

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

Ministerio de Ambiente y Energía - Instituto Meteorológico Nacional

Número **1**
ISSN 2953-738X



Instituto Meteorológico Nacional
Fundado en 1888

ISSN 2953-738X

Volumen 24

Diciembre 2025



San José, Costa Rica

Ministerio de Ambiente y Energía
Instituto Meteorológico Nacional

Coordinación general:
Mag. Eladio Solano León

Edición:
[M.Sc.](#) Gabriela Chinchilla Ramírez

Comité editorial:
[M.Sc.](#) Daniel Poleo Brito
[M.Sc.](#) Gabriela Chinchilla Ramírez
[M.Sc.](#) Karina Hernández Espinoza

Diseño y diagramación:
Rodrigo Granados Jiménez

Imágenes de portada:
Nury Sanabria Valverde

*La revista “Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos”
es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional,
Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como
finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y
estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.*

Los artículos publicados en Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos expresan la opinión del autor y
no necesariamente del Instituto Meteorológico Nacional

Tornados y trombas marinas en el trópico: eventos registrados en Costa Rica (2010 al 2023)

DANIEL POLEO BRITO¹ Y MÓNICA JIMÉNEZ MURILLO²

Resumen

A pesar de que existe muy poca documentación sobre la ocurrencia de tornados y trombas marinas en Centroamérica, este estudio demostró que los tornados no mesociclónicos son frecuentes en ciertas regiones y épocas del año en Costa Rica. Se realizó un análisis sinóptico de todos los casos identificados del 2010 al 2023 a través de registros fotográficos, videos de torbellinos (tornados y trombas marinas) en Costa Rica, imágenes de satélite y datos de estaciones en superficie, determinando que son frecuentes la ocurrencia de tornados no mesociclónicos en la región, originados en nubes convectivas muy profundas de tipo cumulonimbos y que adquirieron rotación. Luego se comparó con las fases de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación de Madden Julian (MJO) con el fin de determinar su relación con estas oscilaciones intraestacionales y de baja frecuencia. Además, se determinó la estacionalidad en la ocurrencia de los tornados, así como la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), los cuales son concluyentes en la formación de todos los torbellinos en la región y en particular de los tornados no mesociclónicos, siendo más (menos) frecuentes durante el fenómeno de La Niña (El Niño); al contrario de las trombas marinas que son más (menos) frecuentes durante la fase cálida (fría) del ENOS.

PALABRAS CLAVES: TORNADOS, TROMBAS MARINAS, TORBELLINOS, TORNADOS EN CENTROAMÉRICA, MJO.

Abstract

Although there is very little documentation on the occurrence of tornadoes and waterspouts in Central America, this study shows that non-mesocyclonic tornadoes are frequent in certain regions and times of the year in Costa Rica. To this end, a synoptic analysis was conducted of all identified cases from 2010 to 2023 using photographic records, videos of whirlwinds (tornadoes and waterspouts) in Costa Rica, satellite images, and data from surface stations. It was determined that non-mesocyclonic tornadoes are frequent in Costa Rica, originating in cumulonimbus convective clouds that acquired a certain rotation. This was then compared with each of the phases of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Madden Julian Oscillation (MJO) in order to determine their relationship with these intra-seasonal and low-frequency oscillations. In addition, the seasonality of tornado occurrence was determined, as well as the influence of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon, which are conclusive in the formation of all whirlwinds in the region and in particular non-mesocyclonic tornadoes, being more (less) frequent during the La Niña (El Niño) phenomenon; unlike waterspouts, which are more (less) frequent during the warm (cold) phase of ENSO.

KEYWORDS: TORNADOES, WATERSPOUTS, WHIRLWINDS, NON-MESOCYCLONIC TORNADOES, TORNADOES IN CENTRAL AMERICA, MJO.

- 1 Máster en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico dpoleo@imn.ac.cr
- 2 Bachiller en Meteorología. Instituto Meteorológico Nacional, área de Aeronáutica. San José, Costa Rica. Correo electrónico moni.jimenez.murillo@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Meteorológica Mundial en su Atlas Internacional de Nubes, en los fenómenos hidrometeoros de la atmósfera, existen aquellos que consisten en un vórtice de partículas. A estos les llamaremos torbellinos y se pueden definir como una columna de fluido, ya sea líquido o gaseoso, que presenta un rápido movimiento giratorio en torno a un eje en posición vertical que permanece relativamente estable, generando un vórtice de viento o remolino.

La Organización de la Investigación de Tornados y Tormentas (TORRO, por sus siglas en inglés) (TORRO, 2021) clasifica los torbellinos en cuatro tipos, según su formación. Además, indica que cuando el vórtice es una rotación en agua, se le conoce en inglés como “whirlpool” o tromba marina, mientras que cuando la rotación es de aire, se le conoce en inglés como “whirlwind” o tornados. Por lo que podemos clasificar los torbellinos de la siguiente manera:

- **Torbellinos principales:** tornados mesociclónicos, tornados no mesociclónicos y nubes de embudo, estas últimas hacen referencia a tornados en formación pero que no han tocado el suelo.
- **Torbellinos menores:** land devils (demonios de tierra), water devils (demonios de agua) y fire devils (demonios de fuego).
- **Torbellinos de Eddy** (pequeños vórtices).
- **Otros torbellinos:** vórtices formados al final de los planos alares de los aviones.

Hablando propiamente de los tornados, se pueden definir como una violenta columna de aire en rotación que se extiende de nubes tipo cumulonimbos o cumulus congestus hasta alcanzar la superficie, ya sea en tierra o agua, con la base inferior del cono. Pueden generarse en regiones tropicales y subtropicales, y su formación está asociada tanto a ciclones tropicales como a convección severa organizada sobre continentes

cálidos o aguas someras (Edwards, 2012; Carroll-Smith, 2023). A menudo se asocia su origen con células de tormenta bien desarrolladas en frentes fríos, donde se da un choque entre una masa de aire frío que avanza desplazando una masa de aire cálido y húmedo (Piñeres, 2010). Sin embargo, la mayoría de los tornados en zonas tropicales suelen estar asociados a ciclones tropicales, como huracanes o tormentas tropicales.

Estos sistemas pueden generar tornados cuando se dan condiciones de inestabilidad y cizallamiento vertical en niveles bajos de la atmósfera, similares a otros sistemas productores de tornados. La ubicación dentro del ciclón tropical resulta clave para la formación de tornados. La mayoría de estos fenómenos ocurren en el cuadrante delantero derecho de la tormenta, donde la combinación de cizallamiento del viento y condiciones de inestabilidad convectiva es más favorable (Piñeres, 2010). En ese sector, las bandas convectivas suelen contener células que facilitan la formación de tornados, incluso a cierta distancia del centro de la tormenta tropical. Este proceso se acelera cuando el ciclón toca tierra y presenta una mayor fricción o resistencia al avance, aumentando los procesos turbulentos y facilitando la formación de tornados (National Weather Service, s. f.; Edwards, 2012; Carroll-Smith, 2023). No obstante, en los ciclones tropicales, la inestabilidad térmica es más frecuente por debajo de los 3 000 m (10 000 pies), lo que produce tormentas más diminutas y de menor profundidad que las observadas en latitudes medias (NOAA, s.f.).

Dadas las condiciones dinámicas y termodinámicas que se presenten en la atmósfera, podemos clasificar los tornados en dos tipos según su formación u origen dinámico:

- **Tornados mesociclónicos:** se dan cuando se forma un mesociclón o ciclón de mesoescala en las células de tormenta llamadas supercélulas. Esto ocurre cuando la base de la nube cumulonimbos gira

al igual que el tornado, formando una especie de “herradura”. Normalmente se producen en latitudes medias y para formarse necesitan intrusión de aire seco y frío, húmedo y cálido. Cuentan con gran vorticidad que permite la rotación de la nube (Hagemeyer, 1997).

- **Tornados no mesociclónicos:** estos no presentan un mesociclón en las células de tormenta debido a que tienen menos vorticidad, la nube es de menor tamaño y se forman con masas de aire húmedas homogéneas, a diferencia de los mesociclónicos. Son débiles, de corta duración y no son fáciles de detectar. Se pueden subclasificar en trombas terrestres, trombas marinas y “gustnados” (tornados de frente de ráfagas) (Piñeres, 2010).

El proceso de gestación de un tornado mesociclónico, según TORRO (2021), tiene varias fases:

- 1) Comienza dentro de las células de tormenta, conforme el aire ingresa por el flanco derecho delantero a baja altitud.
- 2) Persiste una fuerte corriente ascendente de aire cálido y húmedo.
- 3) El aire ascendente se ve obligado a girar debido a la variación vertical del viento con la altura y a su proximidad a una corriente descendente de aire más frío y seco.
- 4) La corriente ascendente caliente flotante adquiere rotación en sentido antihorario en el hemisferio norte (sentido horario en el hemisferio sur) a medida que sufre un estiramiento local en la vertical.
- 5) El efecto de giro en espiral se extiende gradualmente a lo largo de la corriente ascendente, y la velocidad de rotación aumenta a medida que disminuye el diámetro efectivo de la columna, este proceso principalmente ocurre con los tornados mesociclónicos.

Cuando la columna se extiende visiblemente debajo de la base de la nube como una nube en forma de embudo, es porque el vapor de agua se está condensando en su cubierta exterior debido a la caída de presión y temperatura. Tras pasar el tiempo suficiente, se presenta una velocidad de giro y estiramiento lo suficientemente alto como para que el embudo del tornado se alargue hasta el suelo. Esto ocurre mientras hay ráfagas descendentes en la nube de tormenta y vientos de alta velocidad potencialmente dañinos. Esto forma un efecto de absorción donde el embudo succiona todo lo que se encuentra a su paso.

Por otro lado, los tornados no mesociclónicos no se originan dentro de una tormenta celular o una supercelda. Existen dos principales factores que originan su formación y para llegar a la fase de madurez deben presentarse y mantenerse ambos (Alfonso, 1994). Lo primero es la existencia de convección, que normalmente se presenta en nubes de tipo cumulonimbos en la región tropical. Estas nubes son lo suficientemente altas como para generar el proceso de ascenso vertical de aire cálido y una corriente descendente fría y más seca. Y lo segundo es la rotación sostenida del aire que genera cizalladura.

Para lograr la convección existen varios mecanismos, esto puede presentarse en condiciones con un perfil termodinámico inestable, que puede hacer que el aire menos denso ascienda rápidamente. También, cuando el mar está cálido (temperaturas superficiales superiores a los 28°C) puede producir un aumento en la temperatura del aire con el que está en contacto y generar el ascenso de este. Por último, la orografía u otras masas de aire con diferente densidad también pueden causar movimientos verticales (Golden, 1974).

Ahora bien, se ha observado que las trombas marinas específicamente, tienen otro proceso particular. Se asocian a una combinación de cizalladura horizontal del viento a nivel del mar

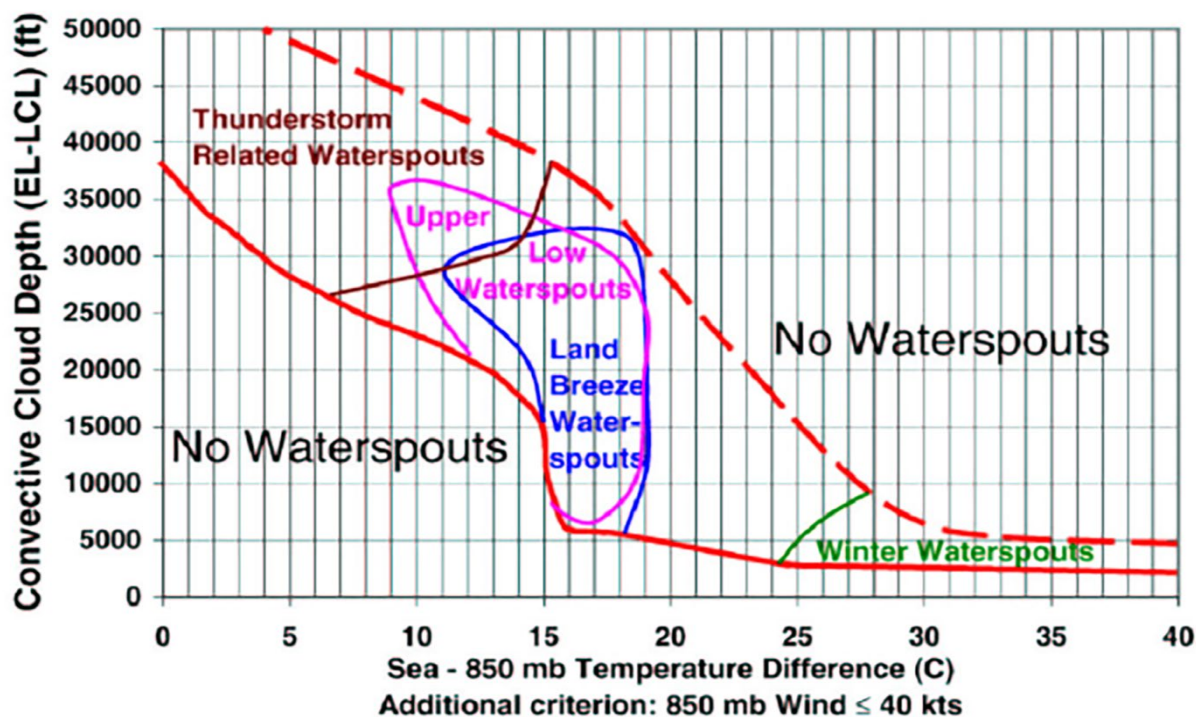


Figura 1: Monograma de Szilagyi para la formación de una tromba marina (tomado de Szilagyi, 2005)

y altas temperaturas en la superficie marina (ver Figura 1). Además, Simpson et al (1986) sugieren que la existencia de vórtices parentales a escala de cúmulos es una condición necesaria para la formación de trombas marinas, pero no suficiente por sí sola. Para que se genere un embudo visible, los vórtices deben intensificarse por debajo de la base de la nube hasta el nivel del mar durante el breve lapso de tiempo en que la corriente ascendente convectiva está activa.

Sobre aguas cálidas someras, la convección somera y la brisa marina generan líneas de convergencia y vórtices de capa límite que, con suficiente flujo ascendente y contraste térmico mar-aire, permiten el desarrollo de vórtices similares a “motores térmicos” (teoría termodinámica para torbellinos convectivos) que al acoplarse a bases de cúmulos, producen trombas marinas delgadas de vida breve y vientos moderados (Golden, 1974). Este mecanismo explica la alta frecuencia de trombas marinas en regiones tropicales-subtropicales como Florida Keys. Por otro lado, el

mismo mecanismo ha sido observado en litorales subtropicales como Canarias bajo condiciones cálidas, húmedas y con cizalladura débil-moderada.

Luego de más de 95 observaciones, Golden (1974) identificó 5 fases para su desarrollo:

- 1) Formación de una mancha oscura en el mar. Se forma un disco oscuro, casi negro, sobre la superficie del agua. La mera presencia de la mancha implica la existencia de la columna de aire rotante sobre el agua. Una pequeña nube embudo puede o no estar presente. Muy posiblemente esta mancha oscura se deba a la sombra del embudo antes de tocar la superficie del mar. (Szilagyi, 1994).
- 2) La fase de espiral. Se forman unas bandas espirales en el agua entorno a la mancha negra. Las bandas alternan entre claras y oscuras.

Cuadro 1: Escala Fujita mejorada para clasificar los tornados según la intensidad del viento y los daños ocasionados. (OMM, 2024)

Categoría EF	Velocidad estimada del viento (km/h)	Impactos principales
EF0	105–137	Daños menores en techos y ramas pequeñas.
EF1	138–178	Daños moderados en viviendas; árboles medianos derribados.
EF2	179–218	Daños considerables en techumbres y paredes; árboles grandes arrancados.
EF3	219–266	Daños severos en edificaciones sólidas; destrucción parcial de viviendas.
EF4	267–322	Daños devastadores: colapso de casas sólidas; vehículos proyectados.
EF5	≥323	Destrucción total de construcciones; árboles despojados de corteza.

- 3) Fase del anillo de espuma. Sobre la mancha oscura comienza a formarse un torbellino de espuma a partir del agua levantada por el viento. Al mismo tiempo, se inicia el desarrollo vertical de la nube embudo.
- 4) La madurez. El anillo de espuma y la tuba alcanzan su máxima longitud y diámetro.
- 5) La disipación. Sucede a veces de manera brusca, cuando cesa una de las condiciones que mantienen activa la tromba. Muchas veces la lluvia cercana intercepta la tromba y las corrientes de aire frío descendentes inician la disipación del fenómeno (Szilagyi, 2004).

Los modelos de formación de tornados no están lo suficientemente desarrollados, sin embargo, en los trópicos, al ser menos frecuentes condiciones extremas que permitan desarrollar superceldas convectivas, se puede determinar que la mayoría de estos eventos que ocurren en la región son tornados no mesociclónicos. Siendo así los tornados tropicales fenómenos menos intensos y poco frecuentes en comparación con sus homólogos extratropicales o mesociclónicos de latitudes medias (Page, 2005).

La velocidad del viento de los vórtices de la mayoría de los tornados tropicales se estima en

menos de 176 km/h. Duran entre pocos segundos y aproximadamente una hora; y recorren distancias entre 100 metros y decenas de kilómetros a velocidades de 18 a 46 km/h (MetEd, 2020) (Laing, 2016).

La duración de las trombas marinas varía entre 5 a 10 minutos y su velocidad de traslación puede estar entre 5 a 20 km/h. Su velocidad de rotación no sobrepasa los 130 km/h y tienden a ser levemente menos intensas que las trombas terrestres.

Todos estos diferentes tipos de tornados se comenzaron a clasificar en estudios realizados en latitudes medias por Theodore Fujita (1971). Surgiendo la escala Fujita para categorizar dichos eventos, basándose en la intensidad del viento y los daños que éstos producían. Actualmente se utiliza la escala Fujita mejorada, la cual está descrita en el cuadro 1 (NOAA, 2024).

Por lo tanto, basados en su intensidad y duración, los tornados generados por ciclones y tormentas tropicales habitualmente se clasifican en los rangos más bajos (por ejemplo, EF0 o EF1). Aun así, estos eventos representan un riesgo considerable para las zonas afectadas, particularmente porque

pueden formarse a gran velocidad y sin aviso suficiente (NOAA, s.f.).

Por otro lado, TORRO utiliza una escala diferente. El Dr. G. Terence Meaden ideó la Escala Internacional de Intensidad de Tornados en 1972 para clasificar las velocidades del viento de los tornados. Está directamente relacionada con la Escala Beaufort y es la única escala verdadera de intensidad de tornados con una base científica sólida (TORRO, 2021).

Existen otros fenómenos que se generan en las nubes cumulonimbos los cuales provocan daños severos debido a la intensidad de los vientos y son las ráfagas descendentes. Se forman por efecto del arrastre de la precipitación, del enfriamiento evaporativo y de la incorporación de aire seco. Las corrientes descendentes más intensas pueden provocar vientos muy fuertes (más de 190 km/h) y dañinos en la superficie. En ocasiones pueden ser confundidas con tornados no mesociclónicos, a consecuencia de su intensidad (Barnes, 2001).

Las corrientes descendentes se clasifican en microrráfagas, que tienen un alcance horizontal inferior a los 4 km y una duración de algunos minutos; y las macrorráfagas, que exceden los 4 km de extensión, duran entre 5 y 30 minutos y son capaces de provocar daños similares a un tornado F0 o F1 en la escala Fujita debido a sus ráfagas de viento superiores a los 120 km/h y en ocasiones superiores a los 140 km/h (MetEd, 2020).

Como existe muy poca documentación sobre la ocurrencia de tornados y trombas en Centroamérica, no se considera como una región tornádica en muchas de las clasificaciones y publicaciones, sin embargo, este estudio demuestra que dichos fenómenos son frecuentes en ciertas regiones climáticas y épocas del año en Costa Rica, así como las variables meteorológicas predominantes para su ocurrencia.

Además, se analiza la correlación que tienen estos eventos con las fases tanto de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) como de la Oscilación de Madden-Julian (MJO), la cual tiene afectación en la precipitación sobre la región de Centroamérica y el Caribe (Poleo et al 2014-a). Por otro lado, aunque los eventos extremos de precipitación se asocian a la cercanía de la Zona de Convergencia Intertropical, también se puede inferir que la presencia de mayores sistemas convectivos de mesoescala y complejos convectivos se debe principalmente a la presencia de la fase 1 y 2 de la MJO (Poleo et al 2014-b), debilitando los alisios y generando mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos extremos asociados a la generación de cumulonimbos.

En México, Macías y Avendaño (2014) realizaron una climatología de tornados ocurridos en este país entre los años 2000 y 2012. Consideraron necesario empezar a construir una base de datos que permitiera ir conformando el panorama global de su existencia, sus características meteorológicas y condiciones de aparición, para ilustrar ese potencial de amenaza y sus condiciones que han sido ignoradas durante muchos años. Ellos concluyen que la construcción de la base de datos de tornados es un instrumento de análisis que permite apreciar la extensión de la ocurrencia de tornados en el país en sus dimensiones temporal y espacial.

Por otro lado, León-Cruz et al. (2025) identificaron tres “tipos de entornos tornádicos” en México con inestabilidad moderada y cizalladura de marginal a moderada, modulados por contrastes térmicos regionales y topografía. Además, en costas del Caribe y el Golfo de México, las trombas marinas son frecuentes y distinguen variantes tornádicas y no tornádicas en la tipología operativa del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA, s. f.).

En Cuba, Aguilar et al. (2005) realizaron una climatología de las tormentas locales severas (TLS) en el período entre 1987 y 2002. Encontraron que

las TLS presentan una clara variación estacional y una variabilidad interanual que sugieren una relación entre los eventos de La Niña y los máximos de actividad de TLS.

En Brasil, Silva (2011) realizó un estudio sobre el aumento de reportes de tornados en dicho país. Comparó el aumento en los informes sobre tornados con la evolución de la densidad de población y las comunicaciones, representadas estas últimas por la evolución de las cadenas de televisión locales y la popularización de Internet. Además, voluntarios espontáneos han contribuido a concienciar sobre la existencia de tornados y el peligro que suponen para la vida y la propiedad. Concluye que, aunque este tipo de noticias son irregulares y poco científicas, son la única fuente disponible sobre este fenómeno, aparte de los pocos casos que han llegado a la literatura científica. Y recalca la importancia de que exista un registro oficial de informes sobre tornados en Brasil.

En 2025, Lopes y de Lima realizaron un estudio en el sur de Brasil, donde se muestra una concentración de tornados dentro del corredor severo del Cono Sur; una climatología recopiló 310 ocurrencias con estacionalidad y distribución espacial definidas en Rio Grande do Sul, Santa Catarina y Paraná. Entre los casos emblemáticos destaca el tornado de Xanxerê (Santa Catarina, 20 de abril de 2015), con víctimas y gran destrucción, documentado por la prensa y por análisis de daños de la comunidad científica brasileña (Agencia Brasil, 2015). Estos hallazgos confirman que, aun fuera de los “pasillos” clásicos de latitudes medias, la confluencia de humedad tropical y forzamientos frontales o de mesoescala favorece convección tornádica intensa en el sur de Brasil.

2. METODOLOGÍA

Se buscaron los registros de publicaciones en medios de comunicación en Costa Rica, boletines

meteorológicos, redes sociales que evidenciaran con fotografías, videos y testimonios de testigos toda la ocurrencia de eventos de torbellinos en Costa Rica en el período entre los años 2010 y 2023. Luego se analizaron todas las condiciones sinópticas de cada evento encontrado para clasificarlos en los diferentes tipos de torbellinos descritos anteriormente, basándose en la evidencia recolectada, y se identificaron todos los tornados y trombas que ocurrieron, diferenciándolas con otros eventos que tienden a ser confundidos con tornados.

Para ello se analizaron datos de estaciones meteorológicas suministradas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y otras instituciones (estaciones de la red de Wunderground, UCR cercanas al evento), imágenes de satélite y radar, bitácoras del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica (DMSA) del IMN y boletines meteorológicos del IMN, así como productos derivados de satélites suministrados por el Instituto Cooperativo para el Estudio Satelital Meteorológico (CIMSS, por sus siglas en inglés).

Para entender las razones termodinámicas que influyeron en la ocurrencia de tornados, se observó la temperatura potencial equivalente generada por una climatología de radiosondeos en el Valle Central, lugar donde se presentaron la mayor cantidad de eventos, esto con el fin de determinar si existían condiciones climatológicas que influyeran en el desarrollo tornádico en la región.

Se clasificaron todos los eventos detectados según la localización, fecha, tipo de evento y región climática establecida por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2021). Con base en esto, se realizó una climatología de eventos ocurridos en el país durante el período de estudio. Luego se clasificaron mensualmente cada uno de los torbellinos y se seleccionaron únicamente los torbellinos principales para conocer su

frecuencia de ocurrencia. Los torbellinos menores se descartaron y no fueron presentados en el presente trabajo puesto que nuestro interés son los tornados propiamente.

Por otro lado, se clasificaron los tornados no mesociclónicos según la fase del El Niño Oscilación del Sur (ENOS) usando los períodos que la NOAA con el índice de oscilación del Niño (ONI) y el índice de oscilación del Sur determinaron que se tenía un fenómeno cálido o frío del ENOS.

Además, se determinó la fase de la oscilación Madden Julian (MJO) según la metodología de Wheeler y Hendon (2004) para la fecha de ocurrencia de cada evento, para así determinar la frecuencia de tornados y trombas marinas en cada una de ellas y clasificarlos.

Para el análisis sinóptico las variables que se utilizaron fueron:

- 1) La presión atmosférica al nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés) medida en hectopascales (hPa), esto para determinar las zonas de altas y bajas presiones.
- 2) El vector del viento en el nivel de 850 hPa medido en metros por segundo (m/s), esto para determinar el comportamiento del viento predominante.
- 3) Los valores de la variable omega medidos en Pascales por segundo (Pa/s), los cuales miden el flujo advectado de aire cálido o frío a la atmósfera. Si el flujo de aire es ascendente (descendente), los valores serán negativos (positivos) y están asociados a sistemas de baja presión (alta presión).
- 4) Líneas de corriente en los niveles de 250 hPa, 500 hPa y 850 hPa para determinar ubicación de la ZCIT y patrones favorables para los cumulonimbos.
- 5) La vorticidad relativa (VR) en el nivel de 850 hPa medida en (s^{-1}), la cual indica la rotación del aire a través de la atmósfera. Siendo positiva cuando es ciclónico (giro

antihorario en el hemisferio norte) y negativa cuando es anticiclónica (giro horario en el hemisferio norte). Está asociado a bajas presiones y ascensos cuando es positiva, mientras que cuando es negativa está asociado a altas presiones.

- 6) La cortante del viento medida en nudos (Kt) la cual es una variable importante para determinar el favorecimiento o no de la convección profunda y el desarrollo de nubes cumulonimbos.
- 7) Finalmente se usaron Imágenes satelitales de radiación infrarroja (IR, por sus siglas en inglés) medida en Celsius ($^{\circ}C$), la cual estima la temperatura de los toques nubosos para determinar la altura del cumulonimbo que generó el tornado y la tromba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego del análisis sinóptico de los 61 días con eventos registrados, se identificaron 64 torbellinos principales en los 14 años de estudio, dado que en uno de los eventos sucedieron 4 trombas marinas al mismo tiempo y se contabilizaron por separado. Los eventos están ubicados espacialmente en un mapa de Costa Rica en la figura 2. Además, se clasificaron en el cuadro 2 por regiones climáticas y por tipo de evento, siendo la mayoría específicamente trombas terrestres, a las que nombraremos simplemente tornados en adelante.

Se identificó una mayor cantidad de tornados representando un 67.2 % del total de eventos, un 21.9% fueron trombas marinas y finalmente un 10.9 % de nubes de embudo (ver Cuadro 3). Estas últimas fueron fenómenos que no llegaron a tocar tierra, desarrollándose la mayoría de las condiciones para la ocurrencia del tornado, pero sin llegar a formarse completamente.

Las regiones con menor ocurrencia de eventos son el Pacífico Central y Zona Norte (ver Figura 3). Probablemente por menos presencia de

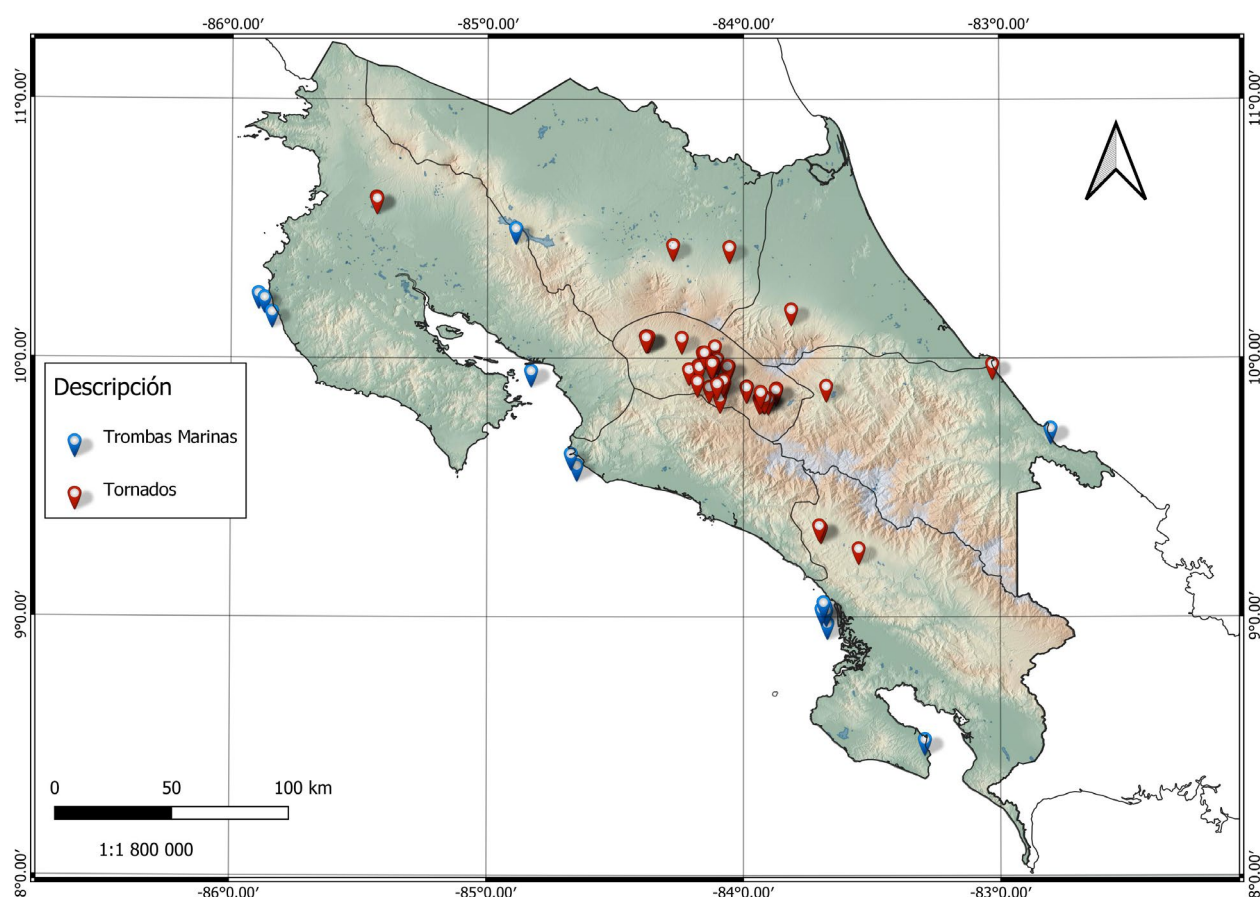


Figura 2. Ubicación espacial de los principales tornados (rojo) y trombas marinas (azul) registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 2. Tornados, trombas marinas y nubes de embudo registrados en Costa Rica durante el 2010 al 2023.

Día	Mes	año	Ubicación	Región climática	Tipo de evento
6	5	2010	Barva de Heredia	Valle Central	Tornado
15	6	2010	Belén de Heredia	Valle Central	Tornado
27	7	2010	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
2	9	2011	Pococí de Limón	Vertiente del Caribe	Tornado
22	6	2012	San Pedrito de Pérez Zeledón	Pacífico Sur	Tornado
28	11	2012	Bella Vista de Sarapiquí	Vertiente del Caribe	Tornado
4	6	2013	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
27	6	2014	Aserri	Valle Central	Tornado
28	4	2015	Santa Bárbara de Heredia	Valle Central	Tornado
20	6	2015	Sierpe de Osa	Pacífico Sur	Tromba marina
12	4	2016	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
12	7	2016	Santa Cruz de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba marina
30	9	2016	Turrialba de Cartago	Vertiente del Caribe	Tornado
14	3	2017	Puerto Jiménez de Golfito	Pacífico Sur	Tromba marina
27	3	2017	Santa Cruz de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba marina
11	4	2017	Liberia de Guanacaste	Pacífico Norte	Tornado

Día	Mes	año	Ubicación	Región climática	Tipo de evento
23	4	2017	Guadalupe de Cartago	Valle Central	Tornado
8	5	2017	San Isidro del General	Pacífico Sur	Tornado
19	6	2017	Cartago centro	Valle Central	Tornado
6	7	2017	San Rafael de Alajuela	Valle Central	Tornado
12	7	2017	Tres Ríos de Cartago	Valle Central	Nube de embudo
31	7	2017	San Antonio de Escazú	Valle Central	Tornado
5	8	2017	Tres Ríos de Cartago	Valle Central	Tornado
19	8	2017	Zona Sur	Pacífico Sur	Tornado
23	8	2017	Hatillo de San José	Valle Central	Tornado
9	9	2017	Plaza González Víquez	Valle Central	Tornado
16	9	2017	San José centro	Valle Central	Nube de embudo
24	9	2017	Oreamuno de Cartago	Valle Central	Tornado
22	3	2018	Limón centro	Vertiente del Caribe	Tornado
30	5	2018	Quircot de Cartago	Valle Central	Nube de embudo
12	9	2018	Heredia y San José	Valle Central	Tornado
20	9	2018	Junquillal de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba Marina
10	4	2019	Liberia de Guanacaste	Pacífico Norte	Tornado
6	8	2019	Belén de Heredia	Valle Central	Tornado
18	8	2019	Lago del Arenal, San Carlos	Zona Norte	Tromba marina
26	5	2020	Pital de San Carlos	Zona Norte	Tornado
15	6	2020	Santo Domingo de Heredia	Valle Central	Nube de embudo
19	10	2020	Volcán Poás	Valle Central	Tornado
22	10	2020	Naranjo de Alajuela	Valle central	Tornado
14	11	2020	San Rafael de Heredia	Valle Central	Tornado
9	1	2021	Mercedes Norte de Heredia	Valle Central	Tornado
5	5	2021	Santa Ana	Valle Central	Nube de embudo
5	8	2021	Santa Bárbara de Heredia	Valle Central	Tornado
14	9	2021	Santo Domingo de Heredia	Valle Central	Tornado
15	9	2021	Cartago centro	Valle Central	Tornado
9	10	2021	Heredia	Valle Central	Nube de embudo
18	5	2022	La Aurora de Heredia	Valle Central	Tornado
26	6	2022	Jacó, Garabito	Pacífico Central	Tromba marina
2	8	2022	La Lima Cartago	Valle Central	Tornado
11	8	2022	San Blas Cartago	Valle Central	Tornado
23	8	2022	Centro Cartago	Valle Central	Tornado
31	8	2022	Cot de Oreamuno, Cartago	Valle Central	Tornado
21	5	2023	Osa	Pacífico Sur	4 trombas marinas
7	6	2023	Puntarenas	Pacífico Norte	Tornado
1	7	2023	Herradura	Pacífico Central	Tromba marina
1	7	2023	Manzanillo	Vertiente del Caribe	Tromba marina
17	8	2023	Heredia	Valle Central	Nube de embudo
1	9	2023	Garabito	Pacífico Central	Tromba marina
23	9	2023	Heredia	Valle Central	Tornado
10	10	2023	Poás	Valle Central	Tornado
14	11	2023	Oreamuno de Cartago	Valle Central	Tornado

Fuente: Propia.

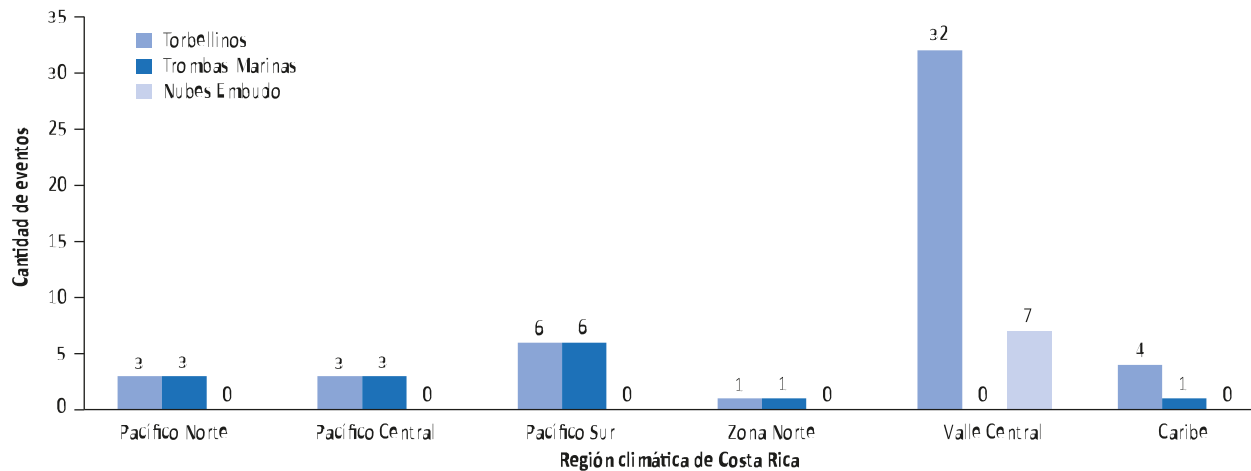


Figura 3. Clasificación por región climática de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 3. Representación porcentual por tipo de evento de los fenómenos registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023

Tipo de evento	Cantidad de eventos	%
Tornado	43	67,2
Tromba Marina	14	21,9
Nubes embudo	7	10,9
Total	64	100,0

Fuente: Propia.

avistamientos, además de condiciones menos propicias para la convergencia de vientos y formación de cumulonimbos con rotación.

La mayor ocurrencia de eventos se dio en el Valle Central (ver Figura 3). Esto debido a la presencia del frente de convergencia de vientos en el centro del país. Es decir, por la confluencia de la brisa marina que ingresa de la región del Pacífico y los vientos alisios provenientes del este. Aunado a esto, la presencia de temperaturas convectivas superiores a 28°C, además de valores muy altos de temperatura potencial equivalente que llegan al menos hasta 600 hPa.

Estas condiciones, que no se evidenciaron en otras regiones del país, permitieron el desarrollo de cúmulos de alto crecimiento vertical con

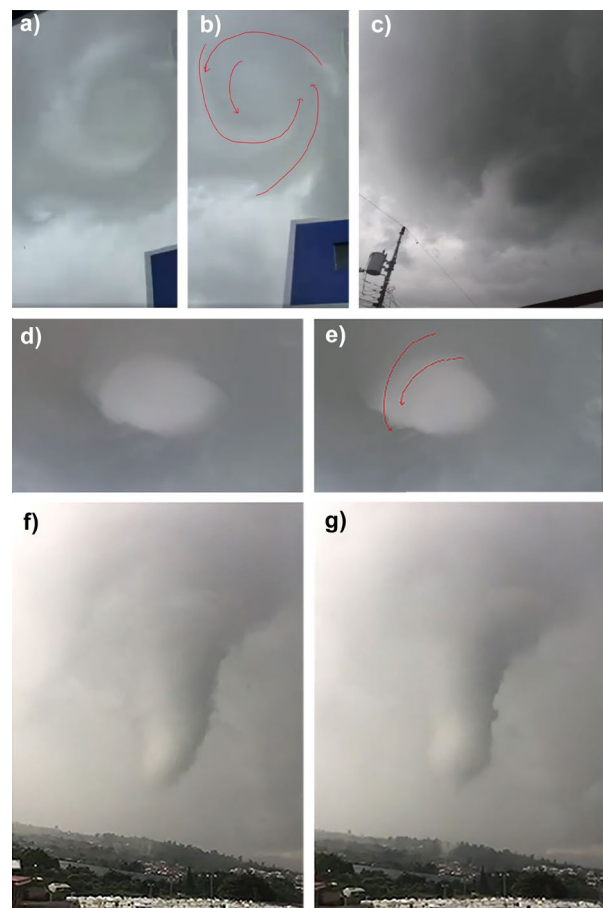


Figura 4: Fases de formación de los tornados (trombas terrestres) observadas en el trópico. Imágenes tomadas en Costa Rica extraídas de varios eventos. Fuente: Elaboración propia, (extraída de video de la Nación 5 agosto 2021).

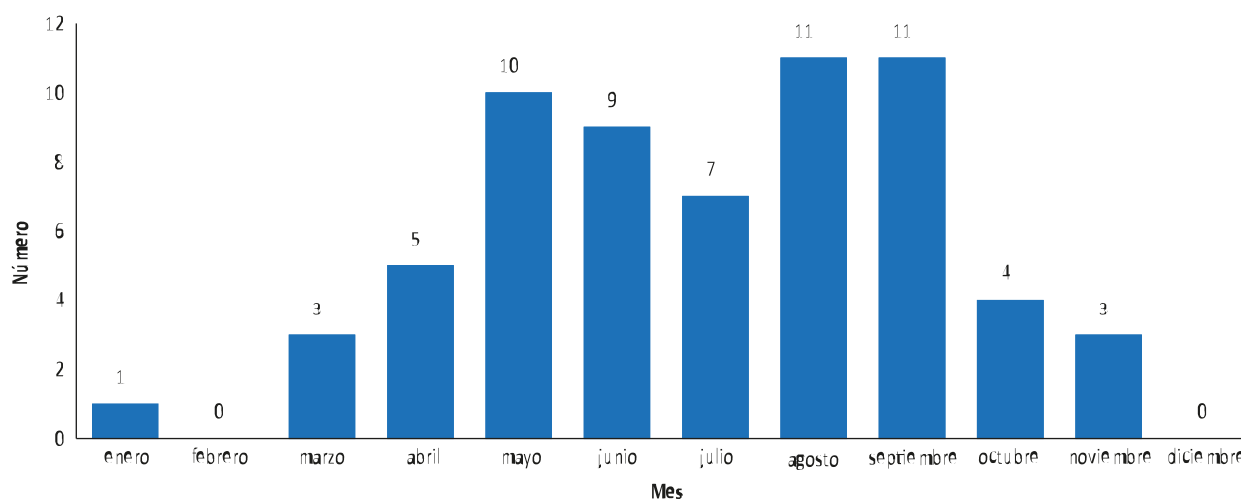


Figura 5. Distribución mensual de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

temperaturas en los topos nubosos inferiores a los -75°C , así como la rotación de los núcleos nubosos. Permitiendo identificar el proceso de formación de los tornados (trombas terrestres) en la mayoría de los eventos (ver Figura 4):

- Etapa de convergencia de vientos húmedos (alisios-oestes) a temperaturas superiores a los 28°C en superficie.
- Formación de cumulonimbos con temperaturas por debajo de los -75°C y hasta -90°C .
- Alta vorticidad del cumulonimbo y presencia de fuertes microrráfagas descendentes. En la base de la nube comienza a notarse el vórtice y giro.
- Fuertes ráfagas descendentes comienzan a empujar el embudo a la superficie. En ocasiones se observa granizo pequeño.
- Formación del embudo en la base (centro) de la nube.
- El tornado toca tierra, esto puede ser observable quizá algunos metros sobre la superficie, pueden percibirse escombros resultados de las microrráfagas y en rotación alrededor del embudo.
- Disipación del evento, la base de la nube tiende a subir.

Las trombas marinas, aunque se registraron en ambas vertientes del país, hubo una mayor ocurrencia de fenómenos en la vertiente del Pacífico, no habiendo preferencia para ninguna subregión. Esto probablemente ocurrió porque para todos estos eventos se necesitó que la temperatura del tope de la nube alcanzara promedios de casi -90°C , siendo más sencillo en el Pacífico al tener temperaturas más cálidas y la presencia de la ZCIT con mayor divergencia. Esto se evidenció en los análisis sinópticos realizados en cada uno de los eventos.

La mayoría de los núcleos convectivos asociados a las trombas marinas tuvieron temperaturas por debajo de los -85°C a -95°C en sus topos nubosos, es decir, tendían a ser más frías que las nubes que desarrollaron los tornados en tierra.

Los análisis sinópticos no se incluyeron en el artículo por ser demasiado extensos pero se determinó en todos los eventos ciertas características recurrentes: anomalías de presión negativa en el Pacífico o Caribe circundante, las presiones a nivel del mar promedios estuvieron entre 1010 y 1012 hPa; grandes regiones de Omegas negativas en toda la región por debajo de -0.12 Pa/s ; posicionamiento de la ZCIT sobre

el Pacífico como vaguada monzónica (conformada por circulaciones ciclónicas) y no como una simple convergencia de vientos; anomalías de vientos del oeste, valores de vorticidad relativa por sobre 45-50 s^{-1} y cortante débil del viento favorable para ciclogénesis.

Se observó una marcada estacionalidad de la ocurrencia de estos fenómenos entre mayo y septiembre, con una disminución en julio, muy posiblemente asociada a un incremento en la cortante del viento debido al Veranillo o Canícula (ver Figura 5).

No se registraron eventos ni en febrero ni en diciembre, ambos meses del invierno del hemisferio norte. Muy posiblemente esta merma se debió a una disminución de las temperaturas convectivas y la ausencia de cumulonimbos de alto crecimiento vertical.

Se determinó que los meses con mayor inestabilidad atmosférica y menor velocidad en los vientos alisios, coincidieron con los meses con mayor actividad tornádica, particularmente junio y septiembre.

Este comportamiento se puede inferir con el calentamiento en el verano boreal, condiciones más inestables consecuencia de la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), una mayor inestabilidad atmosférica a causa de mayor presencia de ondas tropicales que arriban a Centroamérica, entre otros factores.

Por otro lado, pareciera existir un aumento en la tendencia de fenómenos en los últimos años, sin embargo, esto pudiera obedecer a una mayor documentación videográfica con la cual validar la ocurrencia del evento (ver Figura 6).

Cuando se analizó el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) separando cada evento según la fase de ocurrencia del fenómeno (ver Cuadro 4), se observó que hay una gran influencia de la fase fría del ENOS (La Niña) durante la ocurrencia de tornados, el 69,8% de los eventos se presentaron durante esta fase. Mientras que cuando se tuvieron condiciones de El Niño, hubo más eventos de trombas marinas registradas. Incluso en uno de los eventos en la península de Osa se observaron 4 trombas al mismo tiempo (ver Figura 7).

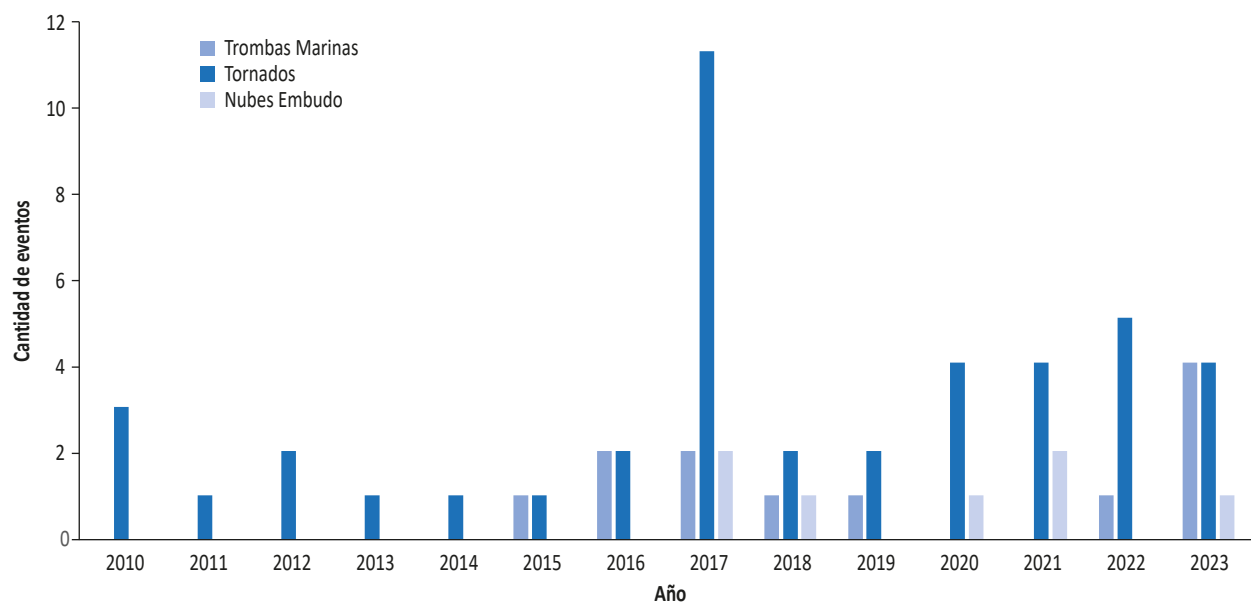


Figura. 6. Distribución anual de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo ocurridos en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 4. Cuadro comparativo de la frecuencia de tornados, trombas marinas y nubes de embudo durante el fenómeno ENOS entre el período 2010-2023.

Fase ENOS	Tornados	%
Niña	30	69,8
Niño	7	16,3
Neutro	6	14,0
Total	43	100,0

Fase ENOS	Trombas marinas	%
Niña	1	7,1
Niño	6	42,9
Neutro	7	50,0
Total	14	100,0

Fase ENOS	Nubes embudo	%
Niña	5	71,4
Niño	2	28,6
Neutro	0	0,0
Total	7	100,0

Fuente: Propia.

Además, se observó una marcada influencia de la oscilación Madden-Julian (MJO) en la ocurrencia de los tornados (ver Figura 8). En las fases 1, 2 y 8 ocurrió más de un 75 % de los eventos registrados en el país, estos en su mayoría en la vertiente del Pacífico, con excepción de 4 eventos de tornados.

Por otro lado, las trombas marinas se presentaron en su mayoría (60%) en fases 3 y 4 de la MJO. De todas las trombas marinas registradas, 12 ocurrieron en el Pacífico y 2 en la vertiente del Caribe (una de ellas en el Lago Arenal). La fase de la MJO con menor ocurrencia de fenómenos fue la fase convergente 6.

Se evidenció que las fases divergentes de la MJO (fases 1 y 2) fueron las que favorecieron mayor cantidad de tornados y las fases convergentes estuvieron presentes en la mayoría de la ocurrencia de trombas marinas (siendo independiente de



Figura 7. Trombas marinas ocurridas en Osa, 21 de mayo 2023.

Fuente: Propia (Extraído y modificado de un video anónimo).

la formación en el océano Pacífico o en el mar Caribe).

La razón principal de que la mayoría de los tornados ocurran durante los meses de junio y agosto-septiembre, así como la disminución o mínimo de eventos presentados en Julio, se debe posiblemente a la inestabilidad atmosférica en niveles bajos y medios de la atmósfera presente durante esos meses. Esto se observa en la figura 9, donde podemos ver altos valores de temperatura

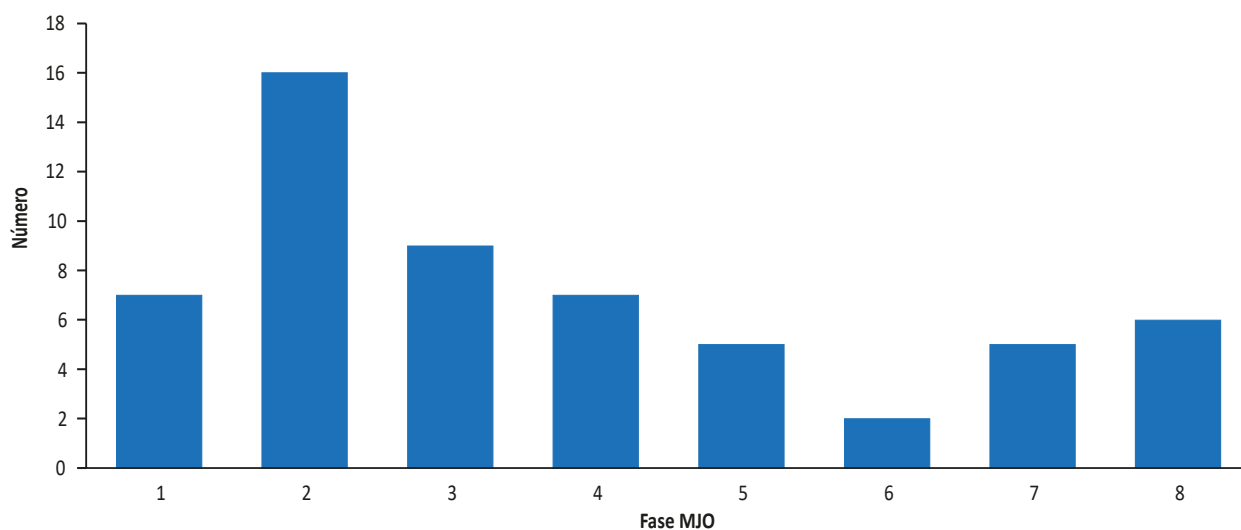


Figura 8. Distribución de los tornados no mesociclónicos ocurridos en cada fase de la MJO en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

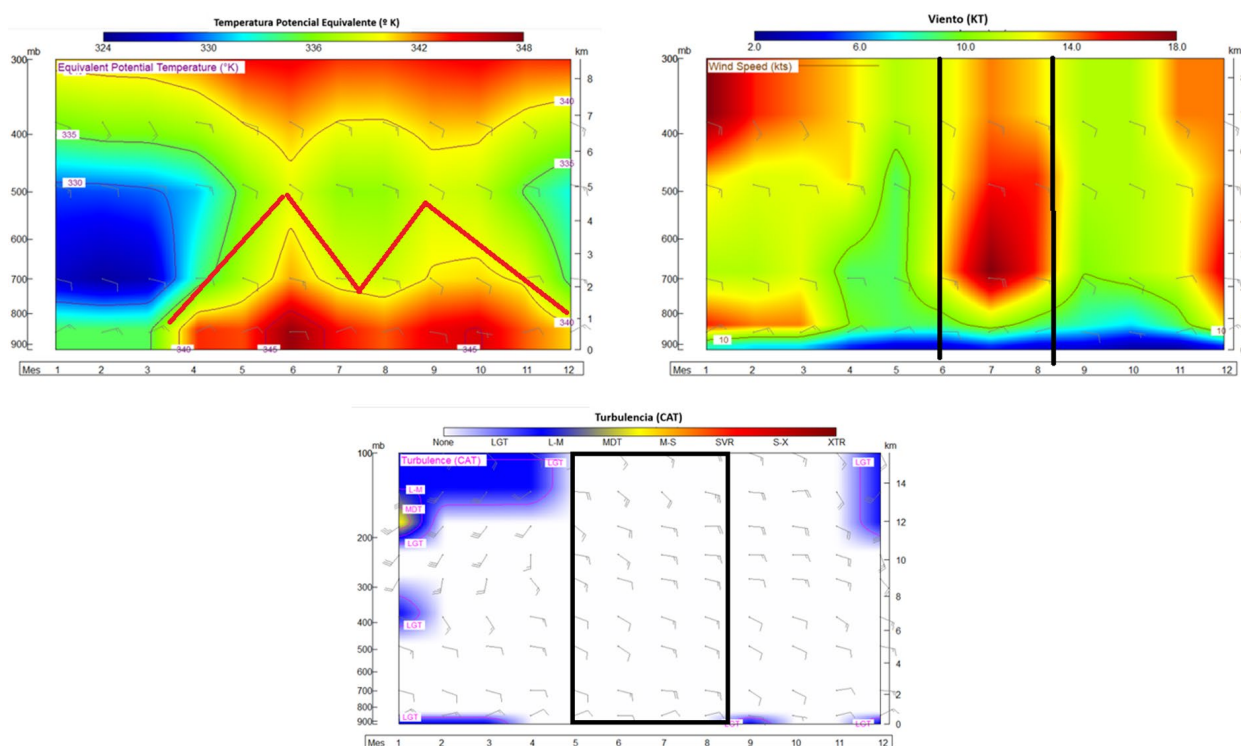


Figura 9. Serie de tiempo anual de la Temperatura Potencial Equivalente (THTE), Viento total y Turbulencia de aire Claro (CAT). Período 2013-2017. Tomado de Valverde (2019).

potencial equivalente durante dichos meses, la cual es mayor que en el resto del año.

Por otro lado, se observó que, con una mayor inestabilidad convectiva, la presencia de una

mayor temperatura potencial equivalente en esos meses de junio, agosto y septiembre generó una mayor inestabilidad atmosférica a la hora de generar estos fenómenos en el Valle Central, así como una mayor profundidad en los

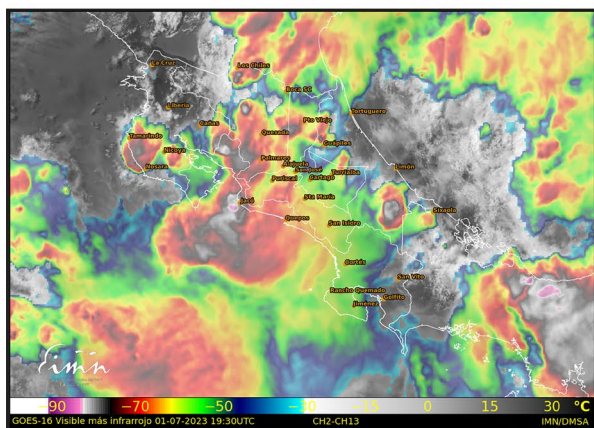
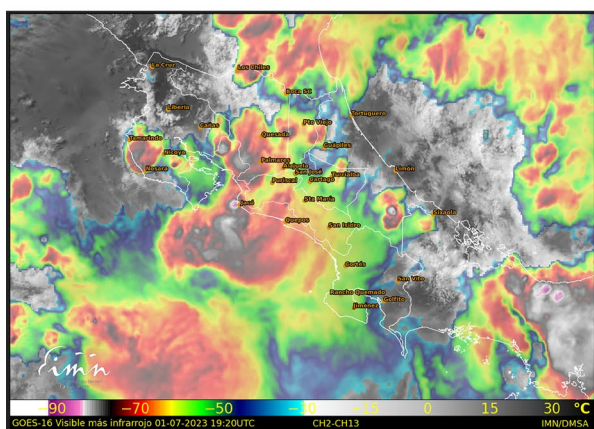
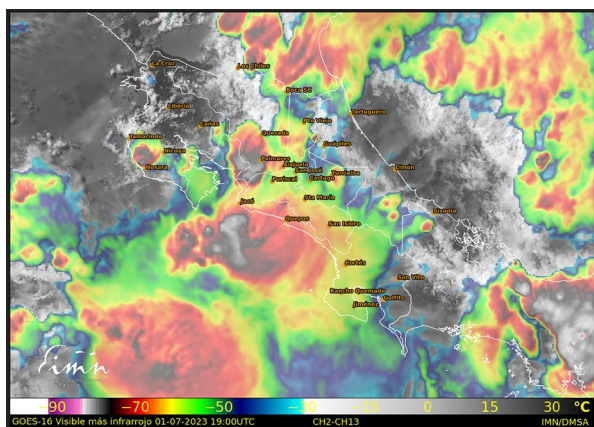
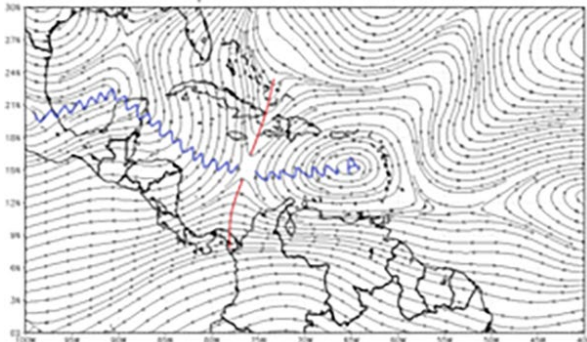


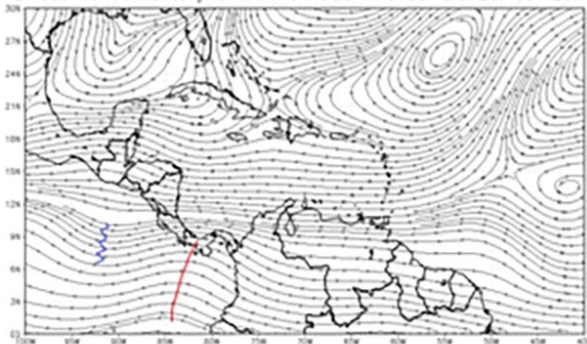
Figura 10. Ejemplo de la disminución de la temperatura en los topes nubosos durante uno de los casos de tromba marina el 1 de julio 2023. Tromba de Herradura. Fuente: Canal 13, GOES 16.

cumulonimbos, cuyas temperaturas alcanzaron valores menores a los -75°C y para trombas marinas temperaturas menores a los -90°C para todos los eventos identificados (ver Figura 10).

Líneas de corriente promedio en 250 hPa del día 20-09-2018



Líneas de corriente promedio en 500 hPa del día 20-09-2018



Líneas de corriente promedio en 850 hPa del día 20-09-2018

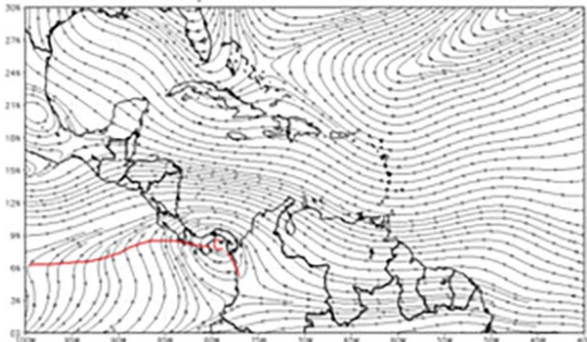


Figura 11. Líneas de corriente del evento ocurrido el 20 de septiembre de 2018 en (hPa). La imagen superior muestra los valores promedio al nivel de 250 hPa, la imagen del centro muestra los valores promedio al nivel de 500 hPa y la imagen inferior muestra los valores promedio al nivel de 850 hPa.

Fuente: Generado con Grads elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

En la figura 10 podemos observar los núcleos convectivos rosados (temperaturas -95°C) en la costa frente a Jacó indicada en el mapa, que fue donde se desarrolló la tromba marina que se observó el 1 de julio de 2023. Este tope nuboso

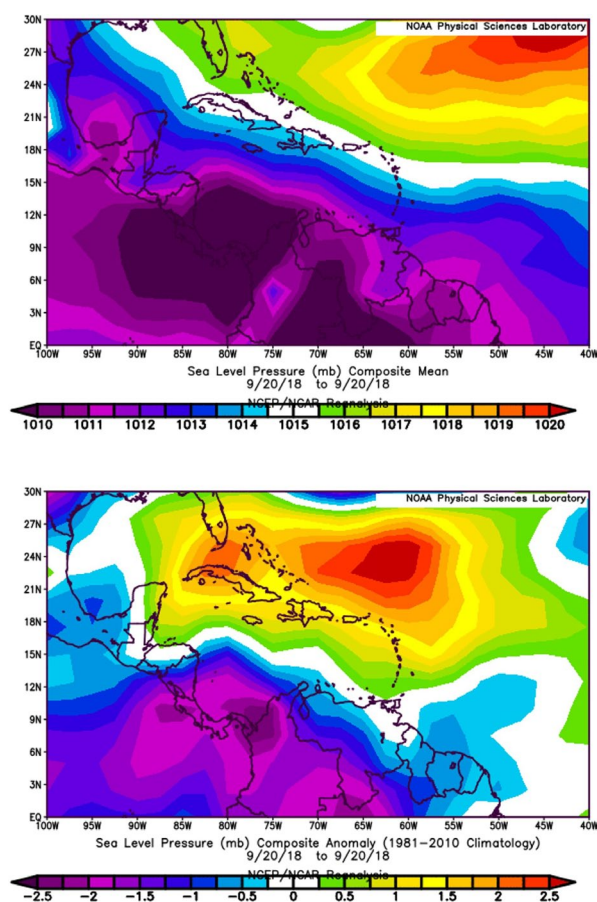


Figura 12. Presión atmosférica al nivel del mar (SLP) y su anomalía ocurrida el 20 de septiembre de 2018. La imagen superior representa los valores de SLP promedio. La imagen inferior re- presenta las anomalías de dicha variable.

Fuente: Elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/ NOAA.

muy frío, aunque pequeño (20 km de diámetro aproximadamente) fue suficiente para generar las ráfagas verticales e inducir el desarrollo de la tromba, por otro lado, el océano Pacífico se encontraba cálido, inmerso dentro de un episodio de El Niño Oscilación del Sur.

En las figuras de la 11 a la 14, presentamos el análisis sinóptico de uno de los casos analizados. Este mismo análisis se elaboró para cada uno de los eventos registrados en el país en el período de estudio de este trabajo donde se observó un comportamiento similar en la mayoría de los casos. Valores de omegas negativos que son resultado de

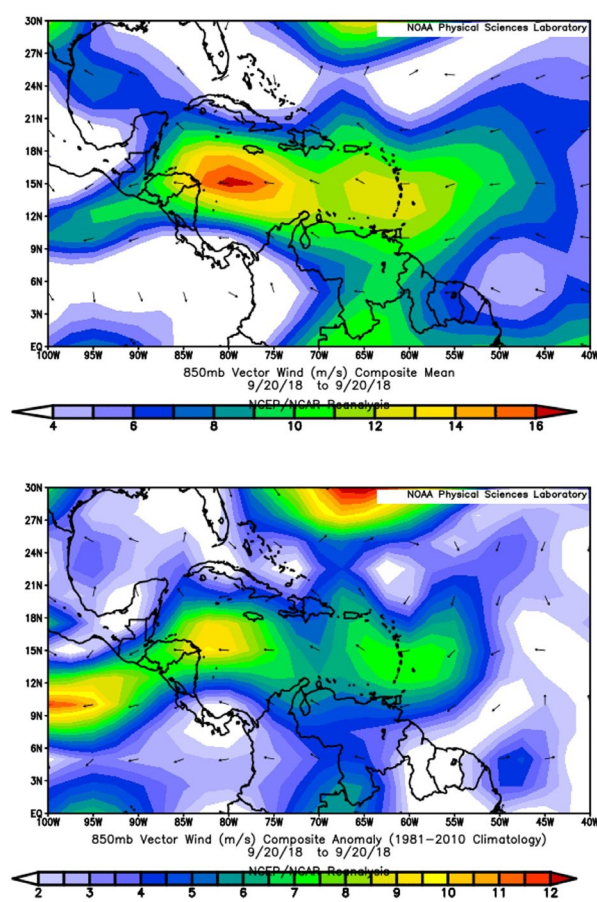


Figura 13. Gráficos del vector de viento (m/s) del día 20/09/2018. La imagen superior muestra los valores promedios del vector de viento. La imagen inferior presenta las anomalías de dicha variable.

Fuente: elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/ NOAA.

los ascensos favorables de las parcelas de aire. La ubicación de la ZCIT sobre Costa Rica en 850 hPa se muestra marcada en la línea roja de la figura 11. La ubicación de la ZCIT en particular con el desarrollo de la baja de Panamá, como parte de la vaguada monzónica, fue una de las características sinópticas preponderantes.

La SLP sobre el Pacífico se encontraba con anomalías negativas, representando condiciones favorables de vientos débiles para este fenómeno de tromba marina que se presentó el 20 de septiembre de 2018. Este comportamiento se pudo observar en todos los eventos de tornados y trombas marinas. Nunca se presentaron

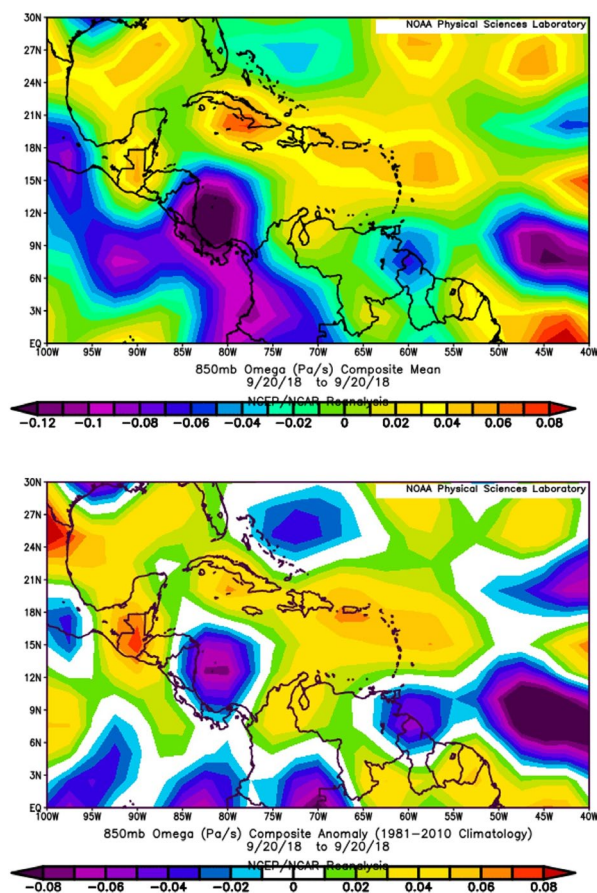


Figura 14. Omega (Pa/s) del día 20/09/2018. La imagen superior muestra los valores pro- medio de la variable Omega. La imagen inferior muestra las anomalías de dicha variable.

Fuente: elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

anomalías positivas de SLP durante alguno de los eventos registrados.

La Figura 13 mostró alisios normales para la época, lo que significó en septiembre vientos del oeste menos intensos que el resto del año.

Finalmente se pudo observar en la figura 14 condiciones de omegas negativos superiores a -0.06 Pa/s, favoreciendo ascensos en una gran área sobre Costa Rica y el Caribe circundante, esto favoreció la ventilación de los sistemas sinópticos como la ZCIT así como la salida en la capa alta de la troposfera (250 hPa) para la formación de la tromba marina en el Pacífico Norte del país.

4. CONCLUSIONES

Luego de analizar los 61 días con eventos recolectados de torbellinos principales en el país en el período 2010 al 2023 se concluyó que se presentaron en el período de estudio 43 eventos con tornados (trombas terrestres) y 14 eventos con trombas marinas, siendo todos los eventos tornados no mesociclónicos, debido a que en ninguno de los casos se visualizó un mesociclón en las nubes cumulonimbos que los generaron, como sí sucede en las superceldas que se desarrollan en latitudes medias, por lo que se puede decir que fueron cumulonimbos, nubes de alto crecimiento vertical en rotación las que produjeron los torbellinos.

La región climática del país donde más se desarrollaron este tipo de fenómenos fue en el Valle Central y los meses con más casos registrados fueron junio y septiembre, coincidiendo con los meses de mayor actividad de ondas tropicales, además de la presencia de una mayor inestabilidad atmosférica profundizada hasta 600 hPa (figura 9).

Las condiciones sinópticas preponderantes durante los eventos fueron anomalías de presión negativas en la mayor parte de la costa del Pacífico, además se tuvieron vientos alisios débiles (menores a 4 m/s) incluso en niveles de 850 hPa, la ubicación de la ZCIT sobre el Pacífico de Costa Rica como vaguada monzónica en 850 hPa, vorticidades relativas altas cercanas o sobre Costa Rica (positivas sobre los $40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, cortante del viento muy baja favoreciendo al crecimiento de los cumulonimbos y calentamiento superior a los 28°C en el sector de ocurrencia de los fenómenos.

Se evidenció una gran correlación en las temperaturas alcanzadas en los toques de las nubes y la ocurrencia tanto de los tornados (trombas terrestres) como de las trombas marinas. La revisión de los análisis sinópticos y las imágenes de satélite mostraron que la formación de trombas marinas se asoció con sistemas con

temperaturas mucho más bajas en los toques (-85°C a -90°C) mientras que para los tornados son suficientes sistemas cercanos por debajo de -75°C, sin embargo, siempre se presentó convergencia de alisios del noreste con vientos suroestes húmedos.

La MJO en sus fases divergentes (1 y 2) favorecieron la ocurrencia de una mayor cantidad de tornados. Por otro lado, las fases convergentes estuvieron presentes en la mayoría de la ocurrencia de trombas marinas (siendo independiente de la formación en el océano Pacífico o en el mar Caribe).

Se identificó que los meses de diciembre a febrero, los cuales corresponden al período de la estación seca en el Valle Central y la vertiente del Pacífico en Costa Rica, fueron cuando menos tornados y trombas marinas se presentaron, eso responde a una dinámica más asociada a la ausencia de la ZCIT ubicada más al sur en este período, condiciones más estables en la atmósfera media y alta, la presencia de una mayor cortante de viento, condiciones más secas en la atmósfera así como una mayor presión a nivel del mar.

El fenómeno de La Niña estuvo presente en el 70 % de los tornados (trombas terrestres), mientras que El Niño y la fase neutral del ENOS estuvieron presentes en el 92 % de las trombas marinas. La principal razón de este comportamiento que se presentó durante La Niña es consecuencia de un mayor contenido de humedad en las regiones propensas a generarse tornados (Pacífico), vientos alisios, cortantes más débiles, así como la presencia de mayor cantidad de núcleos convectivos continentales.

Es posible que durante El Niño se presentaran mayor cantidad de trombas marinas consecuencia de un mayor calentamiento de las aguas del Pacífico, favoreciendo con ello núcleos convectivos con toques de nubes más altos, logrando alcanzar los -85°C a -90°C que se necesitaron en todos los casos para generar trombas marinas. El

caso de la tromba detectada en el lago arenal fue la excepción, debido a que no se tiene una explicación certera de la razón dinámica de su ocurrencia y los datos y análisis sinópticos no fueron concluyentes.

Es importante mencionar que en todos los análisis que se realizaron y videos analizados, los principales daños causados por los tornados y trombas marinas en el país fueron el desprendimiento de latas, daños en tendido eléctrico e infraestructura de las viviendas; tampoco hubo fallecidos asociados a los tornados y trombas en este período.

5. AGRADECIMIENTOS

A José Navarro, por su colaboración en la elaboración de figuras del mapa de Costa Rica.

6. REFERENCIAS

- Agencia Brasil. (2015, 22 de abril). City in southern Brazil devastated by tornado. Empresa Brasil de Comunicação. Extraído de: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2015-04/city-southern-brazil-devastated-tornado>
- Aguilar G.; M. Carnesoltas; C. Fernández y L. Naranjo (2005): «Climatología de las tormentas locales severas en Cuba en el período 1987-2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio». Revista Cubana de Meteorología, 12(1): 3-10
- Alfonso, A. P., 1994: Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología. Editorial Academia, 168 págs. [Disponible a través de Editorial Academia, Industria no. 452, esquina a San José, La Habana 10 200, Cuba]
- Barnes, Gary, 2001: Severe Local Storms in the Tropics. *Meteorological Monographs*, **28**, 359–432.

- Carroll-Smith, D., Green, B. W., Edwards, R., Bai, L., Litta, A. J., Huang, X., ... & McCaul Jr, E. W. (2023). Forecasting tropical cyclone tornadoes and impacts: Report from IWTC-X. *Tropical Cyclone Research and Review*, 12(2), 123-135.
- Edwards, R. (2012). Tropical cyclone tornadoes: A review of knowledge in research and prediction. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 7(6), 1-61.
- Fujita, T. (1971). Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity (No. NASA-CR-125545).
- Golden, J. H. (1974). The life cycle of Florida Keys' waterspouts. I. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 13(6), 676-692.
- Hagemeyer, B. C., 1997: Peninsular Florida Tornado Outbreaks. *Wea. Forecasting*, **12**, 399–427.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Clima de Costa Rica y Variabilidad Climática. (2021). Extraído de: <https://www.imn.ac.cr/52> (15 de octubre de 2021).
- Laing, Introducción a la meteorología tropical, 2a edición (The COMET program, 2016).
- La Nación, 2021: Tornado de santa Bárbara. Extraído de: <https://www.nacion.com/sucesos/desastres/tornado-destecha-viviendas-bota-arboles-y-afecta/FLC4XNOH25HTDDYDLGA3QWYW74/story/> (15 de agosto 2022)
- León-Cruz, J. F. (2025). Tornadic environments in Mexico. *Atmospheric Research*, 315, 107916.
- Lopes, M. M., & de Lima Nascimento, E. (2025). Climatology of tornado occurrences in southern Brazil. *Ciência e Natura*, 47(esp. 3), e84051-e84051.
- Macías Medrano and A. Avendaño García, Investigaciones geográficas pp. 74–87 (2014).
- MetEd Education and Training, Tormentas locales severas tropicales (MetEd, 2020).
- National Weather Service. (s. f.). Tropical tornadoes in the CAE warning area. Extraído de: https://www.weather.gov/cae/tropicaltornadoes.html?itid=lk_inline_enhanced-template (21 de septiembre de 2024).
- NOAA, 2024: Enhanced Fujita Scale (EF Scale). Extraído de: <http://www.sp.c.noaa.gov/efscale/> (21 de septiembre de 2024)
- NOAA Office of Oceanic and Atmospheric Research, Atlantic Oceanic and Meteorological Laboratory. (s. f.). ¿Por qué los ciclones tropicales generan tornados y con qué frecuencia ocurren? En Preguntas frecuentes sobre huracanes. Extraído de: <https://www.aoml.noaa.gov/es/hrd-faq/#tc-formation> (21 de septiembre de 2024).
- Organización Mundial Meteorológica (OMM). Extraído de : <https://cloudatlas.wmo.int/es/tornado-intensity.html> (12 de junio de 2024).
- Page, O., 2005: Tornado affects the Mack Pond Area. Available from the Antigua and Barbuda Meteorological Services, http://www.antiguamet.com/Antigua_Met_files/tornado.htm (Comprobado el 13 de diciembre de 2012).
- Piñeres Espitia, G. D. (2010). Acercamiento tecnológico a la aparición de tornados en Barranquilla.
- Poleo, D., Solano, E., & Stolz, W. (2014-a). La Oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica. *Meteorol Oceanogr*, 58.
- Poleo, D., Solano, E., & Stolz, W. (2014-b). La oscilación Madden-Julian y las precipitaciones extremas en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 13(2), 5-18.

- Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). Servicio Meteorológico Nacional, tiempo y clima. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.
- Silva Dias, M., 2011: An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil, *Wea. Climate Soc.*, **3**, 209–217.
- Simpson, J., Morton, M. C. McCumber, R. S. Penc, 1986: Observations and Mechanisms of GATE Waterspouts. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 753–783.
- Szilagyi, W., 1994: 1994 Waterspout Report. Internal report. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- Szilagyi, W., 2004: The great waterspout outbreak of 2003. *Marine Weather Log* 48 (3).
- Szilagyi, W., 2005: Waterspout nomogram instructions. Internal manuscript. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- The Tornado and Storm Research Organization (TORRO), 2021. Extraído de: <https://www.torro.org.uk/research/tornadoes/background> (14 de octubre de 2021).
- Valverde Mora, P. (2019). Aplicación en pronósticos de corto plazo de aspectos de variabilidad de la tropósfera baja costarricense basada en datos de radio-sondeos meteorológicos [trabajo final de maestría, Universidad de Costa Rica]. Sistema de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera.
- Wheeler, M. & Hendon, H. (2004). An all season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*. 132, 1917–22 1932.



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

