



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio de sistemas convectivos mesoscales en la zona mediterránea occidental mediante el uso del radar meteorológico

Tomeu Rigo Ribas



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial 4.0. Espanya de Creative Commons**.

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial 4.0. España de Creative Commons**.

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0. Spain License**.

3. Datos utilizados y metodología

El presente capítulo trata el bloque metodológico de esta tesis, presentándose los diferentes instrumentos utilizados y la información recogida de cada uno de ellos, así como los algoritmos desarrollados para su tratamiento. Para realizar el estudio de análisis de situaciones de lluvias fuertes en Catalunya se ha dispuesto de datos que van desde los sondeos verticales (que, en cierto modo, se engloban en la información sinóptica) hasta los datos de estaciones automáticas (tanto hidroluviométricas como meteorológicas), pasando por la información mesoescalar (que incluye los datos de los análisis y re-análisis mesoescales y los del radar meteorológico). Sin embargo, la resolución temporal no es la misma para todos, como se verá a continuación. De todas maneras, la información disponible ha cubierto un gran número de episodios de lluvias fuertes registrados durante el período 1996-2000 en Catalunya.

En este capítulo se presentan algunos aspectos de los diferentes entornos meteorológicos que envuelven las estructuras convectivas que se han identificado en los episodios de lluvias fuertes analizados en el presente trabajo. Aunque sea una parte secundaria dentro de esta tesis, resulta imprescindible ya que para conocer de forma compleja todo el proceso relacionado con el ciclo de vida de la convección, es necesario tener un punto de vista más amplio. Probablemente, hubiera sido interesante realizar un estudio a partir del uso de modelos mesoescales (como pueden ser el HIRLAM, el MASS o el MM5, entre otros), pero el esfuerzo necesario y la cantidad de información obtenida habrían supuesto la necesidad de doblar el trabajo presentado.

El aspecto meteorológico se ha dividido en tres partes diferentes: la termodinámica de la atmósfera, el análisis mesoescalar (tanto en la escala alfa como en la beta) y la evolución de las tormentas dentro de la escala local (es decir, lo que se conoce como mesoescala gamma). En la figura 3.1 se presentan las diferentes escalas meteorológicas en las que se ha trabajado.

3.1. Radiosondeos y perfiles verticales

Uno de los análisis más fiables de la estructura vertical de la atmósfera se lleva a cabo mediante las radiosondas, las cuales están constituidas por un conjunto de sensores de presión, temperatura y humedad o temperatura de rocío (Gibergans, 2001). Además, contienen un aparato transmisor que se utiliza para el envío de datos codificados a una estación receptora. No es el único sistema, ya que existen otros métodos, como los satélites o los vuelos comerciales, pero las radiosondas son, hasta el momento, las que producen un error más bajo.

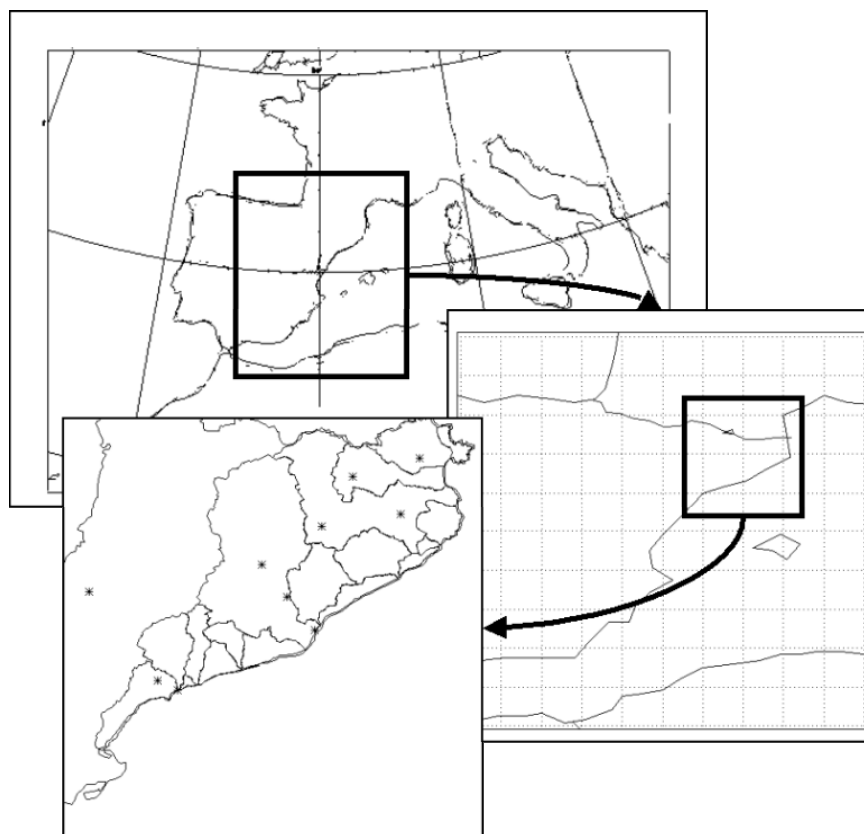


Figura 3.1. Representación gráfica de las diferentes escalas utilizadas en el presente trabajo.

Para el presente trabajo se han utilizado radiosondeos de diferentes estaciones aerológicas. En primer lugar, se ha dispuesto de la información de las estaciones que rodean la región (figura 3.2), es decir, Palma de Mallorca por el SSE, Murcia por el SSO, Zaragoza por el O y, finalmente, Nimes por el NNE. De esta forma, la región está más o menos “rodeada” y así, todas las situaciones meteorológicas adversas están bien cubiertas a la hora de conocer la situación previa. Los datos corresponden a los episodios analizados (ver apartados y capítulos siguientes), con información perteneciente a los ambientes previo, durante y posterior al registro de las precipitaciones máximas. Una parte de los datos de la estación de Palma de Mallorca han sido cedidos por el Centro Meteorológico Territorial (CMT) del Instituto Nacional de Meteorología de les Illes Balears. El resto de los radiosondeos se han obtenido a través de la página web del College of Engineering de la University of Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).



Figura 3.2. Estaciones de radiosondeos utilizadas en el estudio. Las más importantes son las de Barcelona, Zaragoza, Nimes, Murcia y Palma de Mallorca

Por otra parte, se ha dispuesto de los radiosondeos de la estación de Barcelona, que no pertenece a la red de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), pero que ha permitido conocer mejor la situación vertical de la atmósfera en la región durante los episodios de lluvias fuertes. Desgraciadamente, no se dispone de los datos para todos los casos (el estudio comprende el período 1996-2000), ya que se empezó a lanzar a finales de 1997.

Finalmente, se ha trabajado con los datos de análisis vertical del campo de vientos. Se han analizado los valores interpolados en niveles híbridos del modelo HIRLAM, con una resolución de $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ (en el apartado siguiente se explican algunos detalles para el modelo 0.5° , que son similares al aquí presentado), y para la posición del radar de Barcelona del INM. Se trata de 31 niveles híbridos, incluyendo el valor en superficie. Para cada nivel se obtienen los valores de las componente U y V del viento y el valor de la presión a dichos niveles. Estos datos han sido utilizados en el programa para la predicción a corto plazo de estructuras convectivas.

La información para ambos tipos de datos (radiosondeos y del análisis del viento vertical) ha sido analizada mediante el IDL (Interactive Data Language, o Lenguaje Interactivo de Datos), permitiendo obtener información termodinámica (inestabilidad, humedad, vientos...) que se representa bien tanto en gráficos termodinámicos (figura 3.3) como en curvas de evolución de los parámetros calculados (CAPE, índices de inestabilidad, cizalladura, masa de agua potencial, niveles importantes...). El programa informático en IDL se ha basado en el realizado por Gibergans (2001) en FORTRAN, con algunas mejoras, especialmente a nivel técnico, debido al gran número de subrutinas que tiene el lenguaje. El programa parte de los datos de los diferentes niveles disponibles e interpola logarítmicamente hasta conseguir un valor de temperatura, temperatura del punto de rocío, y velocidad y dirección del viento cada 10 hPa.

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

A partir de aquí se obtiene la curva de evolución, así como otros parámetros como la temperatura del termómetro húmedo, la densidad del aire, la altura geopotencial, etc, en cada nivel. En este punto es posible calcular las diferentes magnitudes que nos dan la información sobre el comportamiento en la vertical de la atmósfera. Cabe decir que a los radiosondeos se les aplica un control de calidad a partir de la información de los datos de temperatura (niveles a los que llega el radiosondeo y número de datos disponibles). Las rutinas desarrolladas para el estudio de los radiosondeos se desglosan en:

- *Transformación de los datos de los radiosondeos* (debe recordarse que existen diferentes formatos) al formato de lectura propio
- *Lectura de los datos del radiosondeo* y almacenamiento en estructuras que contienen toda la información (tanto valores como características de la estación de lanzamiento)
- *Interpolación logarítmica de los datos*: cada 10 hPa para temperatura y temperatura de rocío
- *Cálculo de los diferentes parámetros*, los cuales pueden agruparse en: niveles de interés, magnitudes relacionadas con la cantidad de vapor en la atmósfera, temperaturas potenciales, masa de agua precipitable en diferentes estratos, temperatura virtual, altura geopotencial y densidad del aire de los diferentes niveles, isocero, índices termodinámicos (Showalter, LI, KI, TTI...), energías y CAPE, número de Richardson y velocidad vertical máxima.
- *Representación gráfica*: en la figura 3.3 se presenta un ejemplo

La termodinámica, al igual que la escala sinóptica, es un campo bien estudiado para el Mediterráneo Occidental, con numerosos trabajos que hacen referencia a la Península Ibérica y a las Balears (Ramis y Tudurí, 1997, Gibergans, 2001, Sánchez *et al.*, 2001). Por lo tanto, no se pretende en un único apartado mejorar los conocimientos ya adquiridos sobre este tema. De todos los posibles parámetros se han seleccionado, en base a los trabajos anteriores, 4 de ellos que han demostrado ser claves para conocer los factores que intervienen en los episodios en Catalunya. Concretamente, los parámetros han sido la CAPE, el LI y el nivel de la isocero, mientras que la masa de agua precipitable entre superficie y 850 hPa se ha analizado en menor manera.

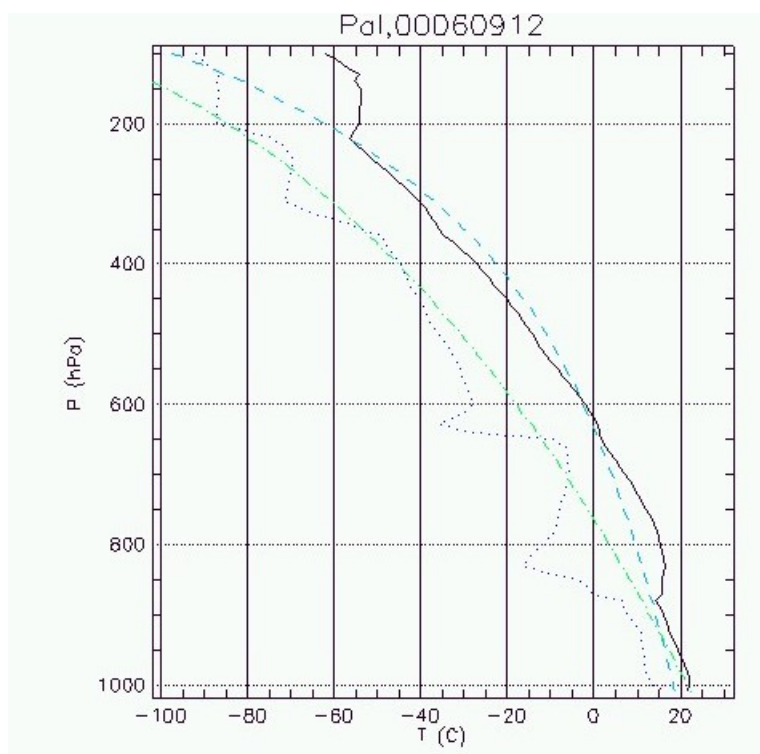


Figura 3.3. Ejemplo de un diagrama termodinámico de Stüve para el día 9 de junio de 2000, a las 12 UTC, para la estación de Palma de Mallorca. La línea continua corresponde a la curva PT, a puntos a la PT_d , a trazos a la pseudoadiabática y a puntos y trazos a la adiabática seca.

Para los diferentes parámetros analizados se presentaba en el capítulo segundo una tabla con los valores umbrales. Estos umbrales serán comparados con los obtenidos aquí para confirmar si realmente son útiles o debe realizarse una mejora, no solamente en los umbrales, sino, quizás en la definición de nuevos parámetros definidos para nuestra región. Los objetivos básicos del apartado termodinámico pueden resumirse en:

- La obtención de unos valores medios para los diferentes parámetros y estaciones aerológicas utilizadas antes, durante y posteriormente a la ocurrencia de lluvias fuertes en Catalunya y comparación con los valores de la bibliografía.
- Analizar por estaciones los diferentes parámetros, considerando los mismos periodos estacionales que para la precipitación.
- Obtención de unos valores tipo para cada clase de episodios de lluvias fuertes considerados a partir de las zonas afectadas por la precipitación y las cantidades acumuladas.

3.2. Mapas y datos mesoescalares

La mayoría de análisis mesoescalares utilizados en este trabajo proceden del modelo HIRLAM-0.5° que se corre en el Instituto Nacional de Meteorología. Se trata de un modelo de

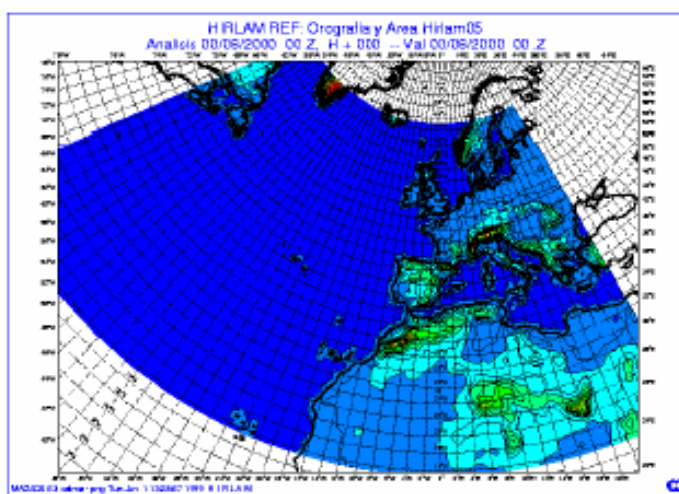
Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

área limitada (Picornell *et al.*, 2001, García-Moya y del Río, 2001), con una resolución horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ en latitud y en longitud, y 31 niveles híbridos en la vertical. Para las condiciones de contorno se utilizan los campos de la predicción del modelo global del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, o Centro Europeo para las Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo), mientras que la primera salida son las predicciones H+6 (a 6 horas) del propio HIRLAM. En las figuras 3.4 (a y b) pueden verse las áreas de integración tanto para el HIRLAM- 0.5° como para el HIRLAM- 0.2° .

El análisis realizado por el modelo incluye un esquema de interpolación óptima, que es multivariante en tres dimensiones tanto para el campo de masa como para el de viento, mientras que para la humedad relativa es univariante. En un futuro (García Moya y del Río, 2001) está previsto que realice predicciones de modo determinístico, además de mejorar la resolución.

Tanto los mapas disponibles de los análisis operacionales no inicializados a nivel del mar, para las 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC, como la información disponible en la página web <http://medex.inm.uib.es>, han sido consultados para realizar un estudio de los ciclones identificados próximos a la región, y ver cual es la correlación entre episodios de lluvias fuertes, la presencia de Sistemas Convectivos Mesoescalares y la existencia de una baja en superficie cercana a la región. Este trabajo se incluye dentro de la participación del grupo GAMA de la Universitat de Barcelona al proyecto MEDEX. En las figuras 3.5 y 3.6 pueden observarse los dominios (incluyendo la orografía) del modelo, así como un ejemplo de un mapa mesoescalar para un episodio analizado (octubre de 2000).

Además, para diferentes episodios particulares el CMT del INM de las Illes Balears ha facilitado los mapas con los datos de las estaciones automáticas de la Península Ibérica y alrededores, para poder realizar el reanálisis mesoescalar de situaciones complejas. En la figura 3.7 se observa el caso del 10 de junio de 2000, al cual se le han superpuesto las células convectivas identificadas con el radar meteorológico.



a

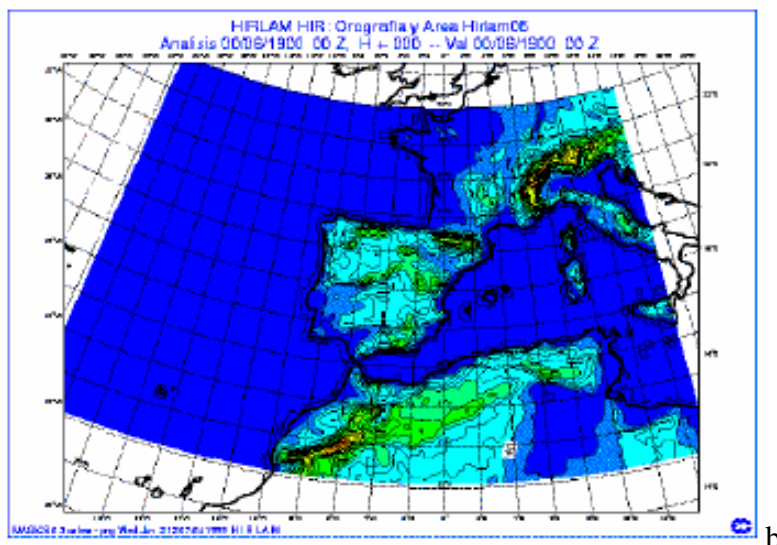


Figura 3.4. Áreas de integración del modelo HIRLAM, para las resoluciones de 0.5° (a) y 0.2° (b)

Para aquellos casos en los que no se disponía de los mapas, se ha realizado un estudio básico con los mapas del modelo FNL (que se conoce como la última ejecución del modelo NCEP, en el cual se incluye también información de satélite y datos que no se han recibido a la hora correcta), disponible en la página web <http://www.arl.noaa.gov/ready-bin/arlplotafile.pl?metdata=FNL> del Air Resources Laboratory (ARL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Las características del modelo pueden verse en la tabla 3.1 y en la figura 3.8. En este caso se ha analizado también la temperatura en superficie, considerando las siguientes condiciones para la selección del mapa:

- Posición del centro: Latitud = 40° N; Longitud = 1° E
- Radio del mapa: 10° desde el centro
- Superposición de campos: temperatura en superficie (intervalos de 2° C) y presión en superficie (intervalos de 2 hPa)

Así mismo, se ha hecho especial hincapié en la localización de depresiones mesoescalares próximas a la zona afectada por las lluvias. Al tratarse de información predominantemente gráfica, el trabajo de programación se ha centrado única y exclusivamente en el análisis de los datos de la base de ciclones mediterráneos del proyecto MEDEX. El primer paso de este trabajo se ha centrado en crear un fichero con toda la información de interés para el estudio: fecha, hora, código, nivel atmosférico máximo en el que se ha identificado, latitud y longitud del centroide, presión en superficie, desplazamiento, estabilidad y velocidad del viento. Esta información ha sido analizada posteriormente cruzándola especialmente con los datos de precipitación, ya que son series continuas.

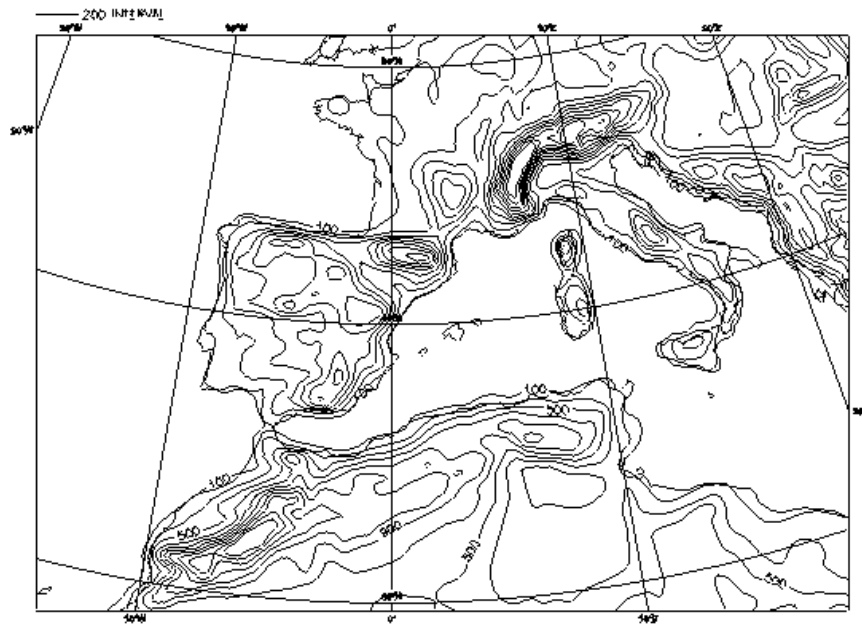


Figura 3.5. Dominio del modelo HIRLAM utilizado para el análisis mesoscalar objetivo, incluyendo la orografía

MODELO	DOMINIO	RESOLUCIÓN TEMPORAL (h)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (km)	NÚMERO DE NIVELES
FNL/GDAS	NH / SH	6	191	13

Tabla 3.1. Características básicas del modelo FNL

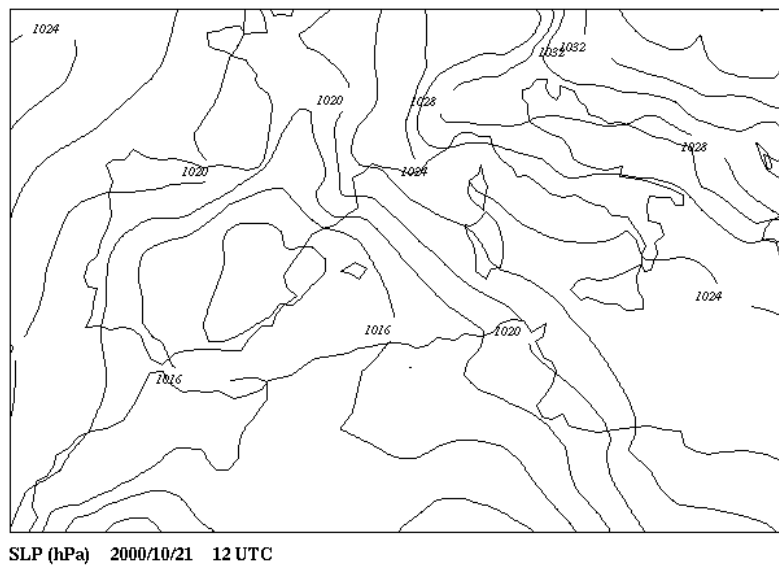


Figura 3.6. Ejemplo de análisis objetivo para el día 21 de octubre de 2000, a las 12 UTC

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

Como ya se presentaba en la figura 3.6, en el caso de la mesoescala beta, el CMT de las Illes Balears ha proporcionado los ploteos de cuatro situaciones diferentes (octubre de 1996, diciembre de 1998, junio de 2000 y octubre de 2000). Se trata de cuatro casos en los que se superaron los 100 mm en 12 horas (en el caso de los dos últimos eventos, incluso se superó ese valor en 3 horas) y que tuvieron impacto considerable. Además, tres de ellos afectaron la parte central de Catalunya, incluyendo la cuenca del río Besòs, zona de estudio dentro del proyecto CICYT en el que se enmarca esta tesis. Por el contrario, el último episodio (octubre de 2000), apenas dejó precipitación en esa región. Por lo tanto, uno de los objetivos en este apartado será el de tratar de caracterizar aquellas situaciones que afectan a la zona de principal interés, y diferenciarlas de las que no producen precipitación en ella.

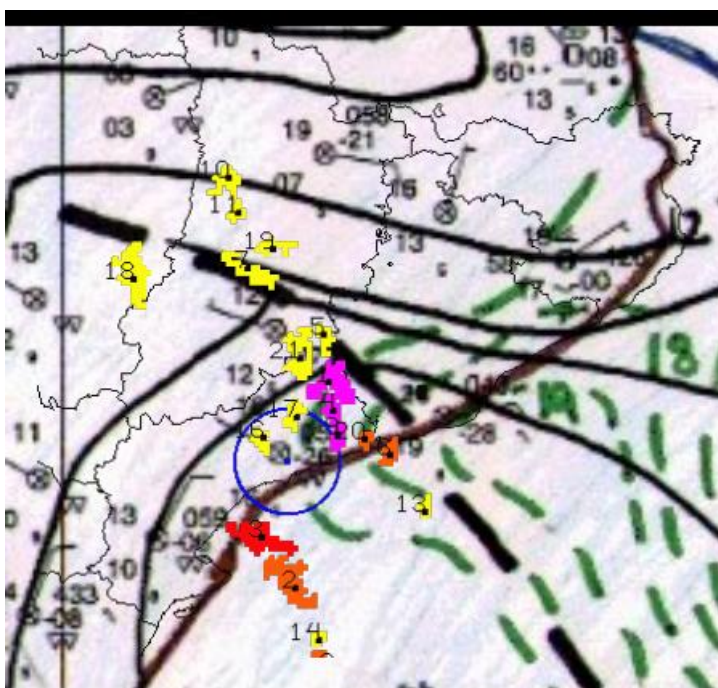


Figura 3.7. Análisis subjetivo del día 10 de junio de 2000 a las 00 UTC, en el que se han superpuesto las células convectivas identificadas por el radar, en colores amarillo, rosa, naranja y rojo (según el valor del VIL). Las isóbaras han sido trazadas de forma continua en color negro, las líneas de igual temperatura del punto de rocío en verde a trazos y, finalmente, la línea de convergencia está representada por una línea negra a trazos más gruesos.

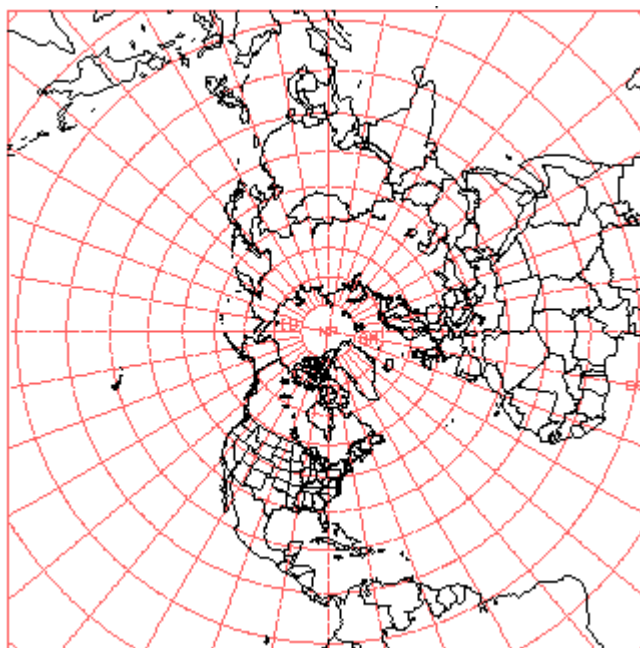


Figura 3.8. Área de integración del modelo FNL

Para realizar el reanálisis mesoescalar se ha procedido siguiendo las indicaciones impartidas por el Dr. Jansà, director del CMT en las Illes Balears del INM y una de las máximas autoridades a nivel internacional sobre todo lo que se refiere a meteorología mesoescalar. A continuación se resumen brevemente los pasos de la metodología seguida:

- En primer lugar, debe tenerse un *conocimiento previo del episodio* que se analiza (zonas más afectadas por las lluvias, viento...), por lo que es conveniente documentarse tanto con información instrumental (radar, pluviómetros, estaciones meteorológicas...) pero también con datos obtenidos de la prensa u otras fuentes (como aseguradoras).
- A continuación, resulta interesante *analizar las imágenes satelitarias*, fijándonos en la evolución de la situación general y buscando estructuras que puedan ser importantes en el desarrollo de los episodios (posibles líneas de convergencia, zonas de máximos de viento...). Para este trabajo se han analizado imágenes del satélite Meteosat (por su resolución temporal), aunque también del NOAA (por la resolución espacial).
- El siguiente paso ya se refiere al estudio de los datos a tratar. En primer lugar, debe realizarse un *control de calidad* para eliminar valores que resulten anómalos y que pueden producir errores en el futuro re-análisis. En concreto, es interesante fijarnos en datos de estaciones de montaña que no han sido corregidos, de barcos o plataformas marinas (que pueden proporcionar valores incorrectos). También deben ser vigilados valores que puedan considerarse muy diferentes a los que existen en las estaciones próximas. Además, puede resultar de gran utilidad el realzado de las zonas orográficas más importantes, que pueden afectar al trazado de las isolíneas y a los vientos más locales.

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

- El cuarto paso consiste en trazar, de forma no muy intensa (ya que al final del trabajo serán borradas), flechas que indican la *dirección del viento predominante* en cada zona. Esto nos puede dar una primera indicación para localizar estructuras secundarias.

- El *trazado de las isóbaras* resulta el paso clave del trabajo y, también, el más complejo. Debe tenerse en cuenta la orografía y la dirección de las flechas del viento (nunca deben provocar que el flujo obtenido a partir de las líneas sea totalmente opuesto al de las flechas, como mucho puede ser perpendicular) y, además, que exista suficiente espacio para incluir otras líneas, si es preciso. En general, se empezará trazando las líneas de 2 en 2 hPa (iniciando el proceso por un valor máximo o mínimo), aunque en zonas de interés especial se pueden trazar de 1 en 1 hPa. Además, las estructuras que se obtengan deben ser coherentes con las imágenes de satélite y con mapas previos y posteriores (a veces, un mapa que parece correctamente re-analizado debe ser modificado por completo al analizar toda la evolución del episodio).

- Dentro del trazado de isóbaras debe tenerse especial consideración con las *líneas de convergencia* (pueden ser marcadas junto con las flechas direccionales del viento) y en ellas el trazado debe considerar el sentido horario o anti-horario de las circulaciones anticiclónica o ciclónica, respectivamente. A veces, una cordillera importante puede ser tratada también como una línea de convergencia, teniendo muy en cuenta el concepto de dipolo orográfico.

- Una vez *identificadas las bajas y anticiclones*, deben ser marcadas según su tamaño. Así, una depresión de dimensiones importantes será etiquetada con una “B”, mientras que si es secundaria la marcaremos con una “b”. También es útil etiquetar con un número cada estructura, ya que facilitará seguir su evolución dentro del episodio.

- El último aspecto dentro del re-análisis mesoescalar de un único mapa consiste en la posibilidad de trazar *líneas de humedad y la nubosidad* de la imagen satelitaria (facilitando la corroboración de la coherencia). También es posible trazar la nubosidad previamente, aunque si se va observando la imagen del satélite el resultado ha de ser el mismo.

- Ya para acabar el estudio de un caso, debe considerarse toda la evolución de los mapas, corrigiendo aquellos aspectos que no sean consistentes.

Tras realizar el re-análisis completo del episodio es posible conocer mejor la evolución (o simplemente su aparición) de estructuras que pudieron jugar un papel muy relevante en el desarrollo del episodio pero que los modelos no pudieron identificar o no lo hicieron de forma correcta. Por lo tanto, el conocimiento de estas estructuras a partir de este tipo de re-análisis resulta muy importante, ya que la creación de modelos conceptuales puede ayudar a mejorar la modelización operativa y obtener mejores resultados en las predicciones futuras. Especialmente importante, como ya se anunció anteriormente, es la identificación de líneas de convergencia.

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

Por lo que se refiere a la mesoescala del tipo alfa y beta, se han pretendido verificar los siguientes aspectos:

- La influencia de los ciclones mesoescalares en los episodios de lluvias fuertes en Catalunya: tanto por ciento de ocurrencia, posiciones del centro de la estructura más habituales, valores de la presión en el mismo centro...
- La identificación de estructuras mesoescalares de menores dimensiones: pequeños ciclones (producidos por dipolo orográfico), vaguadas secundarias, líneas de convergencia...

Buscar aspectos de la mesoescala que permitan facilitar la predicción de episodios de lluvias fuertes en la zona central de Catalunya (cuena del Besòs), a partir de re-análisis, es decir, realizar un pequeño esquema conceptual del tipo de situaciones que pueden producir esas lluvias.

3.3. Datos meteorológicos de las estaciones de la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya (XAC)

La XAC (Xarxa Agrometeorològica de Catalunya o Red Agrometeorològica de Catalunya) es una red de estaciones automáticas que se conectan a través de teléfono para la transmisión de los datos. Sus principales funciones son, lógicamente, para el uso agronómico, en particular, se puede destacar la lucha para evitar enfermedades y plagas en los cultivos, prevención de heladas, o el ahorro en el uso de agua para riego. Las estaciones son Campbell Scientific, y son de tres tipos, dependiendo de la funcionalidad. Las variables básicas que se miden en todas las estaciones son:

- Velocidad y dirección del viento a 2 m de altura
- Temperatura y humedad relativa a 1,5 m de altura
- Radiación global a 2 m de altura
- Precipitación a 1 m de altura (pluviómetro de balancín)

En algunas también se determina:

- Radiación neta
- Temperatura de subsuelo a 5 y 50 cm de profundidad

Finalmente, las destinadas a uso forestal también contienen los sensores para medir:

- El contenido de agua en el suelo
- La humedad del combustible forestal

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

- La velocidad y la dirección del viento se mide a 6 m de altura

Los datos anteriores pueden ser consultados en la página web http://www.meteocat.com/marcs/marcos_observacio/marcs_dades.htm casi en tiempo real (última hora). Todos los datos que se muestran siempre son producto de realizar una media horaria a partir de los datos diez minutales para todas las variables, excepto la precipitación (acumulación horaria) y la dirección del viento (media vectorial de los valores instantáneos). Para realizar el estudio se han utilizado los datos correspondientes únicamente a los episodios de lluvias fuertes. Recientemente se ha modificado la altura de los sensores de viento en algunas estaciones, pero en los episodios analizados en esta tesis estaban vigentes los parámetros que se han indicado.

1. Cabanes	2. Sant Pere Pescador	3. Mas Badia	4. Malgrat de Mar
5. Cabrils	6. Torre Marimon	7. Viladecans	8. Mas Bové
9. Vinyols i els Arcs	10. Benissanet	11. Punta del Fangar	12. Amposta
13. Alcanar	14. els Valentins	15. la Granadella	16. el Poal
17. Vallfogona de Balaguer	19. Raïmat	20. Monte Julia	21. el Canós
22. Prades	23. Pinós	24. Monestir de les Avellanes	25. Perafita
26. el Montmell	27. Viladrau	28. Cassà de la Selva	29. Santa Coloma de Queralt
30. Riba-roja d'Ebre	31. Garraf	32. Montseny	33. Embassament de Sau
34. Mas Rabell	35. els Alfacs	36. Port de les Cases d'Alcanar	37. Bellvís
38. Alcarràs	39. Castellclaus	40. Tornabous	41. Alfarràs
42. Vilanova de Segrià	43. Miralcamp	44. Serós	45. Bordeta
46. Gimenezells	47. Castellnou de Bages	48. l'Aldea	49. l'Ametlla de Mar
50. Mas de Barberans	51. Aldover	52. Corredor	53. Monells
54. Aitona	55. Sant Llorenç Savall	56. Parc Tecnològic del Vallès	57. Ascó
58. Rellinars	59. Vilobí d'Onyar	60. Fornells de la Selva	61. Montesquiu
62. Gurb	63. Lladurs	64. Gisclareny	65. Lac Redon
66. Torroella de Montgrí	67. Serra de Daró	68. Albesa	69. Sant Pere de Ribes
70. Riudoms	71. la Granada	72. Blancafort	73. Batea
74. la Vall d'en Bas	76. Ventalló	77. Castelló d'Empúries	78. Torroella de Fluvià
79. Espolla	80. el Masroig	81. Oliana	82. Vilanova del Vallès

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

83. Golmés	84. Nulles	85. Algerri	86. Maials
87. Oliola	88. Vilablareix	89. Santuari de Queralt	90. Montserrat-Sant Jeroni
91. Sant Martí de Riucorb	92. la Bisbal del Penedès	93. Canaletes – Mediona	

Tabla 3.2. Poblaciones donde se ubican las estaciones de la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya

Los datos utilizados en el estudio son los que corresponden a la precipitación, temperatura, humedad y viento. Se han generado unos campos interpolados a partir de los datos de todas las estaciones, que se han superpuesto a las imágenes del radar meteorológico para poder analizar las consecuencias y el estado previo en superficie de la observación de estructuras convectivas. En la figura 3.10 puede verse un ejemplo del campo de vientos con las estructuras de precipitación identificadas con el radar para el episodio del 10 de Junio de 2000 que afectó a la zona central de Catalunya.

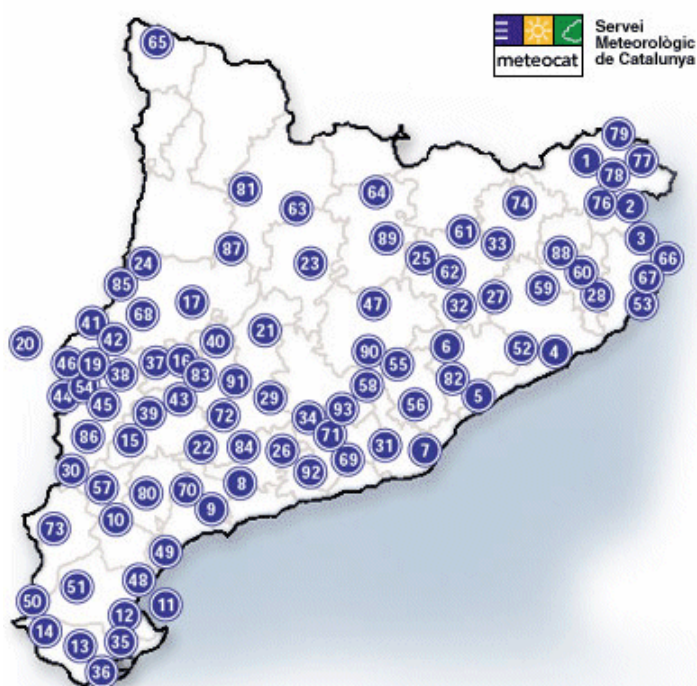


Figura 3.9. Mapa de las estaciones de la Xarxa Agrometeorològica de Catalunya (ver tabla 3.2)

Los diferentes parámetros disponibles en las estaciones meteorológicas de la XAC han permitido conocer un poco mejor la evolución en superficie de algunos de los episodios del período 1996-2000. Se han presentado anteriormente los mapas que se han desarrollado para seguir la evolución de las estructuras convectivas identificadas con el radar. Así, es posible

observar que efectos tiene en tierra el paso de un sistema convectivo de grandes dimensiones frente a estructuras de menores dimensiones y peor organizadas.

Los mapas de temperatura y humedad se han obtenido a partir del método de krigging, con un rango de 15 Km y una semilla de valor 0, a través de la programación en IDL. No se ha realizado ningún estudio geoestadístico, ya que únicamente se pretendía mostrar si con un simple método de cálculo se pueden obtener algunas características que se asocien a las estructuras convectivas observadas en superficie. Para obtener el campo de viento se ha realizado también una interpolación, pero en este caso a partir del método de la superficie de mínima curvatura (considerando una función logarítmica como parámetro básico en el coeficiente de segundo orden). En todos los casos, se ha obtenido un valor para cada uno de los puntos de una malla de $5 \times 5 \text{ Km}^2$ que se encuentran dentro de los límites de la región analizada.

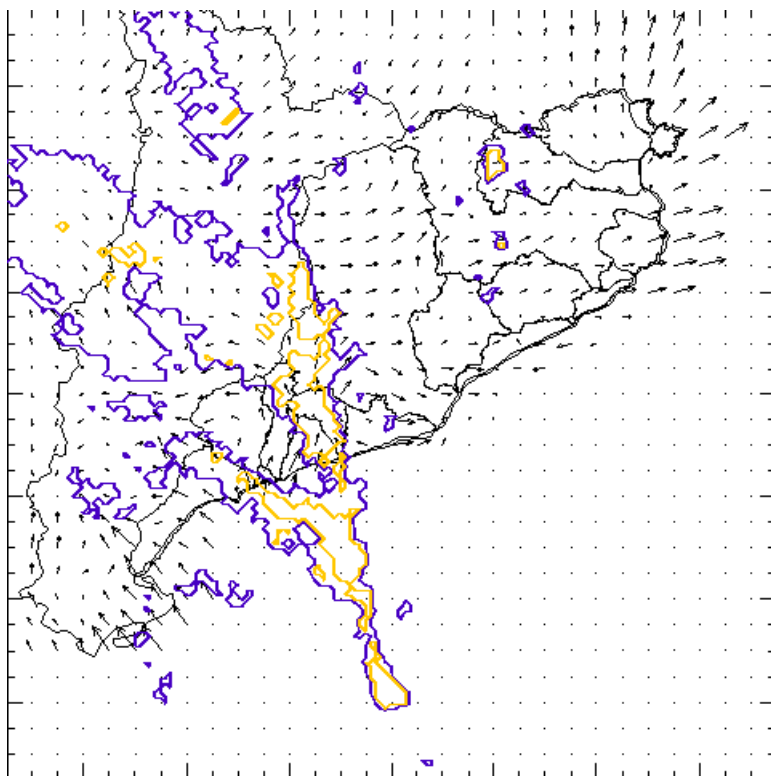


Figura 3.10. Ejemplo de un campo de vientos interpolados en superficie, con la imagen radar superpuesta (en color amarillo, las zonas de precipitación convectiva, en azul las de precipitación estratiforme). 10 de junio de 2000, a las 02 UTC

No se pretende competir con los trabajos realizados a partir de modelización, sino aportar otro punto de vista a partir de mapas obtenidos mediante interpolaciones no muy complejas pero que pueden facilitar la visión de los flujos entrantes y salientes dentro de las estructuras, el movimiento de éstas según las advecciones de humedad o las caídas de temperatura que se suponen al paso de un sistema convectivo mesoescalar. Los mapas

realizados son comparados con las imágenes de radar teniendo en cuenta que la disponibilidad de la información meteorológica es horaria (frente a la 10-minutal del radar), superponiendo las estructuras en el PPI más bajo y considerando la separación de la precipitación en convectiva y estratiforme. Por lo tanto, pueden ayudar a la verificación de los modelos conceptuales propuestos a partir de la modelización numérica.

Los objetivos básicos de esta parte del trabajo son:

- Seguimiento de la evolución de diferentes variables durante la ocurrencia de un episodio de lluvias fuertes en Catalunya, focalizándose el estudio en la búsqueda de fenómenos asociados a estructuras convectivas
- Intentar diferenciar los efectos en superficie producidos por una estructura convectiva de pequeñas dimensiones (célula convectiva aislada) frente a otra de gran tamaño (sistema convectivo mesoescalar).

3.4. Registros de precipitación de los pluviómetros de la red del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de las Cuencas Internas de Catalunya

Las Cuencas Internas de Catalunya pertenecen a aquel grupo de cuencas que transcurren totalmente por una única comunidad autónoma, que se conocen como cuencas intracomunitarias y que están gestionadas por una Administración Hidráulica autónoma. En este caso se trata de la Agència Catalana de l'Aigua, organismo que pertenece a la Generalitat de Catalunya.

Debido al elevado riesgo de inundaciones existente en la región mediterránea, las cuencas de esta zona disponen de redes de pluviómetros y sensores para determinar el nivel del río (o limnímetros), así como información relativa a los embalses. Estas redes se conocen como Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) y proporcionan un conocimiento de la situación hidrometeorológica e hidrológica de las cuencas en tiempo real. Además, si se utilizan modelos apropiados, es posible realizar predicciones de ciertas variables a corto plazo.

Las redes SAIH situadas en territorio español proporcionan datos en tiempo real, con pocos minutos de retraso, de niveles y caudales de ríos y canales, además de las reservas y salidas de los embalses, las precipitaciones, etc. En el caso de las CIC, la red cubre un área de 16000 km². La red pluviográfica del SAIH está constituida por 126 pluviómetros (ver tabla 3.3) de balancín con una precisión de volcado de 0.1 mm. La precipitación se acumula y registra cada 5 minutos. Mediante un convenio con la ACA, el GAMA (Grupo de Análisis de

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

situaciones Meteorológicas Adversas) recibe por vía Internet cada hora un archivo con los últimos datos del caudal y lluvia en todas las estaciones.

En la figura 3.11 se puede observar la posición de los pluviómetros, así como las subcuencas a las que pertenecen (con su denominación). En la 3.12 se puede apreciar un campo de precipitación correspondiente al episodio del 10 de junio de 2000 (21 UTC del día anterior hasta las 09 UTC de ese mismo día), realizado con los datos del SAIH, interpolados mediante el método de krigging y creado con IDL.

Ríos y afluentes	Estación de aforo		
Muga	Boadella	Avencó	Aiguafreda
	Castelló d'Empúries	Llobregat	La Pobla de Lillet
Fluvià	Olot		Guardiola de Berguedà
	Esponellà		Olvan
	Garrigàs		Sallent
Ser	Serinyà		el Pont de Vilomara
Ter	St. Joan de les Abadesses		Castellbell
	Ripoll		Martorell
	Roda de Ter	Gavarressa	Sant Joan Despí
	el Pasteral	Cardener	Artés
	Girona		La Coma i la Pedra
Llémena	Ginestà		Aigües Juntes
Onyar	Girona		Olius
Terri	Banyoles		Cardona
Ridaura	Santa Cristina d'Aro		Súria
Tordera	La Llavina	Aiguadora	Manresa
	Sant Celoni	Anoia	Navés
	Can Serra		Jorba
Arbúcies	Hostalric	Carme	Sant Sadurní d'Anoia
Santa Coloma	Fogars de Tordera	Mediona	La Pobla de Claramunt
Besòs	Sta. Coloma de Gramenet	Rubí	Sant Quintí de Mediona
Mogent	Montornès del Vallès	Foix	El Papiol
Tenes	Parets	Gaià	Castellet de Foix
Caldes	La Florida		Querol
Ripoll	Montcada	Brugent	Vilabella
Congost	La Garriga	Riera de Riudecanyes	Montblanc
		Siurana	La Riba
			Tarragona
			La Riba
			Duesaigües
			Cornudella de Montsant

Tabla 3.3. Poblaciones donde se ubican las estaciones de la red SAIH de la Agència Catalana de l'Aigua, incluyendo la cuenca en la que se encuentran.



Figura 3.11. Mapa con las estaciones de la red SAIH, incluyendo el nombre de la cuenca principal en la que se ubican. La zona marcada en color azul indica el área más afectada por las inundaciones durante el episodio de junio de 2000

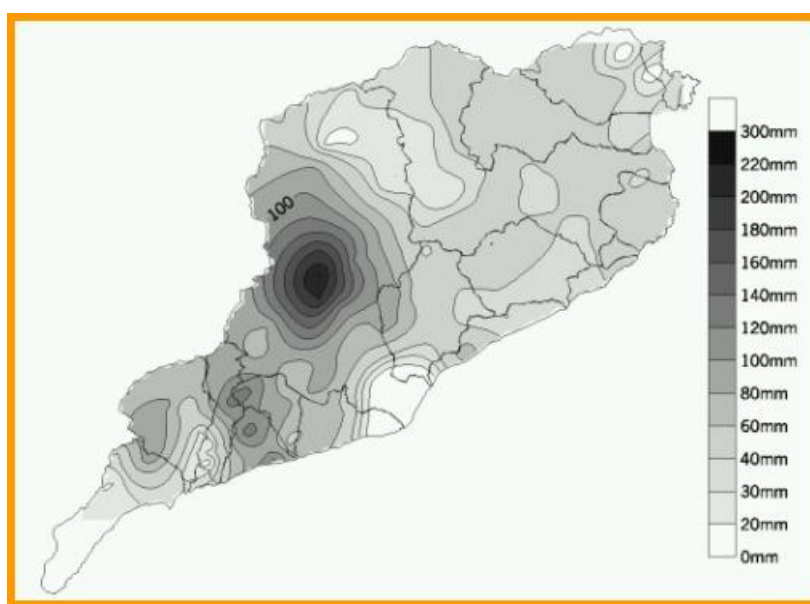


Figura 3.12. Mapa de precipitación acumulada durante el episodio de junio de 2000 a partir de los datos de la red SAIH (21 UTC del día 9 hasta las 09 UTC del día 10)

Como se comentó en la introducción, el presente estudio intenta analizar las situaciones meteorológicas de lluvias fuertes en Catalunya a partir especialmente del uso del radar meteorológico. Sin embargo, otras herramientas han sido utilizadas (como los radiosondeos o los mapas mesoescalares) para completar el trabajo, destacando especialmente la red de pluviómetros del SAIH de las CIC. La selección del período de estudio (1996-2000) no ha sido casual, por lo que se refiere especialmente a su fecha inicial, y se debe a dos motivos: el primero

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

es que a partir de ese año el radar empieza a tener una cierta fiabilidad (tanto en la continuidad de los datos como en su calibración) y, por otra parte, que se inicia el uso de los datos de la red del SAIH.

Precisamente, el uso de la red de pluviómetros del SAIH ha sido básico por diferentes cuestiones, entre las que destacan la selección de los episodios o su caracterización, a partir de ciertos factores tales como la precipitación acumulada, la extensión afectada (dentro de las CIC) o el grado de precipitación convectiva (mediante del parámetro β , descrito en capítulos previos y analizado en posteriores). Además, ha sido fundamental para conocer la relación entre umbrales termodinámicos o situaciones mesoescalares y las precipitaciones que afectan a la región.

Criterios de selección (umbrales escogidos) y área de estudio. En este apartado se presentan especialmente las definiciones de **episodio**, así como las características pluviométricas que deben verificar para ser considerados como tales.

Con el objetivo de poder facilitar el estudio mediante el radar meteorológico, se decidió seleccionar inicialmente sólo aquellos episodios que podían considerarse de lluvias fuertes. El motivo principal fue especialmente el del tamaño de los datos, ya que mientras un fichero anual de datos SAIH ocupa una media de 6 Mb, un volumen radar tiene un tamaño de 0.75 Mb (es decir, más del 10%), y cabe recordar que hay un volumen cada 10 minutos (por lo tanto, el conjunto de imágenes de medio día –12 horas- ocupa más de 13 Mb). En resumen, el volumen de datos que se deberían almacenar y manejar para realizar un criterio de selección de los episodios no era gestionable con la tecnología disponible y por este motivo se decidió buscar una alternativa más rápida y manejable. Entonces, una vez realizada la selección de episodios sería posible obtener los datos, gracias a la colaboración existente entre el grupo GAMA de la Universidad de Barcelona y el INM, dentro del proyecto CICYT REN20000-1755-C03-02/CLI.

El criterio para clasificar un episodio como de lluvias fuertes se ha basado exclusivamente en la información pluviométrica y no en la meteorológica. Esto implica que en un mismo episodio se han podido dar diferentes situaciones meteorológicas, las cuales no han podido ser separadas a priori, habida cuenta de como se ha definido al *episodio*. La definición en cuestión es la siguiente: “período temporal que comprende el tiempo transcurrido desde que se inicia la precipitación en algún punto de las CIC, hasta que deja de registrarse precipitación en todos los puntos de las CIC. Esto implica que un día puede empezar con el final de un episodio meteorológico que acaba con lluvias en un extremo de la región y, al finalizar ese mismo día empiece a llover en otro punto opuesto, debido a otro episodio diferente, como puede apreciarse en la figura 3.13. En ella se observan diferentes periodos 6 horarios en los cuales no se ha registrado ningún valor de precipitación en punto alguno de las CIC, pero el intervalo temporal sin precipitación es menor al umbral escogido (24 horas en este trabajo) por lo que se

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

considera todo como el mismo episodio. Este método busca la sencillez, aunque posteriormente ha sido mejorado, considerando que el intervalo sin precipitación en las CIC no debe superar las 6 horas, ajustándose mejor a las características meteorológicas. En este estudio no se considera la nueva definición.

Otro aspecto a tener en cuenta dentro de la clasificación de los episodios es el de la *duración*, ya que se ha considerado la siguiente definición: “la duración de un episodio de lluvias fuertes viene dada por el número de días en los cuales se produce algún tipo de precipitación, desde una fecha en la que se cumple uno de los umbrales propuestos para considerar al episodio como de lluvias fuertes”. Es decir, a partir de el primer día en que se supera uno de los umbrales que van a ser presentados a continuación, todos los días consecutivos en los que se acumule precipitación en algún punto de las CIC, pertenecerán al mismo episodio. Este hecho amplifica aún más la posibilidad de que dentro de un mismo episodio puedan intervenir diferentes situaciones meteorológicas. Cabe decir que la diferenciación de éstas implica una larga labor de análisis que impediría efectuar un estudio sistemático de todos los eventos generados en el periodo 1996-2000.

Un ejemplo muy claro se aprecia en la figura 3.14, en la cual se observa como desde el día 15 de agosto de 1998 a las 00 UTC hasta el día 17 a las 18 UTC las lluvias son poco importantes pero existentes, pero durante este último día los valores son más importantes y podrían pertenecer probablemente a otro episodio. Además, cabe considerar que antes de que se de un día que cumpla las condiciones de lluvias fuertes pueden darse otros días anteriores en los cuales se ha registrado precipitación. Sólo en el caso de que se cumpla la condición de la precipitación acumulada en todo el episodio (ver más adelante, en este mismo apartado) serán considerados como parte del episodio.

Estos motivos parecen indicar que la selección realizada no podría ser la más idónea. Sin embargo, hay varios motivos que pueden hacer cambiar esta decisión. En primer lugar, cabe recordar que el objetivo principal de esta selección es permitir conocer que fechas son las más óptimas para ser estudiadas a partir de los datos del radar meteorológico. Por lo tanto, después se puede decidir, con una simple ojeada a los gráficos de precipitación si es necesario realizar el descarte de algún período dentro de la primera selección. Además, no se perseguía buscar una selección perfecta sino que se pretendía realizar de la manera más óptima esta selección, ya que el volumen de información cabe recordar que es considerable (32.4 Mb, equivalentes a más de 1.390.000 líneas de información pluviométrica 5-minutal para el período 1996-2000). Otro punto a tener en cuenta es que el “exceso” de información favorece la comparación de otros datos (mesoescalares o termodinámicos) con los pluviométricos, ya que pueden identificarse características que pueden ser significativas para detectar los períodos en los cuales pueden registrarse lluvias importantes con otros muy parecidos pero que pueden no verificar alguna de las condiciones. Finalmente, para el estudio pluviométrico o meteorológico es perfectamente

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

factible subdividir los episodios inicialmente identificados, mientras que resulta mucho más complejo buscar una parte de un episodio que ha sido descartada inicialmente. Además, como se citó en el capítulo 2, un factor que favorece la aparición de inundaciones en un territorio es que el terreno en el cual se producen las lluvias fuertes se hayan registrado poco antes precipitaciones que provocan que el terreno esté saturado y no pueda absorber más agua.

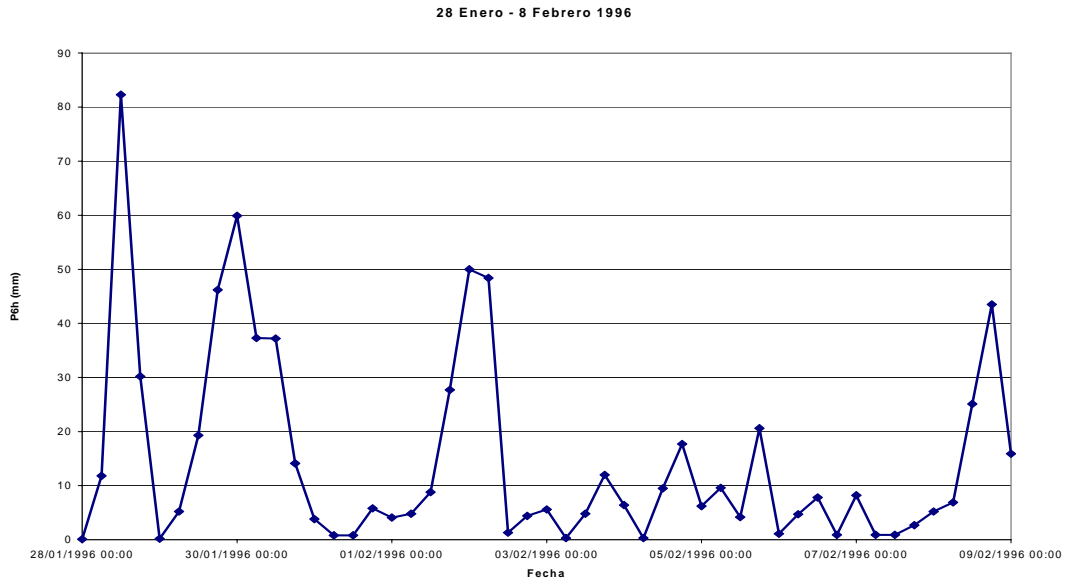


Figura 3.13. Precipitación máxima acumulada 6-horaria para el episodio del 28 de enero al 8 de febrero de 1996. Los valores hacen referencia a la estación que haya registrado el máximo en ese intervalo 6-h.

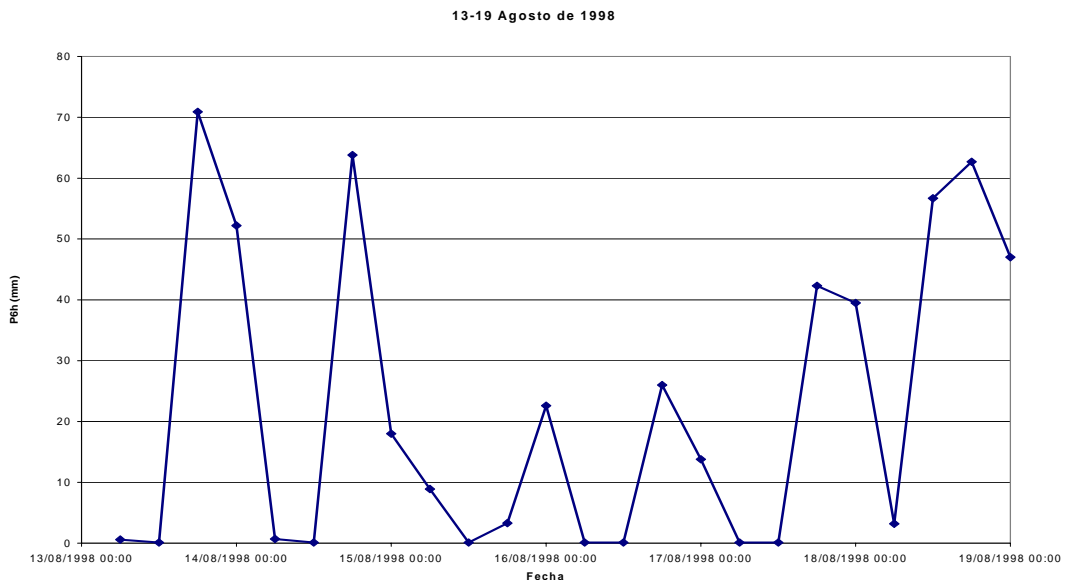


Figura 3.14. Precipitación acumulada 6-horaria para el episodio del 13 al 19 de agosto de 1998

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

Teniendo en cuenta las definiciones anteriores de episodio y duración, se ha considerado como *episodio de lluvias fuertes* a aquel período temporal que supera al menos uno de los siguientes umbrales de precipitación registrada:

- $P > 100$ mm en 24 horas en al menos un pluviómetro
- $P > 60$ mm en 24 horas en 5 o más pluviómetros
- $P > 35$ mm en 1 hora en uno o más pluviómetros
- $P > 200$ mm durante todo el episodio, en al menos un pluviómetro

La discusión sobre el período temporal ya ha sido tratada previamente en este mismo apartado. Cabe decir que los umbrales considerados han sido seleccionados por diferentes motivos. En primer lugar, se ha creído necesario realizar un pequeño control de calidad sobre los datos de los pluviómetros del SAIH. Cabe decir que los datos de estos pluviómetros apenas se someten a un análisis mínimo de validez por parte del ACA, basado en indicar con un parámetro de control que los valores obtenidos en un punto no son válidos debido a que se va a realizar, o se ha realizado, una operación de calibración o mantenimiento del aparato. Esta operación consiste en el lanzamiento de unos cuantos litros de agua dentro del pluviómetro, verificándose que los registros medidos son correctos. Este proceso es muy útil para el control de los datos para el tiempo real, que es la función primordial de esta red pluviométrica, pero puede llevar a ciertos errores cuando se intenta realizar un estudio histórico. Los errores se basarían, principalmente, en el hecho de que el lanzamiento de agua es equivalente a un chubasco de intensidades medias durante un período temporal muy corto. Si no se hubiera aplicado el control de calidad realizado en esta tesis (el cual considera que una precipitación que sólo afecta a un pluviómetro no debe ser considerada como tal), el número de episodios detectado hubiera sido muy superior, aunque una parte de ellos serían “falsos” eventos. La suposición sobre la necesidad de que la precipitación afecte a más de un pluviómetro debe ser considerada como correcta gracias a la elevada densidad de pluviómetros por kilómetro cuadrado, de unos 125 km^2 (Montes, 1997).

Por otra parte, se ha intentado que los umbrales fueran representativos de la región, por lo que se ha buscado una comparación con los propuestos por los centros meteorológicos para esta zona o sus proximidades, especialmente por lo que se refiere a los umbrales de alerta del INM y del SMC, además de otras publicaciones (p.e., el PENMOC del INM considera precipitaciones de 60 mm en 1 día). A continuación, se citan algunos de los umbrales propuestos por las diferentes instituciones meteorológicas.

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

LLUVIA ACUMULADA en mm		
Pirineo y Prepirineo 1 hora	Resto 1 hora	12 horas
45	30	80

Tabla 3.4. Umbrales de precipitación para la generación de avisos en el Instituto Nacional de Meteorología, para Catalunya

NIVEL 1	NIVEL 2
Intensidad > 20 mm / 30 minutos	Intensidad > 40 mm / 30 minutos
Acumulada > 100 mm /24 horas	Acumulada > 200 mm /24 horas

Tabla 3.5. Umbrales de precipitación para la generación de avisos en el Server Meteorològic de Catalunya

Además, se han tenido en cuenta las diferentes clases de episodios de lluvias fuertes vistos anteriormente:

- *Episodios breves pero muy intensos* (representados tanto por el segundo como el tercer umbral)
- *Episodios con acumulaciones importantes en períodos temporales del orden de aproximadamente un día* (que se identifican con el primer punto, aunque también es posible que se superen los otros tres umbrales)
- Finalmente, *episodios de larga duración* (más próximos al cuarto punto)

Datos utilizados para la selección y período de tiempo analizado. Como ya se ha citado en el apartado anterior, para realizar la selección de los episodios de lluvias fuertes se han utilizado los datos de la red de pluviómetros del SAIH de la ACA. Estos datos se reciben en ficheros horarios que contienen la información de caudal de todas las estaciones y la precipitación 5-minutal registrada, si se ha producido, en cada una de ellas. Los datos de precipitación tienen el siguiente formato:

161 161P01 P 02 07 2001 12 55 0 26 31,20

donde la primera columna es el código de la estación, la segunda es un parámetro que contiene nuevamente el código, el tipo de dato (P significa precipitación en forma de lluvia, N nieve y R caudal) y el tipo de estación, vuelve a repetirse el tipo de dato en la tercera columna, la fecha (DD MM AAAA HH mm), un parámetro de control en la novena columna (0 indica que es válido y 2 que se están realizando operaciones de calibración en la estación), en la siguiente columna el número de volcados del pluviómetro (se trata de pluviómetros de balancín)

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

y la intensidad de precipitación en mm/h. La precipitación 5-minutal puede obtenerse, de forma aproximada, dividiendo por 10 el número de volcados (cada uno equivale más o menos a 0.1 mm) o bien por 12 la intensidad de precipitación dada en mm/h.

Los datos de intensidad de precipitación para cada año han sido conjuntados en un único fichero en el cual sólo se han considerado aquellos valores que tenían el parámetro de control igual a cero y, además, no existía ningún valor igual a dos en la misma hora (ya que, en ciertas ocasiones, sólo se indica ese valor para un instante pero no para el resto de datos, pero que todos pertenecían al mismo proceso de calibración). El nuevo formato de los ficheros es el siguiente:

```
21 2451179.50347 1.2
```

donde la primera columna corresponde al código de la estación, la segunda a la fecha (expresada en código juliano, donde el valor cero corresponde al día 1 de enero de 4713 AC, a las 12:00, y cada día suma una unidad) y la última columna es la de la intensidad de precipitación 5 minutal. La agrupación de los datos ha facilitado su análisis, ya que únicamente deben estudiarse 5 ficheros.

El programa en IDL para discriminar los episodios de lluvias fuertes funciona de la siguiente manera:

1. *creación de una estructura* que contiene la precipitación, el código y la fecha para todo el período de los datos, es decir, 525.600 filas de tiempo (una para cada 5 minutos) y 126 columnas de los pluviómetros
2. *lectura* de la línea y *discriminación* de cada tipo de dato (columna)
3. a partir del código y la fecha, se coloca el *valor de intensidad* de precipitación en el punto que le corresponde
4. se *crean nuevas variables* (precipitación horaria, diaria y total del episodio) para cada estación y se calculan para cada instante
5. se *analizan los diferentes criterios* (citados previamente) y se busca si se verifica alguno de ellos

Los datos de la red de pluviómetros del SAIH, además de permitir la identificación de cada episodio, han sido utilizados para determinar diferentes tipos de valores del parámetro β , que se han analizado comparando con otros tipos de información.

3.5. Imágenes del radar meteorológico de Barcelona del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.)

Las imágenes cedidas por el INM dentro del marco del proyecto CICYT REN20000-1755-C03-02/CLI consisten en volúmenes que contienen el nivel PPI más bajo y, además, 12 niveles CAPPI (en coordenadas cartesianas) a las cuales únicamente se les ha aplicado una máscara de ecos de tierra (Martín León y de Esteban, 1994). No se ha realizado ninguna otra corrección por el único motivo que son los datos con los que se trabaja en el propio INM a la hora de aplicar sus algoritmos. Además, meteorológicamente hablando (no cuando hablamos en términos hidrológicos), la aplicación de los procesos de corrección de las imágenes puede ser nociva para la aplicación de los algoritmos, ya que es posible eliminar algún píxel importante que puede ser confundido, por ejemplo, con un eco de tierra. Por este motivo, los procesos para el estudio de estructuras meteorológicas (es decir, que afectan a toda la troposfera, a diferencia de las hidrológicas, más relacionadas con el estudio de las capas más bajas del radar, es decir, la precipitación) deben incorporar algún mecanismo que pueda servir como control de calidad para estructuras que prácticamente no cambian su posición durante mucho tiempo (en nuestro caso, podríamos hablar de los efectos de la Serra de Tramuntana –al N de Mallorca-, ya que no viene corregida por la máscara). Las imágenes analizadas sólo suelen contener un mapa de Catalunya superpuesto y, además, incluyen valores de reflectividad superiores a 18 dBz, ya que nos centraremos en el estudio de estructuras con una cierta identidad (por debajo de ese valor, los valores de intensidad de precipitación obtenidos para casi todo tipo de relación Z-R son muy bajos).

Una de las primeras herramientas utilizadas para el estudio de los episodios de lluvias fuertes ha sido desarrollada en IDL basándose en el STArPc del INM (Riosalido, 1994), aunque con mayor accesibilidad a los diferentes productos y con la posibilidad de analizar los episodios de manera continua, sin necesidad de ir cargando las imágenes manualmente. Este programa se utiliza simplemente para un primer análisis visual de las diferentes estructuras detectadas por el radar. Otra ventaja sobre el STArPc (ver ejemplo en figura 3.15) es que al operar con dos ventanas es posible visualizar la imagen inicial (generalmente, el PPI más bajo) con el producto a su derecha.

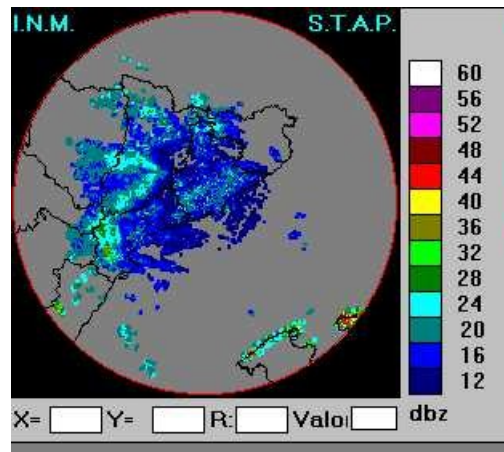


Figura 3.15. Ejemplo de la aplicación STArPc del INM

Además, a diferencia de algunos productos comerciales, el programa que genera esta herramienta es fácilmente modificable por el propio usuario. Cabe decir que tampoco pretende ser una competencia a productos como el IRIS o el entorno McIDAS, sino una simple ayuda para conocer mejor las estructuras que producen la precipitación, es decir, realizar un análisis meteorológico de un episodio concreto. Las figuras 3.16 a 3.20 son ejemplos de algunos de los productos generados (CAPPiS en niveles medios o altos, ECHOTOPs con umbral de 20 dBz y 40 dBz, secciones verticales del volumen, Zmax o perfiles verticales de reflectividad de un punto).

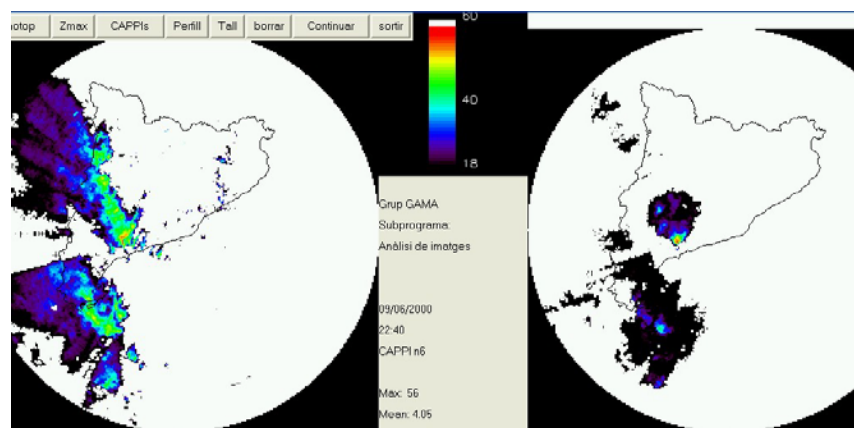


Figura 3.16. Ejemplo de la aplicación para la visualización de volúmenes radar desarrollada durante el presente trabajo. PPI en el nivel más bajo (izquierda) y a 7 Km (derecha)

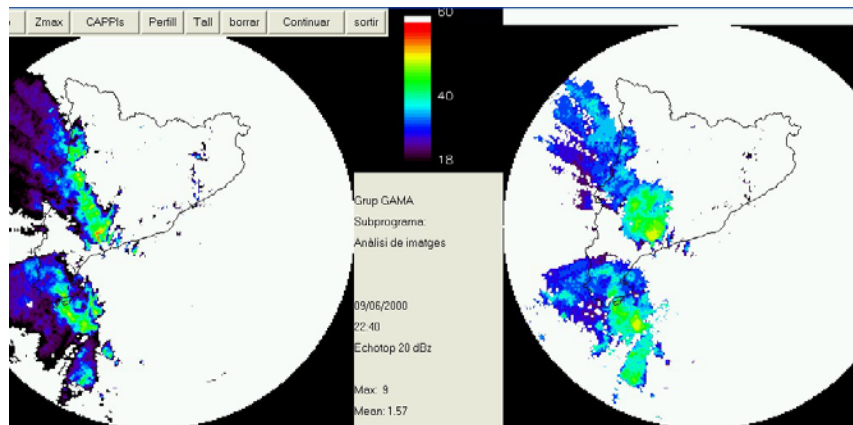


Figura 3.17. Idem que en la figura 3.16, con el Echotop-12 a la derecha

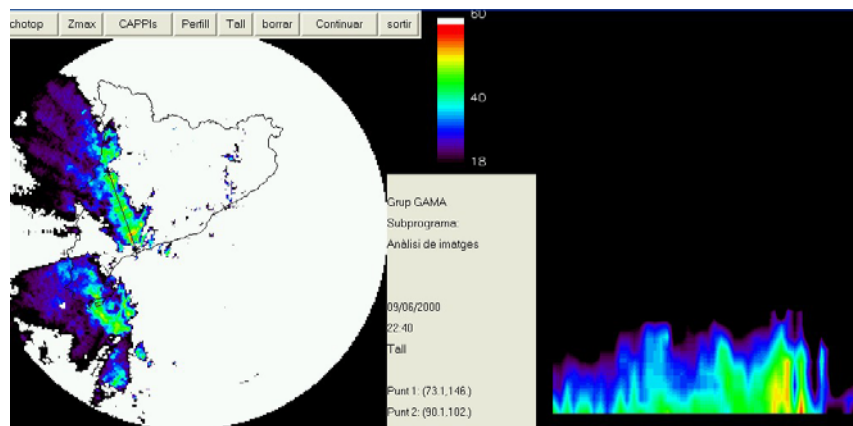


Figura 3.18. Idem que en la figura 3.16, con un corte vertical a la derecha

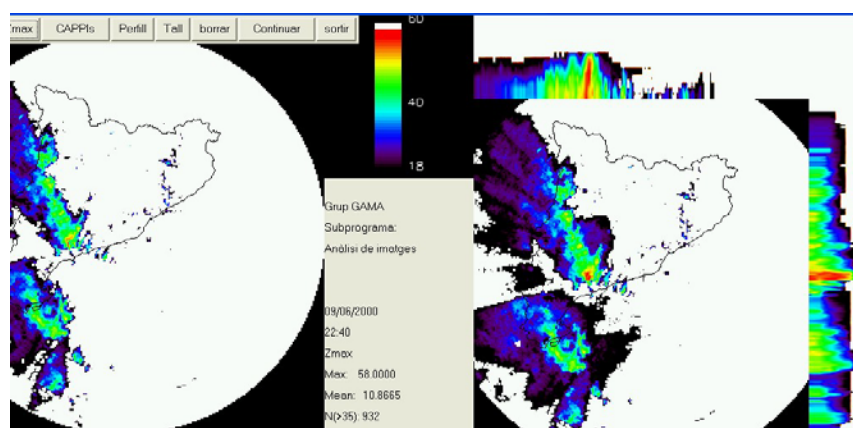


Figura 3.19. Idem que en la figura 3.16, con el ZMax a la derecha

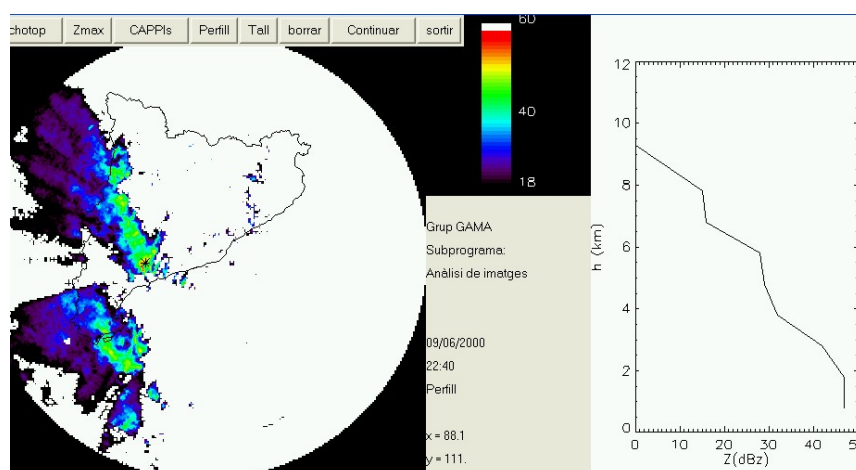


Figura 3.20. Idem que en la figura 3.16, con un perfil vertical a la derecha

Algoritmos aplicados en el presente estudio. En todas las partes del método se hace una diferencia entre la parte meteorológica (que, a partir de ahora, citaremos como 3D) y la hidrometeorológica (de ahora en adelante, referida como 2D). El procedimiento para identificar estructuras bidimensionales se basa en el algoritmo de Steiner *et al.* (1995), con algunas de las modificaciones realizadas por Listemaa y Biggerstaff (2000), pero con adaptaciones, ya que estos algoritmos fueron desarrollados para identificar tipos de precipitación en cualquier situación. En nuestro caso el aspecto fundamental es la identificación de precipitación convectiva, ya que estamos analizando situaciones de lluvias fuertes, y no se ha analizado el aspecto de la localización de la banda brillante, cuya identificación es habitual en los episodios estudiados (aunque no en la parte más convectiva de las estructuras). Se han descartado otros algoritmos como el de DeMott *et al.* (1995) o de Dinku *et al.* (2002), por diferentes motivos. En el primer caso, porque no se busca una conexión de la precipitación en superficie con los niveles superiores, a través de la búsqueda de partes de la célula que no se encuentran en el mismo nivel, sino la identificación del campo de precipitación en el nivel más bajo, independientemente (al menos, en la primera parte) de las estructuras 3D. Por lo que se refiere a la segunda metodología, se ha desestimado porque necesita de una gran resolución en la vertical, además de información satelitaria.

El proceso realizado para clasificar los píxeles es el de distinguir entre precipitación convectiva, de precipitación estratiforme y no precipitación. Los píxeles que no superan el umbral de 18 dBz se consideran como de no precipitación. Para identificar los puntos convectivos se aplican tres condiciones iniciales, de las cuales el píxel debe verificar al menos una de ellas. Las condiciones son las siguientes:

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

1. *Criterio de umbral*: todos aquellos píxeles que superen el umbral establecido serán considerados como convectivos. El estudio realizado por Sánchez-Diezma (2001) muestra como un umbral óptimo para la región es 43 dBz. Aplicando la relación Z/R de Marshall-Palmer el valor correspondiente de intensidad media de precipitación “10-minutal” es, aproximadamente, 17.8 mm/h (cabe recordar –Martín León y de Esteban (1994)- que la medida de la reflectividad no se corresponde, ni mucho menos, con toda la precipitación total del tiempo entre imágenes, ya que se trata de una medida puntual). Este valor está bastante por debajo del valor considerado para estudios realizados con pluviómetros en la misma región (35 mm/h, para intensidad 5-minutal, que corresponde a unos 47.8 dBz - ver capítulo 9). Sin embargo, probablemente el utilizado en el primer caso pueda ser un poco bajo y el segundo demasiado alto, pero lo importante es que ambos puedan ser considerados como representativos de este tipo de precipitación. Además, en el caso del radar, existen otras condiciones que podrán hacer “eliminar” un píxel etiquetado como convectivo. Finalmente, como último argumento para aceptar la validez de ese umbral, en Rigo y Llasat (2002, 2004) se demostró que el campo de precipitación convectiva más parecido entre el obtenido por el radar y el pluviómetro corresponde al que se encuentra entre los 40 y los 45 dBz.

2. *Criterio de gradiente*: en este caso se busca que el píxel verifique la existencia de un cierto gradiente entre él y los puntos de su alrededor (característica típica de la precipitación convectiva). Cabe decir que sólo aquellos píxeles que superan o igualan el valor de 30 dBz pueden ser analizados por este criterio. En este caso, la relación aplicada es la presentada en la ecuación 3.1 (Sánchez-Diezma, 2001), donde Z_{bg} es el valor promedio de la reflectividad de aquellos píxeles que rodean al punto analizado y que se encuentran a una distancia inferior a un valor determinado por el valor de la reflectividad del píxel en cuestión y que, además, superan el umbral de precipitación impuesto (18 dBz).

3. *Criterio de radio*: en este caso se aplica a aquellos píxeles que tienen un algún píxel identificado como convectivo en sus alrededores. El criterio del radio de búsqueda en la vecindad viene dado también en este caso por el valor de reflectividad. Además, también en este caso el píxel debe superar el valor de los 18 dBz. La distancia máxima impuesta para la búsqueda de píxeles convectivos en las proximidades es de 10 km.

$$Z - Z_{bg} > 8 \cos\left(\frac{\pi Z_{bg}}{128}\right)$$

Ecuación 3.1. Criterio del gradiente aplicado para la identificación de estructuras convectivas 2D.

Una vez identificado los píxeles convectivos, se determinan los estratiformes como aquellos que superan el umbral de precipitación pero que no se consideran convectivos.

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

Finalmente, se realiza un reajuste de píxeles convectivos a estratiformes y al revés, a partir de unos criterios parecidos a los utilizados por Biggerstaff y Listemaa (2000), pero que han sido adaptados a la región:

- Conversión de un píxel convectivo en estratiforme: cuando se verifica que el píxel analizado no supera los 35 dBz y, además, el gradiente horizontal es inferior a 3 dBz/km y el gradiente vertical es superior a 3.5 dBz/km. En el caso de que el valor de reflectividad del píxel en un nivel situado dos alturas por encima del nivel donde se registra el máximo de reflectividad en la vertical sea inferior a 28 dBz, basta que el gradiente horizontal sea inferior a 3 dBz/km.
- Conversión de un píxel estratiforme en convectivo: cuando el píxel analizado supera los 30 dBz y su gradiente horizontal es superior a los 3 dBz/km.

Se definen como gradientes horizontal y vertical de un píxel a aquellas variaciones de reflectividad en el plano o en la vertical, alrededor del píxel considerado. Este criterio se ha impuesto para poder tener en cuenta, al menos de manera mínima, la estructura vertical de la reflectividad.

Una vez identificados todos los píxeles se realiza un agrupamiento de aquellos considerados como vecinos que pertenecen a una misma clase: el algoritmo selecciona grupos de ecos del tipo convectivo (identificadas como “zonas de precipitación convectiva”) y aquellos que son de precipitación (identificadas como “zonas de precipitación”), sin importar el tipo. Esta identificación en dos partes es importante, ya que la primera nos servirá para realizar cálculos de precipitación utilizando relaciones Z/R diferentes según el tipo de precipitación, mientras que la segunda será utilizada para hacer el seguimiento de las estructuras y la predicción del movimiento futuro.

Para cada tipo de estructuras (convectivas y de precipitación) se imponen unos umbrales de área que debe verificar cada zona identificada para que pueda ser plenamente identificada como estructura válida. En el caso de las estructuras de precipitación convectiva el umbral mínimo requerido es de 4 píxeles (16 km²), mientras que para las estructuras de precipitación el umbral requerido es mayor, 8 píxeles (32 km²), ya que así pueden eliminarse algunas zonas de ecos anómalos, de dimensiones inferiores.

Una vez validadas las estructuras 2D, se pasa a su caracterización, a partir de unas ciertas variables que se presentan a continuación. La metodología es muy similar a la descrita en Riosalido (1994) para caracterizar la forma de las estructuras, a las que considera como elipses. Para los dos tipos, se definen la posición del centroide, el índice de la estructura (que viene dado por el área de la misma), el área, el eje máximo, las reflectividades máxima y media, la orientación, y la excentricidad. Además, para las estructuras convectivas se indica a que estructura de precipitación corresponde y, para las estructuras de precipitación se incluye el

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

número de estructuras convectivas contenidas y una etiqueta índice que servirá para realizar su seguimiento.

Como en el caso de los algoritmos para identificar tipos de precipitación a partir de los datos radar, para detectar células convectivas (o estructuras tridimensionales) existen metodologías muy diversas en la bibliografía (ver, por ejemplo, Collier, 1989). Sin embargo, parece que cada vez de manera más clara empiezan a imponerse los criterios en los que se utilizan técnicas de umbrales de reflectividad. Entre las más utilizadas están la utilizada por los productos TITAN (Wilson, 1993) y SCIT (Jonson *et al.*, 1998). El primero considera un único umbral de reflectividad, mientras que el segundo considera diferentes. Una diferencia clara entre el algoritmo original y la adaptación a nuestra herramienta es el hecho que se ha utilizado aquí coordenadas cartesianas, en lugar de polares, lo que simplifica bastante los cálculos.

Por otra parte, **el algoritmo 3D**, aplicado a las células convectivas, resulta una adaptación del método SCIT aplicándolo a partir de CAPPIs y en coordenadas cartesianas (en lugar de PPIs y coordenadas polares del modelo original), para facilitar la formulación de los algoritmos, pese a conocerse los errores producidos por la interpolación (Johnson *et al.*, 1998). Los motivos de la selección de este algoritmo se deben a que es el que representa mejor la filosofía de una célula convectiva. Además, al trabajar en un proyecto conjunto con el STAP del INM (donde ya se habían realizado estudios previos con este algoritmo), se ha creído conveniente continuar en la misma línea, aunque con algunos cambios, de forma que se pueda realizar su validación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que no es completamente aplicable el modelo “clásico” de célula convectiva, ya que resulta imposible caracterizar su ciclo de vida de la misma manera que la teoría. Además, los errores del radar, pese a no tener una relevancia tan especial, se encuentran presentes especialmente cuando existe apantallamiento del señal radar, bien sea por orografía bien por la propia convección.

Resumiendo brevemente, se considerará aquí como “célula convectiva” a una estructura 3D identificada en más de un nivel, pudiendo existir saltos entre dos niveles de la misma célula de cómo máximo un nivel intermedio donde la célula no ha sido detectada, con un área máxima en cada nivel superior a los 24 km², y que se reduce a aquel volumen que verifica las condiciones previas para un valor de reflectividad máximo. Estas condiciones provocan que existan aspectos favorables y otros más negativos:

- Las células en estado de disipación (solamente identificadas en el nivel más bajo) o aquellas en formación, que únicamente se detectan en un único nivel, no son consideradas.
- Algunas células, por las condiciones aplicadas, no son consideradas, ya que pueden no ser bien identificadas en varios niveles o no superar los umbrales

Capítulo 3: Datos utilizados y metodología

- Distingue de forma bastante aceptable dos células bastante próximas, incluso una encima de la otra
- Por las condiciones aplicadas, la extensión identificada podrá variar con el tiempo, aunque esas variaciones no sean tan precisas
- Es el método que identifica de manera más sencilla y de forma más ajustada las columnas verticales de reflectividad, asociadas a las células convectivas
- Solamente identifica aquellas células que son potencialmente peligrosas
- Puede “esquivar” de forma más óptima aquellos ecos anómalos que aún permanezcan en las imágenes.

Como en el caso de la parte hidrometeorológica, una vez identificadas las células, se pasa a caracterizarlas para poder conocer mejor su forma (excentricidad, orientación e inclinación), la intensidad de precipitación (valores máximos y medios de reflectividad), la posición (en el plano y altura del centroide, además de la altura de la base y la cima de la estructura, el echotop...) o el volumen, además de la probabilidad de granizo (a partir de los parámetros VIL y densidad de VIL). Esto permite clasificarlas según su grado de potencial peligro y facilita las técnicas de seguimiento y nowcasting.

Por lo que se refiere, al **tracking** y **nowcasting** de la **parte 2D**, es decir, la parte de estructuras de precipitación y precipitación convectiva en el nivel radar más bajo, el algoritmo de seguimiento se basa en un procedimiento mixto a partir de centroides (para estructuras pequeñas) y de correlaciones cruzadas (para las más grandes).

Una vez identificada la estructura, para realizar la predicción entre los próximos 10 y 60 minutos se han combinado diferentes vectores:

- El del viento en niveles medios (a partir de los perfiles de viento obtenidos del modelo meteorológico sobre el radar)
- El movimiento pasado de las estructuras, extrapolado hacia el futuro
- Finalmente, el *nowcasting* aplicado a las células 3D que han sido identificadas dentro de la estructura 2D (es decir, que su centroide cae dentro de la región de ecos de reflectividad).

A partir de diferentes relaciones Z/R (según la precipitación sea convectiva o estratiforme, a partir de las ecuaciones mostradas en la tabla 2.3) se obtiene el campo de precipitación aproximado para cada imagen. Entre los aspectos negativos de la parte 2D nos encontramos que los errores propios del radar hacen que se identifiquen un gran número de estructuras “falsas” (como pueden ser aquellas debidas especialmente a la propagación anómala o haces de radar con interferencias o anomalías). Sin embargo, se propone que la aplicación de una máscara que se puede diseñar a partir de los datos obtenidos pueda eliminar gran parte de

las estructuras falsas. Además, cabe decir que la mayoría de las estructuras de precipitación falsas tienen áreas poco importantes y además tienden a situarse en zonas más o menos definidas.

A partir del seguimiento de la bibliografía (Parker y Johnson, 2000, Schiesser et al., 1995, Doswell et al., 1996) ya existente y la aplicación de la metodología de identificación de estructuras convectivas se ha realizado una clasificación de estructuras convectivas, la cual va ser presentada a continuación. Cabe avanzar que dentro de la presente clasificación no se ha considerado a las supercélulas, ya que como se ha citado previamente, la característica básica de este tipo de organización convectiva es la identificación de un mesociclón mediante el modo Doppler del radar. Desafortunadamente, no ha sido posible disponer de estos datos para el análisis, por lo que se ha creído conveniente descartar este tipo de estructura convectiva, pese a que ciertos autores den algunos aspectos que pueden ser propios de las supercélulas a partir de los datos únicamente de reflectividad.

Las características que se han observado para realizar esta clasificación han sido el área total de la estructura 2D, la diferencia entre la parte convectiva y la estratiforme, la duración y, por lo que se refiere a los SCM, la posición de la parte estratiforme en referencia a la parte convectiva. Sin embargo, se debe constatar que existen muchas otras características que deberían ser analizadas, como la linealidad de las estructuras 3D, la zona donde se identifica la máxima actividad o la simetría respecto al eje del movimiento, o el tipo de desarrollo vertical observado. Además, y a excepción de si se observan dos SCM en la misma imagen, únicamente se ha seleccionado aquel tipo de estructura considerada más importante (a partir del orden presentado más adelante). Las clases de estructuras identificadas aquí son las siguientes (figura 3.21):

1. **Sistemas Convectivos Mesoescalares (SCM):** estructura de precipitación para la cual su eje mayor tiene una longitud igual o superior a los 100 Km durante 3 o más horas. Además, debe verificarse que, como mínimo, el 30% del área total en cada imagen puede asociarse a precipitación del tipo convectivo. Por otra parte, como se ha citado previamente, se ha clasificado a los SCM dependiendo de la posición de la región estratiforme en referencia a la zona convectiva, y, además, a partir de la organización de la parte convectiva. A partir de aquí, estas estructuras se pueden dividir en sistemas linealmente organizados y en clusters de estructuras convectivas (CLU). Asimismo, el primer tipo (lineales) pueden dividirse en TS (con la parte estratiforme en la zona trasera del SCM), LS (en la parte delantera), y NS (prácticamente sin precipitación estratiforme, o ésta se halla situada en un lateral del sistema). Un caso particular de esta última categoría serían aquellos SCM en los cuales existe una parte estratiforme moviéndose alineada con la estructura convectiva, en una u otra parte de la línea (y a los que algunos autores conocen como paralelos o PS, aunque aquí no se realizará esta distinción).

2. **Sistemas multicelulares (MUL):** son aquellas estructuras en la que la precipitación convectiva ocupa un área superior al 30% del total, pero que, al contrario de los SCM, no tienen una duración o un tamaño suficientes como para ser consideradas como tal.
3. **Convección embebida en precipitación estratiforme (EST-EMB):** se trata de una estructura de precipitación mayoritariamente estratiforme, con algunos núcleos de precipitación convectiva, habitualmente situados sin ninguna organización lineal y con desarrollos verticales poco importantes. El área ocupada por la zona de precipitación convectiva no puede superar el 30% del total de la región en la que se identifican ecos de precipitación.
4. **Convección aislada (IND):** cuando en una imagen se identifican estructuras mayoritariamente convectivas, de pequeño tamaño, independientes entre ellas y, además, diseminadas.
5. **Estratiformes (EST):** cuando la precipitación convectiva identificada tiene un área nula o que no supera el 3% del total de precipitación.

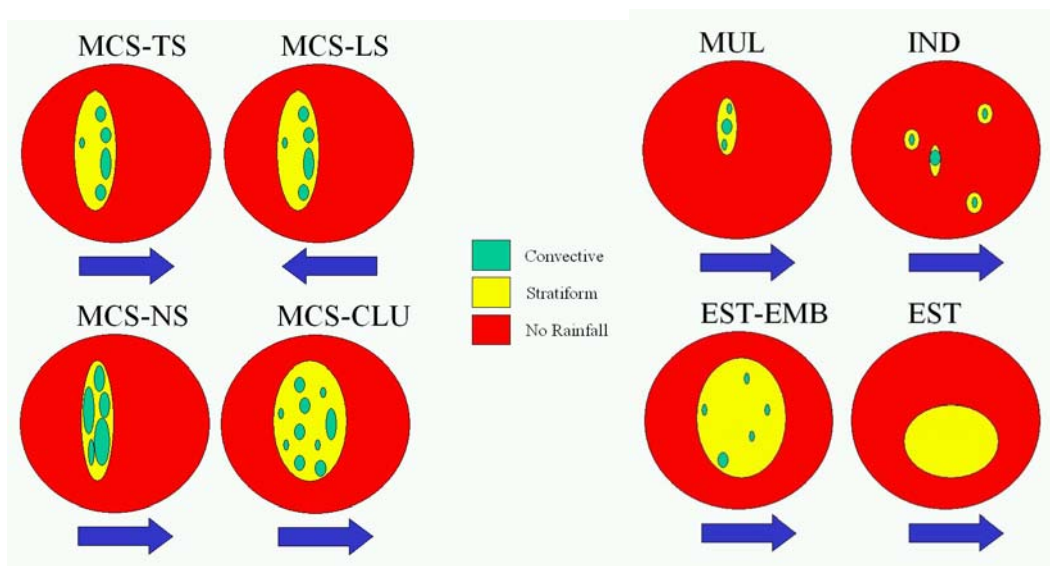


Figura 3.21. Diferentes tipos de estructuras de precipitación identificados a partir del CAPPI más bajo del volumen radar.