

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

KAUAN MATEUS KUBASKI

DETECÇÃO DE RASTROS DE TORNADOS POR DE IMAGENS DE
SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NOS MUNICÍPIOS DE ÁGUA DOCE A
TANGARÁ (SC) E NOVA CANDELÁRIA A CAMPOS NOVOS (RS)

PONTA GROSSA

2026

KAUAN MATEUS KUBASKI

DETECÇÃO DE RASTROS DE TORNADOS POR DE IMAGENS DE
SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NOS MUNICÍPIOS DE ÁGUA DOCE A
TANGARÁ (SC) E NOVA CANDELÁRIA A CAMPOS NOVOS (RS)

Dissertação apresentada para obtenção de título
de mestre em Gestão do Território, do Programa
de Pós Graduação em Geografia da Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karin Linete Hornes

PONTA GROSSA

2026

K95 Kubaski, Kauan Mateus

Detecção de rastros de tornados por meio de imagens de sensoriamento remoto orbital nos municípios de Água Doce a Tangará (SC) e Nova Candelária a Campos Novos (RS) / Kauan Mateus Kubaski. Ponta Grossa, 2026.

111 f.

Dissertação (Mestrado em Gestão do Território - Área de Concentração: Gestão do Território: Sociedade e Natureza), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Karin Linete Hornes.

1. Geotecnologias - Análise espacial. 2. Tempestades severas. 3. NDVI (Índice de vegetação) - Aplicações. 4. Sensoriamento remoto. I. Hornes, Karin Linete. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Gestão do Território: Sociedade e Natureza. III.T.

CDD: 551



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

TERMO

KAUAN MATEUS KUBASKI

"DETECÇÃO DE RASTROS DE TORNADOS POR MEIO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NOS MUNICÍPIOS DE ÁGUA DOCE (SC), TANGARÁ, NOVA CANDELÁRIA E CAMPOS NOVOS (RS)"

Ponta Grossa, 11 de fevereiro de 2026

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Gestão do Território no Curso de Pós-Graduação em Geografia - Mestrado em Gestão do Território, Setor de Ciências Exatas e Naturais, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Karin Linete Hornes - UEPG

Ericson Hideki Hayakawa - UNIOESTE 

Júlio Manoel França da Silva - UEPG

Documento assinado digitalmente

ERICSON HIDEKI HAYAKAWA
Data: 28/04/2026 21:58:41-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>



Documento assinado eletronicamente por **karin Linete Hornes, Coordenador(a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia - Mestrado**, em 13/02/2026, às 15:53, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Julio Manoel Franca da Silva, Professor(a)**, em 18/02/2026, às 18:34, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **2973434** e o código CRC **649D95CA**.

25.000093345-6

2973434v6

*Dedico a minha família, em
especial meus pais Suely e
Estefano, e minha irmã Sthefany*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Dra. Karin Linete Hornes pela orientação, aos membros do Laboratório de Climatologia e Estudos Ambientais, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado, a Marinha do Brasil pelas cartas sinóticas disponibilizadas e as demais pessoas não mencionadas nominalmente que de algum modo auxiliaram no processo de elaboração dessa dissertação.

RESUMO

Os tornados são responsáveis por uma série de danos que resultam em prejuízos econômicos e perdas humanas, podendo resultar desta forma, em um desastre. Embora o fenômeno fosse historicamente documentado no Brasil, o mesmo é relativamente desconhecido por uma parcela significativa da população. O sudeste da América do Sul abriga um corredor de tornados que inclui o sul e sudeste brasileiro, com a região Sul respondendo a uma fração significativa das ocorrências reportadas. Diante da perspectiva que o uso de sensoriamento remoto, SIG e as geotecnologias podem ser mais exploradas e a relevância do tema, essa pesquisa investigou dois estudos de caso de tornados retrógrados, detectando seu percurso e a largura máxima encontrada. Para a execução desse propósito, foram utilizadas imagens de satélite MSI/Sentinel-2 de 2017 a 2023, sendo adquiridas cenas pré-evento e pós-evento. O ano inicial foi definido tendo como base o lançamento global do satélite. Para a seleção preliminar das ocorrências, foi utilizado a base de dados de Almeida (2023) e Piotrovski (2025), selecionando eventos de maiores categorias dentro do contexto brasileiro e do período disponível. Com as imagens de satélites adquiridas, foram utilizados procedimentos que pudessem realçar através de processamento digital de imagens, o rastro de tornados. Para isso, foram usados o NDVI pós-evento, a mudança de NDVI e o PCA, métodos aplicados em estudos anteriores e que foram eficazes em identificar a trajetória dos tornados. O NDVI é um indicador da saúde e o estado da vegetação, sendo derivado do balanço espectral entre o infravermelho próximo e o vermelho, enquanto que, a mudança de NDVI reflete as mudanças na superfície para períodos distintos (antes e após o distúrbio causado pelo tornado). O PCA, entretanto, trata-se de um procedimento estatístico. O método exibe a máxima variância em componentes principais, sendo a quantidade total de componentes principais determinada pelo número de bandas espectrais empilhadas no arquivo *raster* de entrada. Cada componente explica diferentes mudanças na superfície, dentre elas o rastro de tornado e são computadas em ordem decrescente da variância total explicada. Os resultados demonstraram que principalmente a mudança de NDVI e PCA foram eficazes em detectar rastros de tornados estimados entre EF2 e EF3, embora a variabilidade espacial do uso do solo e variações na intensidade do fenômeno podem resultar em descontinuidades espaciais no percurso detectado. Algumas evidências corroboram alegações de trabalhos anteriores, dentre eles, de que o PCA identifica melhor o rastro em ambientes urbanos e a mudança de NDVI em áreas de perda de vegetação, mas que o substrato não foi exposto. No entanto, em linhas gerais, tanto a mudança de NDVI quanto o PCA apresentam comportamento similar na identificação de rastro de tornados para os eventos analisados, destacando a importância do recurso multitemporal de análise. Os métodos aplicados são úteis para tornados extensos, auxiliando o mapeamento de danos e subsidiam análises futuras para correlacionar com as características da superfície terrestre.

Palavras-chave: Geotecnologias, Tempestade Severa, NDVI, Detecção de mudanças.

ABSTRACT

Tornadoes are responsible for a series of damages that result in economic losses and human casualties, which can lead to disaster. Although the phenomenon has been historically documented in Brazil, it is relatively unknown to a significant portion of the population. Southeastern South America is home to a tornado corridor that includes southern and southeastern Brazil, with the southern region accounting for a significant fraction of reported occurrences. Given the prospect that the use of remote sensing, GIS, and geotechnologies can be further explored and the relevance of the topic, this research aimed to investigate retrograde tornadoes, detecting their path and maximum width. To achieve this purpose, MSI/Sentinel-2 satellite images from 2017 to 2023 were used, with pre-event and post-event scenes being acquired. The initial year was defined based on the global launch of the satellite. For the preliminary selection of occurrences, the database of Almeida (2023) and Piotrovski (2025) was used, and as necessary for the search for more significant events, the list on Wikipedia containing independent external sources was consulted, filtered by EF2-EF3 occurrences. With the satellite images acquired, procedures were used that could highlight the trail of tornadoes through digital image processing. For this, post-event NDVI, NDVI change, and PCA were used, methods applied in previous studies that were effective in identifying the trajectory of tornadoes. NDVI is an indicator of the health and condition of vegetation, derived from the spectral balance between near infrared and red, while NDVI change reflects changes in the surface for different periods (before and after the disturbance caused by the tornado). PCA, however, is a statistical procedure. The method displays the maximum variance in principal components, with the total number of principal components determined by the number of spectral bands stacked in the input raster file. Each component explains different changes in the surface, including the tornado track, and is computed in descending order of total variance explained. The results showed that NDVI change and PCA were particularly effective in detecting tornado tracks estimated between EF2 and EF3, although spatial variability in land use and variations in the intensity of the phenomenon can result in spatial discontinuities in the detected path. Some evidence corroborates claims from previous studies, among them that PCA better identifies trails in urban environments and NDVI change in areas of vegetation loss, but that the substrate was not exposed. However, in general, both NDVI change and PCA show similar behavior in identifying tornado tracks for the events analyzed, highlighting the importance of multitemporal analysis. The methods applied are useful for extensive tornadoes, assisting in damage mapping and supporting future analyses to correlate with land surface characteristics.

Keywords: Severe Storm, Geotechnologies, NDVI, Change detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Janela inicial do complemento PCA4CD indicando para inserir os dados de entrada e parâmetros para o cálculo dos componentes principais.....	23
Figura 2 - Exemplo de janela aberta automaticamente do complemento PCA4CD após os componentes principais serem calculados.....	24
Figura 3 - Ilustração de uma nuvem em uma tempestade madura.....	27
Figura 4 - <i>Cumulonimbus capillatus</i> em Berlim, Alemanha.....	28
Figura 5 - Ciclo de vida de uma tempestade.....	28
Figura 6 - CCM no sul do Brasil, neste exemplo a origem do sistema advém do Chaco argentino, caracterizado como uma área de baixa pressão e com cavado.....	35
Figura 7 - Exemplo de eco de arco	36
Figura 8 - <i>Hook echo</i> (eco de gancho) em uma imagem de radar, indicando uma supercélula tornádica em direção a Birmingham, Alabama.....	38
Figura 9 - Tornado F5 nos arredores de Elie, Manitoba no Canadá em 22 de junho de 2007.....	39
Figura 10 - Exemplo de diferentes categorias de danos (em escala EF) em residências de um evento tornádico em Greensburg, Kansas, Estados Unidos em 4 de maio de 2007.....	47
Figura 11 - Velocidade do vento em diversas escalas utilizadas para avaliação de danos de tornado.....	49
Figura 12 - Ocorrências de tornados reportados no Brasil entre 1975 e 2018.....	56
Figura 13 - Imagem do MSS/Landsat no infravermelho próximo (banda 6) na bacia do Paraná (tríplice fronteira) em 1972.....	59
Figura 14 - Assinatura de tornados em diferentes condados do Alabama em 3 de março de 2019. a) NDVI pós-evento em 6 de março; b) diferença de NDVI; c) PC7 e d) Assinala seções utilizadas para cada um dos métodos.....	63
Figura 15 - Imagens aéreas pós-tornado no município de Água Doce, SC. Em “a” uma estrutura destruída e em “b” árvores arrancadas.....	67
Figura 16 - Percurso estimado do tornado de 14 de agosto de 2020 na região de Água Doce, SC.....	67

Figura 17 - Velocidade do vento no sul do Brasil em 14/08/2025 às 15h (GMT-3) em diferentes alturas geopotenciais.....	68
Figura 18 - Imagem de radar em 14/08/2020 entre as cidades de Água Doce e Tangará em um intervalo por volta das 15h-15h30 no horário local, SC. Em “a” a supercélula estava em Água Doce e em “b” rumou à oeste para Tangará.....	69
Figura 19 - Imagem do satélite GOES-16 às 16h no horário local do dia 14/08/2020.....	69
Figura 20 - Carta sinótica no Brasil em 14/08/2020. Em “a” às 00Z (21 horas no horário local e em “b” às 12Z (9 horas no horário local).....	70
Figura 21 - NDVI em 25/08/2020 entre Água Doce e Tangará, SC.....	72
Figura 22 - NDVI em 25/08/2020 ampliado sobre o contorno do rastro identificado.....	72
Figura 23 - Mudança de NDVI entre Água Doce e Tangará, SC.....	73
Figura 24 - Resultado do PCA computado no complemento PCA4CD, em vermelho a terceira componente e em laranja escuro a sétima componente.....	74
Figura 25 - PCA entre Água Doce e Tangará, SC.....	75
Figura 26 - Rastros de tornados entre Água Doce e Tangará, SC obtidos pelo NDVI, mudança de NDVI e PCA.....	76
Figura 27 - PCA (CP3) e mudança de NDVI na área urbana de Água Doce, SC.....	77
Figura 28 - Seção com maiores larguras detectadas. Em “a” na CP3, em “b” na mudança de NDVI, na letra “c” o destaque da seção na área de estudo e em “d” a imagens WPM/CBERS 4-A de 04/09/2020 mostrando a cobertura presente.....	79
Figura 29 - Mudança de NDVI e PC3 (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Água Doce e Tangará, SC.....	80
Figura 30 - Relação entre PC3 e a mudança de NDVI (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Água Doce e Tangará, SC.....	81
Figura 31 - Seleção de alguns pontos amostrais com comportamentos e valores distintos entre a mudança de NDVI e PCA. De “a” para “d” (primeira linha) - imagens MSI/Sentinel-2, de “e” para “h” (segunda linha) imagens WPM/CBERS 4-A.....	82

Figura 32- Danos observados em Sede Nova, RS. Em “a” um galpão completamente destruído na área rural e em “b” uma casa destruída.....	83
Figura 33 - Danos causados por tempestade severa no noroeste do Rio Grande do Sul em 12 de julho de 2023.....	84
Figura 34 - Carta sinótica do Brasil em 12/07/2023. Em “a” às 00Z (21 horas no horário local e em “b” às 12Z (9 horas no horário local).....	85
Figura 35 - NDVI em 19/07/2020 entre Nova Candelária e Campo Novo, RS.....	86
Figura 36 - Ampliação do NDVI de 19/07/2020 entre os dois primeiros segmentos..	87
Figura 37 - Ampliação do NDVI de 19/07/2020 no terceiro segmento.....	87
Figura 38 - Mudança de NDVI entre Nova Candelária e Campo Novo, RS.....	88
Figura 39 - Resultado do PCA computado no complemento PCA4CD, em vermelho a terceira componente e em laranja escuro a oitava componente.....	89
Figura 40 - PCA (CP3) entre Nova Candelária e Campo Novo, RS.....	90
Figura 41 - Maiores larguras identificadas pelos procedimentos utilizados e fontes consultadas com a mudança de NDVI como <i>basemap</i>	93
Figura 42 - Mudança de NDVI e PC3 (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Nova Candelária e Campo Novo, RS.....	94
Figura 43 - Relação entre PC3 e a mudança de NDVI (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Nova Candelária e Campo Novo, RS.....	95
Figura 44 - Área ampliada com danos na plantação.....	96
Figura 45 - Imagem de satélite do Google Earth ao norte de Campo Novo, RS em 25/08/2023.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações das bandas espectrais do instrumento MSI a bordo da missão Sentinel-2.....	18
Quadro 2 - Escala EF com a faixa de velocidade do vento estimada e os danos causados.....	46
Quadro 3 - Panorama geral dos principais artigos com NDVI e PCA para identificação dos rastros.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de NDVI associado ao uso do solo.....	21
Tabela 2 - Comprimento estimado do rastro de tornado entre Água Doce e Tangará, SC ocorrido em 14/08/2020 através dos diferentes procedimentos utilizados.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMS	<i>American Meteorological Society</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CAPE	Energia potencial convectiva disponível
CHC	<i>Canadian Hurricane Center</i>
CISA	<i>Cybersecurity and Infrastructure Security Agency</i>
CCM	Complexo convectivo de mesoescala
EF	Escala Fujita Melhorada
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESOS	El Niño-Oscilação do Sul
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FFP	Escala de tornados Fujita-Pearson
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
IDEAM	<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSI	<i>Multi-Spectral Instrument</i>
mTc	Massa Tropical Continental
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NNW	Norte-Noroeste
NSSL	<i>National Severe Storms Laboratory</i>
NW	Noroeste
NWS	<i>National Weather Service</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
SCIED	<i>Center for Science Education</i>
SMBYC	<i>Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono para Colombia</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPC	<i>Storm Prediction Center</i>
WMAX	Velocidade vertical máxima
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS.....	18
3	TEMPESTADES SEVERAS.....	25
3.1	FORMAÇÃO DE UMA TEMPESTADE SEVERA.....	27
3.2	CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES.....	33
3.2.1	.Tempestade de multicélulas.....	34
3.2.2	Tempestade de supercélulas.....	37
4	TORNADOS.....	39
4.1	ESCALA F E A ESCALA EF.....	44
4.2	PARÂMETROS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DE TORNADOS.....	49
4.3	DISTRIBUIÇÃO E FREQUÊNCIA DE TORNADOS.....	52
5	DETECÇÃO DE MUDANÇAS NA ANÁLISE DE TORNADOS.....	57
5.1	IMAGENS DE SATÉLITE NA ANÁLISE DE TORNADOS.....	58
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.1	TORNADO ENTRE ÁGUA DOCE E TANGARÁ, SC (14/08/2020).....	66
6.1.1	Verificação da atividade tornádica.....	70
6.1.1.1	<i>NDVI pós-evento.....</i>	<i>71</i>
6.1.1.2	<i>Mudança de NDVI.....</i>	<i>73</i>
6.1.1.3	<i>PCA.....</i>	<i>74</i>
6.1.1.4	<i>Comparação entre NDVI, mudança de NDVI e PCA.....</i>	<i>75</i>
6.2	TORNADO ENTRE NOVA CANDELÁRIA E CAMPO NOVO, RS (12/07/2023).....	83
6.2.1	Verificação da atividade tornádica.....	85
6.2.1.1	<i>NDVI pós-evento.....</i>	<i>85</i>
6.2.1.2	<i>Mudança de NDVI.....</i>	<i>88</i>
6.2.1.3	<i>PCA.....</i>	<i>89</i>

6.2.1.4	<i>Comparação entre NDVI, mudança de NDVI e PCA.....</i>	91
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Fiocruz (2026), os desastres tidos como “desastres naturais” é definido pela interrupção das atividades humanas em decorrência de eventos extremos de origem climatológica ou meteorológica, isoladamente, esses fenômenos não desencadeiam um desastre. O sistema social com os aspectos físicos é indissociável na compreensão da definição de desastre. Somente em um período de 10 anos (2013-2023), os prejuízos acumulados em todo o Brasil em função de desastres chegaram a 639,4 bilhões de reais, afetando mais de 13 milhões de brasileiros e quase um milhão de desabrigados e desalojados, milhares de decretos foram emitidos ainda no período pré-COVID, sendo necessário maior injeção de orçamento na prevenção do que na resposta ao desastre (CNM, 2024).

O tornado, fenômeno resultante de uma tempestade severa, pode gerar muitos danos, reverberando economicamente e na vida das pessoas que residem em determinado bairro, localidade ou município de maneira geral, portanto, pode gerar um desastre. Ocorrências tornádicas costumam ser mais danosas do que outros eventos relacionados a tempestade severa. Até algumas décadas atrás, o fenômeno era praticamente desconhecido no Brasil pela população, embora houvesse publicações científicas que relatam eventos de forma esporádica. Tornados são frequentemente atribuídos como vendavais nos boletins de ocorrência, à vista disso, são difundidos muitas vezes desse modo pela mídia, dificultando uma maior conscientização do fenômeno, especialmente no passado (Silva Dias, 2011; Hornes, 2022).

Além do potencial destrutivo, os tornados se revelaram de forma muito frequente no sudeste da América do Sul (o que inclui regiões mais austrais do território brasileiro), sendo também um dos locais mais propensos no mundo ao evento. Brooks, Lee e Craven (2003) foram os responsáveis a reconhecer isso internacionalmente a partir dos dados de reanálise aplicados a nível global através do conjuntos de dados da *United States National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) de janeiro de 1948 a julho de 2002 com resolução horizontal de 210 km aproximadamente e resolução operacional em torno de 105 km, embora tivesse menos dados reportados com um relatório de eventos catalogados para serem comparados com o modelo.

Almeida, Hornes e Estivallet (2023) reuniram 581 episódios a nível nacional entre 1975 e 2018 e a região Sul do Brasil respondeu com a maior parte do total de tornados em território brasileiro registrados (411), na sequência veio o Sudeste, notadamente o estado de São Paulo. As evidências em modelagem com os eventos reportados compilados em um banco de dados ressaltam a importância de estudos envolvendo a temática, seja por diferentes ângulos e perspectivas de análise.

Segundo Qiao *et al.* (2020), a detecção de mudanças, capturando as diferenças para duas datas contrastantes (pré-evento e pós-evento) com o aumento no volume de dados e desenvolvimento de técnicas, impacta na velocidade da resposta ao desastre e de recuperação conseguinte. As etapas que alçam esse propósito, são colaboradas com a ampliação ao longo do tempo de dados de sensoriamento remoto, refletindo em mais dados de diferentes resoluções espaciais, temporais e espectrais, em paralelo, mais práticas são desenvolvidas para este fim.

A aplicação de imagens de satélite preenche a lacuna da ausência de dados existente em locais remotos e extensos, serviços públicos danificados no trajeto, a necessidade de deslocamento rápido e transporte, envolvendo recursos humanos em tempo hábil. O imageamento periódico, o acesso quase instantâneo e a cobertura independente da área de interesse são pontos a serem relevados como parte do levantamento de danos de tornado. O mapeamento realizado é de valia para autoridades, seguradoras, avaliadores da tempestade, dentre outros (Myint *et al.*, 2008; Molthan *et al.*, 2014; Wagner *et al.*, 2025).

Dada a relevância do tema, ainda ser relativamente pouco abordado no Brasil e a disponibilização de ferramentas e técnicas de sensoriamento remoto que já são utilizados no exterior e tem obtido sucesso para identificação de rastros de tornados entre eles: Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002), frequentemente citado nas publicações com o tema e Burow, Herrero e Elis (2020) que utilizaram o mesmo *dataset* deste trabalho.

Este trabalho pretende compreender a utilidade de imagens de satélites gratuitas Sentinel-2 com maior resolução espacial e temporal que outras missões de acesso livre, averiguando os procedimentos replicáveis para contribuir para a base de dados de tornados no Brasil. A investigação levou-se em conta que o evento é subnotificado, havendo carência de levantamentos sistemáticos e padronizados. O uso de imagens de satélites gratuitas visa a necessidade de avaliar a aplicabilidade

e limitações técnicas de processamento digital de imagens, como o NDVI, mudança de NDVI e análise de componentes principais.

Como estudo de caso, são abordados dois episódios: o de Sede Nova e demais municípios do noroeste do Rio Grande do Sul ocorrido em 13 de julho de 2023 e o de Água Doce a Tangará em Santa Catarina, registrado em 14 de agosto. Foi delimitado o caminho de tornados, para testar as potencialidades e limitações das técnicas, perpassando pelo seguinte pressuposto “em que medida técnicas de processamento digital de imagens aplicadas a imagens multitemporais Sentinel-2 permitem identificar e delimitar rastros de tornados no Brasil. A delimitação espacial auxilia na tomada de ações pelos gestores e equipes competentes bem como investigações futuras que podem ser desenvolvidas no âmbito das geociências. O uso dessas ferramentas provém dados em um curto espaço de tempo e não são dispendiosas, embora dependa se a escala do fenômeno é compatível com os dados de entrada gratuitos. As geotecnologias de um modo geral e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) podem ser promissoras na análise de tornados no Brasil, verificando interações e relações, especialmente com a superfície terrestre.

Objetivo geral: Avaliar o potencial e limitações do uso de imagens multitemporais MSI/Sentinel-2, por meio de técnicas de processamento digitais de imagens, na identificação e delimitação espacial de rastros de tornados no Brasil.

Objetivos específicos:

- Avaliar a capacidade das técnicas de NDVI, mudança de NDVI e PCA em identificar e delimitar rastros de tornados;
- Comparar o desempenho do NDVI pós-evento, da mudança de NDVI e da análise de componentes principais na identificação do percurso e da largura dos rastros;

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Os procedimentos consistiram inicialmente na seleção de imagens de satélite Copernicus Sentinel-2, missão da Agência Espacial Europeia (ESA) que possui uma constelação de dois satélites gêmeos operando na mesma órbita. O primeiro lançamento foi em 23 de junho de 2015, denominado de Sentinel-2A, depois vieram o Sentinel 2-B lançado em 7 de março de 2017 e o Sentinel 2-C em 5 de setembro de 2024 que substituiu o Sentinel 2-A que estava próximo ao fim da sua vida útil (ESA, 2025; Copernicus, 2025a). Esses dados provenientes de sensoriamento remoto foram aplicados para três métodos escolhidos para análise de assinatura de tornados: o NDVI, Análise de mudança do NDVI e Análise de Componentes Principais (PCA).

As imagens de satélite do Sentinel-2 são produtos com 10 m de resolução espacial no espectro visível e infravermelho, sendo ao todo constituído de 13 bandas espectrais captadas pelo sensor *Multi-Spectral Instrument* (MSI), a imagem tem 12 bits, ou seja, 4095 possibilidades de intensidades de luz distintas, que posteriormente são convertidas em 16 bits. A órbita é heliossíncrona, estando a uma altitude média de 786 km e inclinação de 98,62°, o horário de passagem local ocorre por volta das 10h30 da manhã. Sendo dois satélites, o Sentinel 2-B e o Sentinel 2-C, o tempo de revisita é de 5 dias na maior parte do Centro-Sul do Brasil e a cena possui ao todo 290 km de largura (Copernicus, 2025a; ESA, 2025). Na sequência é mostrado as especificações do sensor MSI do Sentinel-2 (quadro 1):

Quadro 1 - Especificações das bandas espectrais do instrumento MSI a bordo da missão Sentinel-2:

(continua)

Banda	Resolução espacial (m/px)	Comprimento de onda central (nm)	Uso
B01 (aerosol)	60	443	medição de aerossol
B02 (azul)	10	490	identificar tipos de usos do solo
B03 (verde)	10	560	contraste na superfície aquática

(continuação)

B04 (vermelho)	10	665	uso do solo, exceto água
B05, B06, B07 e B8A (borda vermelha)	20	705 (B05), 740 (B06), 783 (B07) e 865 (B8A)	categoriza a vegetação
B08 (infravermelho próximo)	10	842	análise de vegetação
B09 (vapor d'água)	60	945	rastreamento do vapor d'água
B10 (cirrus)	60	1375	identificação de nuvens cirrus
B11 e B12 (infravermelho de onda curta)	20	1611 (B11) e 2190 (B12)	tipos de cobertura vegetal com base na umidade

Fonte: Adaptado de: SENTINEL HUB. **Sentinel-2 Bands**. Disponível em: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>. Acesso em: 22 jul. 2025.; ENGESAT. **Sentinel-2**. Disponível em: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

Para essa pesquisa as imagens utilizadas são do *level L2A*, na qual possui a correção atmosférica aplicada através da reflectância da superfície e o algoritmo *Scene Classification*, que identifica nuvens e sombras por elas geradas, bem como neve. O processo é feito a partir das características de reflectância, operações de bandas espectrais e índices, bem como outros dados relacionados à superfície. Outros algoritmos são utilizados para o cálculo de vapor d'água e aerossol (Copernicus, 2025b).

Depois da delimitação do intervalo temporal, levando em consideração a ausência de nuvens para a área de estudo, a seleção de tornados partiu das ocorrências que possuem maior intensidade, isso se deve por terem a maior probabilidade de que danos e cicatrizes sejam melhor interpretados e visualizados pelos procedimentos utilizados e especificamente do ponto de vista das imagens orbitais, de acordo com a resolução espacial do satélite principalmente. Assim buscou-se no banco de dados de Almeida (2023) e Piotrovski (2025) que tivesse

forçam destrutivas equivalentes a categoria EF2-EF3. A escolha do período se deve pelo início da cobertura global do satélite Sentinel-2 com correção atmosférica (L2A) ter iniciado em 2017 (Sentinel Hub, 2025b). Desse modo, foram utilizados os eventos tornádicos de Água Santa, SC registrado em 14 de agosto de 2020 e Sede Nova, RS ocorrido em 12 de julho de 2023, em ambos os casos, os demais municípios vizinhos tiveram danos registrados, embora tenham sido os mais mencionados pela intensidade e por atingirem as suas respectivas áreas urbanas. A delimitação espacial levou em consideração primeiramente a descrição geográfica das áreas mais afetadas, incluindo mapas com os pontos de danos identificados, vide a publicação de Ribeiro (2023) as áreas mais afetadas/relatadas e posteriormente o mapeamento de danos bem como testes iniciais.

As imagens de satélite do pré-evento e pós-evento foram adquiridas pelo *EO Browser*, catálogo de imagens do *Sentinel Hub*, pertencente ao Planet Labs e disponível em: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Com o *login* do *Sentinel Hub* é possível acessar os produtos das missões Sentinel, Landsat e MODIS, bem como outras imagens provenientes de sensoriamento remoto. O *EO Browser* permite delimitar a área antes de selecioná-la, possui camadas de pré-visualização em cores reais e NDVI por exemplo, e desse modo foi feito o *download* de todas as bandas espectrais em .TIFF, 32-bits float para a área selecionada de cada evento, definida pelo mapeamento de danos encontrados. A solicitação partiu da seleção de cenas com ausência de cobertura de nuvens para o recorte selecionado, sendo que as datas antecedentes e posteriores são as mais próximas de cada um dos eventos.

Para os procedimentos realizados foram utilizados o *software* livre *Qgis* 3.18.3 em que foi calculado o NDVI e operações posteriores e o *Qgis* 3.34.6 para a aplicação de técnicas de detecção de mudança, no caso a análise de principais componentes sendo manipulado pelo complemento PCA4CD 23.2a. Cada um dos métodos foram aplicados em dados provenientes de imagens multiespectrais de alta resolução e são embasados especialmente em Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) que utilizaram os mesmos procedimentos de processamento digital de imagens, bem como de outras produções posteriores, dentre elas, de Burow, Herrero e Ellis (2020) que incluem a imagem pré-tornado no PCA e análise da largura pelo modelo e vórtice de Rankine.

Para o primeiro método escolhido, o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) foi selecionado as bandas 8: infravermelho próximo (B08: *NIR*) e banda 4: vermelho (B04: *red*). Segundo Fiocruz (2024) o NDVI é um índice obtido através de sensoriamento remoto que quantifica e mostra o estado de vegetação, a partir da diferença entre a reflectância do infravermelho próximo e do visível. Matematicamente, o NDVI é definido da seguinte forma a seguir e indicado as bandas correspondentes do satélite Sentinel-2:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} = \frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04)} \quad (1)$$

O índice varia de -1 a 1, sendo baseado na absorção da clorofila durante o processo de fotossíntese na banda do vermelho que normaliza a dispersão da folhagem das plantas que é refletida na banda do infravermelho. Em resumo, a vegetação em bom estado refletirá mais o infravermelho e absorverá mais a luz visível, a cobertura vegetal em maior densidade tende a valores mais próximos de 1, enquanto que valores em torno de 0, significa ausência de plantas verdes (Earth Observatory, 2000; SentinelHub, 2025c), como demonstrado na tabela 1:

Tabela 1 - Faixa de NDVI associado ao uso do solo

USO DO SOLO	NDVI
VEGETAÇÃO DENSA	0,5 - 1,0
GRAMA	0,2 - 0,5
SOLO EXPOSTO	0,1 - 0,2
CORPOS D'ÁGUA	<0

Fonte: FIOCRUZ, 2024.

Depois, foi gerado a análise de mudança de NDVI, procedimento realizado por Yuan, Dickens-Micozzi e Magsis, (2002) e Burow, Herrero e Ellis (2020) em que consiste na imagem pós-evento subtraída da imagem pré-evento, em que o decréscimo de NDVI também expõe uma assinatura de tornado.

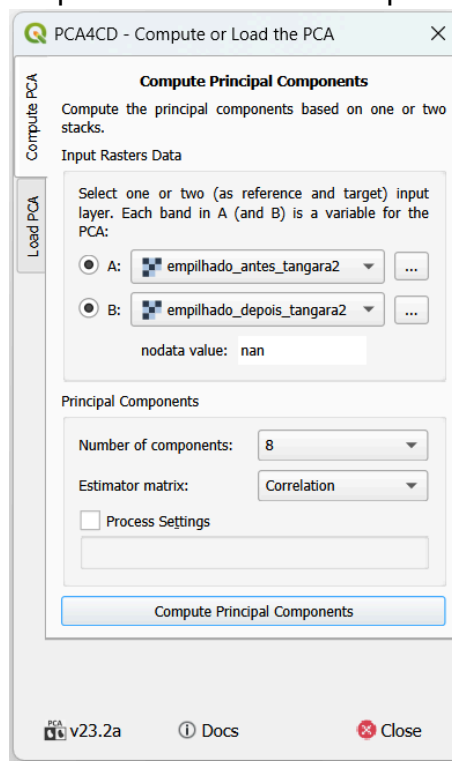
Valores de NDVI pré-tornado e NDVI pós-tornado tiveram seus valores negativos removidos, pois representam superfícies aquáticas, o que diminui o contraste.

O método posterior, foi o PCA que permite realizar a detecção de mudanças de uso do solo através de imagens multitemporais que são empilhadas através de bandas espectrais escolhidas de datas diferentes, por exemplo, antes e pós-evento. O empilhamento é feito para reduzir o tamanho do arquivo, sendo os dados padronizados em matriz de covariância ou de correlação. Os primeiros componentes resultantes indicam a maior variância, por vezes quase sua totalidade (Li; Yeh, 1998).

Para isso, foi feito o empilhamento, isto é, a fusão das bandas espectrais em único arquivo, mantendo desse modo, o máximo de informação espectral possível. Nesse processo foram usadas as bandas 2, 3 e 4, respectivamente, as bandas do azul, verde e vermelho e também foi usada a banda 8, correspondente ao infravermelho próximo, gerando um arquivo de fusão para data pré-evento e pós-evento. Para análise de assinaturas de tornados essas são as bandas normalmente escolhidas, contudo, mais regiões do espectro podem ser utilizadas.

As imagens resultantes foram carregadas no complemento PCA4CD, esse complemento foi desenvolvido por Xavier Corredor Llano, membro do Grupo de Sistemas de Monitoramento Florestal e de Carbono (SMByC) subsidiado pelo Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM) da Colômbia (Llano, 2025). IDEAM (2025) usa o catálogo de imagens de satélites gratuitas disponíveis globalmente: Landsat e Sentinel-2, para o monitoramento de florestas da Colômbia através de análise estática, desse modo, é utilizado o recurso interpretativo das componentes principais. Ao contrário da forma tradicional, o *plugin* tem a premissa de fazer os cálculos de forma paralela, diminuindo o tempo e o uso de memória do computador utilizado, desde que haja memória *RAM* livre, dependente dos parâmetros selecionados. A figura 1 abaixo mostra a tela inicial do complemento PCA4CD, na qual exibe a opção de inserir os dados de entrada e o tipo de matriz escolhida:

Figura 1 - Janela inicial do complemento PCA4CD indicando para inserir os dados de entrada e parâmetros para o cálculo dos componentes principais



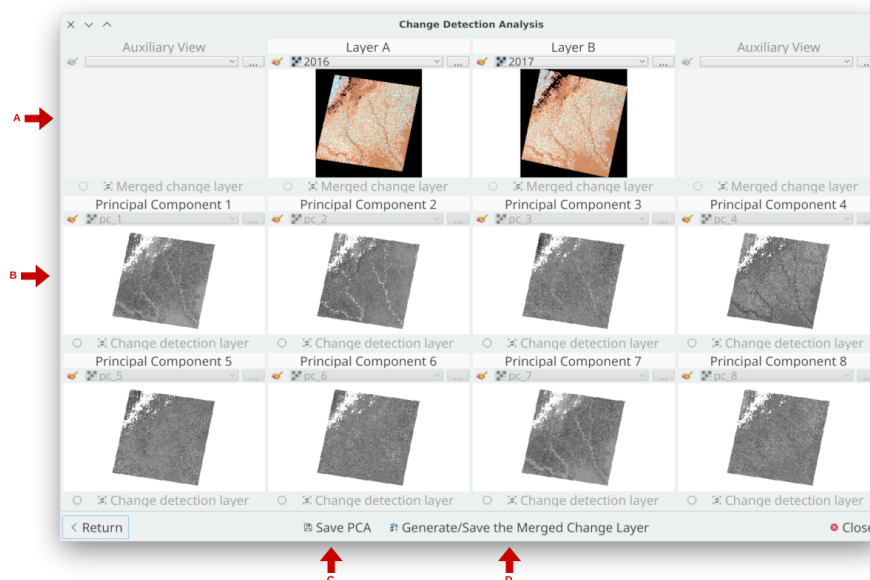
Fonte: PC4AD/SMBByC, 2025.

Os dois arquivos *rasters* gerados do processo de fusão são inseridos em (A) - data antecedente e em (B) data posterior. Ao todo, são gerados 8 componentes, pois a quantidade é proporcional à quantidade de bandas empilhadas em cada um dos *rasters* de entrada. Alguns estudos como um dos mais conhecidos, o de Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) utilizaram apenas a data posterior, outros trabalhos porém, como o de Burow, Herrero e Ellis (2020) utilizaram outra imagem anterior à ocorrência do tornado. Para verificar períodos diferentes é recomendado utilizar a data anterior e posterior. (Llano, 2025)

O PCA foi aplicado em uma matriz de correlação, segundo Singh e Harrison (1985) a correlação não depende das escalas das variáveis, portanto, elas não necessitam de padronização independente para calcular a variância. Llano (2025) recomenda também o uso desse estimador como opção padrão. Levantamentos prévios para o presente trabalho mostraram maior dispersão de dados e maior susceptibilidade a ruídos usando covariância, como observado por Singh e Harrison (1985), além de sugerir uma melhor interpretação visual, todavia, ainda conforme o autor, utiliza-la com as variáveis escalonadas, tem o melhor ajuste do papel de cada

banda espectral na explicação da variância resultante. O resultado gerado é aberto e mostrado automaticamente em uma nova janela como ilustrado na figura 2 a seguir:

Figura 2 - Exemplo de janela aberta automaticamente do complemento PCA4CD após os componentes principais serem calculados



Fonte: PC4AD/SMBYC, 2025.

Com base na ilustração acima e as setas indicativas, em A temos a linha principal em que os dados de entrada são apresentados no centro, sendo que em *Layer A* a data anterior a ocorrência de tornado e em *Layer B* a data posterior ao acontecimento. Em B exibe os componentes calculados, assim como no exemplo acima, como são 8 componentes devido à quantidade de bandas de cada imagem inserida, os componentes principais são divididos em duas linhas. Em C pode ser salvo o resultado do PCA em um único arquivo e em D apenas os componentes onde foram observadas mudanças de uso do solo, a opção *Change detection layer* abre uma nova caixa de diálogo em que áreas de interesse podem ser demarcadas, alteração do intervalo de valores e ajustes através do histograma (Llana, 2025).

A malha municipal utilizada em ambos os eventos tornádicos é a do IBGE, que foi atualizada em 2024, sendo disponibilizada em SIRGAS 2000. Alguns locais de danos usados de referência

3 TEMPESTADES SEVERAS

A Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2024, tradução nossa) define tempestade, sem necessariamente ser severa, como “uma ou mais descargas elétricas repentinas, manifestadas por um clarão de luz (relâmpago) e um som agudo ou estrondoso (trovão)”. Enquanto, a tempestade severa com base no glossário do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (NWS, 2024a) é descrita como “uma tempestade local produzida por uma nuvem cumulonimbus e acompanhada por raios e trovões”. As nuvens de tempestade podem chegar até 20 km de altura e sinalizam a presença de umidade e instabilidade na atmosfera devido ao processo convectivo (Harper; Granger; Hall, 2000).

A definição oficial da NWS e que conta com mais detalhes afirma que a tempestade severa é uma tempestade que gera granizos acima de 1 polegada (25,4 mm) ou que produz ventos maiores de 58 mph (93,3 km/h), sendo capaz de quebrar galhos de árvores, sua estrutura ou mesmo uma árvore inteira. As tempestades podem vir acompanhadas de chuvas intensas, relâmpagos, tornados e inundações (NWS, 2024a). Em Johns e Doswell (1992), valores menos extremos são encontrados, definindo a velocidade do vento ou de rajada para 26 m/s e diâmetro de granizo com 19 mm para ser considerada uma tempestade severa.

As definições destas perturbações podem variar de país, a exemplo do que é demonstrado em Harper, Granger e Hall (2000). Contudo, precipitação elevada em curto prazo, ventos intensos, tornado e granizo são descritos tanto para determinar a tempestade quanto de seus elementos constituintes.

Brooks *et al.* (2019) afirmam que alguns autores preferem convecção úmida profunda ao invés do termo tempestade, esse termo pode ser visto em outras publicações, vide Johns e Doswell (1992) que também utilizam o mesmo tema.

Os primeiros esforços a respeito dos estudos de tempestades severas ocorreram entre o final do século XIX e início do século XX, em 1849 os Estados Unidos tinham um sistema colaborativo de observação do tempo controlado pelas Forças Armadas daquele país. John P. Finley ficou responsável pela previsão de tornados na qual alertas foram emitidos entre 1884 e 1886, até a proibição do termo de tornados, os meteorologistas continuavam com a previsão, mas se referiam a tempestade convectivas locais, isso se deve ao fato que um incidente poderia ser

maior do que um tornado e o caos deixado pela população (Galway, 1989; Brooks *et al.*, 2019).

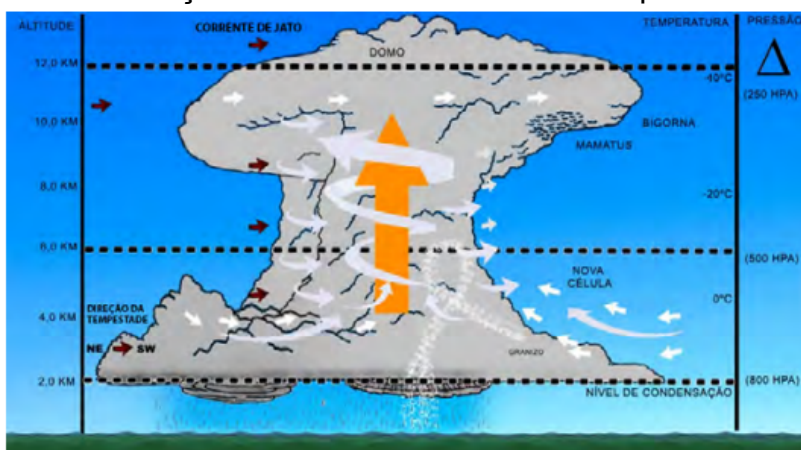
Embora comumente associadas, a precipitação nem sempre acompanha uma tempestade severa, assim como ocorre o inverso, chuvas intensas e granizo, mas não se configura uma tempestade, mesmo se tratando de cumulonimbus. De todo modo, quando se trata de tempestades severas, notadamente estão relacionadas a cumulonimbus (algo como “aglomerado de nuvens de chuva”), uma nuvem densa, verticalizada que vai até próximo à tropopausa e com elevada massa, seu topo se estende horizontalmente com o formato conhecido como bigorna e possui aspecto macio (devido aos seus cristais de gelo), fibroso ou com ranhuras e se estende mais a uma direção devido os ventos da troposfera superior. A bigorna se forma devido a nuvem atingir a tropopausa. A base desse tipo de nuvem pode vir acompanhada de outras nuvens, na qual se situa em diversas ocasiões uma faixa de chuva (Stull, 2017; Met Office, 2023).

As tempestades severas são intimamente ligadas o cisalhamento do vento, definido pela RedeMet (2024) como a variação da direção e velocidade do vento por causas atmosféricas a depender da distância, segundo o Centro Canadense de Furacões - CHC, vinculado ao governo do Canadá (2019) se deve a altitude no caso do cisalhamento vertical. Cisalhamento vertical é responsável por separar movimentos do ar de direções diferentes, fazendo com que a corrente ascendente, devido a inclinação causada, não intercepte a corrente descendente (NWS, 2015a). Outro fator comumente associado a uma tempestade severa é a frente de rajada que é uma linha de ventos de forte intensidade com mudança em sua direção associadas a um aumento de pressão e diminuição da temperatura de 5 a 10°C como resposta ao ar frio que atinge a superfície advindo de uma corrente descendente. A frente de rajada alimenta a tempestade e ajuda na formação de novas tempestades. Isso se deve porque acaba gerando uma frente fria em uma “mini escala”, o ar frio converge com o ar quente gerando mais ascensão do ar, consequentemente novas nuvens cumulus surgirão (SciJinks, 2025; Musk, [200?]).

3.1 FORMAÇÃO DE UMA TEMPESTADE SEVERA

Uma nuvem típica que pode originar uma tempestade é ilustrada a seguir (figura 3), de um lado as correntes ascendentes atuam até formar uma bolha que se espalha na forma de bigorna, observada na parte superior da figura. No flanco direito ocorre precipitação e há a correntes descendentes que por sua vez se espalham no solo podendo ocasionar frentes de rajadas: linhas de vento causadas pelo ar descendente mais frio de rápido deslocamento (Stull, 2017; SciJinks, 2024).

Figura 3 - Ilustração de uma nuvem em uma tempestade madura



Fonte: Brendo Francis Carvalho, 2022.

O serviço meteorológico Met Office (2023) afirma que via de regra, as nuvens cumulonimbus se desenvolvem de cúmulos, porém podem advir de nuvens mais altas (altocumulus) ou mais baixas (stratocumulus). O comportamento da precipitação e o aspecto da nuvem auxiliam na identificação de cumulonimbus. A mesma pode desenvolver diferentes subtipos de nuvens, bem como é acompanhada de vários outros tipos de nuvens como cirros, altostratus, nuvem parede e *mammatus* que compõem a tempestade. A associação de nuvens está atrelada ao fluxo de ar e umidade presente e o desenvolvimento destas células é observado em imagens de satélite. A aparência da bigorna classifica o subtipo de cumulonimbus, a figura 4 mostra a *Cumulonibus capillatus* que seu destaque é a extensão da bigorna e seu caráter estriado (Stull, 2017).

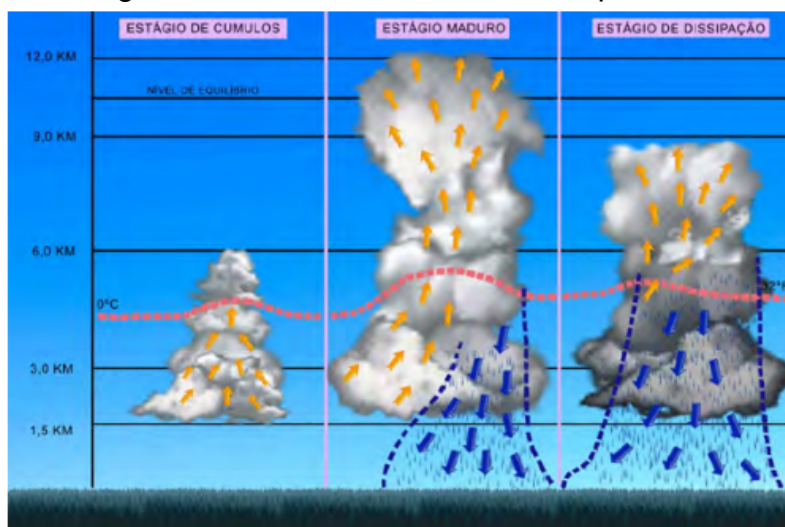
Figura 4 - *Cumulonimbus capillatus* em Berlim, Alemanha



Fonte: Miguel Andrade, 2009.

Segundo o NOAA (2023) quando uma nuvem de tempestade atinge seu estágio elevado, uma cumulus pode chegar até 6 km de altura em média, podendo duplicar ou triplicar a sua altura no estágio maduro, na qual além de manter as correntes ascendentes do estágio anterior, também atuam fortes correntes descendentes. Em um determinado momento, a tempestade não é mais alimentada por ar quente e úmido, deste modo, ela é insustentável, mantendo apenas correntes descendentes, ou seja, alguma chuva não muito intensa com ventos fracos até desaparecer quase completamente, restando apenas o topo com a bigorna característica. A seguir na figura 5 está representado o ciclo de vida de uma tempestade n:

Figura 5 - Ciclo de vida de uma tempestade



Fonte: Brendo Francis Carvalho, 2022.

As tempestades se formam à medida que o ar quente e úmido sobe sobre o ar frio, durante esse processo, a umidade expressa através do vapor d'água se condensa, perdendo a temperatura - levando a um movimento descendente, o que faz o ar se aquecer novamente e inverter o processo (a parcela de ar ascende novamente), formando uma célula de convecção. Dependendo da quantidade de ar e umidade, formará desde uma nuvem até uma tempestade. (SCIED, 2024).

Diversos fatores podem colaborar com o processo convectivo, entre eles o aquecimento solar, as formas derivadas da orografia, frentes e vales. Os raios ilustram a conversão da energia térmica para energia cinética, quando a condensação do ar quente e úmido provocadas por intensas correntes ascendentes separam os dois polos de cargas elétricas na nuvem. (Harper; Granger; Hall, 2000).

McNulty (1995) sustenta que há três ingredientes básicos para a formação de tempestade: a instabilidade convectiva, a umidade, a fonte que propicie a ascendência do ar e a propagação. Para Doswell e Bosart (1993) também a complementa com a necessidade de sustentação superando a inibição convectiva (sem estabilidade não há convecção profunda, sendo necessário energia cinética para ascensão do ar) (AMS, 2020). A inibição convectiva é definida por Toledo (2023, p. 70) como “a quantidade de energia que irá impedir uma parcela de ar ascender, desde o nível da superfície até o nível de convecção livre”. Esse nível é atingido quando a parcela do ar se torna saturada, seja pela evaporação ou o mais provável, através do resfriamento adiabático, em que a pressão é reduzida, mas não há trocas de calor. (Crocker, 2005; Blumenstein, 2013).

A instabilidade convectiva corresponde a variação vertical da temperatura, em que parcelas de ar sofrem uma aceleração ascendente quando atingem um nível de convecção livre (NCL), mensuradas através de índices de instabilidades, entre eles o Índice CAPE — energia potencial convectiva disponível. (McNulty, 1995, p. 190), através dele é possível calcular quanto de energia disponível é necessária para elevar a parcela do ar (Toledo, 2023). Com o ambiente computacional, CAPE é um índice que acompanha as sondagens e previsão (Doswell; Rasmusen, 1994). Doswell e Bosart (1993) afirmam que a presença de ciclone extratropical auxilia também em escalas menores que a escala sinótica na convecção úmida profunda. Este termo é utilizado para dissociar de trovoadas, devido ao termo tempestade causar erroneamente a relação com raios e trovões (Doswell, 2001).

A umidade conforme sua advecção e padrão de gradiente (que podem sofrer alterações em curto prazo), auxilia na previsão de tempestades, podendo indicar seu início e seu desenvolvimento, McNulty (1995) cita algumas publicações como exemplo. Em conjunto com a temperatura, as mudanças na umidade em altura estão ligadas a que tipo de evento pode se desenvolver.

O “motor” capaz de gerar uma tempestade pode ser observado tanto na mesoescala quanto na escala sinótica. Majoritariamente, o movimento de ascendência está presente em eventos de tempestade na escala sinótica, sendo a fonte de subida do ar, complementarmente ocorrendo através de mecanismos de mesoescala, que correspondem à própria dimensão de espaço e tempo das tempestades severas (McNulty, 1995, p. 191). A escala sinótica abriga análises tanto na mesoescala (10-100 km) quanto na microescala e está relacionada com dados meteorológicos mais generalistas, de vários pontos ao mesmo tempo. (Fujita, 1981). Os ambientes urbanos se mostraram muito importantes na alteração da morfologia da tempestade severa com células maiores (acima de 1100 km²) em um maior afastamento da cidade. Além disso, a composição da tempestade sofreu muitas mudanças na estrutura: aumento de tamanho, houve divisão, dissipação ou ainda estava em estágio inicial nas áreas urbanas quando comparado às áreas rurais (Niyogi *et al.*, 2011).

Segundo Harper, Granger e Hall (2000) as tempestades em geral podem durar cerca de uma hora e chegar a uma largura de 10 km, ou seja, em muitas ocasiões são limitadas no tempo e espaço, em outras ocasiões, há tipos de tempestades que a área afetada pode ser muito maior, causando diversos danos. Contudo, uma única nuvem, ou seja, uma tempestade unicelular, pode durar apenas a metade do tempo: apenas 30 minutos, sendo que uma cumulonimbus isolada percorre todo seu estágio em uma hora (Met Office, 2023).

De acordo com o Met Office (2023) o relâmpago nada mais é que o deslocamento dos elétrons que ocasionam faíscas elétricas ao seu redor. O caminho percorrido por esta partícula subatômica de carga negativa é visivelmente conhecido como o raio.

Foss (2011, p. 135) analisando as condições atmosféricas para a formação da tempestade destacou que o padrão sinótico da América do Sul se difere do que é apresentado na literatura para a América do Norte, com o desenvolvimento das

tempestades convectivas locais estão ligadas a presença de cavados invertidos e os cavados de uma frente fria. No continente norte-americano a frente quente pode ser posicionada no continente onde há diferenças de temperaturas que levam a formação de tempestades convectivas locais. Além disso, o autor sugere que o ciclone extratropical interage com a frente fria e o cavado em uma distância menor que na América do Sul.

Alguns eventos decorrentes de uma tempestade são mais propícios a determinados horários de ocorrência, podendo ajudar indiretamente na formulação de planos de redução de impactos. No Paraná o horário e período de maiores tendências das atividades tempestuosas, se evidencia no final do período vespertino e, sobretudo, na primavera. Com base nos eventos reportados pela Defesa Civil entre 2013 e 2017 no Paraná, o predomínio de chuvas intensas se estende da madrugada a manhã enquanto, os demais eventos que se originam de nuvens Cumulonimbus, tem sua predominância de ocorrência no final da tarde e início da noite (Balicki; Andrade; Hornes, 2018, p. 487).

Segundo Balicki, Andrade e Hornes (2018, p. 480) às tempestades severas causam prejuízos sociais e econômicos. Contabilizando de 1980 a 2023, os Estados Unidos tiveram ao todo 455 bilhões de dólares de danos causados por tempestades severas, com mais de 30% das tempestades ocorrendo entre 2018 e 2023 (CISA, 2024).

Bouwer (2011) sugere que o aumento de perdas ocasionadas por tempestade severas convectivas e extremos climáticos se deve a maior exposição a vulnerabilidade por alterações econômicas e demográficas. A mudança climática antropogênica não demonstrou impacto significativo quando a normalização dos dados foi feita, embora alguns eventos tenham sua intensidade alterada devido a variabilidade climática - mudanças decenais e teleconexões climáticas e incertezas relacionadas à quantificação da vulnerabilidade e a exposição ao desastre (Bouwer, 2011; Gensini, 2021).

De acordo com Balicki, Andrade e Hornes (2018, p. 487) a direção do deslocamento das nuvens também permite identificar o evento, partindo das imagens de satélite se obtém as direções predominantes, conforme as massas de ar que atuam e os jatos de alto e baixo nível. Com as nuvens de tornados, por exemplo, indo para os quadrantes nordeste, leste e sudeste preferencialmente,

influenciado pela Massa Tropical Continental (mTc) e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) (Balicki; Andrade; Hornes, 2018). A frente fria formada a partir do encontro da massa de ar Polar e Tropical favorece condições tempestuosas em curto período de tempo na região Sul do Brasil (Scortegagna; Rebolho, 2013), do mesmo modo, os CCMs propiciam um ambiente de instabilidade que pode desencadear tornados e atuam principalmente na região Sul também (Silva Dias, 1996).

Estudos existem para estabelecer parâmetros e correlações, a fim de compreender a formação de uma tempestade. Brooks (2013) em suas observações de dados simulados a partir de modelos climáticos indica em certo ponto, uma correlação válida da energia termodinâmica para tempestades (CAPE ou WMAX - velocidade vertical máxima) e de cisalhamento (com destaque ao SHR6 - helicidade relativa à tempestade), podendo distinguir se de fato corresponde a uma tempestade severa, sendo o segundo mais importante para a formação de tornados e granizos.

Existem alguns desafios na previsão da tempestade convectiva severa pelo fato de os processos atmosféricos levarem a diferentes cenários, o dilema em relação à compreensão desses processos e equívocos na rede de observação, desafiados pela escala de espaço e de tempo. Apesar dos avanços da informática no último milênio, o diagnóstico é importante para eventos derivados destas tempestades (Corfidi, 2017).

Alguns países como o Canada (2005), emitem alerta antes mesmo da formação de uma tempestade severa, quando as observações feitas indicam a formação propícia de uma tempestade. Assim como avisos são emitidos quando tornados são identificados.

Nos EUA, um *Tornado Watch* bem como um *Thunderstorm Watch*, alertas de cautela são emitidos por 4-8 horas, para indicar a possível formação do evento e de uma tempestade em municípios e áreas costeiras, sendo responsabilidade do *Storm Prediction Center*. Quando avistado no radar, é necessária uma tomada de ação para a população próxima, por isto ao invés de *Tornado Watching* passa-se a ser emitido alerta *Tornado Warning*, pois o tornado foi detectado no radar WSR-88D. A detecção é obtida através da velocidade de vento e diâmetro de granizo, que por sua vez é a definição oficial de tempestade utilizado pelas agências estadunidenses.

No entanto, um tornado pode se desenvolver sem nenhum indício no radar (NWS, 2024a).

A proteção durante o decorrer de uma tempestade severa, consiste em localizar um local seguro, resistente e afastado do contato com ambiente externo (objetos podem ser arremessados), como um porão ou se não for o caso, abaixo de um móvel da residência, organizando-se com os demais membros da família. Outras medidas com pilhas extras para rádios portáteis, medicamentos, ponto de encontros de familiares e conhecidos bem como a poda de árvores são úteis para o preparo antes da emergência (Canada, 2005).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES

Se considerar o local de ascendência do ar, ao invés da célula que originou, temos a classificação da tempestade pela circunstância que motivou a subida do ar, seja pela orografia, a instabilidade das massas de ar ou dos limites das frentes, fazendo o ar se deslocar (SCIED, 2024).

O Centro de Educação Científica (SCIED, 2024) descreve que uma tempestade pode se originar de uma ou mais células de convecção. São elas:

- Tempestades unicelulares: correspondem às tempestades comuns, formadas por uma célula única de cumulonimbus com cerca de 12 km de desenvolvimento, podendo atingir e ultrapassar os 20 km nos trópicos (INPE, 2025). Possuem tamanho pequeno, curta duração, apresentando normalmente raios e chuvas, por vezes granizos.
- Tempestades multicelulares: é uma tempestade originada de um aglomerado de células, o que as diferem são os estágios delas. Linhas de instabilidade podem ser observadas por centenas de quilômetros, em casos que o ar quente se eleva sobre o ar frio numa frente quente ou frente fria. Outra característica é rajada de ventos fortes antes da atuação da tempestade.
- Tempestades de supercélulas: tipo de célula com maior destruição e poder formar tornados mais perigosos e granizos de dimensões consideráveis, seja pela intensidade da tempestade e pela sua duração comparada com as tempestades anteriores. Tem como característica

ventos ascendentes — o ar sobe com muita velocidade, de forma rápida e com movimentos de rotação. Em altura, as nuvens podem chegar até 18 km.

3.2.1 Tempestade de multicélulas

Segundo Stull (2017) uma tempestade multicelular pode se formar a partir de um sistema convectivo de mesoescala, na qual as tempestades se dispõem lateralmente com relativa curta extensão em uma ordem de centenas de quilômetros. O conjunto de bigornas em geral, se tornam nuvens estratiformes, com cerca de 30% de precipitação. Dos trópicos a latitudes médias uma quantidade considerável de precipitação vem desse sistema gerando um acumulado em longas extensões, bem como tempo severo e inundações. A forma linear não é onipresente em todos os sistemas convectivos de mesoescala (Houze Jr., 2018).

As células individualmente têm estágios de maturidade distintos, sendo que novas células do grupo atingirão o seu ápice. Portanto, se mantém por um tempo maior em atividade, isso significa uma frente de rajada mais intensa, sendo circundada por novas correntes ascendentes que a convergência significativa propicia. Na classificação por quantidade de células, a tempestade multicelular é de intensidade intermediária, pois a quantidade de umidade usada para correntes ascendentes atenua sua força (Gibbs; Xue, 2015). A NWS (2019) afirma que a manutenção das correntes ascendentes, importantes para o seu potencial em eventos severos, se deve às frentes, limites de massas de ar de diferentes características e áreas elevadas. Esses fatores permitem a convergência do ar a níveis de pressão mais baixos. Em seus estágios iniciais, a célula se desenvolve contra o vento dos níveis médio e superior e um pouco antes de se dissipar, a favor do vento.

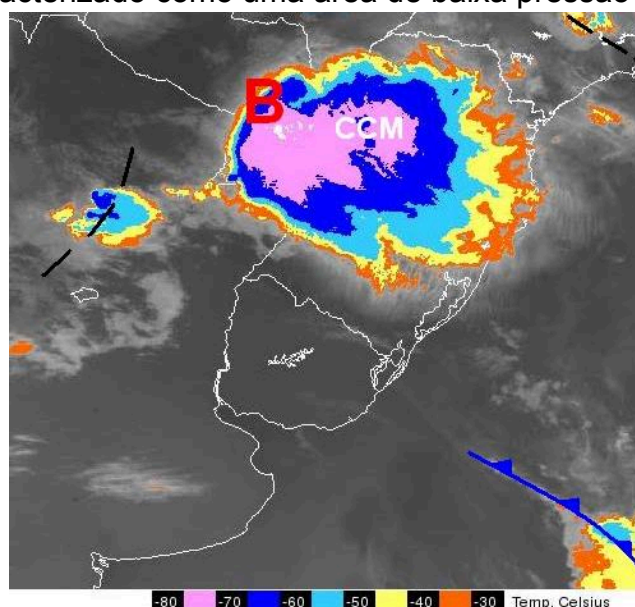
Segundo Ferreira *et al.* (2015) o sistema de aglomerado de nuvens de uma tempestade multicelular pode ser subdividido em um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) e linhas de instabilidade.

Maddox (1980) define um CCM como uma área de 100000 km² com uma temperatura do infravermelho na imagem de satélite inferior ou igual a -32 °C (topo da nuvem: escudo de máxima extensão), com o interior da nuvem chegando a limiar

de $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ para uma área de 50000 km^2 , por um período de pelo menos 6 horas e a razão dos eixos (excentricidade) maior ou igual a 0,7. Valores que não satisfazem o limiar de temperatura representam o seu término. As sequências de imagens provêm do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES).

Tipicamente a CCM tem um formato arredondado como demonstra a figura 6 a seguir. Na faixa subtropical do continente sul-americano a CCM tem origem próximo aos vales do rio Paraná e Paraguai e a leste do Andes a alguns graus abaixo do Trópico de Capricórnio em média, sua trajetória é variável sazonalmente, mas normalmente parte dos quadrantes oeste e sul (Silva Dias, 1996).

Figura 6 - CCM no sul do Brasil, neste exemplo a origem do sistema advém do Chaco argentino, caracterizado como uma área de baixa pressão e com cavado



Fonte: CPTEC/INPE, 2012.

Velasco e Fritsch (1987) analisando 78 CCMs¹ em latitude média da América no Sul entre novembro-abril de 1981-1982 e de 1982-1983, concluíram que embora possuam desenvolvimento mais tardio e duração maior na América do Sul, não se observa características muito distintas dos Estados Unidos, o que difere mais nos escudos de nuvens, é o tamanho, que são 60% maiores no continente sul-americano. A origem do complexo também corresponde a cerca de 30% da porção leste de altas elevações andinas. Uma característica notória ainda de acordo com os autores, são os tamanhos maiores dos CCMs da América do Sul,

¹ Os autores utilizaram valores de temperatura do infravermelho um pouco diferentes do que é definido por Maddox (1980).

comparado ao dos EUA, mas considerando também que houve modificações no sistema de classificação desenvolvido por Maddox em 1980.

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala também podem se apresentar na forma de linha, daí o nome “linha de instabilidade”. As linhas de instabilidade são estruturas lineares de convecção com nuvens em formato de cone, em seu interior pode ser encontrado eco de arco (*bow echo*), um segmento da tempestade que possui um formato arqueado ou curvado, com um “C” invertido (figura 7). Estas linhas podem chegar a 1000 km de comprimento, estando a algumas centenas de quilômetros da dianteira de uma frente fria e no setor quente de um ciclone extratropical. Rajadas de vento que causam danos lineares na superfície são observadas nesta tempestade interna do sistema, seu comportamento está relacionado com as correntes descendentes, por isso a expansão do vento quando atinge menores altitudes. A maior parte dos danos nas estruturas que não são de tornados surgem a partir do eco de arco. Tornados menos intensos podem ser encontrados em associação a linhas de instabilidade e ecos de arco, normalmente vistos na dianteira de uma tempestade com precipitação e baixa visibilidade (NWS, 2015b, 2019; METSUL, 2024).

Figura 7- Exemplo de *bow echo* (eco de arco)



Fonte: Theweatherprediction.com, [200-].

O Serviço Meteorológico dos Estados Unidos (2019) descrevendo sobre as linhas de instabilidade, distinguem o movimento individual de cada célula na qual, tendem a se deslocar a nordeste e o grupo celular que tende a se mover a leste que na verdade, é a união de tempestades individuais que mantém uma frente de rajada

coesa e de deslocamento rápido. Outros autores, como é o caso de Gibbs e Xue (2015), acrescentam a instabilidade condicional moderada a forte (é instável a deslocamentos verticais) e cisalhamento vertical moderado ou de menor intensidade pois são capazes de gerar nova convecção, devido a interação da frente de rajada com a corrente ascendente e ao contato ao núcleo da tempestade.

3.2.2 TEMPESTADES DE SUPERCÉLULAS

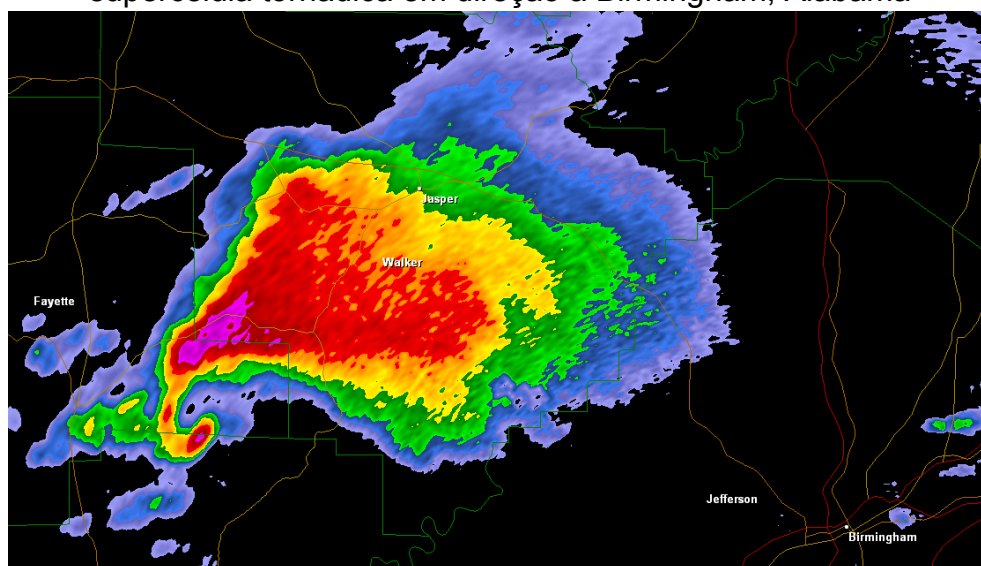
Tempestades supercelulares tem como característica um mesociclone de elevada profundidade e longa duração. Para o seu desenvolvimento, há a dependência do cisalhamento vertical do vento e por isto, são menos frequentes em ambientes tropicais, mas ainda sim são observados (Dahl, 2006; Doswell; Brooks, 1993;. De acordo com Bluestein (2013) a tempestade supercelular possui certas características que a distingue da tempestade multicelular entre elas: o tempo de vida maior, o cisalhamento vertical típico e a corrente ascendente, ainda que possua características de funcionamento e movimento similares.

Vórtices convectivos mais significativos são produzidos nesse tipo de tempestade, sendo importantes para compreender porque um evento de tornado é diferente do outro. Uma tempestade de supercélula não está necessariamente dependente de precipitação intensa e está relacionada a uma linha seca. Por outro lado, as tempestades de alta precipitação, que são as mais comuns, características de ambientes úmidos, são conhecidas por um “gancho” visível no radar, que denota alta refletividade nas imagens, destacando seu padrão de circulação (Doswell; Burgess, 1993).

Além dos dois tipos, com base nos Estados Unidos, há uma terceira forma desse tipo de tempestade: a “supercélula clássica” que é definida como de precipitação moderada e a refletividade é maior fora do gancho visível. Tornados de maior repercussão são observados, mas é pouco comum observar inundações repentinas nestas supercélulas padrão (Doswell; Burgess, 1993). Há exceções, em o que é observado a olho nu pode não ser o mesmo do radar em termos estruturais, por exemplo a supercélula com eco, as dificuldades de conseguir características da supercélula pela refletividade do radar se deve às variações de precipitação, tanto na variação espacial quanto a de quantidade, podendo haver também a

sobreposição de outras células de outras tempestades. Tempestades não supercelulares são mais dependentes da distância e da resolução do radar (Doswell; Burgess, 1993). Dahl (2006) menciona alguns estudos em que a rotação em baixos níveis é decorrente da vorticidade do lado da corrente descendente. Uma tempestade supercelular pode em algumas ocasiões apresentar uma assinatura de radar conhecida como *hook echo* (eco de gancho), possuindo uma aparência de “gancho” ou “vírgula”. Normalmente, é observada na porção final da estrutura celular e em muitos casos, indica a presença de precipitação em torno do mesociclone, apresentado o formato característico e a propensão a formação de tornados (figura 8):

Figura 8 - *Hook echo* (eco de gancho) em uma imagem de radar, indicando uma supercélula tornádica em direção a Birmingham, Alabama



Fonte: Ustornadoes.com, 2013.

De acordo com Harper, Granger e Hall (2000) a capacidade de manutenção das correntes ascendentes e sua intensidade é o que torna a supercélula muitas vezes severa. Ao contrário de outras tempestades na qual, as correntes descendentes causam perdas de energia. Esta distinção de áreas de correntes ascendentes e descendentes na supercélula se deve ao cisalhamento de vento, que determinam porções da célula que potencialmente ocasiona granizos e tornados (flanco traseiro esquerdo).

4 TORNADOS

A definição do glossário da Sociedade Meteorológica Americana (AMS, 2024, tradução nossa) frequentemente utilizada conceitua um tornado como:

Uma coluna de ar em rápida rotação que se estende verticalmente da superfície até a base de uma nuvem cumuliforme, frequentemente com detritos/poeira circulando próximo à superfície quando sobre terra ou pulverizados quando sobre a água. Embora sua presença não seja obrigatória, uma nuvem em funil é frequentemente visível e pode se estender parcial ou totalmente da base da nuvem até o solo.

A nuvem funil nem sempre é visível, em alguns casos até é possível observá-las, mas em um ângulo de visualização restrito, um dos motivos é a pressão não ser baixa o suficiente ou o ar está seco (Bluestein, 2013). O centro de um tornado possui um núcleo de baixa pressão em que as diferenças de pressão atraem o ar para a rotação, mas que com isso gera uma força centrífuga onde o ar é lançado para fora novamente. Estes dois processos se mantêm até que o atrito com a superfície e o contato com objetos desequilibrem as forças, até o seu total desaparecimento (Silva Dias, 2007). Houser *et al.* (2018) analisando imagens de radar próximo a superfície (menor que 20 m AGL e ângulo de elevação de 0°) de 5 eventos de tornados, os autores indicaram que a rotação dos ventos ocorreu próximo à superfície. Esta constatação difere do que é amplamente aceito de que a formação de tornados ocorre primeiramente próximo à nuvem (Kornei, 2018). A figura 9 mostra um tornado F5 em Manitoba, Canadá, intensidade até então nunca documentada no Brasil onde é possível nesse caso observar o funil típico.

Figura 9 - Tornado F5 nos arredores de Elie, Manitoba no Canadá em 22 de junho de 2007



Fonte: Justin Hobson, 2007.

Ernest Agee (2014) revisitando as diferentes definições ao longo do tempo definidos pelo glossário da AMS, alega que alguns momentos na descrição do termo tornado, como a de 2000 inclui os gustnados, mas devido a dependência com o contato com a nuvem cumuliforme, esses redemoinhos do vento foram excluídos da terminologia por estarem mais diretamente atrelados ao cisalhamento do vento. Para o pesquisador, um vórtice forma um tornado, a partir do cisalhamento do vento e da flutuabilidade que promove uma corrente ascendente em nuvens típicas de tempestade. O contato com a nuvem mãe é o que diferencia tornados e trombas d'água de redemoinhos (Fujita, 1973).

Em francês, alemão, espanhol e italiano é utilizado apenas o termo tromba. A palavra tornado tem origem espanhola, sendo uma das hipóteses, uma variante do termo *tornada* (trovoada), também é mencionada como tradução de tempestade, aplicada neste caso, a tempestades no Atlântico Tropical. O termo que se escreve do mesmo modo em língua inglesa e em português, teria surgido a partir de 1620 e em meados do século XIX teria sido usado para descrever o fenômeno no epicentro de ocorrências em território norte-americano (Fujita, 1973; Hornes, 2022, p. 90; Etymonline, 2025).

Tornado é um evento que causa grande agitação pública quando mencionado, além dele há outros eventos que em certos casos causam destruição como o redemoinho de poeira, os filipinos usam o termo “ipo ipo” para se referir a qualquer coluna de ar giratória ao mesmo tempo que os japoneses usam “tsuij-kaze” mas apenas para redemoinhos mais destrutivos (Fujita, 1973). No Brasil há vários termos, muitos deles associados à cultura popular como saci (figura que se apresenta no olho da coluna do ar), vento de poeira, pé-de-vento e tormenta. Alguns outros termos se confundem com outras definições utilizadas para descrever outros fenômenos como ventania, furacão, ciclone, cyclone, tufão e vendaval, um dos motivos para imprecisão dos registros históricos de tornados. A expressão vento sul usada no litoral sul de São Paulo também tem relação com a passagem de frentes frias, o mesmo vale para o termo noroeste que se refere a ventos continentais dessa direção, nesses casos, a terminologia usada indica as mudanças nas condições do tempo. (Barbosa-Doiron, 2010; Hornes *et al.*, 2022).

Ao contrário da precipitação, mesmo que seja intensa, pode não ser considerada tempo severo nos Estados Unidos, enquanto que um tornado por si só

é um evento severo, embora a maior parte seja F0 ou F1 na Escala Fujita original (Doswell, 2001).

Uma pesquisa recente, realizada por Strader *et al.* (2024) revela uma tendência de diminuição das ocorrências do fenômeno nas planícies do sul dos Estados Unidos desde a década de 1980, devido ao aumento da inibição convectiva. Paralelamente, o risco e a exposição da região Centro-Sul ao evento superam as alterações na tendência espacial dos tornados. Essa constatação se deve ao aumento no potencial de formar uma corrente ascendente rotativa, a helicidade vertical - termo definido pela NWS (2015) e também da instabilidade.

O caminho do tornado é estreito e o redemoinho de vento se dispõe de forma convergente, o oposto de um *downburst* (Fujita, 1981), além de ter um barulho característico (Fujita, 1973). Conforme Fujita (1985), árvores caídas costumam apresentar danos em espiral. Uma rajada descendente (micro e macroexplosões, dentre eles, o *downburst*) causa avarias semelhantes, vide um surto tornádico investigado pelo autor que varreu a Virgínia Ocidental em 3 de abril de 1974, embora os danos causados por explosões fosse uma minoria, com torções e árvores arrancadas que o autor definiu como padrão estelar (Fujita, 1985, p.1). No geral, os danos causados por rajadas são observados em única direção (Silva Dias, 2007). Na mesma investigação, Theodor Fujita (1985) acredita que os dois eventos possam estar relacionados em tempestades supercelulares e com assinaturas do tipo *bow echo* no radar Doppler. Danos de tornados podem atingir áreas tão pequenas como 1,5 x 2,7 metros (Fujita, 1973), o que não diminui a sua importância, pois há danos confirmados nessas áreas.

De acordo com Bluestein (2013) os danos são mais expressivos a favor do vento, nas estruturas mais altas. A velocidade do vento pode variar de 72 a 504 km/h, não havendo uma velocidade mínima para a formação do redemoinho. Um tornado possui em média 10 m de diâmetro, geralmente variando de poucos metros a 2 km de espessura, esse valor costuma ser proporcional a intensidade do tornado (Brooks, 2003). A duração em média de um tornado é de 20 minutos, portanto, o que torna o fenômeno nocivo em muitos casos, não é a extensão ou o tempo de vida do redemoinho, mas sim, os danos que trazem consigo (Silva Dias, 2011).

O percurso de um tornado pode ser de menos de 1 km e passar de 40 km em eventos EF4 nos Estados Unidos (Brooks, 2003), esses valores são condizentes

também com Maddox (1976) em que a atuação tornádica normalmente é de centenas de metros a alguns quilômetros, podendo passar de 20 km. Em geral, os tornados ocorrem na ordem escalar que Fujita (1985) denomina como misometeorologia, dependente da observação no radar e alertas meteorológicos. Também é comumente menor que o mesociclone quando presente (Bluestein, 2013) e que de acordo com Fujita (1985) acompanhando de um sistema atmosférico que pode ir de 4 a 400 km. A dinâmica na atmosfera que envolve o fenômeno é muito mais abrangente, sendo que os movimentos na escala sinótica acontecem na ordem de 200 km (mesoescala), nesse nível de observação o mais importante é a convecção, probabilisticamente não é comum, considerando que as atuações de pequena intensidade são predominantes (Maddox, 1976)

Uma equipe do NOAA/NWS *Storm Prediction Center* em Norman, Oklahoma afirmaram que a largura máxima de um tornado demonstrou ter maior correspondência do que utilizar a largura média do trajeto do tornado, tendo como referência a base de dados oficial de tornados entre 1950-2005 em território estadunidense. A largura máxima também parece convergir mais com tornados violentos na área urbana e arredores do que na área rural na Escala F, abordada na sequência (McCarthy; Schaefer; Edwards, [200-]).

Mais pesquisas são necessárias para melhor compreensão da origem dos tornados, especialmente no interior da escala da tempestade, como sugere SPC NOAA (2024a), ressaltando que embora se conheça o ambiente favorável para o fenômeno, não é sempre que gerarão tornados, ainda que sob essas condições haja maior probabilidade. Pesquisas do VORTEX indicam mudanças na temperatura da borda da corrente descendente que abriga o mesociclone, contudo tanto em modelagem numérica quanto a alguns tornados destrutivos observados, isso não é necessariamente uma regra. Durante um tornado, a ascensão do ar gera a impressão que o tornado está se estendendo até a superfície, mas isso deve a condensação do vapor d'água mais próximo à superfície.

Como visto anteriormente, a disponibilidade de umidade, instabilidade convectiva, cisalhamento vertical do vento e movimento ascendente são os elementos que originam a convecção severa profunda, ou seja, que desencadeiam tornados. Evidenciado por temperaturas mais baixas em níveis médios (5 km de altitude), em alturas um pouco menores uma baixa umidade na média e alta

troposfera (acima de 3 km) e nas camadas mais próximas da superfície maiores teores de umidade (Marcelino; Nascimento, Ferreira, 2007). Através do raciocínio de Doswell e Bosart (2001) as tempestades convectivas deriva de um acúmulo em baixos níveis de calor latente e calor sensível maior que o transporte convectivos, especialmente, mas não apenas vindos de movimentos verticais, pois o vento também modifica espacialmente em maiores altitudes da atmosfera. O excesso de calor pode ser liberado em uma região diferente de onde entrou na atmosfera.

Tornados são catalogados sistematicamente desde 1916, tornados com velocidades de vento menores, como vistos anteriormente, por vezes podem ser confundidos com ventos em linha reta e rajadas descendentes: frequentemente referido como *downburst*, microexplosão e macroexplosão quando apenas analisados em campo (Fujita, 1981). Para Doswell e Brooks (1993) os danos são causados pela rotação que são pelo menos, duas a três vezes proporcionais em escala feita para medir os danos.

Thompson *et al.* (2003) observou que a sondagem de tempestades severas e tornados datam da década de 1940 e também da década de 1950: Showalter e Fulks (1943), Fawbush e Miller (1954) e Beebe (1955, 1958), esses autores procuravam fazer a caracterização ambiental da tempestade, portanto dos processos energéticos e de movimento. Através destas sondagens de tornados próximos, se extrai uma parametrização média dos eventos selecionados (Maddox, 1975).

Há algumas formas de se classificar os tornados, uma delas, utilizada por Corfidi (2017) é através da origem, dividindo-as em tornados de supercélula associados ou não a um mesociclone e os que não advém de supercélulas, notadamente de menor intensidade e menores perdas.

De acordo com Johns e Doswell (1992) os tornados que provém de supercélulas são mais compreendidos cientificamente, seja através da observação e também por meio de modelos numéricos. Tornados supercelulares são também os mais mortais e são associados a uma maior severidade de danos, sendo classificados entre F2 e F5 na Escala Fujita. Porém, 20% das supercélulas originam tornados: o desafio se situa em definir quais condições o fenômeno pode ser originado de tempestade vinculados a um mesociclone, distinguindo as características da tempestade (NSSL, 2024a). Para Stull (2017) tornados de elevada

intensidade que advém de supercélula pode ter origem de uma nuvem parede, localizado na base da célula

Alguns tornados podem apresentar dois ou mais vórtices. Testes laboratoriais em conjunto com modelos laboratoriais e numéricos foram conduzidos por Wurman (2002), os tornados múltiplos vórtices como são conhecidos, partem da premissa que o vórtice se dividirá em várias estruturas de rotação, corroboradas com a observação e as características de danos. Fujita (1981) afirma que vários vórtices de sucção diminuem a estimativa da velocidade do vento. Embora existam radares de ultra alta resolução, não é possível via de regra, realizar análises na escala do vórtice (Wurman, 2002).

Em uma mesma ocasião, pode ocorrer vários tornados, Maddox (1976) determina que um surto tornádico é uma data em que 20 ou mais tornados foram registrados a um raio de 370 km de distância. Sem tal evento, é considerado apenas tempestade severa. Pautz (1969) *apud* Ówik *et al.* (2021) por outro lado, divide em categorias, 20 ou mais tornados nesse caso, representa um “surto grande” de tornados, enquanto que, um “surto pequeno” é definido de 6 a 11 ocorrências e de 11 a 20 tornados é definido como um “surto moderado”.

4.1 ESCALA F E A ESCALA EF

Tetsuya Fujita esboçou a primeira vez o que ficou conhecido como a escala F em 1971. A formulação da escala teve o seu ponto de partida a partir de tornados que ocorreram no mesmo ano nos Estados Unidos. Posteriormente, em 1972 o pesquisador classificou eventos japoneses (conhecidos como *tatsumakis*, terminologia que também abrange trombas d'água), na qual a diferença com os tornados estadunidenses reportados estava apenas na intensidade máxima dos eventos levantados.

Allen D. Pearson, diretor do Serviço nacional de Meteorologia dos Estados Unidos, além de assumir a coautoria no sistema de classificação de tornados de Fujita, foi o responsável por repassar a metodologia para ser aplicada nos diversos escritórios da NWS. Em 1973 os Estados Unidos continentais a partir de alguns registros de tornados existentes, avaliou a possibilidade de aplicar a escala F de tornados. A partir de então, em 7 anos mais de 26000 tornados foram analisados, contendo o comprimento do caminho, coordenadas de pontos de toque, localização,

número de mortos e de feridos, data e horário do acontecimento (Fujita *et al.*, 1972; Fujita, 1981; McCarthy; Schaefer; Edwards, [200-]).

Em um primeiro momento, a escala era denominada de Escala de tornados Fujita-Pearson (FPP) e continha a velocidade do vento, comprimento e largura do rastro. O comprimento e a largura do tornado eram delimitados através do reconhecimento das áreas em que o tornado tocou a superfície - determinação da área de danos, no caso de tornados em família, os mesmos eram tratados individualmente. Para um melhor aproveitamento estatístico, a escala foi desenvolvida com o intuito que não fosse muito complexa, permitindo uma análise mais abrangente (Fujita, 1973, p.58). Embora haja problemas na escala original, por exemplo a mesma consegue dimensionar a faixa de danos, conforme algumas aferições da velocidade de vento feitas a alguns metros acima do solo com o radar Doppler-On-Wheels. Com o tempo a largura e o comprimento foram deixados de ser adotados pois havia um problema estatístico para dimensionar os tornados de intensidades muito distintas, nesse interstício foi adotado a nomenclatura mais conhecida: escala F (Fujita, 1973; McCarthy; Schaefer; Edwards, [200-]).

A escala F indica a velocidade máxima do vento e determina sua intensidade graduado através escala de Beaufort. essa escala por sua vez estima velocidade do vento pela força de furacões que usa como referência o número de Mach. O número Mach é uma medida para correlacionar ventos próximos à barreira do som que utiliza uma função ajustada para altura do vento que causaria algum dano estrutural ou na vegetação, a escala F se liga ao limite superior da escala de Beaufort e ao limite superior da escala de Match (Fujita, 1971, 1973; McCarthy; Schaefer; Edwards, [200-]). Portanto, através de uma escala de ventos conhecidas, se atribui um intervalo de valores (categorias) tendo como referência a barreira do som.

Com os dados do Centro de Previsão de Tempestade (SPC) fica claro, a subnotificação de tornados F0, especialmente entre 1950-1970 nos Estados Unidos, pois menos danos reflete em quantidade menor de dados reportados (Fujita, 1973; McCarthy; Schaefer; Edwards, [200-]). De acordo com Fujita (1971) a ideia da faixa de danos é que sejam distinguíveis, acima da escala 12 não seriam expressivos e ainda conforme o autor, o menor tempo para estimar a velocidade do vento é feito *in*

loco. No mundo como um todo, boa parte das ocorrências de tornados são F3 ou menos.

Embora amplamente utilizada pelos escritórios e agências estadunidenses, surgiram algumas objeções a respeito da velocidade real do vento, isso porque os danos estavam indicando um vento mais violento do que as estruturas realmente suportam, a intenção foi reformular os indicadores de danos, deixando-os mais correlacionados e claros. Propondo melhorias, McDonald e Mehta (2004) em conjunto com um corpo de colaboradores sugeriram a Escala Fujita Melhorada, como se observa na proposta, são solicitados indicadores de danos adicionais dependente do grau de dano.

Desde 2007 o NWS utiliza a Escala Fujita Melhorada (Escala EF) que classifica a força de um tornado e consequentemente a maior velocidade do vento conforme os indicadores de danos: uma lista descritiva de 28 tipos de danos sendo nivelada pelo avaliador através do graus de danos, determinando a velocidade (uma rajada de 3 segundos) dentro dos limites da faixa observada pelo quanto a estrutura conforme a constituição e o tamanho das mesmas, foi danificada, isso foi o diferencial em relação a escala F original e é aplicada para cada estrutura. A categoria de um evento tornádico não foi alterada, mas suas estimativas de velocidade de vento estão em uma faixa um pouco diferente da escala original (NWS, 2015c, 2024b). O quadro 2 abaixo exhibe a classificação atualmente empregada, com a estimativa máxima do vento (rajada de 3 segundos) e os danos classificados:

Quadro 2 - Escala EF com a faixa de velocidade do vento estimada e os danos causados

(continua)

Categoria	Velocidade estimada em 3 s (km/h)	Danos	Exemplos
0	105-137	Leve	Telha removida, galho quebrado
1	138-178	Moderado	Telhado danificado, vidros quebrados
2	179-218	Considerável	danos a árvores maiores e telhados

(continuação)

3	219-266	Severo	objetos maiores levantados, edifícios danificados
5	>322	Inacreditável	destruição significativa de grandes estruturas

Fonte: Adaptado de SPC. NOAA. **Enhanced F Scale for Tornado Damage**. Disponível em: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-scale.html>. Acesso em: 9 mai. 2025. LAYDEN, M. **Here's how a tornado's strength is measured**. WSMV 4, 2024. Disponível em: <https://www.wsmv.com/2024/05/10/heres-how-tornados-strength-is-measured/>. Acesso em: 9 mai. 2025.; BEDDOES, B. **The EF Scale: What is it?** WHSV 3, 2022. Disponível em: <https://www.wHSV.com/2022/05/11/ef-scale-what-is-it/>. Acesso em: 9 mai. 2025.

A figura 10 ilustra alguns dos danos mencionados acima em áreas residenciais, como danos em algumas telhas (EF0), parte considerável do telhado danificado e vidros quebrados (EF1), árvore de médio porte caída e perda completa do telhado (EF2), danos na estrutura da casa, grande parte destruída (EF3), uma residência transformada completamente em detritos que possivelmente também envolve os objetos dos arredores (EF4) e uma casa em que restou apenas a fundação (EF5).

Figura 10 - Exemplo de diferentes categorias de danos (em escala EF) em residências de um evento tornádico em Greensburg, Kansas, Estados Unidos em 4 de maio de 2007



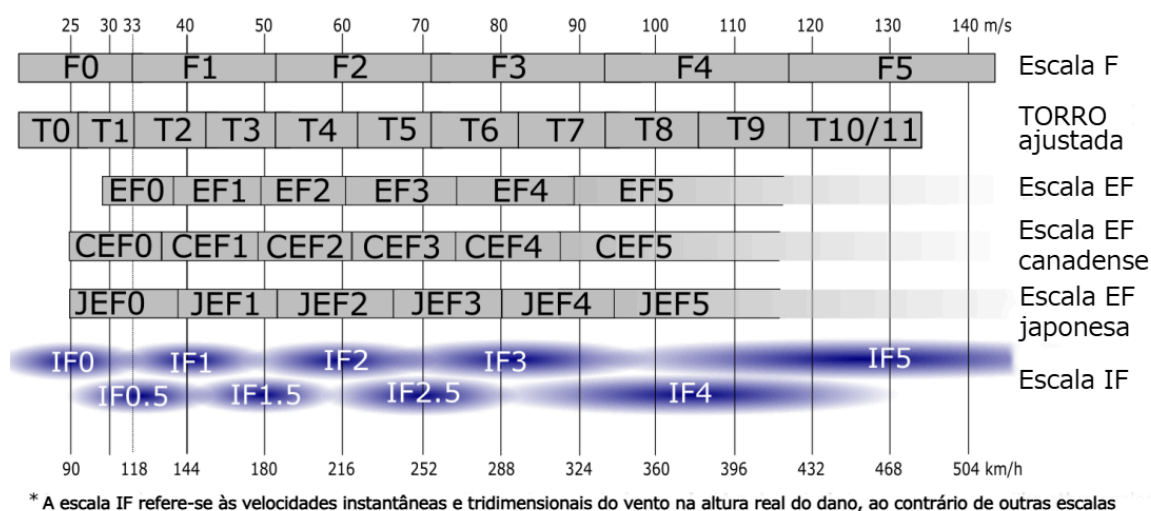
Fonte: MARSHALL, T.; MCCARTHY, D.; LADUE, J.; WURMAN, J.; ALEXANDER, P. R.; KOSIBA, K. Damage survey of the Greensburg, KS tornado. In: CONFERENCE ON SEVERE LOCAL STORMS, 24., 2008, Savannah. **Anais [...]** Savannah: AMS, 2008. Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/141534.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

A rajada acaba sendo mais importante do que a velocidade média porque os ventos mais danosos normalmente possuem um curto período de tempo, mas são cruciais pois são responsáveis por afetarem as estruturas, na qual Fujita (1971) originalmente definiu como o “vento mais rápido que ¼ de milha” que na primeira escala era de 4 segundos. O pesquisador formulou a estimativa da velocidade do vento com base em força de arrasto e sustentação que são proporcionais ao quadrado da velocidade do vento. Em uma casa de madeira, por exemplo, uma parede a favor do vento é menos afetada que as arestas dos telhados em tornados menos intensos devido a aceleração do fluxo.

McCarthy, Schaefer e Edwards ([200-]), membros do SPC, um órgão do NOAA/NWS declaram que a década de 1990 foi importante para o registro de tornados, marcado por um crescimento acentuado na base de dados da agência, isso se deu ao aumento populacional em partes dos Estados Unidos, a comunicação quase instantânea e a maior capacitação de equipe *in loco*. Esta década também levou a implantação do radar Doppler WSR-88D, antes da sua instalação apenas 35% dos tornados recebiam alertas, depois da instalação do radar, aumentou para 60% naquele país e o tempo médio de emissão de alertas também aumentou, mas esta questão se deve a queda de alertas do tipo falso positivos, enquanto que ferimentos e números de mortos foi reduzido entre 45 e 40%, a grande parcela dos dados utilizados são diurnos (Simmons; Sutter, 2004). Embora o “olho” de um tornado deixa assinatura conforme Fujita (1981), as suas dimensões não permitem a observação direta em um radar Doppler, enquanto que vórtices de sucção (entre 40 cm a 40 m) costumam ser observadas em fotografias aéreas.

A Escala EF não é a única escala utilizada atualmente, algumas regiões do globo possuem seu próprio sistema, embora isso não signifique que as estimativas desenvolvidas originalmente por Fujita e sua equipe fossem substituídas. O Laboratório Europeu de Tempestades Severas (ESSL) desenvolveu a Escala Internacional Fujita (Escala IF) que conta com uma varredura ampla da faixa de ventos, usada por uma elevada quantidade de estruturas, além de outras escalas, vide o sistema japonês e canadense, como exposto na figura 11. Outras formas de classificação, como a escala T, usam apenas a intensidade do vento para indicar a força de um tornado, usado principalmente no contexto inglês, para eventos mais brandos (MetMatters, 2023).

Figura 11 - Velocidade do vento em diversas escalas utilizadas para avaliação de danos de tornado



Fonte: Adaptado de EUROPEAN SEVERE STORMS LABORATORY. **The Internacional Fujita (IF) Scale**. Tornado and Wind Damage Assessment Guide. 2018. Disponível em: https://www.essl.org/cms/wp-content/uploads/IF-scale_v1.0c.pdf. Acesso em: 9 set 2025.

4.2 PARÂMETROS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DE TORNADOS

Algumas pesquisas procuraram compreender como a superfície terrestre com os seus aspectos distintos entre si contribuem para o desenvolvimento tornádico. Frazier, Hemingway e Brasher (2019) trabalharam com duas principais áreas propensas à formação de tornados nos Estados Unidos, a grande questão é onde exatamente ocorrem os tornados nestas extensas áreas, considerando a heterogeneidade da superfície. O autor reuniu uma certa quantidade de variáveis para estabelecer correlação das diferentes superfícies com a área de ocorrência e posteriormente com a intensidade do fenômeno. O método analítico empregado foi a regressão logística binária, a variável dependente é submetida a uma variável explicativa (uma variável a ser considerada), fornecendo resultados binários (“1” ou “0”), aumentando ou diminuindo a probabilidade de ocorrência desse evento. A classe de uso do solo manteve um padrão característico, com as áreas de cultivo tendo um impacto importante na atuação do tornado, todavia, vale ressaltar que essa análise não considera o local de origem da tempestade e há nuances que devem ser consideradas em um maior nível de detalhamento. Amy Frazier e sua equipe enfatizam o uso de imagens de alta resolução para o melhor posicionamento e melhor precisão das tendências estatísticas das variáveis utilizadas.

Foi constatado que em áreas de florestas e de maior umidade possuem uma menor taxa de ocorrências tornádicas, uma área de mata possui menor albedo, ou seja, refletem pouca radiação, além de serem mais rugosas comparado com o cultivo (Frazier; Hemingway; Breshner, 2019). Outro ponto é a predominância do fluxo do calor latente sobre o calor sensível na vegetação, na qual é sugerido que reduziria o albedo e aumentaria a rugosidade e a resistência da superfície, situação oposta em áreas de cultivo (Lyons *et al.*, 1993).

Contraponto os resultados acima, Kellner e Nioyogi (2014) constataram uma maior presença de tornados em condados de maior densidade urbana no estado de Indiana, Estados Unidos do que em outros usos do solo, embora os próprios mencionam algumas limitações metodológicas, como a do *buffer* utilizado, na qual a densidade populacional foi dividida em classes com raio de 1 a 4 km e de que outros parâmetros devem ser considerados. Uma possível explicação parcial de porque o resultado é distinto daqueles encontrados por Frazier, Hemingway e Breshner (2019), é de que analisando a dinâmica da tempestade através de imagens de radar em uma distância de até 120 km de Indianápolis, Estados Unidos é de que as tempestades podem ser divididas em células convectivas menores quando estão próximas aos ambientes urbanos a favor do vento e a barlavento (Nioyogi *et al.*, 2011). Fujita (1973) trazendo observações de Tóquio, notou diferenças internas com o aumento de frequência de tornados em direção a periferia da cidade, no qual o calor antropogênico é soprado aos subúrbios onde o ar está mais ameno ocasionando uma frente. Enquanto que Chicago, outra significativa região metropolitana exposta a ilha de calor urbana, Fujita, através de simulações de laboratório, descobriu que o atrito com elementos constituintes da cidade reduz a força de atuação do tornado que é atenuado ainda mais por uma parcela de aquecimento em baixos níveis.

Kellner e Nioyogi (2014) sugerem que a vorticidade local pode ser limitada pelo balanço de energia e a rugosidade. Dessens Junior (1972) averiguou a rugosidade do solo por um modelo de laboratório, a conclusão foi que uma maior convergência em superfície é gerada pela intensificação das diferenças entre a força de gradiente de pressão e da força centrífuga. Outra observação foi de que elementos a poucos metros sobre a superfície teriam influência na turbulência do fluxo superior. Mudar o ambiente implica alterar o funcionamento do vórtice, porém

também a dinâmica da corrente ascendente, além de outras questões a serem consideradas. Pryor e Kurzhal (1997) investigando a ocorrência de tornados entre 1950 a 1975 no estado de Indiana, Estados Unidos inferiram que a maior rugosidade da superfície é inversamente proporcional ao toque de tornados.

O relevo relativamente plano da Indiana, não permitiram constatações na microescala relacionadas a ocorrência de tornados, mas ainda assim, indícios a nível topográfico são possivelmente apontados, como por exemplo a leste da Escarpa Knobstone, na qual teoricamente induziria maior vortacidade resultando em pontos de toque (Kellner; Niyogi, 2014).

Características fisiográficas podem não predizer elementos em comum nas ocorrências tornádicas em porções espacialmente distintas. No estudo desenvolvido por Frazier, Hemingway e Bresher (2019) a região do Tornado Alley nos Estados Unidos está associada do ponto de vista estatístico a maior probabilidade de ocorrência de tornados em áreas próximas a um rio e que possuem maior altitude e inclinação do relevo, situação essa distinta e simultaneamente oposta em Axie Alley, isso deve principalmente a canalização do vento.

El Niño-Oscilação do Sul (ENSO) pode ter algum impacto na distribuição espacial da ocorrência de tornados (Kellner; Niyogi, 2014). Enquanto que, Allen, Tippet e Sobel (2015) verificam uma maior incidência do fenômeno dos Estados Unidos durante o La Niña devido a maior advecção que atinge o sul do país. Com temperaturas mais baixas no centro-leste Oceano Pacífico Tropical há tempestades de maiores dimensões naquele país, bem como maior gradiente de temperatura causada pelo aumento da temperatura de superfície, isto leva ao aumento do CAPE de convecção de camada mista, conhecido como MLCAPE.

Roberto C. Dyer (1988), fazendo parte em 1979 de um programa de fotointerpretação, principalmente de fotografias aéreas, descobriu faixas lineares de descontinuidade da vegetação entre o sudoeste do Brasil, nordeste da Argentina e leste do Paraguai, enquanto seu entorno estava coberto pela mata. Instigado, o autor recorreu a um intervalo maior de datas, encontrando correspondências de que o evento tenha acontecido em meados da década de 1960, colaborado com alguns tornados descritos por Reinhard Mack.

24 rastros de tornados foram reunidos pelo autor, tendo uma predominância as direções NW e NNW (Noroeste e Norte-Noroeste), na qual Dyer indagou a

possível relação com os diques de diabásio presentes na Bacia do Paraná, pois a anomalia magnética também possui as mesma direções (Dyer, 1988).

Doswell (1987) compreendendo um evento tornádico que ocorreu na primavera boreal de 1983 no leste do Kansas, Estados Unidos descreve que apesar de processos quase-geostrófico explicar boa parte do fenômeno, há fatores que interferem a convecção em escalas menores em latitudes médias. Outro ponto levantado é a interação da mesoescala, podendo alterar a forma de convecção e não apenas impulsionar a ascensão do ar, sendo dependente da grande escala.

Bertoni (2013) analisando a ocorrência de tornados no sul e sudeste do Brasil entre 1960 e 2008, enfatiza que tanto o uso e ocupação do solo com o relevo e a topografia não corresponde ao principal fator para explicar a formação de tornados, sendo necessário recorrer as condições sinóticas e do clima da área de ocorrência. Logo, o uso e a ocupação do solo não explicam isoladamente a propensão à ocorrência de tornados, embora incida principalmente em porções de cultivo agrícola. Terrenos destinados a cultivos como locais preferencias para a formação de tornados também foi observado em Marcelino (2004), com o adendo de se situarem próximas a parcelas florestais. Áreas sem declive muito acentuado com características planálticas também são locais preferenciais do ponto de vista de relevo, para o surgimento de um tornado (Bertoni, 2013). A proximidade com morros favorece a precipitação pelo efeito orográfico, maiores parcelas do ar em ascensão com nuvens que favorecem a atividade tempestuosa (Bertoni, 2013).

4.3 DISTRIBUIÇÃO E FREQUÊNCIA DOS TORNADOS

Nos EUA ocorrem 1200 tornados em média anualmente (NSSL, 2024b), o que leva em média quase 1 bilhão de dólares em perdas nesse mesmo intervalo anual entre 1949-2006, variando significativamente de ano para ano específico (Changnow, 2009) e cerca de 71 mortes/ano (MetMatters, 2023). Ainda, de acordo com MetMatters (2023) ocorre em média por ano 100 tornados no Canadá e 300 ocorrências em todo continente europeu. Todos os continentes já registram esse tipo de evento, exceto a Antártida. Nas Ilhas Britânicas não é um fenômeno raro, porém costuma ser de menor intensidade e ao mesmo tempo cobrir uma área maior (MetMatters, 2023). Esses números, contudo, devem ser levados em cautela, pois

dependem da densidade populacional, data do registro e intensidade, que costuma ser menor na maior parte do mundo (Fujita, 1971; Silva Dias, 2011; Hornes, Balicki, 2018; MetMatters, 2023).

Nos primeiros anos em que Fujita estava desenvolvendo sua escala (Fujita, 1973) onde o autor contextualiza tornados e *downbursts* na escala global, a América do Sul, já aparecia em destaque como um dos locais propícios, do que foi coletado, o Uruguai apareceu com 6 casos registrados entre 1963-1966. Com os dados que existiam desde logo, indicaram a predominância entre faixas subtropicais e de latitudes médias no planeta. Na análise multiescalar feita por Veloso-Aguila, Rasmussen e Maloney (2023) como parâmetros convectivos dos dados de reanálise do ERA5 para 74 tornados reportados, o evento está mais frequentemente relacionado a CCM de menores tamanhos e outras tempestades de curta distância, esse argumento condiz com Silva Dias (2011) na qual os complexos convectivos de mesoescala percorrem o sul do Brasil e o norte da Argentina. Ainda, de acordo com a pesquisadora brasileira, não existe um banco de dados nos moldes como existe nos Estados Unidos.

A América do Sul subtropical possui uma característica de muitos tornados estarem associados ao complexo convectivo de mesoescala (Veloso-Aguila, Rasmussen e Maloney, 2024). Investigações como a de Velasco e Fritsch (1987) através de indícios como da localização do cisalhamento vertical do vento sugerem que a ocorrência de tornados esteja mais ao sul do local de formação do sistema, ainda que a quantidade de dados seja escassa, os CCMs possuem destaque no papel de produzir tempo severo no continente. Tempestades assim como aquelas que ocorrem em latitudes médias dependem do cisalhamento do vento que por sua vez é alimentado por correntes de jatos (Silva Dias, 2011). Uma das maneiras de se identificar um tornado é através do cisalhamento vertical, pois a direção e a velocidade do vento se modificam em função da altura, quando o vento sofre alterações nas suas propriedades tende a girar sobre o eixo horizontal, assim chamado de vorticidade horizontal (Corfidi, 2017).

Com base no levantamento feito por Almeida, Hornes e Estivallet (2023) a cada 2 tornados com dados horários registrados entre 1975 a 2018, um deles possivelmente ocorreu no período da tarde, em média. Nos Estados Unidos também estão associados principalmente ao horário vespertino desde alguns séculos

anteriores, com prevalência entre as 17h e 18h em dados históricos de 1794-1874 (Finley, 1998), com os dados atuais se tem a predominância entre as 16h e 19h no horário local (NSSL, 2024a), ressaltando que podem ocorrer em qualquer momento do dia e em todas as estações do ano. Conforme Marcelino (2003) esta variação sazonal também implica em regiões de trajetória distintas, tanto pela topografia e proximidade com o mar no verão quanto a passagem de frentes entre o outono e primavera mais no interior do continente. Os dados de Bertoni (2013) para ocorrências de tornados no sul e sudeste do Brasil entre 1960 a 2008 revelam o predomínio de tornados na primavera, condizente com o que é o observado em Balicki, Andrade e Hornes (2020), além das tempestades severas também possuem maior frequência nesta mesma estação do ano

No Brasil, a formação de áreas de instabilidade e consequentemente, a ocorrência de tornados é propiciada pela presença de jatos de baixos níveis a leste dos Andes que transporta a umidade da Amazônia para latitudes maiores e desestabiliza a atmosfera, jatos subtropicais vindos da Argentina, Uruguai, Paraguai e no sul do país, além dos jatos polares, cavados na média e alta troposfera e a presença de frentes (Marcelino; Nascimento; Ferreira, 2007; Estivallet *et al.*, 2009; Bertoni, 2013).

Com a Internet, surgiram páginas que documentavam a ocorrência de tornados, também mais material midiático especialmente de locais com maior densidade demográfica, ainda que, a sua distribuição seja irregular sem uma análise mais criteriosa, é o compilado que permeia investigação científica (Silva Dias, 2011; Hornes; Balicki, 2018). Embora ocorra um aumento de precipitação intensa e eventos extremos, isoladamente, não explicam o maior número de ocorrências de tornados que chega a ser 10 vezes maior que em quatro décadas de relatos (1960-2008), dessa forma, a variabilidade climática explicaria apenas parte deste incremento, sugerindo a contribuição de maior número de ocorrências reportadas (Silva Dias, 2011).

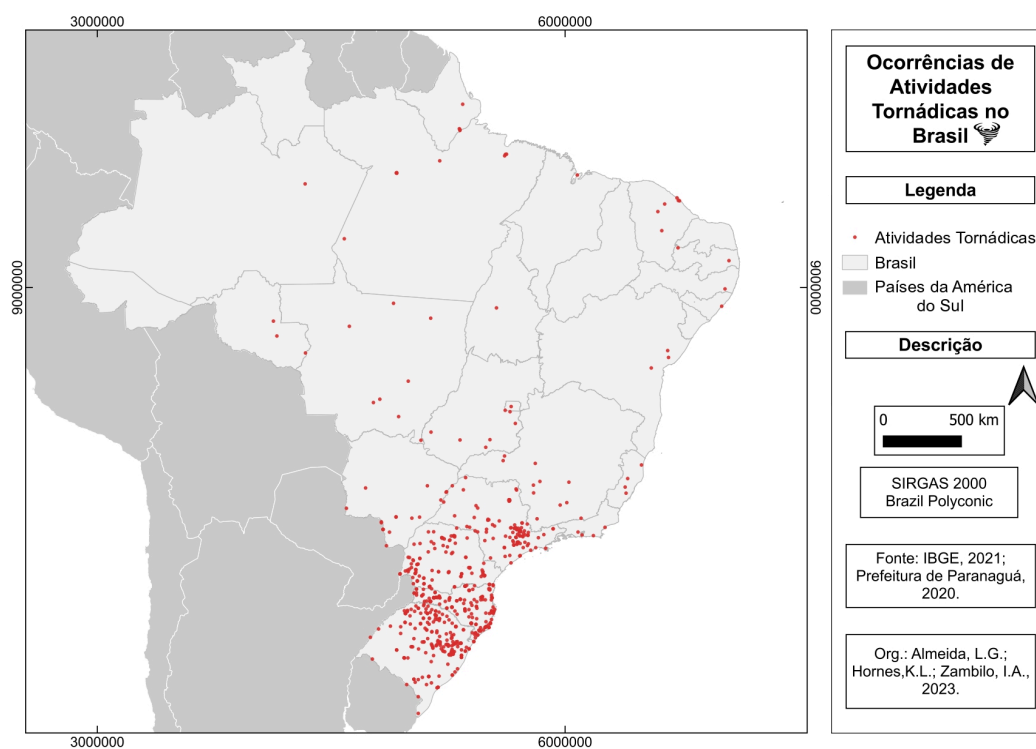
Um dos registros mais antigos sobre tornados no Brasil é o de Ferraz (1927, p. 500, tradução nossa), na qual descreveu que “um redemoinho destrutivo varreu Ponta Grossa, no Paraná, com efeitos de tornado, evento de ocorrência muito rara no Brasil”. Da segunda metade do século XX temos alguns registros de Dyer (1986) supracitados, que de modo acidental com o uso de sensoriamento remoto encontrou

evidências de eventos tornádicos e no início de 2000 houve produções que catalogaram e analisaram os eventos, vide Marcelino (2003).

No estudo conduzido por Bertoni (2013) fica evidente a diferença escalar quando analisa a sazonalidade do evento por estado. Um fator que tem um peso importante, é que parte desses dados são antecessores a popularização de *smartphones* e redes sociais que propiciaram a maior circulação de vídeos e notícias sobre o evento e que pudesse, por exemplo, analisar visualmente o padrão de danos e o volume de dados.

Em meados da década de 1970 até próximo ao final dos anos 2010, foram confirmadas em média 13,5 ocorrências/ano de uma coluna de ar rotacionais pendente de uma nuvem, dada a subnotificação, esse valor deve ser substancialmente maior (Almeida; Hornes; Estivallet, 2023). Apesar de tornados ocorrerem em distintas regiões do país, conforme o levantamento de Almeida, Hornes e Estivallet (2023) o Sul do Brasil predomina em quantidade de ocorrências do fenômeno, de 588 tornados catalogados de um período entre 1975-2018, 411 ocorreram nesta região brasileira (figura 11), destes casos, 43,8% são do Rio Grande do Sul. Embora o fenômeno seja mais frequente ao sul de 20°S no Brasil, tornados podem ocorrer inclusive nos vales da Amazônia como documentado por Nechet (2002).

Figura 12 - Ocorrências de tornados reportados no Brasil entre 1975 e 2018



Fonte: ALMEIDA, L. G.; HORNES, K. L.; ZAMBILO, I. A., 2023.

5 DETECÇÃO DE MUDANÇAS NA ANÁLISE DE TORNADOS

Singh (1989) compreende a detecção de mudanças essencialmente como um modo de mensurar o fator tempo, a fim de detectar mudanças de um objeto ou fenômeno em períodos distintos. Devido a esse princípio, o sensoriamento remoto é utilizado por fornecer dados em sequências temporais que são via de regra, de curtos períodos. As mudanças na superfície provocam alterações nos valores da radiância capturados pelos sensores que estão a bordo dos satélites. Os usos de detecção de mudança, incluem o monitoramento do desmatamento e de diferentes tipos de vegetação, avaliação de danos, derretimento de neve, avaliação do campo térmico, dentre outros.

A detecção de mudanças idealmente exhibe a modificação da área, quantificando a alteração; espacializa e assinala a mudança na cobertura do solo. A precisão pode ser averiguada, estando dependente das etapas de pré-processamento aos métodos utilizados que atestam a precisão posicional, distorções, falhas e efeitos atmosféricos. Na sequência, é dependente também do método utilizado, recorte espacial, classes definidas e subjetivamente do olhar e experiência do executor (Lu *et al.*, 2004). Especificamente, as imagens de satélite do Copernicus Sentinel-2 *Level 2A*, já são corrigidas em termos radiométricos, geométricos e de terreno na pré-coleta (Sentinel Online, 2025), melhorias nos algoritmos ao longo do tempo, via de regra, refletem estimativas mais precisas e adequadas para o uso final.

Correa e Rodriguez (2017) utilizando uma das várias formas de detecção de mudanças desenvolvidas, aplicou a subtração de imagens do NDVI (séries Landsat 5 e 8) resultante de datas distintas para estabelecer o aumento da área da silvicultura de eucalipto em São Luiz do Paraitinga, São Paulo, realizando o acompanhamento anual entre 2000 e 2015. Como resultado, o autor conseguiu estabelecer o período de maior taxa de variação da área, indicando um momento de expansão em determinado momento e um declínio posterior, sugerindo pressão externa.

A técnica é aplicada também em desastres como o do rompimento da barragem de Mariana, Minas Gerais em 2015. Silveira *et al.* (2017) usaram o mesmo índice espectral, comparando as diferenças de data, posteriormente, realizaram uma

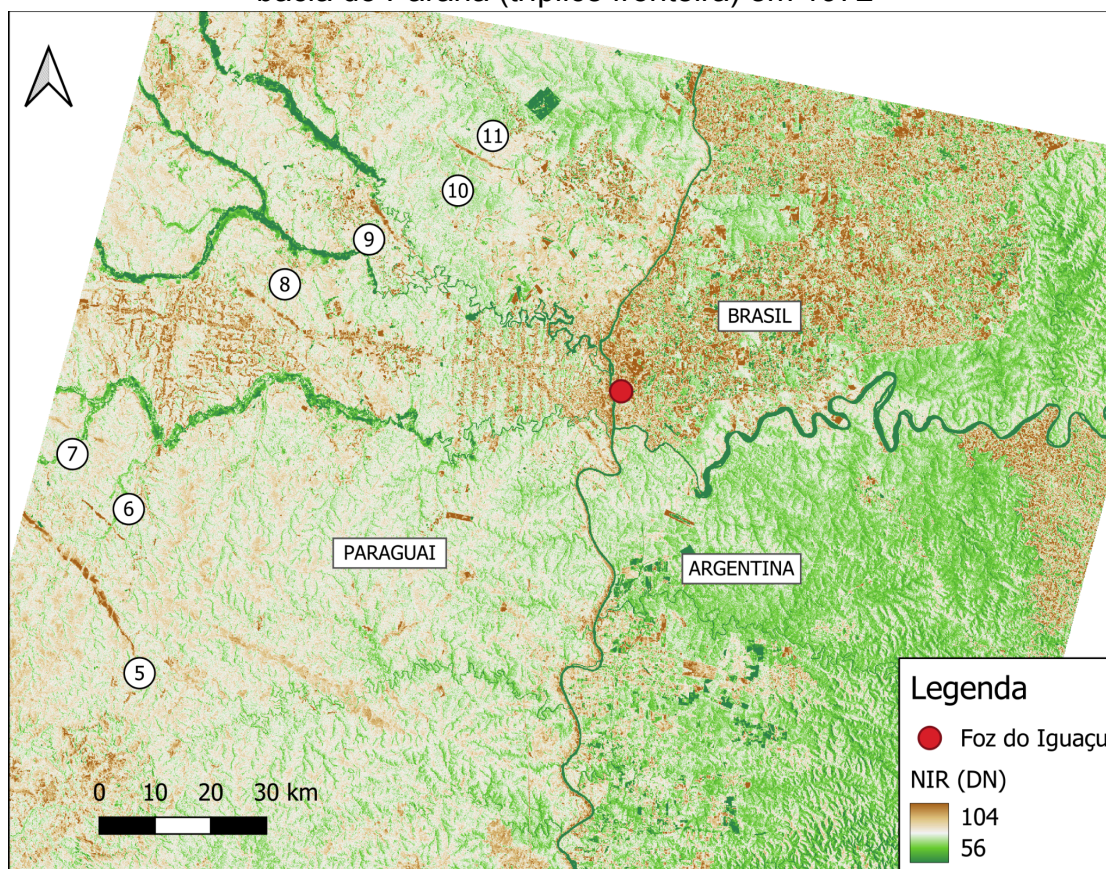
segmentação orientada a objetos, gerando o agrupamento da variância do NDVI através do semivariograma experimental, um gráfico de análise do padrão espacial para variáveis contínuas.

A detecção de mudanças constituiu-se tradicionalmente pelos métodos tradicionais citados, envolvendo operações algébricas, ao mesmo tempo que, outro caminho, a ser seguido é possível através de aprendizagem profunda (Qiao *et al.*, 2020). O emprego de redes neurais convolucionais também são uma das abordagens utilizadas pela qualidade do resultado obtido e a automação da detecção de mudanças por meio de uma série temporal (Lebedev *et al.*, 2020). Há uma gama de algoritmos, além das redes neurais, que compõe o aprendizado de máquina e são usados na detecção de mudanças (Lebedev *et al.*, 2020).

5.1 IMAGENS DE SATÉLITE NA ANÁLISE DE TORNADOS

Uma das primeiras investigações com imagens de satélite ocorreu em torno da tríplice fronteira da Argentina, do Paraguai e do Brasil. Parte do estudo do Dyer (1988) envolveu cenas do Landsat de 1973. O autor identificou rastros de tornados paralelos entre si com direção noroeste, no lado paraguaio com atividade antrópica mais intensa, danos vistos na década anterior através de fotografias aéreas não são mais detectáveis. O mesmo aconteceu para um outro rastro em que o maior desmatamento em território brasileiro removeu a cicatriz (não houve resquícios remanescentes de faixa devastada), mas que se manteve intacta na porção que se encontrava na Argentina por se situar em um parque florestal. Antes disto, a aerofotogrametria era uma prática comumente aplicada em conjunto com observações a nível do solo (Yuan; Dickens-Micozzi e Magsig, 2002). Dyer (1988) usou as imagens de satélite em conjunto com fotografias aéreas de 1:60.000 registradas em 1965. Uma das imagens com rastro de danos na região fronteira através de imagens de satélite do Landsat em 1972 apresentado por Robert C. Dyer é exibida na figura 13:

Figura 13 - Imagem do MSS/Landsat no infravermelho próximo (NIR: banda 6) na bacia do Paraná (tríplice fronteira) em 1972



Fonte: Adaptado de: DYER, R. C. Remote Sensing Identification of Tornado Tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, [S. l.], v. 54, n. 10, p. 1429-1435, out. 1988. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/oct/1988_oct_1429-1435.pdf. Acesso em: 1 ago. 2025.

No século XXI dezenas de trabalhos foram conduzidos utilizando imagens de satélite para detecção de rastros de tornados, entre eles Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002); Lillesand *et al.* (2002); Jedlovec, Nair e Haines (2006); I. P. de O. Marcelino, E. V. Marcelino e Sausen (2007); Molthan, Jedlovec e Carcione (2011); Molthan *et al.* (2014); Kingfields e Beurs (2017) e Burow, Herrero e Elis (2020).

Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) adquirindo imagens do satélite *Indian Remote Sensing* com 23,5 m de resolução espacial analisaram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e sua variação com intervalo temporal que antecedeu o surto e posterior bem como a técnica de mudança na superfície, por meio do PCA aplicando-a apenas para o pós-evento. Os autores utilizaram como base um surto de tornados que ocorreu em 3 de maio de 1999 na cidade de Oklahoma e arredores do estado homônimo. Com uma resolução espacial quase

intermediária entre as séries Landsat e as mais recentes do Sentinel-2, a análise do NDVI permitiu identificar danos na escala F2 e F3 e mesmo F1, nos casos em que o índice de vegetação pós-evento foi subtraído pelo pré-evento, considerando um método separado, indicando desse modo quanto perdeu especialmente da vegetação danificada e também dos detritos gerados. O PCA que nesse estudo incluiu a banda verde, vermelha e infravermelho próximo, mostrou-se adequado para danos F3. Áreas danificadas são indicadas pelo baixo brilho na imagem. A hipótese para seções do trajeto não danificadas foi a de categoria inferior ou pontos com maior variabilidade da superfície. Segundo Jedlovec, Nair e Haines (2006) a heterogeneidade da superfície em curtas distâncias tenderiam a dificultar a análise dos danos por estes meios.

Lillesand *et al.* (2002) aplicaram imagens do satélite Landsat 7/*Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) para um evento que ocorreu no noroeste do Wisconsin, Estados Unidos em 18 de junho de 2001. Para análise das componentes principais foram usadas as bandas do azul, verde e duas faixas do infravermelho de ondas curtas. A segunda componente é a que teve maior variação. A particularidade deste estudo é descrever a capacidade de interpretação visual em cada banda do sensor ETM+. A faixa do verde mostrou nitidamente a trajetória de danos, em outros casos, algumas bandas destacaram mais outras porções do que outras. Os autores também usaram imagens pancromáticas do Landsat 7 para combinar com as bandas multiespectrais através da técnica conhecida como *pan-sharpening* que une a melhor capacidade de distinção por regiões do espectro com um maior nível de detalhamento de uma única banda, porém não realçou o rastro, sugerindo que a banda possa ter baixa resposta ao rastro tornádico. Neste estudo, não foi apenas áreas vegetadas extensivas que demonstraram danos, houve uma correlação eficiente na maior parte dos casos em danos estruturais e em áreas de cultivo que foram comparadas com verificação em campo e fotografias aéreas.

Jedlovec, Nair e Haines (2006) investigando uma tempestade entre 22 e 28 de abril de 2001 em regiões distintas dos Estados Unidos, definiram três tornados para análise com sensoriamento remoto, sendo dois do Missouri e um de Maryland, no estudo foi utilizado o *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de 250 m de resolução espacial e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) de 15 m e assim como em Lillesand *et al.* (2002) as

imagens do Landsat 7 ETM+. As assinaturas de tornados foram mais pronunciadas em florestas do que em campos e vegetações mais esparsas, o que vai de acordo com o que foi sugerido por Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) em locais de pasto e sem uma faixa de detritos significativa, o que ambos os autores concordam entre si. Portanto, além da intensidade implícita, a quantidade de danos é dependente do uso do solo. Além da reflectância resultante do detrito, há a contribuição do solo exposto. O que o sensor capta são as alterações na faixa do infravermelho e do visível como consequência dos ventos fortes do fenômeno, implicando mudanças físicas e na direção dos elementos na superfície, o que promove mudanças na energia refletida pelo sol.

A cidade de Muitos Capões, localizada no noroeste do Rio Grande do Sul foi afetada por um tornado de categoria F3 na Escala Fujita original em 29 de agosto de 2005. Pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) empregaram imagens de satélite do Landsat 5 com o sensor TM para calcular a extensão e largura da impressão do tornado no solo. Além disso, foi levantado dados em campo, determinando o comprimento e largura por GPS. Os autores do relatório sugerem que o tornado não teve ponto de toque em alguns momentos, o que explicaria parte da trajetória ausente. As bandas utilizadas no PCA foram as mesmas aplicadas por Lillesand *et al.* (2002), entretanto, a subtração foi o que mais enfatizou o rastro, sendo o resultado da banda do infravermelho de onda curta da data posterior menos da data anterior. O NDVI pós-evento realçou mais o urbano. O estudo também confere mais evidências de que o rastro tem a sua interpretação visual favorecida em vegetação densa do que outros elementos “verdes”. A metodologia aplicada seguindo a equipe provou ser “um excelente recurso para obter informações sobre as dimensões e extensão total dos danos ocasionados por tornados com intensidade superiores a categoria F2” (I. P. de O. Marcelino; E. V. Marcelino; Sausen, 2007).

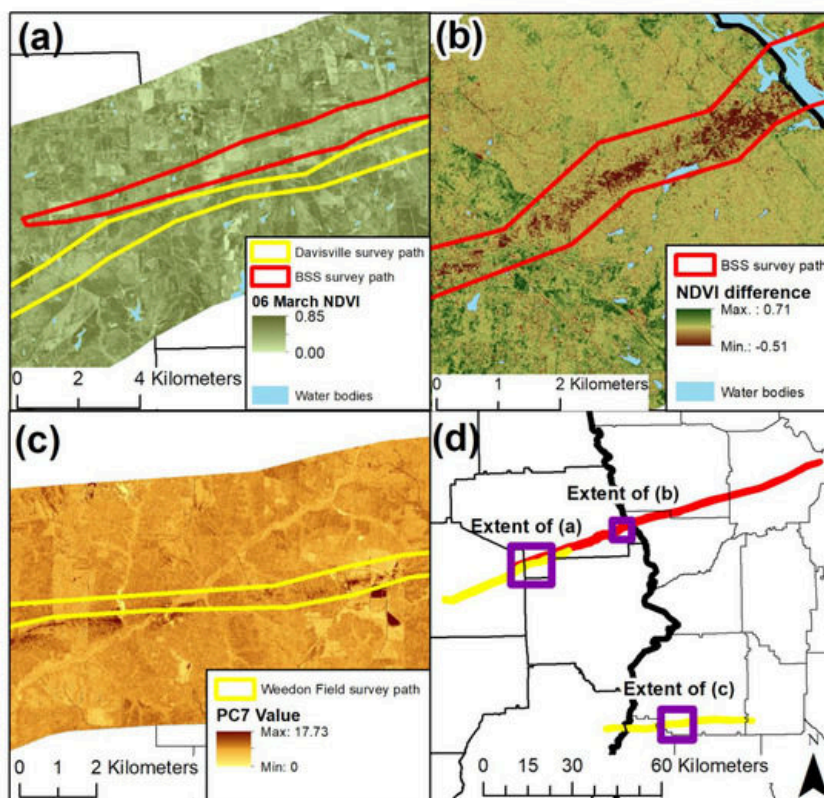
Molthan *et al.* (2014) empregaram imagens de diferentes resoluções espaciais e consequentemente demais especificações (ASTER, MODIS e Landsat) para um surto que chegou ao todo a 62 tornados, destes, 32,4% foram discerníveis ao menos parte das trajetórias apenas com o NDVI. A respeito da gravidade dos danos, 65,2% de áreas com danos EF2 tiveram reconhecimento. Tornados com categoria máxima EF3 tiveram 95% de detecção de ao menos partes da extensão,

sendo via de regra a intensidade conhecida como limite para detecção com o NDVI pós-evento pelos meios aplicados. A detecção prevaleceu pela resolução do satélite utilizado, embora a diferença do Landsat 7 e do Aster que seria equivalente a 2 pixels nesse caso seja apenas de 1 tornado, mas provavelmente isso pode variar em outros contextos e na extensão e largura (seções do trajeto). O coeficiente de determinação aplicado levantou que as imagens de satélite obtiveram mais êxito em determinar a extensão de um tornado do que a largura máxima estimada previamente em campo, mesmo que em ambos os casos sejam subestimados. Assim como em Jedlovec, Nair e Haines (2006), a pesquisa conduzida por Molthan *et al.* (2014) também verificou a maior utilidade em áreas em maior densidade de vegetação. Além disso, foi destacado a detecção favorável em situações de relevo plano. A pesquisa ressaltou a mudança de NDVI com diferença de um mês e meio aproximadamente, em detrimento da outra imagem posterior de apenas 16 dias para eficácia da detecção do rastro. O PCA com as bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo usando Landsat 7 indicou danos EF2 a EF4 conforme o comparado com o levantamento pré-existente, destacaram principalmente a segunda componente (CP2) e terceira componente (CP3), mas salientaram que a componente que melhor detecta um rastro pode variar de acordo com a superfície e as bandas de entrada, o mesmo enunciado por Burow, Herrero e Ellis (2020), levando em conta também outros fatores.

Produtos provenientes do Sentinel-2, missão de observação da Terra da Agência Espacial Europeia inspirada nas séries Landsat, não estavam disponíveis até meados de 2010. Burow, Herrero e Ellis (2020) foram um dos primeiros trabalhos conhecidos utilizando este *dataset* para determinação de rastros de tornados, os mesmos aplicaram para três eventos de tornados que ocorreram em 3 de março de 2019 no Alabama, sendo dois EF2 e um EF4. Através do PCA, a sétima componente (PC7) que retornou a melhor correspondência para o rastro de tornado (na qual foi utilizado todas as bandas do visível e infravermelho próximo), bem como a mudança de NDVI que foi checada em conjunto com o modelo de Rankine, uma modelagem de vórtice que estima a velocidade do vento. A mudança de NDVI através da amostragem aleatória de pixels ao longo do trajeto indicou tendência de maiores perdas em coberturas florestais e urbanas, em relação ao PC7 essa variação tende ser maior. De modo geral, os dois métodos foram eficazes tanto para detecção

quanto para avaliar a escala de danos. A figura 14 exhibe os resultados obtidos pelos autores por diferentes métodos:

Figura 14 - Assinatura de tornados em diferentes condados do Alabama em 3 de março de 2019. a) NDVI pós-evento em 6 de março; b) diferença de NDVI; c) PC7 e d) Assinala seções utilizadas para cada um dos métodos



Fonte: BUROW, D.; HERRERO, H. V.; ELLIS, K. N. Damage Analysis of Three Long-Track Tornadoes Using High-Resolution Satellite Imagery. Atmosphere, v. 11, n. 6, p. 1-20, jun. 2020. DOI: 10.3390/atmos11060613. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/613>. Acesso em 1 ago. 2025.

O quadro 3 a seguir, destaca os principais resultados dos artigos que a realizaram a pesquisa com a temática e são frequentemente citados sendo divididos pelos autores, sensor utilizado, métodos e resultados obtidos:

Quadro 3 - Panorama geral dos principais artigos com NDVI e PCA para identificação de rastros

(continua)

Autor	Sensor/Satélite	Procedimento(s)	Resultados
Yuan, Dickens, Micozzi e Magsig (2002)	IRIS (23,5 m)	PCA (pós-evento), NDVI pós evento e mudança de NDVI	Danos EF1 detectados com a mudança de NDVI

(continuação)

Molthan <i>et al.</i> (2014)	ASTER (15 m), MODIS (250 m) e Landsat (30 m)	NDVI pós-evento	95% de partes de trajetórias de 68 tornados EF3 detectadas
Burow, Herrero e Ellis (2020)	MSI/Sentinel-2 (10 m)	PCA e mudança de NDVI	detecção de danos EF2 e EF4

Organização: O autor.

O estudo da faixa de danos de tempestade compatibilizada com o nível de detalhamento requerido pode auxiliar na previsão do tempo a curto prazo, partindo da análise de algumas variáveis meteorológicas (Jedlovec; Nair; Haines, 2006). Além disso, de acordo com I. P. de O. Marcelino, E. V. Marcelino e Sausen (2007) as imagens de satélite podem otimizar o tempo de inspeção no local de ocorrência. Não é incomum não se obter toda a trajetória do tornado em campo. Mesmo nos Estados Unidos, as imagens aéreas tendem a ser mais utilizadas logo após a uma ocorrência tornádica mais frequentemente em áreas povoadas (Jedlovec; Nair; Hanes, 2006). Molthan, Jedlovec e Carcione (2011) sugeriram o uso para uma reanálise em campo para áreas de difícil acesso, onde diferentes rotas de dissipação podem ter sido traçadas, permitindo-a um reajuste na trajetória (Burow; Herrero; Elis, 2020). Recomendou-se também o uso para tornados extensos (Molthan; Jedlovec; Carcione, 2011), o que em até certo ponto, vai de encontro com o argumento de Burow, Herrero e Ellis (2020) que indicaram para situações em que não há tempo e recursos suficientes, desde que não haja interferência de nuvens para a área de estudo. De modo geral, existe uma maior dificuldade para detecção de danos inferiores a EF2 com a utilização das opções gratuitas de aquisição de imagem de satélite.

Embora o satélite ASTER tenha resolução espacial relativamente próxima ao do Sentinel-2, o primeiro somente era adquirido sob demanda (Jedlovec; Nair; Haines, 2006). No início dos anos 2000, o catálogo das missões Landsat eram pagas (Yuan; Dickens-Micozzi; Magsig, 2002), atualmente são gratuitas assim como o Sentinel-2, logo, embora existam limitações a depender do objeto de estudo ou fenômeno, por outro ângulo os produtos de sensoriamento remoto e de geotecnologias como um todo estão se tornando mais acessíveis.

Ao mesmo tempo que as cenas provenientes de satélite podem ser de vários dias posteriores da ocorrência do tornado, o que implica alterações ambientais e maior dificuldade na interpretação dos danos, principalmente em locais menos evidentes (I. P. de O. Marcelino; E. V. Marcelino; Sausen, 2007), a cicatriz de tornado e de granizo pode ser observada mesmo depois de uma latência de tempo, sendo capaz de ser avistada após semanas (Jedlovec; Nair; Haines, 2006). Presume-se que ainda há muita limpeza a ser feita em cerca de duas semanas (Molthan *et al.*, 2014), enquanto que, Kingfield e Beurs (2017) monitoraram por 5 anos através de imagens de Landsat as mudanças espectrais de cicatrizes tornádicas, o pico da perturbação na vegetação chegou a acontecer em até 6 meses, em diante, com a recuperação da área vegetada, houve a redução do valor dos pixels perturbados. Dyer (1988) identificou danos muitos anos posteriormente, todavia tinha a interferência antrópica nesse hiato de tempo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados e discussão foi dividida em duas seções para os dois estudos de caso, contendo os procedimentos realizados e as comparações feitas nos subitens:

6.1 TORNADO ENTRE ÁGUA DOCE E TANGARÁ, SC (14/08/2020)

Em 14 de agosto de 2020, uma sexta-feira ocorreu um tornado em Água Doce, Tangará, na qual teve um caminhão tombado e outros danos relacionados a tempestade em Vargem Bonita, SC. O evento foi confirmado pela Defesa Civil Estadual e também corroborado com imagens de uma supercélula avistada por volta das 15h30 no município na data em questão, horário de passagem do tornado. A cidade mais afetada foi Água Doce, sobretudo o centro urbano, residências foram destruídas e edificações maiores foram danificadas, aproximadamente 700 casas destelhadas. Catanduvas e Ibicaré também foram atingidas pela tempestade que foi derivada de um sistema de baixa pressão, sendo acompanhada de ventos fortes, chuva e granizos na região Oeste, a principal região afetada e que está em análise neste estudo e Norte de Santa Catarina (Rádio Catarinense, 2020; G1 SC, 2020a; Catucci, 2020). Conforme o G1 SC (2020b) no dia seguinte, o município assina o decreto de estado calamidade pública, diante desse quadro, é dispensado o processo licitatório para medidas que venham a sanar os problemas relacionados com o desastre. Houve muitos desabrigados e uma das demandas foi telhas de fibrocimento (Água Doce, 2025). A figura 15 exibe imagens aéreas de Água Doce, assim como descrito por Fujita (1985) nota padrões circulares na vegetação:

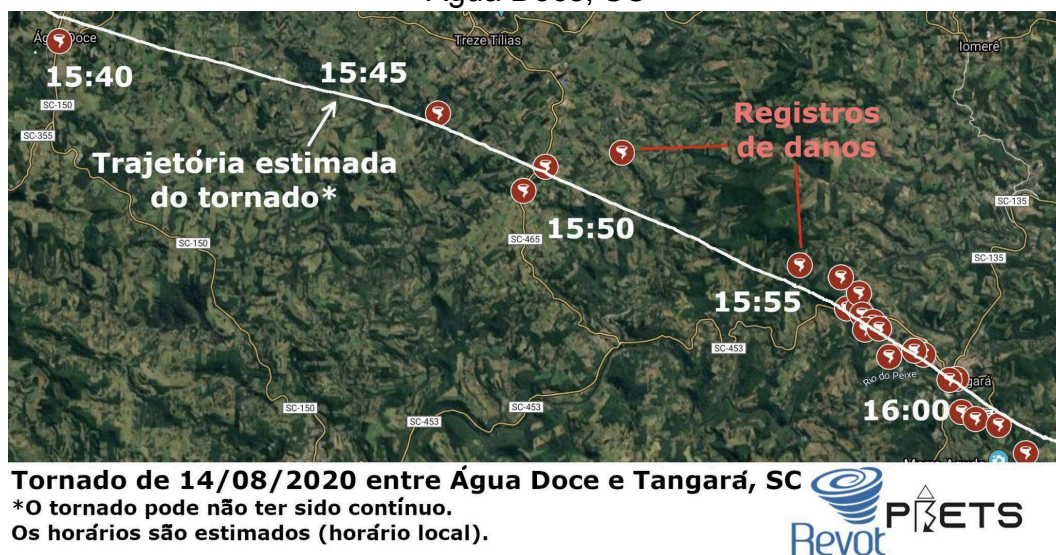
Figura 15 - Imagens aéreas pós-tornado no município de Água Doce, SC. Em “a” uma estrutura destruída e em “b” árvores arrancadas



Fonte: Júnior Arenhart, 2020.

Um grupo de meteorologistas, o PREVOTS (2020) divulgou a trajetória estimada entre Água Doce, Treze Tílias, Ibicaré e Tangará, destacando em vermelho o registro de danos, como mostra a figura 16:

Figura 16 - Percurso estimado do tornado de 14 de agosto de 2020 na região de Água Doce, SC

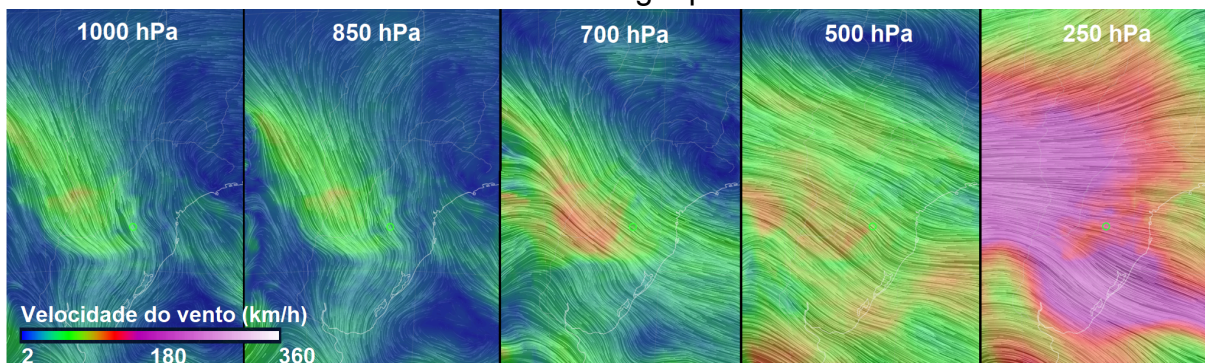


Fonte: PREVOTS, 2020.

A análise de ventos em diferentes altitudes, constatou a presença de Jatos de Baixo Níveis (JBN), trazendo desse modo, a umidade da região amazônica para o Sul do Brasil. Variações na velocidade e direção do vento com a altitude também foram observadas, portanto, o cisalhamento do vento foi confirmado, elemento essencial para o desenvolvimento de uma tempestade supercelular. A figura 17

mostra a velocidade do vento na data em questão às 15 horas no horário local em diferentes alturas geopotenciais através da ferramenta Earth Null School:

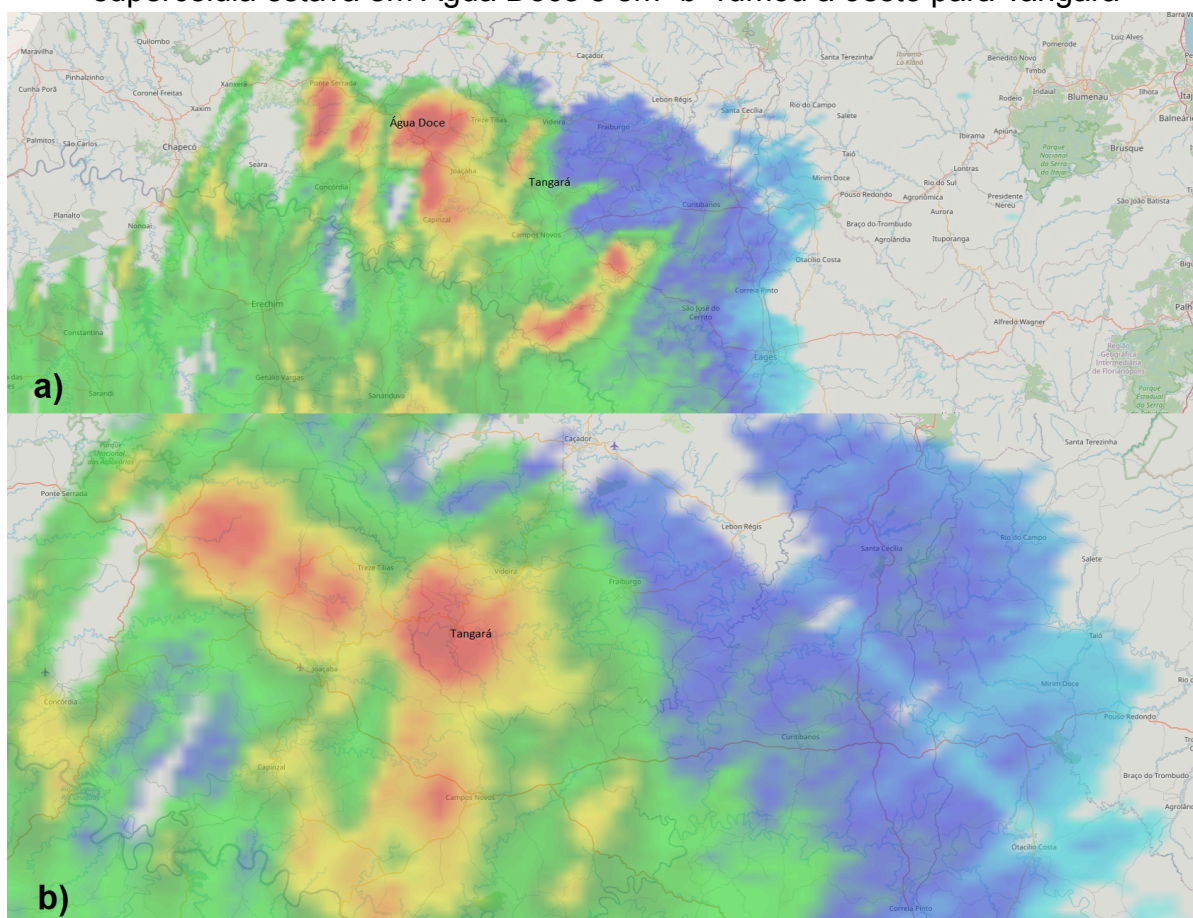
Figura 17 - Velocidade do vento no sul do Brasil em 14/08/2025 às 15h (GMT-3) em diferentes alturas geopotenciais



Fonte: GFS/NCEP/US NWS, 2025.

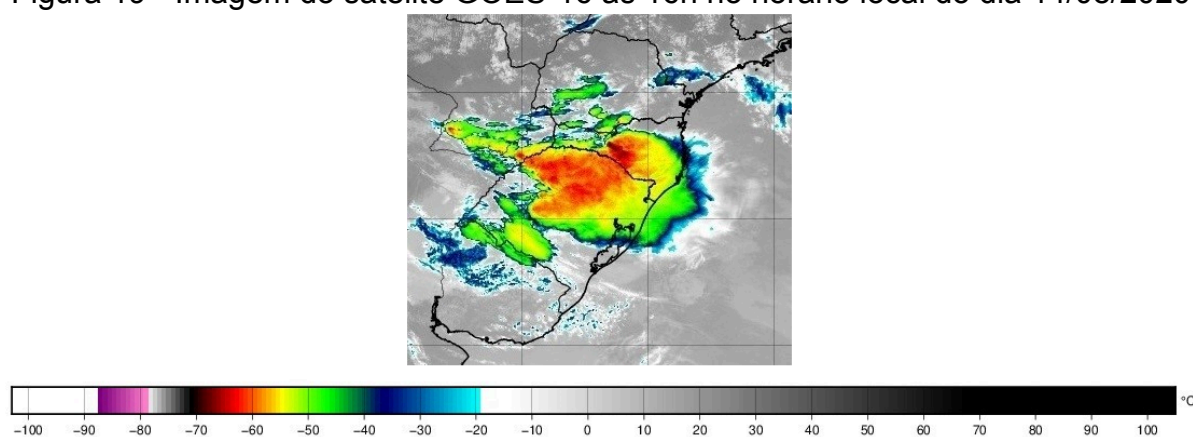
As imagens de radar da Aeronáutica capturaram a supercélula sobre Água Doce, destacado em vermelho (figura 18.a) e depois sobre Tangará (figura 18.b), PREVOTS (2020) estimou um tempo de 20 minutos para o tornado percorrer a área urbana das duas cidades. Na imagem do satélite GOES-16 (canal 14: infravermelho) também é possível averiguar condições tempestuosas intensas sobre os municípios atingidos, como mostra a figura 19:

Figura 18 - Imagem de radar em 14/08/2020 entre as cidades de Água Doce e Tangará em um intervalo por volta das 15h-15h30 no horário local, SC. Em “a” a supercélula estava em Água Doce e em “b” rumou à oeste para Tangará



Fonte: REDEMET, 2020.

Figura 19 - Imagem do satélite GOES-16 às 16h no horário local do dia 14/08/2020

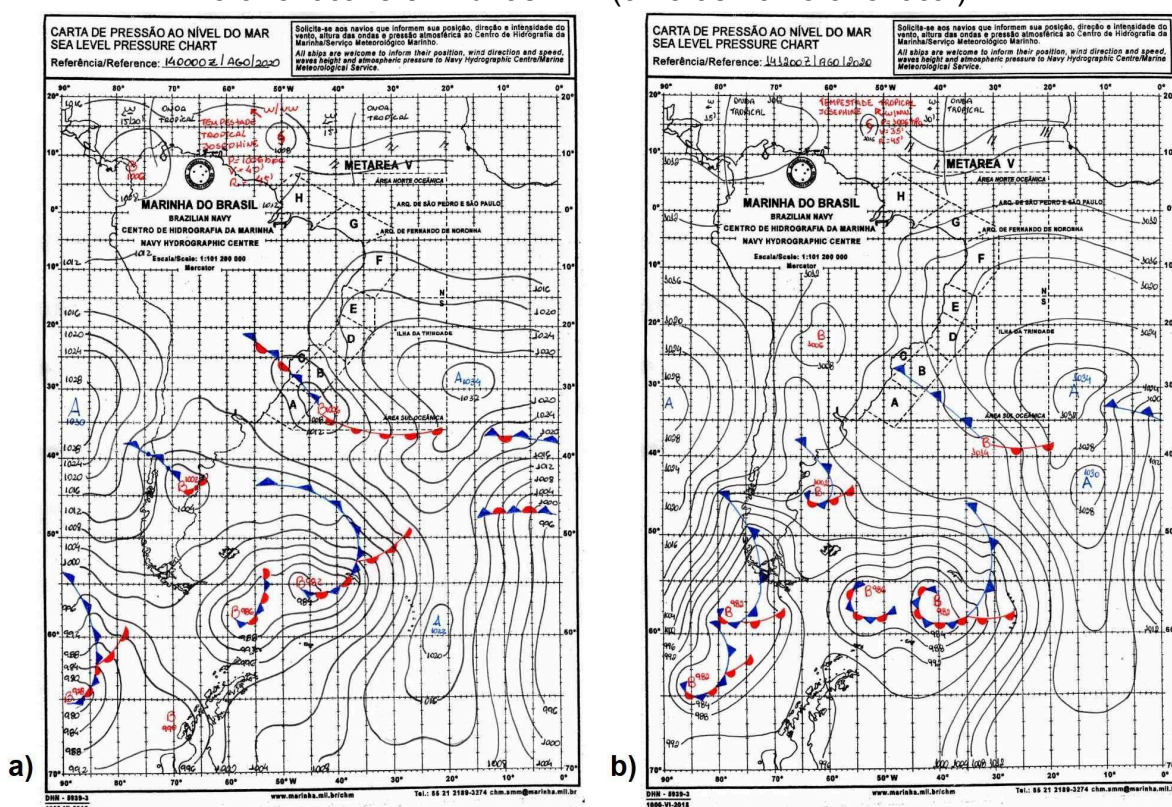


Fonte: DSA/INPE, 2020.

As cartas sinóticas da Marinha (figura 20) apresentaram um centro de baixa pressão, um dos ingredientes para a formação de tempestade severa, na região do

Chaco, Paraguai em 12Z, 9 horas da manhã no horário local (figura 19b), em 00Z (figura 19a), às 21 horas do dia anterior, ainda não havia ventos fortes soprando como mostra as isóbaras. Nos dois horários as cartas exibem a passagem de frentes frias e ciclones extratropicais. Em limites baroclínicos, a vorticidade horizontal da supercélula pode ser aumentada devido às diferenças de temperatura, outros fatores podem ampliar sua extensão (Markowski; Rasmussen; Straka, 1998), a interação nessas bordas na qual estão presentes as frentes, amplia a probabilidade de ocorrência de tornados (Maddox; Hoxit; Chappel, 1980).

Figura 20 - Carta sinótica no Brasil em 14/08/2020. Em “a” às 00Z (21 horas no horário local e em “b” às 12Z (9 horas no horário local)



Fonte: CHM, 2020.

6.1.1 Verificação da atividade tornádica

Através dos três métodos, foram geradas três imagens resultantes, explicando cada uma delas e posteriormente comparando-as. Com os métodos que tiveram melhor assinatura do tornado, foram realizadas a coleta de pontos amostrais

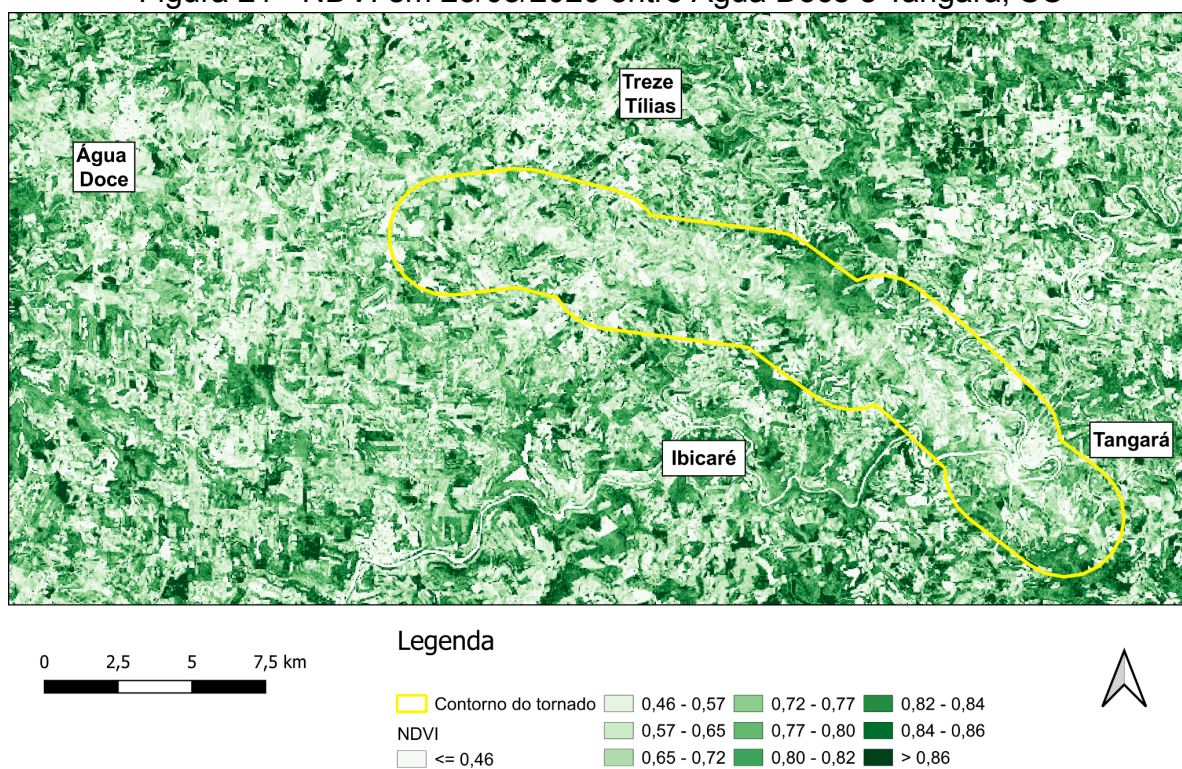
para verificar a diferença com base nas características de uso e cobertura em torno do pixel.

6.1.1.1 NDVI pós-evento

O NDVI posterior a passagem do tornado é de 25/08/2020, ou seja, 11 dias após a ocorrência. O percurso esteve destacado em áreas esbranquiçadas e espacialmente contínuas, representando a redução do NDVI. O índice de vegetação pós-evento teve melhor visualização entre Ibicaré, Treze Tílias e Tangará, indicado no *buffer* e o rastro estimado em amarelo. A figura 21 exhibe o rastro sobre a área de estudo e na figura 22 foi construído um *buffer* para deixar com maior evidência o percurso do tornado, com valores inferiores a 0,57.

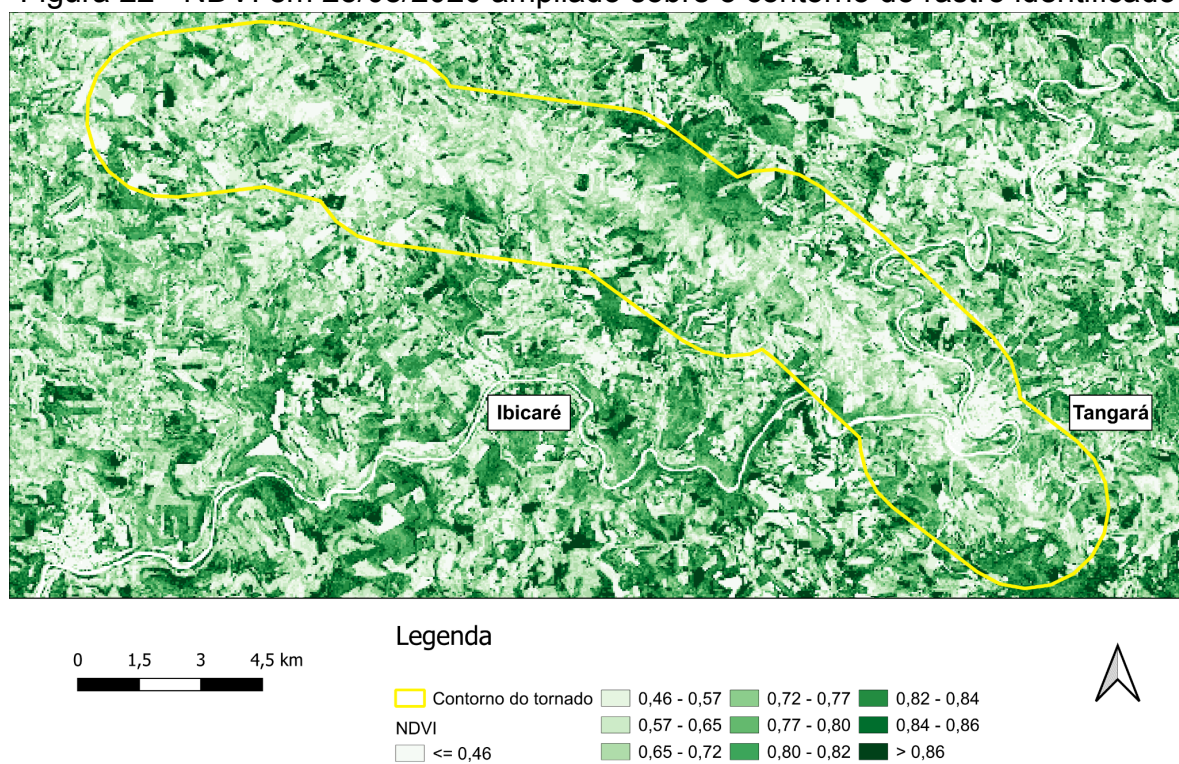
Do centro de Água Doce até são por volta de 13 km até a faixa de danos serem, de fato, detectáveis. Embora haja danos próximo a Água Doce, o rastro não é discernível de modo contínuo, em parte possivelmente por possuir intensidade menor, houve algumas manchas, mas que se assemelha a colheita de culturas, mesmo em locais florestados a assinatura é muito branda, o autor sugere que em parte possa ser, além do uso, devido a largura do tornado nestas porções. Trechos menos evidentes coincide com locais onde a área de cultivo é cortada longitudinalmente, sem matas nas proximidades. Como a imagem é do período de inverno, a taxa de crescimento das plantas tende a ser mais lenta, o que pode ser benéfico para o uso do índice de vegetação.

Figura 21 - NDVI em 25/08/2020 entre Água Doce e Tangará, SC



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

Figura 22 - NDVI em 25/08/2020 ampliado sobre o contorno do rastro identificado

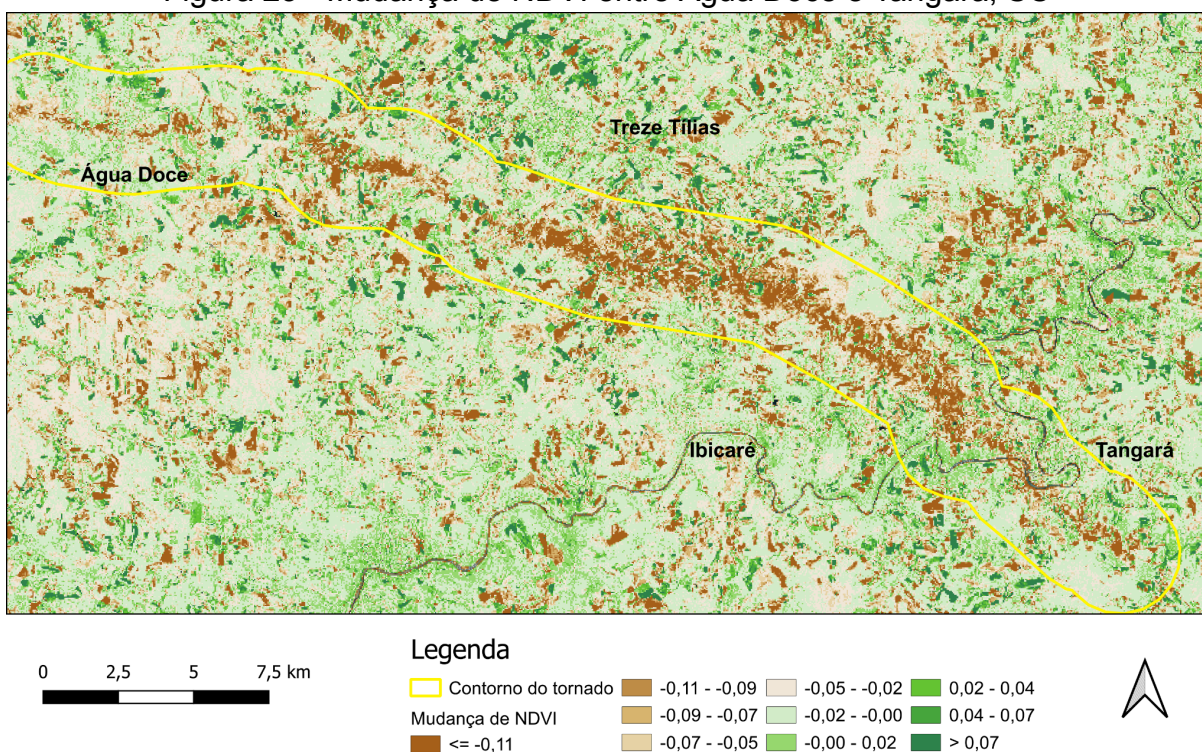


Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.1.1.2 Mudança de NDVI

A imagem da qual foi obtido o primeiro NDVI que serviu de base para comparação posterior ao evento foi do dia 10 de agosto de 2020 (4 dias antes da ocorrência que se deu em 14/08/2020). A imagem que proporcionou o resultado da comparação do NDVI para averiguação do rastro é do dia 25 de agosto de 2020 (11 dias após a passagem do tornado). A distância temporal entre as imagens possui uma latência de 16 dias. A maior parte do trajeto conhecido, divulgado pelo PREVOTS (2023) não descreve como foi construído as informações e totalizou cerca de 40 km. O trajeto descrito por estes permite vislumbrar a largura da destruição, pois o mesmo é apresentado apenas como uma linha. O percurso detectado através da mudança de NDVI exibe uma faixa de valores negativos, indicando a perturbação do tornado bem como outras alterações no decorrer desse período superior a duas semanas. Existe algumas pequenas lacunas sem danos como mostra na figura 23, onde a cobertura tem o predomínio de áreas de cultivos e pastos.

Figura 23 - Mudança de NDVI entre Água Doce e Tangará, SC



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.1.1.3 PCA

A primeira componente exibiu 72,5% da variância de canal utilizado (antes e depois), destacando sobretudo alvos reflexivos, o segundo componente que explica 22,5% da variância total destacou os cursos de rios e indicando a mancha do urbano, enquanto que a terceira componente (CP3) foi a mais importante para esse estudo, porque embora tenha explicado apenas 1,67% da imagem, é a que melhor delineou o rastro de tornado. As demais exibem mais ruídos do produto espectral, porém, a sétima componente é a segunda componente que mais permite a interpretação da assinatura do tornado, a 1, 2, 4, 5 e 8 não exibem nenhuma feição (figura 24):

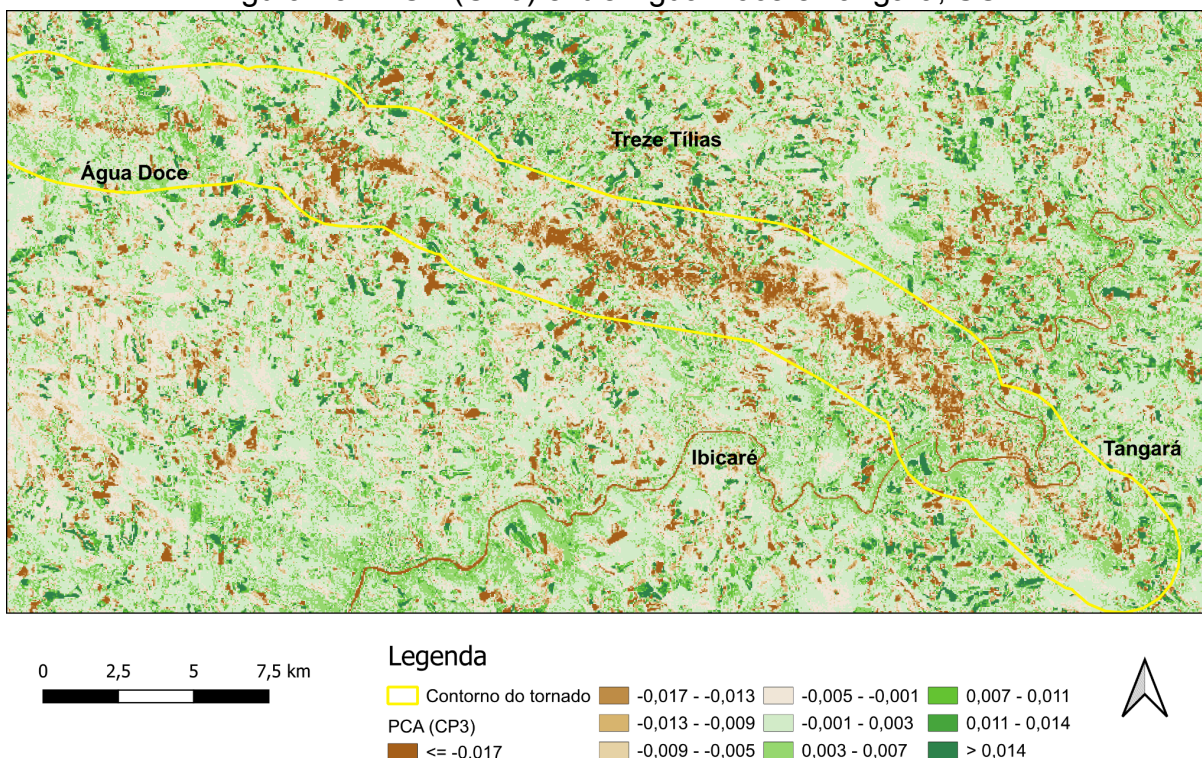
Figura 24 - Resultado do PCA computado no complemento PCA4CD, em vermelho a terceira componente e em laranja escuro a sétima componente



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

O resultado do PCA utilizando a CP3 foi exportado usando o mesmo gradiente de cores do NDVI. Com essa composição os danos da trajetória ficaram também destacados em marrom, assim como na mudança de NDVI houve trajetos sem indicação de danos (figura 25):

Figura 25 - PCA (CP3) entre Água Doce e Tangará, SC



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.1.1.4 Comparação entre NDVI, mudança de NDVI e PCA

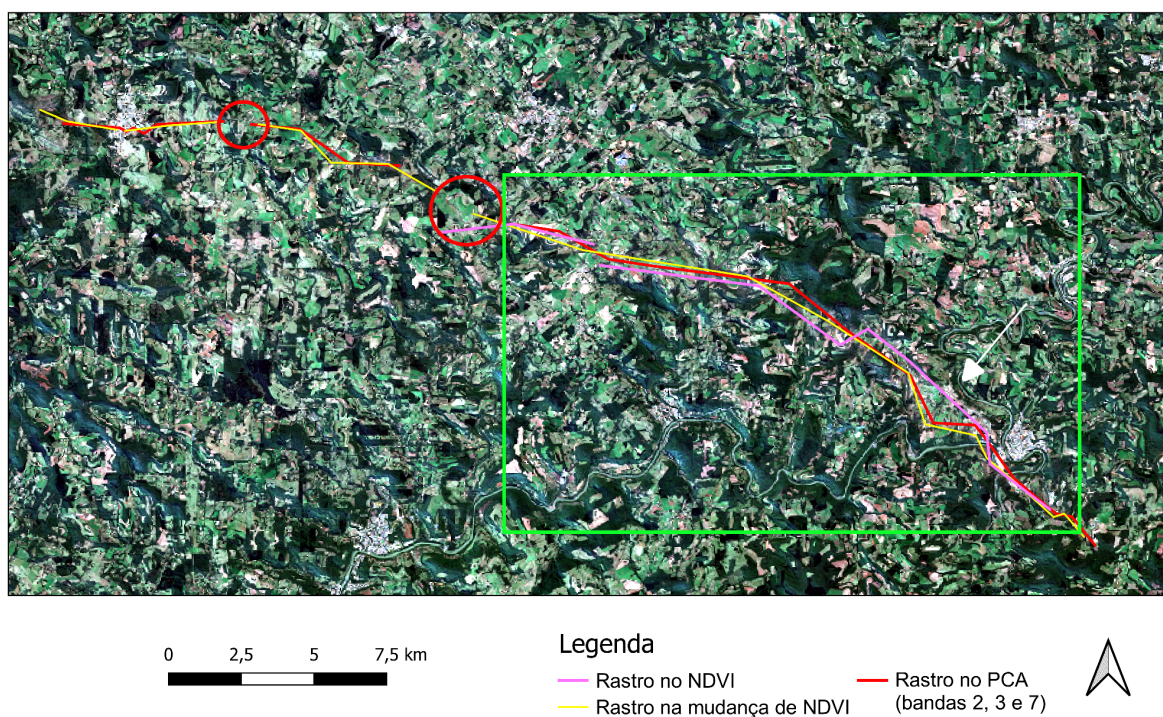
Nos procedimentos utilizados, o NDVI pós-evento foi o que forneceu menos resultados esperados, fornecendo menos de $\frac{2}{3}$ do trajeto visível do tornado de forma clara quando comparado ao PCA e a mudança de NDVI, isso coincide com o que foi observado por Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) o NDVI posterior é útil para áreas amplas e contínuas como porções com vegetação removida e coberta de detritos, embora utilize outros *datasets*. A maior parte do trajeto é rural, variando de uso agrícola, áreas de mata e de menor representatividade escalar: pastagens. Os três municípios (Água Doce, Ibicaré e Tangará) possuem uma população inferior a 10 mil habitantes, utilizar os procedimentos em centros urbanos maiores pode ter resultados um pouco mais distintos entre si. Os resultados devem apresentar diferenças em outras estações, os procedimentos que utilizam o índice de vegetação possuem menor peso no inverno devido ao baixo desenvolvimento dos seres fotossintetizantes (Burow; Herrero; Elis, 2020).

Embora o NDVI posterior ao acontecimento forneça um resultado inferior, o mesmo é importante a se considerar, pois a mudança de NDVI e PCA são aplicadas

duas imagens, o que aumenta a probabilidade, de pelo menos uma delas, terem nuvens em curtos períodos de tempo para a análise multitemporal, o que pode resultar um período longo, como meses.

Na figura 26 abaixo, a área em verde representa a seção onde os três métodos exibiram o rastro, ainda que o NDVI pós-evento não forneça o melhor contraste. Áreas circuladas em vermelho representam áreas de pastagem com vegetação, onde nenhum dos métodos detectou danos, o círculo mais a sudeste também tem maior contribuição da área de cultivo. A seta abaixo indica um desvio maior no trajeto gerado pelo NDVI do que o restante da área dentro do retângulo, isso pode ter acontecido, pois, alterações em cultura podem se assemelhar com os danos de tornados, mas que nos outros procedimentos mantém a continuidade espacial.

Figura 26 - Rastros de tornados entre Água Doce e Tangará, SC obtidos pelo NDVI, mudança de NDVI e PCA

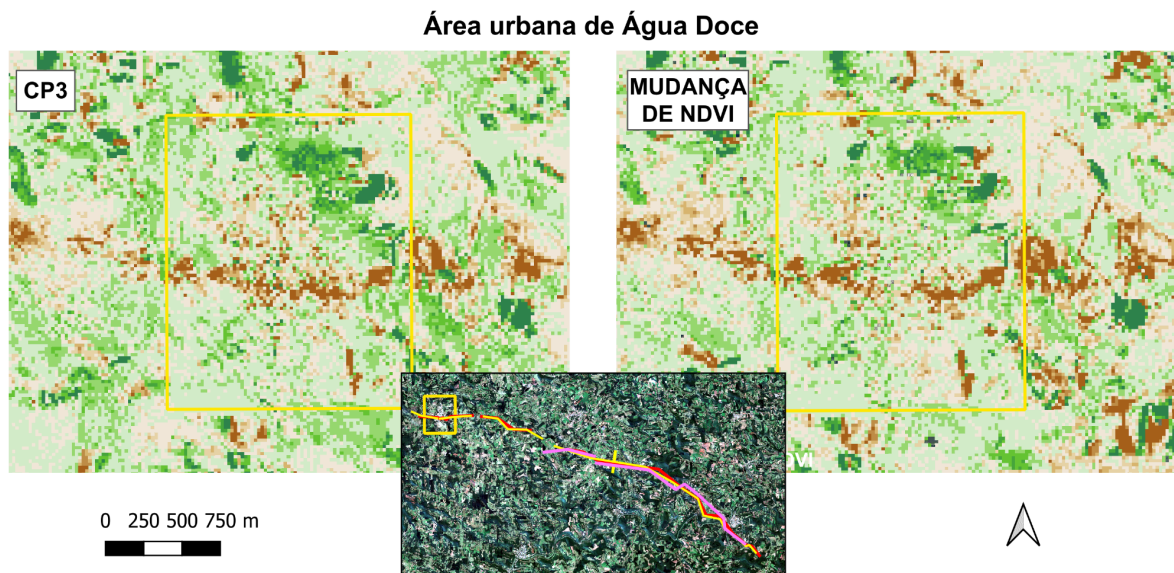


Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

A análise de componentes principais teve um resultado semelhante ao da mudança de NDVI, mas oferecendo melhor assinatura na área urbana de Água Doce, em que o seu centro urbano sofreu diversas avarias. Contudo, quando se

compara o seu entorno ou mesmo dentro da área urbana, os dois métodos não tiveram muitas divergências entre si. A figura 27 a seguir exibe uma maior ampliação sobre a área urbanizada de Água Doce:

Figura 27 - PCA (CP3) e mudança de NDVI na área urbana de Água Doce, SC



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

Combinando os diferentes métodos e tendo como base o percurso estimado por meteorologistas (de Água Doce a Tangará), obtém ao todo 41,29 km de percurso, somando pequenas diferenças na camada vetorial, em locais em que possivelmente houve o início do tornado e sua dissipação, levando em conta especialmente os dois procedimentos que melhor definiram o rastro. Há seções em todos os procedimentos na qual o rastro não é exibido. É possível que o rastro real seja maior do que o observado pelo processamento digital das imagens de satélite. A mudança de NDVI ofereceu o maior comprimento com 37,89 km, na sequência vem o PCA com 3,55 km a menos (34,34 km), enquanto o índice de vegetação posterior a ocorrência do fenômeno registrou de forma mais clara apenas $\frac{3}{4}$ do trajeto total estimado (24,46 km), 13,43 km a menos. Parte dessa diferença vem de descontinuidades (“ilhas” de danos pela qual o tornado foi perdendo sua intensidade e também deve ter tido influência da rugosidade e resistência da superfície) na percepção do rastro, portanto, a determinação das trilhas por pixels danificados deveria fornecer diferenças menores. A tabela 2 retrata o resultado da interpretação visual:

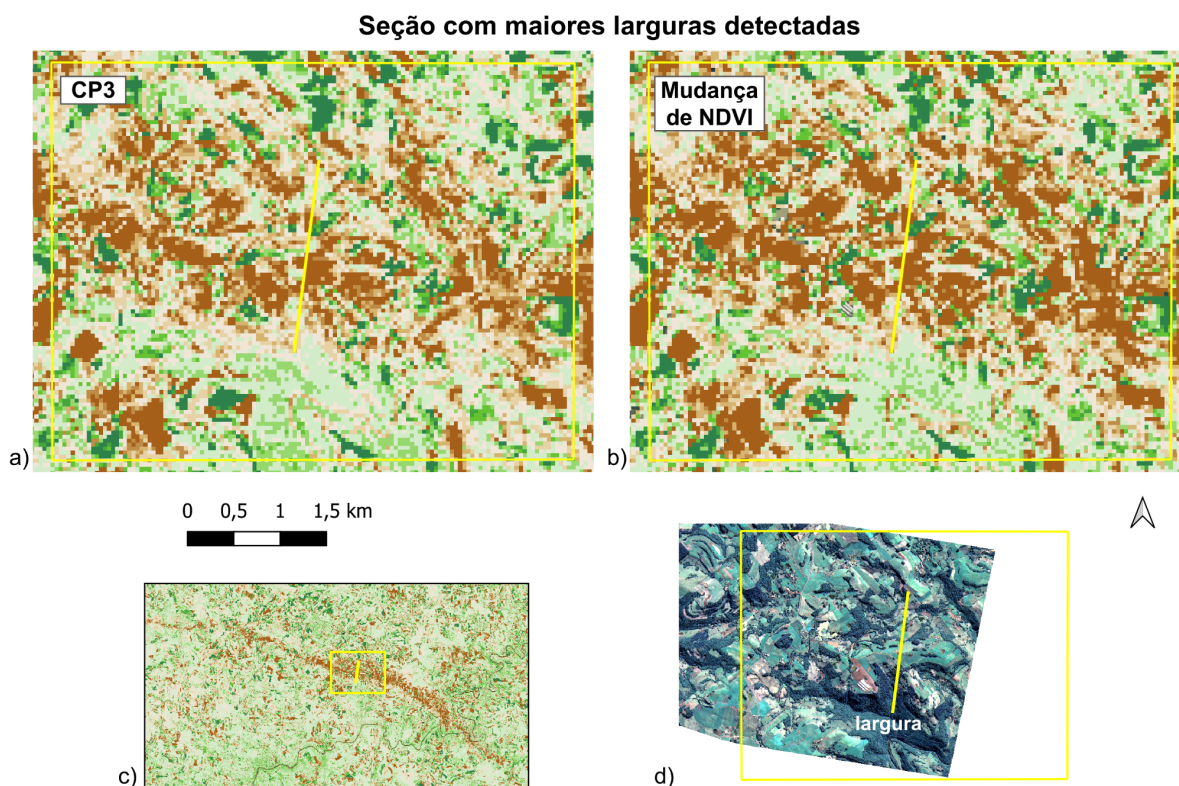
Tabela 2 - Comprimento estimado do rastro de tornado entre Água Doce e Tangará, SC ocorrido em 14/08/2020 através dos diferentes procedimentos utilizados

Método	Comprimento estimado (em km)	Comprimento estimado em % em relação a trajetória combinada aproximada
NDVI	24,46	59,23
Mudança de NDVI	37,89	91,77
PCA	34,34	83,14

Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

Conforme alguns estudos sugerem, a largura de uma trilha tornádica pode ser mais difícil de detectar do que o comprimento, aferido em estudos como o de Molthan *et al.* (2014) por exemplo, enfatizando esse aspecto. Para a seção com a largura máxima detectada e observada na figura 27.c foi utilizado apenas a CP3 (figura 26.a), a componente que forneceu a melhor assinatura do tornado para ter um melhor parâmetro com a mudança de NDVI (figura 26.b), que são muito próximos visualmente devido a elevada explicação da variância entre os dois períodos para os dois métodos como mostrado anteriormente. Tendo em vista que em locais florestados possuem melhor identificação, foi utilizado, dentre outros dados, a imagem WPM/CBERS 4-A pancromática com fusão das bandas espectrais da faixa do visível de modo a auxiliar, levando em conta a “contaminação” dos terrenos cultivados que leva a maior variabilidade espacial e descontinuidades da perturbação ocasionada pelo tornado e os ventos decorrentes. 2,07 km de largura é verificável, o que o torna relativamente largo, valores próximos em comprimento e largura em um dos episódios relatados por Dyer (1988) no Paraguai, porém esse evento especificamente, foi estimado por fotografia aérea.

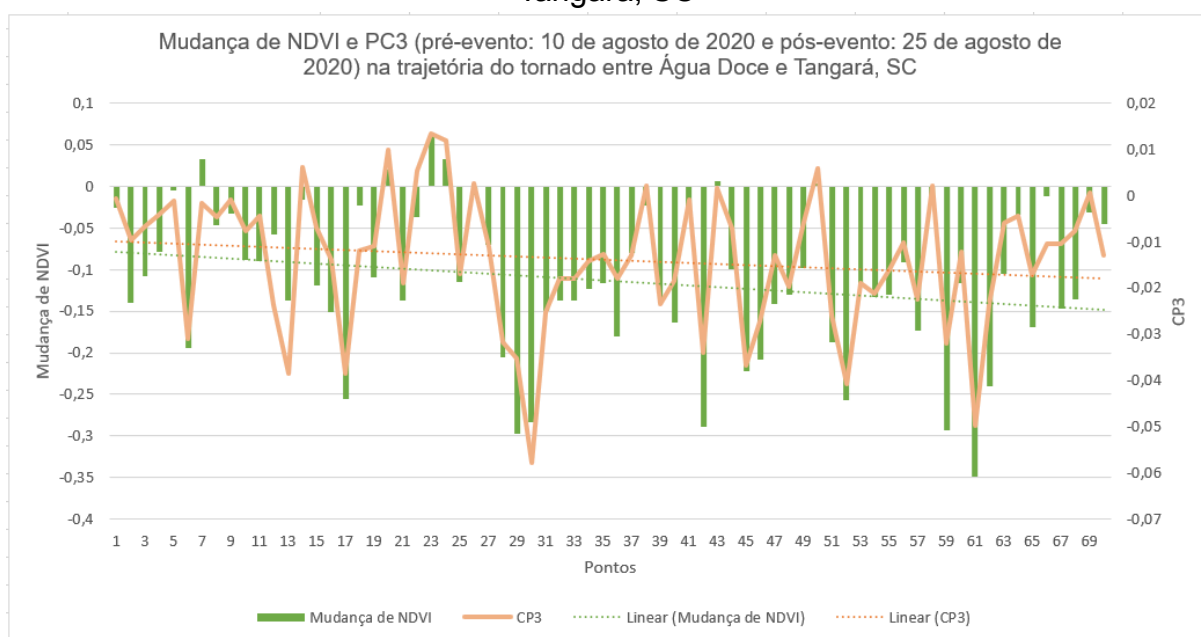
Figura 28 - Seção com maiores larguras detectadas. Em “a” na CP3, em “b” na mudança de NDVI, na letra “c” o destaque da seção na área de estudo e em “d” a imagens WPM/CBERS 4-A de 04/09/2020 mostrando a cobertura presente



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. WPM/CBERS 4-A, 2025. Org.: O autor, 2025.

Com o rastro da mudança de NDVI e a componente da PCA que tiveram o maior trajeto detectado, foram amostrados 70 pontos aleatórios no percurso identificado, embora sejam princípios diferentes, a PC3 reproduziu assinaturas semelhantes, com a seleção de pontos foi possível avaliar melhor as diferenças em pequenas variações espaciais, em que na maioria das vezes se observa diferenças mais nítidas entre os métodos (figura 29).

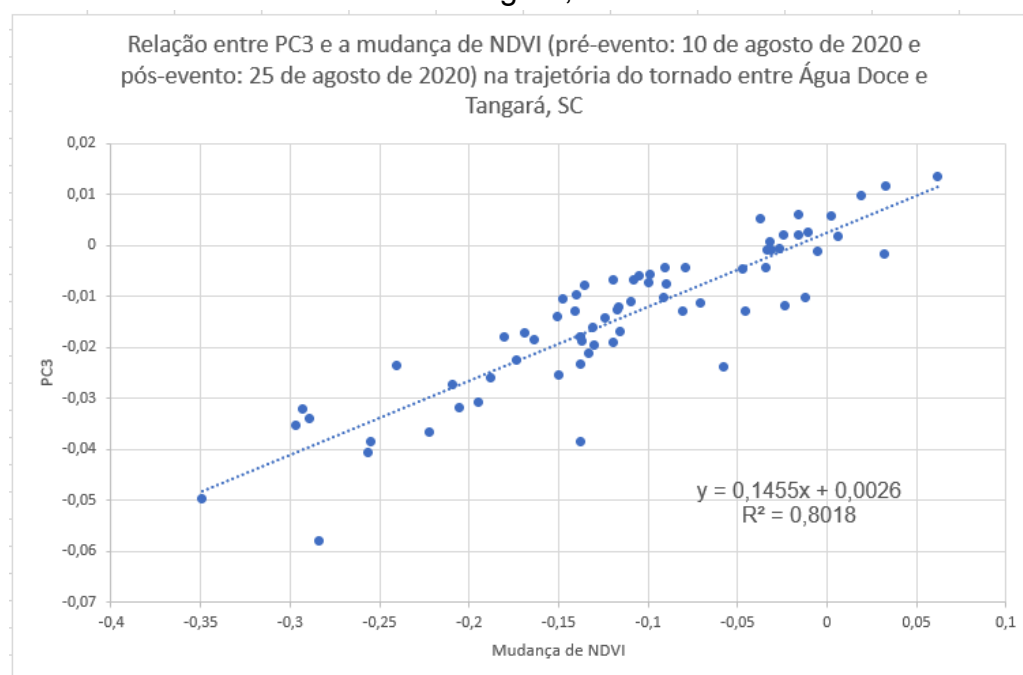
Figura 29 - Mudança de NDVI e PC3 (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Água Doce e Tangará, SC



Fonte: O autor, 2025.

A mudança de NDVI com a PC3 possuiu uma forte correlação (0,9), em parte esperadas, pois as alterações mais representativas em quantidade são de áreas verdes (cultivo, floresta e pastagem) e a seleção da componente com maiores alterações em decorrência do tornado reflete isso. A mudança de NDVI em que as maiores perdas de vegetação ou que de outro modo desencadearam maior absorção no vermelho, também possuíam na maioria das vezes valores mais baixos da terceira componente. Valores mais baixos ou mais altos de cada pixel (o sinal indica a direção) em cada componente principal na PCA representam maior variância para a componente analisada, sendo que valores negativos corresponderam a áreas mais perturbadas, assim como menores valores de mudança de NDVI, sendo dessa forma, diretamente proporcionais. Como o valor negativo representa a direção tomada, ou seja, possui um significado apenas estatístico e a PCA dependente das bandas de entrada e o estimador utilizado, a correlação positiva das variáveis dos dois métodos como nesse caso, em outras ocasiões, pode passar para uma correlação negativa, verificado com experimentos para essa pesquisa e evento, todavia se pode estabelecer parâmetros para cada estudo de caso. O coeficiente de determinação foi de 0,80, indicando que a variação do CP3 e a mudança de NDVI são fortemente explicadas entre si (figura 30).

Figura 30 - Relação entre PC3 e a mudança de NDVI (pré-evento: 10 de agosto de 2020 e pós-evento: 25 de agosto de 2020) na trajetória do tornado entre Água Doce e Tangará, SC



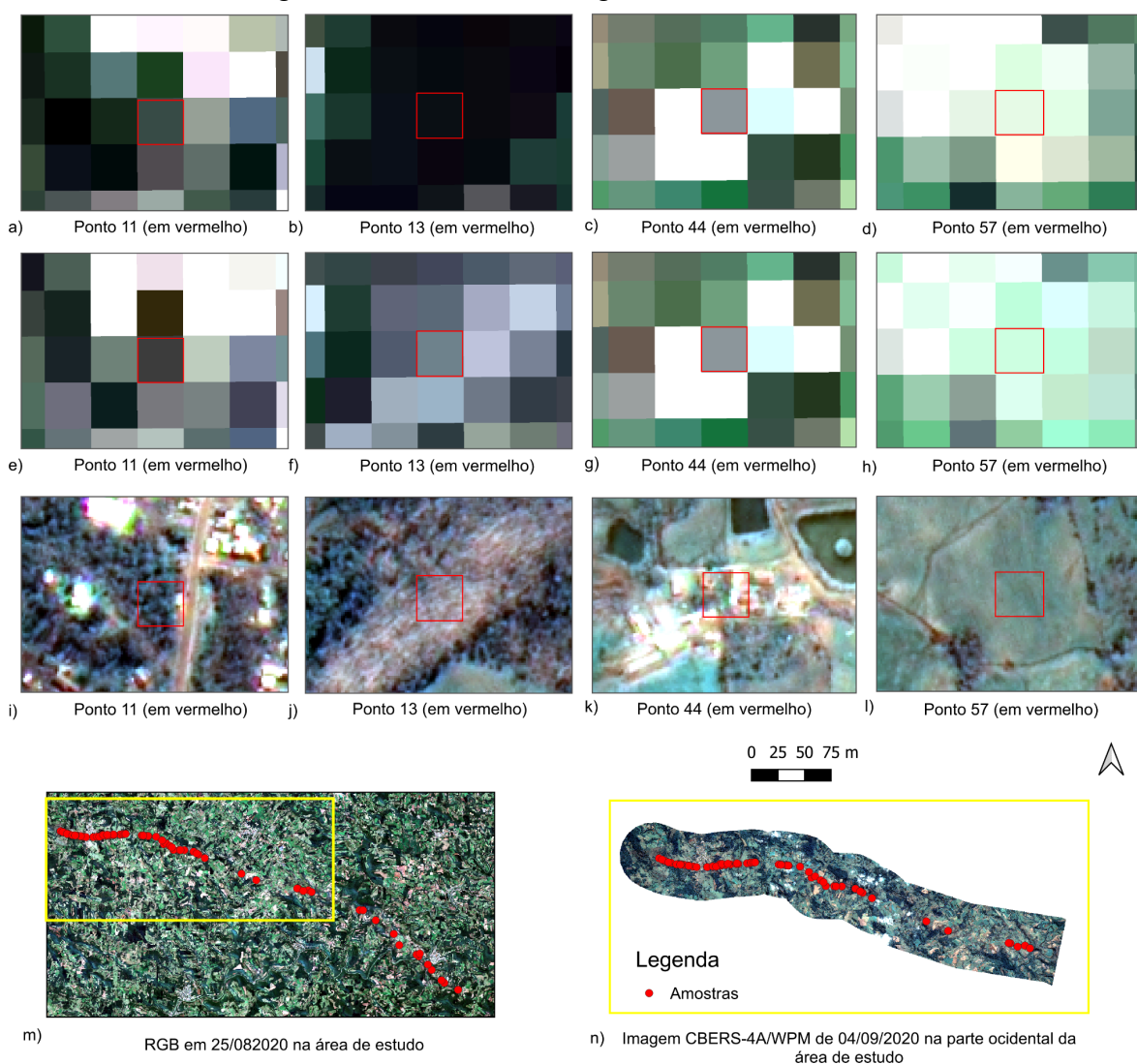
Fonte: O autor, 2025.

Levando em conta os pontos amostrados, em áreas em que próxima a dimensão do pixel a variabilidade é considerável, a mudança de NDVI com PCA possuem um resultado próximo (tal como o ponto 44). Isto sugere capacidade similar de determinar uma cicatriz de tornado nessas situações em que também respondem a pequenas mudanças na superfície que aumentam o grau de dificuldade na detecção do rastro na análise multitemporal (Marcelino, 2007). Em áreas de biomassa densa, com elevada perda, mas que mantém indivíduos arbóreos, ou seja, folhagem representativa, o primeiro tem melhor resposta, em pixels que o solo se tornou desnudo e detritos orgânicos o PCA possui melhor correspondência, o ponto 13 retrata isso, o mesmo para áreas urbanas, possivelmente foi o que Burow, Herrero e Elis (2020) encontrou em suas amostras na qual classe de uso de solo do tipo floresta e 57 tenderam em média a menores valores com a componente utilizada. O ponto 47 teve as maiores mudanças detectadas, especialmente na mudança de NDVI, no entanto, era cultivo agrícola.

Como os procedimentos revelam mudanças na superfície, foi verificado qual era o uso e ocupação do solo em cada ponto em específico para observar diferenças no comportamento descrito acima e também exibido na figura 29. Devido a

escala grosseira para porções não homogêneas, apesar de ser inferido pela textura e tonalidade, de modo a auxiliar a verificação, foi usado imagens do CBERS 4-A WPM da banda pancromática com resolução espacial de 2 m fusionadas com as imagens multiespectrais do espectro visível para o dia 04/09/2020 (figuras 31.i, 31.j, 31k e 31l), disponíveis para a parte inicial do trajeto (figura 31.j) correspondente aos municípios de Água Doce, Treze Tílias e Ibicaré, levando em conta alterações mínimas para análise apenas interpretativa, subsidiando a melhor avaliação a nível do subpixel, observação do uso do solo e da área circundante que também influencia no valor do pixel.

Figura 31 - Seleção de alguns pontos amostrais com comportamentos e valores distintos entre a mudança de NDVI e PCA. De “a” para “d” (primeira linha) - imagens MSI/Sentinel-2 de 10/08/2020, de “e” para “h” (segunda linha) - imagens Sentinel-2 de 25/08/2020 imagens e de “i” a “l” = imagens WPM/CBERS 4-A de 04/09/2020.



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. WPM/CBERS 4-A, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.2 TORNADO ENTRE NOVA CANDELÁRIA E CAMPO NOVO, RS (12/07/2023)

O evento ocorreu em Sede Nova, RS e foi registrado em 12 de julho de 2023. De acordo com Ribeiro (2023) se trata de um evento de tornado com base em cicatrizes observadas em imagens de satélite, embora não haja imagens divulgadas destas. Na data do ocorrido, ventos mais intensos são ocasionados pela passagem de um ciclone extratropical, enquanto que, no dia anterior, 11 de julho, o leste do Rio do Grande do Sul estava sob influência de uma intensa área de baixa pressão atmosférica. A maior parte das residências e demais edificações do município de Sede Nova foram de algum modo afetadas (cerca de 80% da cidade), incluindo a destruição de casas e propriedades. Diversas estruturas de suporte, sejam metálicas ou de madeira foram derrubadas, as imagens também mostram partes de concreto danificadas, bem como postes e árvores (Rádio Alto Uruguai, 2023; Siezemel, 2023). Segundo Alonso (2023) danos no campo também foram observados no município essencialmente agrícola, entre elas, um galpão de ordenha que foi destruído. Como um todo, a prefeitura estimou uma perda que ultrapassa 100 milhões de reais e mais de 500 famílias atingidas. Assim como no outro evento, no dia seguinte, 13 de julho, o município decretou estado de calamidade pública. Abaixo, é possível observar danos condizentes a EF3 na Escala EF (figura 32):

Figura 32 - Danos observados em Sede Nova, RS. Em “a” um galpão completamente destruído na área rural e em “b” uma casa destruída

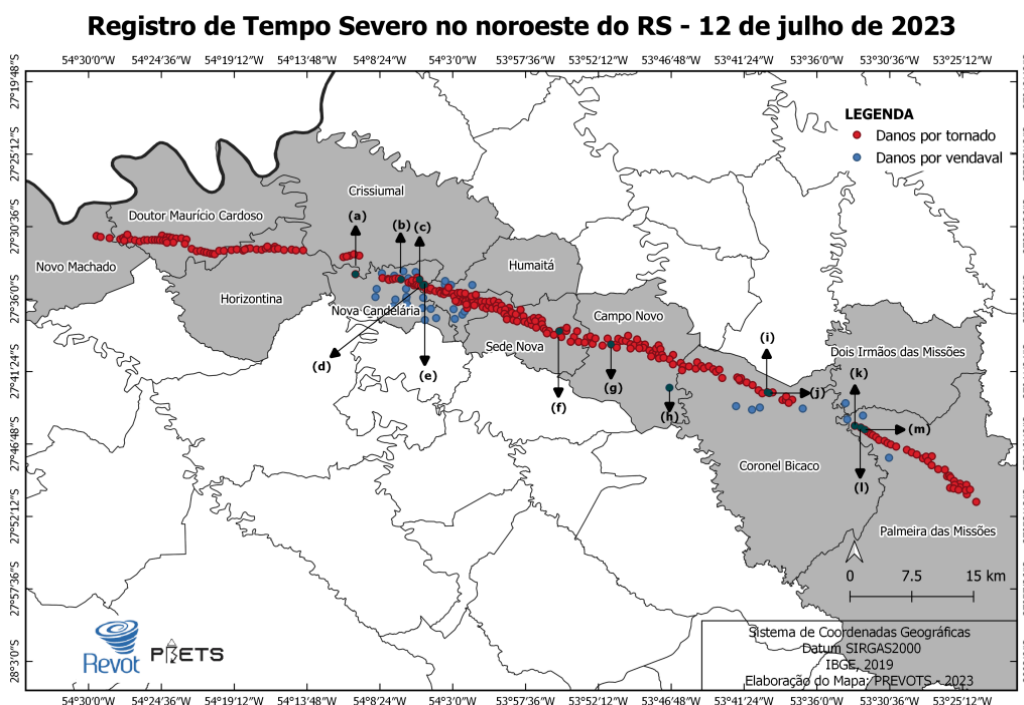


Fonte: RBSTV, 2023.

O PREVOTS indicou danos por tornados em pelo menos 10 municípios do noroeste gaúcho, os autores sugerem a possibilidade de ter ocorrido mais de um

tornado (Ribeiro, 2023). Na figura 33, os pontos em vermelho indicam danos do fenômeno:

Figura 33 - Danos causados por tempestade severa no noroeste do Rio Grande do Sul em 12 de julho de 2023

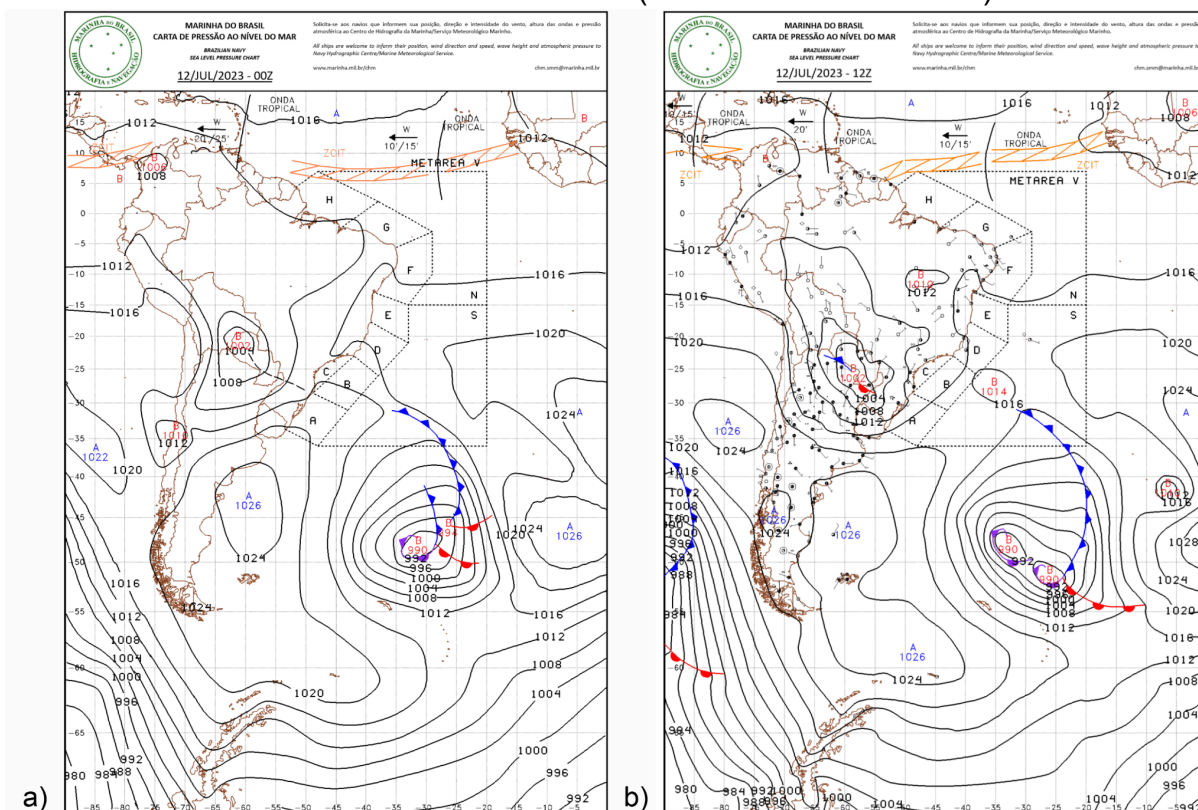


Fonte: PREVOTS, 2023.

No dia 12 de julho de 2023 não havia um contraste significativo na direção do vento, mas o cisalhamento vertical era ocasionado pela diferença da velocidade pelo perfil atmosférico. A imagem do radar meteorológico para a ocasião não foi encontrada disponível publicamente e do satélite ambiental GOES-16 (canal 14: infravermelho), não estavam mais disponíveis.

As cartas sinóticas da Marinha (figura 34) exibem a presença do ciclone extratropical intenso com seu centro apresentando pressão atmosférica de 990 hPa, esse núcleo de baixa pressão estava associado a uma frente fria ocasionado tempo severo com contribuição de outro centro de baixa pressão no Paraguai intensificando em direção ao noroeste do Rio Grande do Sul e de ventos com altas temperaturas vindas do norte do Brasil, contribuindo com a queda da pressão atmosférica e a formação de tempo instável como havia indicando a previsão (Climatempo, 2023).

Figura 34 - Carta sinótica do Brasil em 12/07/2023. Em “a” às 00Z (21 horas no horário local e em “b” às 12Z (9 horas no horário local)



Fonte: CHM, 2023.

6.2.1 Verificação da atividade tornádica

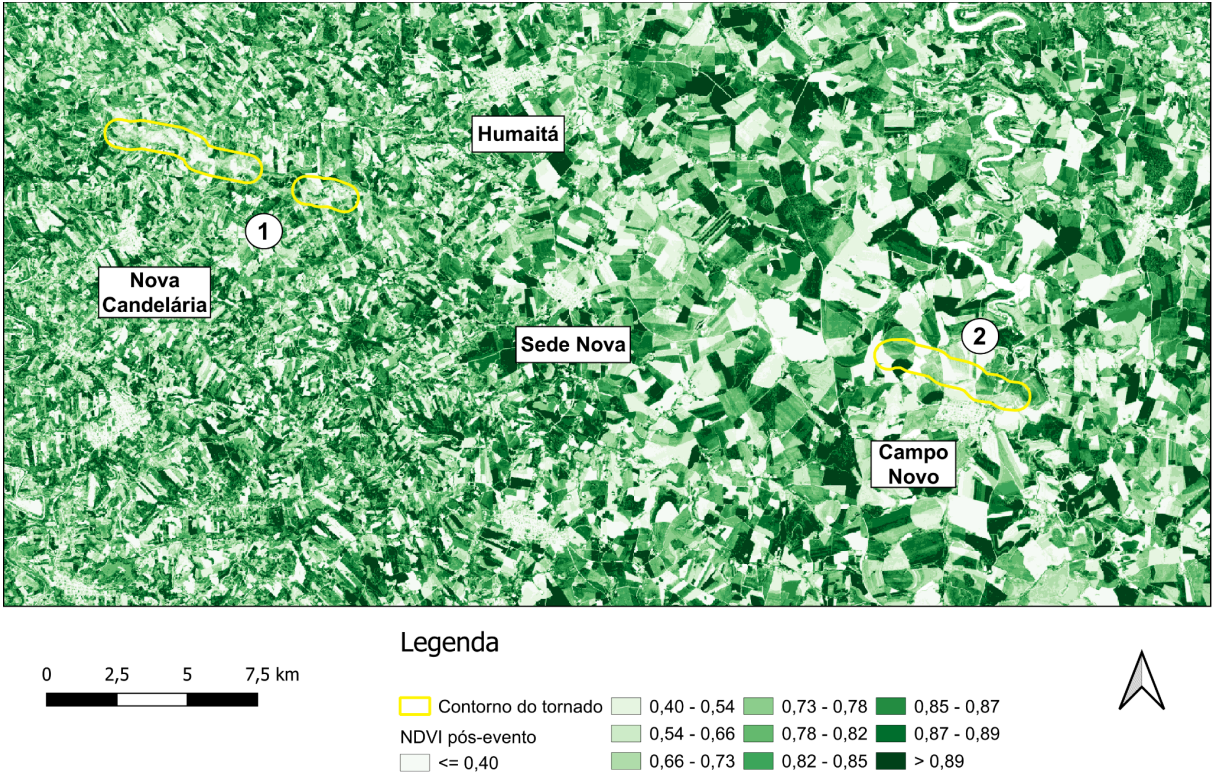
6.2.1.1 NDVI pós-evento

O NDVI após a passagem do tornado corresponde a 19 de julho de 2023, uma semana de latência em relação a ocorrência do fenômeno. Ao todo, 6,32 km do trajeto foram identificados. Como observado no tornado em Água Doce e Tangará e literatura, vide Molthan *et al.* (2014) e Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002), há maior dificuldade de detectar o percurso sem a abordagem de um par de imagens de satélite que expresse as modificações radiométricas do antes e pós-evento.

Os danos observados mais claramente, se localizam entre os municípios de Nova Candelária (localidade de Santa Lúcia) e Humaitá como mostra a figura 35, com 2 segmentos que foram ampliados na figura 36 e do terceiro segmento na figura 37. A interpretação foi auxiliada pela presença de matas de galeria, o uso associado à agricultura nesse caso, também destacou, indicando alteração mínima nessas

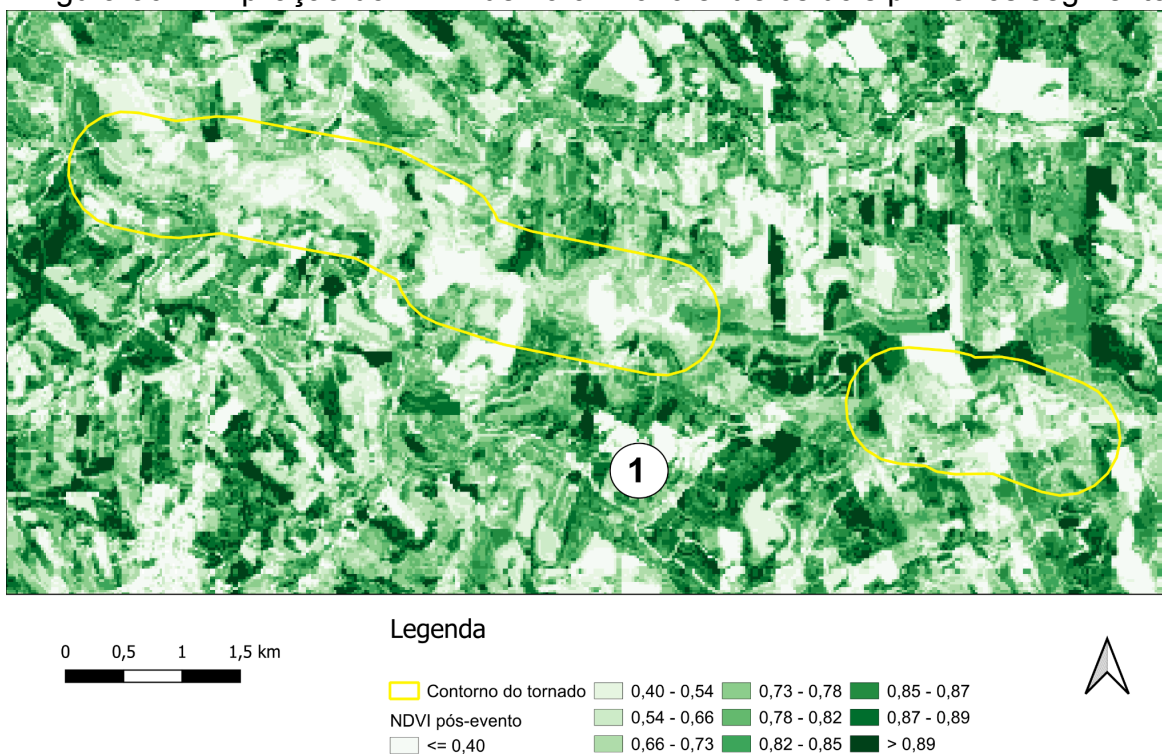
seções identificadas. Apesar do trajeto se dividir em 3, de acordo com o mapeamento exposto por Ribeiro (2023), se trata do mesmo tornado.

Figura 35 - NDVI em 19/07/2020 entre Nova Candelária e Campo Novo, RS



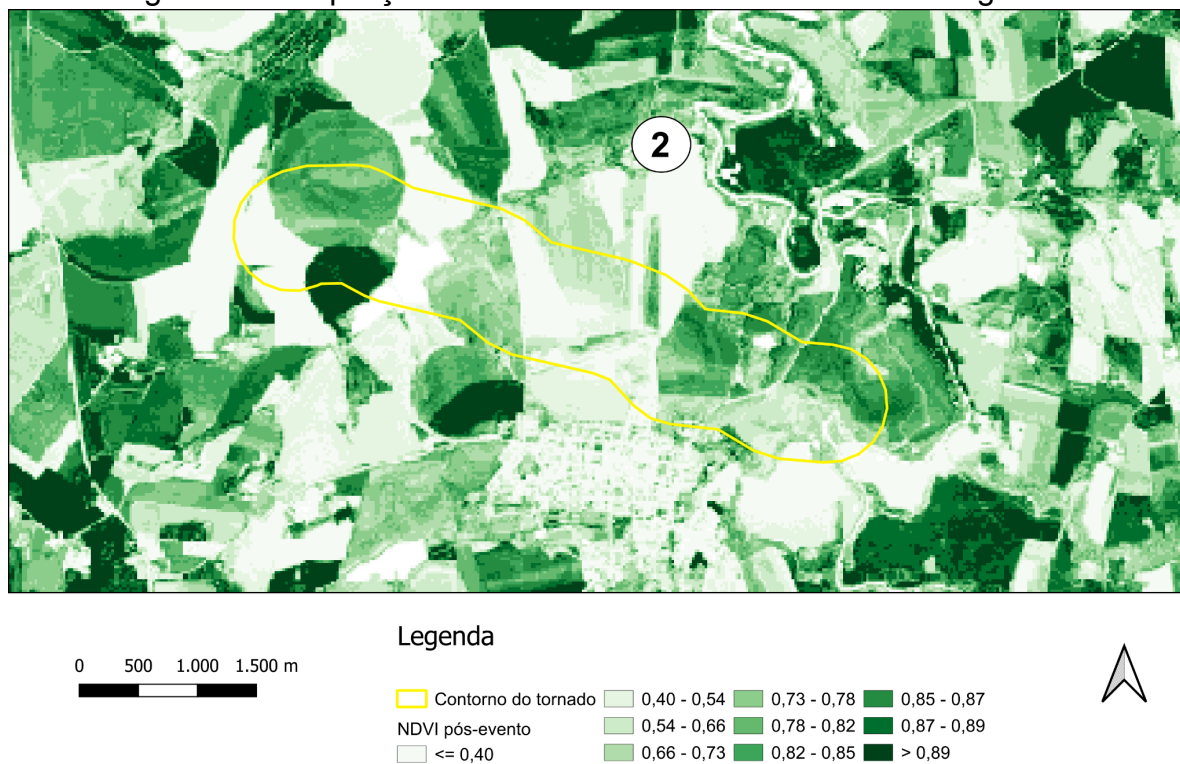
Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

Figura 36 - Ampliação do NDVI de 19/07/2020 entre os dois primeiros segmentos



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

Figura 37 - Ampliação do NDVI de 19/07/2020 no terceiro segmento

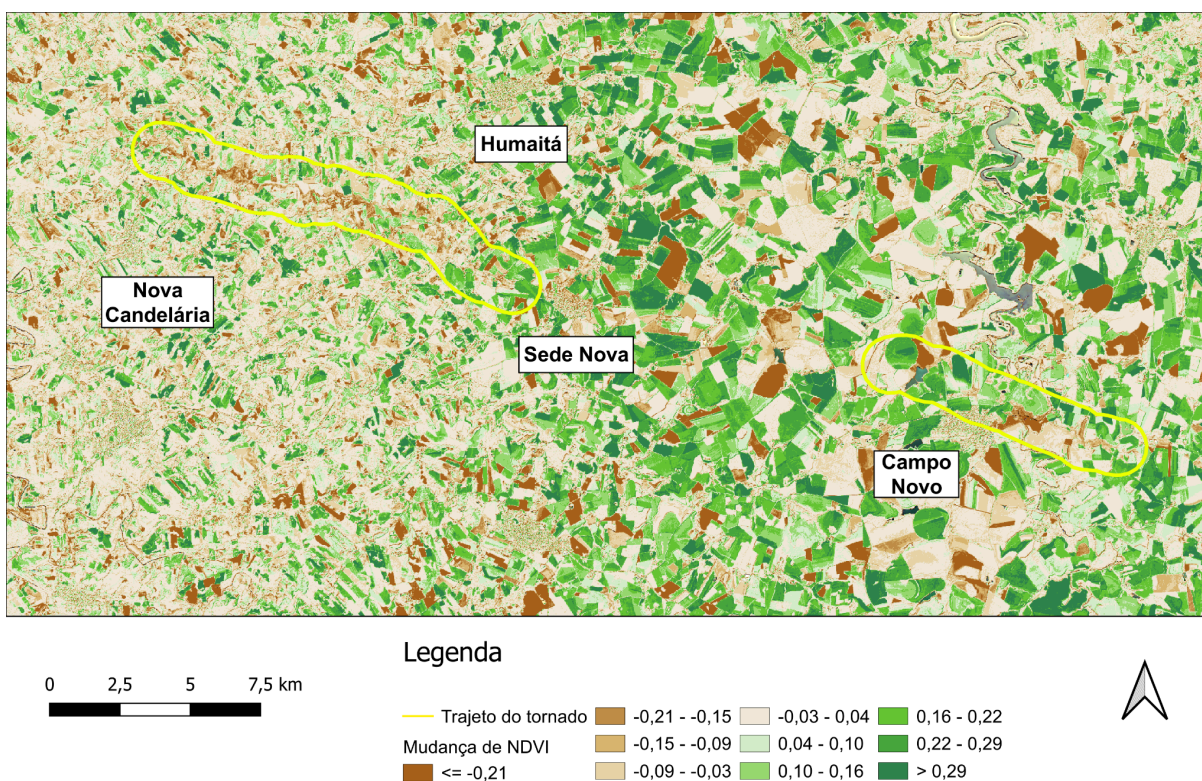


Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.2.1.2 Mudança de NDVI

A diferença do índice espectral do NDVI do pós-evento (19/07/2020) com o *raster* pré-evento (04/07/2020), fornece uma janela de tempo de 15 dias, com 7 e 8 dias respectivamente, de distância da ocorrência de tornado. Como mostra a figura 38, trajetória detectada foi de 22,52 km, sendo a maior parte do trajeto detectado entre Nova Candelária e Humaitá, conforme os tons marrons de oeste-noroeste (WNW) a leste-sudeste (ESE), houve também uma outra parte do percurso detectada ao norte de Campo Novo, diferente da cicatriz maior e mais destacável na mudança do NDVI, esta parte do trajeto apresentou uma faixa de valores menores no NDVI subtraído das duas datas. Nessa assinatura mais discreta e de menores dimensões à sudeste, parte da cicatriz não teve queda no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, mas indicada por uma faixa estreita de redução em verde claro que durante o deslocamento, mais à sudeste é destacado novamente com uma redução do índice, indicando perturbação na reflectância do infravermelho próximo como esperado.

Figura 38 - Mudança de NDVI entre Nova Candelária e Campo Novo, RS

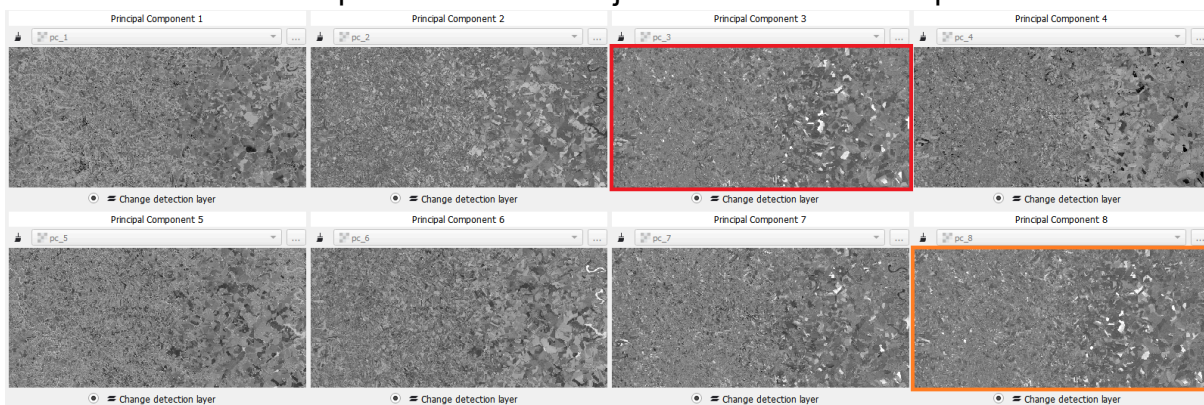


Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.2.1.3 PCA

Como a PCA é ordenada da maior para menor variância, a primeira componente explicou 58,8% da variância da área definida, destacando as principais diferença de brilho na imagem: vegetação arbórea densa, pastagem/agricultura e áreas urbanas. A segunda componente por sua vez explicou 27,28%, destacando principalmente cursos d'água e áreas agrícolas. A terceira componente (CP3) em contrapartida, revela 8,32% da variância total, sendo a componente que melhor detectou o rastro, ao mesmo tempo que, a oitava componente com uma variância total de apenas 0,21%, teve um resultado próximo, com um baixo ruído de fundo, artefatos nas componentes que não são das atribuições físicas da superfície (figura 39).

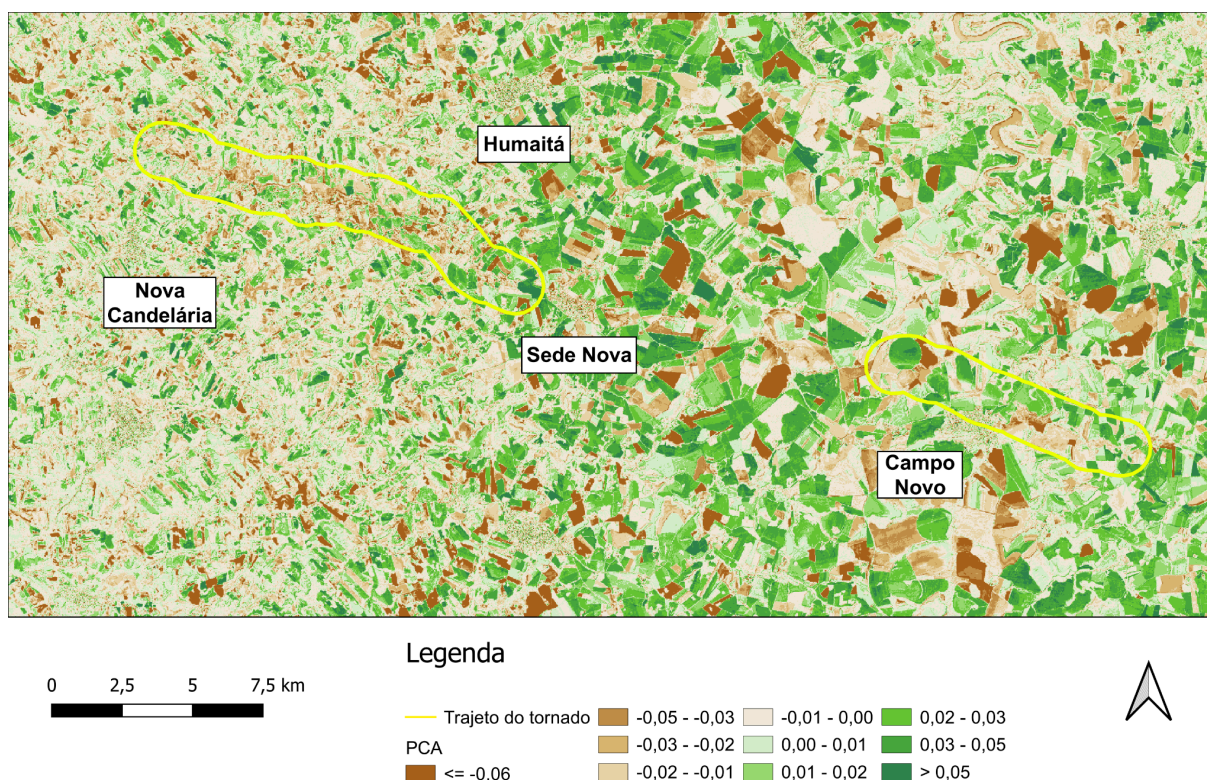
Figura 39 - Resultado do PCA computado no complemento PCA4CD, em vermelho a terceira componente e em laranja escuro a oitava componente



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025; SMBYC, 2025.

O PCA computado foi exportado, sendo que a terceira componente é apresentada na figura 40, na qual as cargas negativas representam a assinatura tornádica e demais alterações principalmente ao cultivo, devido ser uma região essencialmente agrícola, conforme observado nas imagens.

Figura 40 - PCA (CP3) entre Nova Candelária e Campo Novo, RS



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025. SMBYC, 2025. Org.: O autor, 2025.

6.2.1.4 Comparação entre NDVI, mudança de NDVI e PCA

Assim como no evento de Água Doce, a PCA e mudança de NDVI foram efetivamente mais eficazes na detecção de rastro e novamente conforme Yuan, Dickens-Micozzi e Magsig (2002) e Molthan *et al.* (2014) com um papel desempenhado pelo NDVI pós-evento inferior na capacidade de detectar a cicatriz do tornado, trazendo indícios que estejam nas categorias inferiores na Escala EF. Uma faixa de ventos de menos intensidade associada pode não ter distúrbios significativos no ambiente com pequenos rearranjos na área afetada (galhos quebrados, dentre outros) não captados pelo sensor (Molthan *et al.*, 2014). Em muitas partes do trajeto, envolveu a habilidade de identificar os rastros. Descontinuidades são comumente encontradas, elas também estão relacionadas a áreas com maior estreitamento dos danos observados e faixas de NDVI com valores distintos, não considerando outros aspectos.

Ambos os eventos ocorreram no inverno, alguns estudos como Kingfields *et al.* (2017) considerando que a diferença sazonal é pouco abordada, afirmam que a

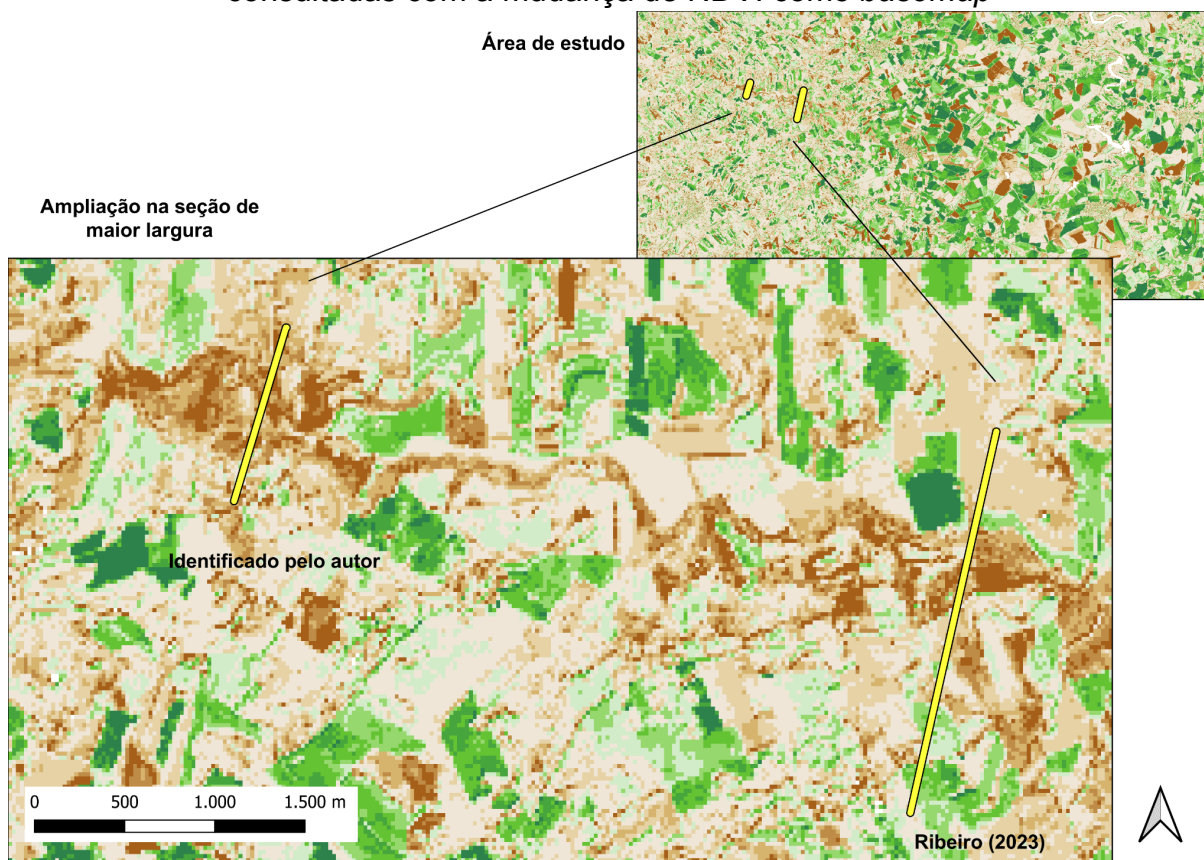
reflectância no infravermelho próximo é maior comparada com as estações posteriores que concentram a maioria das ocorrências de tornados, sendo menos detectável o percurso. Um dos fatores envolve o translado do vórtice: velocidade radial e tangencial e da velocidade de deslocamento, tendo um comportamento variável e de acordo com a especificidade local e saúde da vegetação. O modelo físico aplicado por Holland, Riordan e Franklin (2006) para simular quedas de árvores mostra que a direção de queda dos pinheiros muda com a velocidade do deslocamento, se alinhando com a tempestade e alternado para o lado direito do percurso do tornado com aumento da componente radial. Ainda conforme este estudo, quanto maior a velocidade do vento mais assimétrico se torna os padrões de danos e mais indivíduos serão afetados, mas espera-se uma redução de área total pois a componente tangencial tende a queda. Outras contribuições com pesos distintos dizem respeito aos tipos de cobertura do solo, o comportamento espectral nos arredores da face oposta da área urbana e o material orgânico e das edificações acumulado sobre a superfície da terra (Kingfields *et al.* 2017). Com o material documentado detalhadamente em campo, seria útil para análise dessa constatação.

Neste evento tornádico não foi observado queda completa de matas inteiras que estavam na trilha dos tornados e mais uma vez, como observado na ocorrência em Tangará, Santa Catarina, por não ter escavação do solo como sugere o primeiro estudo de caso, a mudança de NDVI obteve uma leve vantagem comparado com a PCA. Algumas seções menos discerníveis levaram em conta os pontos de danos apresentados por Ribeiro (2023), embora não haja maiores detalhes sobre sua origem, portanto, o comprimento estimado também tem a viés de um mapeamento anterior e devido as semelhanças e limites menos definidos é mais difícil nesse estudo de caso, diferenciar a mudança de NDVI e a PCA com a CP3, portanto, foram assumidos comprimentos aproximados na mesma ordem, com nuances observados em poucas dezenas de metros. Nesse caso, poderia considerar que na visão geral, ambos os métodos tiveram um resultado muito próximo, mesmo nas descontinuidades, vale ressaltar também que não houve rastro detectado na área urbana, provavelmente indicando intensidade de ventos menores bem como bordas com mudanças mínimas na superfície terrestre. Além disso, é importante destacar a maior incipiência do uso de uma imagem de único dia para detectar área danificada.

Com base na figura 33 anterior referente ao registro do tempo severo no noroeste do Rio Grande do Sul em 12 de julho de 2023, considerando apenas o trajeto central entre Nova Candelária e Coronel Bicaco (município a sudeste de Campo Novo), não contabilizando os percursos laterais separados por lacunas superiores a 2 km sem danos plotados em Ribeiro (2023). Tendo como base esse mapeamento, cerca de 42,22% da trajetória central que traz um percurso quase contínuo de 53,34 km de danos que se concentra a área de estudo, foram detectadas pelos meios de detecção de mudanças (mudança de NDVI e PCA) e 11,84% apenas com a inspeção do NDVI pós-evento. Contabilizando o total, o que inclui os trajetos laterais na qual, possivelmente contenha áreas sem danos ou com ventos inferiores a 137 km/h (EF0), corresponderia 18,95% da trajetória com a detecção de mudanças, enquanto que, o NDVI pós evento identificou 11,84% do trajeto.

Como mostra a figura 41, algumas seções do trajeto sugerem larguras máximas de pelo menos 872,65 m a 1 km com ajuda da identificação de perdas superficiais por vegetação densa. De acordo com o mapa exposto por Ribeiro (2023), os centros plotados permitem estimar aproximadamente 2,2 km de largura máxima, em setores mais a sudeste, onde a mudança fenológica mascara mais veemente a área de danos contíguos.

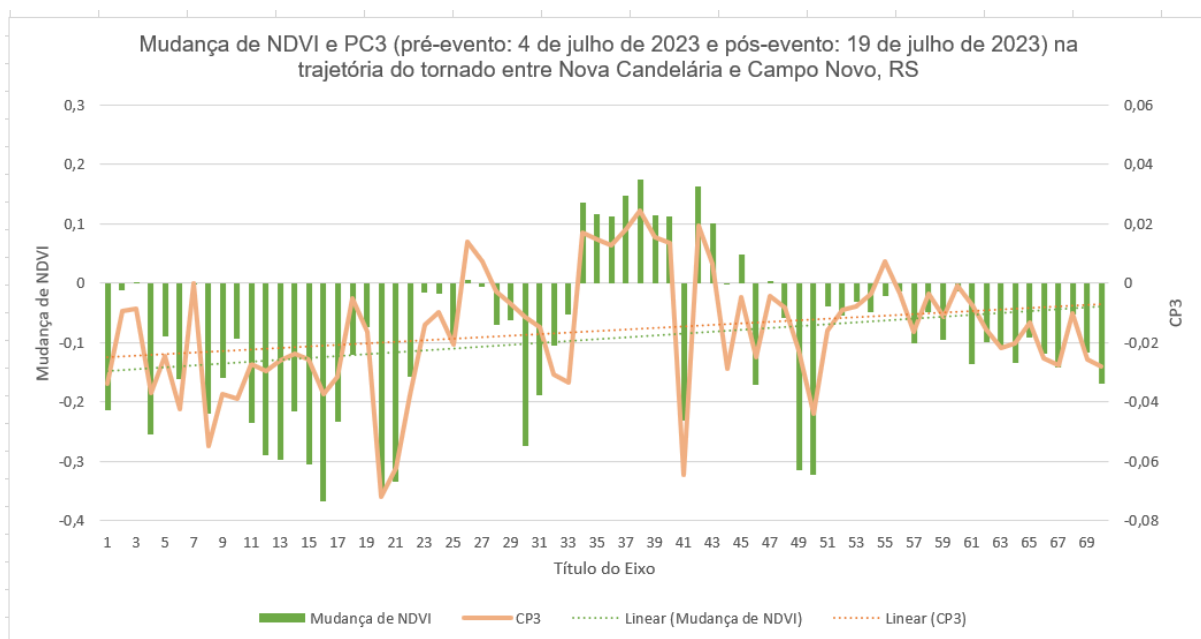
Figura 41 - Maiores larguras identificadas pelos procedimentos utilizados e fontes consultadas com a mudança de NDVI como *basemap*



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025; Ribeiro, 2023. Org.: O autor, 2025.

Para a linha que representa a cicatriz tornádica, 70 pontos foram amostrados para avaliar o comportamento da diferença do NDVI das duas datas com a componente principal que melhor delineou o rastro de tornado, a CP3 (figura 42). Na matriz de correlação da PCA com as 8 bandas de entrada, a mesma configuração do estudo de caso anterior se repetiu, com a CP3 e mudança de NDVI sendo diretamente proporcionais na maioria das vezes, com nuances na natureza de interpretação da informação espectral.

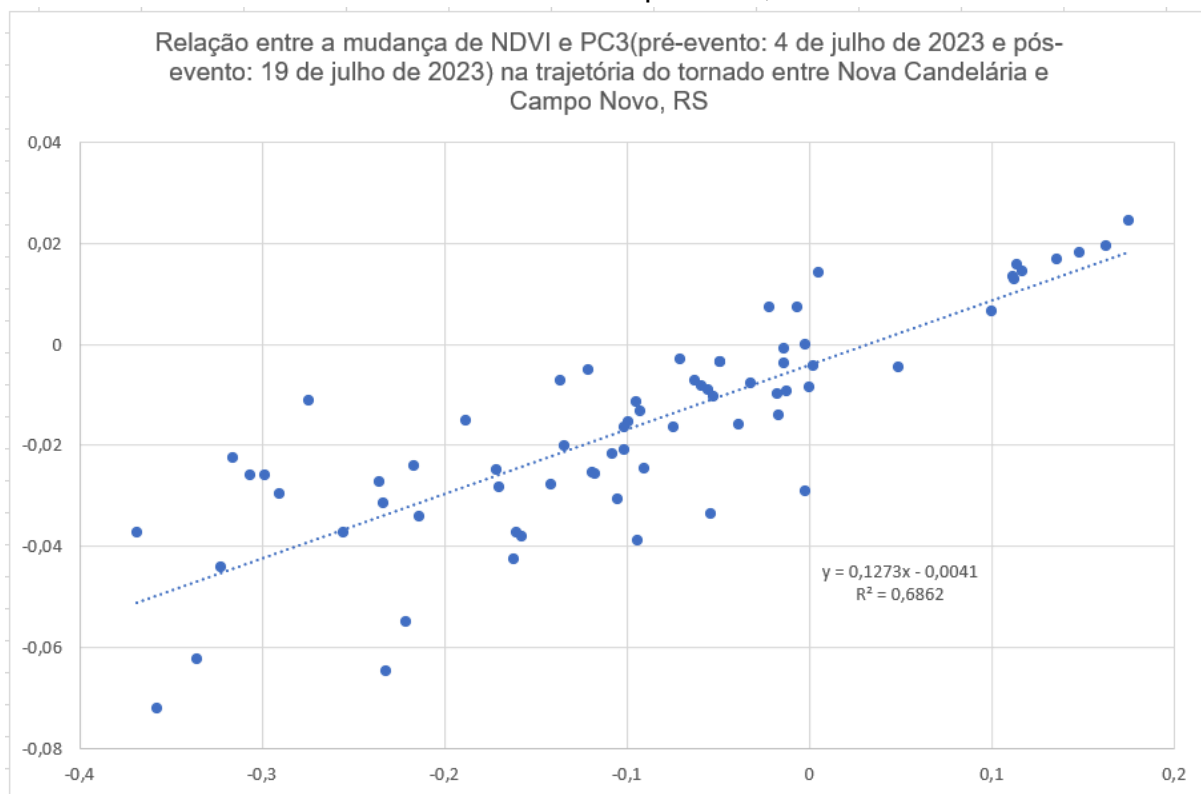
Figura 42 - Mudança de NDVI e PC3 (pré-evento: 4 de julho de 2023 e pós-evento: 19 de julho de 2023) na trajetória do tornado entre Nova Candelária e Campo Novo, RS



Fonte: O autor, 2025.

A correlação linear positiva e forte confirma o comportamento entre os dois métodos sobre a área danificada ($R = 0,8$), indicando que a maior parte da alteração física foi captada entre os dois procedimentos, como mostra a figura 43. O coeficiente de determinação foi um pouco menor quando comparado ao tornado entre Água Doce e Tangará, possivelmente porque o evento foi mais brando, evidenciando mais os limites na sensibilidade de detecção (Burow; Herrero; Elis, 2020) entre os métodos e maior complexidade da área. Os pontos 34 a 43 (com a exceção do ponto 41) tiveram o aumento de NDVI e a carga da CP3 também foi em direção contrária, no entanto, eles também representam a área da cicatriz do tornado, seção do trajeto referida pelo autor no subitem 5.2.1.2.

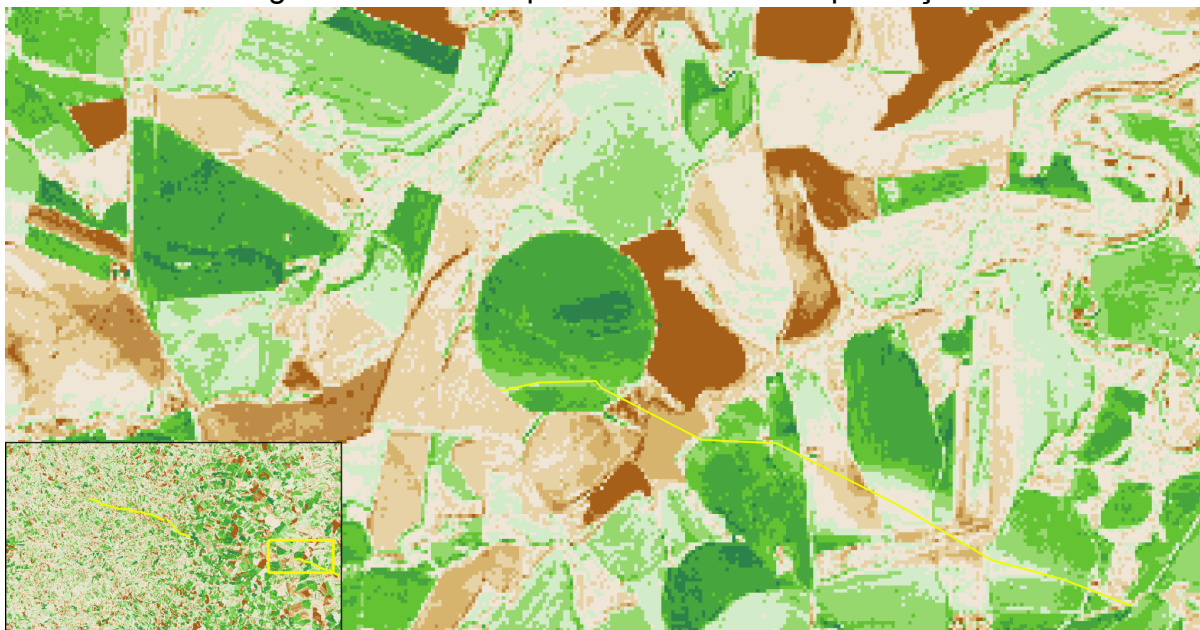
Figura 43 - Relação entre PC3 e a mudança de NDVI (pré-evento: 4 de julho de 2023 e pós-evento: 19 de julho de 2023) na trajetória do tornado entre Nova Candelária e Campo Novo, RS



Fonte: O autor, 2025.

Não foi possível utilizar as imagens de satélite do CBERS 4-A fusionadas, devido à combinação da resolução temporal da missão com a contaminação de nuvens, encontrando-se apenas imagens de fevereiro, mais adequadas para monitoramento de matas. As imagens de satélites comerciais de alta resolução disponíveis no Google Earth devido a irregularidade temporal e espacial, tiveram o histórico próximo disponível para comparação do evento apenas ao norte de Campo Novo, datada em 25/8/2023, cerca de um mês e duas semanas depois do tornado, ainda durante o inverno, as cicatrizes evidenciam danos apenas de vegetação densa, com pequenos destaques na área de cultivo circular em que a faixa do NDVI tinha aumentado conjuntamente como ampliado e exibido na figura 44, todavia havia uma faixa linear com valores menores que os arredores. Na figura 45 com a imagem do Google Earth para a mesma área ampliada, a maior parte da cicatriz já havia desaparecido no espectro visível devido a mudança do uso e cobertura do solo:

Figura 44 - Área ampliada com danos na plantação



Fonte: MSI/Sentinel-2, 2025; Ribeiro, 2023. Org.: O autor, 2025.

Figura 45 - Imagem de satélite do Google Earth ao norte de Campo Novo, RS em 25/08/2023



Fonte: Google Earth/Airbus, 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu evidenciar que com a aplicação do sensoriamento remoto e do geoprocessamento através da utilização das técnicas de comparação de imagens foi possível reconhecer parte do trajeto de tornados retrógrados que ocorreram nos anos de 2020 e 2023. Esta técnica pode ser aplicada a outros eventos, auxiliando grandemente no registro destes eventos, uma vez que em muitas situações os afetados não acionam a Defesa Civil e assim o fenômeno fica subnotificado.

A técnica permitiu evidenciar atuações correspondentes a tornados compatíveis com a Escala EF3 pelo material bibliográfico, sendo via de regra, inversamente proporcional a intensidade do dano e o intervalo de tempo utilizado. Destaca-se que para uma melhor acurácia do trajeto o mesmo deve ser realizado com comparações de evidências de danos em *locus* preferencialmente recentes, bem como checagens de deslocamento sinótico da nuvem geradora também devem ser acrescentados para uma melhor acurácia dos dados.

A sensibilidade de captar danos através do sensoriamento remoto com imagens de satélites gratuitas envolve a resolução espacial e temporal, no caso de eventos no limite detectável categorizados como EF2, a resolução temporal ainda é mais crucial que a resolução espacial do sensor do satélite a bordo. Outros fatores envolvem o uso e a cobertura do solo, a manutenção do tornado próximo a superfície, largura associada e o padrão das componentes do vento no padrão de danos. A área associada a danos, mesmo que discerníveis, pode não estar associada apenas a queda do NDVI entre dois períodos, mas a linhas retilíneas e curvilíneas com o índice mais baixo do que a área circundante. Danos menos intensos ou de algum outro modo mencionadas acima, normalmente

A técnica empregada pode ser aplicada a outros eventos relacionados a tempestade severa, entre eles granizo e *downburst*. Esse estudo mostra que o sensoriamento remoto é útil para episódios de tornados extensos e que possuem preferencialmente EF3 na Escala Fujita, pela qual com a escala apropriada permite uma visão geral na qual a logística nesses eventos não permite a documentação completa em curto prazo. É necessário, no entanto, algumas métricas como largura máxima, comprimento do rastro e dados georreferenciados em localizações pontuais, para poder ser avaliado com melhor profundidade. Existe algumas análises

relevantes do ponto de vista científico, por exemplo, envolvendo o relevo, o que incluía a altitude, declividade e rugosidade do terreno. De um modo geral, é possível analisar as características da superfície e fisiográficas em relação principalmente a tornadôgenese e a manutenção da coluna de ar, bem como dos diferentes tipos de uso do solo, levando em consideração a sua relevância para detecção em escalas mais grosseiras (embasado nessa pesquisa e investigações anteriores).

A aplicação do sensoriamento remoto em locais acometidos com tornados de média e alta intensidade contribuem para a otimização do mapeamento e plano de ações para a recuperação que um município por exemplo poderia tomar, inclusive nas comunidades rurais que em certo ponto, possivelmente estejam dissociadas ao evento em si, levando em conta normalmente a área urbana e às vezes partes da área rural.

A utilização de mapas temáticos pode auxiliar na identificação dos rastros em locais do uso de variabilidade espacial elevada, contribuindo também para melhores estimativas métricas. Para episódios mais brandos, imagens de satélites comerciais de 30-50 cm de resolução espacial permitiriam realizar a análise de orientação de danos e averiguação de tornados EF0-EF1 bem como áreas de bordas (danos menos intensos), o que devido os custos se torna mais viável com o uso de veículos aéreos não tripulados. À medida que a quantidade de dados vier a ampliar, a qualidade dos dados também é favorecida, mais rastros e danos reportados poderão ser úteis para averiguação de características da superfície relacionados à formação e manutenção dos tornados.

REFERÊNCIAS

AGREE, E. A Revised Tornado Definition and Changes in Tornado Taxonomy. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 29, n. 5, p. 1256-1258, out. 2014. DOI: 10.1175/WAF-D-14-00058.1. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/29/5/waf-d-14-00058_1.xml. Acesso em: 29 abr. 2025.

ÁGUA DOCE. **Parecer jurídico**. Disponível em: https://aguadoce.sc.gov.br/uploads/sites/280/2022/05/1927356_Parecer_Juridico.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

ALLEN, J. T.; TIPPETT, M. K.; SOBRL, A. H. Influence of the El Niño/Southern Oscillation on tornado and hail frequency in the United States. **Nature Geoscience**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 278-283, mar. 2015. DOI: 10.1038/ngeo2385.

ALMEIDA, L. G. de; HORNES, K. L.; ESTIVALLET, J. Ocorrências de tornados no Brasil no período de 1975 a 2018. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UEPG, 22., 2023, Ponta Grossa. **Anais [...]** Ponta Grossa: UEPG, 2023. Disponível em: https://siseve.apps.uepg.br/storage/eaic2023/9_Loriane_Gomes_de_Almeida-169538975923582.pdf. Acesso em: 15 mai. 2025.

ALMEIDA, L. G. de. **tornados_1975_2023.csv**. Ponta Grossa: UEPG, 2023. Planilha eletrônica.

ALONSO, F. **Veja como está a reconstrução de Sede Nova uma semana após a passagem do ciclone**. GZH. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/passo-fundo/geral/noticia/2023/07/veja-como-esta-a-reconstrucao-de-sede-nova-uma-semama-apos-a-passagem-do-ciclone-clka7a0nk009q015l0ql0kkam.html>. Acesso em: 30 jul. 2025.

AMS. **Convective inhibition**. 2020. Disponível em: https://glossarytest.ametsoc.net/wiki/Convective_inhibition. Acesso em: 13. out. 2024.

BALICKI, M.; ANDRADE, A. R. de.; HORNES, K. L. Gênese e impacto de tempestades severas no estado do Paraná (Brasil). **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 26, p. 2237-8642, abr. 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.71335. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/71335>. Acesso em: 29 set. 2022.

BARBOSA-DOIRON, M. P. Ocorrências Lexicais para Redemoinho no Falar Paulista: Um Estudo Dialetológico. **Signum: Estudos da Linguagem**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 113-130, dez. 2010. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/signum/article/view/4787>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BERTONI, B. G. L. **Estudos de caso de tornados, uso e ocupação do solo, topografia e análise meteorológica destes eventos atmosféricos no sul e sudeste do Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-02052013-160126/pt-br.php>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BLUESTEIN, H. **Severe Convective Storms and Tornadoes**: Observations and Dynamics. Berlim: Springer, 2013.

BOUWER, L. M. Have Disaster Losses Increased Due to Anthropogenic Climate Change? **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 92, n. 1, p. 39-46, jan. 2011. DOI: 10.1175/2010BAMS3092.1. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/92/1/2010bams3092_1.xml?tab_body=pdf. Acesso em: 13 out. 2024.

BROOKS, H. E. On the Relationship of Tornado Path Length and Width to Intensity. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 19, n. 2, p.310-319, abr. 2004. DOI: 10.1175/1520-0434(2004)019<0310:OTROTP>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/19/2/1520-0434_2004_019_0310_otrotp_2_0_co_2.xml. Acesso em: 30 mai. 2025.

BROOKS, H. E. Severe thunderstorms and climate change. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 123, p. 129-138, abr. 2013. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.04.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809512000968?via%3Dihub>. Acesso em: 8 mar. 2023.

BROOKS, H. E.; DOSWELL, C. A.; ZHANG, X.; CHERNOKULSKY, A. M. A.; TOCHIMOTO, E.; HANSTRUM, B.; NASCIMENTO, E. de L.; SILLS, D. M. L.; ANTONESCU, B.; BARRETT, B. A Century of Progress in Severe Convective Storm Research and Forecasting. **Meteorological Monographs**, [S. l.], v. 59, n. 1, p; 18.1-18.41, jan. 2019. DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0026.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/amsm/59/1/amsmonographs-d-18-0026.1.xml>. Acesso em 14 out. 2024.

BROOKS, H. E.; LEE, J. W.; CRAVEN, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 67-68, p.73-94, 2003. DOI: 10.1016/s0169-8095(03)00045-0.

BUROW, D.; HERRERO, H. V.; ELLIS, K. N. Damage Analysis of Three Long-Track Tornadoes Using High-Resolution Satellite Imagery. **Atmosphere**, v. 11, n. 6, p. 1-20, jun. 2020. DOI: 10.3390/atmos11060613. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/613>. Acesso em 1 ago. 2025.

CANADÁ. **Self-Help Advice**: Severe Storms. Disponível em: https://www.gnb.ca/public/HelpPDF/storm_e.pdf. Acesso em: 7 mar. 2023.

CANADÁ. **Canadian Hurricane Centre**: glossary. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/hurricane-forecasts-facts/glossary.html#glossaryw>. Acesso em: 28 abr. 2025.

CATUCCI, A. **Tornados e tempestades com granizo deixam rastro de destruição em SC.** G1 SC. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/08/15/tornados-e-tempestades-com-granizo-deixam-rastro-de-destruicao-em-sc.ghtml>. Acesso em: 30 jul. 2025.

CHANGNON, S. A. Tornado Losses in the United States. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 10, n. 4, p.145-150, nov. 2009. DOI: 10.1061/ASCE1527-6988200910:4145. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291527-6988%282009%2910%3A4%28145%29>. Acesso em: 2025.

CISA. **Severe Storms.** Disponível em: <https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience/extreme-weather-and-climate-change/severe-storms>. Acesso em: 29 fev. 2023.

COM prejuízos provocados por tornado, Água Doce decreta calamidade pública. **G1 SC.** Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/08/16/apos-tornado-agua-doce-decreta-estado-de-calamidade-publica.ghtml>. Acesso em: 30 jul. 2025.

COPERNICUS. ESA. **S2 Mission.** Disponível em: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>. Acesso em: 2 jul. 2025.

COPERNICUS. ESA. **S2 Processing.** Disponível em: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-processing>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CORREA, M. V. de.; RODRIGUEZ, D. A. **Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra através de processamento digital de imagens.** São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.03.21.29/doc/correa_de_teccao.pdf. Acesso em: 4 dez. 2025.

CORFIDI, S. Forecasting severe convective storms. *In: Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford University Press, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/38698532/Forecasting_Severe_Convective_Storms. Acesso em: 8 mar. 2023.

ĆWIK, P.; MCPHERSON, R. A.; BROOKS, H. E. What Is a Tornado Outbreak?: Perspectives through Time. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 4, p. E817-E835. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0076.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/4/BAMS-D-20-0076.1.xml>. Acesso em: 29 jan. 2026.

DAHL, J. M. L. **Supercells: Their Dynamics and Prediction.** 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Livre de Berlim, Berlim, 2006. Disponível em: https://www.estofex.org/files/dahl_thesis.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

DESSENS JUNIOR, J. Influence of Ground Roughness on Tornadoes: A Laboratory Simulation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [S. l.], v. 11, n. 1, p.

72-75. DOI: 10.1175/1520-0450(1972)011<0072:IOGROT>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/11/1/1520-0450_1972_011_0072_iogrot_2_0_co_2.xml. Acesso em: 9 de jun. 2025.

DOSWELL, C. A. The Distinction between Large-Scale and Mesoscale Contribution to Severe Convection: A Case Study example. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 3-16, mar. 1987. DOI: 10.1175/1520-0434(1987)002<0003:TDBLSA>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/2/1/1520-0434_1987_002_0003_tdblsa_2_0_co_2.xml. Acesso em: 14 out. 2024.

DOSWELL, C. A. **Severe Convective Storms**. Boston: American Meteorological Society, 2001.

DOSWELL, C. A.; BOSART, L. Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. In: DOSWELL, C. A. **Severe Convective Storms**. Boston: American Meteorological Society, 2001, p.27-70. DOI: 10.1175/0065-9401-28.50.27. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-06-5_2. Acesso em: 13 out. 2024.

DOSWELL, C. A., BURGESS, D. Tornadoes and Tornadic Storms: A Review of Conceptual Models. **Geophysical Monograph**, Washington, v. 79, p. 161-172, jan. 1993.

DYER, R. C. Remote Sensing Identification of Tornado Tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, [S. l.], v. 54, n. 10, p. 1429-1435, out. 1988. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/oct/1988_oct_1429-1435.pdf. Acesso em: 1 ago. 2025.

EARTH OBSERVATORY. NASA. **Measuring Vegetation (NDVI & EVI)**. 2000. Disponível em: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php. Acesso em: 22 jul. 2025.

ENGESAT. **Sentinel-2**. Disponível em: <https://www.engesat.com.br/sentinel-2/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ESTIVALLET, J.; OLIVEIRA, R.; SHEUR, P.; SILVA, L.; ESPÍNDOLA, L. P. **La Niña e El Niño: A influência nas ocorrências tornádicas em Santa Catarina**. 2009. Monografia (Curso Técnico de Meteorologia) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ETYMONLINE. Tornado. Disponível em: <https://www.etymonline.com/word/tornado>. Acesso em: 3 mai. 2025.

ESA. **ESA - Sentinel 2**. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso em: 2 jul. 2025.

FRAZIER, A. E.; HEMINGWAY, B. L.; BRASHER, J. P. Land surface heterogeneity and tornado occurrence: an analysis of Tornado Alley and Dixie Alley. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1475-1492, 2019. DOI: 10.1080/19475705.2019.1583292. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2019.1583292>. Acesso em: 20 mar. 2023.

FERREIRA, R. C.; HERDIES, D. L.; VENDRASCO, E. P.; BENETI, C. A. A. Case study of Mesoscale Convective Complexes: preliminary results with assimilation of radar data. Disponível em: http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.23.11.12/doc/ferreira_ase2.pdf. Acesso em: 30 jan. 2025.

FIOCRUZ. Índice de Estado da Vegetação (NDVI). Disponível em: <https://climaesaude.iciet.fiocruz.br/indicador/indice-de-estado-da-vegetacao-ndvi>. Acesso em: 7 de jun. de 2024.

FIOCRUZ. Impactos na saúde e caminhos para reduzir os danos dos desastres. Disponível em: <https://climaesaude.iciet.fiocruz.br/eventos-extremos-0>. Acesso em: 18 fev. 2026.

FINLEY, J. P. **Report on the Character of six hundred tornadoes**. 1998. Disponível em: <https://www.aoml.noaa.gov/general/graphics/lib/tor.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

FOSS, M. **Condições atmosféricas conducentes à ocorrências de Tempestades Convectivas Severas na América do Sul**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/10256>. Acesso em: 14 mar. 2023.

FUJITA, T. T. **Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity**. SMRP. Universidade de Chicago. 1971. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19720008829>. Acesso em: 15 mai. de 2025.

FUJITA, T. T. Tornadoes around the World. **Weatherwise**, v. 26, n. 2, p. 56-83, abr. 1973. DOI: 10.1080/00431672.1973.9931633. Disponível em: <https://swco-ir.tdl.org/server/api/core/bitstreams/aae2c230-4b53-4cf4-bb07-9bbd5ecd dc67/content>. Acesso em: 1 mai. 2025.

FUJITA, T. T. **The Downburst**: Microburst and Macrobust. Chicago: SMRP, 1985. Disponível em: <https://swco-ir.tdl.org/items/500757a4-6919-4c78-a19d-6e16f7327653>. Acesso em: 3 jun. 2025.

FUJITA, T. T. Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales. **Journal of the Atmospheric Sciences**, [S. l.], v. 38, n. 8, p.1511-1534, ago. 1981. DOI: 10.1175/1520-0469(1981)038<1511:TADITC>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/38/8/1520-0469_1981_038_1511_taditc_2_0_co_2.xml. Acesso em: 10 jun. 2025.

FUJITA, T. T.; WATANABE, K.; TSUCHIY, K.; SHIMADA, M. Typhoon-Associated Tornadoes in Japan and New Evidence of Suction Vortices in a Tornado near Tokyo. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, [S. l.], v. 50, n. 5, p. 431-453. out. 1972. Disponível em:

<https://swco-ir.tdl.org/server/api/core/bitstreams/f57768a1-008e-4531-82f3-9f22d1e7fcd9/content>. Acesso em: 1 mai. 2025.

GENSINI, V. Severe convective storms in a changing climate. In: FARES, A. **Climate Change and Extreme Events**. [S. l.]: Elsevier, 2021. p. 39-56.

GIBBS, J. A.; XUE, M. **Multicell Storms**. 2015. Disponível em: https://twister.caps.ou.edu/MM2015/docs/chapter4/chapter4_b.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

HARPER, B.; GRANGER, K.; HALL, SARAH. Severe Thunderstorms Risks. In: GRANGER, K.; HAYNE, M. (org). **Natural hazards and the risks they pose to South-East Queensland**. Camberra: AGSO, 2000. Disponível em: <https://www.ga.gov.au/pdf/GA1489.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

HOLLAND, A. P.; RIORDAN, A. J.; FRANKLIN, E. C. A Simple Model for Simulating Tornado Damage in Forests. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, S. l., v. 45, n. 12, p. 1597-1611, dez. 2006. DOI: 10.1175/JAM2413.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/45/12/jam2413.1.xml>. Acesso em: 30 dez. 2025.

HORNES, K. L. (org). **Tornados no Brasil**. Ponta Grossa: Todapalavra, 2022. Disponível em: <https://www.todapalavraeditora.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Tornados-no-Brasil-digital.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2025.

HORNES, K. L.; BALICKI, M. Caracterização do tornado ocorrido em Marechal Cândido Rondon e Quatro Pontes em novembro de 2015. **RAEGA - O espaço geográfico em análise**, [S. l.], v. 44, p. 36-54, mai. 2018. DOI: 10.5380/raega.v44i0.47761. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/47761>. Acesso em: 22 mai. 2025.

HOUSER, J.; BLUESTEIN, H. B.; SEIMON, A.; SNYDER, J. Rapid-Scan Mobile Radar Observations of Tornadogenesis. In: FALL MEETING, 2018, Washington. **Resumos [...]** Washington: AGU, 2018.

HOUZE JR., R. A. 100 Years of Research on Mesoscale Convective Systems. **Meteorological Monographs**, [S. l.], v. 59, n. 1, p.17.1-17.54, jan. 2018. DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1. Disponível: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/amsm/59/1/amsmonographs-d-18-0001.1.xml>. Acesso em: 30 dez. 2024.

IDEAM. **El monitoreo de bosques en 8 pasos**. 2025. Disponível em: https://ideam.gov.co/sites/default/files/transparencia/informaciondelaentidad/noticias/infografia_monitoreo_del_bosque_en_8_pasos_1.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

INPE. **Estágios da Tempestade.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/evolucao.php>. Acesso em: 8 set. 2025.

JEDLOVEC, G. J.; NAIR, U.; HAINES, S. L. Detection of Storm Damage Tracks with EOS Data. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 249-267, jun. 2006. DOI: 10.1175/WAF923.1. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/21/3/waf923_1.xml. Acesso em: 1 ago. 2025.

JOHNS, R. H.; DOSWELL, C. A. Severe Local Storms Forecasting. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 588-612, dez. 1992. DOI: 10.1175/1520-0434(1992)007<0588:SLSF>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/7/4/1520-0434_1992_007_0588_slsf_2_0_co_2.xml. Acesso em: 14 out. 2024.

KELLNER, O.; NIYOGI, D. Land Surface Heterogeneity Signature in Tornado Climatology? An Illustrative Analysis over Indiana, 1950–2012. **Earth Interactions**, [S. l.], v. 18, n. 10, p.1-32, mai. 2014. DOI: 10.1175/2013EI000548.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/eint/18/10/2013ei000548.1.xml>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KINGFIELD, D. M.; BEURS, K. M. de. Landsat Identification of Tornado Damage by Land Cover and an Evaluation of Damage Recovery in Forests. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [S. l.], v. 56, n. 4, p. 965-987, abr. 2017. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0228.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/56/4/jamc-d-16-0228.1.xml>. Acesso em: 1 ago. 2025.

KORNEI, K. **Surprise! Tornadoes form from the ground up.** Science, 2011. Disponível em: <https://www.science.org/content/article/surprise-tornadoes-form-ground>. Acesso em: 9 set. 2025.

LEBEDEV, M. A.; VIZILTER, Y. V.; VYGOLOV, O. V.; KNYAZ, V. A.; RUBIS, A. Y. Change detection in remote sensing images using Conditional Adversarial Networks. In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, XLII-2, 2018, Riva del Garda. **Anais** [...], Riva del Garda: ISPRS, 2018, p.565-571. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-565-2018. Disponível em: <https://d-nb.info/1161420843/34>. Acesso em: 4 dez. 2025.

LI, X.; YEH, A. G. O. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta. **Remote Sensing**, [S. l.], v.19, n. 8, p. 1501-1518, 1998. DOI: 10.1080/014311698215315.

LILLESAND, T.; PODGER, N.; CHIPMAN, J.; GOLDMANN, R.; LEWELLING, K.; OLSEN, T. Assessing tornado damage via analysis of multi-temporal Landsat 7

ETM+ data. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF THE AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2002, Washington. **Anais** [...], Washington: ASPRS, 2002.

LLANO, X. C. **PCA4CD**. SmbYc. Disponível em: <https://smbyc.github.io/PCA4CD/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

LYONS, T. J. *et al.* Land-Atmosphere Interaction in a Semiarid Region: The Bunny Fence Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 74, n. 7, p. 1327-1334, 1993. DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<1327:LIASR>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/74/7/1520-0477_1993_074_1327_liasr_2_0_co_2.xml. Acesso em: 20 mar. 2024.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E. S.; MORAN, E. Change Detection Techniques. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 25, n. 12, p. 2365-2407, jun. 2004.

MADDOX, R. A. An Evaluation of Tornado Proximity Wind and Stability Data. **Monthly Weather Review**, [S. l.], v. 104, n. 2, p. 133-142, fev. 1976. DOI: 10.1175/1520-0493(1976)104<0133:AEOTPW>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/104/2/1520-0493_1976_104_0133_aeotpw_2_0_co_2.xml?tab_body=fulltext-display. Acesso em 13 out. 2024.

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complex. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 61, n. 11, p. 1374-1387, nov. 1980. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26221473>. Acesso em: 30 jan. 2025.

MADDOX, R. A.; HOXIT, L. R.; CHAPPELL, C. F. A Study of Tornadic Thunderstorm Interactions with Thermal Boundaries. **Monthly Weather Review**, [S. l.], v. 108, n. 3, p. 322-336, mar. 1980. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<0322:ASOTTI>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/108/3/1520-0493_1980_108_0322_asotti_2_0_co_2.xml. Acesso em: 17 ago. 2025.

MARCELINO. I. P. V. de. O. **Análise de episódios de tornados em Santa Catarina**: caracterização sinótica e mineração de dados. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2003.

MARCELINO. I. P. V. de. O; MARCELINO, E. V.; SAUSEN, T. M. **Tornado ocorrido em Muitos Capões - RS no dia 29/08/2005**. Nota técnica – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.11.18.44/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acesso em: 1 ago. 2025.

MARCELINO. I. P. V. de. O; NASCIMENTO, E. de L.; FERREIRA, N. J. Tornados em Santa Catarina: Análise meteorológica e de vulnerabilidade com o auxílio de geotecnologias. *In*: ALMEIDA, C. M.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (org.).

Geoinformação em Estudos Urbanos e Regionais. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. cap. 11, p. 1-20. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.21.14.06/doc/marcelino_tornados.pdf. Acesso em: 15 mai. 2025.

MARKOWSKI, P. M.; RASMUSSEN, E. N.; STRAKA, J. M. The Occurrence of Tornadoes in Supercells Interacting with Boundaries during VORTEX-95. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 852-859, set. 1998. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0852:TOOTIS>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/13/3/1520-0434_1998_013_0852_tootis_2_0_co_2.xml. Acesso em: 17 ago. 2025.

MET OFFICE. **Factsheet 2 — Thunderstorms.** Disponível em: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/library-and-archive/library/publications/factsheets/factsheet_2-thunderstorms_2023.pdf. Acesso em: 29 jan. 2024.

METMATTERS. **Tornadoes around the world.** Disponível em: <https://www.rmets.org/metmatters/tornadoes-around-world>. Acesso em: 15 mai. 2025.

MCCARTHY, D. **What Are We Doing with (or to) the F-Scale?** SPC. NOAA. Disponível em: <https://www.spc.noaa.gov/publications/mccarthy/slsc23.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2025.

MCDONALD, J. R.; MEHTA, K. C. **A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale).** *Wind Science and Engineering Research Center*, Universidade de Tecnologia do Texas. 2004. Disponível em: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-ttu.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2025.

MCNULTY, R. Severe and Convective Weather: A Central Region Forecasting Challenge. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 187-202, jun. 1995. DOI: 10.1175/1520-0434(1995)010<0187:SACWAC>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/10/2/1520-0434_1995_010_0187_sacwac_2_0_co_2.xml. Acesso em: 24 mar. 2024.

METSUL. **Tempestade em São Paulo é uma das mais temidas por meteorologistas.** Disponível em: <https://metsul.com/tempestade-em-sao-paulo-e-uma-das-mais-temidas-por-meteorologistas/>. Acesso em: 12 fev. 2025.

MYINT, S. W.; YUAN, M.; CERVENY, R. S.; GIRI, C. Categorizing natural disaster damage assessment using satellite-based geospatial techniques. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 707-719, jul. 2008. DOI: 10.5194/nhess-8-707-2008. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/8/707/2008/>. Acesso em: 4 dez. 2025.

MOLTHAM, A.; BELL, J. R.; COLE, T. A.; BURKS, J. E. Satellite-based identification of tornado damage tracks from the 27 April 2011 severe weather outbreak. **Journal of Operational Meteorology**, [S. l.], v. 2, n. 16, p. 191-208. DOI:

10.15191/nwajom.2014.0216. Disponível em:
<http://nwafiles.nwas.org/jom/articles/2014/2014-JOM16/2014-JOM16.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2025.

MOLTHAN, A. L.; JEDLOVEC, G. J.; CARCIONE, B. NASA satellite data assist in tornado damage assessments. **Eos**, [S. l.], v. 92, n. 40, p. 337-339, out. 2011. DOI: 10.1029/2011EO400002. Disponível em:
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011EO400002>. Acesso em: 1 ago. 2025.

MOLTHAN, A. L. Satellite-Based Identification of Tornado Damage Tracks from the 27 April 2011 Severe Weather Outbreak. **Journal of Operational Meteorology**, [S. l.], v. 2, n. 16, p. 191-208. DOI: 10.15191/nwajom.2014.0216. Disponível em:
<https://noaa.hub.arcgis.com/documents/noaa::satellite-based-identification-of-tornado-damage-tracks-from-the-27-april-2011-severe-weather-outbreak-1/explore>. Acesso em: 4 dez. 2025.

MUSK, L. **Sistema de trovoadas**. Disponível em:
https://lcb.fflch.usp.br/files/upload/paginas/Leslie_Musk_Capitulo_8%20-%20Sistema%20de%20trovoadas.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

NECHET, D. Ocorrência de tornados no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 29–39, 2002.

NIYOGI, D.; PYLE, P.; LEI, M.; ARYA, S.P.; KISHTAWAL, C. M.; SHEPHERD, M.; CHEN, F.; WOLFE, B. Urban Modification of Thunderstorms: An Observational Storm Climatology and Model Case Study for the Indianapolis Urban Region. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [S. l.], v. 50, n. 5, p. 1129-1144, mai. 2011. DOI: 10.1175/2010JAMC1836.1. Disponível em:
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/50/5/2010jamc1836.1.xml>. Acesso em: 2 mai. 2025.

NOAA. **Weather Spotter's Field Guide**: a guide to being a SKYWARN spotter. 2011. Disponível:
<https://www.weather.gov/media/pqr/skywarn/SpotterGuide-2011.pdf>. Acesso em: 8 set. 2025.

NOAA. **Life Cycle a Thunderstorm**. Disponível em:
<https://www.noaa.gov/jetstream/thunderstorms/life-cycle-of-thunderstorm>. Acesso em: 9 mai. 2025.

NSSL. NOAA. **Severe Weather 101**: Tornado Types. Disponível em:
<https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/tornadoes/types/>. Acesso em: 29 fev. 2024.

NSSL. NOAA. **Severe Weather 101**: Frequently Asked Questions about Tornadoes. Disponível em: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/tornadoes/faq/>. Acesso em: 20 de jun. de 2025.

NWS. NOAA. **EF Scale.** Disponível em: <https://www.weather.gov/lx/enhancedfujitascale>. Acesso em: 6 mai. 2025.

NWS. NOAA. **The Enhanced Fujita Scale (EF Scale).** Disponível em: <https://www.weather.gov/oun/efscale>. Acesso em: 6 mai. 2025.

NWS. NOAA. **Env Parameters and Indices.** Disponível em: <https://www.weather.gov/lmk/indices>. Acesso em: 12 jun. 2025.

NWS. NOAA. **Severe Thunderstorm Safety.** Disponível em: <https://www.weather.gov/safety/thunderstorm>. Acesso em: 29 fev. 2024.

NWS. NOAA. **Severe Weather Definitions.** Disponível em: <https://www.weather.gov/bgm/severedefinitions>. Acesso em: 13 mar. 2024.

NWS. NOAA. **Squall Line/Bow Echo/QLCS.** Disponível em: <https://www.weather.gov/lmk/squallbow>. Acesso em: 13 mar. 2024.

NWS. NOAA. **Types of Thunderstorm.** Disponível em: <https://www.weather.gov/spotterguide/types>. Acesso em: 28 abr. 2025.

NWS. NOAA. **Understand Tornado Alerts.** Disponível em: <https://www.weather.gov/safety/tornado-ww>. Acesso em: 13 mar. 2024.

NWS. NOAA. **Week 2: What is Wind Shear?** Disponível em: <https://www.weather.gov/ilx/swop-springtopics>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PASSO a passo do ciclone extratropical nos dias 12 e 13 de julho. Climatempo. Disponível em:

<https://www.climatempo.com.br/noticia/2023/07/12/passo-a-passo-do-ciclone-extratropical-nos-dias-12-e-13-de-julho-1423>. Acesso em: 20. jan.2026.

PIOTROVSKI, M. C. **tabela tornados F3 - F4 de 1975 a 2018**. Ponta Grossa: UEPG, 2025. Planilha eletrônica.

PREVOTS. **Evento de tempo severo no dia 14/08/2020**. [S. l.], 20 de ago. de 2020.

X: @prevots_svr. Disponível em:

https://x.com/prevots_svr/status/1296606207965364232. Acesso em: 30 jul. 2025.

PUCHALSKI, L. **A passagem de uma Supercélula provocou tornados em SC**. NSC Total, 2020. Disponível em:

<https://www.nsctotal.com.br/colunistas/puchalski/a-passagem-de-uma-supercelula-provocou-tornados-em-sc>. Acesso em: 13 ago. 2025.

QIAO, H.; WAN, X.; WAN, Y. SHENGYANG, L.; ZHANG, W. A Novel Change Detection Method for Natural Disaster Detection and Segmentation from Video Sequence. **Sensors**, [S. l.], v. 20, n. 18, p. 1-20, set. 2020. DOI: 10.3390/s20185076. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5076>. Acesso em: 4 de dez. 2025.

RÁDIO ALTO URUGUAI. **Sede Nova mobilizada para se reconstruir após temporal que castigou o município**. Disponível em:

<https://www.radiocatarinense.com.br/2020/08/defesa-civil-confirma-que-tornado-atingiu-agua-doce-tangara-e-vargem-bonita/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

RÁDIO CATARINENSE. **Defesa Civil confirma que tornado atingiu Água Doce, Tangará e Vargem Bonita.** Disponível em: <https://www.radiocatarinense.com.br/2020/08/defesa-civil-confirma-que-tornado-atingiu-agua-doce-tangara-e-vargem-bonita/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

REDEMET. DECEA. **Windshear.** Disponível em: <https://redemet.decea.mil.br/old/?i=facilidades&p=windshear>. Acesso em: 28 abr. 2025.

RIBEIRO, B. Z. **Tornados e tempo severo nos dias 11 e 12 de julho de 2023.** PREVOTS. [S. l.]: 26 de jul. de 2023. Disponível em: <http://prevots.org/2023/07/tornados-e-tempo-severo-nos-dias-11-e-12-de-julho-de-2023/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SCIED. UCAR. **Thunderstorms.** Disponível em: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/storms/thunderstorms>. Acesso em: 29 fev. 2024.

SCIJINKS. NOAA. **What Is a Gust Front?** Disponível em: <https://scijinks.gov/gust-fronts/>. Acesso em: 30 jan. 2024.

SCORTEGGNA, A.; REBOLHO, B.C. S. Principais áreas de risco para desastres naturais na cidade de Curitiba-PR, no ano de 2009. **Revista FAE**, v. 16, n. 2, p. 192-208, jul/dez. 2013. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/147>. Acesso em: 29 jan. 2026.

SENTINEL HUB. **Sentinel-2 Bands.** Disponível em: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SENTINEL HUB. **Sentinel-2 L2A.** Disponível em: <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SENTINEL HUB. **Normalized difference vegetation index.** Disponível em: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SENTINEL ONLINE. Copernicus Sentinel-2 pre-Collection-1 MSI Level-2A (L2A). Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-0-level-2a>. Acesso em: 4 dez. 2025.

SIEZEMEL, G. **'Momento de terror', diz moradora de Sede Nova após passagem de ciclone.** RBSTV, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/07/14/momento-de-terror-diz-moradora-de-cidade-do-rs-que-tem-mais-de-um-terco-da-populacao-fora-de-casa-apos-ciclone.ghtml>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SILVA DIAS, M. A. F. An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil. **Weather, Climate, and Society**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 209-217, jul. 2011. DOI: 10.1175/2011WCAS1095.1. Disponível em:

https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/3/3/2011wcas1095_1.xml. Acesso em: 20 mai. 2025.

SILVA DIAS, M. A. F. Complexos Convectivos de Mesoescala sobre a Região Sul do Brasil. **Climanálise Especial**, [S. l.], n. esp., p. 173-186, 1996. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/mcc_cli.html. Acesso em: 11 fev. 2025.

SILVEIRA, E. M. de. O.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, F. W.; REIS, A. A. dos.; WITHEY, K. D.; RUIZ, L. A. Characterizing landscape spatial heterogeneity using semivariogram parameters derived from NDVI images. **Cerne**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 413-422, out-dez. 2017. DOI: 10.1590/01047760201723042370. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/CJsY6sVdB97TCYYKVdBB6HD/?lang=en>. Acesso em: 4 dez. 2025.

SIMMONS, K. M.; SUTTER, D. WSR-88D Radar, Tornado Warnings, and Tornado Casualties. **Weather and Forecasting**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 301-310, jun. 2005. DOI: 10.1175/WAF857.1. Disponível em:

https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/20/3/waf857_1.xml. Acesso em: 3 mai. 2025.

SINGH, A.; HARRISON, A. Standardized principal components. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 883-896, 1985. DOI: 10.1080/01431168508948511. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168508948511>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SPC. NOAA. **The Online Tornado FAQ**. 2024. Disponível em: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

STULL, R. Thunderstorm Fundamentals. In: STULL, R. **Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science**. Vancouver: University of British Columbia, 2017. p. 481-544. Disponível em: https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/prmet102/Ch14-Tstorms-v102b.pdf. Acesso em 30 jan. 2024.

STRADER, S. M.; GENSINI, V. A.; ASHLEY, W. S.; WAGNER, A. N. **npj Natural Hazards**, [S. l.], v. 1, n. 20, p. 1-12, jun. 2024. DOI: 10.1038/s44304-024-00019-6. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00019-6>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TEMPORAL com rajadas de vento em SC derruba caminhões no Oeste; região também registra granizo. G1 SC, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/08/14/temporal-forte-em-sc-derruba-caminhao-no-oeste.ghml>. Acesso em: 30 jul. 2025.