

## **Comparación entre los índices de crecimiento de las tormentas de Albacete y Aragón\***

A. CASTRO, J. L. SANCHEZ, M. L. SANCHEZ, J. L. MADRID y R. FRAILE

Entre los diferentes métodos que se utilizan para caracterizar las tormentas de una zona, en este trabajo se utilizará la información que sobre las mismas nos suministró un radar meteorológico de la banda C. A partir de integrales de área tiempo-altura, se hallarán los factores de crecimiento a fin de verificar si existen diferencias entre las tormentas detectadas en dos zonas geográficas españolas diferentes, una alrededor de Albacete y otra alrededor de Zaragoza, para posteriormente determinar en que fase de su evolución difieren.

A. Castro, J. L. Sanchez, M. L. Sanchez, J. L. Madrid y R. Fraile. Laboratorio de Física de la Atmósfera. Universidad de León.

**Palabras clave:** Tormenta, factores de crecimiento, radar meteorológico.

### **INTRODUCCIÓN**

Existen numerosos estudios realizados en diversas latitudes, para determinar las características que presentan las tormentas, habiéndose encontrado diferencias apreciables de unas zonas a otras. Al parecer el hecho de que en muchas ocasiones tengan un marcado acento local hace que reúnan en cada lugar unas condiciones especiales.

El problema fundamental consiste en caracterizar las tormentas de cada lugar siguiendo una uniformidad de criterios. Para ello se han propuesto diversos métodos basados en:

—El tipo de masa de aire bajo las que se

generan las tormentas (FONT, 1983, BIEL *et al.*, 1962, CAPEL, 1981).

—Las características de la precipitación que generan las tormentas (relativas al espectro de gotas, la intensidad de las precipitación, las áreas sobre las que se produce la precipitación, etc. (BATTAN, 1973, KNIGHT *et al.*, 1982).

—Las características que presentan en las imágenes de radar, satélites meteorológicos, (SAUVAGEOT, 1982, BATTAN, 1973, SCORER, 1986).

En este trabajo nos referiremos a este último método de estudio, pero desde el punto de vista de observación de las tormentas mediante un radar meteorológico convencional.

---

\* Este trabajo ha sido realizado a partir de los datos suministrados por la Subdirección General de Sanidad Vegetal y es un resumen de la Memoria final del Convenio establecido entre el Mapa y la Universidad de León. Asimismo expresamos que este trabajo fue presentado oralmente en la VI Asamblea de Geofísica.

### **DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL**

Las dos zonas españolas, en las cuales vamos a intentar hacer una comparación de

las tormentas que se han detectado a lo largo de un periodo de observación de tres épocas estivales en cada una de ellas, son áreas centradas en los aeropuertos respectivos de las ciudades de Zaragoza y Albacete, (figura 1) y cubren la extensión de un círculo de radio 140 km en torno a ellas.

La que llamaremos zona de "Zaragoza", se halla situada al noroeste de la Península y abarca prácticamente el Valle Medio del Ebro, estando rodeada por importantes sierras en su parte norte pertenecientes a los Pirineos y al suroeste por las de la Cordillera Ibérica, con un extenso valle de apenas 300 m. de altitud en su parte central que rodea ambos márgenes del río Ebro.

Por otra parte la llamada zona de "Albacete", queda más al sureste de la Península, y su orografía es marcadamente diferente a la anterior, la altitud media es de unos 700 m y sólo muy al norte del área tiene estribaciones de la Ibérica, y al sur las del Sistema

Penibético, extendiéndose en su zona este hasta las costas mediterráneas.

El período de estudio comprendió en Albacete los meses de Junio a Septiembre de los años 1981, 1982 y 1983, mientras que en Zaragoza son los mismos meses durante los años 1984, 1985 y 1986.

El radar utilizado en ambas zonas es un modelo WR-100-2 de Enterprise de la banda C (con una longitud de onda de 5,5 cm), con una frecuencia de transmisión de 5.485-5.660 MHz, una potencia pico de 250 Kw, y una duración del pulso de 2 microsegundos. El alcance efectivo se ha considerado de 140 Km, en ambas zonas de estudio, evitando de esta forma efectos negativos de apantallamiento, sobre todo para el radar ubicado en Zaragoza, debido a que en su radio de acción se encuentran cadenas montañosas importantes como la Cordillera Ibérica y sobre todo los altos picos de los Pirineos.

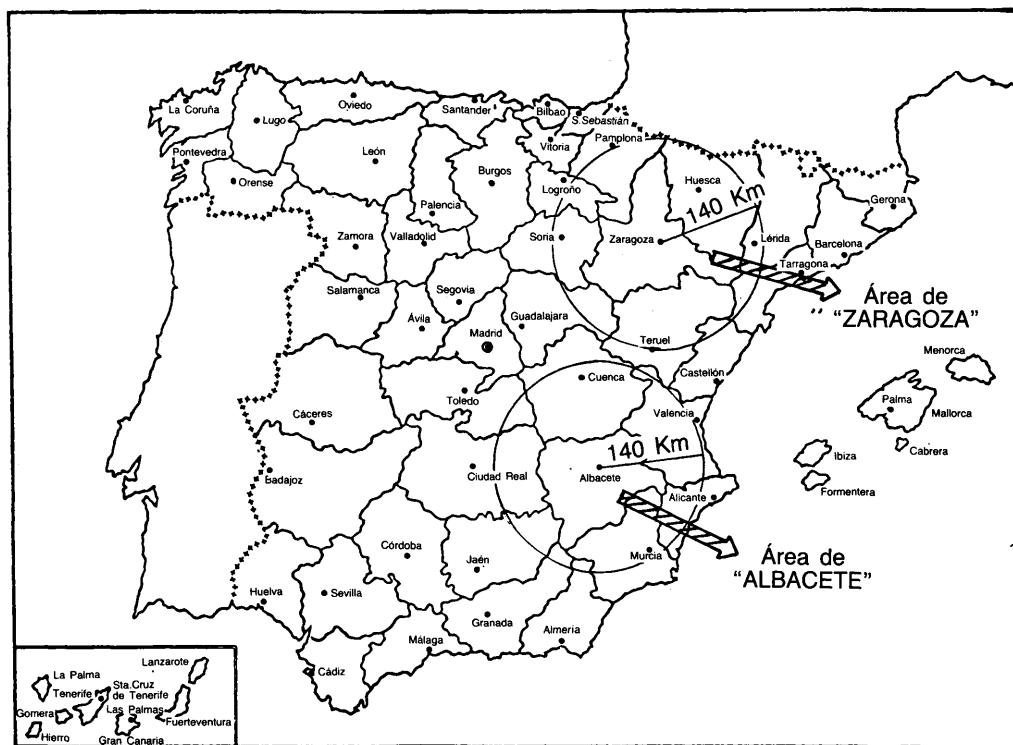


Fig. 1.—Zonas de estudio.

En ambas zonas y durante los periodos de observación, fueron detectadas numerosas masas nubosas de carácter tormentoso, llegando algunas de ellas a producir importantes daños en la Agricultura, debido a las intensas precipitaciones que se registraron bien en forma de lluvia o de granizo. Las observaciones realizadas a las masas nubosas se hicieron dentro de Proyectos Operacionales de Lucha Antigranizo, realizados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Algunos estudios sobre las mismas ya han sido realizados en ambas zonas (SANCHEZ *et al.*, 1986, CASTRO, 1987, BIEL *et al.*, 1962), incluso estudios comparativos de tormentas sembradas y no sembradas de la zona de Albacete (SANCHEZ *et al.*, 1986), pero no un estudio que diera cuenta de la existencia de diferencias en las tormentas no sembradas de ambas zonas que son geográfica y climatológicamente tan diferentes. Este será el objetivo del presente trabajo.

## FACTORES DE CRECIMIENTO : INTEGRALES TIEMPO-ALTURA

### Fundamentos teóricos y metodología

Actualmente numerosos autores como WALDVOGEL *et al.*, 1982, SPERANZA, 1982 o GOYER, 1975 en sus estudios acerca de los procesos atmosféricos acompañados de intensas precipitaciones, utilizan las integrales en el tiempo de características, como la altura del contorno de los 10 dBZ, la energía de las precipitaciones, etc. Nosotros las utilizaremos para determinar un índice que nos caracterice a las tormentas desde el punto de vista de su mayor o menor intensidad a lo largo del tiempo, índice que viene determinado por las variaciones de su desarrollo vertical y su duración en el tiempo.

Hemos utilizado el índice de factor de crecimiento definido por GOYER (GOYER, 1975) por varias razones entre las que destacamos que:

—Goyer estudió las características de las

tormentas de Alberta y pudo apreciar que presentaban una evolución muy rápida en el periodo de formación, para una vez alcanzado su máximo, ir decayendo lentamente. Al estudiar las características de las tormentas del Valle Medio del Ebro y de Albacete nos hemos encontrado con un comportamiento similar, lo que hace por tanto suponer, que un tratamiento análogo puede ser utilizado.

—Al igual que en Alberta, también hemos podido disponer de un radar meteorológico convencional, de la banda C y 250 Kw de potencia, dotado con la posibilidad de efectuar cortes horizontales (PPI) y verticales (RHI) cada cortos intervalos de tiempo.

La primera restricción impuesta a la gran cantidad de masas nubosas detectadas en ambas zonas es que la duración del contorno de 45 dBZ de las mismas, debe superar los 5 minutos. Este criterio (KNIGHT *et al.*, 1982), permite trabajar con aquellas masas nubosas, que entran dentro de la categoría de tormentas propiamente dichas.

A la hora de calcular el factor de crecimiento, y puesto que la instrumentación permite determinar la evolución de cada tormenta, GOYER toma los instantes en los que la tormenta tiene ya una considerable intensidad (cuando alcanza una altura de 10.000 metros), y considera la evolución de la tormenta en los 20 minutos anteriores, como una forma de determinar la evolución más o menos rápida en la fase de crecimiento de la tormenta, y finalmente considera el instante en el cual la tormenta decae en intensidad y alcanza la altura de 7.6 km. Desde los 20 minutos anteriores al momento de alcanzar los 10000 m, hasta que decae a los 7600 m, la tormenta pasa prácticamente por sus tres fases evolutivas de formación, maduración y disipación, dando cuenta este periodo, como hemos dicho de sus características de intensidad, duración, etc.

Para calcular el factor de crecimiento que en este trabajo lo denotaremos por FC, es preciso comenzar trazando la curva de evolución de cada tormenta. Para ello con ayuda de los cortes RHI, representamos la altura del contorno de 10 dBZ, es decir del límite superior activo de la tormenta

(ZIEGUEL *et al.*, 1983, KNIGHT *et al.*, 1982, SANCHEZ *et al.*, 1986), en función del tiempo, ( figura 2).

En estas condiciones podemos determinar:

$t_0$  : el instante el cual la curva de evolución llega a alcanzar los 10.000 metros.

$t_1$  : el instante ( $t_0-20$ ) minutos.

$t_2$  : el instante en el cual la tormenta va disminuyendo su actividad y su altura tope alcanza los 7.6 km.

$T_0$  : es el área que queda por debajo de la curva de evolución comprendida entre  $t_0$  y  $t_1$ .

$T_1$  : es el área que queda por debajo de la curva de evolución comprendida entre  $t_1$  y  $t_2$ .

De esta forma queda definido el factor de crecimiento, FC, como la relación  $T_1/T_0$  y que servirá para ver las diferencias entre las tormentas de ambas zonas de estudio.

**Resultados**

Uno de los problemas que tiene la definición de FC es que exige contar con tormen-

tas de alturas superiores a los 10.000 metros, por tanto muy intensas, y que además deben contar con una serie suficiente de cortes de RHI, que permitan seguir su evolución desde que se formaron hasta que se disiparon. De esta forma se ha restringido mucho las muestras a utilizar, pero pensamos que de esa forma hemos ganado mas exactitud a la hora de calcular sus factores de crecimiento.

La restricción estadística ha acertado el tamaño de la muestra, pero tambien hay que tener en cuenta que se refieren a épocas estivales diferentes ya que la serie de Zaragoza se refiere a los veranos de 1984, 1985 y 1986, y la de Albacete a los de 1981, 1982 y 1983. Sin embargo, y a pesar de que todo ello entraña dificultades, el número de casos y años es superior a los utilizados por el propio GOYER (GOYER, 1975).

En las figuras 3 y 4 mostramos los histogramas de frecuencias de los resultados encontrados, en Albacete y Zaragoza respectivamente. Como se puede ver por simple inspección de los FC, presentan valores

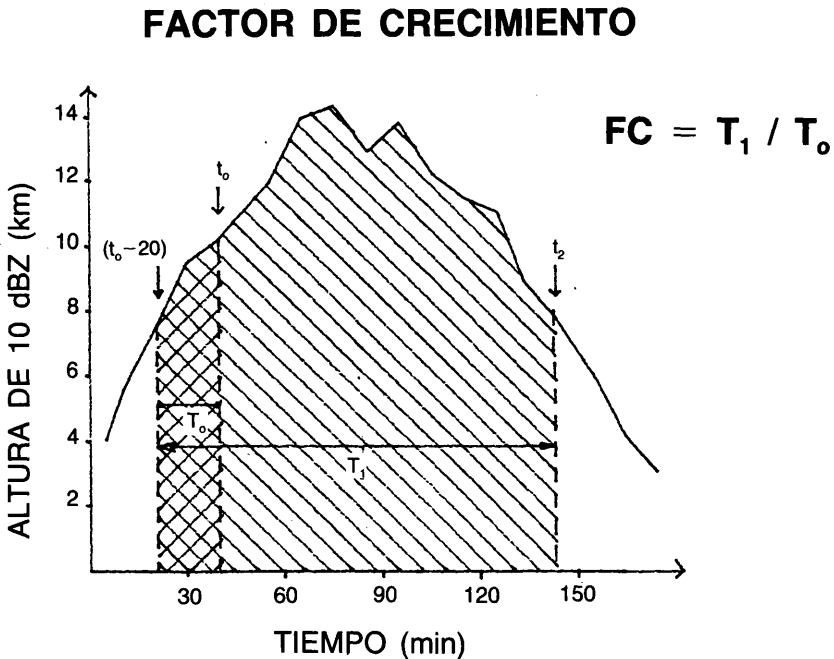


Fig. 2.—Curva de evolución del tope de la masa nubosa (contorno de 10 dBZ), a lo largo del tiempo.

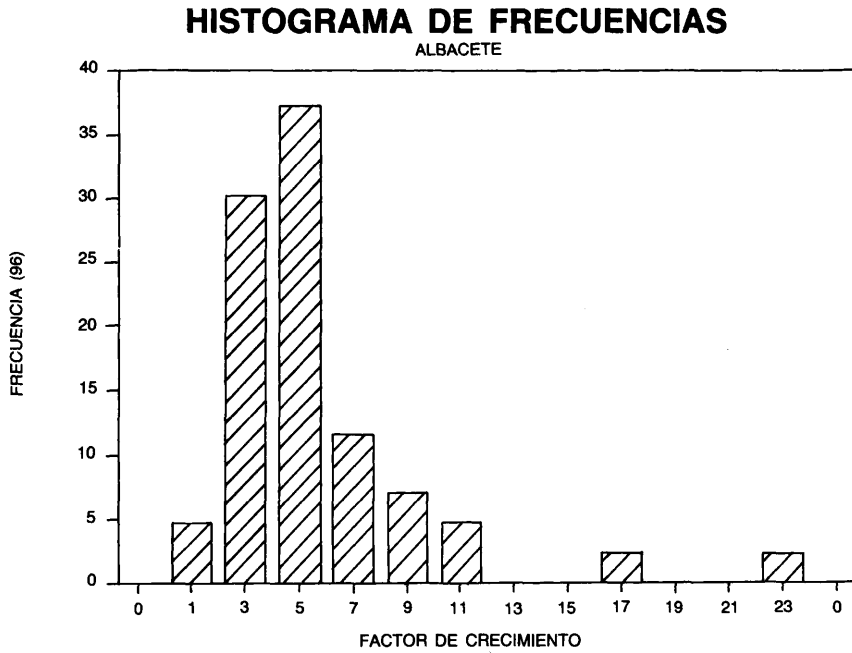


Fig. 3.—Histograma de frecuencias de los factores de crecimiento de las tormentas de Albacete.

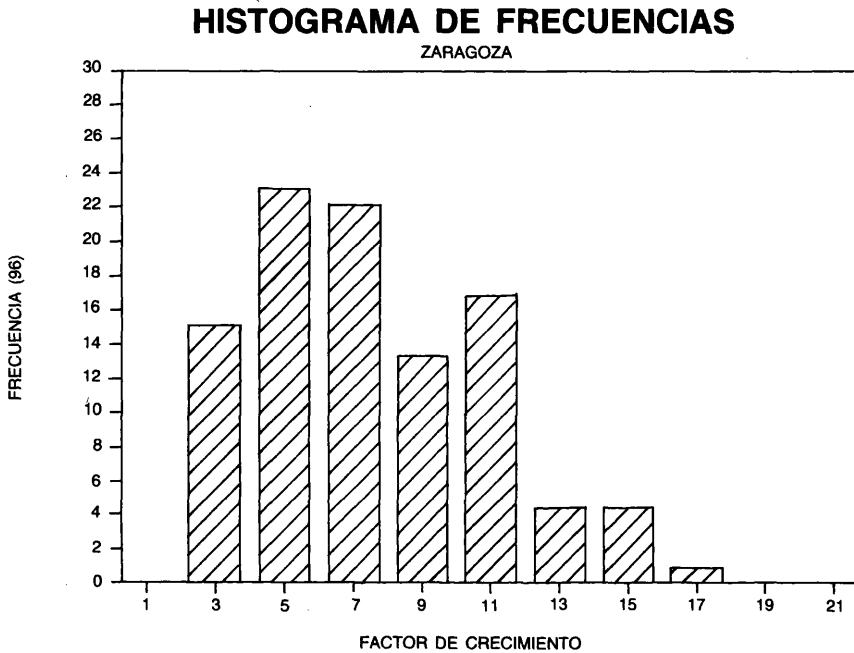


Fig. 4.—Histograma de frecuencias de los factores de crecimiento de las tormentas de Zaragoza.

muy dispersos, lo cual indica la variabilidad en la intensidad de las tormentas de una y otra área, e incluso dentro del mismo área. En Alberta un 70% de las tormentas presentaron FC inferiores al índice 10, en Zaragoza fueron un 73.5%, siendo en cambio en Albacete el 93% de los casos estudiados.

Los valores máximos, mínimos, media y desviación típica de cada zona vienen indicadas en el cuadro 1. Observamos que en el caso de Albacete las tormentas alcanzaron respecto al máximo y al mínimo valores más extremos de 22,3 y 1,7, frente a los 16,2 y 2,3 respectivos de Zaragoza, sin embargo la media de los factores de crecimiento es superior claramente en la zona de Zaragoza, con 7,66, siendo en Albacete de 5,72. Esto en principio nos indica que de forma global las tormentas del Valle medio de Ebro presentan una mayor intensidad, que veremos posteriormente como hay que interpretarla.

### ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS TORMENTAS DE ALBACETE Y ZARAGOZA

Dividiremos el estudio en varios pasos:

#### Log-normalidad de las poblaciones

Al analizar los histogramas de las figuras 3 y 4 observamos que los FC pueden corresponder a poblaciones log-normales. Una vez calculados los logaritmos de cada FC<sub>i</sub>, aplicamos el test de KOLMOGOROV-SMIRNOV a ambas muestras estadísticas y se apreció que las nuevas muestras formadas por los logaritmos de los factores de creci-

miento obedecían a distribuciones gaussianas con nivel de significación inferior al 0,05.

Al objeto de probar si además, las dos series obedecían a la misma o distinta población, aplicamos el test no paramétrico de MANN-WHITNEY en la versión corregida de SIEGEL-TUKEY. Dicho test se aplica a muestras que tienen distinto número de elementos,  $n_1$  y  $n_2$ , utilizando como hipótesis nula que los índices, FC, no dependen de la zona donde se han formado y desarrollado las tormentas.

Fijado el 1% como nivel de significación, el estadístico  $|Z_{ul}$  debe ser mayor que 3,23 si se quiere rechazar la hipótesis nula. Al aplicar el test a nuestras series obtuvimos un valor de del estadístico de 3,71 lo que el resultado nos he llevado a concluir que las dos muestras obedecen a dos distribuciones diferentes, existiendo diferencias que dependen de la zona.

#### Análisis probits. Rectas de Henri

El hecho de que nuestras muestras obedezcan a sendas distribuciones log-normales, nos permite aplicar el Análisis Probit, (MURRAY *et al.*, 1961), y utilizar las rectas de Henri, que nos relacionan la distribución de frecuencias acumulativas de la variable log (FC), en términos de la variable tipificada "u", en función de los logaritmos de los factores de crecimiento. En la figura 5 están pintadas las rectas de Henri de las dos distribuciones, la de Albacete y la de Zaragoza.

Las similares pendientes de las curvas indican que las distribuciones de ambas

Cuadro 1.—Estudio del factor de crecimiento, FC, para las dos zonas de formación de las tormentas. Test "U" de Mann-Whitney

Zona de estudio	Nº Casos	Máximo	Mínimo	x	o
Albacete	43	22,3	1,7	5,72	3,83
Zaragoza	113	16,2	2,3	7,66	3,45
Test de Mann-Whitney		$ Z_{ul} = 3,71$		$x (\%) = 1 \%$	

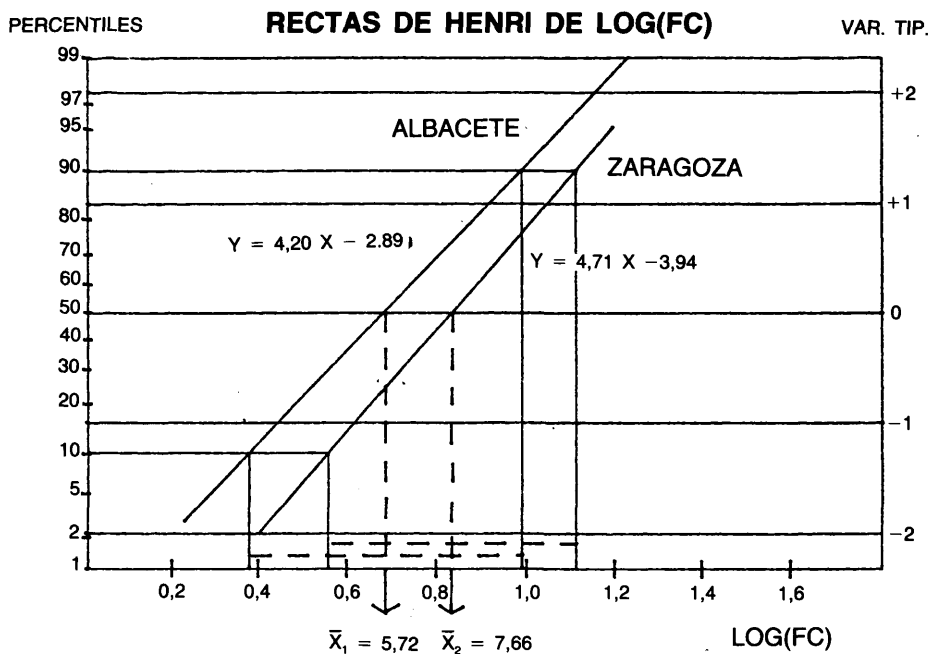


Fig. 5.—Rectas de Henri de las distribuciones normales de Log(FC) de Albacete y Zaragoza.

zonas presentan desviaciones típicas similares como ya vimos antes, y la diferente longitud de la curva da cuenta de los diferentes intervalos de variación de los índices según se trate de una u otra zona. La recta de Zaragoza está desplazada hacia la derecha, dando cuenta de su mayor valor promedio en los FC.

El estudio de los percentiles nos indica que tenemos un 80 % de probabilidad de que en Albacete las tormentas presenten FC entre 2,40 y 9,77, mientras que en Zaragoza existe la misma probabilidad de que se mantengan en el intervalo de 3,63 a 14,13.

**Discusión**

El hecho de haber observado que los factores de crecimiento de Zaragoza son superiores a los de Albacete, pueden obedecer a diferentes razones:

—Una de ellas es que el término  $T_0$ , o magnitud inicial de la tormenta sea clara-

mente menor en Zaragoza que en Albacete.

—En caso contrario la diferencia estribará en la magnitud total de las tormentas,  $T_1$ .

Para ver si la mayor o menor velocidad de crecimiento hasta alcanzar los 10000 m, en esos 20 minutos, depende de la zona se aplicó a los  $T_0$  medidos en Km.min, el test no paramétrico de Mann-Whitney, dando un valor el estadístico  $|Z_{ul}|$  de 0,373, con un nivel de significación del 70,92 %, lo cual nos lleva a que inicialmente hasta que alcanzan los 10.000 m las tormentas de ambas zonas se comportan de forma análoga. Los valores promedios de las integrales de área tiempo-altura son en Albacete de 175,3 Km.min y desviación típica de 16,4 y en Zaragoza de 176,4 Km.min y desviación 17,3.

Luego la razón hay que buscarla en  $T_1$ , es decir en la magnitud total de la tormenta, término en el cual influye la mayor o menor duración de la fase de crecimiento hasta que la tormenta alcanza su máxima altura, la duración de la fase de maduración y mayor

o menor duración de la fase de disipación.

En los cuadros 2 y 3, podemos observar como las tormentas de ambas zonas presentan en promedio valores parecidos para las tres variables estudiadas: alturas máximas (HMAX), tiempo de duración del contorno de 45 dBZ (T45), y factores de máxima reflectividad (ZMAX); sin embargo éstas variables son demasiado puntuales, no hacen referencia a la evolución de las tormentas a lo largo del tiempo, luego en  $T_0$  deben influir términos relacionados con lo dicho anteriormente.

El tiempo que tardan las tormentas en alcanzar su máxima altura, contada desde los 20 minutos anteriores al momento de alcanzar los 10 km, es en la zona de Albacete de 43.4 min., con una desviación típica de 27.9 min, mientras que en Zaragoza el tiempo es de 37.0 y 26.5 min. de media y desviación respectivamente. Utilizando el test "U" de MANN-WHITNEY se vio que el tiempo invertido en alcanzar la tormenta su máximo desarrollo vertical depende de la zona, con un nivel de confianza del 96 %, siendo las tormentas formadas en el área circundante a Zaragoza las que presentan una evolución significativamente menor.

Por tanto aunque las tormentas desarrolladas alrededor de las ciudades de Albacete

y Zaragoza, en un radio de 140 Km, a pesar de que manifiestan intensidades máximas similares y grandes desarrollos verticales, con altitudes medias entre 11,5 y 12 Km, presentan una evolución claramente diferente:

—hasta que alcanzan los 10.000 m se comportan de forma análoga las tormentas de ambas zonas.

—la evolución posterior, hasta alcanzar su máximo desarrollo vertical, es más rápida para las tormentas de Zaragoza.

—el hecho de manifestar además, factores de crecimiento claramente superiores se traduce en una mayor duración de la fase de maduración de la tormenta para las tormentas del Valle medio del Ebro, manifestando por tanto una mayor duración de las tormentas en el periodo de su vida en el cual manifiestan una mayor intensidad, intervalo de tiempo en el cual se registran los procesos de precipitación más intensos y perjudiciales para la agricultura, si son prioritariamente en forma sólida. Por otra parte como la duración media del contorno de 45 dBZ, también eran similares en ambas zonas de estudio, del orden de los 70 a 75 minutos, la fase de disipación también es más rápida en Zaragoza que en la zona de Albacete.

Cuadro 2.—Estudio de algunas variables de las tormentas de la zona de Albacete.

Variable	Nº Casos	Máximo	x	o
T45 (min)	43	280	71,5	62,5
ZMAX (dBZ)	43	68	56,6	7,5
HMAX (Km)	43	15,0	11,6	1,3

Cuadro 3.—Estudio de algunas variables de las tormentas de la zona de Zaragoza.

Variable	Nº Casos	Máximo	x	o
T45 (min)	113	220	74,9	47,3
ZMAX (dBZ)	113	69	55,7	5,6
HMAX (Km)	113	14,8	12,1	1,2



## ABSTRACT

CASTRO, A., J. L. SANCHEZ, M. L. SANCHEZ, J. L. MADRID y R. FRAILE, 1990: Comparación entre los índices de crecimiento de las tormentas de Albacete y Aragón. *Bol. San. Veg. Plagas*, **16** (3): 623-631

Among the different methods used to characterize the storms in an area, we are to work with the information given by a band C meteorological radar. We will find out growth factors from timeheight area integrals, in order to verify if there are differences between storms detected in two various Spanish geographical zones, one of them in the surroundings of Albacete and the other one round Saragossa, to determine afterwards in which stage of their process differ.

**Key words:** Storms. Growth factor. Meteorological Radar.

## REFERENCIAS

- BATTAN, L.J. 1982: *Radar observation of the atmosphere*. The University of Chicago Press. Chicago and London.
- BIEL, L. A. y GARCIA, P. L. 1982: El clima de Zaragoza y ensayo climatológico para el Valle del Ebro. Servicio Meteorológico Nacional. Publicación Serie A. Nº 36.
- CAPEL, J. J. 1981: *Los climas de España*. Colección Ciencias Geográficas. Oikos-tau. Barcelona.
- FONT, T. I. 1983: *Climatología de España y Portugal*. I.N.M.
- GOYER, G.G. 1975: Time-Integrated radar echo tops as a measure of cloud seeding effects. *J. of Appl. Meteo.* **Vol. 14**, Nº 7, 1362-1365.
- KNIGHT, C. A. and SQUIRES, P. 1982: *Hailstorms of the Central High Plains*. Colorado Associated University Press. Boulder. Colorado. USA. Vol I y II.
- MURRAY, R. and SPIEGEL, R. 1961: *Estadística*. McGraw Hill. 357 pp.
- SANCHEZ, J. L., CASTRO, I. A., SANCHEZ M. L. y DAVILA, M. 1986: Comparison between seeded and unseeded storms in Albacete (Spain). *The Journal of Weather Modification*. **Vol. 18**, Nº 1, 43-46.
- SANCHEZ, J. L., DAVILA, M., APARICIO, F. and CASTRO, A. 1986: Study of storms clouds in the Southeast of Spain. Tenth Conference on Weather Modification. American Meteorological Society. Virginia. USA. 366-369.
- SCORER, R. S. 1986: *Cloud Investigation by Satellite*. Ed. Ellis Horwood Limited. Chichester. England.
- SPERANZA, A. 1980: Alpine cyclogenesis as a complex problem. Seminar on Radar Meteorology. WMO. Nº 626, pp.269.
- WALDVOGEL, A. and SCHMID W. 1982: The Kinetic Energy of Hailfalls. Part III: Sampling Errors Inferred from Radar Data. *J. of Appl. Meteo.* **Vol. 21**, Nº 9. 1228-1238.
- ZIEGLER, L. C., RAY, S. P. and KNIGHT, C. N. 1983: Hail Growth in an Oklahoma Multicell Storm. *J. of the Atmospheric Sciences*. **Vol. 40**, Nº 7, 1768-1791.

(Aceptado para su publicación: 19 de Marzo de 1990)