

EL TORNADO DEL 28 DE AGOSTO DE 1999 EN TERUEL

Francisco Espejo Gil (1)

Ricardo Sanz Barajas (2)

(1) GPV del CMT en Aragón, La Rioja y Navarra. INM

(2) CMT en Canarias Occidental. INM

RESUMEN

El 28 de agosto de 1999 se produjo un tornado en un bosque de pinos en una zona deshabitada del Maestrazgo, en la provincia de Teruel. A partir del reconocimiento sobre el terreno de la traza y de la caracterización y estudio de algunos de sus aspectos, se describirán detalladamente los efectos observados en el terreno. Después se propondrá un modelo dinámico simple para estimar la velocidad del viento, que permitirá la clasificación del tornado en la escala de Fujita, que resultará en uno del tipo F3. Por último, se presentará una hipótesis sobre la evolución del tornado y sobre la interacción del vórtice con el terreno.

1. Introducción

El 28 de agosto de 1999, la convergencia de vientos húmedos mediterráneos con una masa de aire atlántico, más frío, originó un sistema convectivo muy cerca de la divisoria de las aguas entre la Cuenca del Ebro y la Vertiente Mediterránea de Levante, en la Sierra del Rayo, un ramal de la Sierra de Gúdar. Este sistema convectivo generó un tornado que dejó una traza perfectamente reconocible de 12 Km de longitud en un pinar constituido casi en exclusiva por *pinus silvestris*, entre los términos municipales de Fortanete, Mosqueruela y Cantavieja. La altura media de los pinos se estima en 14 m y su edad media en torno a los 40 años, si bien se observaron ejemplares derribados de más de 70. La traza se sitúa entre las cotas de 1420 m y 1760 m y se despliega con una anchura oscilante entre los 500 m y los 20 m. Los servicios forestales de la Diputación General de Aragón estimaron que unos 800 000 pinos habían sido afectados. Al encontrarse la zona deshabitada, un guardia forestal fue el único testigo directo del hecho.

En 1992 se observó otro tornado en una localización muy próxima a ésta, aunque de menor entidad. De hecho en un punto las trayectorias del tornado de 1992 y del de 1999 se cortan casi perpendicularmente. En la Cordillera Ibérica de Teruel se observaron en 1999 al menos otros dos tornados, también de menor intensidad del que es objeto de este estudio.

2. Situación meteorológica del día 28 de agosto de 1999

2.1 Situación sinóptica

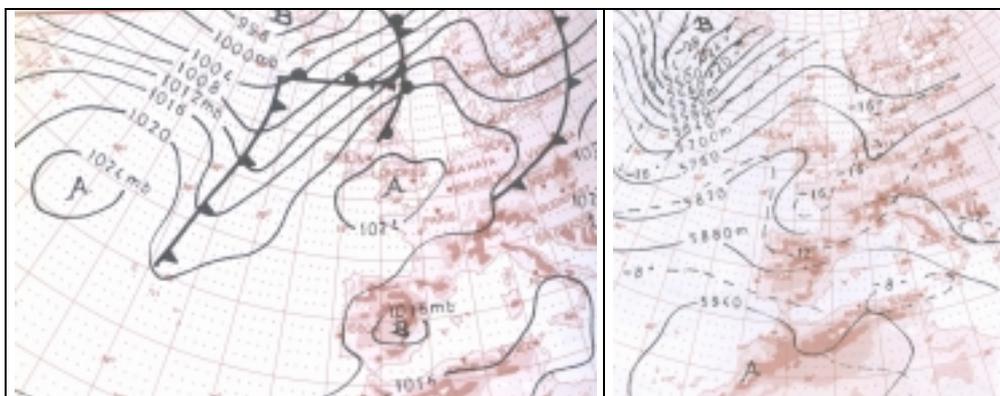


Figura 1: Situaciones en superficie y en 500 hPa el 28 de Agosto de 1999 a las 12 Z.

El día 28 de agosto tiene lugar el paso de una vaguada sobre la zona afectada. Su centro de vorticidad y su núcleo frío (-16 °C en 500 hPa) se encuentran sobre el sur de Bretaña a mediodía y se mueven lentamente hacia el SE, aproximándose a los Pirineos durante el resto de la jornada. Presenta un eje orientado en la dirección NE-SW en niveles medios y altos que cruzará el NE peninsular durante el día. Esta zona se

encuentra, según la topografía de 500 hPa, entre las isotermas de -14°C en los Pirineos y -12°C en la Sierra de Gúdar. En niveles inferiores la vaguada es menos acusada. Así, en 700 hPa presenta un eje en fase con el observado en niveles superiores y en niveles bajos lleva asociado una línea de convergencia de vientos flojos del NW y del SE. Sobre el centro y este de la Península Ibérica se ha formado en superficie la habitual baja térmica de los meses de verano, en este caso de 1016 hPa.

2.2 Análisis mesoescalar

Sobre la Sierra de Gúdar se encuentra a primeras horas una mesobaja de origen térmico de 1016 hPa que es una extensión de la baja térmica peninsular. Atraídos por la mesobaja penetran vientos húmedos de levante que, forzados a remontar la Sierra de Gúdar, generan nubosidad de evolución. A las 12 Z todavía la nubosidad no es lo suficientemente abundante como para impedir que las temperaturas máximas alcancen los 33 o 34°C en la zona. El avance de la vaguada en niveles medios y altos va acompañado de un ligero enfriamiento en esos niveles, hecho que favorece los desarrollos convectivos en la zona. En niveles bajos, la vaguada se hace sentir en forma de una línea de convergencia que, avanzando desde los Pirineos, va cruzando el nordeste peninsular de W a E. Esta línea de convergencia viene acompañada de tormentas en el Pirineo aunque en el Valle del Ebro la ausencia de forzamiento dinámico no activa la convección. La línea de convergencia llega a la Sierra de Gúdar en torno a las 15Z, produciéndose un aumento del forzamiento dinámico. Este es el momento del día más favorable para la aparición de células convectivas, cuando se están alcanzando las temperaturas máximas, que son las correspondientes a la temperatura de disparo. Con una elevada inestabilidad térmica, la alta humedad aportada por los vientos de levante y el forzamiento dinámico introducido por la línea de convergencia en una orografía muy favorable a la recepción de vientos del NW, se producen fuertes tormentas que dejan intensas señales en el radar meteorológico de Zaragoza. A las 18 Z todavía sigue activo un núcleo en la zona. Progresivamente, el flujo del NW gana terreno y a las 21 Z sólo queda nubosidad de tipo medio o alto.

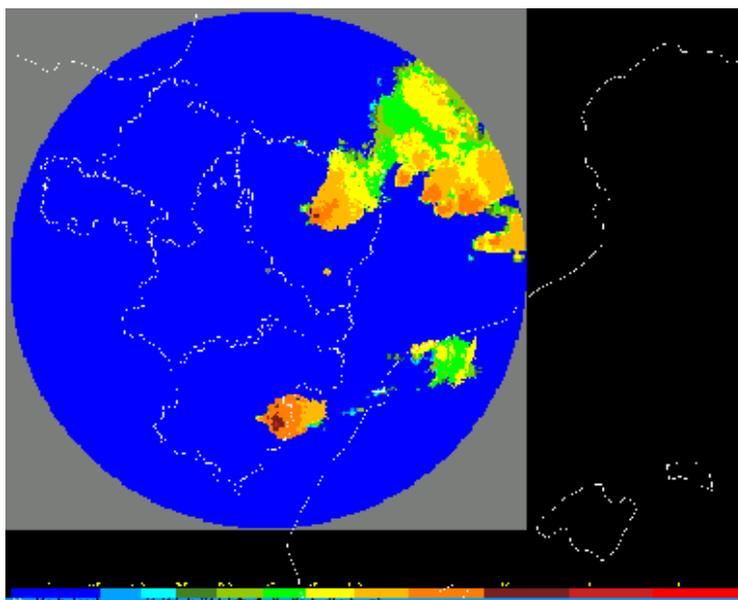


Figura 2: Ecotops del radar de Zaragoza a las 18 Z del 28 de agosto de 1999.

2.3 Formación del núcleo convectivo y aparición de la traza del tornado

La Sierra de Gúdar se abre en su parte septentrional a una serie de grandes barrancos, casi paralelos y orientados todos ellos en la dirección NW-SE. Esta es precisamente la dirección predominante del viento en el Valle del Ebro tras el paso de un sistema frontal o con flujo del norte en niveles bajos –WNW o cierzo-. Así, al aproximarse la línea de convergencia a la Sierra de Gúdar, sus barrancos septentrionales facilitaron la entrada de los vientos del noroeste que venían tras ella. La convección se activó por el forzamiento añadido por el relieve, y los núcleos convectivos, ya desarrollados a las 15 Z, son encauzados por los barrancos, empujados por los noroestes que soplan en niveles medios y bajos. Por las descargas eléctricas producidas se aprecia cómo los núcleos convectivos siguen el trayecto que les es sugerido por estos valles. El núcleo más activo asciende por uno de ellos, el llamado Rambla de Mal Burgo, de más de 20 km de longitud, hasta encontrarse con la Sierra del Rayo que, orientada casi perpendicularmente a la

dirección de avance de la tormenta, se abre al norte por un estrecho barranco lateral, el Barranco de Jujarra, afluente de la Rambla de Mal Burgo y el punto en el que el tornado contacta con el suelo.

3. Análisis de la traza del tornado

3.1 Trabajo de campo

Al dejar el tornado su señal en un bosque homogéneo, cada pino derribado o deformado aporta información de la fuerza y de la dirección del viento. El trabajo de campo consistió en el recorrido y delimitación de la traza del tornado y en una tarea de observación detallada de varios elementos; como son la anchura de la traza en las distintas partes del recorrido, la dirección predominante de abatimiento de los pinos (D.P.A.), los distintos efectos producidos en los árboles, la toma de medidas -el diámetro de su tronco a 1,5 m del suelo y su altura aproximada- en los pinos afectados y la clasificación en diferentes tipos de los efectos sobre las coníferas -derribados, partidos o deformados-. Como consecuencia del estudio de estos efectos obtendremos una estimación de la velocidad del tornado y su clasificación en la escala de Fujita (Soliño y Gayá, 1992).

3.2 Descripción de la traza

El Barranco de Jujarra tiene 3 Km de longitud y 120 m de profundidad y es aquí donde se produce el contacto del tornado con el suelo (*número 1 en la figura 3*). Los efectos del contacto del tornado con el terreno en el barranco aparecen de forma repentina y los daños en los pinos son devastadores, resultando la mayor parte de ellos partidos y arrancados del suelo. De la observación de las direcciones de abatimiento de los pinos se evidencia ya, como lo hará más adelante y de forma más clara, el giro ciclónico del tornado. En esta zona se observan rápidos cambios en la dirección predominante de abatimiento de los pinos (D.P.A.). El ancho de la traza, que inicialmente es de unos 500 m, abarcando casi toda la anchura del barranco, se va reduciendo conforme el tornado lo va remontando. Es notable el hecho de que el tornado toque el suelo en una zona tan propicia, cóncava y abierta hacia la dirección predominante del viento en superficie.

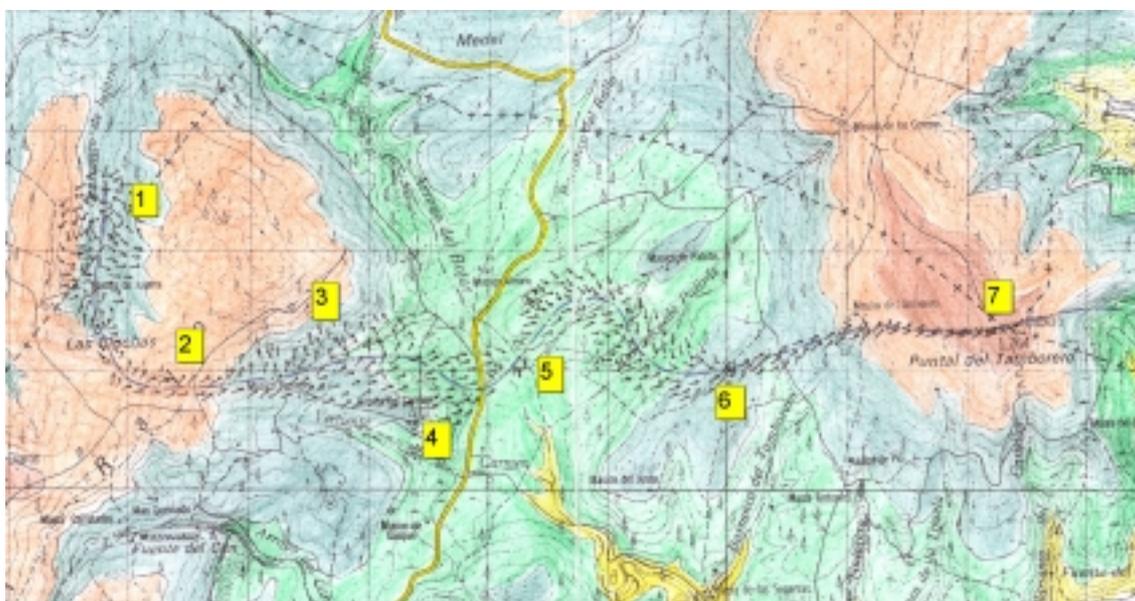


Figura 3: Representación de la traza del tornado y de la D.P.A.

Remontados 2 Km del Barranco de Jujarra, el tornado cruza la Sierra del Rayo por un collado (*número 2*). La traza se estrecha rápidamente hasta los 100 m. Abandona la dirección N-S del Barranco de Jujarra para seguir la del collado que la reconduce hacia el este. Durante la travesía del collado la D.P.A. en la subida es aproximadamente contraria a la dirección de avance; en el descenso por la otra ladera ambas, dirección de traslado del tornado y D.P.A. son coincidentes. Al final del collado se abren dos barrancos y la trayectoria del tornado continúa por el de su izquierda. Este hecho puede evidenciar indirectamente el giro ciclónico del tornado. La anchura de la traza aumenta rápidamente abarcando casi la totalidad del barranco, alrededor de 500 m. En este punto la D.P.A. muestra con más claridad el giro antihorario del

tornado siendo, en el margen derecho, hacia el centro y en el sentido de avance; en el centro de la trayectoria, perpendicular a la misma; y en el margen izquierdo, hacia afuera y contrario al sentido de avance. Por debajo del Masico de Benagés (*número 3*), los bruscos descensos de cota en el centro del barranco permiten que queden grupos de pinos inalterados, a pesar de encontrarse completamente en el centro de la trayectoria y habiendo grandes extensiones de pinos arrasados a ambos lados del mismo, lo que hace suponer que en estos puntos más bajos el vórtice del tornado no llegó a alcanzar la superficie. En las proximidades de la Ermita del Carmen (*número 4*), el tornado parece perder su guía orográfica abandonando el barranco. En este punto, presenta grandes oscilaciones en la dirección de avance en poco espacio. Incluso se llegan a observar algunos segados diferenciados, ocasionalmente paralelos, que tal vez podrían deberse a la acción de vórtices secundarios. La anchura de la traza disminuye hasta unos 200 o 300 m y la D.P.A. es coherente con la del anterior tramo, pero las oscilaciones en la dirección de avance la hacen aparecer más confusa. A continuación, el tornado alcanza su cota más baja al atravesar perpendicularmente la pista forestal Cantavieja-Mosqueruela. A partir de este punto (*número 5*) la D.P.A. vuelve a organizarse regularmente manifestando unas características nuevas: En ambos márgenes de la traza los pinos aparecen derribados hacia el centro y en el sentido de avance. Esta nueva D.P.A. respondería, más que al efecto del giro, al de la succión lateral hacia el mínimo central de presión, igual por ambos márgenes. Una vez atravesada la pista forestal, la trayectoria remonta una pequeña loma desviándose hacia su izquierda. Encuentra entonces una pequeña meseta que desciende suavemente hasta llegar al barranco de Patirás, que atraviesa perpendicularmente. En este punto la anchura de la traza aumenta de nuevo llegando a ser del orden de unos 500 m. Se observan máximos de vorticidad en zonas bastante localizadas -en unos 200 m-, en las cuales de nuevo el sentido de giro era ciclónico. Se llegó a observar algún pino retorcido y no quebrado, siendo el sentido de la torsión igualmente antihoraria. Superado el Barranco de Patirás, la trayectoria vuelve a tener que remontar una dorsal de unos 1550 m que separa los barrancos de Patirás y del Tamborero, y el comportamiento de la dirección de avance es análogo al de la ocasión anterior: Se desplaza hacia su izquierda, estrechándose la traza sensiblemente. Justo en el punto más alto de esta dorsal (*número 6*), la anchura es de nuevo mínima, menos de 100 m, pero la destrucción es masiva y la D.P.A. es caótica.

El tornado desciende, atraviesa perpendicularmente el Barranco del Tamborero y remonta la Sierra de las Dehasas, cruzándola por su punto más alto, el Puntal de Tamborero (1764 m) (*número 7*), para luego descender por una vaguada pronunciada y abierta al este. Tras 1 Km de descenso la traza se extingue. En todo este tramo la anchura de la traza es mucho menor que la de los anteriores sectores, unos 100 m o menos. La D.P.A. es diferente a la del sector anterior, formando un ángulo de unos 45° con la dirección de avance y en su sentido.

4. Estimación de la velocidad del tornado

Los diferentes efectos experimentados por los árboles se pueden clasificar en tres grupos, que se van a diferenciar por el radio (mínimo para cada grupo) del tronco a 1.5 m de altura sobre el suelo (r).

EFEECTO	RADIO (m)
DERRIBO	0,2
ROTURA	0.1
DEFORMACIÓN	0.05

Tabla 1: Caracterización de los efectos observados según el radio de los árboles.

4.1 El árbol derribado tipo

Para estimar la velocidad del viento en el tornado es necesario definir un árbol tipo. Trabajaremos con el primer caso en el que el pino es derribado con su cepellón, sin romperse el tronco. La tabla 2 resume las simplificaciones efectuadas que se detallan a continuación.

Aproximaciones para la copa: La masa de la copa es aproximadamente la mitad de la masa del tronco. En la cubicación de la copa del pino se admite que 50 m³ de madera del tronco equivalen a 100 m³ de madera de las ramas. Para el cálculo de la sección eficaz se ha supuesto que el tronco es aproximadamente cilíndrico.

Aproximaciones para el tronco: Para su cálculo hemos utilizado la densidad de la madera de pino silvestre $\rho=500\text{kg/m}^3$.

Aproximaciones para el cepellón: Una buena aproximación es considerar que el cepellón está constituido por 2/3 de raíz y por 1/3 de suelo forestal, al que por tratarse de un suelo calizo asignaremos una densidad $\rho=2800 \text{ kg/m}^3$

	FORMA	RADIO	ALTURA	MASA	SECC.	C.M.
COPA	Cónica	2.3	8.0	125	13.2	2.0
TRONCO	Cónica	0.2	13.0	250	1.6	3.3
CEPELLÓN	cilíndrica	1.2	0.8	4560	-	0.4
PINO	-	-	-	4935	-	0.8

Tabla 2: Datos característicos del árbol tipo.



Figura 4: Ejemplos de árboles derribados, rotos y deformados.

4.2 Modelo dinámico

Justo en el instante en el que el árbol cede al empuje del viento y es derribado, le ejerce una resistencia D . El empuje T , que es igual al peso del árbol, lo mantiene en pie. Usando la conservación del momento angular sobre la esquina del cepellón sobre la que el árbol bascula se puede calcular la velocidad del viento en el preciso instante en el que éste es arrancado de raíz.

En principio hay que asumir que la componente vertical de la velocidad del viento en el tornado en superficie es mucho menor que la componente horizontal. Por tanto, la componente vertical se considera despreciable.

Es común calcular el rozamiento de cuerpos escarpados mediante el coeficiente adimensional C_D :

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A} [1] \quad \text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu} [2]$$

Donde:

- D : Rozamiento total a una corriente de velocidad U_0
- ρ : Densidad del aire. Se toma $\rho=1.2 \text{ Kg/m}^3$
- U_0 : Velocidad de una corriente no perturbada.
- ν : Viscosidad cinemática.
- A : Área lateral.
- U_0 : Velocidad de una corriente no perturbada.
- L : Longitud del cuerpo paralela a la corriente.

Para calcular el número de Reynolds, debemos empezar suponiendo un valor para U_0 , la velocidad del viento. A partir de los efectos observados claramente, podemos intuir que este tornado es, como mínimo, uno del tipo F2. Por tanto, según la escala de Fujita, la velocidad horizontal de la corriente debe ser del orden de 50 m s^{-1} .

Dimensionalmente, la longitud del cuerpo que es paralela a la corriente es el diámetro de la copa, alrededor de 10 m . A partir de los datos de observaciones meteorológicas en los puntos próximos, se puede estimar una temperatura en la zona de alrededor de 30°C . Esto hace que $\nu \approx 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Y por tanto, es $\text{Re} = 5 \times 10^7$.

Aunque para el cálculo de la masa del árbol se ha supuesto que el tronco es prácticamente cónico ahora, para calcular la resistencia, se supondrá que el tronco es aproximadamente cilíndrico, ya que no hay grandes variaciones de diámetro a lo largo de la parte del tronco expuesta al viento antes de que le surjan

las ramas. Con estos supuestos, y con un número de Reynolds comprendido entre 10^7 y 10^8 , C_D es, para el tronco $C_{D1} \approx 0.7$.

Como la copa es, en realidad, de forma irregular y $Re > 10^7$, se considerará $C_{D2} \approx 1$. Así:

$$D = \frac{1}{2} \rho U_0^2 (A_{tronco} C_{D1} + A_{copa} C_{D2}) [3]$$

Aplicando ahora la condición de equilibrio estático sobre A, se tiene que: $D \cdot d = T \cdot l [4]$

Sustituyendo en [4] los valores para el pino derribado tipo, se obtiene un valor para el rozamiento D. De aquí se despeja en [3] para hallar la velocidad de la corriente, que resulta $U_0 \approx 89 \text{ m s}^{-1}$. En definitiva, se tiene que la velocidad horizontal del viento en el tornado para derribar un árbol tipo es del orden de 90 m/s, que son unos 325 Km/h. Este método determina así que la velocidad del viento corresponde a un tornado del tipo F3, tornado severo, de la escala de Fujita. Cabe señalar que este cálculo no tiene en cuenta la resistencia adicional que ejerce el resto de las raíces que se rompen al bascular el cepellón, por lo tanto es un valor mínimo.

5. Conclusiones

El tornado que se formó en el Barranco de Jujarra prosperó, atravesando la Sierra del Rayo y descendiendo por un barranco hasta llegar a un punto en el que podrían haberse formado varios vórtices secundarios, de los que únicamente pudo prosperar uno. Por ello, las características del mismo, que se evidencian principalmente en la D.P.A., son diferentes y corresponderían a un vórtice más estrecho, que finalmente fue perdiendo fuerza y se extinguió unos 12 Km después de la formación del tornado original. Hay otras pruebas que justifican esta división en dos del fenómeno. Al principio, la orografía condiciona la trayectoria claramente, ésta discurre a lo largo de barrancos y remonta las montañas por collados. En la segunda parte -posible vórtice secundario-, la orografía modifica la trayectoria (giros a la izquierda al ascender y a la derecha al descender, estrechamientos de la traza en ascensos), pero no la condiciona, ya que atraviesa los barrancos perpendicularmente y remonta las montañas por sus cimas. De todos modos, hay que destacar que las observaciones deducidas de los pinos derribados no evidencian grandes diferencias de fuerza del viento en ambos sectores, siendo ésta máxima al comienzo, en el Barranco de Jujarra y en la dorsal entre los Barrancos de Patirás y del Tamborero (en una extensión mucho menor). A partir de este punto, es evidente que la fuerza del tornado disminuye. Este comportamiento de la traza podría explicarse como una consecuencia directa de la propia forma tridimensional del vórtice, al que debe considerarse como un hiperboloide que succiona por abajo y se expande en la base del cumulonimbo. Por tanto, cuando el tornado en su desplazamiento encuentra cotas más altas en la superficie, ésta interseca al hiperboloide más arriba, por lo que su proyección es menor y por tanto la traza es más estrecha al ascender y más ancha al descender. Asimismo, el giro a la izquierda en ascensos y a la derecha en descensos se debe al giro ciclónico del vórtice. De una forma muy intuitiva, el extremo del vórtice se ve arrastrado por el desplazamiento del cumulonimbo que lo genera, por lo que, cuando encuentra un obstáculo frontal, su giro ciclónico hace que “ruede” sobre la ladera desplazándose consiguientemente a la izquierda. Una vez superado el obstáculo, la base tiende a recuperar la posición de la parte más alta del vórtice y gira a la derecha. En este proceso se va restando energía con el rozamiento y contribuye a la extinción final, que se produce después de remontar la cumbre más alta. Por tanto, podría sacarse como conclusión que el terreno condiciona y ocasionalmente determina la trayectoria de los tornados.

Finalmente, y con el apoyo de varios argumentos: la longitud y anchura de la traza, el número de pinos afectados, los daños observados en los árboles, la posible existencia de vórtices secundarios y la velocidad calculada por el método anterior, tenemos que concluir que el 28 de agosto de 1999, un tornado muy importante, posiblemente del tipo F3, se desarrolló y afectó a las montañas de Teruel.

Referencias

Soliño A. y M. Gayá (1992). La escala Fujita. Medida indirecta de la velocidad en tornados: descripción y utilización en el reconocimiento de campo. III Simposio Nacional de Predicción. I.N.M. Madrid, diciembre 1992.