

RELACIÓN ENTRE LAS OCURRENCIAS DE RAYOS Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ECOS DEL RADAR DE MADRID

Francisco Pérez Puebla
José Miguel Gutiérrez Núñez
Fernando Aguado Encabo

(Servicio de Teledetección, -INM-)

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio sobre la relación entre los datos procedentes de una selección de rayos nube-tierra y los perfiles de reflectividad derivados de la exploración de radar. Con este objeto se han utilizado los productos de la Red de Radiogoniómetros (RR) del Instituto Nacional de Meteorología (INM) y del Centro Regional de Radar de Madrid (CRRM). Se valoran y cuantifican las características que exhiben los ecos radar en relación con las frecuencias de rayos habidos en dos situaciones sinópticas diferentes del verano y otoño de 1992.

1. Introducción.

Después de varias campañas de archivo intensivo de toda la información proporcionada por el CRRM y por la RR en períodos de actividad tormentosa generalizada se obtuvieron algunos intervalos simultáneos de información

dentro del radio de exploración de 240 km entorno al emplazamiento del radar. La información corresponde a un total de unas veinte horas de actividad, de las cuales nueve corresponden a tormentas desarrolladas en la conocida baja térmica peninsular (15 de julio); y, el resto, se registraron bajo la acción otoñal de sendas bajas atlántico-ibéricas (25 y 26 de septiembre, y 30 de octubre). Durante los períodos de coincidencia se registraron prácticamente todos los volúmenes polares constituidos por las agrupaciones de ecos

en forma de paraboloides para las 20 elevaciones operativas en el CRRM consiguiéndose de esta forma registrar toda la información radar aprovechable. De forma análoga se almacenaron todos los datos procedentes de la RR, en particular, los datos brutos de detección de descargas por cada sensor de la red.

Posteriormente se sometieron a un proceso de cálculo todos los datos. Por un lado los volúmenes polares de exploración del radar se transformaron en cartesianos. Esto es, se presentan en forma tridimensional con una rejilla de resolución horizontal de 2×2 km² y en la vertical los doce niveles actualmente operacionales en el CRRM (1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 7,5; 8,5; 10; 12; 14 y 16 km de altitud sobre el nivel del mar) que en la nomenclatura de radar se denominan

"CAPPIs" (CAPPI 0, CAPPI 1, ... y así sucesivamente hasta "el CAPPI 11"). Este proceso de "digitalización" se basa en la interpolación lineal de los valores de reflectividad de los ecos del volumen polar más próximos y que no estuviesen contaminados con ecos de tierra puesto que fueron previamente eliminados. Sin embargo, no se incluyó en el volumen cartesiano la extensión artificial de los niveles de altitud constante más allá del verdadero alcance del haz radar: esto es, no se generaron los denominados "pseudo-cappi's" como es habitual en el CRRM puesto que la intención de este procedimiento de discretización es la obtención de la columna de perfiles de reflectividad radar en aquellos lugares donde se hubiese producido un rayo. A aquellos niveles en los que no se tiene ningún dato porque la elevación inferior de los haces radar quedase por encima se les asignó una reflectividad de -30 dbz en la correspondiente celdilla del volumen cartesiano y en su perfil o columna de reflectividades.

También se recalcularon las posiciones de los rayos a partir de los datos brutos de cada sensor (el instante en que se detectó, la dirección de la que procedía la señal, la intensidad relativa, la polaridad, el número de subdescargas, ...etc.) de acuerdo con la mejor calibración de la que se dispone hasta ahora en la red.

1.1. Sobre el problema de la simultaneidad de los datos.

El primer problema a que nos enfrentamos es el garantizar que los registros correspondiesen a eventos realmente coetáneos y para ello se sincronizaron los relojes del CRRM y de la RR antes de las campañas de captura de datos. No obstante, el problema de relacionar fenómenos de escala temporal tan diferente como la precipitación en las nubes tormentosas y los rayos que en ellas se producen tiene una extensión mayor y, no se aborda en este estudio. Sin embargo, existen trabajos en los que se comprueba que la correlación entre ambas fuentes de datos no se ve afectada especialmente por la forma en que se realice la superposición temporal de los mismos siempre que se mantenga un intervalo de coincidencia temporal que no sobrepase los veinte minutos.

Nosotros elegimos una ventana de diez minutos comprendida entre los tres minutos anteriores al comienzo de la exploración del radar y dos después de finalizada. Esto es, todos los rayos comprendidos en ese intervalo se simulta-

nearon a los registros de los ecos de precipitación que se obtienen en forma operativa cada diez minutos. De esta manera, mantendríamos el número de rayos de la muestra sin menoscabarla, aunque se pudiera introducir un factor de incertidumbre en los resultados del estudio por el lapso temporal entre el instante en que se produjo el rayo y aquel en que se recibió el eco de precipitación en el radar.

1.2. Sobre el problema de la coincidencia espacial de los datos.

Mientras que la resolución espacial de los datos radar es uniforme y viene dada por una celdilla de 2x2 km², la precisión en la localización de un rayo depende de la técnica empleada. Esencialmente, por lo que respecta al error en la fijación de la posición de un rayo, cabe distinguir si han sido dos o más el número de sensores de la red que lo detectaron. Si sólo fueron dos sensores no hay manera de garantizar que el error no sea de orden superior al de la celdilla de resolución del radar.

Cuando son tres o más el número de sensores que detectaron el mismo rayo el proceso de localización consiste en un ajuste por mínimos cuadrados de las diversas intersecciones que se producen considerándolos dos a dos. Así se obtiene la localización óptima que minimiza la función "chic cuadrado" de Pearson definida de la siguiente forma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\theta_i - \theta \right)^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad [1]$$

donde: θ_i es el ángulo medido por cada sensor,

θ es el ángulo de la dirección de localización óptima,

σ_i es la desviación estándar de la distribución de ángulos de error.

Entorno a cada localización se define una elipse de error dentro de la cual es mayor la probabilidad de que se haya producido el rayo. Las características de las elipses son función de la desviación estándar de ángulos de error, del número de sensores activos y de la configuración geométrica que presentan los sensores respecto a la localización obtenida.

La muestra de rayos con la que trabajamos fue escogida de un modo muy restrictivo y repre-

SITUACIÓN	NÚMERO DE RAYOS	"CHI" MEDIA	SEMIEJE MAYOR (km)	SEMIEJE MENOR (km)
15-JULIO	505	1,0	2,4	1,3
25-26-SEP	198	1,1	2,5	1,4
30-OCTUBRE	73	1,0	2,4	1,6
TOTAL	776	1,0	2,4	1,3

Tabla I

senta aproximadamente un 50% del total de rayos registrados en los períodos de simultaneidad. En primer lugar, sólo mantuvimos los rayos que se hubiesen fijado por el método de optimización anteriormente comentado; y, de ellos, se escogieron para mayor seguridad los que tuviesen un valor del parámetro de Pearson inferior a dos. De modo que la muestra que se utilizó exhibe las características promedio para cada situación y para el total, que se indican en la tabla I.

Con los criterios anteriormente mencionados se construyó una base de datos formada por todas las localizaciones de rayos seleccionadas así como sus características físicas, a las que se añadieron los perfiles de reflectividad en la columna vertical, la altura del, "ecotop", la reflectividad máxima de la columna, la altura donde se situaba dicho máximo, el valor de reflectividad de la primera elevación (PPI), y la distancia al radar.

2. Características de los perfiles de reflectividad media.

Se han representado en dos gráficas (Figuras 1 y 2) los valores medios de las reflectividades en cada nivel de la columna donde se produjo un rayo en función de la distancia al radar. La primera característica común a todas las representaciones es la existencia de un intervalo de niveles entre 4,5 y 11 km en el cual se produce un decrecimiento parabólico de la reflectividad con la altura.

Por otro lado, en los niveles inferiores el valor de la reflectividad sufre un debilitamiento que da lugar a un máximo local de la función en todas las representaciones para el segundo o tercer nivel independientemente de la distancia al radar. La razón de este aparente debilitamiento de la señal en los niveles inferiores está en el bloqueo orográfico del haz radar para distancias superiores

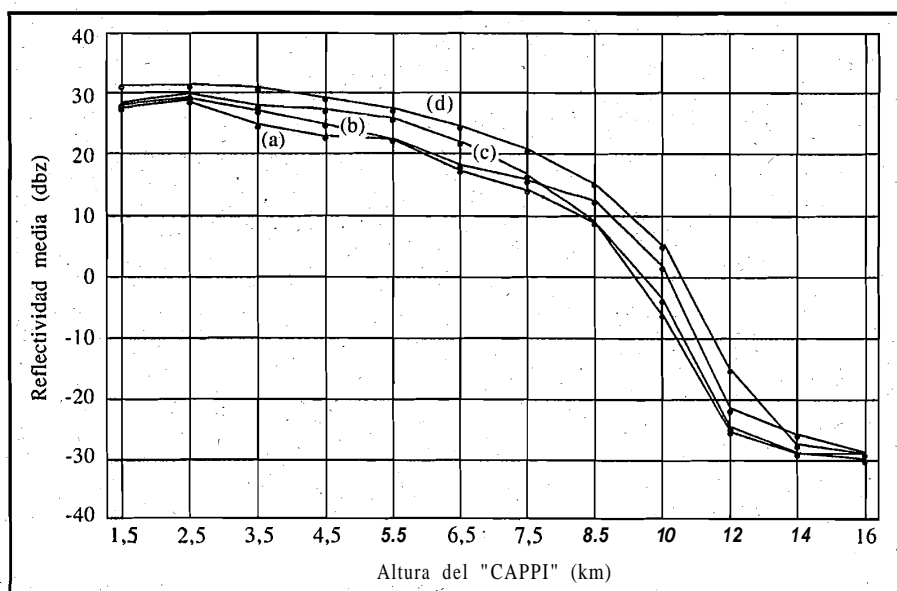


Figura 1.- Reflectividades medias por coronas esféricas:
 a) Para $r \leq 30$ km. b) Para $30 < r \leq 60$. c) Para $60 < r \leq 90$. d) Para $90 < r \leq 120$

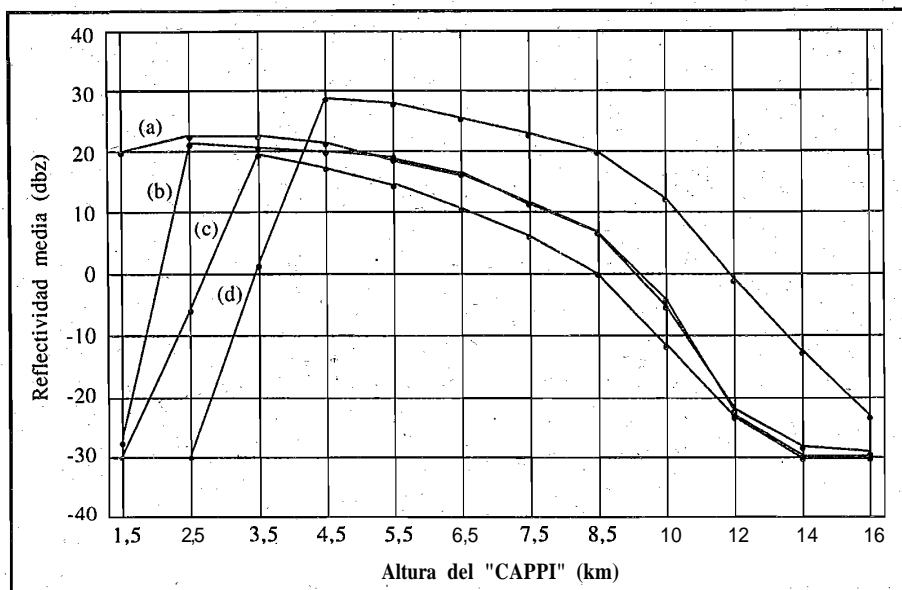


Figura 2.- Reflectividades medias por coronas esféricas:
 a) Para $120 < r \leq 150$ km. b) Para $150 < r \leq 180$. c) Para $180 < r \leq 210$. d) Para $210 < r \leq 240$

a 150 km, en la eliminación de los ecos de tierra en distancias intermedias de 60 a 150 km y en la eliminación de los ecos de tierra producidos por los lóbulos laterales del haz en las proximidades al radar. Además, el proceso de conversión de un volumen polar a otro cartesiano utiliza la interpolación con lo que contribuye a infravalorar los niveles de reflectividad detectados en ese nivel.

Por tanto, prescindiendo de la disminución artificial de la reflectividad se puede afirmar que ésta aumentaría hasta los niveles más próximos al suelo, apoyando la idea intuitiva de la relación entre los procesos de precipitación convectiva y los de generación de rayos entre nube y tierra.

Los valores de la altura a la que se sitúan los máximos de reflectividad (ver Figura 4) de

las columnas van aumentando lenta y constantemente conforme se toman coronas circulares más alejadas del radar. Se confirma así la existencia del bloqueo orográfico en las elevaciones inferiores y su repercusión en los valores de reflectividad de los niveles más bajos.

Por otro lado, los valores de las medias de reflectividades máximas (ver Figura 3) son mayores cuanto más próximos al radar estemos, lo que parece un síntoma propio de la atenuación de los radares de banda C como el de Madrid. Sin embargo, esta tendencia se rompe justo para la corona esférica más alejada del radar contraviniendo la anterior suposición. Por tanto, no se puede deducir que en el estudio la atenuación de la señal radar haya sido importante. Quizás este efecto sea consecuencia de la apertura del haz con la distancia a la antena.

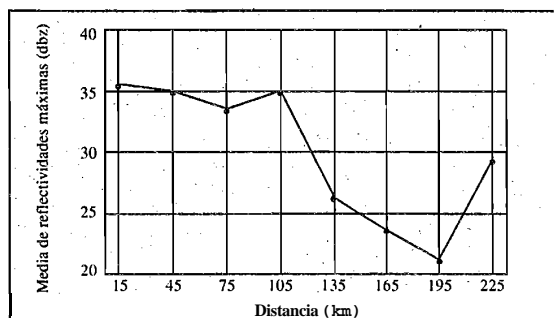


Figura 3.- Media de "Zmax"-R

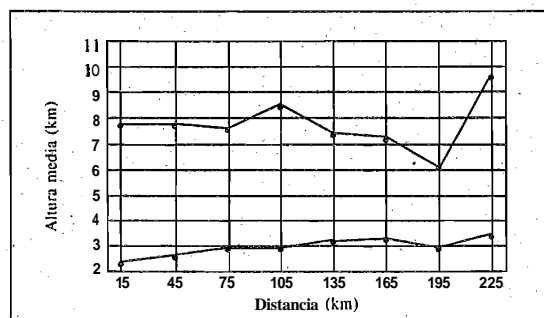


Figura 4.- Medias de "Etop" y "Hmax"

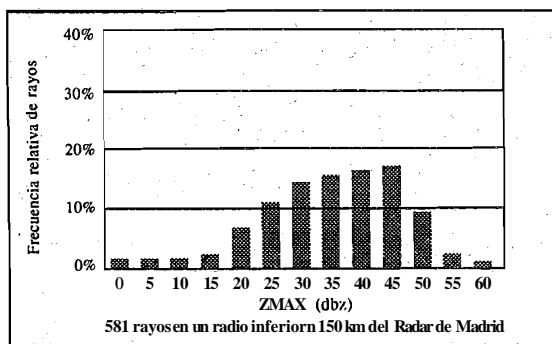


Fig. 5.- Frecuencia de rayos frente a la reflectividad máxima

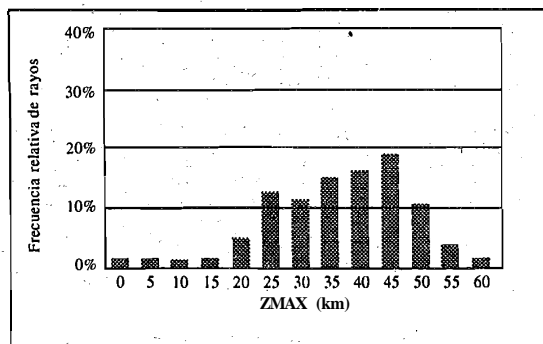


Fig. 6.- Reflectividad máxima en tormentas de baja térmica

3. Wistogrammas de reflectividad máxima y de altura del "ecotop".

En la Fig. 5 se presenta el histograma de frecuencias relativas de aparición de rayos para intervalos de valores de la reflectividad máxima detectada en la columna. Para su confección sólo se tomaron en cuenta los rayos que se produjeron dentro de un radio de 150 km al objeto de minimizar el bloqueo orográfico.

Se observa cómo la gráfica tiene un máximo de frecuencia de aparición de rayos cercano al 20% para reflectividades máximas en la columna entre 40 y 45 dbz y cómo la curva se ajusta a una normal con una cola a la izquierda.

Hemos realizado la misma representación gráfica (Figuras 6 y 7) en cada una de las dos situaciones meteorológicas diferentes a las que pertenecen los datos observándose que el máximo se sitúa en las bajas térmicas entorno a los 40-50 dbz mientras que en las depresiones frías se sitúa entre 25 y 30 dbz revelándose las bajas cálidas como desencadenantes de precipitaciones más intensas.

Analizamos del mismo subconjunto de datos las alturas de los "ecotop" (Fig. 8); esto es, la máxima altura a la que se detecta una reflectividad igual o superior a 12 dbz. Se encontró un máximo entre 8 y 9 km de altura con más del 35% de los rayos. Al estudiarlo por situaciones (Figuras 9 y 10) de nuevo las bajas cálidas manifiestan mayor elevación para los yunques de los cumulonimbos alcanzando el 80% alturas entre 8 y 10 km, mientras que las depresiones atlántico-ibéricas sólo consiguieron alcanzar estas alturas en un 50% de los casos.

En la distribución aparece con un porcentaje inferior al 10% del total de rayos un grupo cuyas alturas de "ecotop" son inferiores a 1 km. Estos rayos corresponden realmente al grupo de descargas cuya columna no tenía ningún valor de reflectividad que alcanzase los 12 dbz y se les asignó arbitrariamente la altura cero. A este grupo le hemos designado como rayos en "aire claro".

No constituye este resultado algo insólito ya que Holle en el Radar de Florida se encontró con un tanto por ciento superior al nuestro. Realmente, el estudio de estos rayos debe cons-

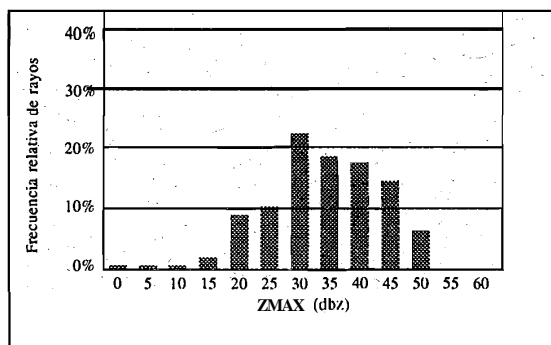


Fig. 7.- Reflectividad máxima en tormentas de "baja fría"

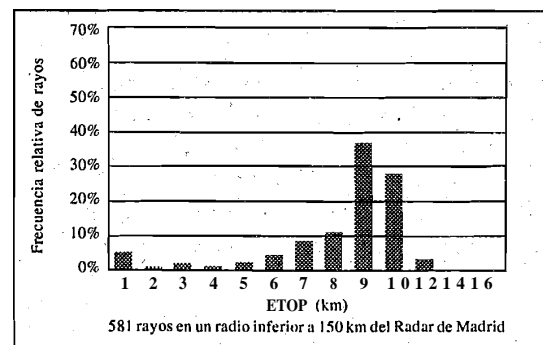


Fig. 8.- Frecuencia de rayos frente a la altura del "Etop"

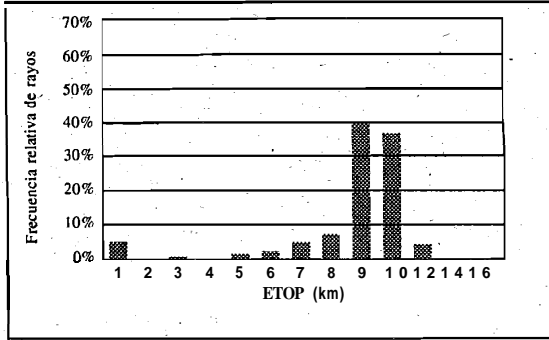


Fig. 9.- "Ecotop" en tormentas de "baja cálida"

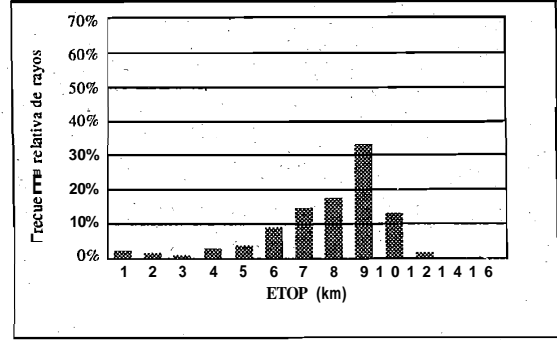


Fig. 10.- "Ecotop" para tormentas de "baja fría"

tituir un capítulo aparte aunque sospechamos que muy probablemente este resultado sea consecuencia de la amplitud del intervalo temporal de simultaneidad de los datos. (Téngase en cuenta que se puede dar una distancia de hasta 8 minutos entre ambos y mientras tanto el sistema se puede desplazar de su posición original).

4. Estudio de la frecuencia de rayos en relación a la etapa de desarrollo de la tormenta.

Es frecuente el uso de índices de desarrollo obtenidos a partir del perfil de reflectividad. En el CRRM está disponible el índice denominado "VPI" (vertical profile indicator) obtenido mediante el cociente bajo determinadas condiciones de las reflectividades entre un nivel superior y otro inferior.

Uno de los problemas más frecuentes es la elección de los niveles para determinar mejor el grado de desarrollo de los sistemas tormentosos. Se sometieron a prueba diversos índices y los que han tenido un comportamiento más coherente son:

a) para distancias al radar inferiores a 60 km:

$$\alpha = \frac{\text{Reflectividad a 4,5 km}}{\text{Reflectividad a 2,5 km}} - \frac{Z \text{ capi } 3}{Z \text{ capi } 1} \quad [2]$$

b) para distancias inferiores a los 150 km:

$$\alpha = \frac{\text{Reflectividad a 6,5 km}}{\text{Reflectividad a 3,5 km}} - \frac{Z \text{ capi } 5}{Z \text{ capi } 2} \quad [3]$$

Se estudiaron los valores de frecuencias relativas (%) de aparición de la totalidad de los rayos habidos en los dos radios considerados en la tabla II.

		RADIO ≤ 60 km			RADIO ≤ 150 km		
FASE DE DESARROLLO	VALORES DE V.P.I.	TOTALES %	+ %	- %	TOTALES %	+ %	- %
FINAL	$\alpha \leq 0,8$	54	4	49	52	9	43
LLUVIA INTENSA	$0,8 < \alpha \leq 1,2$	30	1	29	32	2	30
INTERMEDIA	$1,2 < \alpha \leq 2,0$	5	0	5	5	0	5
INICIAL	$\alpha > 2,0$	7	0	7	3	0	3
"AIRE" CLARO	"sin α "	4	1	3	8	0	8

Tabla II

El primer radio se escogió como el único que nos asegura la inexistencia de bloqueo orográfico y como área de pruebas para el uso de niveles inferiores no contaminados por ecos de tierra. Los resultados de este área se toman como referencia para localizar otros niveles superiores que evitando el bloqueo orográfico y los posibles ecos de las montañas sirvan para definir un índice VPI útil a mayores distancias.

Para el segundo radio se presentan los resultados de frecuencias con el VPI propuesto mediante la fórmula [3], mientras que en el radio de 60 km se utilizó el índice definido por la fórmula [2], y como se aprecia hay una buena coincidencia entre los resultados. Sólo los porcentajes relativos en los denominados "rayos de aire claro" y los porcentajes de rayos positivos en la fase final presentan ciertos contrastes.

Por tanto, deducimos que cualquiera de los índices refleja perfectamente las restantes fases de desarrollo en las tormentas. Posiblemente estas discrepancias sean fruto de unas muestras exiguas en rayos positivos, y en cuanto a los "rayos en aire claro" insistimos "en la indeterminación espacio-temporal introducida por el criterio de simultaneidad seguido en el estudio".

Por lo demás, resalta la práctica inexistencia de rayos positivos en las fases de desarrollo inicial e intermedio del desarrollo tormentoso. Además, sólo entorno a un 10% del total de rayos se producen en estas fases. La gran mayoría de los rayos, el 84%, se producen en las fases de precipitaciones intensas o en la etapa final de las tormentas.

Conclusiones.

Los resultados obtenidos revelan que las concomitancias entre los datos aportados por la red de radiogoniómetros y los obtenidos del Radar de Madrid son altamente elevadas y beneficioso su estudio no sólo a los efectos de investigación y desarrollo sino también para el conocimiento del comportamiento y limitaciones de cada sistema.

Por otro lado, no se deduce del estudio que el Radar de banda C de Madrid sufra atenuación importante ni siquiera a grandes distancias para las situaciones aquí estudiadas. Sin embargo, sí debe tomarse en consideración la contaminación de los niveles inferiores por ecos de tierra, así como el efecto del bloqueo orográfico y de la progresiva elevación de los haces de exploración del radar, incluso en sus proximidades (R 60 km).

Por último, es de destacar el excelente ajuste entre los índices de desarrollo (VPI) aquí probados y las frecuencias de aparición de rayos en las distintas fases de las tormentas.

Referencias.

Holle; López y Hiscox (1983). *Relationships between lightning occurrences and radar echo characteristics in South Florida. 8th International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Fort Worth, Texas. June 1983.*

Reap, R.M. (1985). *Evaluation of cloud-to-ground lightning data from the western United States for the 1983-84 summer seasons, Journal of Climate and Applied Meteorology. May 3, 1985.*