ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Condições de tempo severo e formação de tornado em Brasília-DF: um estudo de caso

Rafaella de Araújo Aires Vilar, e-mail: rafaella.aavilar@yahoo.com Universidade Federal de Campina Grande. Magaly de Fatima Correia, e-mail: magaly_correia@yahoo.com.br Universidade Federal de Campina Grande. Maria Regina da Silva Aragão, e-mail: silva_aragao@yahoo.com.br Universidade Federal de Campina Grande, Josefa Morgana Viturino de Almeida, e-mail: morgana.almeida@inmet.gov.br Instituto Nacional de Meteorologia.

Artigo submetido em 02/06/2020 e aceite em 10/10/2020

RESUMO

Os danos ambientais e estruturais causados por uma tempestade severa na área do Aeroporto Internacional de Brasília (DF) no dia 01 de outubro de 2014 motivaram a realização desta pesquisa. A ocorrência do tornado de intensidade F_0 (escala Fujita), um fenômeno pouco frequente no Centro-Oeste do Brasil, evidencia a importância de estudos que possibilitem compreender melhor os padrões atmosféricos que favorecem o desenvolvimento de sistemas convectivos severos na região. O objetivo deste trabalho foi identificar fatores ambientais potencialmente favoráveis à manutenção ou dissipação da convecção profunda. A técnica estatística da Análise de Componentes Principais (ACP), dados meteorológicos de superfície e de ar superior e imagens de um radar meteorológico banda-S localizado no Gama-DF foram os principais recursos disponíveis para esta pesquisa. Os resultados indicam que a coexistência de alta instabilidade potencial, temperaturas elevadas e ventos intensos foi determinante para a evolução da tempestade severa. Os índices de instabilidade analisados apresentam valores que diferem consideravelmente dos limites normalmente utilizados como indicadores da formação de tornados. Linhas de instabilidade em forma de arco (“bow echoes”) detectadas pelo radar meteorológico 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 transmissão de energia elétrica, telhados, árvores e carros danificados pelo vento (95 km/h) também são relevantes na caracterização do fenômeno.

Palavras-chave: tornado, eco em forma de arco, linha de instabilidade, Análise de Componentes Principais.

Severe weather conditions and tornado formation in Brasília-DF: a case study

ABSTRACT

The environmental and structural damages caused by a severe storm around the International Airport of Brasília (DF) on 01 October 2014 motivated this research. The occurrence of the F_0 intensity tornado (Fujita scale), an infrequent phenomenon in Central-West Brazil, highlights the importance of studies that allow a better understanding of the atmospheric patterns that favor the development of severe convective systems in the region. In this context, the objective in this work was to identify environmental factors that are potentially favorable to the maintenance or dissipation of deep convection. The statistical technique of Principal Component Analysis (PCA), meteorological surface and upper air data and Gama-DF S-band meteorological radar images were the main resources available for this research. The results indicate that the coexistence of high instability potential, high temperatures and strong winds was fundamental for the severe storm evolution. The instability indices show values that differ considerably from the limits normally used as indicative of tornado formation. Arc-shaped squall lines (“bow echoes”) detected by the meteorological radar during the intense rainfall period with surface damages are the strongest signatures of the tornado that hit the region. Photographic evidence of damages on transmission lines of electricity, roofs, trees and cars caused by the winds (95 km/h) are also relevant in the phenomenon characterization.

Keywords: tornado, bow echo, squall line, Principal Component Analysis.

Introdução

No dia 01 de outubro de 2014 um episódio de tempestade severa desencadeou a formação do primeiro tornado registrado na cidade de Brasília,

DF e ocasionou danos estruturais na área do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek.

As tempestades severas (TS) compreendem uma classe de nuvens convectivas profundas com alto

potencial para ocorrência de chuvas torrenciais, queda de granizo, ventos destrutivos em superfície e/ou tornados. Esses fenômenos representam riscos potenciais para gerar catástrofes (McNulty, 1995; Wollmann e Iensse, 2019). Comumente, as TS ocorrem em ambientes termodinamicamente instáveis, e cujo padrão atmosférico de grande escala favorece a convergência de ar úmido em baixos níveis, a intrusão de ar seco em níveis médios e a existência de mecanismos capazes de dar início a convecção local. Grande parte dos tornados tem origem em nuvens convectivas, denominadas supercélulas. Contudo, estudos recentes mostram que as TS também podem se desenvolver associadas com sistemas convectivos de mesoescala quase lineares (Reif and Bluestein, 2018). No entanto, as análises indicam que tornados com essas características apesar de potencialmente danosos não são tão intensos quanto aqueles associados com as supercélulas. No Brasil, as regiões Sul e Sudeste se destacam entre as mais atingidas por TS (Silva Dias e Grammelsbacher, 1991; Marcelino et al., 2003; Silva Dias, 2011; Silva Dias et al., 2013; Wollmann e Iensse, 2019; Toledo et al., 2020). Os resultados mostram que a intensidade e a frequência das tempestades convectivas dependem muito de condições específicas da atmosfera e da localização geográfica. Entretanto, os autores ressaltam que a formação dos tornados é explicada em parte por características peculiares do escoamento atmosférico, associadas com a presença do Jato de Baixos Níveis (JBN).

Costa (2014), em um estudo sobre formação e organização de sistemas convectivos de mesoescala (SCM), e eventos extremos de precipitação em Brasília – DF, evidenciou a importância de fatores locais no desenvolvimento de tempo severo. A autora identificou que a topografia da Região Centro-Oeste do Brasil é um dos fatores que contribui para a organização de linhas convectivas e/ou linhas de instabilidade. Os resultados indicaram ainda que mudanças na intensidade e direção do escoamento sinótico são importantes na definição do grau de severidade dos sistemas convectivos.

O aumento na frequência e intensidade das TS seguidas de danos estruturais ou de natureza ambiental no Brasil, tem motivado a realização de pesquisas que apontam o uso do sensoriamento remoto por satélites e/ou radares meteorológicos como decisivos na caracterização do fenômeno. São métodos que permitem monitoramentos mais eficientes e uma maior compreensão dos processos físicos associados a formação, desenvolvimento e intensificação de SCM

(Nechet, 2002; Nascimento, 2005; Coniglio, et. al., 2006; Silva, et. al., 2008; Sousa et al., 2014; Machado et al., 2017). Geralmente, quando vinculados ao desenvolvimento de tornados, os sistemas convectivos severos são denominados tempestades tornádicas e comumente produzem ventos extremamente fortes, muitas vezes com velocidades superiores a 100 km/h (Dyer, 1994; Lara, et. al., 2019). Os tornados são eventos efêmeros e espacialmente muito localizados, o que dificulta a detecção e monitoramento sem a utilização de ferramentas adequadas que possibilitem avaliações em alta resolução (André, 2006; Wollmann e Iensse, 2019). Deste modo, a aplicação de metodologias que permitem aumentar a compreensão sobre fatores que podem influenciar o processo de formação, organização e intensificação de células convectivas aliada a escassez de investigações sobre TS na região de Brasília, evidenciam a importância desse estudo.

Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho teve como objetivos: (a) identificar variações significativas no padrão atmosférico regional e os mecanismos dinâmicos e/ou termodinâmicos associados ao desenvolvimento da tempestade severa e (b) apresentar evidências de correlação entre a presença de linhas de células convectivas organizadas em forma de arco e o desenvolvimento da TS.

Material e métodos

Região de Estudo

A cidade de Brasília - DF (15°50'16S; 47°42'48W), área foco deste estudo, está situada na Região Centro-Oeste do Brasil e abrange uma área de aproximadamente 5.779.999 km² (Fig. 1). Pela classificação de Köppen-Geiger o clima é do tipo tropical de altitude, característico de regiões com verões úmidos e chuvosos e invernos secos e relativamente frios (Barreto, 2008). A temperatura média é de 21°C e a umidade relativa do ar é de 70%, podendo atingir 20% ou menos nos meses de inverno (INMET, 2013).

Dados

Dados de ar superior obtidos através de sondagens realizadas às 12:00 UTC no Aeroporto de Brasília foram utilizados com o objetivo de estimar o grau de instabilidade atmosférica e avaliar a possibilidade do desenvolvimento de convecção profunda. Com essa finalidade, os índices de estabilidade TOTAL TOTALS (TT), SWEAT (SW) e SHOWALTER (SH) foram calculados e utilizados como indicadores de condições de tempo severo. Totais diários de

precipitação registrados na estação de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e informações sobre nebulosidade (percentual, tipo e altura da base das nuvens), direção e intensidade do vento, extraídas de mensagens METAR/SPECI elaboradas no Aeroporto Internacional Juscelino Kubistchek foram utilizados na identificação de alterações locais importantes e definição de padrões atmosféricos

favoráveis ao desenvolvimento de sistemas convectivos severos e formação de tornados. As imagens de um Radar Doppler banda-S localizado em Gama/DF utilizadas na detecção de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) com informações em alta resolução espacial e temporal permitiu detectar o exato momento da formação, além de monitorar o padrão de organização e duração das células convectivas.

Figura 1. Localização geográfica da cidade de Brasília DF.

A estrutura de dependência entre as variáveis e parâmetros meteorológicos disponíveis para análise no período de estudo foi investigada usando a técnica estatística multivariada denominada de Análise Fatorial por Componentes Principais (ACP). A técnica consiste em descrever a variabilidade entre variáveis observadas e provavelmente correlacionadas pelo meio de um conjunto potencialmente menor de variáveis não observadas denominadas de fatores.

As Componentes principais, são independentes entre si e obtidas com a finalidade de descartar variáveis de menor importância e reter, um conjunto menor de variáveis que detém o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados originais. Cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais. O número adequado de CP foi escolhido pelo critério de truncamento de Kaiser (Garayalde et al., 1986; Guodaar and Asante, 2018; Hashim, et al., 2018).

O conjunto de dados disponíveis para análise estatística foi constituído por informações horárias contidas nas mensagens METAR/SPECI elaboradas no aeroporto de Brasília e dados diários de ar superior obtidos através de radiossondagens realizadas às 12 UTC no período de 15 de setembro a 15 de outubro de 2014. A seleção de um mês de dados permitiu observar o comportamento das variáveis atmosféricas antes

durante e depois da TS. Para esse estudo foram escolhidas as seguintes variáveis: temperatura do ar (T), vento expresso em dois subgrupos: de intensidade fraca, para valores de 0 a 5 nós, (VT (0-5)), e de intensidade forte, para valores de 16 a 39 nós, (VT(16-39)), frequência de nuvens cumulonimbus e cumulus congestus (CbCc), frequência de nuvens baixas (NVB), e os índices de instabilidade, SWEAT (SW), SHOWALTER (SH) e TOTAL TOTALS (TT).

Temperatura e Intensidade do Vento

A temperatura média do ar foi calculada utilizando a equação (1)

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

Em que, T_m é a temperatura média diária (°C); T_i é a temperatura do ar registradas nas mensagens METAR e SPECI (°C); n é o número de mensagens registradas no dia.

No cálculo da intensidade do vento, considerou-se, separadamente, os intervalos de 0 (zero) a 5 (cinco) nós, e entre 16 (dezesesseis) e 39 (trinta e nove) nós, utilizando a equação (2)

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2)$$

Em que, V_m é a velocidade média diária do vento; V_i é a velocidade do vento em cada mensagem METAR ou SPECI (nós); n é o número de mensagens registradas no dia.

A frequência diária de nuvens convectivas de grande extensão vertical do tipo Cb (cumulonimbus) e Cc (cumulus congestus) em valores percentuais (PCbCc) e dos demais tipos de nuvens baixas (PNVB) foi calculada utilizando as equações (3) e (4)

$$PCbCc = \frac{\sum_{i=1}^n NcbCc_i}{n} \quad (3)$$

$$PNVB = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (4)$$

Em que, $NcbCc_i$ é o número de registros de nuvens convectivas dos tipos Cb e Cc; N_i é o número de registros de nuvens baixas em cada mensagem

METAR/SPECI; e n é o número de mensagens registradas no dia

Índices de Instabilidade

O Índice Total Totals (TT)

O Índice Total Totals (TT), desenvolvido por Miller (1972), foi calculado com base na equação (5). É um índice importante na previsão de episódios associados a queda de granizo. Valores de TT acima de 50 estão associados a convecção intensa e desenvolvimento de tornados conforme limiares apresentados no Quadro 1.

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2 T_{500} \quad (5)$$

Em que, T_{850} é a temperatura no nível de 850hPa; T_{d850} é a temperatura do ponto de orvalho no nível de 850hPa e T_{500} é a temperatura no nível de 500hPa.

Quadro 1. Valores do índice TT para latitudes médias. Fonte: Nascimento, 2005

Valores	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)

O índice SW agrega componentes dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera (Nascimento, 2005; Hallak e Pereira, 2012). Valores maiores que 300 indicam alta probabilidade de formação de tempestades severas conforme limiares apresentados no Quadro 2. Os valores do SW foram obtidos com base na equação (6).

$$SW = 12T_{d850} + 20(TT - 49) + 2V(850) + V(500) + 125(S + 0,2) \quad (6)$$

Em que, TT é o valor do índice Total Totals; S é função da diferença de direção do vento nos níveis de 500 e 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; e V (850) é o vento no nível de 850 hPa;

Quadro 2. Valores do Índice SWEAT para latitudes médias. Fonte: Nascimento, 2005

Índice SWEAT	Potencial para Tempestades Severas
SWEAT ≤ 300	Sem potencial para Tempestades Severas
300 < SWEAT ≤ 400	Potencial para Tempestades Severas
SWEAT > 400	Potencial para Tornados

O índice Showalter é calculado conforme expresso na equação (7) 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. Ele 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 existe uma inversão de temperatura entre os níveis de 850 hPa e 500 hPa.

$$SH = T_{500} - T_{\text{parcela}} \quad (7)$$

Em que, T_{500} é a temperatura em 500 hPa; T_{parcela} é a temperatura em 500 hPa de uma parcela que ascendeu desde o nível de 850 hPa.

O Radar Meteorológico do Gama-DF

A utilização do radar meteorológico é fundamental no monitoramento de tempestades severas. Através do campo de refletividade do radar é possível detectar sistemas convectivos potencialmente capazes de gerar um tornado. Neste estudo foram usadas imagens de um Radar Doppler do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) que opera na banda-S em Gama - DF. Particularmente nesta análise foram usadas as informações obtidas a partir do CAPPI (Constant Altitude Position Indicator) em 2 km.

O objetivo principal foi monitorar e avaliar características de tempo severo no processo de formação, intensificação e organização de sistemas convectivos no período antes, durante e depois da formação do tornado.

As imagens do radar possibilitam detectar características relevantes no monitoramento da atividade convectiva local tais como: formação, distribuição espacial, intensidade das células precipitantes e identificação do tipo de organização dos sistemas convectivos.

Análise estatística

A análise de componentes principais (ACP) é uma das técnicas estatísticas multivariadas mais usadas em pesquisas científicas. No estudo de eventos meteorológicos extremos tem sido comumente utilizada como uma forma de avaliar a estrutura de dependência entre variáveis dominantes (Diniz et al., 2004; Farias e Correia, 2008; Queiroz, et. al., 2014; Costa, 2014; Barbieri, et al., 2017). O método transforma o conjunto de variáveis inicialmente correlacionadas entre si em outro conjunto de variáveis não correlacionadas.

Neste trabalho, a aplicação da técnica no modo P teve como propósito obter grupos de variáveis mais correlacionadas entre si, essenciais na avaliação de fatores determinantes para ocorrência de tempo severo e formação do tornado registrado no dia 01 de outubro de 2014 na região do Aeroporto Internacional de Brasília.

A aplicação dos testes de Kaiser e

Bartlett permitiu avaliar a adequação dos dados utilizados na realização da análise fatorial. O valor de 0,663 para o KMO indica que a amostra selecionada é apropriada para a utilização da técnica enquanto o teste de significância de Bartlett abaixo de 0,05 valida os resultados da análise (Corrar et al., 2007; Santos, et. al., 2010; Santos, 2014; Silva, et. al., 2017; Santos e Souza, 2018).

Resultados e Discussão

Temperatura e precipitação

O conjunto de histogramas apresentados na Figura 2 ilustra o padrão de comportamento da temperatura e da precipitação média mensal e diária para os meses de setembro e outubro em Brasília-DF. As temperaturas apresentam variações sazonais bem definidas, com valores elevados no período úmido e mais baixos no período seco (inverno). Comportamento semelhante foi verificado por Barros e Balero (2012) para o Centro-Oeste do Brasil.

A análise simultânea da evolução temporal dessas variáveis, particularmente na escala diária, permite observar variações relevantes em escala local incluindo aspectos termodinâmicos da atmosfera antes e depois da tempestade. Nota-se que a temperatura média diária (Figura 2c) no mês de setembro foi acima da média climatológica (Figura 2a) em praticamente todo o mês, com exceção do curto período de 5 a 9 de setembro. Comportamento análogo é observado no mês de outubro.

O total pluviométrico de 201 mm registrado em outubro de 2014 (mês da ocorrência do tornado) ultrapassou em 24 % a média climatológica que é de 167 mm. Contudo, vale ressaltar que embora as chuvas tenham se concentrado na segunda quinzena do mês (Fig. 2f) registrou-se o equivalente a 40,5 mm no dia 2 de outubro (um dia após o tornado). A temperatura no dia 01 de outubro de 2014 atingiu 24,08°C (Figura 2e). Esse valor corresponde a 2,48°C acima da média histórica que é de 21,6°C.

Vento em superfície

Variações na direção e intensidade do vento à superfície no Aeroporto Internacional de Brasília nos dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro (um dia antes, no dia do tornado e um dia depois do tornado) é apresentada na Figura 3. No dia 30 de setembro, observa-se predominância de ventos do quadrante Noroeste (270° a 360°), com

frequência de 38,5%, e intensidade máxima de 30 kt.

No dia 01 de outubro, dia em que ocorreu a TS, o vento predominante foi do quadrante Nordeste, entre 0° a 90°, com frequência de 35,5%, e com intensidade que variou entre 30 e 40

kt. Nesta análise foram incluídos valores das rajadas registradas no período em que o tornado foi observado (entre 17:30 e 18:00 UTC, ou seja, 14:30 e 15:00 HL). Esses resultados indicam características peculiares de ambientes de tempo severo (Kruger, et. al., 2016).

Figura 2. (a) Média mensal climatológica da temperatura; (b) média mensal climatológica da precipitação; (c) média diária da temperatura em setembro de 2014; (d) total diário de precipitação em outubro de 2014; (e) média diária de temperatura em outubro de 2014; (f) total diário de precipitação em outubro de 2014. Fonte de dados: INMET

Figura 3. Frequência da direção e evolução temporal (UTC) da intensidade do vento em nós (kt) para os dias: 30/09/2014 (a, b); 01/10/2014 (c, d); e 02/10/2014 (e, f).

A evolução temporal da intensidade do vento, pressão e temperatura do ar no dia 01 de outubro de 2014 é apresentada na Figura 4. Observa-se simultaneamente queda na temperatura e aumento da intensidade do vento, no período entre 17:25 UTC e 17:40 UTC. O símbolo, F_0 , indica a intensidade do tornado na escala Fujita e o horário aproximado do registro fotográfico do tornado na região do aeroporto de Brasília. Um dado relevante detectado na evolução temporal das variáveis meteorológicas é a mudança abrupta nos valores da temperatura, e do vento. Às 17:30 UTC a intensidade do vento atinge o valor de 39 Kt. Nos minutos que antecederam esse registro máximo do vento, é possível observar uma queda brusca de aproximadamente 6 (seis) graus na temperatura em superfície. A pressão atinge o valor de 1017 hPa. Resultados semelhantes foram obtidos por Wakimoto, et al., (2006) em um estudo sobre ventos destrutivos ocasionados por sistemas convectivos de mesoescala na região de Omaha,

Nebraska. Os autores destacam ainda a presença de sistemas convectivos em forma de arco (bow-echo).

Nota-se que antes do registro do tornado, (Fig. 4) o vento variou muito pouco (entre 5 e 10 kt). Comportamento análogo é observado nos valores das temperaturas T (Temperatura) e T_d (Temperatura do Ponto de Orvalho). A proximidade entre as curvas indica que a atmosfera estava úmida. Na medida em que se aproxima o horário de registro do tornado, a temperatura aumenta e a pressão diminui. Na curva do vento tem-se dois picos bem definidos. Em torno das 14:30 HL verifica-se o primeiro valor mais intenso (40 kt), logo depois a pressão aumenta, verificando-se também o segundo pico de vento forte. Nestes valores estão incluídos os dados das rajadas registrados no aeroporto de Brasília - DF.

Figura 4. 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 no dia 01 de outubro de 2014. O posicionamento do símbolo F_0 , indica a intensidade do tornado na escala Fujita e o horário aproximado do registro fotográfico do tornado na região do aeroporto de Brasília. Fonte de dados: REDEMET

Evolução do Bow-Echo

A análise das imagens do radar meteorológico banda-S, localizado no Gama – DF obtidas no dia da formação do tornado, permitiu observar a evolução dos sistemas precipitantes, o padrão de organização das células convectivas e o período de máxima intensidade da chuva. A sequência temporal de imagens do campo de refletividade (CAPPI em 2km) apresentada na Figura 5, ilustra a evolução e organização das células convectivas observadas no dia 01 de outubro de 2014. É possível verificar que, na região de Brasília – DF, nos horários das 17:10 UTC e 17:20 UTC, os sistemas convectivos que resultaram na formação do tornado ocorreram inicialmente em áreas isoladas nas escalas meso- γ (2 – 20 km) e meso- β (20 – 200 km). A partir das 17:30 UTC (Fig. 5c) é possível observar o deslocamento e organização das células em linhas convectivas. Valores acima de 55 dBZ observados nos campos de refletividade são um forte indicativo de condições de tempo severo. Além

dos valores altos de refletividade nota-se também que esse sistema multicelular desenvolveu a configuração de um arco (denominado *Bow Echo* em inglês). A passagem dessa linha convectiva “tipo arco” (*Bow-Echo*) na região de Brasília - DF coincide com o horário dos danos causados pelo vento na área do aeroporto e com o registro fotográfico do tornado em torno das 14:30 HL. Celiński-Mysław, et al., (2019), mostram que episódios de vento fortes, tornados, granizos ou chuvas intensas que causam destruição na Europa, estão frequentemente associados ao movimento de sistemas convectivos em forma de arco. Segundo Klimowski et al., (2004), pelo menos 29% dos registros de ventos fortes nos EUA (Northern High Plains) durante as estações quentes de 1996-1999 foram causados pela atividade de sistemas convectivos com eco na forma de arco (*Bow-Echo*). Esses sistemas podem se formar a partir de células simples, linhas de instabilidade ou de uma supercélula. Mathias, et. al., (2017), afirmam que independentemente da característica inicial, estão frequentemente associados com ventos fortes e/ou queda de granizo.(.

Figura 5. CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) em 2 km obtida no dia 01/10/ 2014 às: (a) 17:10 UTC; (b) 17:20 UTC; (c) 17:30 UTC; (d) 17:40 UTC; (e) 17:50 UTC e (f) 18:00 UTC. (Fonte de dados: CPTEC/INPE).

No trabalho desenvolvido por Klimowski et al., (2004), ainda foi possível verificar que 45% dos casos de *Bow-echos*, observados nos Estados Unidos, evoluíram de células com pouca organização, 40% a partir de linhas de instabilidade e apenas 15% evoluíram de supercélulas. No Brasil, um estudo realizado por Mattos, et al., (2020), mostrou a existência de uma correlação entre a formação de *Bow Echos* e eventos de tempo severo. Características semelhantes foram observadas em outro estudo sobre a ocorrência de “derechos” no extremo sul do Brasil (Figueiredo, et. Al., 2019).

O temporal registrado em Brasília no dia 01 de outubro de 2014, causou o fechamento do

aeroporto por cerca de uma hora e meia. As operações de pouso e decolagem ficaram suspensas entre 14:26 HL e 15:53 HL. Nas fotografias apresentadas na Figura 6 é possível observar parcialmente a nebulosidade associada ao tornado, caracterizada pela nuvem funil que atingiu a superfície (Fig. 6a), e danos estruturais na área do estacionamento do aeroporto (Fig. 6b). Resultados análogos foram encontrados por outros pesquisadores em estudos sobre impactos de tempestades severas (Waldvogel et al., 1979; Held et al., 2006; Gomes e Held, 2006). Os autores ressaltam que 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 6. Fotografias do tornado (a) e dos danos associados ao fenômeno na área do aeroporto de Brasília – DF (b) para o dia 01/10/2014. (Fonte: Folha UOL, 2014).

Análise Estatística

A ACP utilizada neste estudo permitiu estabelecer relações entre variáveis meteorológicas e avaliar a influência das condições ambientais na intensificação da atividade convectiva responsável pela formação do tornado. As variáveis com maior carga fatorial nos três primeiros fatores (F1, F2 e F3) são apresentadas na Figura 7. A representação por meio de diagramas visa ilustrar melhor o grau de relação entre variáveis e os fatores, assim como destacar comportamentos similares identificados

com a aplicação da técnica estatística. É possível observar que três variáveis apresentam correlações significativas com F1 (CbCc, NVB e VT (16-39). Este fator detém 28,4% da variância total nos dados e representa ambiente atmosférico com elementos peculiares ao desenvolvimento de tempo severo.

Alta frequência de nuvens baixas e de nuvens do tipo CB e Cc, associada com ventos fortes e rajadas, indica atividade convectiva intensa e probabilidade da formação de tempestades severas.

Figura 7. Representação diagramática das cargas fatoriais referentes ao primeiro (a), segundo (b) e terceiro (c) fatores.

A série temporal dos escores é apresentada na Figura 8. Valores positivos maiores que 2,5, observados na série temporal associada ao F1 nos dias 01, 02 e 03 de outubro (Figura 8a), evidenciam a relevância das variáveis na caracterização das condições de

tempo severo. Um ambiente favorável à formação de um tornado requer a presença de nuvens convectivas profundas, umidade alta nos baixos níveis e ventos fortes. O alto percentual de nuvens baixas tem relação direta com o teor de umidade nos baixos níveis. Essas condições foram de fundamental importância na caracterização de um ambiente favorável à ocorrência do tornado.

Figura 8. Evolução temporal dos escores dos fatores: (a) F1; (b) F2 e (c) F3.

A segunda componente retém aproximadamente 28,2% da variância total dos dados. Na Figura 8b observa-se escores predominantemente positivos (negativos), com valores acima (abaixo) de 1 (-1) no período antes (após) da ocorrência do tornado. O segundo fator (F2) está relacionado com a instabilidade atmosférica, através de correlações positivas com os índices TT e SW, e negativas com o índice SH (Fig. 7b). A conexão entre estes índices reflete características da convecção local. Como mencionado anteriormente, quanto maior o valor do TT, maior é a possibilidade de ocorrência de sistemas severos, o que permite inferir sobre a existência de processos físicos relevantes na previsão de granizo. Nas latitudes médias, valores de TT a partir de 49 indicam a possibilidade de tornados isolados. No dia do registro do tornado em Brasília, verificou-se que o TT atingiu o valor de 49,2.

Valores do índice SW maiores que 300 indicam possibilidade de tempestades severas, enquanto valores em torno de 400, ou superiores, indicam a possibilidade de tornados. No entanto, no episódio que ocorreu em Brasília, nenhum valor atingiu 300. Esse resultado indica que, para aquela região, os limiares devem ser diferentes dos utilizados como referência para as latitudes médias. Resultados semelhantes foram encontrados por Ingrosso, et. al, (2020).

O F3 (Fig. 7c) detém 23,2% da variância total dos dados e apresenta correlação negativa com a variável P (Pressão), e positiva com as variáveis VT (0-5) (vento 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 a pressão.

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 no entendimento 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 os valores mínimos da temperatura são observados depois do tornado, provavelmente associados com precipitação.

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.

Conclusões

Neste trabalho foram analisados aspectos de mesoescala associados com o desenvolvimento de tempo severo e a formação do primeiro tornado registrado em Brasília DF pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). O estudo mostrou que: i) a aplicação da técnica da ACP foi adequada na identificação de mecanismos atmosféricos determinantes no processo de formação do tornado (F0). As variáveis VT(16-39) e CbCc com cargas mais elevadas no fator 1, mostram que a convecção profunda e ventos fortes em superfície, abrangem características determinantes para a formação da TS; ii) entre variáveis analisadas os índices de instabilidade termodinâmicos, TT e SH se destacaram como precursores importantes da TS. Nos momentos que antecedem a formação do tornado (F0) seus valores foram substancialmente diferentes daqueles observados nos dias anteriores. As células convectivas se desenvolveram num ambiente instável caracterizado por altos valores do índice TT (TT=49,2) e baixos valores do índice Showalter (SH=-1,62); iii) as imagens do radar meteorológico do Gama foram decisivas na identificação da intensidade e organização de sistemas convectivos multicelulares típicos de ambientes favoráveis ao desenvolvimento de tornado e iv) as linhas de instabilidade em forma de arco ("*bow echoes*") detectadas durante o período de chuva intensa com danos em superfície são os indícios mais fortes do tornado que atingiu a região no dia 01 de outubro de 2014 em Brasília-DF. Os resultados obtidos com este estudo podem ajudar na avaliação de riscos em tempestades com potencial para desencadear ventos tornádicos em sistemas convectivos quase lineares.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Projeto CAPES - N.º 23038.007455/2011-95), ao INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais pela cessão dos dados do Radar Meteorológico do Gama DF, e a UFCG pela estrutura oferecida e a oportunidade da realização desta pesquisa.

Referências

- André, I.R.N., 2006. Algumas considerações sobre mudanças climáticas e eventos atmosféricos severos no Brasil. *Climatologia e Estudos da Paisagem*, 1(2), 1-9.
- Barbieri, L.F.P., Correia, M.F., SILVA Aragão, M.R., Vilar, R.A.A., Moura, M.S.B., 2017. Impacto of climate variations and land use change: a Mann-Kendall application. *Revista Geama*, 10(1), 19-27.
- Barreto, R., 2008. Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Barros, J.R., Balero, J.C.S., 2012. A influência do Clima e do Tempo do Centro-Oeste do Brasil nas Condições de Voo na Região. *Revista de Geografia- Élisée*, 1(2), 25-49.
- Celiński-Mysław, D., Palarz, A., Łoboda, Ł., 2019. Condições cinemáticas e termodinâmicas relacionadas a sistemas convectivos com um eco de arco na Polônia. *Theoretical and Applied Climatology* (137), 2109-2123. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2728-6>
- Coniglio, M.C., Wicker, L.J., Stensrud, D.J., 2006. Effect of upper-level shear on the structure and maintenance of strong, quasi-linear mesoscale convective system, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(4), 1231-1252. Doi: <https://doi.org/10.1175/JAS3681.1>.
- Corrar, L.J.; Paulo, E.; Filho J.M.D., 2007. *Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia*. Editora Atlas. São Paulo.
- Costa, M.N.M., 2014. Episódio de tempo severo em Brasília-DF: Importância de fatores locais no desenvolvimento de convecção profunda, 95 p. Dissertação (Mestrado), Campina Grande, UFCG.
- Diniz, M.C.S., Correia, M.F, Silva Aragão, M.R., 2004. Convecção profunda no submédio do rio São Francisco: uma avaliação das condições atmosféricas na área do aeroporto de Petrolina-PE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(3), 273-285.
- Dyer, R.C., 1994. A review of tornado activity in Brazil. In: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Rio de Janeiro. Proceedings. São José dos Campos: INPE, (30), 203-213.
- Farias, W.R.G., Correia, M. F. 2008. Descargas Atmosféricas e interrupções de energia na área da CHESF: Um estudo de eventos extremos em situações de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Meteorologia*, (23), 270-281.
- Doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000300002>
- Figueiredo, E.L., Nascimento, E.L., Oliveira, M.I., 2019. Analysis of Two Derecho Events in Southern Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, (131), 1171-1190 , <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0654-x>
- Garayalde, E.J.G., da Silva, M.G.A., Tavares, A., 1986. Classificação meso climática da região sul do Brasil pela análise de componentes principais. In: *Congresso Interamericano De Meteorologia*. 1, Brasília. Anais. Brasília: Sociedade Brasileira De Meteorologia, (1) 119-124.
- Gomes, A.M., 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.
- Guodaar, L., Asante, F., 2018. Using a factor analysis to understand climate adaptation barriers impeding smallholder tomato farmers in the Offinso North District, Ghana. *Cogent Food & Agriculture*, 4(1), 1-16. Doi: <https://doi.org/10.1080/23311932.2018.1504507>
- Hashim, N.I.M., Noor, N.M., Annas, S., 2018. AIP Conference Proceedings 2045, 020103, Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5080916> Published Online: 06 December 2018.
- Held, G., Gomes, A.M., Naccarato, K.P., Pinto Jr., O., Nascimento, E., 2006a. The Structure of Three Tornado-Generating Storms Based on Doppler Radar and Lightning Observations in the State of São Paulo, Brazil. *Proceedings, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Foz do Iguaçu, 24-28 April 2006, 1787-1797.
- Ingrosso, R.; Lionello, P.; Miglietta, M.M; Salvadori, G., 2020. A Statistical Investigation of Mesoscale Precursors of Significant Tornadoes: The Italian Case Study. *Atmosfera*, 11(3), 301. Doi: <https://doi.org/10.3390/atmos11030301>.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: dezembro de 2013.
- Hallak, R., Pereira, F.A.J., 2012. 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* 27, 173-206.

- Doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200006>
- Klimowski, B.A., Hjelmfelt, M.R., Bunkers, M.J., 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes. *Weather and Forecasting*, 19(4), 727-734. Doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019%3C0727:ROOTEE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019%3C0727:ROOTEE%3E2.0.CO;2)
- Kruger AC, Pillay DL, Van Staden M. Indicative hazard profile for strong winds in South Africa., 2016. *South African Journal of Science*, 112(1/2), 1-11. Doi: <http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2016/20150094>
- Lara, K.S., André Becker, N., Calvetti, L.G.; Gomes, R.G., 2019. Condições atmosféricas de grande escala associadas a três eventos de tornados ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, 1310-1326. Doi:[10.26848/rbgf.v12.4.p1310-1326](https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1310-1326)
- McNulty, R.P., 1995. Severe and convective weather: A central region forecasting challenge. *Weather and Forecasting*, (10) 187-202. Doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1995\)010%3C0187:SACWAC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1995)010%3C0187:SACWAC%3E2.0.CO;2)
- Machado, J.P., Cardoso, C.S., Quadro, M.F.L., Almeida, T.D.A., Costa, N.M.; Rodrigues, G.L., Rodrigues, T.S., De Paula, L.A., 2017. Análise Preliminar dos Índices de Instabilidade a Partir de Simulações Realizadas com o Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para o Sul do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro*, 40(2), 153-162. Doi:http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_153_162
- Marcelino, I.P.V.O., Ferreira, N.J., Conforte, J.C., 2003. 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*. 05-10.
- Mathias, L., Ermert, V., Kelemen, F. D., Ludwig, P., Pinto, J. G., 2017. Synoptic Analysis and Hindcast of an Intense Bow Echo in Western Europe: The 9 June 2014 Storm. *Weather and Forecasting*, 32 (3), 1121-1141. Doi: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0192.1>
- Mattos, E.V., Reboita, M.S., Llopart, M.P., Enoré, D.P., 2020. Análise Sinótica e Caracterização Física de uma Tempestade Intensa Ocorrida na Região de Bauru-SP. *ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (UFRJ. IMPRESSO)*, 43, 85-106. Doi:https://doi.org/10.11137/2020_1_85_106
- Nascimento, E.L., 2005. Previsão de Tempestades Severas Utilizando-se Parâmetros Convectivos e Modelos de Mesoescala: Uma Estratégia Operacional Adotável no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1), 121-140.
- Nechet, D., 2002. Ocorrência de tornados no Brasil. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, 26(2), 29-39.
- Queiroz, J.N., Sousa, L.F., Ribeiro, R.E.P., Silva Aragão, M.R., Correia, M.F., 2014. Fatores Físicos na Atmosfera do Semiárido Brasileiro em aneiro de 2004. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 07(5), 990-1001.
- Reif, D.W., Bluestein, H.B., 2018. Initiation Mechanisms of Nocturnal Convection without Nearby Surface Boundaries over the Central and Southern Great Plains during the Warm Season. *Monthly Weather Review*, 146, 3053-3078. Doi:<https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0040.1>
- Santos, D.C., 2014. Análise Multivariada de Índices Climáticos na Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Climatologia*. (15), 49-63. Doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v15i0.37277>
- Santos, E.F.N., Souza, I.F., 2018. Análise Estatística Multivariada da Precipitação do Estado de Sergipe Através dos Fatores e Agrupamentos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 23, 205-222. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58267>
- Santos, S.A.; Correia, M.F; Braga, C.C., Silva Aragão, M.R., 2010. Análise Estatística de Chuvas Intensas e Inundações no Semiárido da Bacia do Rio São Francisco: a Cheia de 1985. *Engenharia Ambiental (Online)*, (7), 278-290.
- Silva, C.M.A., Barreto, I.D.C., Santos, E.A.B., Borges, P.F., Araújo, L.S., Santos, E.F.N., 2017. Análise das variáveis climáticas das estações agrometeorológicas do estado de Sergipe através de métodos multivariados. *Revista Gaia*. 11(1), 144-156. DOI:<https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2017v11n1.34943>
- Silva, F.D.S., Correia, M.F, Silva Aragão, M.R., Silva, J.M., 2008. Convecção linearmente organizada na área de Petrolina, semiárido do Nordeste do Brasil: aspectos em meso e grande escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23, 292-304.
- Silva Dias, M.A.F., Dias, J., Carvalho, L.M.V., Freitas, E.D., Silva Dias, P.L., 2013. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil.

- Climatic Change, 116(3), 705–722. Doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-012-0504-7>
- Silva Dias, M.A.F., 2011. An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil. *Weather Climate and Society*, 3, 209-217. Doi: <https://doi.org/10.1175/2011WCAS1095.1>
- Silva Dias, M.A.F., Grammelsbacher, E.A., 1991. A possível ocorrência de tornado em São Paulo no dia 26 de abril de 1991: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 6(2), 513-522.
- Sousa, F.B.B., Karam, H.A., 2014. Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro*, 37(1), 17-26. Doi: https://doi.org/10.11137/2014_1_17_26
- Toledo, D.R., Correia, M.F., Palenzuela, Y.G., Silva Aragão, M.R., 2020. Acoplamento dos Jatos de Altos e Baixos Níveis no Desenvolvimento de uma Tempestade Tornádica na Cidade de Taquarituba, São Paulo. *Meteorologia e Recursos Naturais*. 1ed. Campina Grande: ADUFCG, 3, p. 23-30.
- Waldvogel, A., Schmid, W., Grimm, P., 1979.. Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1521–1525. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C1521:CFTDOH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C1521:CFTDOH%3E2.0.CO;2)
- Wakimoto, R.M., Murphey, H.V., Nester, A., Jorgensen, D. P., Atkins, N.T., 2006. High winds generated by bow echoes. Part I: Overview of the Omaha bow echo 5 July 2003 storm during BAMEX. *Monthly Weather Review*, (134), 2793–2812. Doi:<https://doi.org/10.1175/MWR3215.1>
- Wollmann, C. A., Iensse, A.C., 2019. A Gênese Climática dos Tornados nos Estados da Região Sul do Brasil e São Paulo. *Geo Uerj*, 1-17. Doi:<https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40941>