -RA BKN012 BKN070 23/23 Q1012=  
 SBBE 260800Z 09003KT 6000 -RA BKN012 BKN070 23/23 Q1012=  
 SBBE 260900Z 11005KT 8000 -RA SCT015 BKN070 23/23 Q1012=  
 SBBE 261000Z 15004KT 9999 FEW015 BKN070 23/23 Q1012=  
 SBBE 261100Z 11003KT 9999 FEW015 BKN070 24/24 Q1013=  
 SBBE 261200Z 11005KT 9999 FEW015 BKN070 25/24 Q1014=  
 SBBE 261300Z 11006KT 9999 FEW017 BKN070 26/24 Q1014=  
 SBBE 261400Z 10003KT 9999 FEW017 BKN070 27/25 Q1014=  
 SBBE 261500Z 09003KT 9999 FEW017 BKN070 28/25 Q1013=  
 SBBE 261600Z 02002KT 9999 SCT017 BKN080 29/25 Q1013=  
 SBBE 261700Z 27004KT 9999 SCT017 BKN080 30/25 Q1012=  
 SBBE 261715Z 29003KT 2000 RA SCT017 BKN080 28/26 Q1012=  
 SBBE 261730Z 23002KT 4000E TS BKN015 FEW020CB BKN080 27/26 Q1012  
 RERA=  
 SBBE 261740Z 34002KT 2000 TSRA BKN015 FEW020CB BKN080 27/26 Q1012=  
 SBBE 261800Z 02012KT 3000 TSRA BKN015 FEW020CB BKN080 25/25 Q1011=  
 SBBE 261830Z 01004KT 4000 TS VCSH BKN015 FEW020CB BKN080 24/24 Q1011  
 RERA=  
 SBBE 261900Z 04005KT 9999 TS SCT017 FEW020CB SCT080 BKN300 24/24  
 Q1011 RERA=  
 SBBE 262000Z 02003KT 4000E TS VCSH SCT017 FEW020CB SCT090 BKN300  
 25/25 Q1011=  
 SBBE 262100Z 07003KT 9999 TS SCT017 FEW020CB SCT100 BKN300 25/25  
 Q1012=  
 SBBE 262200Z 07003KT 5000 -TSRA SCT017 FEW020CB SCT100 BKN300 25/25  
 Q1013=  
 SBBE 262300Z 08004KT 5000 -RA SCT017 SCT100 BKN300 25/25 Q1013 RETS=  
 SBBE 270000Z 09003KT 7000 -RA SCT017 SCT090 BKN300 24/24 Q1013=  
 SBBE 270100Z 10002KT 9999 SCT017 BKN090 24/24 Q1014=  
 SBBE 270200Z 09002KT 9999 SCT017 BKN090 24/24 Q1014 =

- Caso 2: 27 de abril de 2011.

SBBE 270600Z 12004KT 4000 -RA SCT010 BKN100 24/22 Q1010=  
 SBBE 270700Z 14002KT 9999 SCT008 BKN100 25/23 Q1010=  
 SBBE 270800Z 00000KT 9999 BKN008 BKN100 25/22 Q1011=  
 SBBE 270900Z 08001KT 9999 SCT010 BKN100 25/23 Q1010=  
 SBBE 271000Z 00000KT 9999 BKN009 BKN100 25/23 Q1012=  
 SBBE 271100Z 33003KT 9999 SCT013 BKN100 26/22 Q1012=  
 SBBE 271200Z 33003KT 9999 SCT013 BKN100 28/23 Q1013=  
 SBBE 271300Z 36004KT 9999 BKN017 BKN100 28/23 Q1013=  
 SBBE 271400Z 33005KT 9999 SCT017 SCT100 28/23 Q1013=  
 SBBE 271500Z 33006KT 9999 SCT020 BKN100 29/23 Q1012=

SBBE 271600Z 33005KT 9999 SCT020 BKN100 30/23 Q1011=  
 SBBE 271700Z 33005KT 9999 SCT020 FEW025TCU 30/23 Q1009=  
 SBBE 271800Z 34004KT 9999 SCT020 FEW025TCU SCT100 31/23 Q1008=  
 SBBE 271900Z 32006KT 9999 SCT020 FEW025TCU SCT100 32/24 Q1008=  
 SBBE 271948Z 11013KT 3000 -TSRA SCT012 BKN020 FEW025CB BKN100 27/23  
 Q1009=  
 SBBE 272000Z 11015KT 2000 R06./0500 -TSRA SCT008 BKN020 FEW025CB  
 BKN100 26/23 Q1009=  
 SBBE 272100Z 03003KT 3000 -TSRA SCT008 BKN020 FEW025CB BKN100 24/22  
 Q1010=  
 SBBE 272143Z 01003KT 5000 -TSRA FEW008 BKN020 FEW025CB BKN100 25/23  
 Q1011=  
 SBBE 272200Z 01006KT 7000 -TSRA FEW008 BKN020 FEW025CB BKN100 25/22  
 Q1011=  
 SBBE 272300Z 35003KT 7000 -RA FEW008 BKN020 FEW025TCU BKN100 25/23  
 Q1012 RETS=  
 SBBE 280000Z 30004KT 7000 -RA BKN017 BKN100 25/22 Q1012=  
 SBBE 280100Z 31002KT 9999 -RA SCT013 BKN100 26/23 Q1013=  
 SBBE 280200Z 29003KT 9999 SCT009 BKN100 26/23 Q1013=

- Caso 3: 02 de dezembro de 2011.

SBBE 010800Z 10005KT CAVOK 25/24 Q1009=  
 SBBE 010900Z 00000KT CAVOK 25/24 Q1010=  
 SBBE 011000Z 05004KT 8000 NSC 25/24 Q1010=  
 SBBE 011100Z 07008KT CAVOK 27/23 Q1011=  
 SBBE 011200Z 05010KT 9999 SCT017 BKN100 28/24 Q1012=  
 SBBE 011300Z 06011KT 9999 BKN023 BKN100 30/23 Q1012=  
 SBBE 011400Z 05007KT 9999 BKN023 BKN100 30/23 Q1011=  
 SBBE 011500Z 06005KT 9999 BKN023 FEW030TCU BKN100 31/23 Q1011=  
 SBBE 011600Z 16003KT 9999 BKN023 FEW030TCU BKN100 31/23 Q1010=  
 SBBE 011700Z 26005KT 9999 BKN025 FEW030TCU BKN100 31/23 Q1010=  
 SBBE 011800Z 31005KT 9999 SCT025 FEW030TCU BKN100 31/24 Q1009=  
 SBBE 011900Z 31007KT 9999 SCT025 FEW030TCU SCT100 30/24 Q1008=  
 SBBE 012000Z 35009KT 9999 FEW025 FEW030TCU SCT100 29/24 Q1008=  
 SBBE 012100Z 01007KT 9999 SCT025 BKN100 29/24 Q1009=  
 SBBE 012200Z 02005KT 9999 FEW025 SCT100 29/24 Q1009=  
 SBBE 012300Z 05006KT 9999 TS FEW025 FEW030CB SCT100 27/24 Q1010=  
 SBBE 020000Z 05009KT 9999 TS SCT025 FEW030CB SCT100 26/24 Q1011=  
 SBBE 020100Z 10009KT 9999 TS SCT015 FEW025CB SCT100 26/23 Q1011=  
 SBBE 020200Z 06009KT 9999 -TSRA SCT015 FEW023CB SCT100 25/24 Q1011=  
 SBBE 020300Z 05004KT 9999 -TSRA SCT010 FEW023CB SCT100 25/25 Q1011=  
 SBBE 020400Z 02004KT 9999 -TSRA SCT010 FEW023CB SCT100 25/25 Q1010=  
 SBBE 020500Z 03003KT 5000 -TSRA SCT009 FEW023CB BKN100 25/25 Q1010=  
 SBBE 020600Z 01003KT 6000 -TSRA SCT011 FEW023CB BKN100 25/25 Q1010=  
 SBBE 020700Z 05003KT 9999 SCT011 BKN100 25/25 Q1009 RETS=  
 SBBE 020800Z 08004KT 9999 SCT015 SCT100 25/25 Q1009=

- Caso 4: 6 de março de 2012.

SBBE 060600Z 07003KT 9999 FEW017 BKN100 25/23 Q1010=  
SBBE 060700Z 09003KT 9999 FEW017 BKN100 25/23 Q1009=  
SBBE 060800Z 10002KT 9999 FEW020 BKN100 25/23 Q1009=  
SBBE 060900Z 11003KT 9999 FEW017 BKN100 25/23 Q1010=  
SBBE 061100Z 12002KT 9999 FEW015 BKN100 26/24 Q1011=  
SBBE 061200Z 06005KT 9999 FEW015 BKN100 28/24 Q1012=  
SBBE 061300Z 05009KT 9999 SCT018 SCT100 29/24 Q1012=  
SBBE 061400Z 06009KT 9999 BKN020 30/23 Q1012=  
SBBE 061500Z 04009KT 9999 BKN025 31/23 Q1011=  
SBBE 061600Z 05006KT 9999 BKN025 FEW030TCU 33/22 Q1010=  
SBBE 061700Z 34014KT 3000 TSRA BKN010 FEW025CB 30/24 Q1009=  
SBBE 061705Z 06025G35KT 1000 R06/1000 +TSRA BKN008 FEW025CB 24/19  
Q1010=  
SBBE 061735Z 36008KT 9999 3000SW -TSRA SCT015 SCT020 FEW025CB BKN100  
25/23 Q1008 RERA=  
SBBE 061800Z 35004KT 9999 SCT015 BKN020 FEW025CB BKN100 27/24 Q1008  
RETSRA=  
SBBE 061850Z 07014G30KT 2000 R06/P2000 +TSRA BKN008 FEW025CB OVC100  
26/24 Q1009=  
SBBE 061900Z 08016G26KT 2000 R06/1000 +TSRA BKN008 FEW025CB OVC100  
25/22 Q1009=  
SBBE 061920Z 07004KT 6000 -TSRA SCT008 BKN015 FEW025CB OVC100 24/21  
Q1008 RERA=  
SBBE 062000Z 06004KT 9999 SCT020 FEW025TCU BKN100 25/22 Q1007  
RETSRA=  
SBBE 062100Z 05009KT 9999 FEW020 BKN100 26/22 Q1007=  
SBBE 062200Z 09010KT 9999 SCT015 BKN100 26/23 Q1009=  
SBBE 062300Z 02007KT 9999 SCT015 BKN100 26/23 Q1009=  
SBBE 070000Z 06003KT CAVOK 25/23 Q1010=  
SBBE 070100Z 05004KT CAVOK 25/22 Q1010=  
SBBE 070200Z 03002KT CAVOK 25/23 Q1012=