

Assinatura de tornado em imagens de radar em ocorrência de 2015 em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes, PR

The tornado signature on radar images for 2015 occurrence in Marechal Cândido Rondon and Quatro Pontes, PR, Brazil

Firma de tornado en imágenes de radar para la ocurrencia de 2015 en Marechal Cândido Rondon y Quatro Pontes, PR, Brasil

Karin Linete Hornes

<https://orcid.org/0000-0002-3040-5688>

karinhornes@yahoo.com.br

Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, PR

Larissa Canossa Schulz

<https://orcid.org/0000-0001-7471-5592>

larissa80@gmail.com

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon, PR

Resumo: Tornados são colunas de ar em altíssima rotação, que possuem alto poder destrutivo. Embora ocorra no Brasil, sua ocorrência é pouco reconhecida. Neste trabalho, pretende-se caracterizar o tornado múltiplo vórtice ocorrido em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes em 2015, para averiguar se houve a possibilidade de identificação do eco gancho na imagem de radar. Para tanto, foram comparadas as imagens disponibilizadas pelo Sistema de Meteorologia do Paraná com o percurso do fenômeno. As análises realizadas permitiram o vislumbre de um gancho na área de ocorrência, demonstrando que o evento apresentou uma assinatura. No entanto, a assinatura ocorreu de forma muito rápida, com apenas sete minutos de antecedência.

Palavras-Chave: Vórtice, Eco Gancho, Radar, Sistema de Alerta, Desastre Natural.

Abstract: Tornadoes are columns of air in very high rotation, which have high destructive power. The phenomenon happens in Brazil, but its occurrence is little recognized. In this work, we intend to characterize the multiple vortex tornado that occurred in Marechal Cândido Rondon and Quatro Pontes in 2015, to find out if there was the possibility of identifying the hook echo in the radar image. For that, the images made available by the Meteorology System of Paraná were compared with the course of the phenomenon. The analyzes performed allowed the glimpse of a hook in the area of occurrence, demonstrating that the event had a signature. However, the subscription took place very quickly, with only 7 minutes in advance.

Key-Words: Vortex, Hook Echo, Radar, Warning System, Natural Disaster.

Resumen: Los tornados son columnas de aire en muy alta rotación, que tienen un alto poder destructivo. El fenómeno ocurre en Brasil, pero su ocurrencia es poco reconocida. En este trabajo pretendemos caracterizar el tornado de vórtice múltiple que ocurrió en Marechal Cândido Rondon y Quatro Pontes en 2015, para averiguar si existía la posibilidad de identificar el eco del gancho en la imagen del radar. Para ello, se compararon las imágenes puestas a disposición por el Sistema Meteorológico de Paraná con el curso del fenómeno. Los análisis realizados permitieron vislumbrar un anzuelo en la zona del suceso, demostrando que el suceso tenía firma. Sin embargo, la suscripción se realizó muy rápido, con solo 7 minutos de anticipación.

Palabras Clave: Vórtice, Eco Hook, Radar, Sistema de Alerta, Desastre Natural.

INTRODUÇÃO

Os radares meteorológicos são um instrumental necessário na previsão e no monitoramento do tempo. O termo ‘radar’ vem da abreviação da expressão inglesa *Radio Detection And Ranging* (Mahafza, 1998, p.33), ou seja, “detecção e telemetria pelas ondas de rádio”. Os radares efetuam leituras que, através da reflexão de ondas, geram imagens que permitem verificar o comportamento atmosférico. Assim, meteorologistas e técnicos podem realizar a previsão e a detecção do comportamento das nuvens, o volume de precipitação e a sua direção, bem como eventuais fenômenos extremos, como ocorrências de granizo, chuvas extremas, micro explosões, raios e tornados.

O Estado do Paraná é coberto por dois radares do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), tendo sido o primeiro instalado em 1998, no município de Teixeira Soares, e o segundo em Cascavel, no ano de 2014 (Cherubini, 2016). O radar instalado em Cascavel atende uma área que compreende toda a região oeste do Estado do Paraná, além do oeste de Santa Catarina, o Noroeste do Rio Grande do Sul, o Sudoeste de São Paulo e o leste do Paraguai. Com tecnologia de ponta, este radar é do tipo *Doppler* e opera na Banda-S de frequência com dupla polarização, o que representa um salto de qualidade na estimativa de chuvas e ventos, bem como na detecção de eventos severos, como granizo, tempestades e vendavais. Sua alta resolução espacial abrange 240 quilômetros de raio no modo quantitativo e 480 quilômetros no modo qualitativo.

Como explica Eduardo Alvim Leite em reportagem para a Gazeta do povo (Cherubini, 2016),

[o] radar é capaz de realizar uma varredura completa da atmosfera a cada dez minutos, gerando dados que integrados a outras informações possibilitam ao Simepar, antecipar e melhorar a qualidade dos alertas de eventos severos de tempo por meio de previsões de curtíssimo prazo com até seis horas de antecedência.

Braga (2016) afirma que estes radares podem detectar precipitações não perceptíveis ou detectáveis por satélites e pluviômetros. Suas antenas são construídas em regiões mais altas, permitindo, assim, uma varredura sem obstáculos.

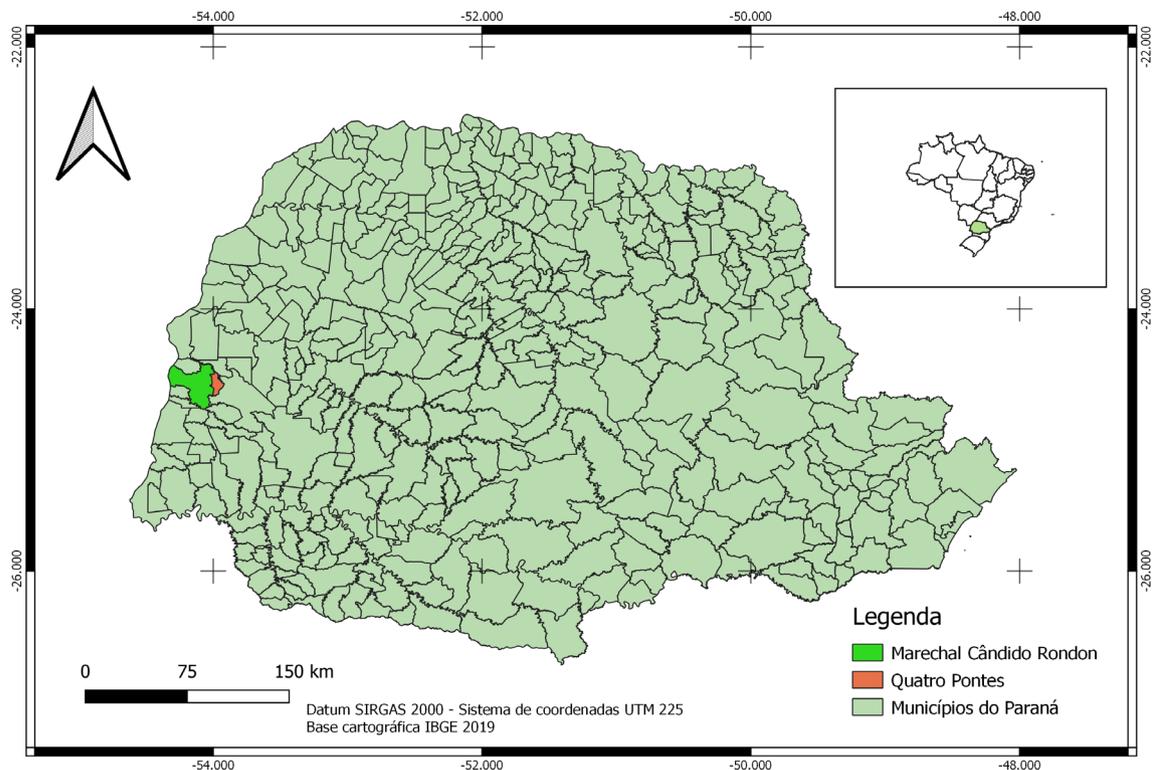
Em alguns eventos severos, como os tornados, é possível encontrar algumas assinaturas nas imagens de radar, sendo que, nestes casos, a nuvem responsável por sua geração apresenta um *hook echo*, ou seja, um eco gancho. Este pode ser produzido por tempestades propícias a granizo e a tornados e apresenta um formato parecido com um anzol em torno de uma supercélula.

Os serviços de meteorologia consideram a presença de um eco gancho o suficiente para justificar a emissão de avisos de possíveis atividades tornádicas. Portanto, seria indicativo para uma ação preventiva de atuação e alerta de tornados.

Junto à análise das imagens, também são feitos diversos algoritmos para acompanhar a velocidade das correntes e a direção dos fluxos de ventos (*The National Severe Storms Laboratory* [NSSL], 2019). No entanto, como o fenômeno ocorre rapidamente, é necessária a presença de *softwares* especializados e de pessoas treinadas especialmente para a verificação e a previsão de tal ocorrência, o que ainda não há no Brasil.

Este trabalho pretende averiguar se foi possível identificar o eco gancho na imagem de radar na ocorrência descrita por Rodrigues (2017) e Hornes e Balicki (2018) nos municípios de Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes (Fig. 1), em 19 de novembro de 2015.

Figura 1: Localização de Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes, PR.



METODOLOGIA

Para a verificação foram sobrepostos os dados georreferenciados do percurso do tornado múltiplo vórtice nas áreas destruídas pela atividade em ambas as cidades. Hornes

e Balicki (2019) verificaram que o percurso da nuvem tornádica foi de 16 km, com 15 minutos de duração e, aproximadamente, 64,08 km/h de velocidade média de deslocamento, seguindo a direção preferencial de Noroeste para Sudeste. O seu diâmetro máximo de circulação variou de 50 a 100 metros no início de seu toque no chão, chegando a 750 metros no perímetro urbano de Marechal Rondon, onde se concentrou sua força destrutiva. O fenômeno danificou 1.500 casas, além de 200 empresas e áreas públicas, deixando aproximadamente 14 mil imóveis sem energia elétrica (G1 Globo, 2015a). A força destrutiva evidenciada na zona de atuação chegou à categoria de um EF2 na escala Fujita melhorada, o que equivale a uma velocidade de 178 km/h a 217 km/h nos seus sub-vórtices de sucção.

O trajeto foi sobreposto a várias imagens de radar georreferenciadas com os horários aproximados da ocorrência no *software Arc Gis*. Após o encontro do eco gancho na imagem de radar, foi verificado o tempo aproximado da identificação do gancho e da atuação do tornado, uma vez que na época, os órgãos específicos não lançaram nenhum alerta para tais eventos - apenas posteriormente foram encontradas suas assinaturas.

Como afirma o meteorologista do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), Hamilton Carvalho, apesar de a estação do Paraná não ter captado o tornado em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes, foi possível identificar o fenômeno nas imagens, através da formação de nuvens favoráveis e pelo registro de ventos em radar (G1 Globo, 2015a). Foi averiguado, então, se houve a possibilidade da identificação do fenômeno na imagem e qual o tempo estimado entre a formação do conjunto de nuvens propícias e o toque do fenômeno destrutivo no chão.

A motivação da pesquisa foi tentar encontrar formas de reconhecimento antecipadas à atividade, no intuito de preparar a população para a resiliência, prevenção e gestão de risco de desastres naturais. A exemplo desta prática nos Estados Unidos, onde a presença do gancho é empregada como assinatura para a identificação e o alerta de tornado (Metsul Meteorologia, 2014).

Formação e caracterização de um tornado

De acordo com Barry e Chorley (2013), o Complexo Convectivo de Mesoescala (doravante CCM) se desenvolve a partir de células de cúmulos nimbus inicialmente isoladas. À medida que as células individuais se organizam em um agrupamento ao longo da frente da alta superficial, novas células tendem a se formar no flanco, através da interação das correntes frias descendentes com o ar adjacente. Com estas condições, o sistema apresentará ventos violentos, pancadas intensas de chuva e granizo, o que pode proporcionar o surgimento de supercélulas com tornados.

Os CCMs podem evoluir para vórtices ciclônicos e crescer verticalmente durante as primeiras seis a doze horas de sua gênese (Maddox, 1980), apresentando um grande aglomerado de nuvens, o qual, posteriormente, adquire uma forma de vírgula, assinalando o ciclone que pode originar a ciclogênese.

A ciclogênese é caracterizada pela diminuição da pressão atmosférica em dada área, o que proporciona a circulação dos ventos. Esta, por sua vez, pode ser influenciada por

vórtices ciclônicos de altos níveis, gerando, assim, grande instabilidade (Reboita, Gan, Rocha & Custodio, 2017).

Estes sistemas podem persistir por mais de 48 horas, mas, de acordo com Barry e Chorley (2013), os CCMs duram em média 12 horas. Velasco e Fritsch (1987) verificam o predomínio da atuação de complexos convectivos no nordeste da Argentina, no Paraguai e no sul do Brasil. Os autores afirmam que a fisiografia da região, com a proximidade da Cordilheira dos Andes, juntamente com a atuação de Jatós de Baixos Níveis, que transportam umidade para a região, facilitam o desenvolvimento de complexos. Amaral (2014), por sua parte, acompanha a diversidade da atuação dos Jatós de baixos níveis na evolução dos complexos convectivos, enquanto que Nascimento (2005) afirma que estes jatós contribuem para a formação de tempos severos. Na região do Chaco, por exemplo, é possível encontrar sistemas ciclônicos desprendidos que se movimentam para leste (Universidade de São Paulo [USP], 2020)

Bonatti e Rao (1987) defendem que perturbações barométricas, tais como as que ocorrem próximas dos Andes, na América do Sul, podem gerar atividades ciclônicas. Já Edwards (2018) apresenta teorias recentes, as quais resultam dos programas Vortex¹, sugerindo que, uma vez que um mesociclone está em andamento, o desenvolvimento do tornado estará relacionado às mudanças de temperatura através da borda do ar descendente envolvente ao redor do mesociclone (a corrente de oclusão).

Os tornados surgem porque a turbulência, aliada à redução da temperatura em certos pontos no interior das nuvens, propicia a ocorrência de queda barométrica, proporcionando, então, a atuação de ventos rotacionais que podem afunilar e, eventualmente, tocar o solo e formar o tornado (Candido, 2012). Como o ar entra rapidamente no interior do vórtice, a pressão tende a baixar em todas as direções, expandindo e resfriando (Noronha, 2010), de modo a formar vórtices pela redução súbita na pressão em certos pontos do sistema convectivo.

A alteração na pressão está relacionada ao grande desenvolvimento vertical desse sistema, que é capaz de gerar intensa turbulência no interior das nuvens. O resfriamento súbito de alguns setores da célula convectiva também tem papel fundamental na redução da pressão atmosférica. Com isso, o ar presente no entorno é atraído e passa a girar ao redor desse núcleo, onde a pressão é inferior, adquirindo a forma de cone, típica deste fenômeno meteorológico. Antes de tocar o solo, essa formação recebe o nome de nuvem funil. Após o contato com o chão, considera-se o evento como um tornado (Candido, 2012).

Um tornado raramente dura mais que uma hora, e se movem ao longo de caminhos retos, em um percurso de 10 km a 100 km de comprimento, com 200m a 2 km de largura, tendo suas velocidades determinadas pela corrente de baixo nível. Quando se forma sobre superfícies líquidas, é menos intenso e possui menores dimensões, sendo denominado de tromba d'água, nome recebido devido ao levantamento de uma coluna de água (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [INPE], 2018). A destruição causada

1 Experimento de Tornados, conduzido nas primaveras de 1994 e 1995 nas planícies do sul e centro dos EUA, liderado por Erik Rasmussen, do NSSL.

pelo fenômeno não está apenas associada aos ventos fortes, mas também à redução da pressão externa, podendo “explodir” prédios perto do caminho do vórtice. Os tornados podem ocorrer em famílias (Barry & Chorley, 2013) ou seja, uma mesma nuvem cúmulus nimbos pode gerar vários vórtices de sucção, quando isto ocorre, eles são denominados de tornados múltiplos vórtices.

Como se vê um tornado nas imagens de radar

A assinatura de um tornado evidencia-se, principalmente, se a célula apresentar rotação, identificando, assim, a presença de um mesociclone. No entanto, o tornado só surgirá quando a nuvem funil tocar a superfície. Alguns autores utilizam o termo super-célula para o mesociclone que origina o tornado (Wallace, & Hobbs, 2006). Segundo estes autores, a maior parte dos tornados fica cercado por um ar mais frio e menos flutuante, à medida que a linha de flanco ou de rajada (traseiro) envolve o mesociclone que está em rotação com ar ascendente.

Estudos de radar *Doppler* indicam que o eco gancho está associado a grande cisalhamento horizontal e/ou à presença de um mesociclone, que pode gerar grandes danos a superfície (Donaldson, 1971 *apud* Forbes, 1981; Burgess, 1976 *apud* Forbes, 1981). No entanto, nem todo mesociclone apresenta um tornado (Forbes, 1981).

Os trabalhos relacionando ecos de gancho como assinaturas tornádicas são difíceis de serem realizados, uma vez que há a necessidade de um banco de dados específico do horário e do local de toque de um tornado para posterior comparação com as imagens de radar. Assim, são imprescindíveis trabalhos que analisam ocorrências passadas, permitindo a compreensão dos elementos envolvidos na dinâmica de suas atuações. No Brasil não há um órgão específico que contabiliza e localiza estas ocorrências. Até o momento, a rede de caçadores de tornados é singela e não dispõe de aparato tecnológico, como radares móveis, para a efetiva interceptação destes. Assim, este tipo de análise é muito restrito.

Forbes (1981) avaliou um surto de tornados ocorridos em abril de 1974, de modo a verificar a utilidade da forma do eco como um indicador de tempestades de tornados. Em seu trabalho, o autor verificou que o formato do gancho costumava ser bem-sucedido em caracterizar um eco como tornádico, com uma faixa falsa de 16%. Como foi pontuado que eco ganchos nem sempre estão associados a tempestades de tornados, e muitos tornados ocorrem a partir de tempestades que nunca desenvolvem um eco gancho, o pesquisador decidiu por averiguar quais seriam as outras feições de eco relacionadas à atividade.

Forbes (1981) analisou quais os tipos de eco que acompanhavam os tornados, quais eram os mais comuns e com que frequência estes ecos se tornavam tornados. O cientista encontrou indicativos em imagens de radar microfilme, de dados de PPI (*Plan Position Indicador*) de nível baixo, registrados nos radares WSR-57 do Serviço Meteorológico Nacional, de que o eco gancho ocorre quando uma tempestade possui um mesociclone, mas não necessariamente se torna um tornado.

O gancho representaria uma faixa de precipitação, acompanhada por corrente descendente e vazante, circundando uma região de eco fraco (*WER - Weak Echo Region*). O WER é uma área de influxo e corrente ascendente, sendo um tipo forte e duradouro de

corrente, que geralmente se forma entre a corrente ascendente e a descendente, perto da borda do anzol (Forbes, 1981).

Dos 25 tornados que o pesquisador verificou, 86% apresentavam o formato de eco gancho. Os demais apresentavam ecos diferentes aos de gancho, que ele classificou como sendo: a) Apêndice: consiste em uma protuberância do eco orientada pelo menos 40° para a direita (sul) do movimento do eco; b) Gancho: quando a orientação do apêndice ultrapassava 60° à direita do movimento; ou c) Gancho espiralado ou gancho fechado: quando o gancho se enrola em uma espiral fechada, não podendo ser distinguido de um apêndice, assim era classificado como gancho desde que sua orientação fosse superior a 80° à direita do movimento do eco.

Além da diferenciação do aparecimento dos tornados em relação aos tipos de eco, Forbes (1981) verifica que algumas nuvens possuem a evolução destas três formas, iniciam como um apêndice, podendo evoluir a um gancho. O formato de gancho nem sempre estava presente nos momentos de atuação dos tornados em determinados espaços geográficos. Por isso, o trabalho de Forbes mostrou que há deficiências em determinar as atividades tornádicas através destes ecos, pois nem sempre equivaliam a este tipo de célula.

O autor enumerou cinco fatores temporais que sugerem que a habilidade da forma do eco na detecção de tornados não é representada com total precisão pela habilidade em classificar um eco como tornado ou não-tornádico. São eles:

- 1) Algumas tempestades produzem mais de um tornado e estes não geram eco ganchos nas imagens;
- 2) A distinção entre a visualização de um gancho e o efetivo toque do tornado no chão demorou aproximadamente 77 minutos antes do toque e desapareceu 20 minutos depois de seu término;
- 3) Alguns tornados ocorreram durante períodos em que os ecos distintos haviam perdido temporariamente suas características distintivas;
- 4) Os ecos distintos produziram tornados por apenas 36% do tempo em que o eco do tornado foi distinto. Isso aumenta a taxa de alarmes falsos;
- 5) Muitos tornados começaram antes do desenvolvimento do gancho e alguns se desenvolveram antes que a característica distintiva fosse detectada

Forbes (1981) verificou que os dados produzidos pelos radares em determinadas distâncias de seus alcances de varreduras apresentavam defasagens na qualidade, o que contribuía para a não eficácia do alerta. Ainda segundo Forbes (1981), a detecção de ecos distintos em circunstâncias operacionais depende muito da densidade da rede de radar e da resolução dos radares para uma melhor eficácia de alertas. A principal limitação é imposta pela perda de resolução em longo alcance devido ao alargamento do feixe. Também há uma perda de detectabilidade em longo alcance, para ângulos positivos de elevação da antena, devido ao aumento da elevação do feixe, que causa *overshoot* (sobreposição) do gancho de baixo nível. Se houver uma sobreposição considerável da cobertura do radar, a chance de detecção aumenta. No outro extremo, perto do radar, a interferência do solo pode inibir a detecção de eco em baixos ângulos de elevação.

A aparência do eco gancho se deve ao movimento giratório, o qual faz a célula sofrer retorcimento das estruturas afetadas e a projeção de objetos. E, por suas dimensões e características específicas, essas células são identificáveis por radar (Nunes et al., 2017).

Sadowski (*apud* Forbes, 1981) verificou que 40 dos 46 ecos de gancho eram tornádicos, dando uma taxa de falsos alarmes de apenas 12%. Este, provavelmente, foi o trabalho que mais claramente conseguiu definir tornados com seus respectivos eco ganchos.

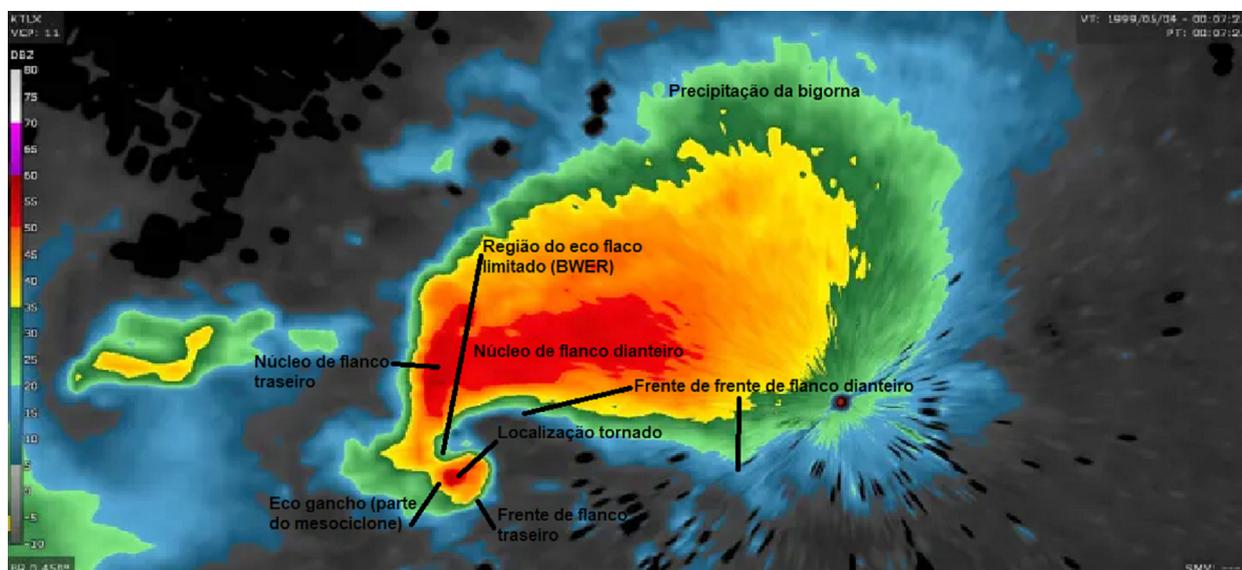
Nuvens tornádicas podem desenvolver novos tornados ao longo do seu deslocamento instável. Na proporção que o tornado maduro e seu mesociclone associado enfraquecem e morrem, um novo mesociclone pode se formar ao longo da frente de rajada, preparando o cenário para um segundo tornado. No decorrer de vida de uma tempestade de super-células, pode ocorrer a geração de uma família de tornados.

Na mesma data da ocorrência do tornado em Marechal, há de se destacar o registro de atividades tornádicas no Paraguai, nas regiões de Alto Paraná (PY) e em Iruña (PY), aproximadamente às 16h (Telefuturo Paraguay, 2020). Posteriormente, às 16h05, foram registradas as ocorrências nas cidades de Marechal Cândido Rondon (PR) e, aproximadamente às 19h, em Chapecó (SC), sendo todas estas atividades confirmadas pelo INMET (G1 Globo, 2015b, c). Estas atividades em sequência caracterizam uma “chuva” de tornados, sendo que os eventos geraram ventos fortes e grandes destruições no território brasileiro e paraguaio.

Através das imagens de radar é possível observar a estrutura de nuvens propensas a atividades de tornogênese. Segundo Queiroz (2009 p.62), “[a] forte assimetria dos padrões nos níveis mais baixos reflete o predomínio do deslocamento da tempestade para a direita”. Além disso, o radar possibilita a observação da região de fracos ecos, que está há uma altura de 4 a 7 km, significando que há correntes ascendentes rotacionais.

A Figura 2 apresenta o típico gancho visualizado no radar *Doppler*, encontrado nas células tornádicas, com o giro anti-horário correspondente ao hemisfério Norte.

Figura 2: Eco Gancho em imagem de radar



Fonte: modif. de NOAA (2018).

A supercélula é produtora de uma abrangente área de precipitação, assumindo no radar a forma de um eco gancho devido ao seu giro ciclônico sobre a área da corrente de ar ascendente. A rotação sob o eixo horizontal se dá pelo giro do ar em baixos níveis ao ser levantado para o interior da corrente ascendente, este ar inicia uma rotação horizontal “inclinada” para o eixo vertical. Assim, tem-se um corte horizontal de baixos níveis na supercélula com o formato de um gancho (*National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2017*).

Os eco ganchos, segundo Forbes (1981), seriam extensões descendentes da parte traseira de uma região de refletividade elevada, na qual o anzol representa uma faixa de precipitação acompanhada de corrente descendente e fluxo de saída, cercando uma região de “eco fraco”, isto é, uma região de influxo e de corrente ascendente. Em alguns casos, a formação do eco gancho pode estar associada com a descida de uma cortina de chuva no *downdraft* (traseira flanco).

A visualização de um eco gancho em uma célula indica a formação de um tornado. Desde o século XX, este método é empregado para emitir alertas de tornado através da utilização de radares. A associação do eco gancho com os tornados em imagens foi calculada por Sadowski (1969, *apud* Forbes), sendo o tempo médio de 15 minutos entre a visualização do eco gancho e a tornogênese (Markowski, 2001). Apesar das falhas mencionadas por Forbes (1981), o eco gancho ainda é amplamente utilizado como elemento indicador de assinatura de mesociclones e células tornádicas.

RESULTADOS

Eco Gancho do tornado de Marechal Cândido Rondon

De posse dos dados oferecidos pelas imagens de radares acerca das atividades tornádicas, foi analisada a ocorrência dos municípios de Marechal Cândido e Quatro Pontes, no estado do Paraná. De acordo com o SIMEPAR, os ventos passaram de 115 km/h, deixando um rastro de destruição (G1 Globo, 2015a).

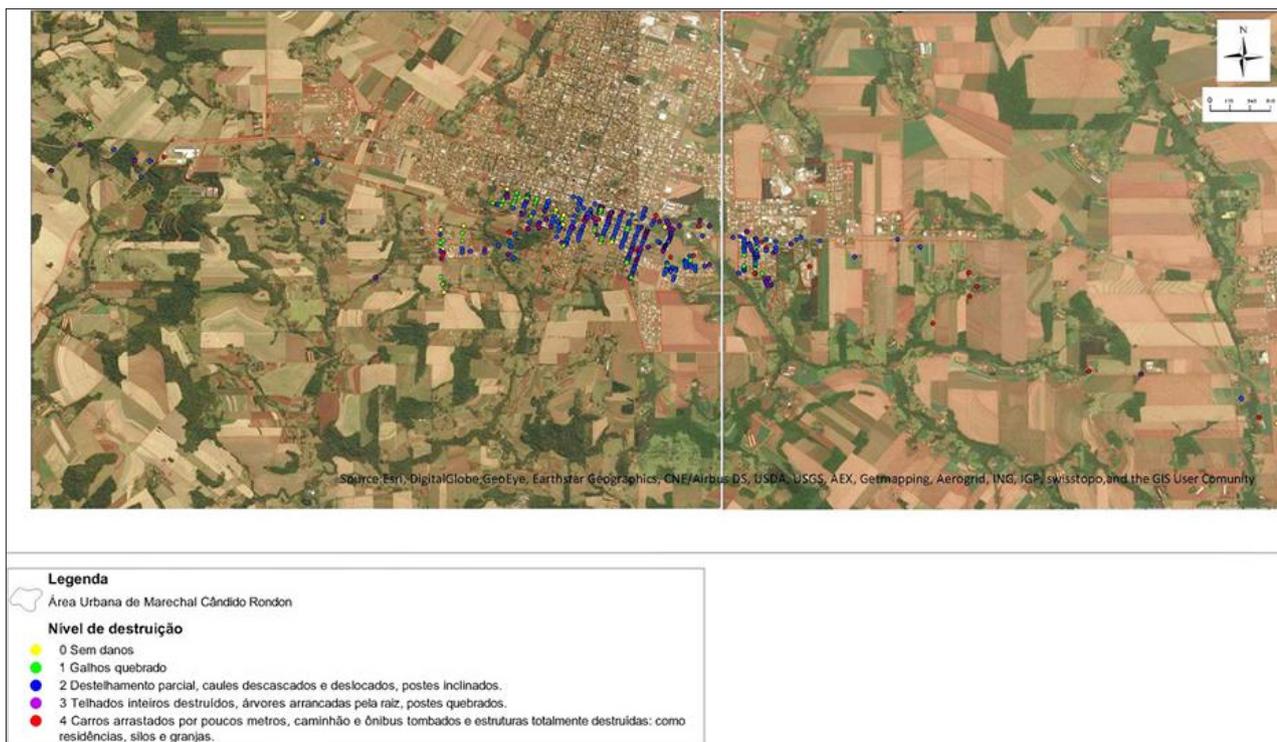
A tornogênese se iniciou nas proximidades da vila agrícola de Curvado, às 16h05 do dia 19 de novembro de 2015, sobre uma plantação de soja (apenas tocando as estruturas mais altas, sem atingir o solo), deslocando-se com a direção preferencial de NW a SE, em direção ao município de Quatro Pontes, onde finalizou sua atividade (Hornes & Balicki, 2018). Ele seguiu por seis bairros urbanos do município de Marechal Cândido Rondon e a dissipação do evento ocorreu no parque industrial III, já na cidade vizinha de Quatro Pontes. Próximo ao Lago Municipal Rodolfo Rieger, no município rondonense, um caminhão e um ônibus tombaram com a força do vento. O tornado também atingiu a empresa Sperafico Agroindustrial, que ficou parcialmente destruída, tendo silos desabados e diversos materiais lançados a centenas de metros (Portal Rondon, 2015).

A Figura 3 apresenta o percurso com o detalhamento de alguns pontos, com níveis de destruição diferenciados. O percurso foi definido a partir do trabalho de Rodrigues (2017), que entrevistou alguns dos afetados e, posteriormente, qualificou o tipo de destruição,

comparando-a à categoria da Escala Fujita Melhorada. A imagem evidencia os diversos danos causados pelo mesociclone tornádico, sendo possível a observação dos arcos de destruições que correspondem às áreas de toque dos subvórtices com coloração vermelha (4) e magenta (3).

O traçado azul na Figura 4 salienta o percurso da atividade espacializada na Figura 3, nas várias cenas das imagens de radar. Na hora aproximada do ocorrido, a temperatura média estava em 24,6°C, a temperatura de ponto de orvalho 22,2 C°, com a pressão a 954,2 HPA (Hornes & Balicki, 2018). Os dados meteorológicos foram extraídos da estação meteorológica do INMET localizada na fazenda experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), de Marechal Cândido Rondon.

Figura 3: Níveis de destruição em parte do percurso do tornado em Marechal Cândido Rondon.



Fonte: Rodrigues (2017).

A nuvem geradora do tornado múltiplo vórtice formou-se rapidamente sobre o oeste do Paraguai (Figura 4-A), à frente de um grande Complexo Convectivo de Meso Escala. Nota-se na figura 4, bloco A, que a nuvem apresenta um núcleo frio na banda do vermelho, demonstrando um influxo convergente ascendente na faixa vermelha com 52 dBZ², correspondendo a uma atividade de intensidade moderada a forte. O mesmo núcleo apresenta-se rodeado de nuvens de baixa refletividade, as quais seriam equivalentes à região de ecos fracos, denominada de WER, uma área de influxo e corrente ascendente.

Na legenda de cores, é possível identificar através do *Plan Position Indicador* (PPI) a refletividade que é dada em decibéis, a qual auxilia na detecção de tempo severo através da

2 Decibel em relação a Z, que corresponde ao fator de refletividade.

verificação da altura da nuvem, o que permite inferir a densidade do ar, que está relacionada com a sua temperatura e, por consequência, com a intensidade e o tipo de precipitação.

A escala de 0 a 30 dBZ corresponde a chuvas fracas e muito fracas, as quais são representadas pelas cores verde e amarelo. Ainda, de 30 a 45 dBZ a classificação é de chuva moderada, sendo representada pela coloração amarela para laranja. Já o nível de 45 a 63 dBZ corresponde à chuva forte, evidenciado pela cor vermelha. Por fim, sendo o dBZ acima de 63, indicado pela cor magenta, a nomenclatura sobe para muito forte (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica [REDEMET], 2015).

A variação de dBZ, no caso em estudo, evidenciou um forte cisalhamento sem efetiva precipitação na região de Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes no horário de ocorrência do tornado. Esta não passou de três milímetros, conforme registro da estação do INMET.

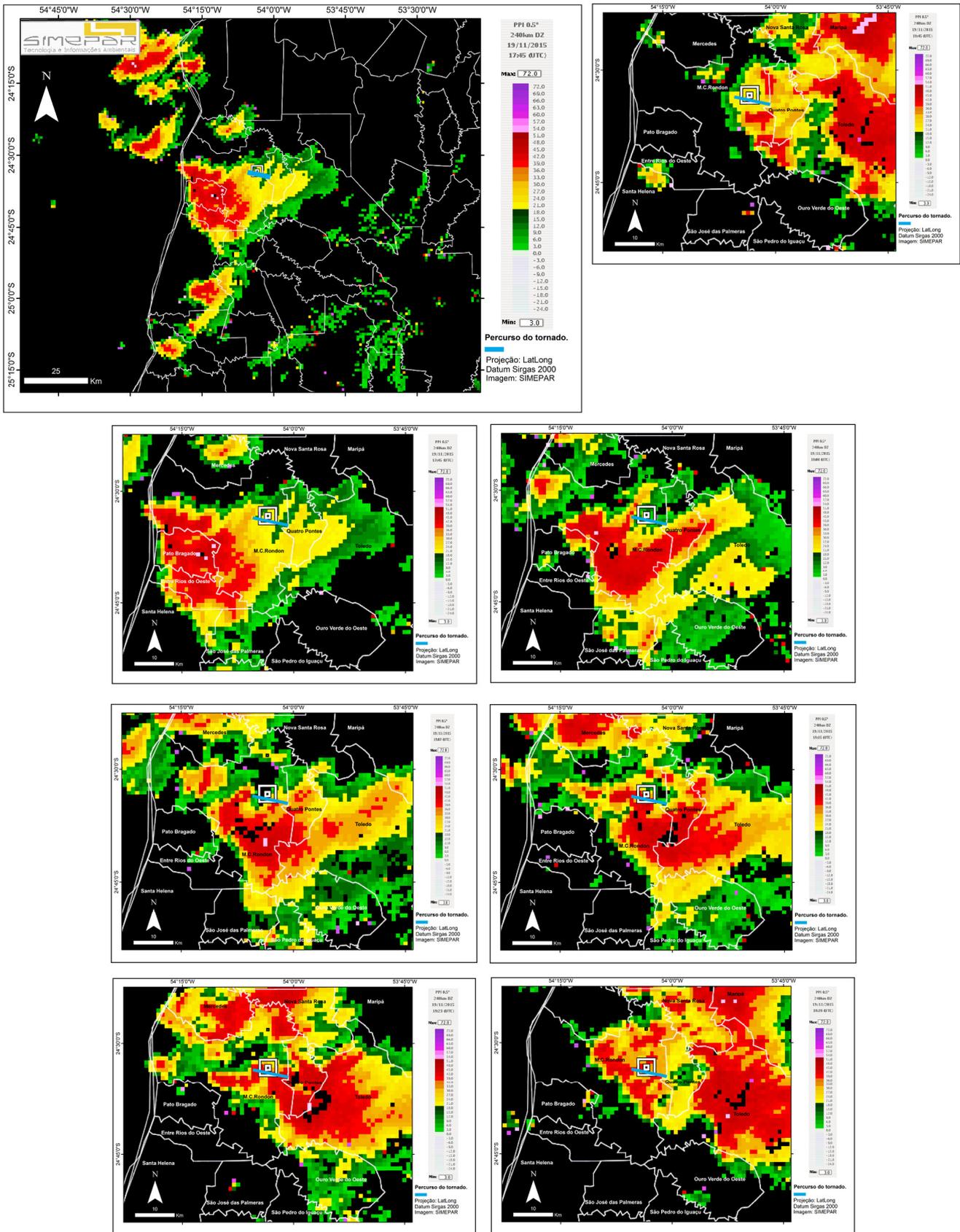
Na imagem de radar 4-B, no horário próximo à atividade (15h45), observou-se a presença de uma assinatura semelhante ao que Forbes (1981) denominou de apêndice. Este apêndice, inicialmente, estava em um dBZ de baixa refletividade e, posteriormente, na Figura 4-C, demonstrou um influxo ascendente, no horário próximo do registro do tornado, às 16h. A assinatura de um eco gancho pode ser vislumbrada em 4-D. O gancho com uma inclinação maior do que 60° , concordando com o afirmado por Forbes (1981), apresenta nas suas proximidades uma região de eco fraco.

Sua posição se diferencia dos ganchos tornádicos dos EUA, os quais apresentam uma direção preferencial de SW para NE e sentido anti-horário. Na situação aqui observada, por outro lado, predomina a direção NW para SE com giro horário. O gancho apresentava movimento condizente com o giro da baixa pressão do hemisfério sul (NOAA, 2017). Além disso, concordando com a literatura, é possível vislumbrar forte assimetria dos padrões nos níveis mais baixos, no horário aproximado da ocorrência, às 16h05 (Hornes e Balicki, 2018).

A partir da imagem do radar, é possível evidenciar a rotação sob o eixo horizontal, que se dá pelo giro do ar em baixos níveis ao ser levantado para o interior da corrente ascendente, evidenciando a rotação horizontal “inclinada” vertical verificada no tornado, presente no flanco da frente traseira, a qual é identificada por uma coloração vermelha e magenta escura, com 65 Dbz, correspondendo a uma atividade extremamente intensa.

Percebe-se o aumento da atividade de 65 Dbz nas figuras 4-C, 4-D, 4-E e 4-F, mas diminuindo em 4-G e 4-H, momento em que o gancho se desfaz. Às 16h07 (Figura 4-D), o gancho apresenta uma leve curvatura no sentido horário, enquanto que, às 16h15 (Figura 4-E), o gancho ainda se mantém, no entanto, há uma aparente junção da nuvem traseira a noroeste ao corpo da supercélula. Em 4-D, às 16h23, o gancho atinge Quatro Pontes e ainda se mantém de forma sutil. Após a passagem da nuvem por Quatro Pontes, esta começa a tomar outra forma, modificando o seu núcleo mais frio (cor vermelha). Finalmente, às 16h38, não é mais possível visualizar um “eco gancho” na área. Nos quadros 4-G e 4-F, o núcleo central da tempestade se desloca para os municípios de Toledo e Cascavel.

Figura 4: Conjunto de imagens de Radar como percurso da atuação tornádica de Marechal Cândido Rondon, PR³.



3 As imagens foram cedidas pelo SIMEPAR e modificadas por Bennert (2016), com o acréscimo do percurso do tornado (em azul).

CONCLUSÕES

Através da análise realizada com as imagens de radar cedidas pelo SIMEPAR, em conjunto com as informações do percurso de destruição ocorrido em Marechal Cândido Rondon, foi possível verificar que o eco gancho apareceu na imagem de radar muito próximo ao horário descrito do início da atividade tornádica. O evento manteve uma área de atuação acompanhando o caminho de destruição, até chegar à cidade de Quatro Pontes, momento em que não é mais possível visualizar com tanta nitidez a curvatura e a manutenção do gancho.

O sentido estabelecido pelo gancho é horário, de NW para SE, concordando com o que a literatura menciona para a situação do Hemisfério Sul. O tempo estimado do apêndice apresentar o gancho, com forte intensidade de fluxo, 65 dBZ, indicando forte rotação, foi de aproximadamente sete minutos, o que permitiria o lançamento de um alerta e uma rápida organização da defesa civil. No entanto, como afirma Forbes (1981), nem sempre estes elementos representam os instantes exatos de atividades tornádicas. Assim, indica-se que os centros de previsões do tempo e a defesa civil promovam o desenvolvimento de pesquisas e de atividades, de modo que os impactos destes eventos sejam minimizados, permitindo a resiliência das cidades para a prevenção e a gestão de risco de desastres naturais.

O tempo de previsão estimado para ocorrências de tornados nos EUA é de 15 minutos. Logo após a visualização de um funil, são ligadas sirenes de alerta e a defesa civil inicia um conjunto de ações sonoras, midiáticas e telefônicas, com o intuito de divulgar o alerta e as ações que devem ser realizadas para a proteção da vida.

Destaca-se que o radar gerador das imagens estudadas dista aproximadamente 70 km do local de atuação tornádica, o que pode representar um ganho de qualidade na verificação do presente evento. Nos Estados Unidos existem diversos 'caçadores de tempestades', com seus próprios radares móveis, os quais auxiliam no monitoramento do tempo *in loco*, facilitando a visualização do funil em tempo real. O Brasil ainda não possui todo este aparato e está-se apenas iniciando a construção da rede de informações acerca de atividades tornádicas.

Esta pesquisa é pioneira nesse tipo de análise e há necessidade de comparações com outros estudos similares para a confirmação de tais características.

AGRADECIMENTOS

Ao Sistema Meteorológico do Paraná, o SIMEPAR, pelo fornecimento das imagens de radar.

REFERÊNCIAS

- Amaral, L.M.C.D. (2014). *Análise de complexos convectivos ocorridos na região sul da América do Sul durante o período de 2005 a 2010*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Barry, R.G., & Chorley, R. (2013). *J. Atmosfera, Tempo e Clima*. 9. ed. Londres: Routledge.
- Bennert, A. (2016). *Conjunto de imagens de Radar da ocorrência tornádica de Marechal Cândido Rondon*.
- Bonatti, J.P., & Rao, V.B. (1987). Moist baroclinic instability in the development of North Pacific and South American intermediate-scale disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2657-2667.
- Braga, C. (2016). Radar meteorológico. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=7vS4qVhE2ss>.
- Candido, D.H. (2012). *Tornados e trombas-d'água no Brasil: Modelo de risco e proposta de escala de avaliação de danos*. Tese de Doutorado em Geociências. Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil. Recuperado de: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286918>.
- Cherubini, F. (2016). Simepar instala segundo radar meteorológico do Paraná em Cascavel. In *Gazeta do Povo* (10 abr. 2014). Recuperado de: <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/simepar-instala-segundo-radar-meteorologico-do-pr-em-cascavel-8ww6yl1i4inuctrkeiblixp3i/>
- Edwards, R. (2018). *The Online Tornado FAQ*. Recuperado de: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/#TOP>
- Forbes, G.S. (1981). On the Reliability of Hook Echoes as Tornado Indicators. *Monthly Weather Review – American Meteorologists Society*, 1457-1466.
- G1 GLOBO (19 nov. 2015a). Tornado atinge Marechal Cândido Rondon e deixa rastro de destruição. Recuperado de <http://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2015/11/tornado-atinge-marechal-candido-rondon-e-deixa-rastro-de-destruicao.html>.
- G1 GLOBO (19 nov. 2015b). Inmet confirma passagem de tornado em Chapecó, SC; houve feridos. Recuperado de <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2015/11/inmet-confirma-passagem-de-tornado-em-chapeco-sc-houve-feridos.html>.
- G1 GLOBO (20 nov. 2015c). Além de Chapecó, Inmet confirma também tornado em Treze Tílias, SC. Recuperado de <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2015/11/alem-de-chapeco-inmet-confirma-tambem-tornado-em-treze-tilias-sc.html>.
- Hornes, K.L., & Balicki, M. (2018). Caracterização do tornado ocorrido em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes em novembro de 2015. *RA'E'GA*, 44, 36-54.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2018). *Glossários*. Recuperado de <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#t>.
- Maddox, R.A. (1980). Mesoscale convective complexes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 61, 1374-1387.
- Mahafza, B.R. et al. (1998). *Introduction to Radar Analysis*. Huntsville: CRC Press Recuperado de: https://books.google.com.br/books?id=HnbERpIIrX0C&printsec=frontcover&%20dq=radar&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwim64qwszMAhUDCpAKHWSeA_sQ6AEIUDAG#v=onepage&q=radar&f=false.
- Markowski, P.M. (2001). Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *American Meteorological Society*, 852-876. Recuperado de https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/130/4/1520-0493_2002_130_0852_hearfd_2.0.co_2.xml?tab_body=pdf.
- Metsul Meteorologia (20/10/2014). São Borja escapou de um forte tornado na noite de sábado. Recuperado de: <https://metsul.com/sao-borja-escapou-de-um-forte-tornado-na-noite-de-sabado/>
- Nascimento, E. de 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.

- National Oceanic and Atmospheric Administration (2017). *Características básicas dos fenômenos convectivos*. Recuperado de <http://www.dca.iag.usp.br/material/hallak/Mesoescala2017/TreinamentoObservacaoTempestades/Topico-3-TreinamentoTempestNOAA.pdf>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2018). *Radar Image of a Violent Tornadoic Supercell* (n.d.). Recuperado de <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/radscl.htm>.
- Noronha, A.W.T. (2010). *Estudo qualitativo sobre a formação dos “tornados” e descrição dos eventos acontecidos nos anos de 2006 a 2009 no estado do Ceará*. Monografia de graduação em licenciatura em Física. Universidade Estadual do Ceará, UECE, Fortaleza, CE, Brasil. Recuperado de: www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_download/98.
- Nunes, L.H., Gomes, A.M., Held, G., Naccarato, K., Bona, L., Amorim, R.R., & Machado, J.P. (2017). Evidências de um tornado em Campinas em junho de 2016: considerações preliminares *Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia e Física Aplicada; Congresso Nacional de Geografia Física*. Campinas, SP, Brasil, 17/1. pp. 1948-1962. Recuperado de <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2408>.
- Portal Rondon (20/11/2015). *Tornado causa destruição em Marechal Cândido Rondon*. Recuperado de <https://www.radiopiratuba.com.br/noticias/noticia/id:1914;tornado->
- Queiroz, A.P. (2009). *Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. Recuperado de https://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2015/03/dissertacao_de_mestrado6.pdf.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P., & Custódio, I.S. (2017). Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I - revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171-186.
- Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (2015) *Como identificar os produtos dos Radares Meteorológicos*. Recuperado de <https://www.redemet.aer.mil.br/?i=blog&id=2390>.
- Rodrigues, N.A. (2017). *Caracterização da atuação do Tornado ocorrido em 19 de Novembro De 2015 Em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes – PR*. 80 f. Monografia graduação em licenciatura em Geografia. Universidade do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil.
- Telefuturo Paraguay (2015). *Impactante tornado en Alto Paraná*. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=bUP_EKNKdAM&feature=emb_rel_end.
- The National Severe Storms Laboratory (2019). *Severe Weather 101*. Recuperado de <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/tornadoes/detection/>.
- Universidade de São Paulo. *Ciclones e ciclogêneses*. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAG Departamento de Ciências Atmosféricas ACA Meteorologia Sinótica, (n.d). Recuperado de <https://docplayer.com.br/63458455-Ciclones-e-ciclogeneses-definicoes.html>.
- Velasco, I.EJ., & Fritsch, M. (1987). Mesoscale Convective Complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, 92(8), 9591-9613.
- Wallace, J.M., & Hobbs, P.V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2.ed. Toronto: Elsevier.

Data de submissão: 14/maio/2020

Data de aceite: 06/mar./2021