

Estudio descriptivo de los vórtices atmosféricos causantes de tornados en Venezuela

Nelson Falcón¹, Odalys Sira¹, Alejandro Medina²

¹ Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Dpto. de Física

² Facultad de Ingeniería, Estudios Básicos, Dpto. de Física

Universidad de Carabobo. Apdo. 129, Av. Bolívar Norte Valencia 2001, Venezuela

(Recibido: 08-Jul-2012. Publicado: 17-Oct-2012)

Resumen

Los tornados y trombas marinas son fenómenos comunes en áreas tropicales y subtropicales. La ocurrencia de estos torbellinos en la atmósfera es debida a inestabilidades y fluctuaciones locales. Desde el punto de vista de la Física Atmosférica son de interés los mecanismos físicos que intervienen en la atmósfera a microescala. Se discute la fundamentación microfísica de estos eventos atmosféricos en el país y se establece una síntesis fenomenológica y el modelo estándar de las trombas marinas observadas en el Lago de Valencia, Lago de Maracaibo y en otras regiones de Venezuela. Mediante la aplicación de la técnica de fotometría se realiza un análisis exploratorio de las imágenes para extraer los órdenes de magnitud de las características físicas de los vórtices causantes de las trombas marinas y tornados tropicales.

Palabras clave: Vórtices, trombas marinas, Tornados.

Abstract

Tornadoes and waterspouts are common phenomena in tropical and subtropical zones. The occurrence of these vortex in the atmosphere is due to instabilities and local fluctuations. The intervening physical mechanisms are of interest from the viewpoint of Atmospheric Physics. The relationship of micro-physics with these atmospheric events in the country is discussed, and a phenomenological synthesis and standard model of the marine whirlwinds observed in Lake Valencia, Lake Maracaibo, and other regions of Venezuela is established. The photometry technique is applied to existing images in an exploratory analysis to extract the orders of magnitudes of the physical characteristics of the vortexes causing tropical waterspouts and tornadoes.

Key words: vortexes, waterspouts, tornadoes.

1. Introducción

Los tornados son unos de los fenómenos más intimidantes originados en la atmósfera terrestre; a nivel mundial han generado grandes pérdidas de vidas y cuantiosas pérdidas materiales, así como el trauma psicológico en quienes han presenciado y vivido las agresiones de este fenómeno. Este consiste en una columna de aire que gira violentamente, en contacto con el suelo, ya sea colgante de una nube cumuliforme o debajo de una nube cumuliforme, y con frecuencia (pero no siempre) visible como una nube embudo (Glickman, 2000). Se caracterizan por producir los vientos más violentos que hay en la tierra, los cuales pueden alcanzar velocidades de hasta 400 km/h (Renno y Blustein, 2001). En el breve lapso de duración de los tornados, entre la decenas de minutos hasta incluso una hora (Doswell y Burgess, 1993), la forma, tamaño y color del embudo varían dependiendo de la fuerza de los vientos que afluye y el tipo de suelo por el que transcurre (Capel 2002).

Si bien los tornados son un fenómeno común en diversas latitudes geográficas, su duración y magnitud, estimada como la máxima velocidad del viento y la severidad de daños sobre la superficie donde ocurren, varían para las diversas latitudes (Dyer, 1988; Gayà, 2005; Silva y Maria, 2011). Los observados en zonas subtropicales, sobre todo en Estados Unidos, presentan mayores velocidades de viento y frecuencia de aparición, y generan por tanto mayores daños en la infraestructura urbana que los observados en zonas tropicales (Doswell y Burgess, 1993; Wakimoto y Lew, 1993). Sin pretender abusar del lenguaje, los tornados tropicales pueden definirse, en comparación a los grandes tornados norteamericanos, como *minitornados*, con la pretensión pedagógica y convencional, según la cual no se observan “grandes” tornados en las regiones próximas al ecuador.

Las trombas marinas, al igual que los tornados, son torbellinos violentos de aire que gira sobre sí mismo, pero en este caso se extiende desde la superficie del mar hasta el nivel de las nubes. A pesar de que presentan el mismo proceso de formación que los tornados, tienen características que las diferencian: la velocidad del viento es mucho menor y suelen formarse en el trópico. Son frecuentes al sur de la Florida, en la costa sudeste de los Estados Unidos, y frente a las islas en el Mediterráneo (Renno y Blustein, 2001; Wakimoto y Lew, 1993). Es decir, en general son más usuales a menos de 100 kilómetros de la costa que en el mar abierto (Falcón, 2009), aun cuando pueden aparecer ocasionalmente sobre lagos y lagunas en el interior de los continentes.

1.1. Formación de Trombas Marinas y Tornados

La ocurrencia de estos meteoros está asociada a la circulación cerrada de fluidos atmosféricos en regiones de inestabilidad local, caracterizados por el desplazamiento vertical en la atmósfera de masas de aire, agua y/o polvo, en trayectorias helicoidales ascendentes o descendentes. Por lo tanto, si una superficie suelo o agua, es calentada “violentamente” (en el sentido del surgimiento de gradientes de temperatura “superadiabáticos”, vale decir mucho mayores que el gradiente adiabático seco, en lapsos de tiempo pequeños comparados con el tiempo de ajuste térmico de la superficie), el aire sobre la superficie asciende rápidamente sobre las capas de aire más frías de la atmósfera, produciendo una circulación vertical o corriente convectiva en la atmósfera. En condiciones normales el fluido atmosférico se comporta barotrópicamente, es decir, las isobaras del fluido atmosférico coinciden con las isoesteras o superficies de igual densidad, obteniendo corrientes convectivas de aire en dirección vertical. Sin embargo, en ocasiones un flujo de viento cortante a nivel de la superficie origina una inestabilidad trasladando porciones de aire paralelo a la superficie. En este caso el fluido adopta un régimen llamado baroclínico, donde las isobaras ya no son paralelas a las isoesteras, y los centros de presión no coinciden con los centros de gravedad del fluido en movimiento, por lo que las fuerzas de presión y de gravedad no son concurrentes en el mismo punto, originando así un torque o torsión en el movimiento del fluido; y la corriente convectiva gira al propio tiempo que asciende, generando un movimiento en espiral y un torbellino sobre la superficie. Si además ocurre que un fuerte viento en las capas superiores traslada las capas de aire directamente por encima de la columna ascendente, se alarga la trayectoria del ducto o corriente convectiva (Wakimoto y Lew, 1993).

Este alargamiento incrementa el giro del torbellino, mejor conocido como vórtice. Ese movimiento rotacional súbito es causado por los gradientes de presión y temperatura, y cesa cuando el aire frío descendente por el ducto disminuye el calor de la superficie que creaba la inestabilidad. En términos macroscópicos vale decir que el vórtice desaparece cuando cesan las condiciones de convergencia de masas de aire de diferentes temperaturas. Al igualarse la temperatura disminuye el gradiente térmico y en consecuencia se equilibran las presiones, cesando el flujo convectivo ascendente, y desaparecen el vórtice y sus manifestaciones visibles como trombas marinas o tornados. Para una descripción más precisa, cuantitativa, véase el teorema de Kelvin y Vorticidad (Falcón, 2012).



Fig. 3: Tromba Marina en el lago de Valencia (Edo Carabobo, 27/10/2004).



Fig. 4: Tromba marina ocurrida en el lago de Maracaibo (Edo Zulia, 04/07/2004).



Fig. 5: Tornado en Barcelona (Edo Anzoátegui, 25/10/2007).



Fig. 6: Tornado en San Cristóbal (Edo Táchira, 31/10/2008).



Fig. 7: Tromba marina en La Guaira (Edo Distrito Vargas, 13/11/2011).



Fig. 8: Tornado en Caracas (Capital, 07/05/2012).

En el proceso de formación de los tornados y trombas marinas intervienen magnitudes físicas como la velocidad angular y la velocidad ascensional del viento, y el tamaño del ducto, entre otras. La descripción de estas cantidades físicas permite obtener patrones de comportamiento de estos fenómenos atmosféricos.

2. Metodología y Resultados

La fotometría se define como medidas con fotografías, es decir, extraer por medio de la fotografía de un objeto sus dimensiones reales (Hallert, 1960). Se utiliza esta técnica para determinar cuantitativamente las magnitudes físicas presentes en el proceso de formación y desarrollo de algunos tornados y trombas marinas ocurridos en Venezuela.

La precisión del sistema de medida basado en la fotometría se encuentra por debajo del 5%, que es un margen de error aceptable considerando otros estudios reportados de observación de vórtices atmosféricos (Schwarzkopf y Rosso, 1982; Antônio, 1997; Silva Dias, 2011)

2.1. Descripción de las magnitudes físicas

2.1.1. Tamaño del ducto

Una de las principales características de los minitornados y trombas marinas es el tamaño de su ducto. La figura 9 muestra una tromba marina ocurrida el 26 de agosto del 2002 en Maracaibo (Edo Zulia, Venezuela). En dicha figura tenemos como referencia una plataforma petrolera que mide de 18 a 24 m de ancho y de 12 a 18 m de alto (Prizantzin, 2007). El error en las medidas para el ancho de la plataforma petrolera es 21 ± 3 m y la altura media es de 15 ± 3 m. Aplicando la técnica de fotometría y empleando las medidas del ancho de la plataforma petrolera y la altura de la nube cumulonimbus, se encuentra que el ducto en la zona *spray* es de 125 m de alto y 88 m de ancho, disminuyendo luego de los 125 m de altura y tomando una forma cilíndrica donde su diámetro varía desde los 18 a 27 m hasta llegar a 2400 m de altura, siendo el ducto medio de 22 m de anchura (figura 10).



Fig. 9: Fotometría aplicada a una tromba marina.

De la figura 11 se obtiene que la tromba marina posee una altura media de 2900 m, lo cual sugiere que la circulación (vórtice) de la tromba penetra en la nube matriz, pues su longitud excede la altura de la base de la nube cumulonimbus. (Además la tonalidad en las fotos sugiere que el ducto penetra en el interior del cumulonimbus).

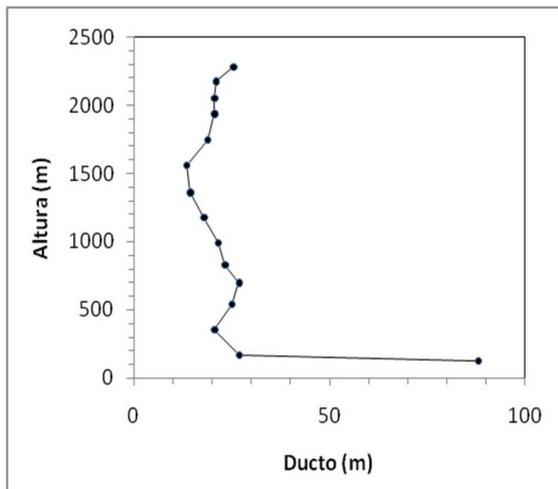


Fig. 10: Variación del diámetro del ducto con la altura (hasta la base del cumulonimbus).

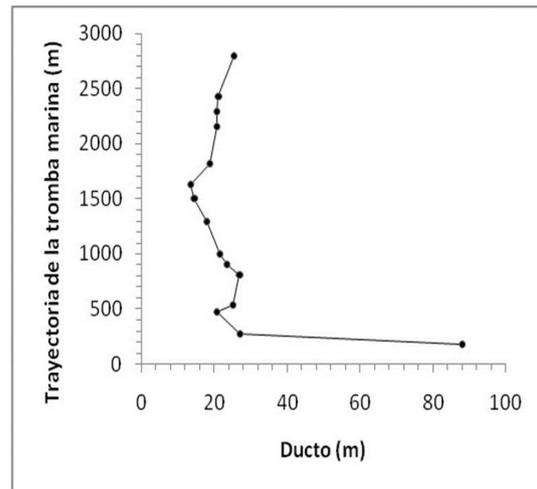


Fig. 11: Variación del diámetro del ducto respecto a la trayectoria de la tromba marina.

Asumiendo por simplicidad que la tromba marina puede simularse mediante una simetría cónica en la zona *spray*, y modelarse con una simetría cilíndrica, luego de una altura de 125 m (como un cilindro circular recto de altura h y radio de la base r), puede obtenerse el área y el volumen de la tromba marina.

Usando los datos de la figura 12, obtenidos por medio de la fotometría, obtenemos que el área de la zona de *spray* es del orden de 10^4 m^2 y su volumen es del orden de $3,3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ o $0,33 \text{ Hm}^3$.

Para la zona cilíndrica es fácil verificar (figura 13), que su longitud es del orden de los 2,6 km, con un área del orden de $3,82 \cdot 10^2 \text{ m}^2$ y un volumen de unos 10^6 m^3 . También es fácil estimar la fuerza de sustentación hidrostática por unidad de longitud como de unos 3,62 Mega Newtons.

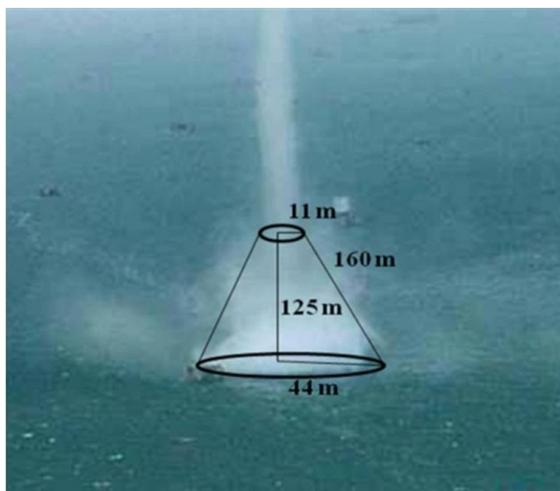


Fig. 12: Simetría axial cónica

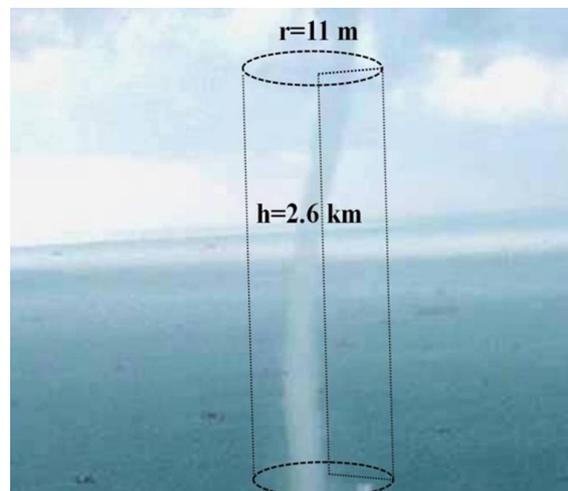


Fig. 13: Simetría cilíndrica.

El 26/08/2002 tuvo lugar una tromba marina en la Ciudad de Maracaibo. Este fenómeno fue captado por un aficionado mediante una grabación amateur (figura 14) de la cual se tomaron fotogramas para realizar el análisis cuantitativo por medio de la fotometría. En este caso se determinó la acción de empuje que ejerce el viento para el desplazamiento de la tromba marina a una altura de 1800 m.

Para 5 vueltas completas del ducto de la tromba marina se obtiene un desplazamiento de 110 metros lineales, que equivalen a una velocidad del orden de $36 \text{ km/h} \pm 10\%$.



Fig. 14: Desplazamiento realizado de la tromba marina a una altura determinada.

A partir del video que muestra el tornado ocurrido en la Isla La Tortuga el 29/08/2008, se extraen los órdenes de magnitud de la velocidad angular, velocidad lineal, periodo y frecuencia.

Se tomaron como referencia las medidas del alto y largo de una casa playera: 2,5 y 12 m respectivamente (figura 15). Así la trayectoria media del tornado tomando de referencia la altura de la base de la nube es de 3120 m.

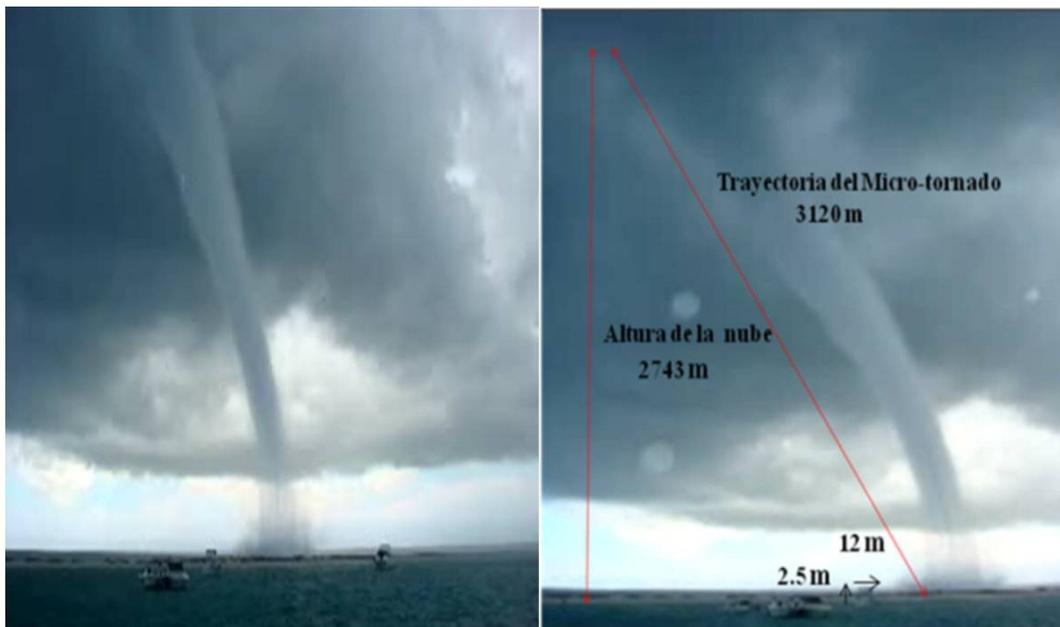


Fig. 15: Trayectoria del tornado.

La figura 16 expone cómo el diámetro del ducto, de 51 m a los 3 m de altura a que se encuentra el vórtice, disminuye primeramente hasta 27 m, para luego aumentar hasta 78 m a más de 2500 m de altura. A diferencia de la anchura del ducto de la tromba marina que decrece y crece continuamente a lo largo de la vertical, el ancho del tornado aumenta seguidamente a lo largo de la altura.

La figura 15 muestra que la trayectoria vertical del tornado es mayor que la altura de la base nubosa. A diferencia de la tromba marina, el tornado tiene mayor inclinación en su trayectoria, debido a que la velocidad del vórtice del tornado es mayor que en la tromba marina.

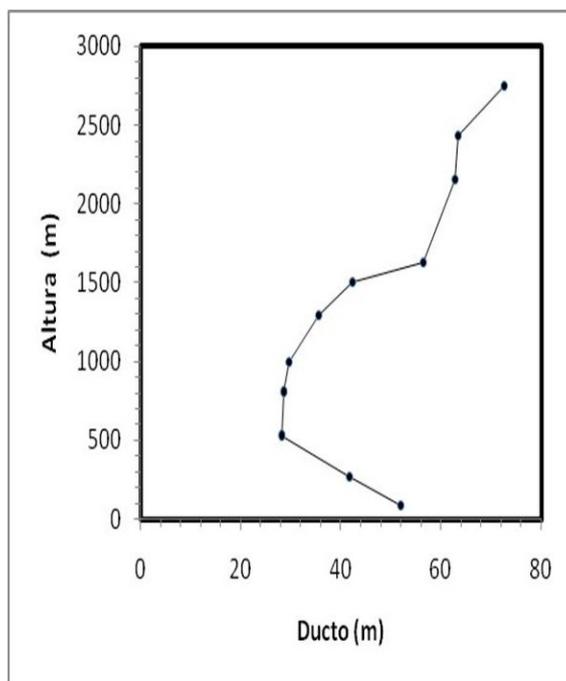


Fig. 16: Variación del diámetro ducto con respecto a la altura (hasta la base del cumulonimbus).

2.1.2. Velocidad del viento

La velocidad del viento se determinó midiendo el tiempo en que se desplazó 5 veces el ancho del vórtice a una altura de 32 m, es decir, cada paso que recorre el tornado, se desplaza un diámetro de su vórtice.

Para 5 vueltas completas al ducto del tornado, se obtiene un desplazamiento de 250 metros lineales, que equivalen a una velocidad del orden de 151 km/h $\pm 11\%$.

2.1.3. Velocidad angular

Para la velocidad angular se mide el tiempo en el que el tornado da una vuelta completa. Mediante el video se puede detectar el movimiento giratorio que experimenta el tornado, tomando como referencia una nube de polvo dando un giro y midiendo su tiempo de recorrido.

Considerando las dimensiones de la casa playera, obtenemos que la velocidad angular para una vuelta completa es aproximadamente 250 rad/s $\pm 10\%$, con un periodo del orden de los 0,024 s y una frecuencia de unos 42 Hz.

En la figura 19 (izquierda) se muestra el tornado ocurrido el 14 de octubre de 2009 en San Cristóbal (Edo. Táchira). En este caso no se pudo determinar la velocidad ya que las condiciones de la grabación de la cual se extrajo la imagen no permiten aplicar la técnica de fotometría. Sin embargo, se puede asumir del cálculo realizado al tornado ocurrido en la Isla La Tortuga una velocidad aproximada de 150 km/h. Además la evidencia de los daños provocados por los vientos huracanados, por ejemplo las caídas

de árboles, entre otros daños moderados, lleva a concluir que la velocidad del tornado se ubica en la intensidad F1 de la escala Fujita-Pearson, es decir, con una velocidad entre 120 y 180 km/h.



Fig. 17: Medidas del tornado con respecto a la casa playera.



Fig. 18: Torbellino dando una vuelta completa.



Fig. 19: Izquierda: Tornado en San Cristóbal (Edo Táchira). Derecha: Formación del tornado a partir del cumulonimbus.

2.2. Trombas marinas y tornados en Venezuela

En las tablas 1 y 2 se establece una comparación entre las trombas marinas y los pequeños tornados registrados en Venezuela con las trombas marinas de las Islas Baleares del Mediterráneo (Gayà *et al.*, 2001) y los grandes tornados de Estados Unidos (Doswell y Burgess, 1993) por medio de los resultados obtenidos por la fotometría, estableciendo diferencias y semejanzas en el comportamiento de estos eventos atmosférico en el país.

Tabla 1. Comparación de las características de las trombas marinas en Venezuela y en el Mediterráneo.

Trombas marinas (Venezuela)	Trombas marinas (Mediterráneo)
Clima tropical: Período lluvioso y período seco con temperaturas uniformes.	Clima mediterráneo: veranos cálidos e inviernos suaves.
El embudo tiene un diámetro medio de 20-50 m.	El embudo tiene un diámetro medio de 30-50 m.
El tubo cilíndrico tiene un diámetro medio de 20-40 m.	El tubo cilíndrico suele tener un diámetro medio 10-25 m.
La zona de <i>spray</i> tiene altura variable 120-130 m, con un ancho medio de 70-90 m.	La zona de <i>spray</i> tiene altura variable 100-130 m, con un ducto medio de 40 m.
La velocidad media del viento es de 36-70 km/h.	La velocidad media del viento en superficie no es mucho mayor de 70 km/h.
Ocurren en cualquier época del año, principalmente en la estación húmeda.	Se producen durante todo el año, especialmente en el mes de Septiembre.

Tabla 2: Comparación de los tornados en Venezuela y los Estados Unidos.

Tornados en Venezuela (“minitornados”)	Tornados en E.E.U.U.
Se forman por desarrollo de grandes nubes cumulonimbus.	Se forman por desarrollo de grandes nubes cumulonimbus.
La base de esta nube se encuentra a altitudes por debajo de los 2,8 km.	La base de esta nube se encuentra a altitudes por debajo de los 2 km.
La velocidad media del viento de los tornados se encuentra entre los 150-180 km/h.	Las velocidades del viento de los tornados son mayores a los 300 km/h.
Se producen por la inestabilidad atmosférica.	Se producen por la inestabilidad atmosférica o frentes fríos.
Se desplazan hasta 2 km.	Pueden desplazarse hasta 16 km o más.
La trayectoria vertical del aire descendente aumenta con la altura.	La trayectoria vertical del aire descendente aumenta con la altura.
El diámetro del ducto a lo largo de la altura es del orden 15-70 m.	El diámetro del ducto a lo largo de la altura puede alcanzar 20-300 m.

3. Conclusiones

En este artículo se realiza una descripción cuantitativa de las características físicas que intervienen en el proceso de formación de tornados (“minitornados”) y trombas marinas reportados en la última década en Venezuela. Para determinar dichas magnitudes se emplea la técnica de fotometría. De la descripción de estos fenómenos se obtiene, en primer lugar, que el ancho del ducto de un tornado aumenta con la vertical, mientras que la anchura del ducto de la tromba marina puede aumentar y disminuir. Además, en la zona de *spray* se encuentra el ducto máximo, lo que corrobora la presencia de cizalladura vertical del viento por debajo de la nube cumulonimbus que genera las mangas de agua.

La anchura media de las trombas marinas en nuestro país es casi el doble que las reportadas en zonas mediterráneas, comparadas con las registradas por Reno y Blustein en las Islas Baleares. Para la velocidad angular obtenemos también una diferencia significativa, siendo menor en un factor de dos. En consecuencia todos los tornados estudiados en este trabajo son de categoría F1 de la escala de Fujita-Pearson, mientras que las trombas marinas no exceden la escala F0, a diferencia de las trombas marinas interoceánicas y mediterráneas que pueden incluso alcanzar valores de F3 y F4.

Agradecimientos

Al editor y cuerpo de árbitros de la Revista de Climatología, por las sugerencias y discusión. Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) de la República Bolivariana de Venezuela, bajo el N° 2011-000326 del Proyecto Estratégico “Caracterización de Fenómenos Transitorios en el Troposfera: Electrometeoros, Litometeoros, Microtornados y trombas marinas”.

Bibliografía

- Antônio MA (1997): Ocorrência de tornado na região tropical do Brasil. *Boletim Climatológico*, 3:136-141.
- Capel J (2002): Tormentas y Tornados en la Península Ibérica. Meteoros Adversos Extremos que le Caracterizan. *Nimbus*, 5-16.
- Dyer RC (1988): Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay. *Photogram Eng. Remote Sens.* 54, 1429-1435.

- Doswell CA III, Burgess DW (1993) Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. En Church C; Burgess D, Doswell C Davies-Jones R Editores: *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, *Geophys. Monogr.* 79, Amer. Geophys. Union, 161-172.
- Falcón N (2009): Mangas de Agua y Trombas Marinas. Memorias del II Coloquio Nacional de Meteorología y Física Atmosférica.
- Falcón N (2012): *Dinámica de Fluidos y Fenómenos de Transporte*. Edit. Académica Española, ISBN 978-3-8473-6618-8, Madrid.
- Gayà M (2005): Tornados en España (1987-2005): distribución temporal y espacial. *Rev. Climatología*, 5:9-17.
- Gayà M, Homar V, Romero R, Ramis C (2001): Tornadoes and waterspouts in the Balearic Islands: phenomena and environment characterization. *Atmospheric Research*, 56:253-267.
- Glickman TS (2000): *Glossary of Meteorology*. 2nd Ed., Amer. Meteor. Soc.
- Hallert B (1960): *Photogrammetry*. McGraw-Hill, New York, NY, 340 pp.
- Prizantzin R (2007): *Diseño de Plataformas y Evaluación para la disposición de recortes provenientes de la perforación de pozos petroleros*. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Renno NO, Blustein H (2001): A Simple Theory for Waterspouts. *J. Atmosph. Sci.*, 58:927-932.
- Schwarzkopf MLA, Rosso LC (1982): Severe storms and tornadoes in Argentina. Conference on Severe Local Storms, 12, Boston, USA.
- Silva Dias MAF (2011) An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil. *Wea. Climate Soc.*, 3:209-217.
- Wakimoto R, Lew J (1993): Observations of a Florida waterspout during CaPE. *Weather and Forecasting*, 8:412-423.