

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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rafaella de Araújo Aires Vilar

**CONDIÇÕES DE TEMPO SEVERO E FORMAÇÃO DE TORNADOS EM
BRASÍLIA-DF: UM ESTUDO DE CASO**

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2016



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia – PPGMet

DISSERTAÇÃO DE METRADO

**CONDIÇÕES DE TEMPO SEVERO E FORMAÇÃO DE TORNADOS EM
BRASÍLIA-DF: UM ESTUDO DE CASO**

RAFAELLA DE ARAÚJO AIRES VILAR

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2016

RAFAELLA DE ARAÚJO AIRES VILAR

**CONDIÇÕES DE TEMPO SEVERO E FORMAÇÃO DE TORNADOS EM
BRASÍLIA-DF: UM ESTUDO DE CASO**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Sub-área: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Magaly de Fátima Correia

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

V697c Vilar, Rafaella de Araújo Aires.
Condições de tempo severo e formação de tornados em Brasília-DF: um estudo de caso / Rafaella de Araújo Aires Vilar. – Campina Grande, 2017.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.
"Orientação: Profª. Dra. Magaly de Fátima Correia".
Referências.

1. Mesoescala (Meteorologia). 2. Tornados – Brasília - DF. 3. Fenômenos Meteorológicos. I. Correia, Magaly de Fátima. II. Título.

CDU 551.515.6 (043)

RAFAELLA DE ARAÚJO AIRES VILAR

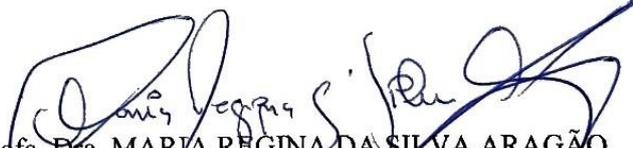
CONDIÇÕES DE TEMPO SEVERO E FORMAÇÃO DE TORNADOS EM
BRASÍLIA DF: UM ESTUDO DE CASO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2016

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



Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAÚJO
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente
Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Universidade Federal da Paraíba

Dedico este meu trabalho primeiramente a Deus, a quem tenho um amor incondicional; aos meus pais: Tertulino Aires e Verônica Lopes, ao meu irmão Rafael Vilar, e à minha tia Ianne Lopes, os maiores incentivadores do meu sonho.

AGRADECIMENTOS

Cheguei ao fim de mais uma etapa que, pessoalmente, foi muito difícil, profissionalmente foi e será enriquecedor. As coisas não acontecem por acaso e nada se constrói sozinho. Nestes anos aprendi muito errando e, principalmente, com muitas pessoas as quais agradeço e retribuo com essas palavras de carinho.

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

Aos meus pais Tertulino Aires e Verônica Lopes, que me ensinaram os valores que precisava para enfrentar a vida e ser uma pessoa de bem, pelo apoio incondicional sem o qual não teria conseguido vencer mais essa etapa. Amo vocês!

Amor de irmão e de tia-irmã não tem preço, não tem hora. Agradeço de forma muito especial e com muito amor a Rafael Vilar e Ianne Lopes que sempre estiveram, estão e estarão comigo em qualquer caminhada, me dando forças, amor, carinho.

Ao meu padrasto Gleriston Klinger e minha madrasta Melânia Assis, meus tios e primos, por todos os conselhos, ajuda, pelo amor, compreensão e incentivo para continuar lutando e vencendo.

À Prof.^a Dr.^a Magaly de Fátima Correia, que carinhosamente a chamo de “tia”, pela orientação, dedicação, confiança, conhecimentos transmitidos, e pela sua enorme paciência. Sem a senhora do meu lado, não teria chegado até aqui. Obrigada!

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Lincoln Eloi pelas sugestões no sentido de melhorar o trabalho e à Prof.^a Dr.^a Regina, que a conheço desde a graduação e com quem sempre me identifiquei. Obrigada pela paciência, disponibilidade e sugestões na melhoria do trabalho.

Agradeço à minha turma de mestrado, de forma especial a Leo, que sempre me recebeu e me ajudou quase sempre com muita boa vontade, Ley, Milena, Edvânia, Zé, Ricardo, Hérika e Danilo que se tornaram verdadeiros amigos me dando todo apoio em todos os momentos.

Aos amigos que a vida me presenteou, em especial a Sabris, Danni, Biba, Bel, Jana, Pollyana, Gerda obrigada por entender quando eu tinha muitas coisas para fazer e não podia sair.

À meteorologista do INMET, Josefa Morgana Viturino de Almeida, pela facilitação na obtenção de informações e cessão de dados coletados no dia do evento, importantes no processo da elaboração deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

*“É preciso força pra sonhar e
perceber que a estrada vai além
do que se vê...”*

Los Hermanos

RESUMO

A formação de tornados é um fenômeno pouco frequente no Centro-Oeste do Brasil. O registro de um tornado em Brasília-DF em 01 de outubro de 2014 evidencia a importância da utilização de métodos que permitam compreender melhor os vários mecanismos atmosféricos dominantes em episódios de tempo severo e monitorar esse fenômeno meteorológico com alto potencial de destruição. Este estudo teve como propósito analisar a estrutura vertical da atmosfera que prevaleceu no desenvolvimento de condições atmosféricas adversas e identificar parâmetros convectivos adequados para determinação de padrões atmosféricos que favoreceram o desenvolvimento de tempo severo. A técnica estatística Análise de Componentes Principais (ACP), índices de instabilidade e imagens de radar meteorológico foram os principais métodos de análise utilizados. Os resultados mostram que a combinação entre o alto grau de instabilidade atmosférica, temperaturas elevadas e vento intenso acompanhado de rajadas foi determinante para o desenvolvimento do tornado. Entretanto, os valores dos índices de instabilidade diferem dos limiares normalmente utilizados como indicadores da formação de tornados. Linhas de instabilidade em forma de arco (“*bow echoes*”) detectadas pelo radar durante o período de chuva intensa com danos em superfície são os indícios mais fortes do tornado que atingiu a região. Registros fotográficos de linhas de energia, telhados, árvores e carros danificados pelo vento (95 km/h) também são apresentados.

Palavras-chave: Tornado, CAPE, Eco Arco (*Bow Echo*), Linha de Instabilidade, Análise de Componentes Principais.

ABSTRACT

The frequency of tornado formation in Central-West Brazil is low. A tornado observed in Brasília-DF on 01 October 2014 highlights the importance of using methods that allow a better understanding of the various atmospheric mechanisms that dominate in severe weather episodes, and the monitoring of this meteorological phenomenon with high destructive potential. The aim in this study was to analyze the vertical structure of the atmosphere that dominated the development of adverse atmospheric conditions and to identify convective parameters that are adequate for determining atmospheric patterns that favor severe weather development. The statistic technique Principal Component Analysis (PCA), instability indices and meteorological radar images were the main analysis methods employed. The results show that the combination of high degree of atmospheric instability, high temperatures and intense wind with gusts was determinant for tornado development. However, values of the instability indices differ from those normally used as indicators of tornado formation. Arc-shaped squall lines (“*bow echoes*”) detected by radar during the period of intense rainfall with damages at the surface are the strongest evidence of the tornado that hit the region. Photos of power lines, roofs, trees and cars damaged by the winds (95km/h) are presented also.

Keywords: Tornado, CAPE, Bow Echo, Squall Line, Principal Component Analysis

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

I – LISTA DE FIGURAS	i
II – LISTA DE TABELAS	iv
III – LISTA DE QUADROS	v
IV – LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	vi
V – LISTA DE SÍMBOLOS	x
1 INTRODUÇÃO	24
2 OBJETIVOS	26
2.1 Objetivo Geral	26
2.2 Objetivos Específicos	26
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 Fenômenos Meteorológicos Predominantes na Região Centro-Oeste do Brasil	27
3.2 Caracterização dos Tornados	32
3.3 Tornados no Brasil, Ambiente Sinótico e Tempestades geradoras de Tornados	35
3.4 Atividade Convectiva e Índices de Instabilidade	37
3.5 Monitoramento de Sistemas Convectivos – Aplicativo FORTRACC e HIDROESTIMADOR	39
3.6 Análise Multivariada	40
4 DADOS E METODOLOGIA	43
4.1 Área de Estudo	43
4.2 Seleção do período de estudo	44

4.3 Dados	44
4.4 Metodologia	46
4.4.1 Radar Gama	46
4.4.2 aplicativo FORTRACC e HIDROESTIMADOR	46
4.4.3 Análise Fatorial (AF) por Componentes Principais (CP)	47
4.4.4 Seleção e definição das variáveis	50
4.4.5 Critérios e organização dos dados para utilização da ACP	55
5 RESULTADOS	57
5.1 Análise Observacional	57
5.2 Relação entre a intensidade do vento em superfície e a formação do tornado	59
5.3 Análise da evolução temporal da nebulosidade para o dia do tornado	61
5.4 Evolução do tornado na área de cobertura do radar meteorológico do Gama-DF	67
5.5 Estrutura vertical da atmosfera	73
5.6 Análise Estatística	79
6 CONCLUSÕES	86
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

I – LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1** – Localização geográfica das regiões do Brasil com destaque para a cidade de Brasília – DF (Fonte: <http://www.sct.embrapa.br/aunidade/localizacao2.htm>). 28
- Figura 3.2** – Mapa do relevo da Região Centro-Oeste do Brasil, composto pelo planalto central, planície do pantanal e planalto meridional. (Fonte: Adaptado de Menrva Templo do Saber, <http://menrvatemplodosaber.blogspot.com.br/2015/04/brasi>). 28
- Figura 3.3** – Esquema da formação de um tornado. (Fonte: Why Files, adaptado de <http://whyfiles.org/2014/tornadoes-strike-again-how-do-they-work/>). 34
- Figura 4.1** – Imagem da cidade de Brasília – DF. (Fonte: Governo de Goiás, extraído de <http://pt.wikipedia.org/wiki/Goi%C3%A1s>). 43
- Figura 5.1** – (a) Histograma da Média Mensal de Temperatura (média climatológica); (b) Histograma da Média Mensal da Precipitação (média climatológica); (c) Histograma do total diário de temperatura de setembro em Brasília – DF; (d) Histograma do total diário de temperatura de outubro em Brasília – DF; (e) Histograma do total diário da precipitação de setembro em Brasília – DF; (f) Histograma do total diário da precipitação de outubro em Brasília – DF. 58
- Figura 5.2** – Frequência da direção e evolução temporal (UTC) da intensidade do vento em nós (kt) para os dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro de 2014. 60
- Figura 5.3** – Fotografias do tornado (a) e dos danos associados ao fenômeno na área do aeroporto de Brasília – DF (b, c, d). 61
- Figura 5.4** – Temperatura de brilho (°K) para o dia 01 de outubro de 2014: (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (e) 19:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC, e (f) 20:00 UTC. Fonte: CPTEC, 2014. 63

Figura 5.5 – Imagens realçadas do satélite GOES 13 no canal infravermelho (IR) ilustrando a evolução temporal da atividade convectiva para o dia 01 de outubro de 2014: (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC; (f) 20:00 UTC; (g) 20:30 UTC; (h) 21:00 UTC. A hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte: <http://sigma.cptec.inpe.br/>).

Figura 5.6 – Imagens geradas pelo FORTRACC em 01/10/2014; (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC; (f) 20:00 UTC. A escala de cores da legenda corresponde ao estado de evolução de sistemas convectivos severos. (Fonte: <http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/>).

Figura 5.7 – Evolução temporal da intensidade do vento (V), pressão (P), temperatura do ar (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), observadas na estação de superfície do aeroporto internacional de Brasília DF. O símbolo F_0 indica o período em que foram registrados a formação e danos intensos na região do aeroporto.

Figura 5.8 – Imagens do radar do Gama DF, para o dia 01/10/ 2014 das: (a) 13:15; (b) 13:30; (c) 13:45; (d) 14:00; (e) 14:15 e (f) 14:30. (Fonte: Adaptado da REDEMET).

Figura 5.9 – Imagens de refletividade (MAX CAPPI) do radar meteorológico do Gama em 01/10/2014, nos horários: (a) 17:46 Z e (b) 17:56 Z. O símbolo da aeronave indica a posição dos aeroportos na área do radar e as cores representam a escala em dBZ.

Figura 5.11 – Perfis Verticais de Temperatura, Temperatura do Ponto de Orvalho, e do Vento plotados no diagrama Skew-T Log P e valores dos índices de instabilidade (CAPE, TT, SW e SH) obtidos de sondagem de ar superior em setembro e outubro de 2014 em Brasília-DF às 12 UTC. (Fonte: weather.uwyo.edu).

Figura 5.12 – Perfis verticais da temperatura potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) obtidos da sondagem realizada em Brasília as 12 UTC para os dias (a) 30/09, (b) 01/10 e (c)

02/10/2014.

- Figura 5.13** – ScreePlot 81
- Figura 5.14** – Evolução temporal dos escores do primeiro fator (a) e a Representação diagramática das cargas fatoriais (b). 81
- Figura 5.15** – Evolução temporal dos escores do segundo fator (F2) (a) e a representação diagramática das cargas fatoriais (b), para outubro de 2014 (b). 82
- Figura 5.16** – Evolução temporal dos índices TT e SWEAT. 84
- Figura 5.17** – Evolução temporal dos escores do terceiro fator (F3) (a) e a Representação diagramática das cargas fatoriais (b). 84

II – LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Explicada e Acumulada. 79

Tabela 5.2 – Variáveis em função do grau de correlação com os fatores F1, F2 e F3. 80

III – LISTA DE QUADROS

- Quadro 3.1** – Escala Fujita-Pearson de intensidade de tornados. (Fonte: Adaptada de Fujita e Pearson, 1973). 35
- Quadro 3.2** – Ocorrências de tornados no Brasil. (Fonte: Adaptado de Cunha, 1997). 36
- Quadro 4.1** – Valores do Índice TT para as latitudes médias. (Fonte: MILLER, 1972). 52
- Quadro 4.2** – Valores do Índice SWEAT para latitudes médias. 53
- Quadro 4.3** – Valores do Índice Showalter para latitudes médias (Fonte: http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/inst_form_conect_sbgl.pdf) 54

IV – LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°- Grau

°C- Graus Celsius

hPa – HectoPascoal

J/kg – Joule por Kilograma

km- Quilômetro

mm – Milímetros

%- Porcentual

AA- Análise de Agrupamento

ACP- Análise de Componentes Principais

AD- Análise Discriminante

ANA- Agência Nacional de Águas

AF- Análise Fatorial

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

BHSF – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

CAPE- Energia Potencial Convectiva Disponível

CAPP- Constant Altitude Plan Position Indicator

CB – Nuvem Cumulonimbus

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

CT- Cross Totals

dBZ - Fator de Refletividade que mede a Intensidade do Eco

DF – Distrito Federal

DSA - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais

ENOS – El Nino Oscilação Sul

EB- BowEcho

FORTRACC – Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

GRRA- Chuva com granizo

HS – Hemisfério Sul

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

KMO – Kaiser-Meyer-Olkin

kt – Unidade de intensidade do vento em nó

Landspout- Tromba de areia

LI – Linhas de Instabilidade

MSA - Monções Sul Americanas

N- Norte

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

NCL- Nível de Condensação por levantamento

NE- Nordeste

NEB - Nordeste do Brasil

NW – Noroeste

OMJ – Oscilação Madden-Julian

RA- Chuva fraca

RAI - Rainfall Anomaly Index

REDEMETS – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

RETS- Trovoadas recentes

SH – Índice de Instabilidade Showalter

SBBR – Aeroporto de Brasília – Distrito Federal

SC – Sistemas Convectivos

SCM – Sistemas Convectivos de Mesoescala

SE - Sudeste

SF - Sistemas Frontais

SF- Sistemas Frontais

SPSS- Statistical Package for the Social Sciences

SW – Índice de Instabilidade Sweet

T- Temperatura do ar

TS- Chuva franca com trovoadas

TSRA – Chuva Fraca e Trovoadas

TT – Índice de Instabilidade Total Totals

TSM- Temperatura da Superfície do Mar

UTC – Universal Time Coordinated

VAR- Variância

VCANs – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

VCSH- Pancadas na vizinhança

VCTS- Trovoadas na vizinhança

VT- Vertical Totals

Waterspout – Tromba d'Água

ZCAS- Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

IV – LISTA DE SÍMBOLOS

θ - Temperatura Potencial

θ_e - Temperatura Potencial Equivalente

θ_{es} - Temperatura Potencial Equivalente Saturada

A^{-1} - Matriz inversa

D_V - Função de diferença de direção entre o vento de 500 e o de 850 hPa.

$T_{parcela}$ - Temperatura em 500hPa de uma parcela que subiu desde o nível de 850 hPa.

T_{500} - Temperatura do Ar no nível de pressão de 500 hPa

T_{750} - Temperatura do Ar no nível de pressão de 700 hPa

T_{850} - Temperatura do Ponto de Orvalho

T_d - Temperatura do Ponto de Orvalho

T_{d500} - Temperatura do Ponto de Orvalho no nível de pressão de 500 hPa

T_{d700} - Temperatura do Ponto de Orvalho no nível de pressão de 700 hPa

T_{d850} - Temperatura do Ponto de Orvalho no nível de pressão de 850 hPa

$V_{(500)}$ - Vento no nível de 500 hPa

$V_{(850)}$ - Vento no nível de 850 hPa

X – Variável

X_t - Matriz transposta

1. INTRODUÇÃO

Tempestades severas (TS) são sistemas convectivos em mesoescala com registros cada vez mais frequentes nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. No entanto, mais recentemente, a Região Centro-Oeste também tem sido alvo de atenção dos gestores ambientais para compreensão de mudanças atmosféricas associadas com o aumento de episódios de tempo severo incluindo vendavais, granizo, chuvas intensas e alagamentos.

O número crescente de registros de eventos de TS associados com danos ambientais e materiais significantes tem despertado o interesse de pesquisadores para realização de estudos que permitam compreender melhor os processos físicos associados ao desenvolvimento e intensificação destes sistemas (DYER, 1988, 1994; SILVA DIAS e GRAMMELSBACHER, 1991; MASSAMBANI et al., 1992; ANTÔNIO, 1997; NECHET, 2002; MARCELINO et al., 2002). Geralmente, quando vinculadas ao desenvolvimento de tornados, as TS são denominadas de tempestades tornádicas, que produzem ventos extremamente fortes, muitas vezes com velocidades superiores a 100 km/h. A grande maioria de TS ocorre em ambientes cujo padrão de circulação atmosférica favorece ar úmido nos baixos níveis, intrusão de ar seco em níveis médios e um mecanismo capaz de dar início a convecção profunda.

De acordo com André (2006), as TS têm ocorrido com maior frequência nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, mas há dificuldade em registrar essas ocorrências, já que a sua atuação é extremamente rápida. O radar Doppler é o equipamento mais adequado para tal registro. No entanto, ainda são em número bastante reduzido.

De acordo com Marcelino et al. (2003), existe a necessidade da realização de estudos para a detecção e caracterização de tais eventos severos, que aborda o seu desenvolvimento como forma de prevenir ou minimizar seu impacto no ambiente e os aspectos sinóticos de sua formação. Com esta caracterização tem-se a possibilidade de estabelecer padrões de procedimentos para se evitar maiores consequências, visando minimizar os danos causados. Esta análise dos tipos de tempos que dá início aos tornados poderá dar suporte aos órgãos que trabalham com a assistência as vítimas,

podem contribuir com a previsão meteorológica e com os sistemas de alerta de eventos climáticos severos.

Costa (2014) estudou a importância de fatores locais no desenvolvimento de um episódio de tempo severo em Brasília-DF no ano de 2011, através da ACP e produtos oriundos de sensoriamento remoto e verificou que, apesar da eficiência do método estatístico, a utilização de imagens de radar teve fundamental importância na explicação do fenômeno.

A região foco deste estudo é a cidade de Brasília DF (15°50'16S; 47°42'48W) situada na Região Centro-Oeste do Brasil. O clima é do tipo tropical de altitude, (BARRETO, 2008), característico de regiões com verões úmidos e chuvosos e invernos secos e relativamente frios. A temperatura média é de, aproximadamente, 21°C e a umidade relativa do ar de 70%, podendo atingir 20% ou menos nos meses de inverno (INMET, 2013).

Um episódio de tempo severo associado com o desenvolvimento de um tornado na região do Aeroporto Internacional Juscelino Kubistchek, e ventos da ordem de 95 km/h, no dia 01 de outubro de 2014 (INMET, 2014), representa a motivação principal para realização das análises apresentadas neste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é identificar variações significativas no padrão atmosférico regional e mecanismos dinâmicos e/ou termodinâmicos associados com o desenvolvimento de sistemas convectivos severos e formação do tornado registrado em 01 de outubro de 2014 em Brasília – DF.

2.2. Objetivos Específicos

- Detectar padrões atmosféricos de macro e mesoescala responsáveis pela formação e evolução do tornado no Distrito Federal;
- Caracterizar as células convectivas locais que originaram a tempestade severa associada com o tornado registrado no aeroporto de Brasília-DF;
- Avaliar a eficiência de diferentes índices de instabilidade atmosférica no diagnóstico de tempestades severas;
- Utilizar a técnica estatística Análise de Componentes Principais (ACP) com o intuito de identificar fatores físicos determinantes na ocorrência do tornado ocorrido no dia 01 de outubro de 2014.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fenômenos Meteorológicos Predominantes na Região Centro-Oeste do Brasil

A Região Centro-Oeste (Figura 3.1) é formada pelos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal (BARROS e BALERO, 2012). O relevo desta região é composto pelo Planalto Central, o Meridional e o do Pantanal (Figura 3.2). A vegetação é bem diversificada sendo dividida em cerrado, pantanal e mata atlântica. Apesar de contar com apenas três estados e o DF, a região é a segunda maior em extensão territorial, atrás apenas da região Norte. Ela corresponde a 18% do território brasileiro e representa uma área de aproximadamente 1.607.000 km².

O clima da região é classificado como do tipo Tropical com praticamente duas estações no ano: um inverno seco e relativamente frio e um verão chuvoso. A vegetação típica é o Cerrado. A temperatura média ao longo do ano é de 20,6°C, visto que setembro é o mês mais quente (21,7°C) e julho é o mês mais frio (18,3°C). A temperatura varia de forma significativa nas áreas que são menos urbanizadas, onde a média das mínimas no inverno cai de 10°C a 5°C. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 70%, podendo chegar aos 20% ou menos no inverno. A ocorrência da variabilidade no comportamento da chuva de verão é responsável por eventos extremos, tanto por excesso quanto pela falta de chuva afetando principalmente o abastecimento nos recursos hídricos e a produção agrícola (ANUNCIAÇÃO, 2013; CASTRO FILHO et al., 2012).

Os principais sistemas atmosféricos que atuam na Região Centro-Oeste são: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Monções Sul Americanas (MSA), Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Linhas de Instabilidade (LI), Sistemas Frontais (SF) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) Tropicais ou Subtropicais e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM).

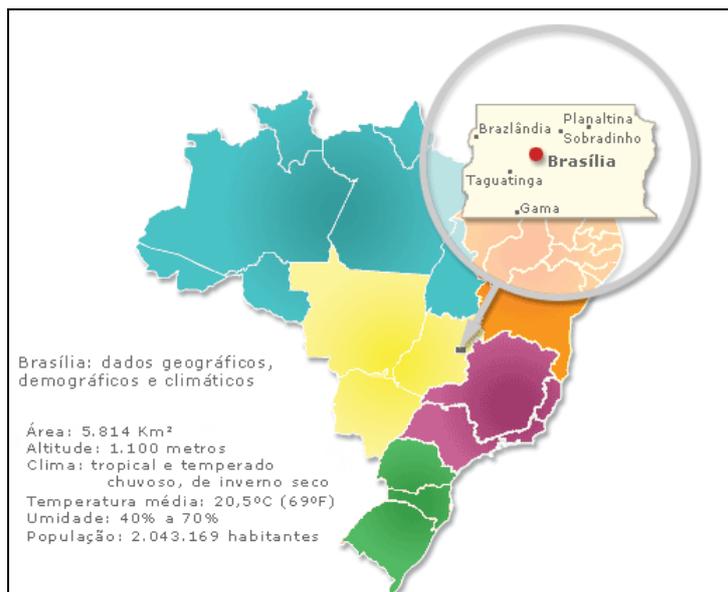


Figura 3.1: Distribuição espacial das regiões do Brasil com destaque para a cidade de Brasília-DF, mostrando os dados geográficos, demográficos e climáticos. (Fonte: <http://www.sct.embrapa.br/aunidade/localizacao2.htm>).

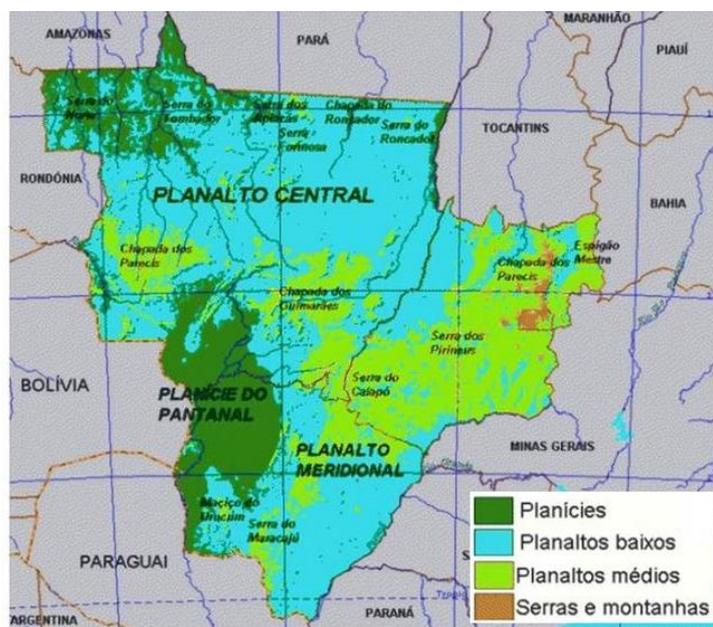


Figura 3.2: Mapa do relevo da Região Centro-Oeste do Brasil, composto pelo planalto central, planície do pantanal e planalto meridional. (Fonte: Adaptado de Menrva Templo do Saber, <http://menrvatemplodosaber.blogspot.com.br/2015/04/brasi>).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada como uma banda persistente de precipitação e nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste,

com forte convecção, cuja área de atuação engloba o centro-sul da Amazônia, Região Centro-Oeste e Sudeste, centro-sul da Bahia e norte do Paraná, e frequentemente prolongando-se até o Oceano Atlântico Subtropical. A ZCAS tem um papel de suma importância quando se trata da precipitação na América do Sul, durante os meses de primavera e verão (NOGUÉS-PAEGLE e MO, 1997 e SATYAMURTYET al., 1998; CARVALHO et al., 2004), onde é responsável pela ocorrência de tempestades severas, deslizamentos de terra e alagamentos, e podendo contribuir para altos índices pluviométricos (SANCHES, 2002; CAVALCANTI e ROWNTREE, 1998, CAVALCANTI et al., 2009).

A América do Sul tem uma grande parte do seu território controlada pelas Monções Sul Americanas de Verão (MSA) que tem como característica principal a variação anual de chuva e de vento, onde na estação de verão, a direção do vento se inverte, soprando na direção do oceano para o continente, e no inverno ocorre o oposto, soprando do continente para o oceano (GARCIA, 2006). A Região Centro-Oeste do Brasil tem potencial para ser uma importante fonte de registros paleoclimáticos que auxiliem a compreensão do comportamento das Monções Sul Americanas de Verão (MSA). Estas monções controlam boa parte das chuvas do continente sul americano, e uma parte importante deste sistema de monções é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS leva umidade desde o norte da Amazônia até o sudeste do país (VERA et al., 2006), e influencia diretamente o regime de chuvas da região Centro-Oeste.

A variabilidade interanual do regime de chuvas na região Centro-Oeste do Brasil também é influenciada pelos modos climáticos de diferentes escalas temporais, e podem influenciar na climatologia da região. A Oscilação de Madden-Julian (OMJ) (MADDEN e JULIAN, 1972) que corresponde ao modo intra-sazonal de atividade convectiva com o período de 30-60 dias, e a interação oceano-atmosfera também pode influenciar no ENOS (El Niño Oscilação Sul), além de anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e fenômenos meteorológicos (NOBRE e SHUKLA, 1996; LIEBMANN e MARENGO, 2001; PEZZI e CAVALCANTI, 2001) como as Oscilações Multidecadais dos Oceanos.

De acordo com Knight et al. (2006) a Oscilação Multidecadal do Oceano Atlântico (OMA) está relacionada com diversas variações multidecadais observadas no clima de algumas porções dos continentes banhados por esse oceano. No Oceano Atlântico existem variações atmosféricas como a Oscilação do Atlântico Norte (OAN) que podem também influenciar na variabilidade da MAS devido a oscilações na temperatura do oceano que geram fases frias ou quentes que podem durar de 20 a 40 anos (ANDREOLI e KAYANO, 2004; KERR, 2000).

Os sistemas de alta pressão localizados em torno de 30° de latitude nos principais oceanos do planeta podem ser chamados de Altas Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS). Elas estão associadas a circulação média meridional da atmosfera ou, mais especificadamente, à célula de Hadley no Hemisfério Sul. A circulação da ASAS transporta umidade do oceano Atlântico Sul em direção a bacia amazônica. O bloqueio imposto ao escoamento pela cordilheira dos Andes fortalece a circulação, desviando-a para sul a leste dos Andes, em direção aos subtropicais, com ventos máximos ocorrendo nas proximidades da Bolívia.

A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é de grande importância para o clima da América do Sul, afetando o clima do Brasil tanto no inverno, como no verão, quando está mais caracterizada e posicionada. No verão, o transporte de umidade nos baixos níveis ao longo da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é afetado pela circulação associada a ASAS. Já no inverno, ela impede que as frentes entrem e causem inversão térmica e concentração de poluentes nos principais centros urbanos.

De acordo com Varejão-Silva (2001), em virtude da posição semifixa do anticiclone do Atlântico Sul, o regime de ventos predominantes no Brasil fica condicionado às atividades desse centro de ação. Em janeiro, a região Centro-Oeste é varrida por ventos de N e NE do anticiclone do Atlântico, e em julho, o regime dos ventos é bastante semelhante, havendo intensificação dos ventos de NE na região Centro-Oeste.

Linhas de instabilidade (LI) são formações de nuvens de tempestade alinhadas, conectadas por uma região estratiforme, que podem se estender por quilômetros e são capazes de produzir ventos fortes e pequenos tornados. Elas fazem parte das tempestades multicelulares descritas na literatura (WEISMAN e KLEMP, 1986;

COTTON e ANTHES, 1989; HOUZE, 1993; SILVA et. al., 2008; ALCÂNTARA et al., 2014; COSTA, 2014), e são aglomerados de nuvens do tipo cumulonimbus (CB's) de vários tamanhos que se agrupam em curvas e linhas. A convergência ao longo da borda principal dispara o desenvolvimento de novas correntes ascendentes atrás e ao longo da frente da rajada, de forma que novas células evoluem, e em sua retaguarda por uma nuvem na forma de “bigorna” que, em geral, produz precipitação do tipo estratiforme. Segundo Costa (2014), a topografia da região Centro-Oeste do Brasil tem influência marcante na organização da convecção em linha, já a direção e intensidade do escoamento de grande escala são determinantes para a definição do grau de severidade dos sistemas convectivos.

Oliveira (1986), usando imagens de satélites geoestacionários entre 1979-1984, certificou que os sistemas frontais normalmente se associam e interagem com convecção tropical, embora nem todos esses sistemas o façam com a mesma intensidade. Durante a primavera-verão do HS, eles se posicionam de preferência sobre a parte central do continente sul-americano, com seu eixo no sentido NW-SE. Os sistemas frontais (SF) estão associados com grandes variações do vento gradiente com a altura, influenciam principalmente o sul, sudeste e centro-oeste do Brasil.

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são caracterizados por apresentarem um centro mais frio do que a sua periferia. Eles podem ser classificados como de tipo Palmém e Palmer. Estes tipos diferem um do outro de acordo com o lugar e a época de formação. Os do tipo de Palmém são mais frequentes no verão e originam-se em latitudes médias. No Brasil, esse tipo de sistema é encontrado na região Nordeste, porém pode ocorrer de atingir a área mais ao norte e nordeste da região centro-oeste do Brasil. Os aspectos observacionais sobre sua formação e deslocamento foram documentados por Kousky e Gan, (1981), Gan (1982) e Ramírez et al. (1999). Os vórtices do tipo Palmém, são formados em latitudes subtropicais e são observados na primavera e no inverno. Quando um cavado de latitudes médias que penetra nos trópicos com uma inclinação meridional bem acentuada, essa inclinação faz com que a sua parte norte, que tem a velocidade de deslocamento menor, atrase-se até desprender-se completamente. Conseqüentemente, forma-se uma circulação fechada nessa parte (PALMÉM, 1949). Tipicamente, após cruzarem a Cordilheira dos Andes, eles deslocam-se sobre o Paraguai, Argentina, Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e

muitas das tempestades severas que ocorrem nestes lugares Brasil tem sido associadas à VCAN (CAVALCANTI, 1985; GAN, 1982; KOUSKY e GAN, 1981; RAMÍREZ et al., 1996; NECCO, 1989; SILVA DIAS et al., 1991). Um dos primeiros estudos a respeito de VCAN foi feito por Palmer (1951). Os VCAN são definidos como sistemas fechados de baixa pressão, de escala sinótica, que se formam na alta troposfera (GAN, 1982), também chamados como baixas frias, pois apresentam centro mais frio que a periferia. Os vórtices ciclônicos de ar frio que se formam na retaguarda de algumas frentes frias estão frequentemente associados a significativos totais de precipitação (MATSUMOTO et al., 1982).

3.2. Caracterização dos Tornados

Dentre os fenômenos atmosféricos classificados como extremos os tornados são ainda pouco estudados, pela grande dificuldade de registro. Isso ocorre devido a sua rápida atuação e pela falta de equipamentos necessários para a identificação correta do mesmo. Contudo, apesar de toda dificuldade de monitoramento e registros no Brasil, algumas pesquisas foram desenvolvidas no país (DYER, 1988, 1994; SILVA DIAS e GRAMMELSBACHER, 1991; MASSAMBANI et al., 1992; ANTÔNIO, 1997; NECHET, 2002; MARCELINO et al., 2002). Na maioria dos casos o fenômeno só é registrado quando presenciado por alguém ou fotografado. Frequentemente são catalogados como eventos severos de granizo e vendaval, que promovem perdas materiais ou vidas.

De acordo com Doswell (1997), o tornado é caracterizado como uma nuvem em forma de funil que liga a base de uma nuvem cumulonimbus à superfície terrestre, sendo que o ar em movimento que o mantém tem força suficiente para causar vários danos em superfície. Eles estão associados com tempestades severas que se desenvolvem em ambientes instáveis e se formam na base de sistemas convectivos, também denominados de supercélulas (Figura 3.3).

Historicamente, a previsão da intensidade e localização das tempestades convectivas, requer esforços por parte dos meteorologistas especialmente relacionada com condições extremas, como chuvas intensas, ventos fortes e granizo. Esse tema tem alcançado cada vez mais importância, devido à ameaça incontestável às atividades

humanas, em especial à navegação aérea, e setores relacionados à geração de energia, agricultura e segurança pública.

As tempestades severas têm sido registradas mais frequentemente nos últimos anos. No entanto, o conhecimento sobre formação e avaliação dos riscos apesar muito altos, já que podem causar chuvas fortes, vendavais, tornados, granizos, e inundações e consequentemente transtornos socioeconômicos é ainda bastante limitado. Uma maior compreensão dos mecanismos de formação e evolução dos sistemas severos depende de características geográficas do local de ocorrência. De acordo com Doswell e Borsari (2000), a definição de tempo severo depende do que está sendo considerado como severo, já que depende de critérios específicos, que variam com o tipo do fenômeno. Para granizo, o critério usado é o diâmetro; para as rajadas de vento, é a velocidade. Contudo, se o fenômeno é o tornado, em quase todos os casos é considerado severo, com exceção daqueles que se formam na água, denominados de Tromba d'Água.

Esses sistemas se formam a partir das nuvens cumulonimbus ou de tempestades que se apresentam como célula única, multicelular ou supercélula. Nos sistemas multicelulares, as células interagem entre si, fazendo com que a corrente de ar descendente de uma célula possa intensificar a corrente ascendente de outras. Já as supercélulas, são consideradas as maiores nuvens e possuem correntes de ar com forte movimento giratório. Elas estão relacionadas a fortes cisalhamentos do vento e alto grau de instabilidade atmosférica. Cisalhamento de vento é um fenômeno meteorológico que ocorre quando há uma mudança do vento, em níveis diferentes, podendo ser horizontal ou vertical.

Segundo Marcelino et al. (2003), o tornado e/ou tempestades associadas com supercélulas representam fenômenos severos intensos. Além disso, investigações realizadas no Brasil nos últimos anos confirmam que a ocorrência de tempestades severas não é tão rara como se presumiu por muito tempo. Contudo, apesar da importância, a compreensão do desenvolvimento e dos mecanismos de formação destes sistemas exige análises e estudos a partir de metodologias específicas, visto que as características ambientais variam de acordo com a localização geográfica.

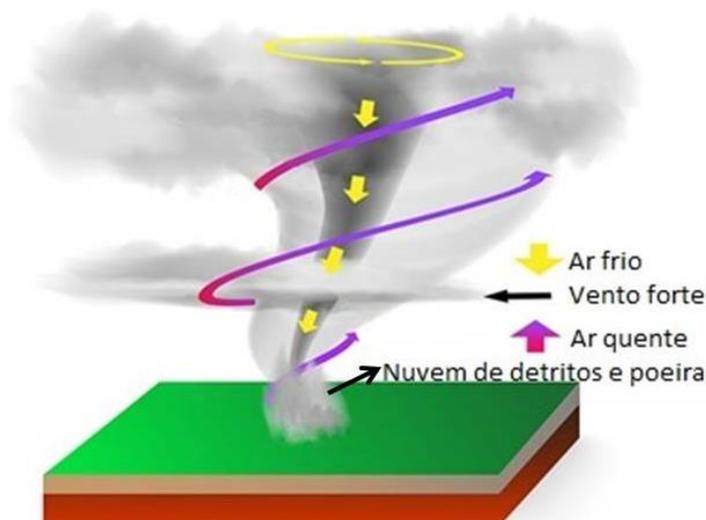


Figura 3.3: Esquema da formação de um tornado. (Fonte: Why Files, adaptado de <http://whyfiles.org/2014/tornadoes-strike-again-how-do-they-work/>)

Os tornados podem ser classificados com base no tipo de superfície em que ocorrem: na água é denominado de tromba d'água (waterspout); na areia de tromba de areia (landspout); e na superfície terrestre de tornado (tornado), ou podem ser classificados quanto a sua intensidade, calculada com a base nos danos que provocam em superfície. Segundo Marcelino et al. (2002), dentre as classificações quanto a intensidade dos tornados, a escala Fujita ou F-escala, é uma das mais aceitas e utilizadas. A relação da intensidade dos tornados, com a velocidade dos ventos e os danos esperados em superfície pode ser observada no Quadro 3.1. Os tornados geralmente são acompanhados por outros fenômenos atmosféricos, tais como: vendavais, precipitação de granizo e precipitações pluviométricas intensas (MENDONÇA e MONTEIRO, 1997; SIMEONOV e GEORGIEV, 2001).

Segundo Doswell III e Bosart (2000), os fatores em escala sinótica que mais contribuem para a formação de atividade convectiva intensa, giram em torno de três ingredientes básicos: movimentos verticais, instabilidade e umidade. Se há forçantes de parcelas ascendentes, então haverá convergência de massa abaixo desses movimentos verticais, frequentemente ditos como frentes, linhas de instabilidades, etc. Os autores utilizam o termo “evidências sinóticas” (*synoptically evident*) para propor tais padrões que são associados a intensos tornados. Essas evidências se resumem em fortes forçantes sinóticas, que são associadas a uma energia potencial significativa, com

cisalhamento vertical e forte escoamento na troposfera superior. Essas condições costumam ocorrer nos dias que antecedem os tornados intensos, propondo a possibilidade da ocorrência dos mesmos.

Quadro 3.1: Escala Fujita-Pearson de intensidade de tornados. (Fonte: Adaptada de Fujita e Pearson, 1973).

Escala	Categoria	Força (km/h)	Danos Esperados
F0	Fraco	65-116	Leves
F1	Fraco	119-177	Moderados
F2	Forte	180-249	Consideráveis
F3	Forte	252-332	Severos
F4	Violento	335-418	Devastadores
F5	Violento	421-512	Incríveis

3.3. Tornados no Brasil, Ambiente Sinótico e Tempestades geradoras de Tornados

Características de uma tempestade severa registrada em maio de 1994 na cidade de Ribeirão Preto (SP) foram analisadas por vários pesquisadores (SILVA DIAS et. al., 1996; MENEZES e SILVA DIAS, 1998). Na análise da escala sinótica foram apresentados resultados que ressaltaram a existência de um cavado invertido sobre o Estado de São Paulo, associado com a passagem de uma frente fria. Esse cavado teve papel essencial, estabelecendo a divergência e movimentos verticais, fatores necessários para gerar a instabilidade observada no evento. Observou-se também a presença de uma baixa desprendida em mesoescala sobre o Estado do Paraná, o que favoreceu a ocorrência de vortividade ciclônica na área de instabilidade.

Silva Dias e Grammelsbacher (1991) em um estudo sobre a ocorrência de tornados em São Paulo, mais precisamente nos municípios de Franco da Rocha e São

Bernardo do Campo mostraram que ele estava associado à interação de um sistema frontal com um VCAN. De modo geral, sistemas de circulação ciclônica desse tipo são caracterizados por ar frio na média e alta troposfera, e por convergência e movimentos verticais subsidentes. A atuação do fenômeno causou danos no centro da cidade. Os registros mostram que cerca de 20 caminhões de carga se encontravam enfileirados tombaram com a passagem do fenômeno severo. A “nuvem funil” foi descrita nos relatos de quem presenciou o tombamento dos caminhões. Características importantes de tornados e trombas d’água registrados no Brasil são descritas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Ocorrências de tornados no Brasil. (Fonte: Adaptado de Cunha, 1997).

DATA			UF	MUNICÍPIO	DANOS
Dia	Mês	Ano			
14	09	1923	SP	Chavantes e Ourinhos	10 mortes, 100 feridos e inúmeras fazendas destruídas.
31	08	1989	MS	Ivinhema	16 mortes, destruiu uma casa-clube onde havia 400 pessoas e atingiu o centro da cidade.
30	09	1991	SP	Itu	Atingiu a periferia da cidade, 15 mortes, 176 feridas, 280 casas destruídas, 5 indústrias, 3 escolas, 2 postos de gasolina, 1 hotel e 20 torres de alta tensão.
17	05	1992	PR	Almirante Tamandaré	6 mortes, 33 feridas e 500 casas destruídas.
24	05	2004	SP	Palmital	4 mortes, 25 feridos.
--	05	2005	SP	Indaiatuba	15 mortes, casas arrancadas do chão, energia elétrica interrompida pela queda de árvores.
08	09	2009	SC	Santa Catarina	4 mortes, 1,5 milhão de pessoas sem energia no estado.
21	09	2010	RS	Gramado e Canela	10 feridos, 480 casas danificadas, e mais de 250 árvores arrancadas.
22	09	2013	SP	Taquarituba	2 mortes e mais de 64 feridos.
01	10	2014	DF	Brasília	Destruição na área do aeroporto: árvores arrancadas e quedas de toldos no estacionamento atingindo vários carros; desvios de voos (pousos).
20	04	2015	SC	Xanxerê	3 mortes e danos em mais de 30% da área urbana.
19	11	2015	PR	Marechal Cândido Rondon	Inúmeros estragos na cidade, mil residências atingidas, empresas, fábricas e escolas, árvores arrancadas e postes de energia danificados, 20 feridos.

A análise do ambiente em escala sinótica nos períodos de ocorrência de tornados permite uma compreensão maior dos sistemas atmosféricos atuantes que produzem áreas de instabilidades intensas, favoráveis à geração de fenômenos extremos, como tornados e trombas d’água.

Se o ar estiver muito instável, a nuvem cumulonimbus pode dar origem a tornados, que segundo Fujita (1981), são formados a partir de intenso movimento rotativo de colunas de ar ascendente, expandindo-se na sua parte superior.

De acordo com Orlanski (1975), os tornados estão entre os sistemas classificados na microescala, que varia de centenas de metros até 2 km, com menos de uma hora de duração. Vale salientar que a classificação deste autor é baseada somente no tamanho e no tempo de vida dos fenômenos.

Embora, nos estudos sobre ocorrências de tornados a abordagem seja predominantemente vinculada com análise de parâmetros representativos de ambientes em mesoescala (BRANDES, 1978, 1984; LEMON e DOSWELL III, 1979; CARBONE, 1983; HAGEMEYER e SCHMOCKER, 1991; DAVIES et al., 1994; BLUESTEIN e PAZMANY, 2000; STENSRUD, 2001), é importante analisar também e compreender as condições sinóticas que favorece no desenvolvimento desse tipo de fenômeno (NEWTON, 1963; JOHNS e DOSWELL, 1992).

Rockwood e Maddox (1988) analisaram a intensidade da convecção que pode gerar tornados, granizo, e outros fenômenos severos, com a intenção de entender o grau de interação entre mecanismos atmosféricos de grande e mesoescala. Eles chegaram à conclusão que se a escala sinótica apresenta circulações favoráveis para formação de tempestades, a convecção evolui dentro de um complexo de tempestades mais organizado e intenso, e com maior tempo de vida.

No estudo de um episódio de tornado que ocorreu na Argentina, Schwarzkopf e Rosso (1982) observaram advecção de umidade em baixos níveis para a região de ocorrência, uma zona baroclínica estacionária na borda de uma frente fria e um cavado em altos níveis associado ao sistema frontal.

3.4. Atividade Convectiva e Índices de Instabilidade

De acordo com Hallak e Pereira Filho (2012), “qualquer quantidade que estime o potencial da atmosfera para atividade convectiva, e que possa ser avaliado a partir de dados obtidos por sondagens operacionais é um índice de instabilidade”. Assim, os valores assumidos pelos índices de instabilidade atmosférica fornecem uma rápida avaliação da situação termodinâmica e do cisalhamento do vento em relação às condições convectivas no momento da aquisição dos dados utilizados para o cálculo. Os índices, portanto, transmitem uma ideia de previsão de eventos convectivos severos, uma vez que, tanto possibilidade quanto probabilidade, são conceitos estatísticos associados à previsão de eventos.

Entre os principais parâmetros termodinâmicos utilizados em avaliações da influência do grau de instabilidade associados com ocorrências de eventos severos nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do país destacam-se os TOTAL TOTALS (TT), o SWEAT (*Severe Weather Threat Index*) (SW) e o SHOWALTER (SH).

O Índice *Total Totals* (TT), é definido como a soma de dois índices de estabilidade: o Cross Totals (CT), dados pela diferença do nível de umidade em 850 hPa e a temperatura em 500 hPa, e pelo Vertical Totals (VT) dado pelo lapse rate entre níveis de 850 e 500 hPa. Este índice agrupa três informações básicas: a temperatura no nível de 500 hPa, a taxa de variação vertical da temperatura de níveis médios e a umidade no nível de 850hPa. No geral, os valores maiores do que 40 obtidos numa dada sondagem indicam uma situação favorável para ocorrer tempestades algumas horas mais tarde, e os valores acima de 45 indicam chances de haver tempestades severas. Não é adequado analisar isoladamente o TT para previsão convectiva, uma vez que o lapse rate alto em níveis médios pode levar a um valor de TT alto, mesmo sem o fornecimento de umidade em baixos níveis (NASCIMENTO, 2005). Este índice é útil para avaliar o entranhamento de ar frio na troposfera média, sendo relevante para previsão de eventos severos associados a queda de granizo.

Índice SWEAT (SW) é utilizado para tempestades de ordinárias a severas. Este índice é bastante elaborado, e é composto a partir de cinco termos: advecção quente entre 850 e 500 hPa, jatos de baixos níveis, jatos de altos níveis, instabilidade e umidade nos baixos níveis. Ele agrupa informação sobre a cinemática da atmosfera e as estruturas termodinâmicas, sendo, contudo desenvolvido para a previsão específica de potencial para tempestades severas, como sugeridas por sua denominação. Valores desse índice acima de 300 são considerados indicativos de tempestades severas, enquanto que valores acima de 400 indicam maior probabilidade de eventos tornádicos (MILLER, 1972).

O Índice *Showalter* (SH) foi um dos primeiros a serem desenvolvidos, dado a partir de três parâmetros: a temperatura do ar (médio) no nível de 500 hPa e a temperatura de uma parcela que sobe adiabaticamente desde o nível de 850 hPa até nível de 500 hPa. O índice é positivo quando $T_{parcela}$ está a esquerda da sondagem, indicando estabilidade. Ele denota apenas a instabilidade da camada e tem valores

negativos quando há umidade e calor no nível de 850 hPa e ar frio em 500 hPa. O índice não é representativo quando há inversão de temperatura entre os níveis de 850 hPa e 500 hPa.

3.5. Monitoramento de Sistemas Convectivos: Aplicativos FORTRACC e HIDROESTIMADOR

O aplicativo Previsão a Curto Prazo e Evolução de Sistemas Convectivos, FORTRACC, foi desenvolvido com o objetivo de obter a evolução temporal e a trajetória dos sistemas convectivos, os quais em geral estão associados com precipitações intensas e com rajadas de vento, sendo disponibilizados seus produtos pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na forma operacional na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA), onde também se pode realizar uma previsão da evolução de SCM para até duas horas. A DSA concede a versão diagnóstica do aplicativo que é utilizada nas atividades de pesquisa.

De acordo com Campos e Eichhloz (2011), é de grande importância a utilização do aplicativo FORTRACC em pesquisas que envolvam eventos severos. O uso deste aplicativo mostra uma contribuição significativa na previsão de SCM e para o entendimento do tempo e clima. Os estudos realizados por Campos e Eichhloz (2011) apresentaram resultados aceitáveis na identificação de nuvens associadas à convecção em diferentes regiões da América do Sul comportando assim, acompanhar a evolução tanto das células convectivas imersas no sistema quanto dos SCM.

Hidroestimador é um método inteiramente automático que utiliza uma relação empírica exponencial entre a precipitação (estimada com radares) e a temperatura de brilho do topo das nuvens (extraídas do canal infravermelho do satélite GOES-12), gerando taxas de precipitação em tempo real. Através da tendência de temperatura da nuvem (e informações de textura) é utilizado um ajuste da área coberta pela precipitação. Variáveis como água precipitável, umidade relativa, orografia, paralax e um ajuste do nível de equilíbrio convectivo para eventos de topos quentes são utilizadas para ajustar automaticamente a taxa de precipitação. (SCOFIELD, 2001).

O Hidroestimador foi desenvolvido a fim de resolver problemas antes gerados pelo Auto-Estimador, que era o fato de utilizar uma curva de tendência de temperatura e

não a informação de textura (assumindo precipitação zero para pixels na região de baixa variação espacial sob a posição que estão os cirrus). Assim o Hidroestimador utiliza diferentes modos para o cálculo de áreas de chuva e ausência de chuva e novos ajustes para o efeito da umidade disponível. Alguns autores encontraram resultados satisfatórios em estudos de modelagem hidrológica (BARRERA et al., 2003; BARRERA, 2007; SALDANHA et al., 2007).

O modelo de estimativa implementado é uma adaptação daquele utilizado pela NEDIS (VICENTE et al. 1998 e 2001). Este modelo passou por várias modificações e para ser implementado operacionalmente na Divisão de Sistemas e Satélites Ambientais (DSA) foi inteiramente adaptado para as condições e estrutura da precipitação sobre a América do Sul (VILA, 2001).

3.6. Análise Multivariada

A técnica multivariada é usada em diversas áreas científicas com o intuito de “limpar” informações empíricas em séries de dados de variáveis distintas. Na climatologia e na meteorologia é muito usada para encontrar relações entre variáveis que expliquem o comportamento de fenômenos atmosféricos. A técnica utilizada pode ser por: Análise de Componentes Principais (ACP), Análise de Agrupamento (AA), Análise Fatorial (AF), Análise de Correspondência ou Análise Discriminante (AD) (SANTOS, 2012).

Nas análises de padrões atmosféricos que utilizam dados ambientais, é muito comum a existência de variáveis redundantes, e a Análise Fatorial (AF) detecta a existência dessa redundância, de maneira que possibilita o reagrupamento das variáveis em um conjunto menor de fatores ou dimensões. A utilização de AF neste trabalho foi realizada através do método de extração de fatores com base na Análise de Componentes Principais (ACP). Essa técnica consiste em reduzir os dados através do método VARIMAX, ou seja, a amostra de dados originais é analisada a partir de um número pequeno de componentes ortogonais ou principais (CPs). O número adequado de CPs é escolhido pelo truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores à unidade (GARAYALDEETAL et al., 1986).

A AF tem sido amplamente utilizada em estudos hidrológicos e climáticos. Diniz (2007) fez um estudo sobre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), com o objetivo de analisar o ambiente atmosférico responsável por enchentes registradas nos anos de 1985 e 2004, aplicou-se a ACP em dois conjuntos de dados compostos por dados do NCEP e registros de superfície e de ar superior, a fim de analisar mecanismos regionais e locais responsáveis por formação de cheias e sistemas convectivos intensos para a região do Rio São Francisco. A análise foi realizada separadamente para analisar padrões atmosféricos de escala sinótica e local. Os resultados mostraram que para o desenvolvimento de enchentes na região, os mecanismos dinâmicos em escala sinótica tiveram influência significativa.

Santos et al. (2010) analisaram o comportamento espaço-temporal da precipitação em parte do Médio e no Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) para determinar padrões atmosféricos em grande escala, associados com eventos extremos de chuva e de cheias na região semiárida. Foi empregada a técnica da ACP como principal ferramenta de análise e utilizaram dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), do período entre 1972 e 1986 em 101 postos pluviométricos distribuídos no Médio e Submédio da BHSF. Os resultados mostraram que as três primeiras componentes retidas apresentaram particularidades sazonais da chuva, evidenciando padrões associados com os principais regimes pluviométricos e sistemas meteorológicos que influenciam o regime hidrológico da BHSF, a configuração espacial dos fatores mostrou forte correlação entre o primeiro fator e os meses de outubro a janeiro, devido principalmente aos VCANS, evidenciando o período chuvoso dessa região, o segundo fator mostra influência direta com os Distúrbios Ondulatórios de Leste e Sistemas Frontais, e o terceiro fator mostra a correlação entre a ZCIT com episódios de VCAN.

Santos (2012) analisou o comportamento da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) para definir padrões atmosféricos associados a eventos extremos de chuva utilizando o RAI (Rainfall Anomaly Index) e associando à técnica de análise fatorial por componentes principais (ACP). O RAI foi calculado usando totais mensais da precipitação de 32 estações de superfície distribuídas na BHSF referentes ao período de 1961 a 2008, provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a técnica da ACP foi aplicada ao conjunto de valores mensais do RAI para analisar padrões temporais e espaciais de fenômenos hidrológicos extremos na bacia. Os

resultados mostraram que ao analisar eventos extremos hidrológicos na BHSF, a aplicação do método RAI foi eficiente não apenas na determinação da duração e intensidade dos eventos, como também na definição da área atingida pelo fenômeno. E a ACP aplicada ao RAI permitiu detectar vínculos entre configurações espaciais de anomalias de precipitação na BHSF e padrões atmosféricos que influenciam a intensidade e distribuição das chuvas, mostrando-se eficiente na identificação de mecanismos dinâmicos que explicam diferentes regimes pluviométricos observados na BHSF.

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Área de Estudo

Brasília ($15^{\circ}50'16''S$; $47^{\circ}42'48''W$) está localizada na região centro-oeste do Brasil, no Distrito Federal (Figura 4.1), abrangendo uma área de 5.779.999 km² e apresenta um clima do tipo tropical de altitude, segundo a classificação Köppen-Geiger (BARRETO, 2008), com verões úmidos e chuvosos e invernos secos e relativamente frios. A temperatura média anual é de, aproximadamente, 21°C e a umidade relativa do ar de 70%, chegando a 20% ou menos nos meses de inverno (INMET, 2013).



Figura 4.1: Imagem da localização geográfica do Distrito Federal (com destaque para a região de estudo Brasília-DF) pertencendo ao Estado de Goiás. (Fonte: Governo de Goiás, extraído de <http://goias-cidades.blogspot.com.br/2014/12/goias-formacao-historica-geografica-e.html>).

4.2. Seleção do período de estudo

As análises desenvolvidas neste trabalho foram concentradas no período entre 15 de setembro e 15 de outubro de 2014. Do ponto de vista científico, o caso surgiu como um desafio, visto que esse foi o primeiro fenômeno registrado em Brasília-DF. Outros fenômenos mais intensos ocorrem mais nas regiões Sul e Sudeste do Brasil dificultando a detecção e/ou visualização de elementos meteorológicos fundamentais para a compreensão de padrões atmosféricos associados com sistemas convectivos intensos e tempo severo. O registro de tempo severo no dia 01 de outubro foi caracterizado pela presença de rajadas de vento, granizo, e destruição no entorno no aeroporto de Brasília-DF. Os dados observacionais e a infraestrutura disponível para monitoramento da convecção indicaram com clareza a formação e evolução do fenômeno. Uma das áreas especialmente afetada pelo vendaval e queda de granizo inclui o Aeroporto Internacional de Brasília, cujos danos materiais levaram à interrupção de pousos e decolagens (<http://www.correiobraziliense.com.br/>) em virtude dos estragos no terminal aéreo.

4.3. Dados

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho foram utilizados os seguintes dados:

- Totais diários de Precipitação e Temperatura provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); disponível em < <http://www.inmet.gov.br/portal/> >;
- Mensagens METAR/SPECI para os meses setembro/outubro confeccionadas a partir de observações meteorológicas feitas no Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek em Brasília e disponibilizadas na página eletrônica da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET); Disponível em <<http://www.redemet.aer.mil.br/>>. Neste estudo foram usados, dados diários de Temperatura, nuvens Cumulonimbus (CB), Nuvens com base abaixo de 3000 pés, Intensidade do Vento, e Pressão;

- Dados de ar superior provenientes de sondagens atmosféricas, realizadas em Brasília-DF às 12 UTC, obtido na página eletrônica do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming – EUA, para o período de 15 de Setembro a 15 de Outubro; <<http://weather.uwyo.edu>>;
- Perfis Termodinâmicos plotados no Diagrama Skew T Log-P incluindo valores dos índices de instabilidade Sweat, Total Totals e Showalter; Disponível em <<http://weather.uwyo.edu/>>;
- Imagens do Radar banda S do Gama/DF (CAPPI 3.100 km e MAXCAPPI), obtidas no dia 01 de outubro de 2014, para analisar a atividade convectiva (tornado) registrada em Brasília, disponível em <<http://www.redemet.aer.mil.br/>>;
- Fotografias tiradas *in situ* no dia da formação do tornado, disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/>>.
- Imagens do Satélite GOES-13 obtidas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Disponíveis em <<http://satellite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp>>;
- Imagens dos aplicativos numéricos FORTRACC e HIDROESTIMADOR obtidas da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O aplicativo FORTRACC (VILA et al., 2008) no modo diagnóstico foi utilizado como uma ferramenta auxiliar para acompanhar a estrutura do evento extremo (tornado), acompanhando o seu ciclo de vida que estava no entorno do aeroporto de Brasília, disponível em <<http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/>>. E o HIDROESTIMADOR foi utilizado para verificar a taxa de precipitação registrada em vários horários no dia 01 de outubro de 2014, disponível em <http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/#>.

4.4 Metodologia

4.4.1. Radar Gama

Imagens do radar Gama (CAPPI e MAXCAPPI) localizado na cidade do Gama-DF foram utilizadas com o objetivo de monitorar e avaliar a intensificação de sistemas convectivos que se desenvolveram na região.

As imagens possibilitam, além de uma classificação qualitativa simples da evolução da atividade convectiva no período de formação do tornado quantificar a intensidade da chuva (taxa de precipitação) entre muito fraca a forte, mas principalmente detectar os sistemas convectivos e monitorar a evolução e organização no decorrer do tempo.

4.4.2. Aplicativos FORTRACC e HIDROESTIMADOR

O aplicativo FORTRACC (Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters), foi usado para acompanhar o deslocamento e evolução dos sistemas convectivos no período de formação e desenvolvimento do tornado. O uso desse aplicativo permite obter informações sobre características físicas das células convectivas imersas nos sistemas sinóticos, e assim acompanhar o seu ciclo de vida completo.

O produto final deste aplicativo exibe uma escala na qual é possível identificar o estágio de desenvolvimento e/ou a intensidade desses sistemas. Onde a cor verde indica que o sistema está em dissipação (desintensificando); a cor amarela indica que o sistema se apresenta estável e a cor vermelha é indicativo de intensificação (VILA et al., 2008; MACEDO et al., 2005).

O Hidroestimador foi usado com o propósito de estimar a chuva convectiva, e a intensidade dela de acordo com a base das nuvens e a temperatura de brilho no topo das nuvens. Extraídas a partir de informações retiradas da página eletrônica do CPTEC, http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/#.

Os produtos mostrados na página eletrônica do DSA exibem a precipitação estimada na imagem GOES mais recente recebida pela DSA e a precipitação acumulada

durante o período entre 12:00 horas do dia anterior e 12:00 horas do dia atual. A ausência de produtos em uma determinada hora ou em um determinado dia é consequência da falta de imagens GOES ou de dados de vento gerados pelo modelo do CPTEC.

Considerando que o FORTRACC se trata de um aplicativo que monitora e identifica as nuvens convectivas e que o modelo HIDROESTIMADOR permite estimar a taxa de precipitação associada a essas nuvens, os dois aplicativos foram utilizados como ferramentas complementares na realização deste trabalho.

4.4.3. Análise Fatorial (AF) por Componentes Principais (CP)

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica da estatística multivariada capaz de transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis da mesma dimensão, denominadas de componentes principais. Essa análise é associada a ideia de diminuição da massa de dados, com uma pequena perda de informação. A técnica pode ser usada para agrupamento de indivíduos e para geração de índices. Ela agrupa os indivíduos conforme sua variação, de maneira que os indivíduos sejam agrupados segundo suas variâncias, ou seja, segundo seu comportamento dentro da população, que é representado pela variação do conjunto de características que define um indivíduo, logo a técnica agrupa os indivíduos de uma população segundo a variação de suas características.

De acordo com Preisendorfer (1988) essa técnica foi utilizada por ser um método de redução de dados com a vantagem de que a máxima variância pode ser explicada pela classificação de autovetores associados aos maiores autovalores da matriz de correlação, logo a amostra de dados originais pode ser analisada a partir de um número pequeno de componentes independentes entre si (ortogonais).

Segundo Moita Neto e Moita (1998), a ACP se baseia na técnica de reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixo mais conveniente para a análise, ou seja, as n variáveis originais geram, através de suas combinações lineares, n componentes principais, cuja principal característica, além da ortogonalidade, é de que são obtidos em ordem decrescente de máxima variância, ou seja, a primeira componente principal detém mais informação estatística que a segunda componente principal, que

por sua vez mostra mais informação estatística que a terceira componente principal e assim sucessivamente. Este método permite a redução da dimensionalidade dos pontos representativos das amostras.

De acordo com a matriz de dados X (n indivíduos \times p caracteres), cujas variáveis possuem média $E(x_j)=m(j)$ e variância $V(x)=s(j)$, $j= 1\dots p$, pode-se obter a matriz de variância e covariância S , sendo assim:

$$S = \frac{1}{n} X \cdot X^t \quad (4)$$

Considerando a matriz X com valores centrados e X^t sua matriz transposta e n é o número de indivíduos ou estações. Normalizando a matriz das variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ normalizadas (média zero e variância um) através da média e do desvio padrão, a matriz variância e covariância será igual à matriz de correlação R , dada por:

$$R = \frac{1}{n} Z \cdot Z^t \quad (5)$$

Sendo a matriz R uma matriz de correlação simétrica e positiva de dimensão ($p \times p$), será diagonalizável por uma matriz ortogonal A , de mudança de base denominada de matriz dos autovetores. Com isso a matriz diagonal D , cujos elementos diagonais são os autovalores de R , é obtida por:

$$D = A^{-1} \cdot R \cdot A = A^t \cdot R \cdot A \quad (6)$$

Em que, A^{-1} é a inversa da matriz A .

As CP's U_1, U_2, \dots, U_p , são obtidas por combinações lineares entre a transposta dos autovetores de A^t e a matriz de observações X , isto é:

$$U = A^t \cdot X \quad (7)$$

Os valores X_i do n -ésimo local podem ser estimados pela seguinte expressão:

$$X_i = A_{j_1}U_1 + A_{j_2}U_2 + \dots + A_{j_k}U_k + \dots + A_{j_p}U_p \quad (8)$$

Em que, as variáveis de U_p é o conjunto dos autovetores de X ordenados por ordem decrescente dos autovalores mais significativos de a em k a, qual seja:

$$U_k = \sum_{j=1}^n a_{jk}X_k \quad (9)$$

O melhor ajuste das componentes é feito através da explicação da variância, pela ordem crescente dos autovalores. A soma dos valores próprios é a soma das variâncias centradas e normalizadas. Assim, a porcentagem da variância dos autovalores em ordem decrescente que é dada por:

$$\%Var(X) = \frac{\sum_{i=1}^q \lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (10)$$

O método de rotação ortogonal usado foi o VARIMAX, que maximiza a variância em cada componente. A correlação entre a i -ésima variável original e a i -ésima componente principal é dada por:

$$Coor(X_i, Z_j) = a_{ij} \cdot \sqrt{\lambda_i} \quad (11)$$

que, a_{ij} é o j -ésimo elemento do i -ésimo autovetor e λ_i o i -ésimo autovalor.

A partir desses cálculos feitos acima, é feita uma análise da contribuição de cada componente principal pela proporção de variância total explicada pelo componente. Com essa informação podemos decidir quantos componentes irão ser utilizados na análise, isto é, quantos componentes serão utilizados para diferenciar os indivíduos. Não existe um modelo estatístico que ajude nesta decisão. Para aplicações em diversas áreas do conhecimento o número de componentes utilizadas tem sido aquele que acumula 70% ou mais de proporção da variância total.

Em seguida é feita uma interpretação de cada componente através da verificação do grau de influência que cada variável X tem sobre a componente Y . O grau de

influência é dado pela correlação entre cada X_j nas componentes Y_j . Se o objetivo de análise é comparar ou agrupar indivíduos, a análise contínua e é necessário calcular os escores para cada componente principal.

Neste trabalho, na técnica de Análise Fatorial por componentes principais é utilizado o programa computacional SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) no modo P, logo em seguida, os autovalores encontrados foram submetidos à rotação VARIMAX, assim obtendo as variáveis mais correlacionadas e que foram essenciais para o favorecimento da formação do evento extremo que ocorreu no dia 01 de outubro de 2014 no Aeroporto Internacional de Brasília.

4.4.4. Seleção e definição das variáveis

O grupo de variáveis usado na análise estatística foi constituído pelos dados horários extraídos das mensagens METAR elaboradas no Aeroporto Internacional de Brasília no período entre 15 de setembro e 15 de outubro de 2014 com resolução de uma hora. As variáveis escolhidas foram: Temperatura do ar (T), Intensidade do Vento, subdividida em classes denominadas de fraca (de 0 a 5 nós) (VT (0-5)) e intensidade forte (de 16 a 39 nós, incluindo rajadas de vento) (VT(16-39)), Percentagem de nuvens cumulonimbus (CB), percentagem de nuvens com base abaixo de 3000 pés (NV<3000pés), e os Índices de Instabilidade (SWEAT (SW), SHOWALTER (SH) e TOTAL TOTALS (TT)).

Cálculo das variáveis

A Temperatura média diária do ar é foi calculada usando equação (12):

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (12)$$

Em que,

T_m é a temperatura média diária (°C);

T_i é a temperatura do ar em cada mensagem METAR/SPECI (°C);

n é o número de mensagens registradas no dia.

A Intensidade do Vento, considerando intervalos de 0 (zero) a 5 (cinco) nós e entre 16 (dezesesseis) a 39 (trinta e nove) nós, foi determinada utilizando a equação (13):

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (13)$$

Em que,

V_m é a velocidade média diária do vento;

V_i é a velocidade do ar em cada mensagem METAR/SPECI (m/s);

n é o número de mensagens registradas no dia.

A percentagem diária de ocorrência de nuvens convectivas do tipo Cumulonimbus (CB) e das Nuvens com base abaixo de 3000 pés, foi calculada utilizando as equações (14) e (15):

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (14)$$

Em que,

P_m são os valores médios diários de ocorrência de nuvens convectivas do tipo CB;

P_i são os valores de nuvens convectivas do tipo CB em cada mensagem METAR/SPECI;

n é o número de mensagens registradas no dia.

E,

$$N_m = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (15)$$

N_m são os valores médios diários de nuvens com base abaixo de 3000 pés;

N_i são os valores de nuvens com base abaixo de 3000 pés em cada mensagem METAR/SPECI;

n é o número de mensagens registradas no dia.

O *Índice Total Totals (TT)*, introduzido por MILLER (1972) é dado por:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2 T_{500} \quad (16)$$

Em que,

T_{850} é a temperatura no nível de 850hPa;

T_{d850} é a temperatura do ponto de orvalho no nível de 850hPa;

T_{500} é a temperatura no nível de 500hPa.

O índice TT combina três informações básicas: o Lapse Rate (LR) de níveis médios, umidade ambiental em 850 hPa, e a temperatura ambiental em 500 hPa. De uma forma geral, valores de TT a partir de 40°C indicam situações favoráveis a tempestades, e acima de 50°C indicam chances de tempestades severas (Quadro 4.1). Entretanto, como ressaltado em HENRY (1987), analisar isoladamente o TT para a previsão convectiva não é adequado uma vez que um LR alto em níveis médios pode levar a um TT alto mesmo sem o suporte de umidade em baixos níveis.

Quadro 4.1: Valores do Índice TT para as latitudes médias. (Fonte: MILLER, 1972).

Índice Total Totals	Ocorrência
TT < 43	Tempestades improváveis
43 < TT < 44	Tempestades isoladas
45 < TT < 46	Tempestades dispersas
47 < TT < 48	Tempestades dispersas e severas isoladas
49 < TT < 50	Tempestades dispersas e tornados isolados
51 < TT < 52	Tempestades dispersas numerosas e tornados isolados
53 < TT < 55	Tempestades numerosas e tornados isolados
TT > 56	Tornados

O *Índice SWEAT (SW)*, é frequentemente utilizado em centros operacionais como indicador de ambientes favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas (Quadro 4.2). Trata-se de um índice bastante elaborado, já que envolve características fundamentais em termos de estrutura dinâmica e termodinâmica da atmosfera para desenvolvimento de tempestades: Umidade nos baixos níveis, instabilidade, jato de baixos níveis, jato de altos níveis, e advecção quente entre 850 e 500hPa. É calculado com base na equação (17).

$$SW = 12T_{d850} + 20(TT - 49) + 2V(850) + V(500) + 125(S + 0,2) \quad (17)$$

Em que,

TT é o valor do índice Total Totals;

S é função da diferença de direção entre o vento de 500 e o de 850hPa;

T_d é a temperatura do Ponto de Orvalho no nível de 850 hPa;

V(500) é o Vento no nível de 500 hPa;

V(850) é o Vento no nível de 850 hPa;

Quadro 4.2: Valores do Índice SWEAT para latitudes médias (NASCIMENTO, 2005)

Índice SWEAT	Potencial para Tempestades Severas
$SWEAT \leq 300$	Sem potencial para Tempestades Severas
$300 < SWEAT \leq 400$	Potencial para Tempestades Severas
$SWEAT > 400$	Potencial para Tornados

O *Índice Showalter (SH)*, é calculado conforme expresso na equação (18) através da diferença entre a temperatura do ar no nível de 500 hPa e a temperatura de uma parcela que sobe adiabaticamente desde o nível de 850 hPa até o nível de 500 hPa.

$$SH = T_{500} - T_{parcela} \quad (18)$$

Em que,

T_{500} é a temperatura em 500 hPa;

$T_{parcela}$ é a temperatura em 500 hPa de uma parcela que subiu desde o nível de 850 hPa.

Este índice também pode ser determinado utilizando diagramas termodinâmicos. A partir da temperatura do ar (médio) no nível de 850 hPa sobe pela adiabática seca que passa por esse ponto até atingir o Nível de Condensação por Levantamento (NCL). Desde o NCL continua-se pela adiabática saturada até o nível de 500 hPa. A temperatura nesse nível é denominada $T_{parcela}$. A diferença ($T_{500} - T_{parcela}$) com seu sinal é o índice S. O índice é positivo quando $T_{parcela}$ está a esquerda da sondagem, indicando estabilidade. O índice Showalter denota a instabilidade da camada e tem valores negativos quando há umidade e calor no nível de 850 hPa e ar frio em 500 hPa. O índice não é representativo quando entre os níveis de 850 hPa e 500 hPa existe uma inversão de temperatura. Tem-se a seguir o Quadro 4.3 com os valores de ocorrência de tornados.

Quadro 4.3: Valores do Índice Showalter para latitudes médias (Fonte: http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/inst_form_conect_sbgl.pdf)

Índice SHOWALTER	Probabilidade de Tornados
3 até 1	Possíveis tornados
0 até -3	Instável, prováveis tornados
-4 até -6	Muito instável, potencial de tornados fortes
< -6	Extremamente instável, potencial de tornados violentos

A temperatura potencial (θ), a temperatura potencial equivalente (θ_e), a temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}) foram calculadas através das equações propostas por Bolton (1980) da seguinte forma:

$$\theta = T \left(\frac{P}{1000} \right)^{0,287} \quad (19)$$

Em que,

T é a temperatura do ar (°C);

P é a pressão atmosférica (hPa).

$$\theta_e = \theta \times \exp \left[\left(\frac{3,376}{T_L} - 0,00254 \right) \times r (1 + 0,81 \times 10^{-3} \times r) \right] \quad (20)$$

Em que,

θ é a temperatura potencial;

r é a razão de mistura em g/kg;

T_L é a temperatura do nível de condensação por levantamento em graus Kelvin, e é dada por essa equação:

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_k} - \ln \left(\frac{UR/100}{2840} \right)} + 55 \quad (21)$$

Em que,

$T_k = T + 273,15$ temperatura absoluta (K);

\ln é o logaritmo natural matemático.

$$\theta_w = \theta * \exp \left[\left(\frac{2,675}{T(k)} \right) * r_s \right] \quad (22)$$

Em que,

θ é a temperatura potencial;

$T_k = T + 273,15$ temperatura absoluta (K);

r é a razão de mistura saturada em g/kg.

4.5. Critérios e organização dos dados para utilização da ACP

Conforme mencionado anteriormente o grupo de dados coletados no Aeroporto de Brasília foi estruturado a partir de informações extraídas de mensagens METAR e SPECI. Inicialmente as informações foram decodificadas e organizadas em planilha do EXCEL. Em seguida essas informações foram processadas para serem utilizadas nas análises estatísticas (Análise Fatorial por ACP). Para facilitar a análise, foi necessário fazer alguns ajustes de denominação, principalmente no grupo de registros da intensidade do vento. No processo de organização e classificação dos dados utilizaram-se os seguintes critérios:

1. A variável representativa do grupo de vento com intensidade de 0 a 5 nós foi denominado “VT(0-5)”;
2. A variável representativa do grupo de vento com intensidade de 16 a 39 nós, incluindo rajadas, foi denominado “VT(16-39)”.
3. A variável representativa da percentagem de nuvens cumulonimbus (CB) foi denominada “CB”

É importante ressaltar também que entre as informações de tempo significativo na área do aeroporto de Brasília no episódio analisado (tornado), as mais frequentes tinham relações com ambientes de instabilidade tais como:

- (1) - RA (chuva fraca);
- (2) - TS (chuva com trovoadas);
- (3) - TSRA (chuva fraca e trovoadas);

- (4) - VCTS (Trovoadas na vizinhança);
- (5) - VCSH (pancadas na vizinhança);
- (6) - GRRA (chuva com granizo);
- (7) - RETS (trovoadas recentes).

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises feitas com base nos registros de precipitação, índices de instabilidade atmosférica, campos de precipitação via radar, imagens do satélite GOES, perfis termodinâmicos construídos a partir de sondagens efetuadas em Brasília-DF e da aplicação da análise fatorial por componentes principais aos dados de superfície provenientes de mensagens METAR elaboradas no Aeroporto Internacional de Brasília, Presidente Juscelino Kubitschek (SBBR).

Para detectar processos meteorológicos específicos responsáveis pela formação do tornado registrado no dia 1 de outubro de 2014, os resultados das análises estatísticas foram comparados com padrões de atividade convectiva obtidos a partir das imagens realçadas do satélite GOES 13, das imagens geradas pelos algoritmos FORTRACC e HIDROESTIMADOR, e dos campos de precipitação (CAPPI e MAXCAPPI) do radar situado em GAMA-DF.

5.1. Análise Observacional

Os histogramas apresentados na Figura 5.1 permitem comparar a evolução diária da precipitação e da temperatura registradas em setembro e outubro de 2014 com o padrão climático em Brasília-DF. Observa-se que a Temperatura Média Mensal (Figura 5.1a) para o mês de setembro foi acima da média em praticamente todo o mês, ficando abaixo apenas nos dias 5 a 9, já para o mês de outubro variou abaixo da média nos dias 5, 7, 26 e 27. A Precipitação Média Mensal (Figura 5.1b) para os meses de setembro e outubro ficaram abaixo da média.

O total pluviométrico registrado na primeira quinzena de outubro concentrou-se nos dois primeiros dias (dia em que ocorreu o tornado). A temperatura atingiu 24,08°C (Figura 5.1d), elevando 2,48°C acima da média histórica que é de 21,6°C (Figura 5.1a). A sazonalidade é bem definida na região, com temperaturas elevadas no período úmido e mais amenas no período seco (inverno).

O regime de chuva em Brasília é bem definido, com precipitação média anual de aproximadamente 1552 milímetros (mm). Praticamente toda chuva ocorre no período de

outubro a abril (Fig. 5.1b). Entre maio e setembro, a capital federal pode passar de dois a três meses sem chuva, sendo o auge da estiagem em junho (Figura 5.1b). Nos períodos mais quentes do ano observa-se a maior concentração de chuvas, enquanto nos menos quentes nota-se a redução da pluviometria. As chuvas registradas em outubro de 2014 se concentraram em poucos dias do mês (nove dias), a média climatológica é 167 mm (Figura 5.1b), e no mês em que ocorreu o tornado essa média foi ultrapassada para 201 mm, equivalendo a 24% da sua normal climatológica (Figura 5.1f).

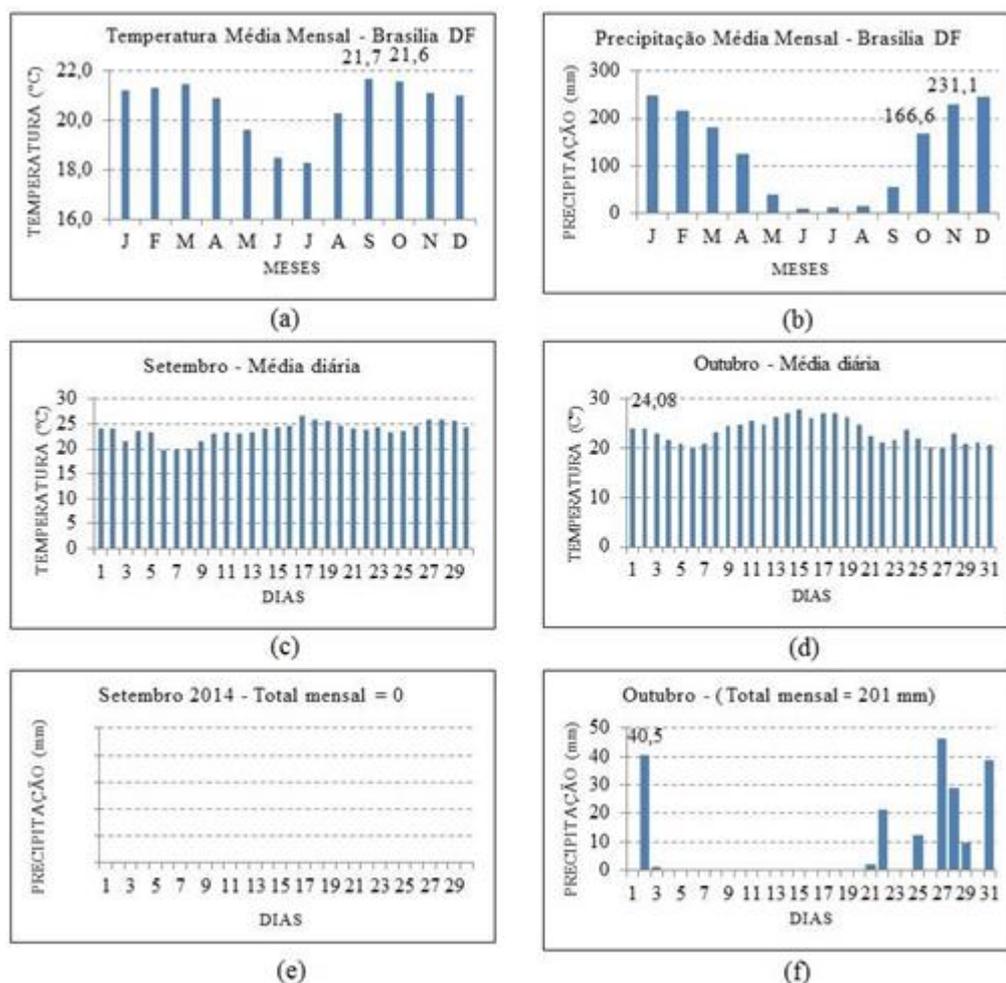


Figura 5.1: (a) Histograma da Média Mensal de Temperatura (média climatológica); (b) Histograma da Média Mensal da Precipitação (média climatológica); (c) Histograma do total diário de temperatura de setembro em Brasília – DF; (d) Histograma do total diário de temperatura de outubro em Brasília – DF; (e) Histograma do total diário da precipitação de setembro em Brasília – DF; (f) Histograma do total diário da precipitação de outubro em Brasília – DF.

5.2. Relação entre a intensidade do vento em superfície e a formação do tornado

Medidas horárias da direção e intensidade do vento em superfície, realizadas entre o período de 15 de setembro a 15 de outubro de 2014, incluindo períodos normais e episódios extremos, permitiram avaliar o comportamento médio desta variável e relacionar com o evento extremo. A Figura 5.2 ilustra o comportamento da direção e intensidade do vento à superfície no aeroporto Internacional de Brasília nos dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro. As informações de tempo significativo contidas no METAR (incluindo também informações de SPECI) indicam um aumento na intensidade do vento antes do tornado o que pode ser detectado nas imagens (CAPPI) do radar (Figura 5.8) estudadas mais na frente. No dia 30 de setembro, observa-se alta frequência (35%) no quadrante Noroeste (NW) (270° a 360°). O primeiro quadrante (entre 0° a 90°) é visivelmente predominante (35,5%) no dia do episódio extremo (01/10/2014). Já no dia 02/10, observa-se uma alta frequência (43,3%) no quadrante (90° a 180°), mas também se podem observar registros em outras direções.

Observou-se que no dia que antecedeu o tornado (30/09), a intensidade do vento chegou a aproximadamente 30 kt. No dia em que ele ocorreu (01/10), a intensidade do vento atingiu os valores mais altos (entre 30 e 40 kt incluindo rajadas de vento) exatamente no período em que há a formação do tornado (entre 17:30 e 18:00 UTC, ou seja, 14:30 e 15:00 HL), coincidindo com características peculiares de ambientes de tempo severo identificados nas imagens de radar e discutidos em detalhes posteriormente. Esse comportamento foi evidente no período da tarde entre 17:00 e 18:00 UTC (14 e 15 HL). Às 17:30 UTC, a direção do vento foi de 240° e com intensidade média de 39 kt e incluindo rajadas. Foi registrada chuva fraca com trovoadas na área do aeroporto, chuva com granizo, nuvens CB (cumulonimbus) e redução significativa da visibilidade no aeródromo. A visibilidade de 10.000 m registrada às 17:00 UTC posteriormente reduziu para 100 m às 17:25 UTC. No dia seguinte, o maior registro de intensidade do vento foi às 21:00 UTC, de 23 kt.

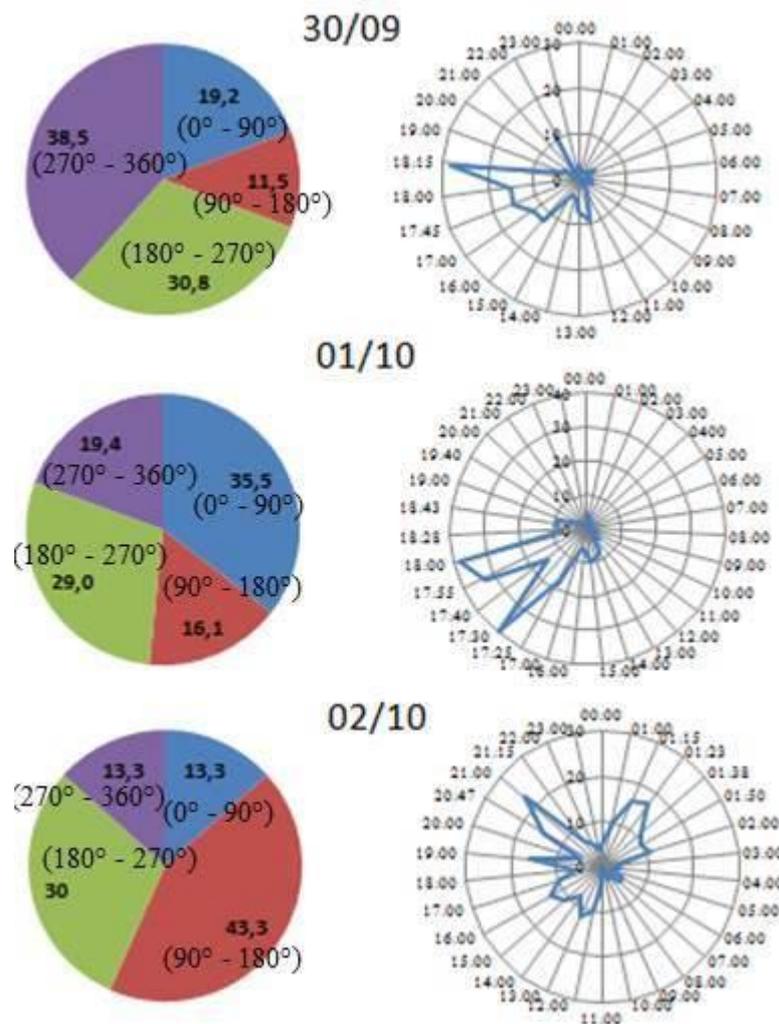


Figura 5.2: Frequência da direção e evolução temporal (UTC) da intensidade do vento em nós (kt) para os dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro de 2014.

As células convectivas desenvolvidas na área do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek causaram precipitação intensa com queda de granizo. Em decorrência disso ocorreram danos no aeroporto. Entre as consequências mais importantes é possível destacar danos nos toldos do estacionamento que caíram em cima de carros (Figura 5.3b,c), e desvios de vôos para aeroportos mais próximos. A Figura 5.3 (a) ilustra a nebulosidade associada ao tornado no seu estágio maduro, caracterizado pela nuvem funil atingindo a superfície.

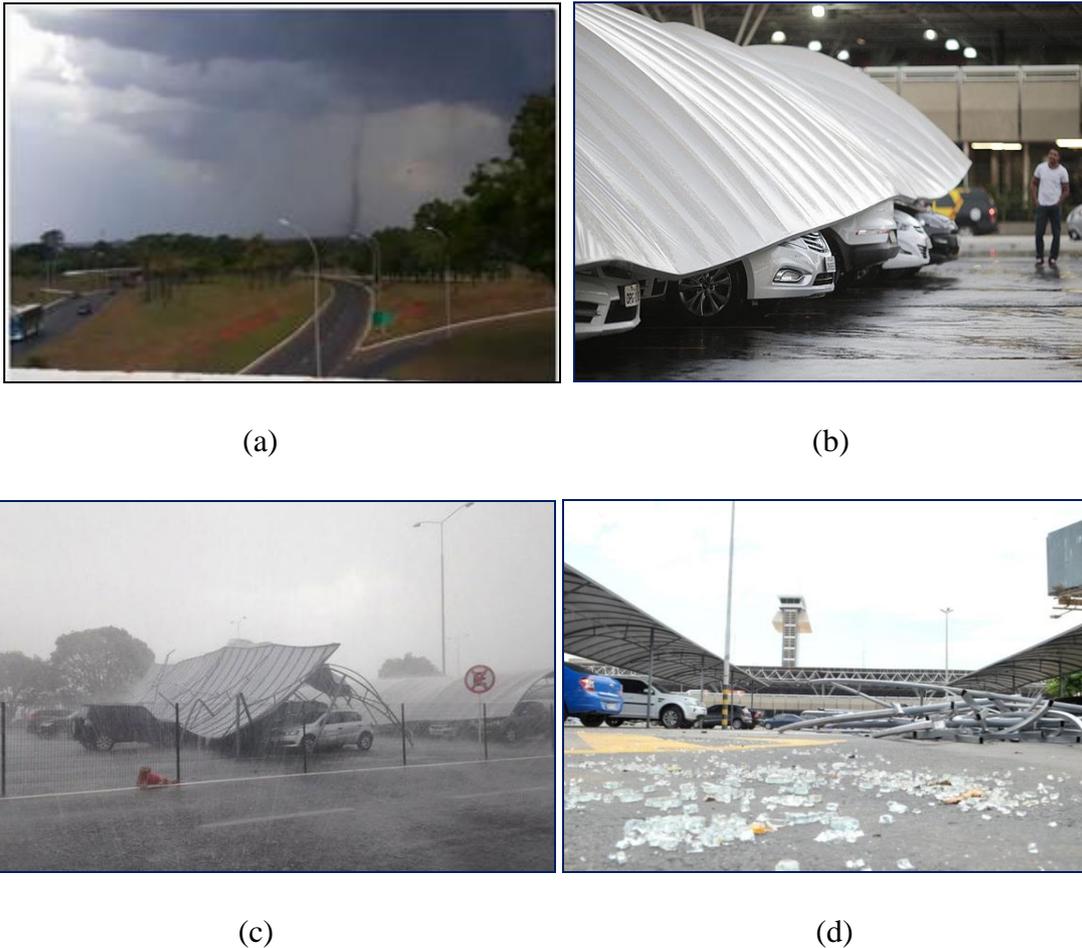


Figura 5.3: Fotografias do tornado (a) e dos danos associados ao fenômeno na área do aeroporto de Brasília – DF (b, c, d) para o dia 01/10/2014. (Fonte: Folha UOL, 2014).

5.3. Análise da evolução temporal da nebulosidade para o dia do tornado

O padrão de nebulosidade observado na sequência de imagens do satélite GOES 13 apresentadas na Figura 5.4 representa um indicativo de que o tornado observado no dia 01 de outubro pode ter resultado da passagem de um sistema frontal identificado no canto inferior direito das imagens. A quantidade de nuvens distribuídas ao longo do continente e no Oceano Atlântico indica forte atividade convectiva, e na escala das temperaturas de brilho, os valores mais baixos estão associados com atividade convectiva intensa, o que será visto melhor na Figura 5.5.

Nas imagens de satélites meteorológicos existem uma forma de nebulosidade, que é associada a baixas desprendidas, muito conhecida como nuvens padrão vírgula invertida (para o Hemisfério Sul). Essas nuvens são observadas na retaguarda de frentes

frias, associadas com ventos fortes, precipitação e tempo de vida curto (REED, 1979; BONATI e RAO, 1987; HALLAK, 2000), o que pode ser observado com mais clareza nas imagens de radar apresentadas mais a seguir na Figura 5.8.

Segundo informações do Boletim Agro Mensal (2014), o tempo estava bem instável, favorecendo o desenvolvimento de nuvens profundas e com probabilidade de ocorrência de tempestade severa. Este ambiente contribuiu para a formação do tornado. A estação automática do INMET mediu ventos de até 95 km/h na hora do evento severo. Houve ainda registro de chuva de granizo no entorno do Distrito Federal.

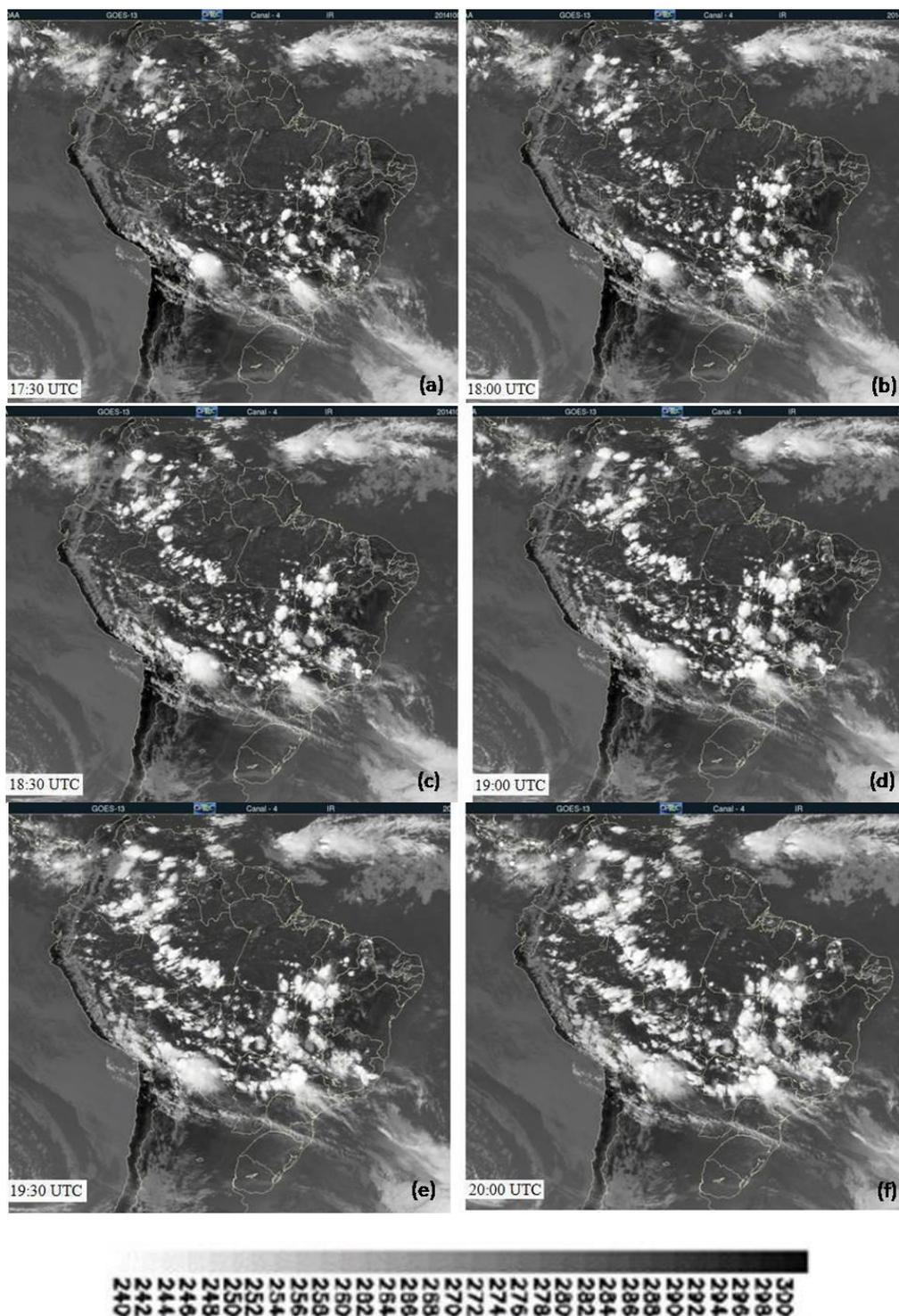


Figura 5.4.: Temperatura de brilho ($^{\circ}\text{K}$) para o dia 01 de outubro de 2014: (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (e) 19:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC, e (f) 20:00 UTC que ilustra a formação de nuvens sobre a região de Brasília-DF. (Fonte: CPTEC, 2014)

As imagens realçadas do satélite GOES-13 para o dia 01 de outubro de 2014, no horário das 17:30 UTC às 20:00 UTC são apresentadas na Figura 5.5 e foram usadas com o objetivo de detectar com maior precisão as áreas que apresentam maior atividade convectiva e ilustrar a sua evolução temporal. Observa-se extensas áreas de nebulosidade profunda indicando atividade convectiva intensa do Amazonas, Acre, Mato Grosso, Goiás, Minas, Tocantins (indicado pelas cores de temperatura nos tons azul escuro e rosa), observa-se também a ZCIT que está localizada na parte superior de todas as imagens (indicado pelas cores de temperatura nos tons azul escuro, azul claro, laranja).

Na região de estudo, o aumento da nebulosidade e intensificação da convecção é mais nitidamente observado no período entre 17:30 e 20:00 UTC e indica que na área do Distrito Federal a atividade convectiva é influenciada pelo aquecimento radiativo. É possível observar o desenvolvimento de CBs cujas temperaturas no topo dessas nuvens atingem valores da ordem de -60°C , -70°C , -80°C . É possível observar também áreas extensas com nuvens profundas cuja distribuição é mostrada pela atuação de um sistema frontal localizado na extremidade inferior direita das imagens (indicado pelas cores de temperatura nos tons azul claro, amarelo e laranja). De acordo com o INMET, a passagem desse sistema frontal influenciou na formação do tornado. No entanto, apesar do realce nas imagens facilitar a interpretação e monitoramento de áreas com tempo instável, a baixa resolução no canal infravermelho impede o monitoramento e evolução dos sistemas convectivos na área de Brasília, e conseqüentemente, a previsão e/ou prognóstico de temporais associados com sistemas em escala local.

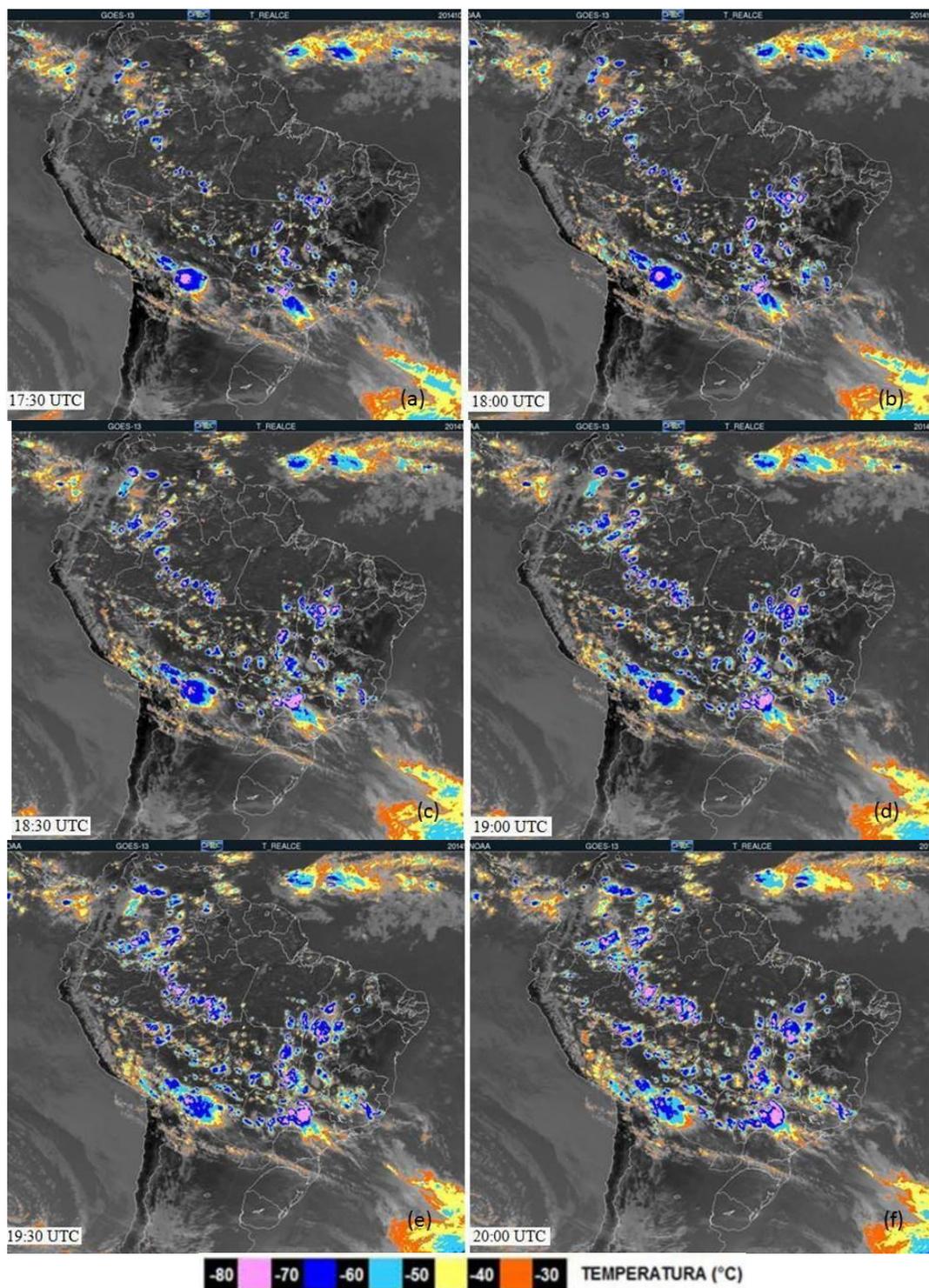


Figura 5.5: Imagens realçadas do satélite GOES 13 no canal infravermelho (IR) ilustrando a evolução temporal da atividade convectiva para o dia 01 de outubro de 2014: (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC; (f) 20:00 UTC. A hora local (HL) é $HL = UTC - 3$ horas. (Fonte: <http://sigma.cptec.inpe.br/>)

Conforme mencionado na metodologia, o monitoramento do ciclo de vida das células convectivas, evolução e trajetória dos SC (sistemas convectivos) são mais perceptíveis através do radar meteorológico ou de imagens resultantes da utilização do aplicativo FORTRACC. A intensificação da atividade convectiva é perceptível na sequência das imagens geradas pelo FORTRACC apresentada na Figura 5.6.

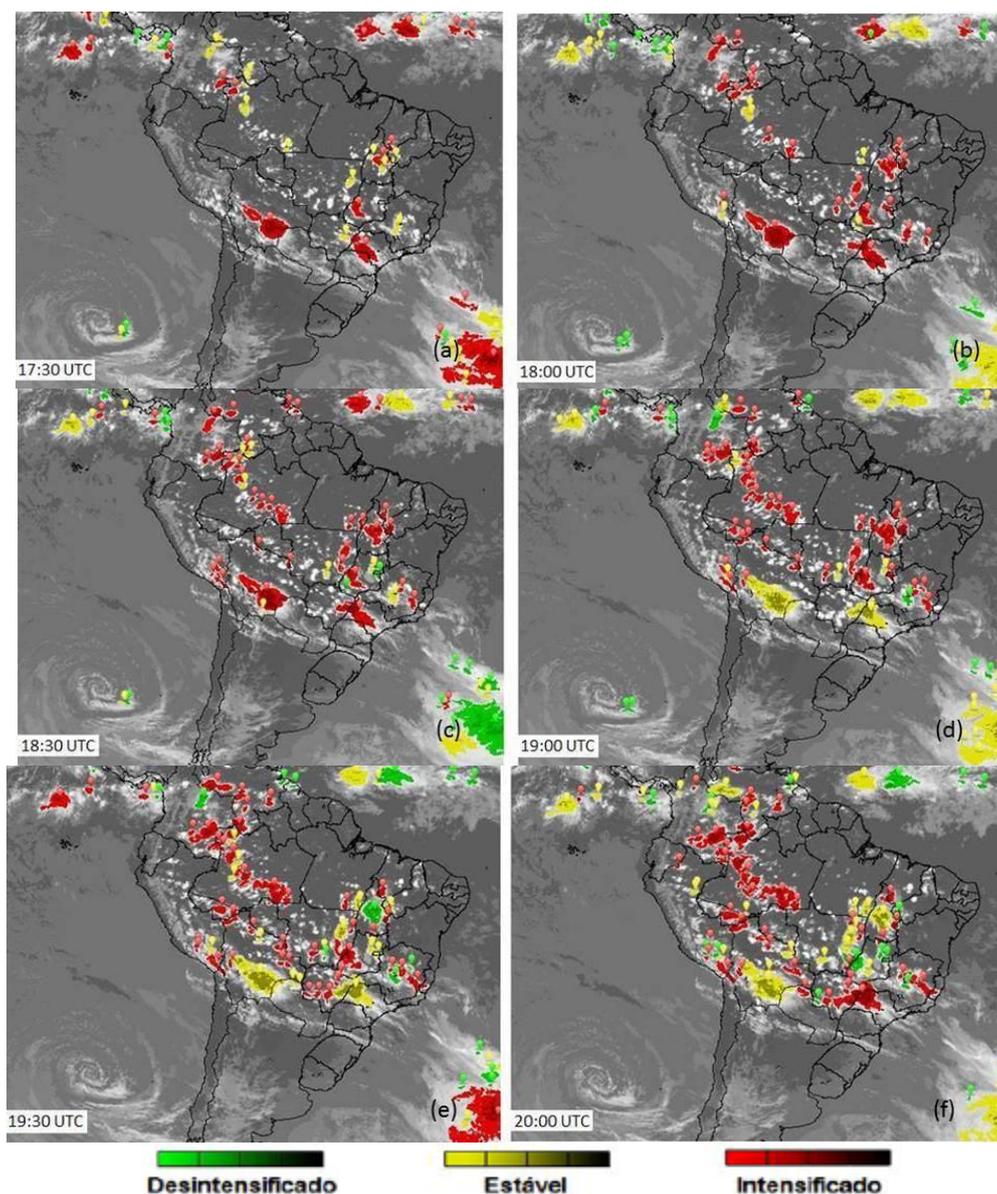


Figura 5.6: Imagens geradas pelo FORTRACC em 01/10/2014; (a) 17:30 UTC; (b) 18:00 UTC; (c) 18:30 UTC; (d) 19:00 UTC; (e) 19:30 UTC; (f) 20:00 UTC. A escala de cores corresponde ao estado de evolução de sistemas convectivos severos. (Fonte: <http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/>).

No período entre 17:30 e das 18:00 UTC (Figura 5.6a,b) verifica-se um aumento significativo do número de núcleos convectivos realçados na cor vermelha (tonalidade que caracteriza o estado de intensificação). Este resultado é coerente com as informações obtidas das imagens de satélite GOES-13 para o dia 01 de outubro de 2014 (Figura 5.5).

Ainda segundo os resultados do FORTRACC, é possível observar que entre 17:30 e 19:00 UTC a atmosfera parece bastante instável na região de estudo. Às 18:00 UTC a cor predominantemente vermelha observada dos núcleos convectivos situados na região do Distrito Federal indica que os processos atmosféricos associados com a formação do tornado estão em estágio de intensificação. Posteriormente, às 18:30 UTC tem-se o estado de maturação das células. Somente às 20:00 UTC a imagem assinala a dissipação do sistema (tonalidade verde).

Estes resultados indicam que a utilização do FORTRACC no modo diagnóstico representa efetivamente um método eficaz no monitoramento de sistemas convectivos. No entanto, a baixa resolução das imagens impede a precisão necessária para estimar a localização exata, dimensão e durabilidade das células convectivas associadas com o desencadeamento do tempo severo (formação do tornado).

Segundo CLIMANÁLISE (2014), as chuvas ocorridas no mês de outubro na Região Centro-Oeste foram devidas, basicamente, a áreas de instabilidades, ora formadas pela interação entre o calor e alta umidade, ora devido à passagem de um sistema frontal. A circulação do vento nos altos níveis da atmosfera também favoreceu a ocorrência de temporais em alguns municípios.

5.4. Evolução do tornado na área de cobertura do radar meteorológico do Gama-DF

Dados coletados na estação meteorológica de superfície do Aeroporto de Brasília, situado na região de formação do tornado (F_0), permitiu avaliar a evolução temporal de algumas das variáveis meteorológicas fundamentais na previsão de tempo severo. Mudanças ambientais significantes foram identificadas considerando principalmente variações bruscas no vento, pressão e na temperatura comumente

associadas com a passagem de tornados. A série de dados revela uma queda de temperatura simultânea ao aumento da intensidade do vento, entre 17:25 UTC e 17:40 UTC conforme indicado na Figura 5.7 pelo símbolo F_0 . Outro dado relevante detectado na evolução temporal das variáveis meteorológicas é a variação brusca da pressão em superfície entre 16:00 UTC e 18:45 UTC. Valores máximos de vento são observados em associação com mudanças bruscas da pressão. Às 17:30 UTC a pressão em superfície atinge o valor mínimo de 1017 hPa com ventos de 39 kt. Às 18:00 UTC a pressão atinge o valor máximo de aproximadamente 1020 hPa com ventos da ordem de 38 kt.

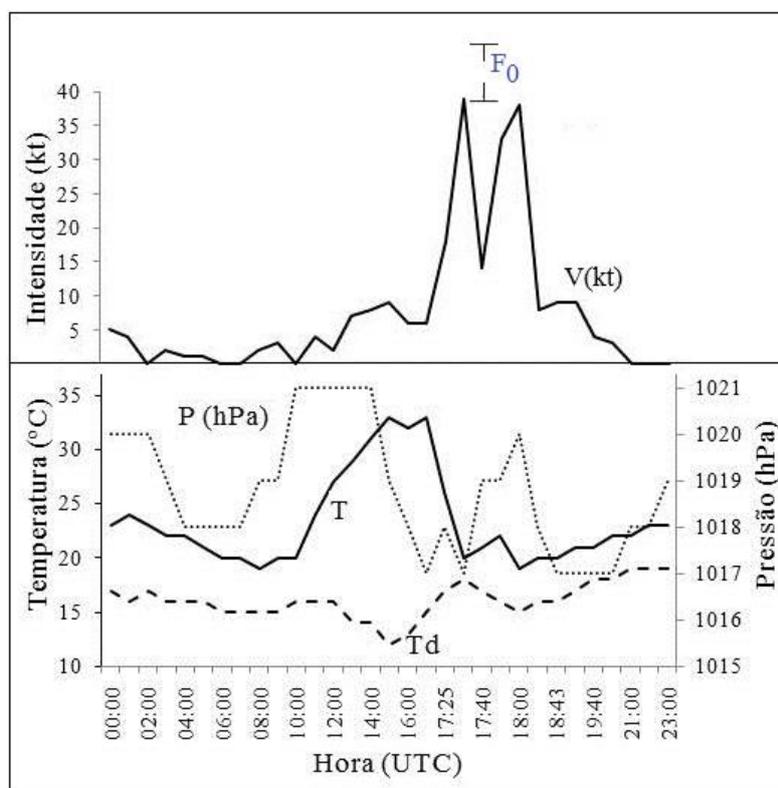


Figura 5.7: Evolução temporal da intensidade do vento (V), pressão (P), temperatura do ar (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td), observadas na estação de superfície do Aeroporto Internacional de Brasília-DF. O símbolo F_0 indica o período em que foram registrados a formação e danos intensos na região do aeroporto. A escala variável no eixo das abscissas varia entre às 16:00 e 21:00 UTC.

Antes da passagem do tornado, o vento variou muito pouco (entre 5 e 10 kt), assim como as curvas T e Td, mostrando que a atmosfera estava úmida, e a Pressão alta. Na medida em que está se aproximando da hora do tornado, a temperatura sobe e a

pressão diminui, que é denominado de mesobaixas, e isso coincide com o primeiro pico de vento forte (40 kt), logo depois a temperatura diminui e a pressão aumenta, o que se pode chamar de mesobaixas, e é onde acontece o seu segundo pico de vento forte, incluindo também rajadas de vento.

Na sequência de imagens do radar meteorológico do Gama (17:20 UTC às 19:10 UTC) apresentada na Figura 5.8, obtidas no dia de formação do tornado, é possível observar a evolução das células precipitantes, padrão de organização e período de máxima atividade convectiva. A mudança no padrão de distribuição espacial das células precipitantes, organização da convecção e desenvolvimento de núcleos intensos é mais visível no período ilustrado, entre 17:30 às 19:10 UTC. Sistemas convectivos organizados em linhas em forma de arcos referenciados na literatura como “*Bow Echos*”, são claramente detectados na área da cobertura do radar.

Na região do Aeroporto de Brasília é possível observar núcleos com taxas de precipitação da ordem de 50 dBZ, evidenciando a ocorrência de tempo severo. Limiares acima de 45 dBZ é indicativo de correntes ascendentes intensas e presença de granizo. A organização da chuva convectiva no formato de um gancho (*hook echo*), denominado eco de gancho (área em tons vermelhos na região de Brasília), é evidente e está indicado pela seta branca no CAPPI das 17:50 UTC (Fig. 5.8d). Essa configuração é uma característica marcante na tela do radar Doppler e constitui forte indício da formação de tornados. Segundo a concessionária que administra o terminal, pousos e decolagens foram suspensos às 14:26 HL (17h26 UTC). As operações aeroportuárias foram normalizadas às 15:53 HL (18h53 UTC).

Na literatura o termo clássico, *Bow Echo*, (BE), é usado para descrever sistemas convectivos na forma de arcos detectados por radar meteorológico, que pode ser indicado pela seta branca. Podem se formar a partir de células simples, linhas de instabilidade ou proveniente de uma supercélula (Figura 5.8i). No entanto, independente da característica inicial, esses sistemas estão frequentemente associados com ventos severos e queda de granizo (Klimowski, et al., (2004). Apresentam extensão horizontal que varia de 20 a 200 km e podem durar entre 3 e 6 horas. O desenvolvimento de vórtices (mesoaltas e mesobaixas) em superfície é considerado como uma característica marcante de ambientes de BE.

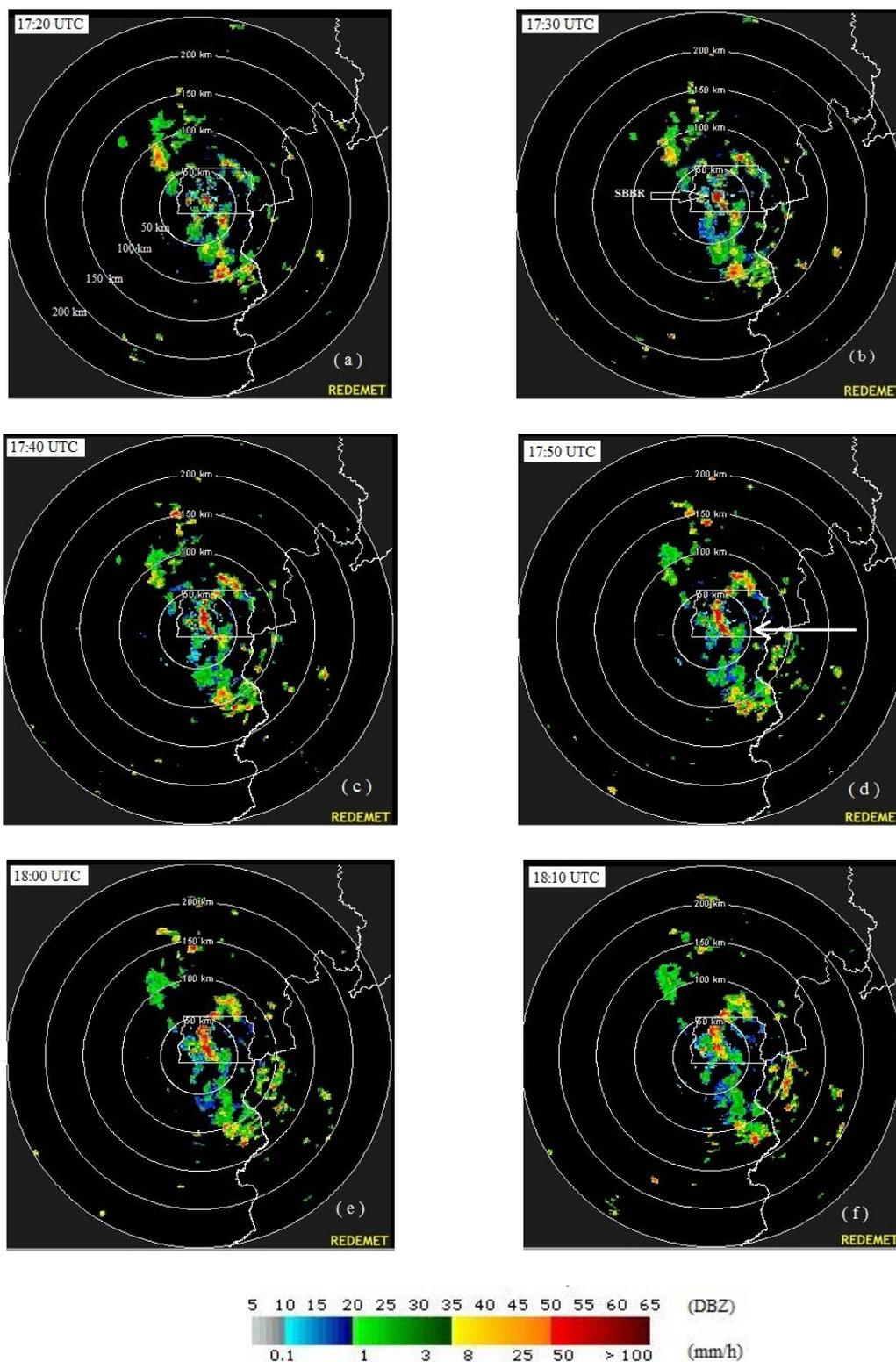


Figura 5.8: Imagens do radar do Gama-DF, para o dia 01/10/ 2014 às: (a) 17:20 UTC; (b) 17:30 UTC; (c) 17:40 UTC; (d) 17:50 UTC; (e) 18:00UTC e (f) 18:10 UTC. A escala de cores indica o grau de severidade das células convectivas. A simbologia mostrada pela seta branca indica a passagem do tornado, onde na tela do radar é indicado por um arco. (Fonte: Adaptado da REDEMET).

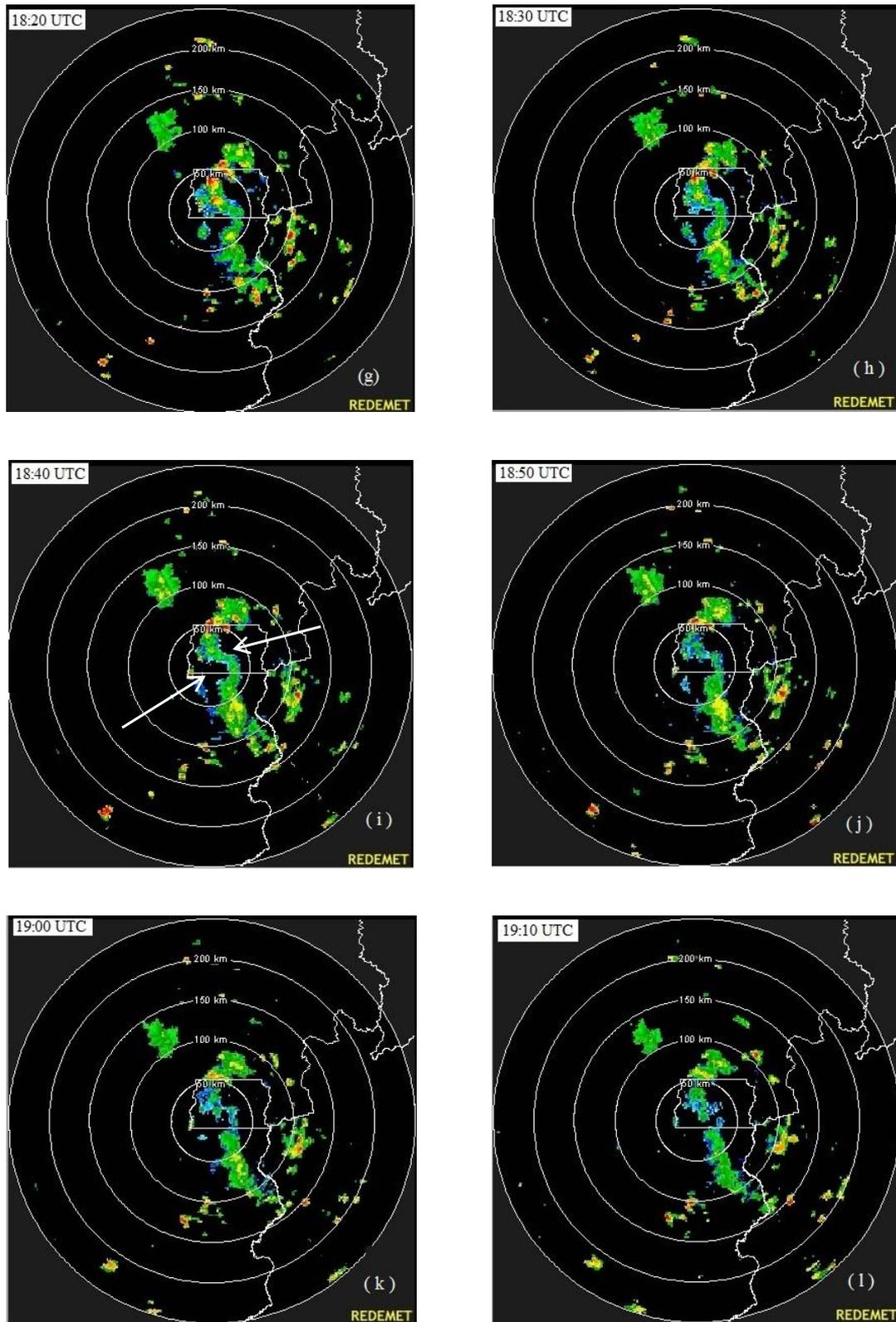


Figura 5.8: Conclusão.

As imagens de radar apresentadas na Figura 5.9 (MAXCAPPI) fornecem as projeções cartesianas nas direções vertical, norte-sul e leste-oeste, dos valores máximos de refletividade (taxa de precipitação) e indicam intensa atividade convectiva proveniente de células profundas na área do aeroporto.

Esses resultados são coerentes com resultados encontrados por outros pesquisadores (GOMES e HELD, 2006; WALDVOGEL et al., 1979) utilizando métodos de análise semelhantes. Células convectivas com intensidades maiores que 45 DBZ indicam alta probabilidade de ocorrência de granizo e rajadas e constituem evidências suficientes para que um previsor experiente antecipe o prognóstico de tempo severo e emita alertas para regiões sob a influência de atividade convectiva intensa.

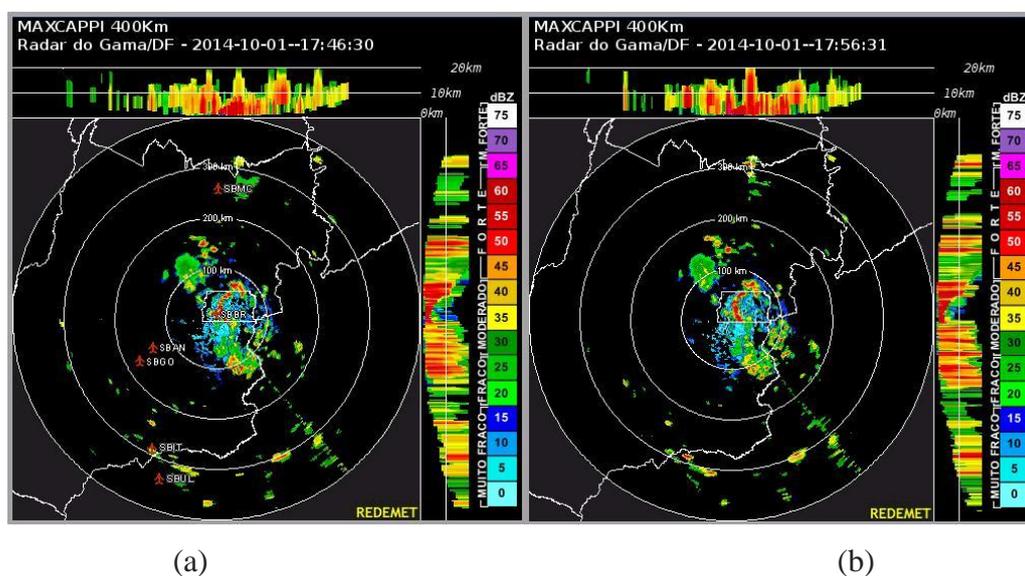


Figura 5.9. Imagens de refletividade (MAXCAPPI) do radar meteorológico do Gama em 01/10/2014, nos horários: (a) 17:46 Z e (b) 17:56 Z. O símbolo da aeronave indica a posição dos aeroportos na área do radar e as cores representam a escala em dBZ. (Fonte: Adaptado da REDEMET).

A sequência de imagens da intensidade de chuva para o dia 01 de outubro das 17:30 às 19:00 UTC obtida pelo aplicativo Hidroestimador é apresentada na Figura 5.10. Verifica-se que não é possível localizar informações que indiquem ocorrência de chuva intensa registrada na área de estudo. Esse resultado indica que a eficiência do aplicativo tem forte relação com a escala espacial dos sistemas precipitantes. Particularmente na situação em estudo o aplicativo subestima a taxa de precipitação

convectiva registrada. Esse resultado é mais evidente se comparado com a taxa de precipitação indicada nas imagens de radar (Figura 5.8).

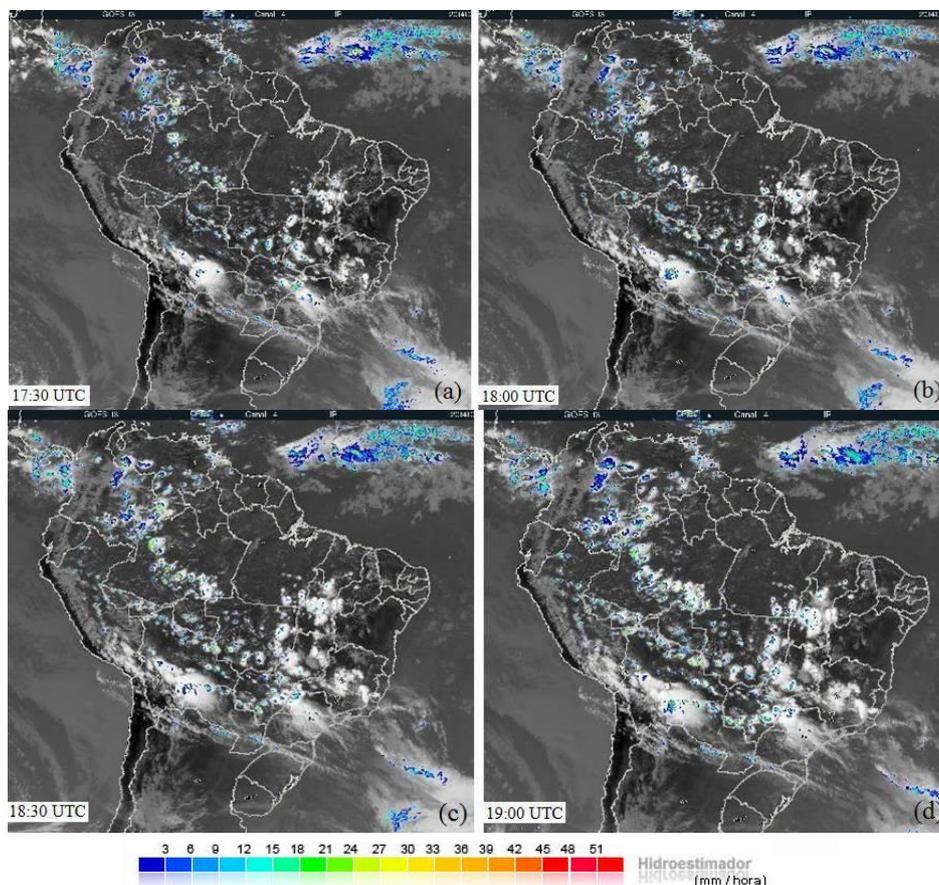


Figura 5.10: Imagens obtidas pelo aplicativo Hidroestimador para o dia 01 de outubro de 2014. A escala de cores representa a taxa de precipitação dada em mm/hora. (Fonte: <http://sigma.cptec.inpe.br/fortracc/>).

5.5. Estrutura vertical da atmosfera

As mudanças na estrutura vertical do conteúdo de vapor d'água e da temperatura estão diretamente associadas com o grau de estabilidade da atmosfera e, conseqüentemente, com o potencial de desenvolvimento de convecção profunda. Esta condição pode ser analisada com base nos valores de índices de instabilidade e do comportamento vertical da temperatura e umidade do ar.

Dados de sondagens realizadas em Brasília-DF permitiram analisar a eficiência dos principais índices de instabilidade utilizados em setores operacionais como

indicadores do desenvolvimento de eventos de tempo severo, bem como no diagnóstico de atividade convectiva local. Com esse intuito, utilizaram-se perfis termodinâmicos e índices de instabilidade obtidos a partir do uso conjunto de diagramas termodinâmicos “Skew-T Log-P” e dados de sondagens atmosféricas realizadas no período de 15 de setembro a 15 de outubro de 2014.

A evolução temporal dos perfis obtidos entre 15 de setembro e 11 de outubro de 2014 pode ser observada na Figura 5.11, onde por falta de dados o dia 05 de outubro não foi incluído na figura. O afastamento das curvas T e Td acima de 600 hPa observado em praticamente todo período analisado, define um padrão peculiar caracterizado pela secagem nos níveis médios da atmosfera e representa um aspecto relevante da estrutura vertical da atmosfera em Brasília-DF. Este padrão é alterado de forma significativa basicamente apenas no período de ocorrência do evento extremo, entre os dias 30 de setembro e 02 de outubro, quando se observa um aumento da umidade do ar que é indicado pela aproximação entre as curvas de T e Td nos níveis abaixo de 600 hPa.

No início da segunda quinzena do mês de setembro verificam-se valores de CAPE considerados extremamente baixos. Entre os dias 15 e 19 de setembro o CAPE é de 0,00 J/Kg. Nos dias seguintes observam-se variações substanciais nos valores deste índice, entretanto sempre abaixo de 1000 J/kg. O CAPE mais alto de 685,9 J/Kg, foi registrado no dia que antecede o tornado. No dia do evento (01/10) o CAPE foi de 241 J/Kg. A variabilidade observada no CAPE indica modificações na estrutura dinâmica e termodinâmica da baixa troposfera. No entanto, esses valores são considerados baixos quando comparados com os limiares que indicam atividade convectiva moderada ($1000 \leq \text{CAPE} \leq 2500$).

A precipitação observada na área de cobertura do radar do Gama para o dia 01/10/2014 não valida este resultado, o que se pode observar que estes valores de CAPE menores que 1000 J/Kg observados nesses dias mostraram que a utilização deste índice foi ineficiente como indicador do grau de instabilidade, e conseqüentemente, como ferramenta na previsão do tornado em estudo. Resultado semelhante foi observado por Costa (2014) em estudo sobre um episódio extremo de precipitação associado com a atuação de Linhas de Instabilidade.

Em contrapartida os índices Total Totals, Sweat e Showalter foram estudados separadamente e em conjunto (Figura 5.15), nesta seção estudamos eles separadamente e analisamos seu comportamento e seus resultados através dos quadros mostrados anteriormente.

A utilização do índice Total Totals é particularmente útil para identificar ambientes convectivos favoráveis à ocorrência de tempestades severas. Nos dias analisados há valores altos, acima de 48, entre os dias 30 de setembro e 02 de outubro. Este resultado indica alta probabilidade de tempestades dispersas e tornados isolados, o que pode ser comprovado no Quadro 4.1.

O índice Sweat é usado para identificar tempestades que variam de ordinárias a severas. Neste estudo, apenas no dia 22 de setembro o valor atingiu 352,4, ou seja, com potencial para desenvolvimento de tempestades severas. No entanto, nos dias próximos ao dia do tornado esse valor chegou a 208,4 indicando baixa probabilidade de eventos tornádicos para o período estudado (Quadro 4.2).

O cálculo do índice Showalter apresentou valores de $-2,05^{\circ}\text{C}$, $1,62^{\circ}\text{C}$ e de $2,77^{\circ}\text{C}$ para os dias 30 de setembro, 01 de outubro (dia do tornado) e 02 de outubro, respectivamente, ou seja, o resultado indica que no dia que antecedeu o tornado e no dia do evento severo a atmosfera encontrava-se instável e com probabilidade de formação de tornados (Quadro 4.3). Com isso chegamos a conclusão que, para a região de Brasília-DF, os índices Total Totals e Showalter mostraram que a atmosfera se apresentava instável e com alta probabilidade para a ocorrência de tornados, enquanto que o índice Sweat foi ineficiente para identificar eventos tornádicos.

Perfis verticais das temperaturas potencial, potencial equivalente e potencial equivalente de saturação elaboradas a partir de dados de sondagens realizadas em Brasília-DF através das equações propostas por Bolton (1980) para os dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro de 2014 são apresentados na Figura 5.12. A queda com a altura ilustrada pela inclinação das curvas de θ_e e θ_{es} para o dia 01/out indica uma atmosfera convectivamente e condicionalmente instável. Entretanto, o afastamento relativamente grande entre as curvas de θ_e e θ_{es} , particularmente nos baixos níveis, indica uma atmosfera com alto teor de vapor, característica que inibe ocorrência de temporais.

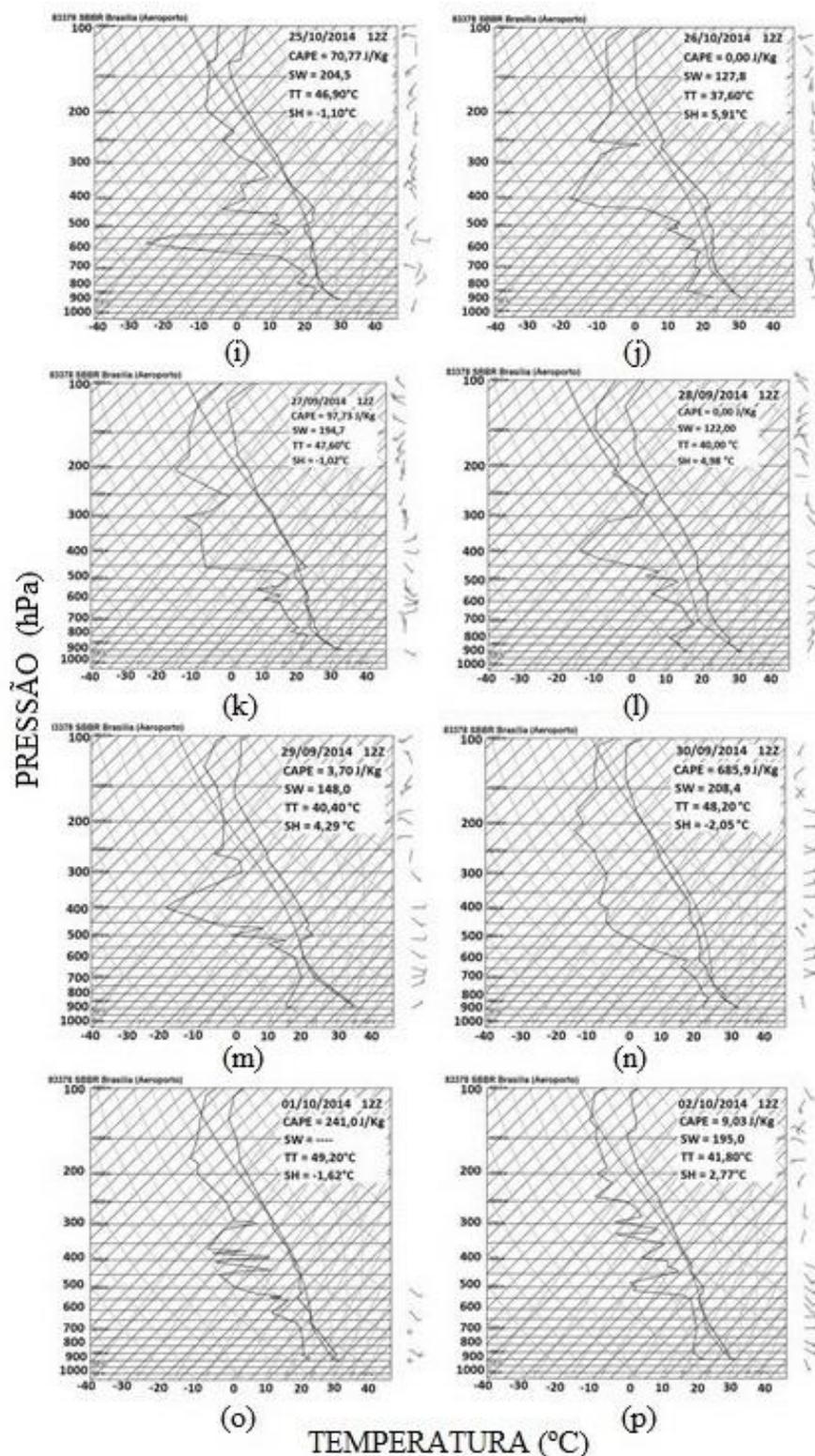


Figura 5.11: Perfis Verticais de Temperatura, Temperatura do Ponto de Orvalho, e do Vento plotados no diagrama Skew-T Log P e valores dos índices de instabilidade (CAPE, TT, SW e SH) obtidos de sondagem de ar superior em setembro e outubro de 2014 em Brasília-DF às 12 UTC. (Fonte: *weather.uwyo.edu*).

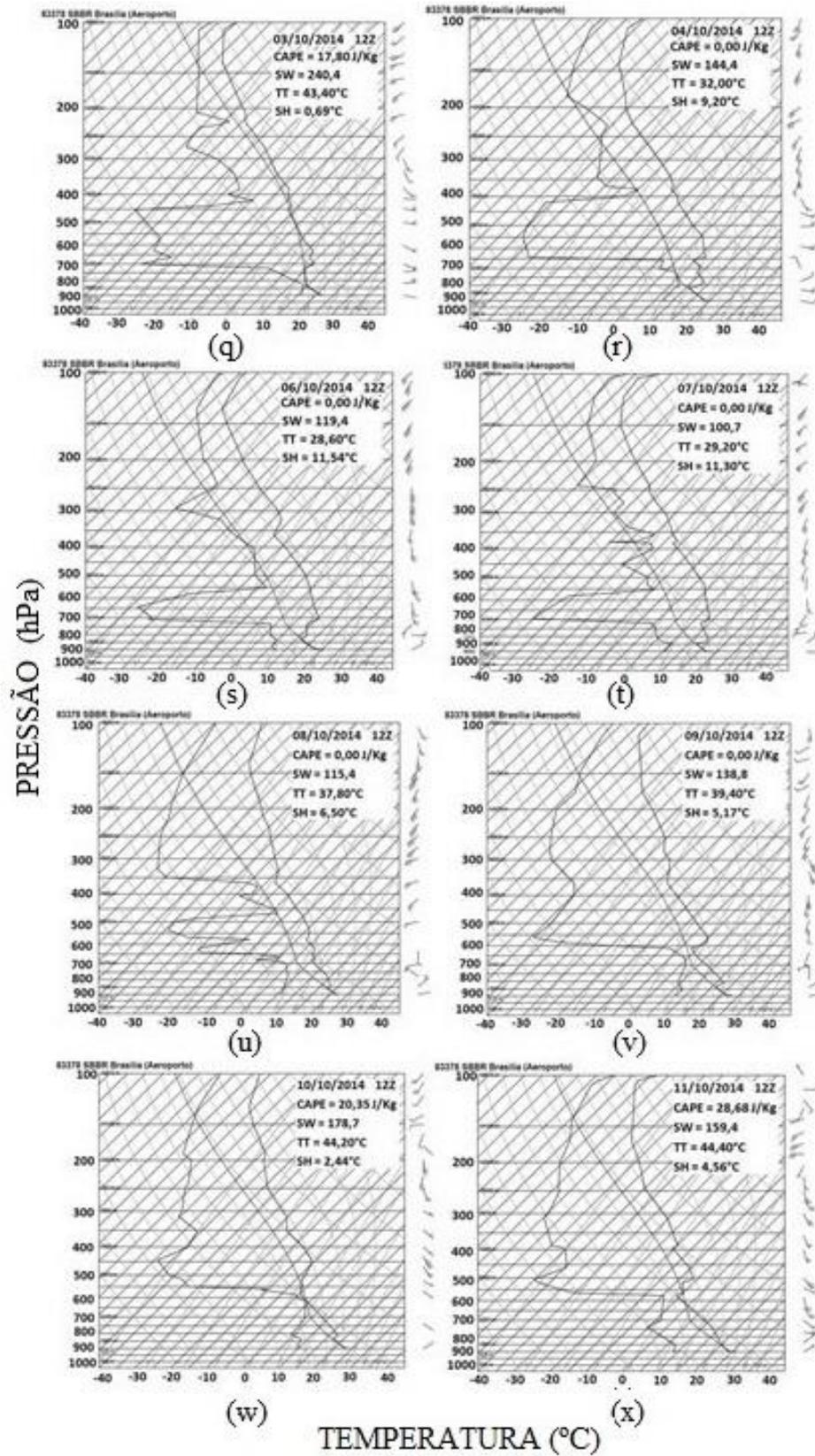
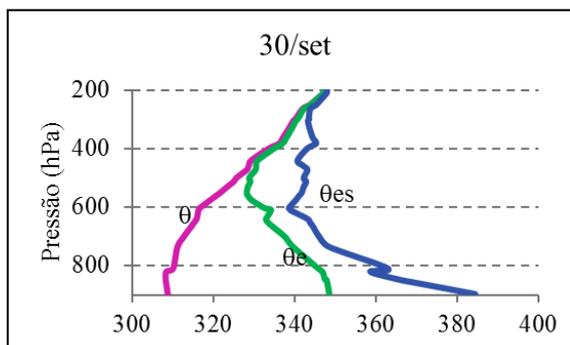
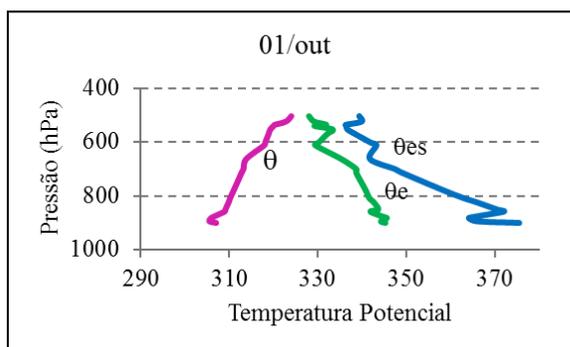


Figura 5.11: Conclusão.

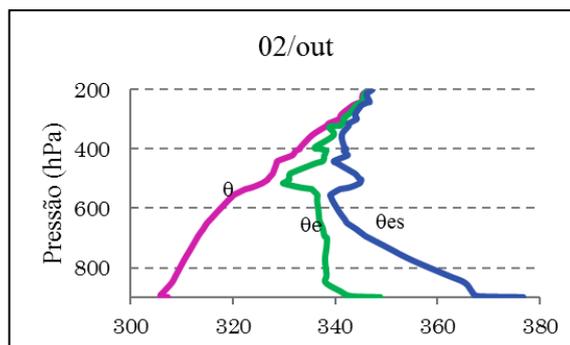
Particularmente no dia 01 de outubro, há um corte nos dados, devido a interrupção no envio de sinais enviados via rádio para estação receptora com as informações sobre vento, temperatura, pressão, umidade. Com a passagem do tornado, só foi possível medições até o nível de 500 hPa. Possivelmente, a sonda foi danificada em virtude da intensidade do vento. Nos dias 30 de setembro e 02 de outubro, as curvas se encontram quando chegam ao nível de 200 hPa devido a umidade que acaba.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12: Perfis verticais da temperatura potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}) obtidos da sondagem realizada em Brasília às 12 UTC para os dias (a) 30/09, (b) 01/10 e (c) 02/10/2014.

5.6. Análise estatística

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da análise de componentes principais (ACP) usando a rotação VARIMAX. Os autovalores, variâncias explicada e acumulada de cada fator retido, são descritos detalhadamente. Observa-se que foram retidos três fatores com poder de explicação de aproximadamente 79,8% da variância dos dados originais. A Tabela 5.1 mostra o peso de cada variável, em relação ao conjunto de dados diários do dia 15 de setembro a 15 de outubro.

A aplicação dos testes de *KAISER* e *BARTLETT* permitiu avaliar a adequação dos dados na realização da análise fatorial. O valor de KMO igual a 0,625 indica que a amostra selecionada é apropriada para aplicação da técnica. Igualmente pode-se concluir que o valor de *BARTLETT* < 0,05, valida a análise (HAIR *et al.*, 1995).

Tabela 5.1: Valores Próprios (autovalores) e porcentagens da Variância Explicada e Acumulada

Comp	Autovalores			Cargas			Cargas Rotacionadas		
	Total	% de Variância	% Acumulada	Total	% de Variância	% Acumulada	Total	% de Variância	% Acumulada
1	3,727	41,406	41,406	3,727	41,406	41,406	2,556	28,404	28,404
2	2,314	25,715	67,122	2,314	25,715	67,122	2,535	28,168	56,572
3	1,142	12,691	79,813	1,142	12,691	79,813	2,092	23,241	79,813
4	0,610	6,780	86,592						
5	0,526	5,845	92,438						
6	0,272	3,018	95,456						
7	0,231	2,563	98,019						
8	0,170	1,894	99,913						
9	0,008	0,087	100,000						

Com o objetivo de facilitar a identificação de comportamentos similares e, consequentemente os fatores físicos responsáveis pelas condições atmosféricas extremas no período, além de ilustrar melhor o grau de relação entre as variáveis e os fatores optou-se por apresentar os resultados conforme descrito na Tabela 5.2. Foram retidos e apresentados apenas os grupos de variáveis com carga fatorial superior a 0,60. A importância relativa das variáveis e do mecanismo dominante é determinada pela

variância explicada por cada um dos fatores observados na Tabela 5.2 (respectivamente, 28,4%, 28,1% e 23,2%).

É possível identificar um padrão de comportamento da atmosfera associado ao primeiro fator (F1) definido pela presença de um grupo de variáveis formado pelo VENTO (16 a 39 kt), CB e NUVEM<3000pés (Tabela 5.2). A alta correlação entre essas variáveis com cargas fatoriais elevadas no primeiro fator (F1) indica a presença de mecanismos necessários para evolução de tempo severo acompanhado de chuva intensa e vendaval. Ventos intensos são necessários para transportar vapor, formação de nuvens e organização da convecção profunda.

Tabela 5.2: Variáveis em função do grau de correlação com os fatores F1, F2 e F3.

Variáveis	Símbolo	F1	F2	F3
SWEAT	SW		0,745	
SHOWALTER	SH		-0,924	
TOTAL TOTALS	TT		0,895	
VENTO(0A5)	VT(0-5)			0,856
VENTO(16A39)	VT(16-39)	0,831		
CUMULONIMBUS	CB	0,898		
TEMPERATURA	T			0,669
PRESSÃO	PRESSÃO			-0,833
NUVEM<3000pés	NV<3000	0,851		

O grupo de variáveis com altas cargas fatoriais no F2 (Tabela 5.2) é constituído pelos índices Sweat (SW), Showalter (SH) e Total Totals (TT). A conexão entre estes parâmetros reflete o grau de instabilidade e cisalhamento vertical da atmosfera, característica determinante para a compreensão de mecanismos vinculados com o episódio de tempo severo registrado em 01 de outubro de 2014.

O F3 (Tabela 5.2) foi responsável por 23,2% da variância total dos dados mostrando forte correlação entre VENTO(0A5), T e PRESSÃO correlacionando negativamente.

A curva ScreePlot apresentada na Figura 5.13 permite relacionar o número de ordem de cada eixo com o valor próprio que lhe está associado. A determinação do número de grupos na ACP é feita de maneira visual, utilizando-se a técnica de inércia

entre saltos. É possível reter apenas os eixos com números de ordem superiores aquele que inicia a estabilização. Foram retidas 3 componentes, porque a partir da quarta, a variação é muito pouca para as demais, e a partir disso, não tem muito poder explicativo.

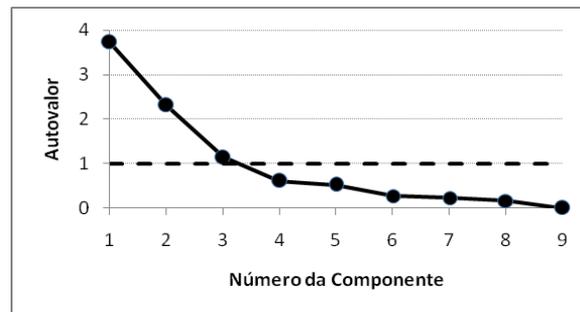


Figura 5.13: ScreePlot

O diagrama ilustrando os grupos de variáveis com maior carga fatorial no primeiro fator e a evolução temporal dos escores é apresentada na Figura 5.14.

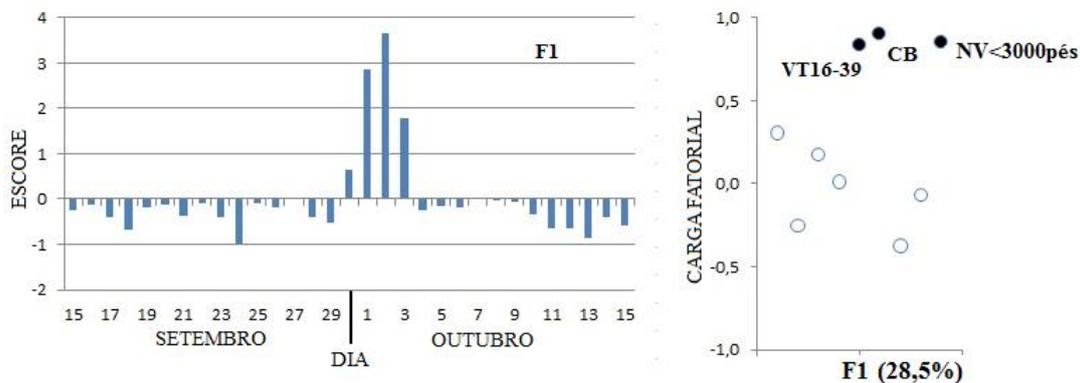


Figura 5.14: Evolução temporal dos escores do primeiro fator (F1) (a) e a Representação diagramática das cargas fatoriais (b).

A série temporal dos escores para o primeiro fator (F1) detém aproximadamente 28,4% da variação total nos dados e mostra valores positivos, superiores a 1, no dia em que ocorreu o tornado e nos dias anterior e posterior, relacionados positivamente com as variáveis VT16-39 (frequência de ventos com intensidade entre 16 e 39 nós), CB (frequência de ocorrência de nuvens do tipo cumulonimbus) e NV<3000pés (frequência de nuvens com altura da base inferior a 3000 pés). A presença de uma alta frequência de nuvens baixas e de CB, associada com ventos fortes e rajadas em superfície nesse período formou um ambiente propício à ocorrência de tempo severo, como foi de fato

observado, inclusive com granizo, o que mostra que as nuvens eram muito profundas e com fortes correntes de vento verticais ascendentes e descendentes em seu interior.

Valores positivos maiores que 2,5, observados na série temporal associada ao F1 nos dias 01, 02 e 03 de outubro (Figura 5.14), evidenciam a relevância das variáveis na evolução das condições de tempo severo associado com o tornado. A severidade das células convectivas tem relação direta com características do cisalhamento vertical do vento. Como Brasília tem uma altitude de aproximadamente 1.200 metros, a interação dos mecanismos termodinâmicos é muito forte, então é um ambiente bastante propício a formação de CBs. Essas condições tiveram fundamental importância para a ocorrência do tornado.

O diagrama ilustrando os grupos de variáveis com maior carga fatorial no segundo fator (F2) e a evolução temporal dos escores é apresentada na Figura 5.15. A segunda componente retém aproximadamente 28,1% da variância total dos dados.

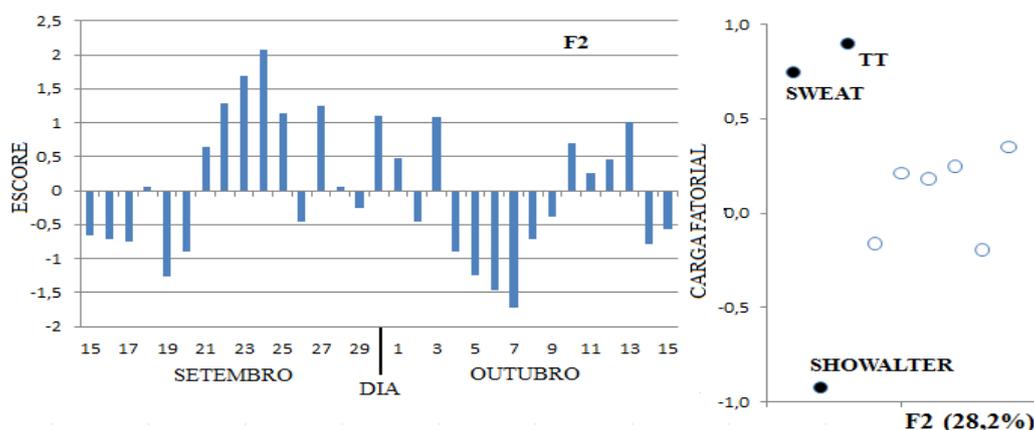


Figura 5.15: Evolução temporal dos escores do segundo fator (F2) (a) e a representação diagramática das cargas fatoriais (b), para outubro de 2014 (b).

Observa-se escores predominantemente positivos (negativos), com valores acima (abaixo) de 1 (-1) no período antes (após) a ocorrência do tornado. O segundo fator (F2) está relacionado com a instabilidade atmosférica, através de correlações positivas com os índices TOTAL-TOTALS (TT) e SWEAT e, negativamente, com o índice SHOWALTER. A conexão entre estes parâmetros reflete características de convecção local, bastante eficientes para compreensão de mecanismos vinculados ao episódio severo.

O índice TT é formado a partir de informações de temperatura e umidade entre os níveis de 850 e 500 mb e, quanto maior o seu valor, maior é a instabilidade atmosférica e a possibilidade de ocorrência de tornados, e também permite inferir sobre a existência de processos físicos relevantes na previsão de granizo. Nas latitudes médias, um TT a partir de 49 já indica a possibilidade de tornados isolados.

Já o índice SWEAT, além de considerar o TT em sua equação, também utiliza informações do vento entre os níveis de 850 e 500 mb. Valores maiores que 300 para este índice são associados a forte instabilidade atmosférica e possibilidade de tempestades severas, enquanto que valores por volta de 400, ou superiores, indicam a possibilidade de tornados. No entanto, no episódio que ocorreu em Brasília, na sondagem das 12 UTC, nenhum valor atingiu 300, o que pode implicar que, para aquela região, os valores para os índices de instabilidade possam ser diferentes dos utilizados como referência para as latitudes médias. O SHOWALTER utiliza informações da atmosfera no nível de 500 mb e quanto mais negativo for o seu valor, maior é a instabilidade na atmosfera, mas vale ressaltar que em casos de inversão térmica na camada, a sua representatividade é reduzida.

A série temporal mostra escores com valores positivos significantes no período entre os dias 21 e 25 de setembro, antes da formação do tornado, e valores negativos no período de 5 a 9 de outubro, depois do tornado.

Embora o escore para o dia do tornado, não tenha sido elevado, os valores observados individualmente para cada índice nas séries temporais mostram a presença de instabilidade atmosférica.

A evolução temporal dos índices de instabilidade relacionados com o F2 (Figura 5.16) mostra valores mais altos do TT nos dias que antecedem o evento severo (tornado) e redução desses valores no período pós-tornado. Esse comportamento indica que o processo de convecção está associado com precipitação. É importante ressaltar que, numericamente, estes valores são extremamente baixos se comparados com os limiares tradicionalmente utilizados em previsões de eventos convectivos severos (BLUESTEIN, 1993).

O F3 (Figura 5.17) detém 23,2% da variância total dos dados e apresenta correlação negativa com a variável P (Pressão), e positiva com as variáveis VT0-5 (ventos entre 0 e 5 nós, em superfície) e T (temperatura do ar). A pressão e a

temperatura do ar são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a temperatura, menor será sua pressão.

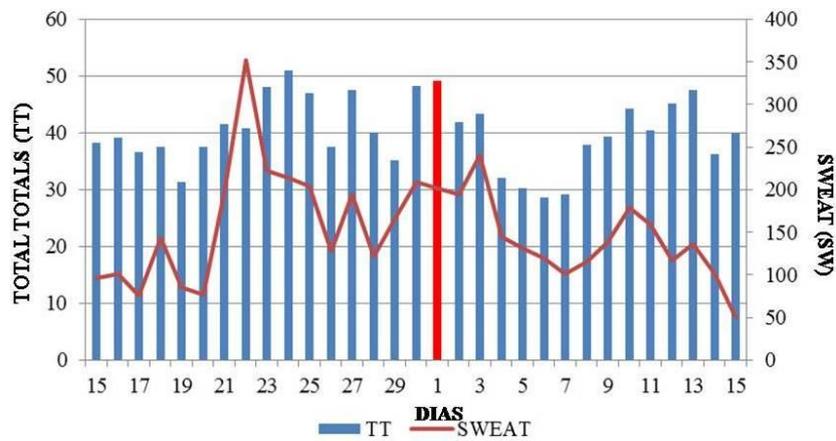


Figura 5.16: Evolução temporal dos índices TT e SWEAT.

O comportamento inverso dos escores no período antes e depois do evento, entre os dias 25 de setembro e 07 de outubro, indicam a importância da temperatura local na compreensão de processos atmosféricos favoráveis ao desenvolvimento do tornado. Verificam-se valores mais altos da temperatura nos dias que antecedem o registro do evento severo, enquanto que os valores mínimos dessa temperatura são observados depois do tornado, provavelmente associados com precipitação.

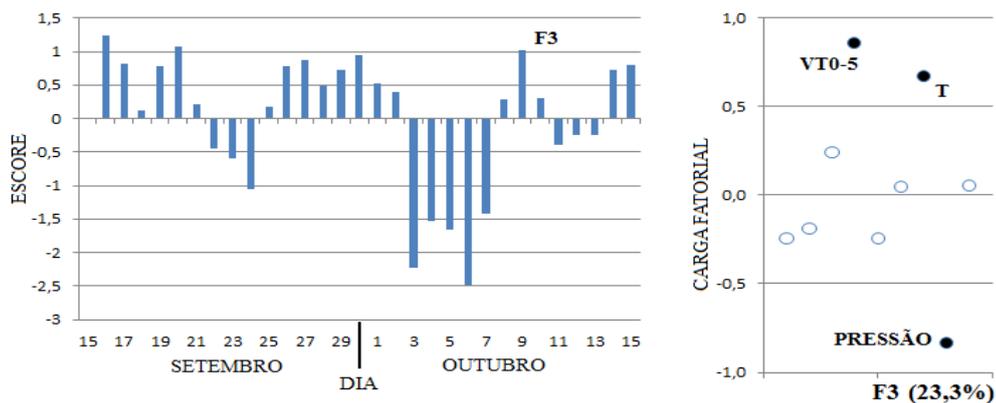


Figura 5.17: Evolução temporal dos escores do terceiro fator (F3) (a) e a Representação diagramática das cargas fatoriais (b).

Escores predominantemente positivos nos dias anteriores ao dia do tornado indicam a presença de ventos fracos, aliados a temperaturas mais elevadas e baixas

pressões, o que favorece a formação de nuvens. No entanto, nos dias posteriores ao evento, os escores são negativos e elevados. Este resultado reflete a importância do padrão de comportamento da temperatura e da intensidade do vento no processo de desenvolvimento e dissipação do evento severo analisado.

6. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa permitiram concluir que:

- Extensas áreas de instabilidade associadas com variações substanciais na temperatura do ar e rajadas de ventos de até 39 kt permitiram a formação do primeiro tornado registrado em Brasília – DF classificado como pertencente à categoria F0 (mais fraco);
- Condições termodinâmicas importantes como, alto teor de umidade nos baixos níveis e alguns índices convectivos importantes como o CAPE não indicaram a possibilidade de formação de tornado;
- Os produtos do FORTRACC contribuíram de forma complementar na detecção, monitoramento do ciclo de vida de sistemas convectivos fundamental na avaliação de ambientes favoráveis ao desenvolvimento de eventos severos de tempo. Representa uma ferramenta importante em estudos sobre evolução da convecção em escala local e regional;
- O HIDROESTIMADOR foi pouco eficiente na estimativa da intensidade da precipitação associada com células convectivas isoladas;
- As imagens do radar meteorológico do Gama foram decisivas na identificação dos sistemas convectivos severos típicos de ambientes com desenvolvimento de tornados;
- Linhas de instabilidade, curvas com ecos em forma de arcos (“*BOW echoes*”) detectados pelo radar no auge do tempo severo com chuva intensa, e danos em superfície representam os indícios mais fortes da ocorrência do tornado registrado no dia 01 de outubro de 2014 em Brasília-DF.
- A aplicação da ACP permitiu apontar os fatores decisivos para formação do tornado (F0) registrado em Brasília-DF.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, C. R.; SOUZA, E. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; BIEZATO, B. Influência dos jatos em médios e baixos níveis nos processos de nuvem: estudo numérico de uma linha de instabilidade amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. vol. 29 no.1. 29-46. São Paulo, 2014.

ANDRÉ, I.R.N. Algumas considerações sobre mudanças climáticas e eventos atmosféricos severos no Brasil. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v.1, n.1-2, p.1-9, 2006.

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T. Multi-scale variability of sea surface temperature in the tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research.**, v.109, C05009, Doi:10.1029/2003JC002220, 2004.

ANTÔNIO, M.A. **Ocorrência de tornado na região tropical do Brasil**. Boletim Climatológico, n. 3, p. 136-141, 1997.

ANUNCIAÇÃO, Y. M. T. **Regimes de Tempo e Precipitação Extrema de Verão Observados e Simulados na Região central do Brasil**. Tese de Doutorado Nº13. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Brasília – DF, 2013.

BARRERA, D.; ZUCARELLI, G.; CEIRANO, E. “Una técnica satelital de estimación de lluvia como herramienta de pronóstico hidrológico: Aplicación a la tormenta del 22 al 25 de abril de 2003 sobre Santa Fe y Entre Ríos”, **In Anais...**, do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Brasil, 2003.

BARRERA, D.F. “The generation of synthetic brightness temperature images to improve rainfall estimation from GOES satellite”. **In Proceedings of Predictions in Ungauged Basins: PUB Kick-off**, IAHS Publication n.309, c.13, p. 113-120. Brasília, Brasil, 2007.

BARRETO, R. **Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, 205 p., 2008.

BARROS, J. R.; BALERO, J. C. S. A influência do Clima e do Tempo do Centro-Oeste do Brasil nas Condições de Voo na Região. **Revista de Geografia- Élisée**, v.1, n.2, p.25-49, Goiânia, 2012.

BLUESTEIN, H.B. **Synoptic-Dynamic Meteorology**. Vol I and II. Oxford University Press, New York, 431pp and 594pp, 1993.

BLUESTEIN, H. B.; Pazmany, A. L. Observations of tornadoes and other convective phenomena with a mobile, 3-mm wavelength, doppler radar: the spring 1999 field experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 12, p. 2939-2951, Dez. 2000.

BONATTI, J. P.; Rao, V. B. Moist baroclinic instability in the development of north pacific and south american intermediate-scale disturbances. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 18, p.2657-2667, 1987.

BRANDES, E. A. Mesocyclone evolution and tornadogenesis: some observations. **Monthly Weather Review**, v. 106, n. 7, p. 995-1011, July 1978.

BRANDES, E. A. Vertical vorticity generation and mesocyclone sustenance in tornadic thunderstorms: the observational evidence. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 11, p. 2253-2269, Nov. 1984.

CAMPOS, C.R.J.; EICHHOLZ, C.W. Características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica** (Impresso), 29: 331-345, 2011.

CARBONE, R. E. A severe frontal rainband. Part II: tornado parent vortex circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, n. 11, p. 2639-2654, Nov. 1983.

CASTRO FILHO, H. C.; STEINKE, E. T.; STEINKE, V.A. Análise Espacial da Precipitação Pluviométrica na Bacia do Lago Paranoá: Comparação de Métodos de Interpolação. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, V.1, N.5, p.336 – 345, 2012.

CAVALCANTI, I. **Casos de Intensa Precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no Período de Inverno de 1979 a 1983**. São José dos Campos, INPE. (INPE3743-RPE/498), 1985.

CAVALCANTI, I. F. A., ROWNTREE, P. A Zona de Convergência do Atlântico Sul no Modelo Climático do Hadley Center, Anais..., **XIII Cong. Bras. Met.**, Brasília, 1998.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. & SILVA DIAS, M.A.F. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, Oficina de Textos. 463 p. 2009.

Costa, M.N.M. **Episódio de tempo severo em Brasília-DF: Importância de fatores locais no desenvolvimento de convecção profunda**, 95 p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-2014.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and cloud dynamics**. Academic Press, Califórnia, 1989.

CUNHA, G. R. **Meteorologia: fatos e mitos**. Passo Fundo: Embrapa, 1997, p. 80-83.

DAVIES, J. M.; Doswell III, C. A.; Burgess, D. W.; Weaver, J. F. Some noteworthy aspects of the Hesston, Kansas, tornado family of 13 march 1990. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 75, n. 6, p. 1007-1017, June 1994.

DINIZ, M. C. S.; **Variabilidade Climática e Ocorrência de Cheias na Zona Semiárida da Bacia Hidrográfica do São Francisco**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 86f, 2007.

DOSWELL, C.A. **What is a tornado?** Norman (USA): NOAA/ERL/National Severe Storms Laboratory [on line] 1997.

DOSWELL III, C. A.; Bosart, L. F. **Extratropical synoptic-scale processes and severe convection**. In: Doswell III, C. A. (Ed.) Severe Convective Storm. Cap. 2. A Meteorological Monograph: American Meteorological Society. Submitted: May 2000.

DYER, R.C. Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil and Paraguay. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 1429-1435, 1988.

DYER, Robert C. A review of tornado activity in Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 1994, Rio de Janeiro. **Proceedings**. São José dos Campos: INPE, 1994. v.30, p203-213.

FUJITA, T. T.; Pearson, A. D. Results of FPP classification of 1971 and 1972 tornadoes. In: **Conf. on Severe Local Storms**, 8., 1973, Denver: Preprints... Boston: American Meteorological Society, 1973. p. 142-145.

FUJITA, T. T. Tornadoes and downbursts in the context of generalize planetary scales. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 8, p. 1511-1524, 1981.

GAN, M.A. **Um estudo observacional sobre as baixas da alta troposfera nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil**. Dissertação de Mestrado, INPE -2685-TDL/126. 1982.

GARAYALDE. E. J. G.; da SILVA. M. G. A.; TAVARES. A. de SÁ. Classificação meso climática da região sul do Brasil pela análise de componentes principais. In: **Congresso Interamericano De Meteorologia**. 1, 1986, Brasília. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira De Meteorologia, v. 1, 1986, p. 119-124.

GARCIA, S. R. **Variabilidade do Sistema de Monção da América do Sul: relações com a Oscilação Decadal do Pacífico**. Dissertação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo. 2006.

GOMES, A.M. e HELD, G., 2006: **Identificação, rastreamento e previsão de tempestades severas. Parte II: Evento de ventos intensos**. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, SBMET, Novembro de 2006, Florianópolis, SC.

HAGEMEYER, B. C.; Schmocker, G. K. **Characteristics of east-central Florida tornado environments**. *Weather and Forecasting*, v. 6, n. 4, p. 499-514, Dez. 1991.

HAIR, J. F., JR., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L. AND BLACK, W. C. *Multivariate Data Analysis*, 3rd ed, **Macmillan Publishing Company**, New York. 1995.

HALLAK, R. **Aspectos dinâmicos e simulação da formação e evolução de um vórtice de ar frio**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Análise de Desempenho de Índices de Instabilidade Atmosférica na Previsão de Fenômenos Convectivos de Mesoescala na região Metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2, 173 - 206, São Paulo. 2012.

HENRY, W. **The Skew-T, Log P Diagram**. National Weather Service Training Center, EUA, 1987, 68 p.

HOUZE JR, R. A. **Cloud Dynamics**. Academic Press, Califórnia, 1993.

INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: dezembro de 2013.

INMET (2014) – **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: http://www.gov.br/portal/arq/upload/BOLETIM-AGRO_MENSAL_201410.pdf. Acesso em: dezembro de 2014.

JOHNS, R. H.; DOSWELL III, C. A. **Severe local storms forecasting**. *Weather and Forecasting*, v. 7, n. 4, p. 588-612, 1992.

KERR, R. A. **A North Atlantic climate pacemaker for the centuries**, *Science*, 288, 1984–1985. 2000.

Klimowski, B. A., M. R. Hjelmfelt, and M. J. Bunkers, 2004: **Radar observations of the early evolution of bow echoes**. *Wea. Forecasting*, 19, 727–734, 2004.

KOUSKY, V. E., Gan, M.A. 1981. **Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south Atlantic**, *Tellus*, 33, 538-551.

LEMON, L. R.; Doswell III, C. A. **Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornado genesis**. Monthly Weather Review, v. 107, n. 9, p. 1184-1197, Set. 1979.

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

MADDEN R. AND P. JULIAN. **Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period**. J. Atmos. Sci., 29, 1109-1123. 1972.

MARCELINO, I. P. V. O.; Herrmann, M. L. P; Ferreira, N. J. **The occurrence of tornadoes in Santa Catarina State, Brazil**. **Australian Meteorological Magazine**. (Submetido), 2002.

MARCELINO, I. P. V. O.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. **Análise do episódio de tornado ocorrido no dia 07/02/98 no município de Abdon Batista - SC**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. p. 05-10. 1 CD-ROM

MARCELINO, E. V.; NUNES, L.H.; KOBAYAMA, M. **Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais**. Caminhos de Geografia, v.6,n.19. p.130-149, 2006.

MASSAMBANI, O.; Carvalho, L.M.V.; Vazquez, M.A. **Tornado ou microexplosão? Um diagnóstico via Radar do evento de Itú-São Paulo**. In: **VII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo, 1992. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1992, v. 2, p.763-768.

MATSUMOTO, S.; NINOMIYA, K.; HASEGAWA, R.; MIKI, Y. **The structure and the role of a subsynoptic-scale cold vortex on the heavy precipitation**. **Journal Meteor. Society**, Japan, 60, 339-354. 1982.

MENDONÇA, M.; MONTEIRO, M. A., 1997. **Precipitações anômalas, concentradas e localizadas ocorridas na costa centro sul do Estado de Santa Catarina no período de 1990 a 1995**. Boletim Climatológico, FCT/UNESP, Presidente Prudente, 2(3): 77-180.

MENEZES W. F.; Silva Dias, M. A. F. Simulação numérica dos casos Itú e Ribeirão Preto: comparação entre casos de tempestades imersas em ambientes com diferentes padrões de cisalhamento vertical do vento. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 10., 1998, Brasília. Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. 1 CD-ROM.

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

MOITA NETO, J. M.; MOITA, G. C. **Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados**. Química Nova, v. 21, p. 467- 469, 1998.

NASCIMENTO, E.L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: Uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.1, p.121-140, 2005.

NECHET, D. **Ocorrência de tornados no Brasil**. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 26, n. 2, p. 29-39, 2002.

NECCO, G. **Extratropical Wheather System in South-America**. Fourth PALMÉM, E. Origin and struture of high-level cyclones south of the maximum westerlies. Tellus, 1: 22-31, 1949.

NEWTON, C. W. **Dynamics of severe convective storms**. Meteor. Monogr., v. 5, n. 27, p. 33-58, 1963.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. **Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America**. J. Climate, in press. 1996.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. **Alternating wet and dry conditions over South America during summer**. Monthly Weather Review, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997.

OLIVEIRA, A. S. de. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. INPE- 4008-TDL/239, INPE, São José dos Campos, 1986, 115p.

ORLANSKI, I. **A rational subdivision of scale for atmospheric processes.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 56, n. 5, p. 527-530, May 1975.

PALMÉM, E. **Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum westerlies.** Tellus, 1: 22-31, 1949.

PALMER, C.E. **On high-level cyclones originating in the tropics.** Transactions of American Geophysics Union, 32(5):683-695.1951.

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

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

RAMÍREZ, M. C. V.; FERREIRA, N. J.; GAN, M. A. **Vórtices Ciclônicos Desprendidos em Altos Níveis que Originam-se no Leste do Pacífico Tropical Sul - Parte I : Aspectos Sinóticos Relacionados a sua Formação.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos - São Paulo. **Anais.** CBMET.1996.

RAMÍREZ, M. C. V.; KAYANO, M.; FERREIRA, N. J. **Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinities of northeast Brazil during the 1980-1989 period.** Atmosfera, 12: 75-88, 1999.

ROCKWOOD, A. A.; MADDOX, R. A. **Mesoscale and synoptic scale interactions leading to intense convection: the case of 7 June 1982.** Weather and Forecasting, v. 3, n. 1, p. 5168, Mar. 1988.

SALDANHA, C.B.; PAZ, A.R.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; BARRERA, D. **Avaliação da chuva do Hidroestimador para modelagem hidrológica na região da bacia do Rio Grande.** In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo (SP). 2007. São Paulo, 2007.

SANCHES, M. B. **Análise sinótica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) utilizando-se a técnica de composição.** Dissertação (Mestrado em

Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, S.P. 95f. 2002.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F; BRAGA, C. C. ; SILVA ARAGÃO, M. R. . Análise estatística de eventos de cheia e inundações no semiárido da bacia do Rio São Francisco. In: **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2010, Belém-PA. A Amazônia e o Clima Global, 2010.

SANTOS, E. P. **Variabilidade Climática e Eventos Hidrológicos Extremos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. **Tropics-South America. Chapter in Meteorology of the Southern Hemisphere**. Ed. D.J.Karoly e D.G. Vincent. Meteorological Monograph #49, American Meteorology Society, 1998.

SCHWARZKOPF, M. L. A.; Rosso, L. C. Severe storms and tornadoes in Argentina. In: **Conference on Severe Local Storms**, 12., 1982, Boston. Anais... Boston: American Meteorological Society, 1982. p. 11-15.

SCOFIELD, R. A., 2001: **Comments on "A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimador."** Wea. Forecasting., 16, 277-278.

SILVA DIAS, M.A.F. e GRAMMELSBACHER, E. A. A possível ocorrência de tornado em São Paulo no dia 26 de abril de 1991: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 6, n. 2, p. 513-522, 1991.

SILVA DIAS, P. L.; ETCHICHURY, P.; SCOLAR, J.; PEREIRA FILHO, A. J.; SATYAMURTI, P.; SILVA DIAS, M. A. F.; GRAMMELSBACHER, I.; GRAMMELSBACHER, E. As chuvas de março de 1991 na região de São Paulo. **Climanálise**, v. 6, p. 44-59, maio 1991.

SILVA, F. D. S.; CORREIA, M F; SILVA ARAGÃO, M. R. S. ; Silva, Jonatan Mota da . Convecção linearmente organizada na área de Petrolina, semiárido do Nordeste do Brasil: aspectos em meso e grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 292-304, 2008.

SIMEONOV, P.; GEORGIEV, C. G. **A case study of tornado-producing storm south of Rhodopes mountain in the Eastern Mediterranean.** Atmospheric Research, v. 57, n. 3, p.187-199, 2001.

STENSRUD, D. J. **Using short-range ensemble forecasts for predicting severe weather events.** Atmospheric Research, v. 56, n. 1-4, p. 3-17, 2001.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** INMET. Brasília, DF: Pax, 2001.

VERA, C., HIGGINS, A.W., AMADOR, B.J., AMBRIZZI, C.T., GARREAUD, D.R., GOCHIS, E.D., GUTZLER, F.D., LETTENMAIER, G.D., MARENGO, H.J., MECHOSO, I.C.R., NOGUES-PAEGLE, J.J., SILVA DIAS, K.P.L., ZHANG, C., 2006. **Toward a unified view of the American Monsoon Systems.** American Meteorological Society – Journal Of Climate – Special Section, 19, 4977 – 5000.

VICENTE, G. A., R. A. SCOFIELD, and W. P. MENZEL, 1998: **The operational GOES infrared rainfall estimation technique.** Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 1883-1898.

VICENTE, G. A., J. C. DAVENPORT, and R. A. SCOFIELD, 2002: **The role of orographic and parallax corrections on real time high resolution satellite estimation..** Int. J. Remote Sens., 23, 221-230.

VILA, D.A.; MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H.; VELASCO, I. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (FORTRACC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. **Weather and Forecasting**, 23: 233–245. 2008.

Waldvogel, A., W. Schmid, and P. Grimm, 1979: **Criteria for the detection of hail cells.** J. Appl. Meteor., 18, 1521–1525.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. **Characteristics of isolated convective storms, mesoscale meteorology and forecasting.** Boston, MA: American Meteorological Society, 1986.

