Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008

Módulo III: LOS RECURSOS HIDRICOS
(1ª PARTE)

METEOROLOGIA E HIDROLOGÍA

AUTOR: MARIA DEL CARMEN LLASAT BOTIJA

Índice

1. Introducción 3

1.1. METEOROLOGÍA, CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGÍA 3
1.2. VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES: DE LA ESCALA SINÓPTICA A LA MICROESCALA 3
1.3. DE LA PREDICCIÓN A LA DIAGNOSIS 4

2. Sistemas de percepción remota y observación de la atmósfera 5
2.1 PLATAFORMAS ESPACIALES DE ÓRBITA GEOESTACIONARIA Y DE ÓRBITA POLAR 5
2.2 SATÉLITES DE POSICIONAMIENTO Y OBSERVACIÓN DE LA ATMÓSFERA MEDIANTE GLOBOS SONDA 5
2.3 EL RADAR METEOROLÓGICO 7
2.4 REDES AUTOMÁTICAS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS 8

3 Estima de variables meteorológicas de interés hidrológico 8
3.1 ESTIMA DE LA PRECIPITACIÓN Y HUMEDAD 8
3.2 ESTIMA DE LAS DIVERSAS TEMPERATURAS 8

4. Aplicación a un caso concreto: las inundaciones del 10 de junio de 2000 11
4.1 INTRODUCCIÓN DEL CASO 11
4.2 EVOLUCIÓN PLUVIOMÉTRICA 13
4.3. ANÁLISIS METEOROLÓGICO 19
4.4 EL EPISODIO DE INUNDACIONES DEL 10 DE JUNIO DEL 2000 BAJO LA PERSPECTIVA DE LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS PREVIAS 25
4.5 CONCLUSIONES 27
4.6 REFERENCIAS CITADAS 29

5. Referencias y bibliografía 30

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

1. Introducción

1.1 METEOROLOGÍA, CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGÍA

Dado que el objetivo de esta introducción es aclarar algunos conceptos que van a ser necesarios para el desarrollo del temario siguiente, lo mejor es comenzar diferenciando lo que es la meteorología de lo que es la climatología, y que puntos en común presentan con la hidrología. En primer lugar cabe decir que la meteorología es la parte de la física que trata de la atmósfera y de los meteoros, en tanto que la climatología es el estudio de los climas, es decir, del conjunto de las condiciones atmosféricas propias de una región. Es por ello que, tradicionalmente la primera ha sido desarrollada por físicos y la segunda por geógrafos. Sin embargo, los avances actuales y la necesidad de comprender los mecanismos que rigen el clima, ha llevado a una fuerte colaboración entre ambos tipos de especialistas.

El principal agente causante de los cambios atmosféricos, y, por ende, del clima, es el agua en sus diferentes fases, de ahí que la hidrología esté enlazada troncalmente con la meteorología y la climatología. Desde el estudio de la microfísica de las nubes, hasta la previsión meteorológica, pasando por los balances energéticos, la turbulencia o los grandes sistemas convectivos de mesoescala, todo tiene en cuenta, en algún momento determinado, el factor agua. De la misma forma, el estudio de los procesos hidrológicos de las aguas superficiales, marítimas o subterráneas, debe tener en cuenta la física de la precipitación y evaporación así como las condiciones climáticas que permiten una mejor gestión tanto a corto como a largo plazo. Así cabe destacar, la previsión, predicción y actuación frente a las inundaciones, la evaporación en lagos y embalses, las necesidades hídricas de los cultivos y el riego, los procesos de sequía y desertificación, las reservas hídricas, incluidas las debidas al manto nival, la erosión debida a la lluvia o las oscilaciones climáticas y su impacto sobre lluvias extremas o recursos hídricos.

1.2 VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES: DE LA ESCALA SINÓPTICA A LA MICROESCALA

Las escalas meteorológicas son referencias expresadas en longitud y en tiempo que permiten clasificar los fenómenos meteorológicos según sus dimensiones espaciales y temporales. Se suelen englobar en tres escalas:

- *Escala sinóptica o macroescala:* considera fenómenos que pueden durar entre algunos días y varios meses y tienen una longitud media aproximada comprendida entre 2000 y 10000 km. En esta escala se incluyen la mayor parte de anticiclones, ondas frontales y depresiones y es usualmente la escala en la que se realizan las predicciones meteorológicas.
- *Mesoescala:* considera fenómenos que pueden durar entre horas y días y abarcan de 2 a 2000 km. Se incluyen aquí algunos frentes y depresiones, así como las grandes tormentas. Es muy importante para lugares de orografía accidentada como es el caso particular de la Península Ibérica y la cuenca mediterránea occidental.
- *Microescala:* considera fenómenos que pueden durar entre algunos minutos y horas, con

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

una longitud media inferior a 2 km. Se utiliza esencialmente en el caso de difusión de contaminantes, lluvias en zonas reducidas, tormentas locales y turbulencia.

En climatología es usual denominar "macroclimas" o "climas zonales" a aquellos climas referidos a grandes áreas geográficas y por tanto en la escala sinóptica. Dentro de esta aceptación estarían los climas intertropicales o tropicales. La mesoescala y, en particular, la meso-α y la meso-β, se corresponderían con los mesoclimas o climas regionales, tales como los que caracterizan las diferentes cuencas hidrográficas. La correspondencia no es estrictamente biunívoca, ya que aunque en climatología se aceptan como mesoclimas, climas tales como el "clima mediterráneo", "clima de España" o "clima de Brasil", entrarían en las dimensiones de la escala sinóptica en meteorología. Los "climas locales" son válidos para una extensión de unos 100 a 10000 m en la horizontal y unos 100 en la vertical (estaríamos en la meso-γ meteorológica), y corresponderían a ciudades, valles o bosques. La equivalencia en la microescala se establece a través de los llamados "microclimas", referidos a la capa de aire más próxima a la tierra en sectores muy bien delimitados y pequeños tales como una calle, un cultivo, un invernadero o una cueva.

1.3 DE LA PREDICCIÓN A LA DIAGNOSIS

Erróneamente a veces se cree que todos aquellos que estudian la atmósfera se dedican a la predicción del tiempo, y así, la imagen de meteorólogo, hombre del tiempo y un tanto de adivino se confunden. Sin entrar en el tema de comunicación de masas, es importante distinguir aquí entre la predicción y la diagnosis. Un repaso breve al proceso que se sigue en la elaboración de un pronóstico meteorológico puede aclarar las ideas. En primer lugar se recogen datos de la atmósfera mediante la utilización de radiosondas, en todo el mundo, y, particularmente, en nuestro caso, en el Hemisferio Norte. Se dispone así de datos de presión, temperatura, humedad y viento para diferentes niveles de la atmósfera, aproximadamente a la misma hora (00:00 TMG y 12:00 TMG) y en puntos dispersos. Utilizando los modelos adecuados se elabora una malla a fin de disponer de una distribución homogénea de semejante información. Se está en condiciones entonces de construir los mapas de análisis meteorológico. Sobre tales datos se corren los modelos de previsión, usualmente modelos físicos, a fin de obtener los datos de presión, temperatura, humedad y viento en el tiempo $t+\Delta t$, donde Δt puede ser 6, 12, 24, 48, 72 horas o más, si bien la fiabilidad disminuye considerablemente a partir de este último intervalo. Paralelamente se obtiene información derivada, como puede ser el campo de precipitación, la vorticidad u otras variables meteorológicas. Basándose en tales previsiones se confeccionan los mapas de previsión meteorológica. Este proceso, unido a la interpretación de los resultados, constituye la parte operativa, que es desarrollada usualmente por los servicios de meteorología.

En ocasiones en que la situación meteorológica ha sido de interés especial, es usual realizar una diagnosis postmortem. Esto sucede con los casos de lluvias extraordinarias, por ejemplo, en que se recuperan todos los análisis meteorológicos realizados durante el episodio y se re-analizan, tanto a escala sinóptica como en mesoescala, a fin de buscar cuales fueron los factores responsables del desenlace de tales lluvias. El objetivo es aumentar el conocimiento para luego mejorar la predicción y la previsión. La diagnosis suele ser realizada en centros de investigación o en unidades especializadas de los servicios meteorológicos.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

2. Sistemas de percepción remota y observación de la atmósfera

2.1 PLATAFORMAS ESPACIALES DE ÓRBITA GEOESTACIONARIA Y DE ÓRBITA POLAR

Los sistemas que se presentan seguidamente se basan en la teledetección, es decir, en la obtención de información de un objeto a distancia. Ésta se basa en cuatro principios básicos: 1) no hay contacto material entre objeto y observador, 2) se utilizan sensores ubicados en plataformas de observación, 3) se trabaja en zonas del espectro electromagnético, 4) hay transformación de datos a información útil. La teledetección se basa en el principio físico de la existencia de una perturbación que el sistema observado produce en el medio, y ésta se transmite al sistema receptor para ser registrada, almacenada y, posteriormente, interpretada.

Si bien las técnicas de teledetección se pueden aplicar desde distintas plataformas de observación (suelo, globos, aviones, cohetes y satélites), en el caso de la observación de la atmósfera, los más utilizados son los satélites. Según sus características orbitales se pueden distinguir entre:

- Heliosíncronos: órbita casi polar, paso aproximado a la misma hora periódicamente, altitud aproximada de 1000 km y periodo de revolución inferior a 2 horas. Es el caso de los satélites LANDSAT, SPOT, NOAA o TIROS. Dada su mayor resolución espacial, se suelen utilizar para la evaluación de recursos naturales.
- Geosíncronos: también llamados geoestacionarios, se mantienen encima de un punto de la superficie, acompañan a la Tierra en su movimiento, altitud aproximada de 36000 km. Es el caso de los satélites GOES, METEOSAT O INSAT. Aunque su resolución espacial es mucho más pequeña presentan la ventaja de dar información continuada, por lo que pueden ser utilizados para el pronóstico y seguimiento del tiempo atmosférico. Esencialmente permiten detectar la cobertura nubosa y el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Convenientemente tratadas las imágenes primarias permiten disponer de la temperatura en la cima de las nubes, pudiendo evaluar así su desarrollo vertical.

2.2 SATÉLITES DE POSICIONAMIENTO Y OBSERVACIÓN DE LA ATMÓSFERA MEDIANTE GLOBOS SONDA

Los primeros intentos encaminados a medir las condiciones atmosféricas existentes lejos de la superficie de la tierra, datan de mediados del siglo XVIII. Desde entonces las medidas de las condiciones atmosféricas en altura se han intentado determinar usando cometas, globos tripulados, globos sonda de papel barnizado, balones de goma, aviones y, a partir de la Segunda Guerra Mundial, radiosondas, es decir, globos sonda equipados de un equipo de radio-transmisión para el envío de los datos de presión, temperatura y humedad, en tanto que la velocidad y dirección del viento se determinan a través del seguimiento del radiosonda por radar. En la actualidad, además de los correspondientes adelantos técnicos en la instrumentación, se está implantando el uso de la tecnología GPS de posicionamiento por satélite, con lo que se ha conseguido una notable mejora en las medidas de la velocidad y dirección del viento.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Los radiosondas producen observaciones de presión, temperatura y humedad con gran resolución vertical. Sin embargo, los errores en la temperatura aumentan considerablemente en la alta troposfera, con errores de 1ºC por encima de los 250 hPa, creciendo hasta los 4º a 10 hPa. y en la estratosfera. Otro inconveniente importante es la pobre cobertura espacial (océanos, regiones desérticas, países subdesarrollados, etc.) y temporal (usualmente se realizan 2 sondeos diarios). Aún así, el radiosonda sigue siendo el mejor instrumento para la observación de la atmósfera en altura, como puede observarse en la Tabla 1, en la que se muestran, de forma comparativa, los *errores* cometidos en las observaciones de la temperatura para distintas altitudes y distintos sistemas utilizados:

Sistema de Observación	**1000 hPa**	**700 hPa**	**500 hPa**	**300 hPa**	**100 hPa**	**50 hPa**
Radiosonda	1.8	1.3	1.3	2.0	3.1	4.0
Vuelos comerciales	2.7	2.7	2.9	3.4	4.6	4.6
Satélite cielo despejado	4.7	3.9	4.0	4.5	4.0	4.0
Satélite cielo cubierto	5.6	4.6	4.6	5.0	4.5	4.5

Tabla 1: Error en la desviación estándar de la temperatura usados en una interpolación espectral estadística para el Global Spectral Model de NCP (Ware et al., 1996)

. El futuro apunta por el uso de:

- una nueva generación de satélites TIROS, denominados METOP (Meteorological Operational Polar Satellite), con los que se espera obtener unos mejores perfiles de temperatura y humedad que los obtenidos en la actualidad con los TIROS. Se espera estén operativos a partir del 2002.

- satélites GPS/Meteorológicos, con los que ya se están obteniendo las primeras medidas de los perfiles de vapor de agua en la atmósfera, así como de temperatura. No obstante, son ahora sus inicios, y por el momento, estas medidas son muy aproximadas y siguen siendo objeto de estudio y discusión.

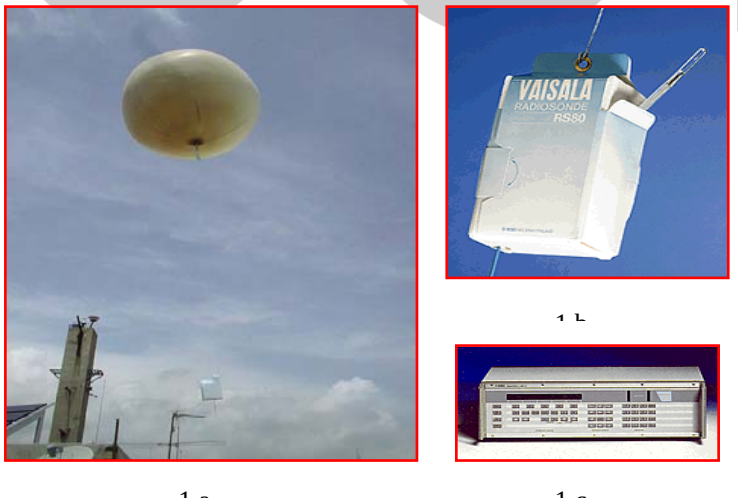


Figura 1:(a) Globo y radiosonda poco después del lanzamiento (b) radiosonda y (c) receptor y decodificador de los datos del radiosonda.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

El Sistema de Posicionamiento GPS fue desarrollado por el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos con finalidades eminentemente militares. Más tarde este sistema se hizo accesible a todo tipo de usuario, pero no hay que olvidar el fin principal de su aparición, razón por al cual el DoD tiene el control y puede degradar la precisión del sistema hasta los 100 m en distancia para los usuarios civiles en general. El principio de navegación se basa en la medida de la distancia relativa entre el receptor y como mínimo 4 satélites visibles, de los cuales son conocidas sus coordenadas. Esta distancia se obtiene calculando el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor. A partir de las distancias relativas se pueden estimar las coordenadas (x,y,z) del receptor, así como el error del reloj de la estación respecto a la escala de tiempos GPS.

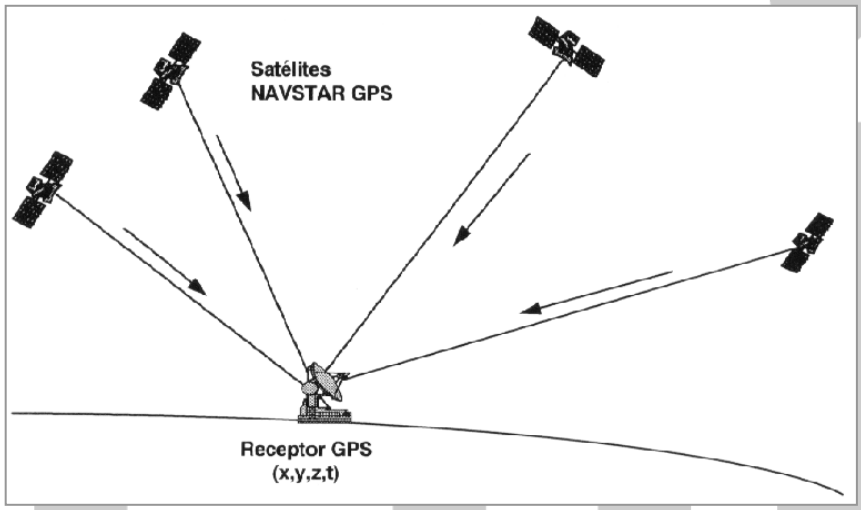


Fig. 1: Cuatro satélites visibles para determinar cuatro incógnitas (x,y,z,t)

2.3 EL RADAR METEOROLÓGICO

Los primeros avances en el radar meteorológico se produjeron durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se empezaron a observar ecos 'inesperados' en los radares desarrollados para la detección de aviones, que procedían de la lluvia, del mar o de la orografía. Posteriormente se desarrollaron los primeros radares específicamente creados para la observación de la lluvia. Su funcionamiento básico sería el siguiente:

- El radar crea una onda electromagnética que se concentra en una antena y que posteriormente emite a la atmósfera en forma de haz.
- Los blancos que son interceptados por el pulso electromagnético (usualmente microondas) difunden la energía recibida en todas direcciones, y una pequeña porción vuelve en dirección al radar y es captada por un receptor.

Los radares meteorológicos pueden ser de banda L (1-2 GHz), banda S (2-4 GHz), banda C (4-8 GHz) o banda X (8-12 GHz). El muestreo se puede realizar según la proyección sobre un plano horizontal de la reflectividad recogida por el radar correspondiente a una elevación determinada (PPI), o según la proyección sobre un plano horizontal de las porciones de in-

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

formación recogidas que se encuentran más cerca del plano (CAPPI). El radar Doppler permite además obtener la medida de la velocidad del viento. Las aplicaciones meteorológicas más importantes del radar son: consulta en tiempo real y animación de los productos radar, previsión a corto y medio plazo, análisis tridimensional de la evolución de tormentas, huracanes y tornados y estudios de los diversos tipos de precipitación. Aunque las imágenes radar son muy vistosas y parecen dar mucha información hay que tener en cuenta las posibles fuentes de error en la medida radar: errores en la calibración electrónica, ecos de suelo, intercepción parcial del haz, atenuación, banda brillante, errores con la distancia al radar, errores en el muestreo temporal, errores en la relación Z-R (reflectividad-intensidad de lluvia) y llenado parcial del haz.

2.4 REDES AUTOMÁTICAS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Aunque la mayor parte de estaciones meteorológicas en superficie son manuales, en los últimos años se ha extendido el uso de estaciones meteorológicas automáticas. La principal característica que distingue una estación meteorológica automática de una convencional es la toma de medidas, procesado primario y almacenamiento de datos y envío, todo ello realizado de una forma automática. Presentan pues la ventaja de poder efectuar medidas en el intervalo deseado, disponer de ellas en tiempo real si se desea y procesarlas fácilmente, así como de liberar la estación de la presencia permanente de un observador. La desventaja es que exigen un mayor mantenimiento, tanto de la parte relativa a los sensores, como a la electrónica o a la red de comunicación. Asimismo no permiten efectuar medidas de carácter subjetivo como pueden ser la visibilidad o el tipo de nubes.

Este tipo de estaciones comprende desde las puramente pluviométricas, como serían las incluídas en los proyectos SAIH, hasta estaciones completas, con medidas de la presión, dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación, radiación solar y radiación neta. Los datos facilitados por este tipo de redes se utilizan esencialmente para la previsión y seguimiento de avenidas, aplicaciones agrometeorológicas que incluyen desde el calendario de riegos hasta la predicción de heladas, o previsión de incendios forestales. Asimismo, en el análisis y previsión meteorológica se les da los mismos fines que las estaciones convencionales (aunque en tal caso solamente se utiliza la información de algunas horas concretas).

3 Estima de variables meteorológicas de interés hidrológico

3.1 ESTIMA DE LA PRECIPITACIÓN Y HUMEDAD

Existen numerosas variables meteorológicas que son utilizadas para estudios de tipo hidrológico. Las más usuales son la precipitación, la humedad y temperatura, y la radiación neta. La precipitación puede ser acumulada (se expresa en l/m^2 o mm) o bien referirse a un periodo de tiempo, en cuyo caso hablamos de intensidad de precipitación (usualmente se expresa en mm/h). La humedad se puede estimar de numerosas maneras pero los índices de humedad más usuales son los siguientes:

- Humedad absoluta: es la densidad del vapor en la mezcla, es decir, la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire. Se expresa en g/m^3. Se utiliza muy poco ya

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

que no se mide directamente, ni tampoco informa de la proximidad o lejanía de la saturación.

$$a = \frac{m_v}{V}$$

- Humedad específica: es la proporción de vapor respecto del aire. Es una cantidad adimensional, ya que es cociente entre masas, pero dado que la cantidad de vapor es muy pequeña, acostumbra a darse en g/kg.

$$q = \frac{m_v}{m} = \frac{m_v}{m_d + m_v}$$

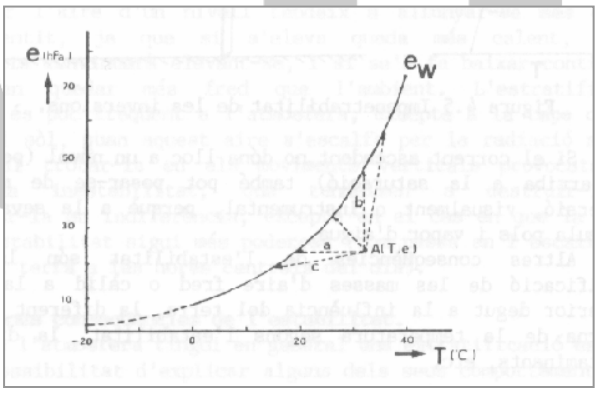
donde $m = m_d + m_v$, índica una parte de la masa del aire que no contiene vapor de agua, *aire seco*, m_d, más la masa de vapor de agua, m_v.

- Proporción de mezcla: es la proporción de vapor respecto a la mezcla de aire seco (todo menos el vapor de agua). También se da en g/kg.

$$r = \frac{m_v}{m_d}, \quad \text{y dado que } m_v << m_d, \quad \text{se tiene que: } r \approx q$$

- Presión parcial de vapor de agua: es la parte de la presión atmosférica total ejercida por el vapor de agua. Se expresa en unidades de presión (hPa). Tiene un valor máximo llamado *presión de vapor saturante* (e_w o E), que es el máximo valor que puede alcanzar sin cambiar de estado; puede superarse momentáneamente, pero entonces cambia a líquido (ver figura adjunta).

E = 6.108 exp(17.27t/(t+237.3) hPa t en ºC



- Humedad relativa: es el cociente entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de saturación del vapor de agua, para la misma temperatura y presión atmosférica. Se expresa en porcentaje. Otra forma equivalente de definir la humedad relativa es la siguiente: es el cociente entre la masa de vapor contenida por unidad de volumen de aire y la masa de vapor que saturaría dicho volumen. Es la medida de humedad del aire más empleada, ya que es muy útil al informar de la proximidad de la saturación. .

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

$$U = 100\frac{e}{E}\ (\%)$$

3.2 ESTIMA DE LAS DIVERSAS TEMPERATURAS

En muchas ocasiones interesa conocer algunas variables que incluyan humedad y temperatura, ya que a partir de ellas se puede analizar la inestabilidad del aire, la posibilidad de que se desarrollen nubes, o aplicaciones tan diversas como la generación de nieve artificial. Las más usuales son la temperatura del punto de rocío y la temperatura del termómetro húmedo.

- Temperatura del punto de rocío: es la temperatura a la que debería de llegar el aire manteniendo la presión constante, para que su humedad fuera saturante, es decir, para que el mismo vapor de agua que contiene lo sature. Para una misma presión, cuanto más húmedo sea el aire, más pequeña sea la diferencia entre la temperatura y la temperatura del punto de rocío: $t - t_d$. Esta diferencia de temperaturas recibe el nombre de *depresión del punto de rocío*.

  $T_d = (2501.10^3.T/(2501.10^3 - 461{,}51.T.\ln(U/100))\ ^oK$

- Temperatura del termómetro húmedo: es la temperatura que indicaría el termómetro si el aire estuviese saturado, manteniendo la presión constante . Para ello se rodea el depósito de mercurio de una muselina empapada en agua. El valor de esta temperatura se encuentra siempre entre la temperatura del aire y la del punto de rocío, coincidiendo cuando el ambiente está saturado. Es útil para determinar si la masa de aire ha cambiado o no después de una lluvia, así como para estudiar la estabilidad de estratificación.

  $t' = t - 1510\ (E'-e) / p$ t en ºC, E', e y p en hPa

3.3 ESTIMA DE LA RADIACIÓN NETA

El cálculo de la radiación neta es importante, sobre todo, para el cálculo de la evapotranspiración. Sin embargo, generalmente no se mide y es necesario recurrir a su cálculo. Es de todos sabido que la transferencia de calor puede efectuarse por conducción, convección o radiación. En el caso del sistema Tierra-Atmósfera, el Sol calienta el suelo por radiación y éste transfiere el calor al aire esencialmente por conducción y convección (ligada fuertemente a la inestabilidad). Usualmente, el balance radiativo consiste en determinar la radiación neta sobre el suelo o la superficie deseada, por comparación de la radiación incidente y de la radiación "saliente", que puede ser emitida o reflejada. Dentro de la radiación incidente se distingue entre la radiación de onda corta, prodecente en su mayor parte del Sol y que usualmente se identifica con la radiación solar (aunque una parte puede proceder de radiación reflejada por las nubes), y la radiación de onda larga, emitida por el Sol, la propia atmósfera, las nubes y otros cuerpos próximos, tal como prevee la Ley de Plank. Asimismo la radiación que sale del suelo puede considerarse compuesta de una parte en onda corta y otra en onda larga. La primera corresponde a la radiación reflejada y depende de la radiación en

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

onda corta incidente y del albedo de la superficie, que varía con la hora del día, las características de la superficie y su orientación. La segunda corresponde a la radiación emitida en onda larga por la propia superficie, y depende de la temperatura de la misma y de su emisividad, función a su vez de las características de la superficie emisora. Ésta última es conocida como radiación terrestre.

$$R_n = R_S \downarrow - R_S \uparrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (1)$$

Otra posibilidad de escribir esta ecuación es la siguiente (Dong et al. 1992):

$$R_n = (1-\alpha)R_s + \varepsilon_s[\varepsilon_a(0)(1-c)\sigma T_a^{\,4} + c\sigma T_a^{\,4} - \sigma T_s^{\,4}] + ck' \quad (2)$$

4. Aplicación a un caso concreto: las inundaciones del 10 de junio de 2000

Para ilustrar la aplicación de los apartados anteriores, se presenta a continuación un extracto del artículo publicado en la Revista de Ingeniería del Agua, sobre las inundaciones producidas el 10 de junio de 2000 en Cataluña (Llasat et al, 2001).

4.1 INTRODUCCIÓN DEL CASO

Durante la madrugada del día 10 de junio del 2000 se produjo una tromba de agua sobre Cataluña que causó graves daños en las comarcas del Bages, Anoia, Baix Llobregat y Baix Penedés (Figura 1), tanto por la lluvia y las inundaciones, como por los deslizamientos de ladera y la caída de piedras. Como consecuencia del episodio murieron 5 personas: una anciana atrapada en su vivienda, dos jóvenes que atravesaban el puente de la N-II cuando éste se desplomó y dos guardias civiles que intentaban rescatar el cuerpo de uno de los jóvenes fallecidos. Los daños materiales más destacables fueron la destrucción parcial de las infraestructuras del recinto del Monasterio de Montserrat así como de algunas vías de acceso a la montaña; la destrucción total del puente más reciente de la autovía N-II sobre la riera de la Magarola a la altura de Esparraguera; y los graves daños producidos en el barrio de la Farinera en Sant Vicenç de Castellet, así como en las poblaciones de Monistrol de Montserrat, Esparraguera y Collbató, en las comarcas del Baix Llobregat y Anoia. Concretamente el río Llobregat experimentó una crecida de más de 4,5 m sobre el puente de la antigua carretera N-II, amén de los súbitos aumentos de caudal experimentados en las rieras de Marganell y de la Magarola (afluentes del Llobregat) que recogieron gran parte de la lluvia que cayó sobre Montserrat y su entorno (Sempere-Torres *et al*, 2000). En el Baix Penedés el municipio más afectado fue el del Vendrell a consecuencia del desbordamiento de la riera del Lluch y la consecutiva ola de agua y barro que se extendió por plazas y calles de la población, provocando destrozos totales o parciales en la zona comercial. A esto hay que añadir desbordamientos de otras rieras de la cuenca del Llobregat, así como en el Maresme y el Garraf, con destrucción total de puentes y fragmentos de carretera, inundaciones de bajos en numerosas poblaciones, cortes en los suministros eléctricos, telefónicos y de agua potable, así como pérdida parcial de vías de transporte. Una semana después los daños materiales se estimaban en más de 11.000 millones de pesetas, y los alcaldes de las zonas más afectadas habían solicitado ya la declaración de zona catastrófica.

Entre las muchas actuaciones que se llevaron a término hay que destacar la activa-

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

ción del plan INUNCAT en el nivel 1, el desalojamiento de 200 vecinos del barrio de la Farinera (San Vicente de Castellet), la evacuación de unas 300 personas que pernoctaban en Montserrat, mediante helicópteros de bomberos de la Generalitat de Catalunya (operación Noria), o la activación de los planes básicos de emergencia de los municipios más afectados, como fue el caso de el Vendrell y Martorell. En Barcelona, los bomberos de la ciudad y los servicios municipales de Parques y jardines realizaron unas 130 salidas durante el día 10 para paliar las consecuencias del temporal.

El episodio ciertamente fue espectacular y, como se discutirá más adelante, puede clasificarse como un episodio de inundaciones catastróficas. El rasgo hidrometeorológico más contundente fue la gran intensidad de precipitación sostenida, con cantidades acumuladas horarias por encima de los 100 mm y máximos en 12 horas de más de 200 mm. Sin embargo, no es el primer caso que se haya registrado en este siglo, ni por lo que respecta a intensidades de lluvia ni por lo que respecta a caudales, ni tampoco por lo que respecta a comarcas afectadas. Basta recordar los episodios del 25 de septiembre de 1962, 20-23 de septiembre de 1971, 6-8 de noviembre de 1982 y 2-5 de octubre de 1987 (Llasat, 1987, 1990, 1991; Ramis *et al*, 1994). La mayor peculiaridad estriba, eso sí, en la época del año en que se ha producido. En Cataluña, los episodios de alta intensidad, muy convectivos, se suelen producir en verano y principios de otoño (Llasat y Puigcerver, 1997; Llasat, 1999), caracterizándose por su brevedad y dando lugar a avenidas súbitas en los torrentes pirenáicos o en las rieras costeras, principalmente en el Maresme. Las inundaciones catastróficas, con más de 200 mm en 24 horas, se producen en otoño, y sólo excepcionalmente se han registrado en este siglo dos o tres casos en invierno (como el de enero de 1996), que además han producido menos daños al tratarse de situaciones poco convectivas y más duraderas, lo que ha permitido una mejor gestión de las avenidas.

El objetivo de este estudio responde, pues, a la necesidad de contextualizar en el marco de las inundaciones históricas y en el marco climático, el episodio de inundaciones del 10 de junio del 2000. Para ello se procede en primer lugar al análisis de la evolución pluviométrica del mismo, tanto desde un punto de vista espacial como temporal, y de su efecto sobre los caudales de los principales ríos y rieras afectados. En segundo lugar, se realiza una explicación meteorológica de las causas del evento desde un punto de vista sinóptico y termodinámico. El estudio se finaliza, antes de pasar a la síntesis y conclusiones, con la comparación con otros casos de inundaciones históricas y documentales, que hayan afectado a la cuenca del Llobregat.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

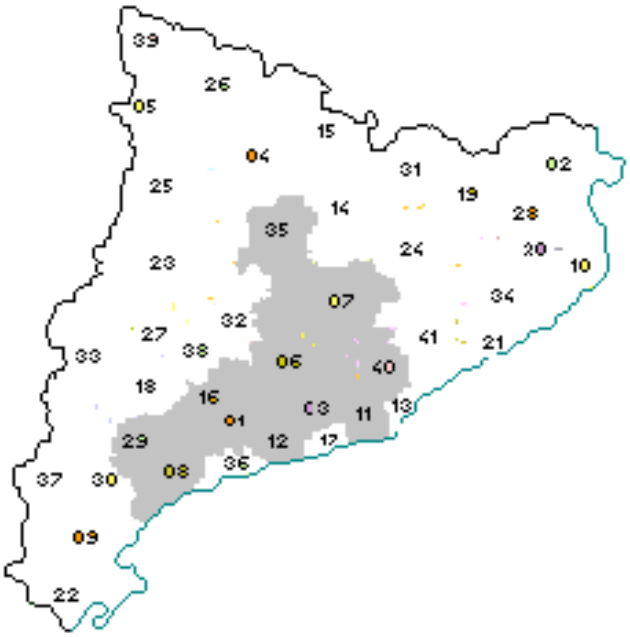


Figura 1: Mapa de Cataluña en el que se muestran las comarcas más afectadas por las lluvias del 10 de junio del 2000. (01 - Alt Camp, 03 - Alt Penedès, 06 – Anoia, 07 – Bages, 08 - Baix Camp, 11 - Baix Llobregat, 12 - Baix Penedès, 16 - Conca de Barberà, 29 – Priorat, 35 – Solsonès, 40 - Vallès Occidental)

4.2 EVOLUCIÓN PLUVIOMÉTRICA

El episodio de lluvias intensas afectó sobre todo a las Cuencas Internas de Cataluña (C.I.C), por lo que el análisis detallado de su evolución pluviométrica se ha realizado exclusivamente para estas cuencas hidrológicas. Con tal fin se han utilizado los datos de lluvia 5-minutales recogidos por las estaciones automáticas del Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H) de las C.I.C. Se trata en total de 125 estaciones pluviométricas automáticas repartidas por un área de 16.000 Km^2, como muestra la Figura 2. El sistema de medida está constituído por un balancín con una capacidad por contenedor de 0.1 mm. La información pluviométrica, que es enviada por radio, se acumula en intervalos de 5 minutos, lo que permite un análisis detallado de la evolución temporal de la intensidad de lluvia.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Figura 2: Mapa de las Cuencas Internas de Cataluña en el que se muestra la localización de los 125 pluviómetros automáticos del SAIH, así como las diferentes subcuencas.

La Figura 3 muestra la distribución de lluvia acumulada en las C.I.C. en todo el episodio, desde las 21:30 UTC, del día 9 hasta las 21:30 UTC del día 10 de junio. Como se puede observar, las máximas cantidades se recogieron en la cuenca del Llobregat, y concretamente en la comarca del Bages, con 224 mm en Rajadell (Figura 4), 202 mm en Sant Salvador de Guardiola y 183 mm en Suria. En la cuenca del Besós se recogieron 96 mm en Sant Llorenç de Savall (Vallès Occidental), en tanto que en las cuencas tarraconenses del Francolí y de la Riera de la Bisbal se recogieron 101 mm en Mont-Ral (Alt Camp) y 134 mm en la Bisbal del Penedés (Baix Penedès). También se superaron los 100 mm en las cuencas del Gaià y Foix, con 127 mm en Aiguamurcia (Alt Camp) y 123 mm en Pontons (Alt Penedés), respectivamente. Aunque también llovió en las cuencas más septentrionales, la máxima totalizada en ellas correspondió a la cuenca del Ter, con 62 mm en Taradell (Osona). Cabe decir que el día 10 se superaron los 50 mm en todas las sub-cuencas pertenecientes a las C.I.C.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

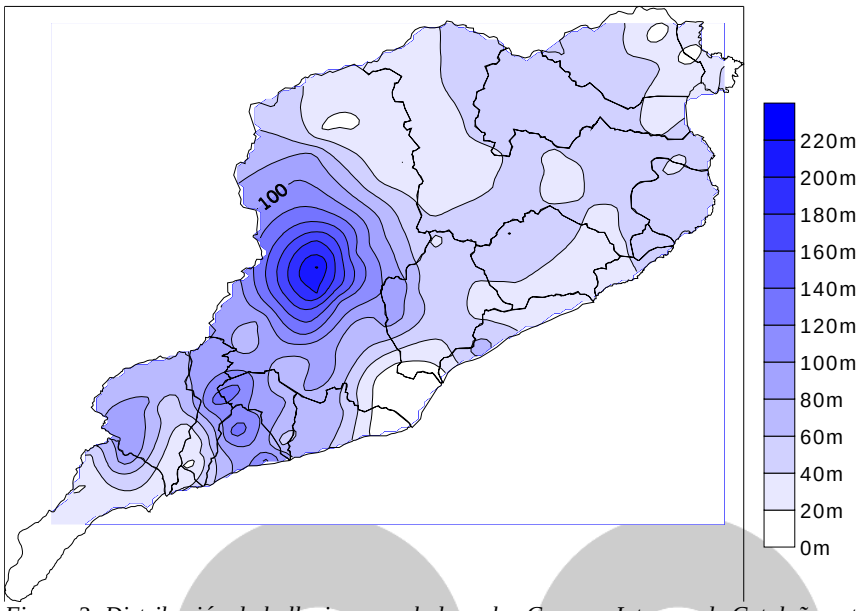


Figura 3: Distribución de la lluvia acumulada en las Cuencas Internas de Cataluña entre las 21:30 UTC del día 9 y las 21:30 UTC del día 10 de junio del 2000.

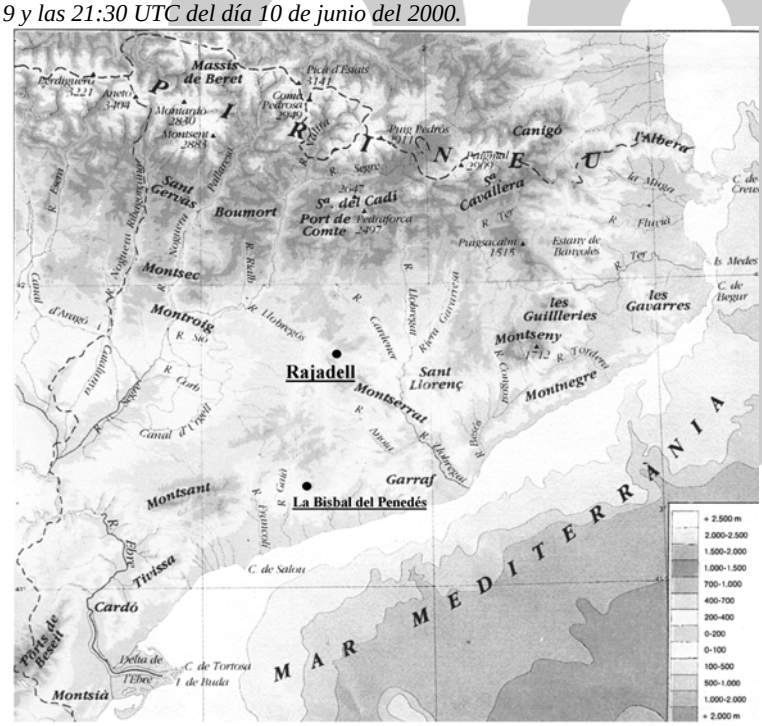
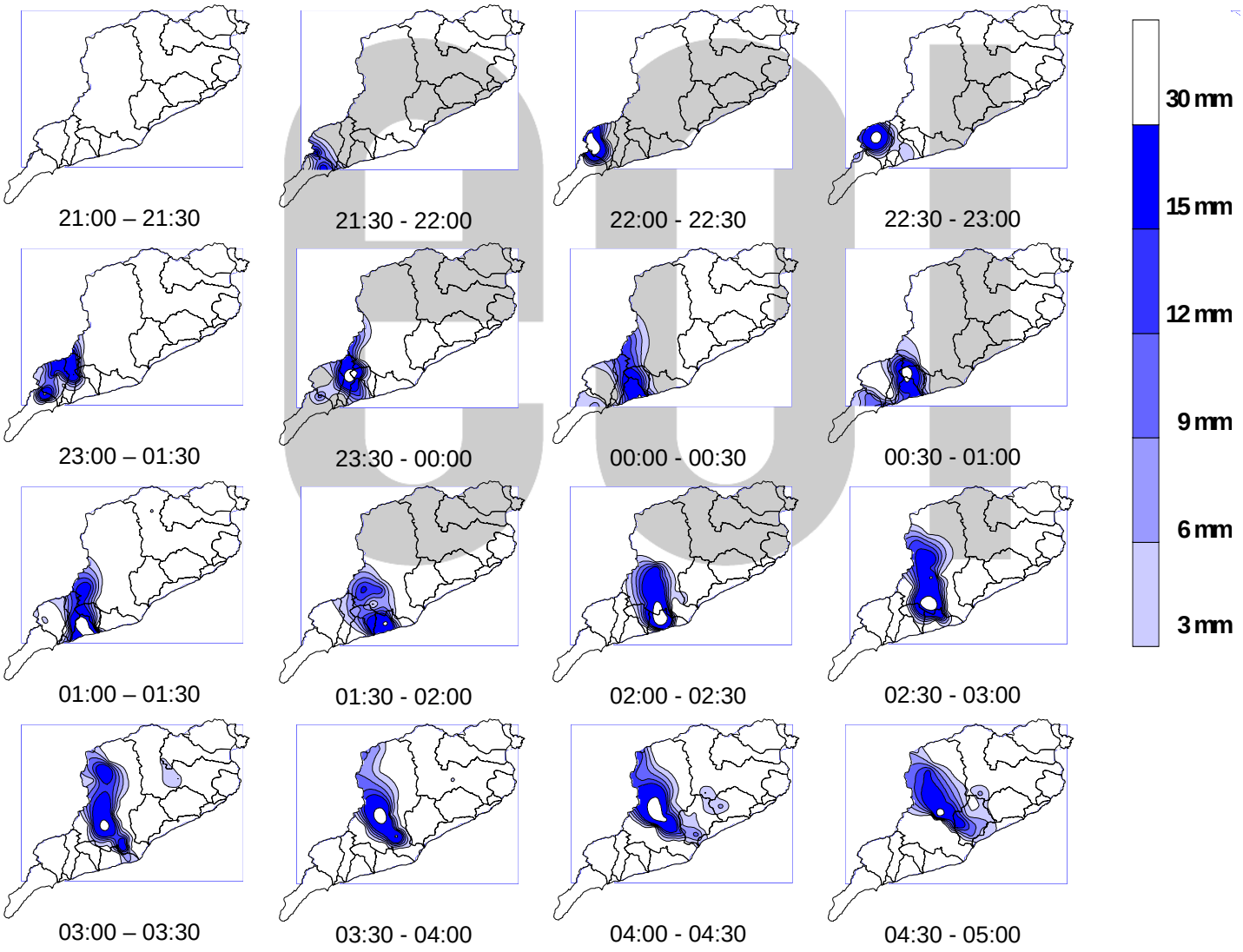


Figura 4: Mapa de Cataluña en el que se indican las principales cadenas montañosas y ríos.

Para comprender mejor la evolución del episodio se ha construído la Figura 5, en la que se muestra la distribución de la lluvia para intervalos semi-horarios, desde las 21:00 UTC del día 9 hasta las 9:00 UTC del día 10 de junio. La lluvia se distribuyó esencialmente según un eje orientado en sentido SE-NW, cuya traslación fue muy lenta, por lo que los principales núcleos se mantuvieron estacionarios durante varias horas sobre las mismas zonas. Las primeras lluvias en las C.I.C. se registraron el día 9 hacia las 21:30 UTC (23:30 hora local),

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

afectando principalmente las comarcas del Tarragonés y Baix Camp. Entre las 22:00 y la 23:30 UTC las lluvias se mantuvieron sobre las comarcas del Baix y Alt Camp, Alt Penedès y Conca de Barberà, y empezaron a penetrar en la comarca del Anoia. Durante esas primeras horas y hasta las 00:00 UTC (2:00 de la mañana hora local) la cuenca más afectada fue la del Francolí, produciendo algunos daños. El sistema se trasladó hacia el NE, de tal forma que entre las 23:00 UTC y la 1:30 UTC, las cuencas más afectadas fueron las de la Riera de la Bisbal, el Gaià y Foix, incidiendo sobre todo en las comarcas del Alt, Baix Camp, Alt y Baix Penedès. Hacia la 1:30 UTCl las lluvias ya afectan a la comarca del Garraf. Las primeras lluvias en la cuenca del Llobregat afectaron la comarca de l'Anoia hacia las 00:00 UTC, alcanzaron los valores máximos entre las 2:00 y las 5:00 UTC , extendiéndose luego a lo largo de todo el día 10, habiendo afectado a las comarcas del Bages, Anoia, Solsonés y Baix Llobregat. Las lluvias afectaron también considerablemente el río Cardener, amén de las rieras de las vertientes norte y sur de Montserrat.



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

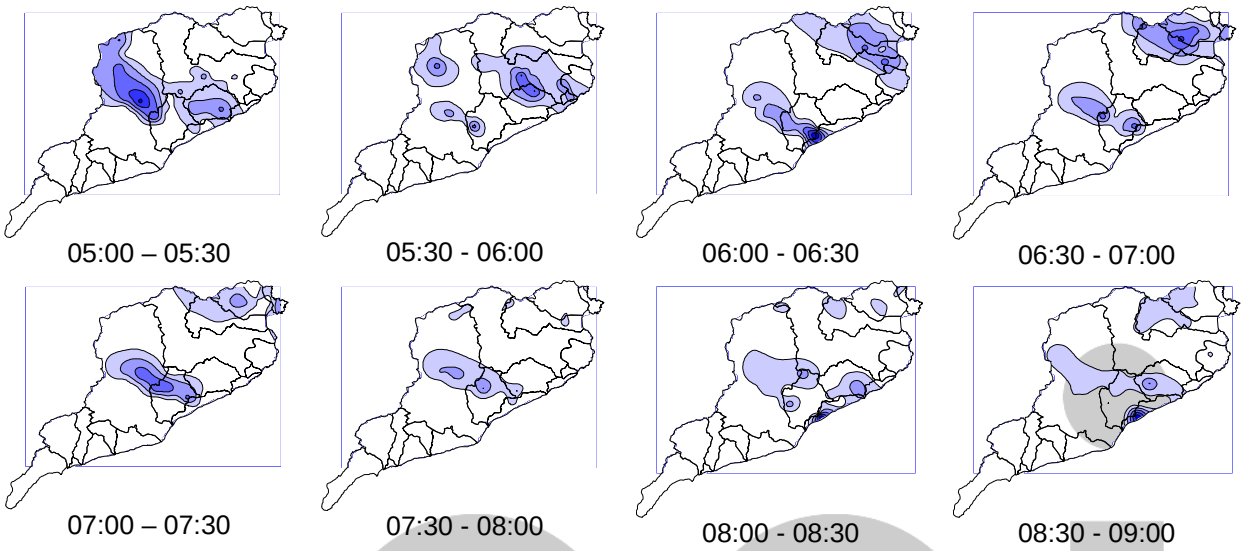


Figura 5: Evolución de la lluvia acumulada semi-horaria, a lo largo de las Cuencas Internas de Cataluña, entre las 21:00 UTC del día 9 y las 9:00 UTC del día 10 de junio del 2000.

La traslación del sistema convectivo se puede observar indirectamente en la Figura 6, que corresponde a una salida directa de la base de datos S.A.I.H. sita en la Agencia Catalana de l'Aigua. La figura muestra los máximos de intensidad y las horas en que se registraron en las tres cuencas más afectadas: Francolí (Mont-Ral), Riera de la Bisbal (La Bisbal del Penedés) y Llobregat (Sant Salvador de Guardiola). Como se puede observar, en todas ellas se superaron las intensidades 5-minutales de 60 mm/h, correspondiendo el máximo a la estación más próxima a Montserrat, con 76 mm/h. Obsérvese también la diferencia de 3 horas entre un pico y otro, lo que, unido a la evolución semihoraria de las isoyetas, permite estimar la velocidad de traslación del sistema, entre las 23:00 y las 5:00 UTC en unos 10 km/h . Para tener una mejor imagen de la extensión y simultaneidad del sistema convectivo, se ha preparado la Figura 6, elaborada en función de las intensidades 5-minutales de lluvia de los pluviómetros S.A.I.H. situados en la falda de Montserrat. Piera es la estación situada más al Sur y también la más próxima a la riera de la Magarola , de ahí que el máximo sea anterior al de las otras estaciones, y más próximo en el tiempo a la hora en que testigos presenciales sitúan las máximas lluvias en Montserrat. Obsérvese la evolución paralela en todo momento de la intensidad de lluvia de las restantes estaciones, lo que indica que la lluvia debe proceder en todas ellas del mismo sistema convectivo.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

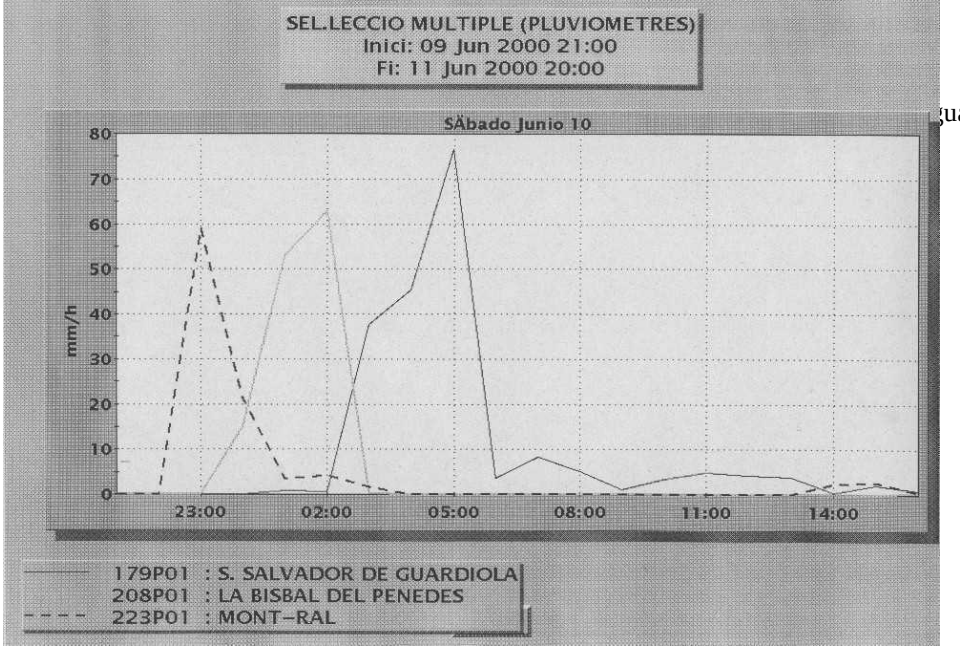


Figura 6: Presentación de los datos pluviométricos del S.A.I.H. que muestra el movimiento de traslación de los picos de intensidad en las cuencas más afectadas: Francolí (Mont-Ral), Riera de la Bisbal (La Bisbal del Penedés) y Llobregat (Sant Salvador de Guardiola). La hora está indicada en UTC.

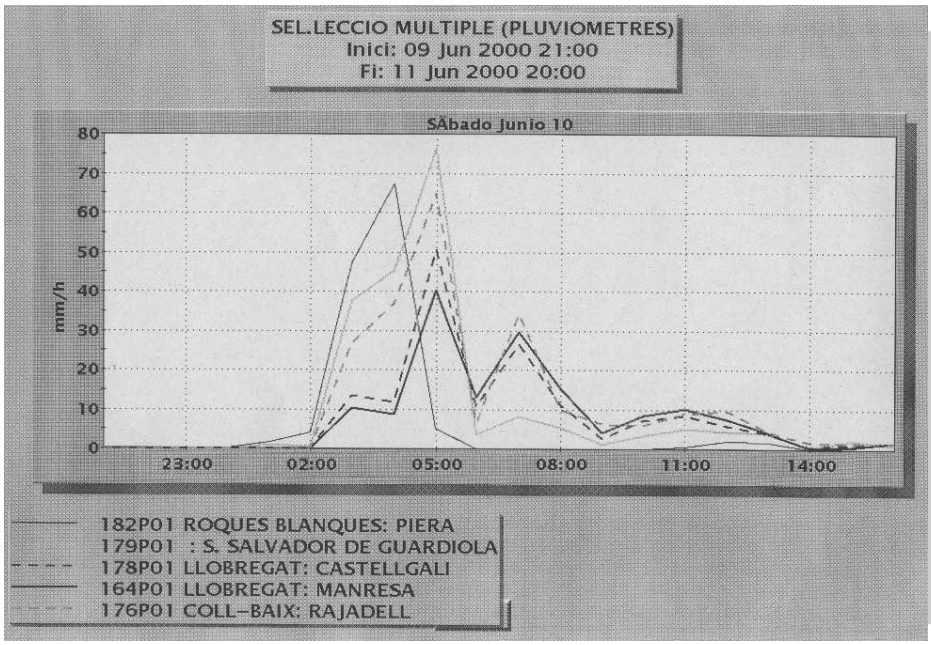


Figura 7: Presentación de los datos pluviométricos del S.A.I.H. que muestra la evolución de la intensidad media horaria en los pluviómetros más próximos a Montserrat. Obsérvese el máximo próximo a 80 mm en 1 hora. La hora está indicada en UTC

Aunque en este artículo no se entrará en el análisis hidrológico del episodio, merece la pena destacar que las lluvias producidas en la cuenca del Francolí entre las 21:30 UTC del día 9 y las 3:00 UTC del día 10, produjeron un aumento de nivel a su paso por Tarragona de más de 2 m hacia las 12:00 UTC del día 10. En el caso del Llobregat, el incremento más elevado del que hay constancia (la estación de aforos de Martorell fue arrastrada por la avenida) se registró en Castellbell i el Vilar, hacia las 9:00 UTC del día 10, con unos 4,5 m y un caudal punta de unos 1100 m^3/s. Cabe decir que los ascensos en los niveles de los ríos afectados fueron muy bruscos, con una respuesta que en el Francolí a su paso por Montblanc llegó a ser inferior a 1 hora.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

4.3. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

El análisis meteorológico se centrará en los principales aspectos sinópticos y termodinámicos.

Evolución termodinámica

La estructura termodinámica de la atmósfera se ha analizado utilizando básicamente los radiosondeos de Palma de Mallorca, Madrid, Gibraltar y Murcia. También se ha consultado el radiosondeo de Barcelona, que viene lanzándose con regularidad desde hace 2 años. Dado que el episodio tuvo lugar dentro de la zona cálida y con una fuerte componente del Sur, se considera que el radiosondeo de Palma es un útil identificativo de la masa de aire que en bajos niveles afectaría después a Cataluña (Llasat, 1987; Llasat, 1990), teniendo presente el posible incremento de su humedad a su paso por el Mar Mediterráneo (o el contrario en el caso de que se produjera precipitación sobre éste). Aún así, y teniendo en cuenta la importancia del avance del frente frío por el oeste, se ha considerado oportuno analizar el radiosondeo de Madrid. Finalmente, los radiosondeos de Gibraltar y Murcia se han incluído para comprender mejor la evolución y focalización de las lluvias.

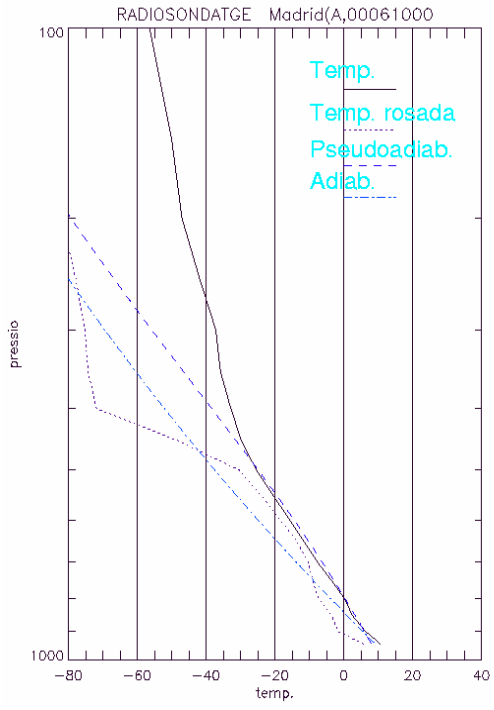
El día 9 a las 12:00 UTC se observa una importante inestabilidad potencial en Palma de Mallorca, tal como muestran la mayor parte de índices de inestabilidad (Llasat *et a* , 1996; Tudurí y Ramis, 1997) y los valores de la energía convectiva disponible (CAPE), que alcanzan los 1866 J/kg . Hay que pensar que valores de la CAPE por encima de 1500 J/kg apuntan a un riesgo notable de que se produzca una situación de tiempo severo o de fuertes lluvias. Asimismo se observa una elevada concentración de vapor de agua en los niveles bajos, equivalente a una masa de agua precipitable de 13 kg/m^2, entre superficie y 850 hPa (unos 1500 m), consecuencia de la situación anticiclónica registrada los días previos, acompañada de un fuerte calentamiento y evaporación en bajos niveles. El día 10 a las 00:00 UTC (Figura 7b) el radiosondeo de Palma de Mallorca muestra una mayor probabilidad de desarrollo de la convección así como de tormentas, en tanto ha aumentado el contenido en humedad registrándose una masa de agua precipitable en los primeros 1500 m, de unos 17 kg/m^2 y una CAPE de 1637 J/kg. A las 12:00 UTC del mismo día la inestabilidad ha disminuído considerablemente, así como la masa de agua precipitable. Merece la pena destacar la capa de aire seco que se registra durante el día 9 y la madrugada del 10, entre 850 y 600 hPa, característica de situaciones de tiempo severo asociadas a fuertes vientos (Doswell *et al*., 1996), fenómeno que también se registró en las zonas costeras de Cataluña y que corrobora el radiosondeo de Barcelona. Doce horas después la CAPE ya había descendido a 440 J/Kg, lo que ciertamente coincide con la finalización del episodio más lluvioso. El hecho de que las lluvias más intensas se produjeran en zonas montañosas muestra el importante papel que jugó el relieve en el desarrollo de la convección, con ascensos forzados comprendidos entre los 500 y los 1500 m (Riosalido, 1998).

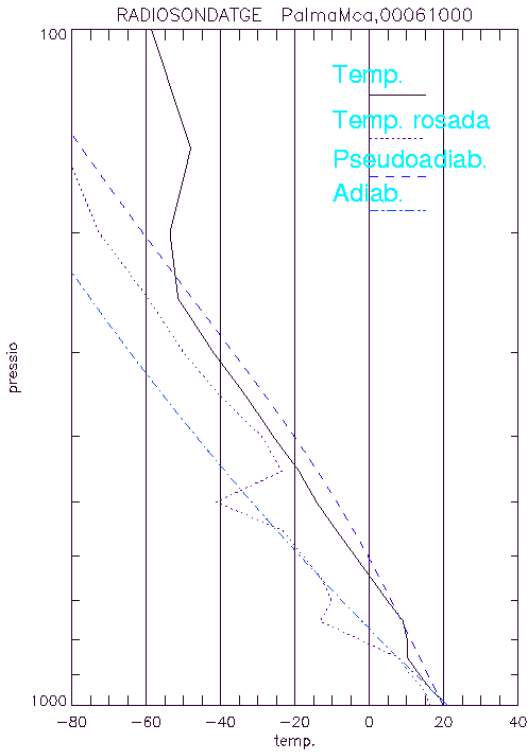
El radiosondeo de Madrid (Figura 8a) muestra una cierta inestabilidad entre el día 9 a las 00:00 UTC y el día 10 a las 00:00 UTC, a consecuencia, principalmente, de la presencia de aire muy frío en niveles medios, y que estaría relacionada con las precipitaciones y nevadas que se registraron en el centro y norte de la Península. La CAPE alcanza el día 12 al mediodía un valor máximo de 202 J/kg, en tanto que a la misma hora el valor de la masa de agua precipitable entre superficie y 850 hPa es de unos 12 kg/m^2, alto con respecto al valor medio en esta región. Murcia (Figura 8d) presenta una evolución semejante a la de Palma de

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Mallorca pero mostrando mayor estabilidad, tanto por lo que respecta a los índices, como a la humedad y la CAPE. El radiosondeo de Gibraltar (Figura 8c) muestra una situación mucho más estable, y tan sólo merece la pena destacar los elevados valores de la masa de agua precipitable que se registraron durante el día 9, con un desfase con respecto a los de Palma de Mallorca de unas 24 horas y que alimentaron de aire húmedo la advección que se produjo en la zona pre-frontal.

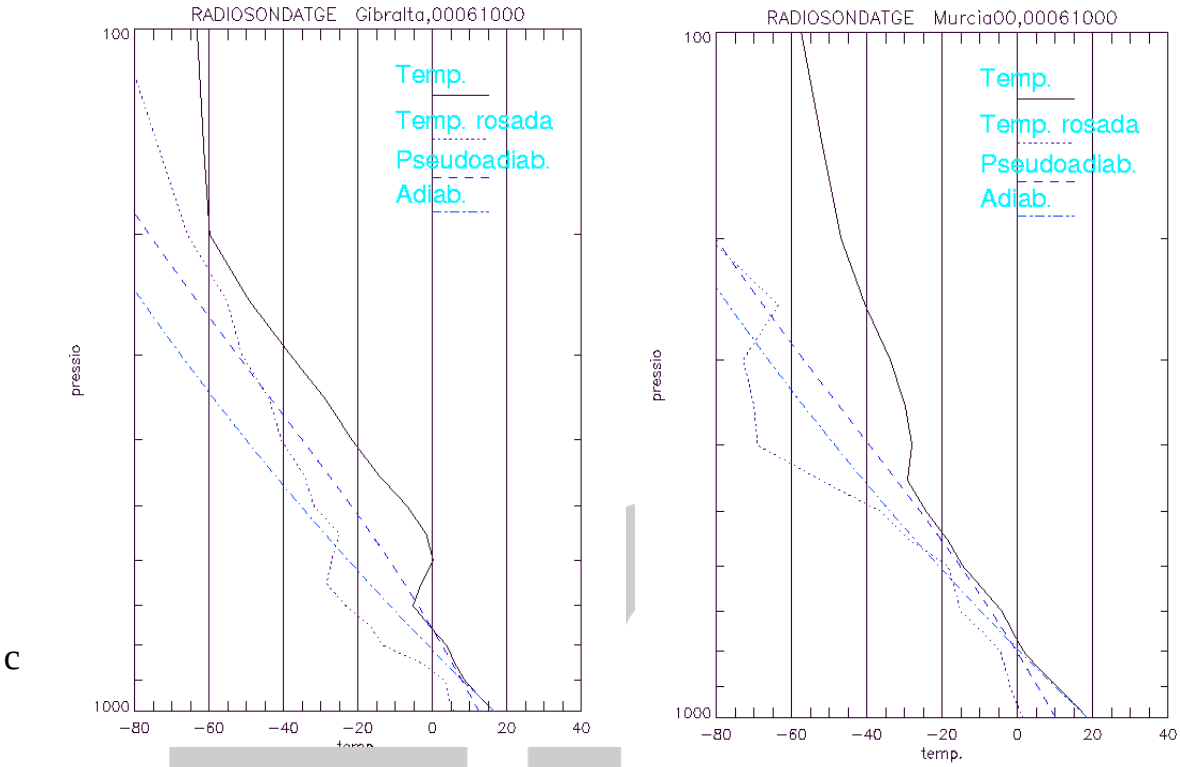
a





b

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.



c d

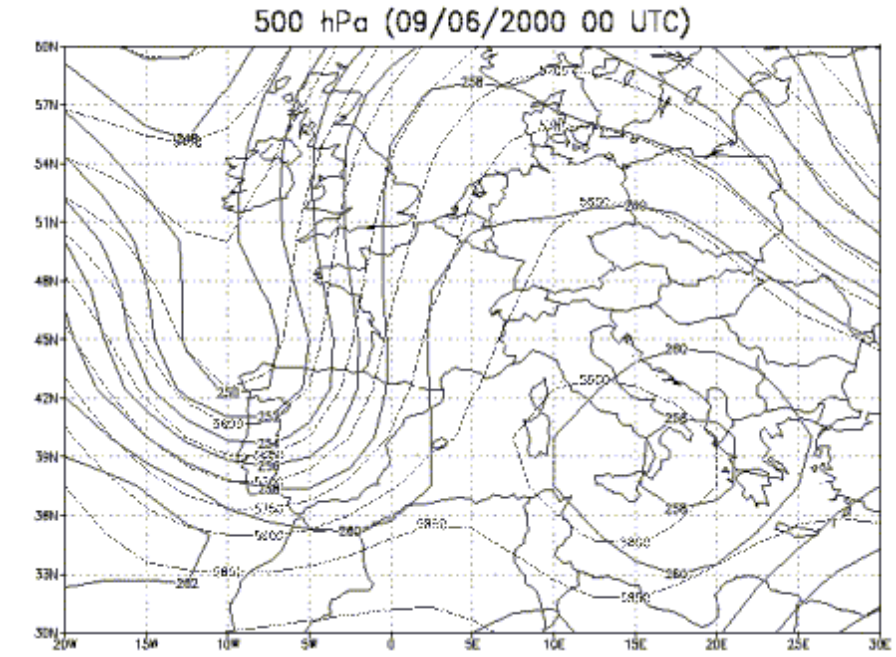
Figura 8: Radiosondeos de Madrid (a), Palma de Mallorca (b), Gibraltar (c) y Murcia (d)

El día 9 a las 12:00 UTC el viento en Barcelona era del SE en niveles bajos y del SSW en altura. A las 00:00 del día 10 ya se había producido un viraje hacia el E a todos los niveles, con una variación gradual entre un E en superficie y un S a 600 hPa. Este viraje unido a las elevadas velocidades (más de 30 kt por encima de 950 hPa) produciría una marcada cizalladura, fenómeno favorable para la producción de tormentas multicelulares (Riosalido, 1998). Doce horas después predominaban los vientos del este a todos los niveles, más flojos, marcando una clara situación de Levante que se prolongaría a lo largo de los días siguientes.

Así pues, la situación termodinámica vertical manifiesta una estructura y evolución similar a la que se registró durante episodios anteriores de inundaciones en Cataluña, principalmente los de noviembre de 1982 y septiembre de 1962 (Llasat, 1997, 1991). La comparación de la evolución del episodio utilizando los radiosondeos de Barcelona y de Palma de Mallorca, corrobora la hipótesis de que el radiosondeo de Palma puede ser considerado un buen representante de la masa de aire que llega a Cataluña, en los casos asociados a inundaciones catastróficas, pudiendo utilizarse como un buen predictor en el ámbito del "nowcasting" o predicción a corto plazo.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

a



b

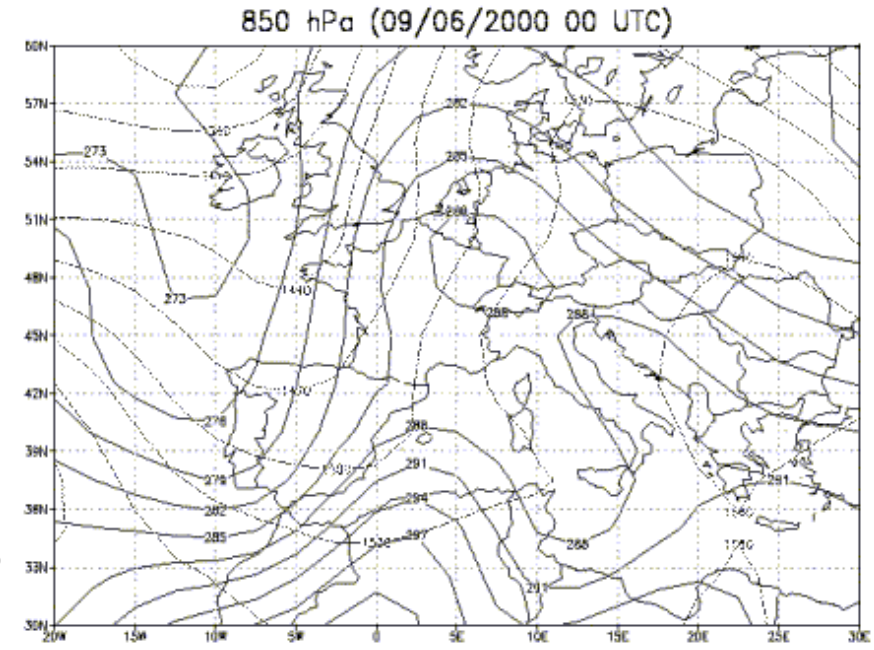


Figura 9: Situación sinóptica del día 9 de junio del 2000 a las 00:00 UTC: a) 500 hPa, b) 850 hPa

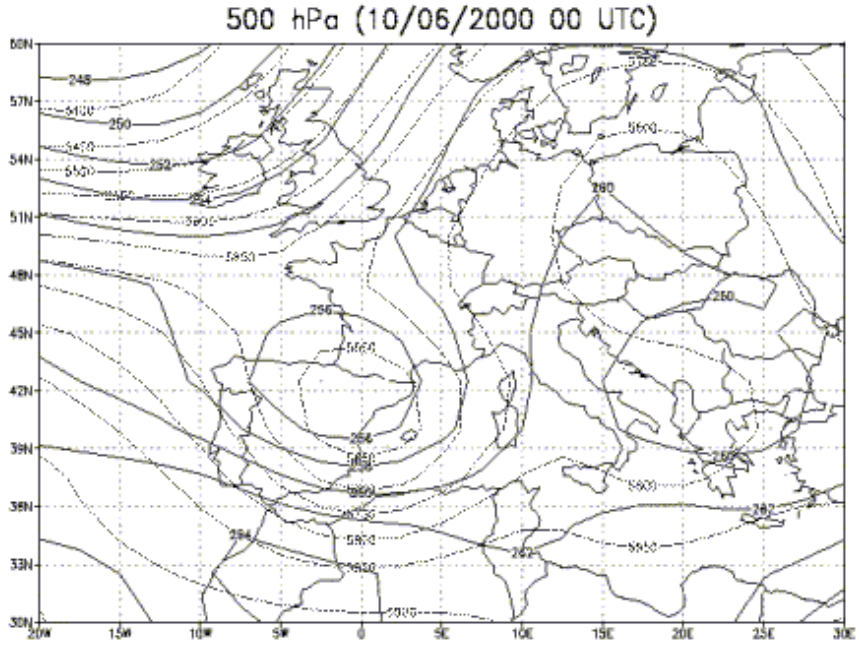
Evolución sinóptica

La situación sinóptica muestra el día 9 la entrada por el W de la Península Ibérica, de un frente frío asociado a una baja situada al norte de las Islas Británicas, en tanto que Cataluña se encuentra bajo un régimen anticiclónico que afecta a la Europa Central y Oriental, así como a gran parte del Mediterráneo. En altura se detecta la presencia de una vaguada fría

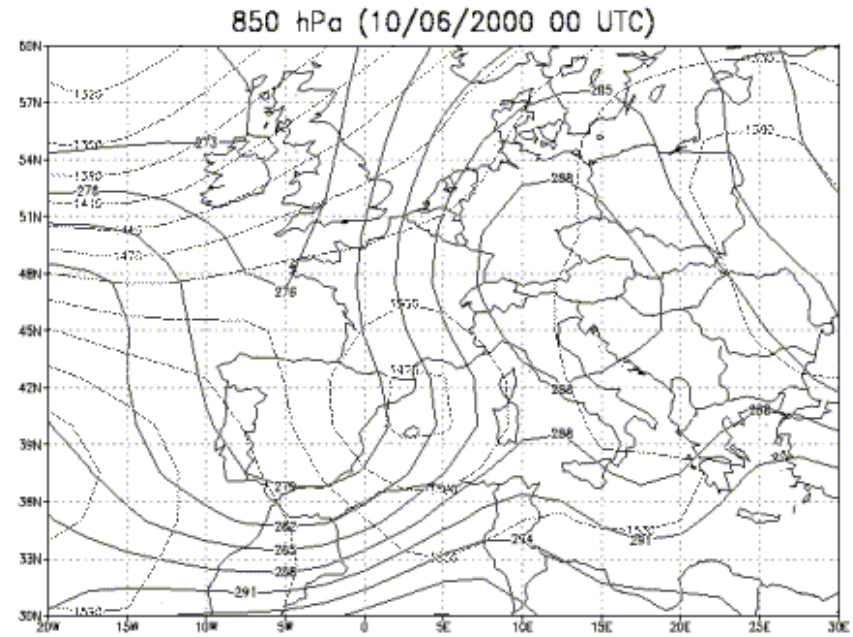
©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

(Figura 9a), cuyo eje se sitúa hacia las 12:00 UTC sobre Portugal y que favorece a 850 hPa (Figura 9b) la presencia de vientos de componente W sobre el sector Occidental de la Península Ibérica, con advección de aire frío, y de componente S sobre el sector Oriental, con una marcada advección de aire cálido. Cabe destacar a 850 hPa (Figura 9b) la existencia de una notable confluencia del viento del SE y SW sobre Cataluña. Así pues se tienen los factores básicos previos a las situaciones de lluvias fuertes en Cataluña: situación anticiclónica sobre Cataluña y el Mediterráneo con alimentación de aire muy cálido y húmedo que permitirá la generación de una fuerte inestabilidad que permanece latente hasta que algún factor, ya sea orográfico, ya sea dinámico, dispare la convección.

a



b



©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Figura 10: Situación sinóptica del día 10 de junio del 2000 a las 00:00 UTC: a) 500 hPa, b) 850 hPa

El día 10 a las 00:00 UTC, el frente frío se sitúa hacia el meridiano de latitud 0º, quedando pues al W de Cataluña. A lo largo de las últimas horas se ha ido formando una depresión en superficie, centrada en las Islas Baleares, que a esta hora alcanza valores inferiores a 1008 hPa. A lo largo de las últimas horas el flujo del W que dominaba sobre la mayor parte de la Península a 850 hPa ha ido virando para alcanzar a esta hora, una componente marcadamente del norte (Figura 10b), que ha advectado aire muy frío que se extiende hasta la troposfera alta (Figura 10a) y que será el responsable de las nevadas producidas este día. En este caso todo parece apuntar hacia la presencia de una gota de aire frío sobre la costa cantábrica en el sentido más estricto de su definición: mínimo de presión y temperatura a 500 hPa que no se detecta en superficie (Llasat, 1991). Asimismo puede desempeñar un papel activo en la producción de lluvias y nevadas sobre parte de la Península, al extenderse hasta 850 hPa. Sin embargo, no es la única responsable de las violentas lluvias que se registraron en Cataluña. En efecto, la situación sinóptica dominante en esta región, entre las 00:00 UTC y las 12:00 UTC, intervalo durante el que se registró la práctica totalidad de la lluvia, muestra la conjunción de los siguientes factores:

- Depresión mesoescalar (meso-α) en superficie que se extiende desde Baleares hasta las C.I.C y que favorece la convergencia de vapor de agua en bajos niveles e interviene directamente en el disparo de la inestabilidad potencial acumulada previamente (la localización de los núcleos convectivos en la imagen de radar – Sempere Torres *et al*, 2000 - apunta hacia la existencia de una línea de convergencia que iría avanzando sobre Cataluña, en sentido SW-NE, con el avance lento de la depresión).
- Acoplamiento de la depresión fría en altura y la depresión en superficie favoreciendo la profundización de la misma. Atendiendo a las condiciones termodinámicas que muestran los radiosondeos, la masa potencialmente húmeda y cálida se encuentra concentrada entre superficie y 900 hPa, con valores de CAPE superiores a 1500 J/kg, lo que unido al aire frío en altura favorece un fuerte gradiente de temperatura potencial equivalente, o dicho de otro modo, la presencia de una gran inestabilidad en bajos niveles.
- Fuerte componente orográfica en la focalización y estacionariedad de la convección.

La figura 11 muestra la imagen NOAA sobre el este peninsular, tomada a las 5:10 UTC en el canal 3 (3,7 μm). Obsérvese la nitidez del borde inferior nuboso debido a la entrada de aire seco en niveles altos y medios de la atmósfera. El rápido avance del frente frío a lo largo de la mañana del día 10 provocará la finalización del episodio.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

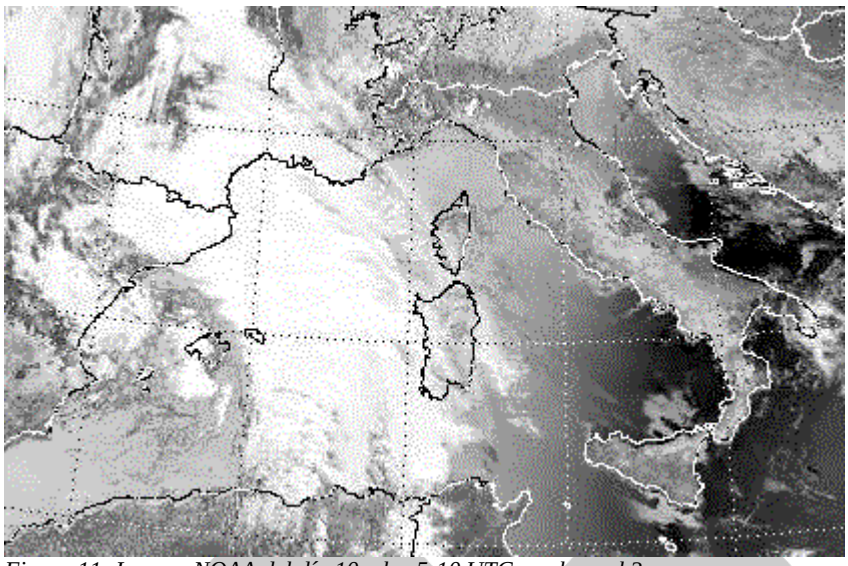


Figura 11: Imagen NOAA del día 10 a las 5:10 UTC en el canal 3

Ciertamente muchos de los rasgos sinópticos concuerdan con los que se dieron previamente y durante las graves inundaciones del 25 de septiembre de 1962 (Llasat, 1987). Durante aquel episodio, y además de la situación previa que ya se ha comentado antes común a este tipo de situaciones, cabe destacar la focalización de la inestabilidad en niveles muy bajos, el avance de un frente frío sobre la Península produciendo lluvias y granizo en muchos puntos de la misma (dada la época del año en ese caso no podía tratarse de nevadas), el avance de las lluvias en Cataluña penetrando por Tarragona y trasladándose luego hacia el noreste y la nocturnidad del episodio. En ese caso los máximos se registraron también sobre la cuenca del Llobregat (y del Besós), en el Vallés, a pocos kilómetros de los que se han registrado este año afectando principalmente al macizo de Sant Llorenç de Munt y a las rieras que en él se originan, tal como la riera de las Arenas que fue una de las que produjo gran número de víctimas.

4.4 EL EPISODIO DE INUNDACIONES DEL 10 DE JUNIO DEL 2000 BAJO LA PERSPECTIVA DE LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS PREVIAS

Como ya se ha dicho a lo largo del presente artículo, en los últimos 50 años se han superado los 250 mm en 24 horas en diversos episodios que han afectado la cuenca del Llobregat, tales como el del 25 de septiembre de 1962, 20 a 23 de septiembre de 1971 o 6 a 9 de noviembre de 1982, tal como se explicita en la tabla 1. A éstas hay que añadir las inundaciones registradas entre el 28 de septiembre y el 5 de octubre de 1987 que también afectaron a esta cuenca, totalizándose a lo largo de todo el episodio 431 mm en el Prat de Llobregat, así como las del 12 de noviembre de 1988, durante las que se registraron 225 mm en 24 horas, en Corbera de Llobregat, produciendo cada una de ellas más de 1000 millones de pérdidas y más de una decena de víctimas mortales.

Con respecto a episodios de avenidas registrados en primavera y según la Junta de Aguas (1994) consta que el caudal punta del Llobregat a su paso por Martorell fue el día 17 de abril de 1916, de 1300 m^3/s, y el día 28 de abril de 1942, de 1500 m^3/s.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Los datos anteriores permiten contextualizar mejor el presente episodio y apuntan hacia una cierta frecuencia de este tipo de episodios, eso sí, principalmente en otoño. Dado que sin embargo se trata de episodios producidos en el siglo XX y a fin de poder dirimir si se trata de una frecuencia excepcional o no, se ha considerado oportuno introducir la información documental de que se dispone para inundaciones registradas con anterioridad a este siglo.

Tal como se explicó en Llasat et al (1999), la experiencia desarrollada tras el análisis de las crecidas registradas en Cataluña desde el siglo XV, ha permitido diferenciar tres tipos de crecidas según su impacto (Barriendos y Pomés, 1993), cuyas líneas básicas se definen a continuación:
a) *crecidas simples*: episodios de precipitación que ocasionan incrementos en el caudal de los cursos fluviales o riadas, pero sin llegar a ocasionar desbordamientos. Pueden ocasionar daños y pérdidas humanas si momentáneamente se desarrollan actividades dentro o cerca del cauce en el momento de la crecida, independientemente de la intensidad de ésta.
b) *inundaciones extraordinarias*: episodios de precipitación que ocasionan desbordamientos con una intensidad o duración que no producen daños en la localidad. Puede ocasionar incomodidades o molestias en la vida cotidiana de la población.
c) *inundaciones catastróficas*: episodios de precipitación que ocasionan desbordamientos con daños graves o destrucción de infraestructuras (puentes, molinos, murallas, caminos), edificios y cultivos.

Atendiendo a esta clasificación es obvio que el episodio del 10 de junio del 2000 quedaría enmarcado en las llamadas inundaciones catastróficas. Sin embargo, tal como se ha ido comentando a lo largo del artículo, otros episodios de semejante magnitud se han registrado a lo largo del tiempo. En el caso concreto del monasterio de Montserrat, sus registros documentales habrían podido permitir la reconstrucción de este tipo de episodios, pero lamentablemente durante la Guerra de la Independencia su archivo histórico desapareció con el asedio de las tropas francesas. Por este motivo, no es posible disponer de información paleoambiental sobre el macizo de Montserrat con anterioridad al periodo 1808-1810. Diferentes autores que han realizado recopilaciones de episodios meteorológicos extremos en época histórica tampoco manifiestan algún testimonio sobre inundaciones catastróficas en el Monasterio (Rico y Sinobas, 1851; Bentabol, 1900; Fontana Tarrats, 1976a; Fontana Tarrats, 1976b).

Por el contrario, sí que es posible reconstruir las inundaciones catastróficas que se han registrado en la parte baja del Llobregat (El Prat de Llobregat) desde 1315 hasta 1971. La paciente investigación historiográfica en diferentes fuentes documentales de ámbito local, permite disponer de una serie de eventos catastróficos para el tramo final del Llobregat con unas garantías óptimas de continuidad y homogeneidad de la información disponible (Codina Vila, 1966, 1971). Así se puede saber que dentro de ese período se registraron 38 inundaciones catastróficas, a las que habría que añadir las registradas en 1982, 1983, 1987 y 1988. Aunque la mayor parte de ellas se registraron durante el otoño, es posible encontrar algunos casos producidos en primavera, tales como las inundaciones del 2 de mayo de 1603, el 9 de junio de 1793 o entre el 24 y el 26 de mayo de 1853. En la Figura 11 se muestra la evolución climática de las inundaciones catastróficas en el tramo final del río Llobregat..

La frecuencia de las inundaciones del Llobregat en su tramo final, a pesar de la suavización aplicada a los valores estandarizados, muestra unos comportamientos oscilantes no regulares.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

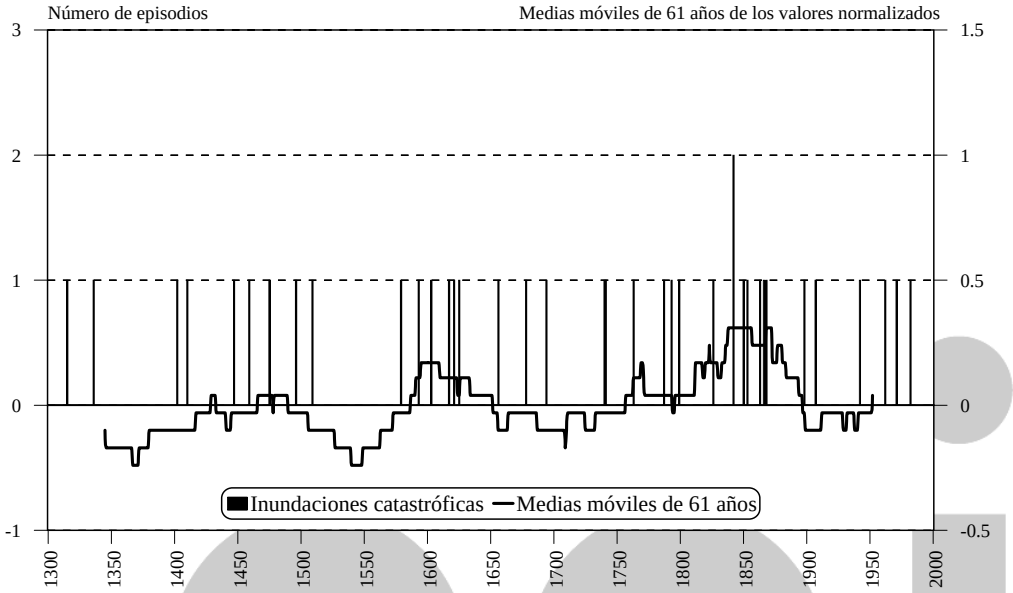


Figura 12: Inundaciones catastróficas en el Delta del río Llobregat, 1315-1982. Valores absolutos y medias móviles de 61 años de los valores normalizados (1= inundación extraordinaria; 2= inundación catastrófica)

En concreto, puede observarse una leve oscilación de incremento en la frecuencia de inundaciones hacia mediados del siglo XV. Otra oscilación es mucho más evidente en los dos últimos decenios del siglo XVI y los dos primeros decenios del siglo XVII. La segunda mitad del siglo XVIII presenta otro incremento moderado y, finalmente, a mediados del siglo XIX se produce una segunda prolongada e intensa oscilación. Estas tres últimas oscilaciones se enmarcan dentro del episodio climático conocido como miniglaciación (Little Ice Age) en su periodo más intenso y generalizado, entre los siglos XVI y XIX, mientras que los primeros indicios de la misma se detectan en la Europa Septentrional hacia principios del siglo XIV. Sólo cabe apuntar algunas coincidencias entre estas anomalías climáticas y la ocurrencia de las inundaciones catastróficas de primavera: las tres oscilaciones importantes detectadas coinciden con importantes incrementos en la longitud de los glaciares en el glaciar Grindelwald (Pfister, 1988), lo que indica que se trata de un comportamiento climático general. Pero la anomalía climática contiene también cada uno de los 3 episodios de inundación catastrófica de primavera conocidos antes del siglo XX: mayo de 1603, junio de 1793 y mayo de 1853. En el caso de las fuertes lluvias registradas en junio del 2000 y analizadas en este artículo, no es posible concluir si forman parte de una anomalía climática generalizada, de una tendencia climática o, simplemente, de una anomalía o episodio excepcional puntual.

4.5 CONCLUSIONES

Durante las primeras horas del día 10 de junio del 2000 se registraron en Cataluña unas fuertes lluvias e inundaciones súbitas que produjeron daños valorados en más de 11.000. millones de pesetas y 5 víctimas mortales, y que afectaron principalmente a las comarcas del Bages, Anoia,, el Baix Llobregat y el Baix Penedès La lluvia se caracterizó por su alta intensidad, superando en algunos puntos los 100 mm en 1 hora, siendo la máxima cantidad acumulada de 224 mm en menos de 24 horas, según fuentes oficiales Sin embargo, cantidades como ésta o superiores se han registrado en más de una ocasión en el último siglo en algún

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

punto de Cataluña tal como se ha demostrado en el apartado anterior, y probablemente también, pese a no disponerse de datos cuantitativos de la lluvia diaria del episodio en cuestión, en siglos anteriores, como parece deducirse de la presencia de inundaciones catastróficas súbitas. El hecho de que el episodio se produjese en primavera es más infrecuente, ya que normalmente este tipo de episodios se producen en Cataluña a finales de verano y, principalmente, en otoño. Los datos históricos muestran que en los siglos XVII, XVIII y XIX, también se registró como mínimo una inundación catastrófica en esta estación del año. Asimismo el aumento de caudal que en este caso registró el río Llobregat en su parte baja, no fue de los más elevados del último siglo. Si que lo pudo ser, sin embargo, aunque no hay constancia de ello por no existir estaciones de aforo, en algunas de las rieras que experimentaron avenidas y que normalmente se hallan secas.

En cuanto a los aspectos meteorológicos cabe destacar la estacionariedad del sistema convectivo sobre el macizo de Montserrat durante unas 3 horas, lo que condujo a la acumulación de una gran cantidad de precipitación en breve tiempo, tal como muestran los datos S.A.I.H. de las C.I.C.. El susodicho sistema, que presentaba una estructura esencialmente lineal (línea de turbonada) con formación de diversos núcleos convectivos en su seno, se detectó por primera vez en el SW de Cataluña el día 9 hacia las 11 de la noche, registrando un lento movimiento de traslación en sentido NE y hallándose 24 horas después sobre Francia. Factores favorables para su desarrollo fueron, además de la propia orografía, la advección de aire muy cálido y húmedo en bajos niveles, con presencia de una baja en superficie frente a la costa catalana, lo que favorecía el flujo del SE y la convergencia, en tanto que en altura se detectaba un embolsamiento de aire frío (factor que no siempre se registra en episodios de inundaciones en Cataluña). El análisis de la estructura termodinámica vertical de la atmósfera apunta a una focalización de la inestabilidad potencial hacia el sector noroeste del Mediterráneo Occidental. Los radiosondeos de Palma de Mallorca y Barcelona ya indicaban unas 12 horas antes del inicio de las fuertes lluvias en Cataluña, la posibilidad de tiempo severo (aunque no la estima cuantitativa del mismo). Vale la pena destacar que este es el primer caso de inundaciones en Cataluña en que se ha dispuesto tanto del radiosondeo de Palma de Mallorca como del de Barcelona; el comportamiento esencialmente paralelo de ambos corrobora la hipótesis que hasta ahora se había mantenido y aceptado, de considerar suficientemente representativo el radiosondeo de Palma de Mallorca para el análisis termodinámico de este tipo de situaciones, tal como se había ya hecho en los casos de 1962, 1971, 1977, 1982, 1983, 1986, 1987 (Llasat, 1987, 1991; Ramis et al, 1994; Llasat et al, 1996).

4.6 REFERENCIAS CITADAS

Barriendos, M. y J. Pomés, (1993) L'aigua a Mataró. Inundacions i recursos hídrics (Segles XVIII-XX), Mataró, Caixa d'Estalvis Laietana, 278 pp.

Bentabol, H. (1990) Las aguas de España y Portugal, Madrid, Vda. e Hijos de M. Tello.

Codina Vila, J. (1966) Delta del Llobregat. La gent del fang. El Prat: 965-1965, Granollers, Montblanc.

Codina Vila, J. (1971) Inundacions al Delta del Llobregat, R. Dalmau, Barcelona, Col. Episodis de la Història", nos. 147-148.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Doswell, Ch. A. III, Brooks, H.E., Maddox, R.A, (1996). *Flash flood forecasting: an ingredients based methodology*. Wea. Forecasting, **11**, 560-581.

Fontana Tarrats, J.M.(1976 a) Historia del clima en Cataluña. Noticias antiguas, medievales y en especial de los siglos XV, XVI y XVII, Madrid, 248 pp. Obra inédita, mecanografiada.

Fontana Tarrats, J.M. (1976 b) Historia del clima en el litoral mediterráneo: Reino de Valencia más Provincia de Murcia, Javea,. Obra inédita, mecanografiada. 206 pp.

Junta d'Aigües (1994): Recomanacions sobre mètodes d'estimació d'avingudes màximes, Generalitat de Catalunya, Barcelona.

Llasat, M.C., (1987) Episodios de lluvias copiosas en Cataluña: genesis, evolución y factores coadyuvantes. Publicacions de la Universitat de Barcelona, 543 pp. , 84-7528-235-0.

Llasat, M.C., (1990) *Influencia de la orografia y de la inestabilidad convectiva en la distribución espacial de lluvias extremas en Cataluña*. Acta Geológica Hispánica, **25,** nº3, 197-208.

Llasat, M.C., (1991) Gota fría. *Ed. Marcombo, (colec. Boixareu Universitaria),* nº6,165 pp, 84-267-0829-3.

Llasat, M.C., Ramis, C. y Barrantes, J., (1996) *The meteorology of high-intensity rainfall events over the West Mediterranean Region*. Remote Sensing Reviews, **14**, 51-90.

Llasat, M.C., Puigcerver, M., (1997) *Total rainfall and convective rainfall in Catalonia, Spain*. International Journal of Climatology**, 17**, 1-13.

Llasat, M.C., (1999) *Una clasificación de los episodios pluviométricos para utilización en hidrología. Aplicación a la intensidad de lluvia de Barcelona*. Revista de Ingeniería Civil, nº 112, 35-46.

Llasat, M.C., M.Barriendos, R.Rodriguez y J. Martín-Vide, (1999) *Evolución de las inundaciones en Cataluña en los últimos quinientos años*. Ingeniería del Agua, **6**, nº4, 353-362.

Pfister, C., (1988) Klimageschichte der Schweiz. *1525-1860*, Bern, Paul Haupt, 184pp.

Ramis, C., Llasat, M.C., Genovés, A. y Jansà, A., (1994) *The October-87 floods in Catalonia. synoptic and mesoscale mechanisms*. Meteorological Applications, **1**, 337-350.

Rico y Sinobas, M., (1851) Memoria sobre las causas meteorológico-físicas que producen las constantes sequías de Murcia y Almería, señalando los medios de atenuar sus efectos, D.S. Compagni, Madrid.

Riosalido, R., (1998). Estudio meteorológico de la situación del 7 de Agosto de 1996 (Biescas). Nota Técnica STAP nº26, Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General del INM, 90 pp.

Sempere Torres, D., Corral, C., Berenguer, M., Sánchez-Diezma, R., Dolz, J. (2000). El

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

episodio pluviométrico del 10 de junio en Cataluña. Un primer estudio hidrometeorológico. *Ingeniería del Agua*, **7**, 2, 105-115.

Tudurí, E., Ramis, C., (1997). *The environments of significant convective events in the Western Mediterranean*. American Meteorological Society, **12**, 294-306.

5. Referencias y bibliografía

Cuadrat, J.M. y Pita, M.F. (1997): *Climatología*, Cátedra, Madrid.

Cunillera , J. y M.C. Llasat, 1997: Application of remote sensing and multivariate analysis to the agroclimatic characterization of a Mediterranean region. *Theor. Appl. Climatol*., 57, 197-208.

Elías Castillo, F. y Castellví, F. (coordinadores) (1996): *Agrometeorología*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación- ediciones Mundi Prensa, Madrid.

Llasat, M.C. y M. Puigcerver, 1994: Meteorological factors associated with floods in the north-eastern part of the Iberian Peninsula .*Natural Hazards*, 9, 81-93.

Llasat, M.C., 1997: *Meteorologia agricola i forestal a catalunya: conceptes, estacions i estadistiques.* Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya, 298 pp

Llasat, M.C. and R.L. Snyder, 1998: Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 3-4, 209-222.

Llasat, M.C., 1998: Una clasificación de los episodios pluviométricos para su utilización en hidrología. Aplicación a la serie de intensidad de lluvia de Barcelona. *Revista de Ingeniería Civil*. **112**, 35-46.

Llasat, M.C., De Batlle, J., Rigo, T., Barriendos, M., 2001. Las inundaciones del 10 de junio del 2000 en cataluña Revista Ingeniería del Agua, vol. 8, nº1, marzo, 53-66. ISSN: 1134-2196. D.L: CS-180-Valencia, España.

Martín Vide, J., 1991: *Fundamentos de climatología analítica*. Editorial Síntesis.

Martín Vide, J. y J. Olcina, 1996: *Tiempos y climas mundiales. Climatologia a traves de mapas del tiempo e imagenes de satelite*, Barcelona Oikos-Tau.

McIntosh, D.H. y A.S. Thom: 1983, *Meteorología Básica*. Editorial Alhambra.

Simonett, D.S. (ed.), 1983: *Manual of Remote Sensing. Volume I: Theory, Instruments and Techniques*. American Society of Photogrammetry. The Sheridan Press, U.S.A.

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.

Ware, R., Exner, M., 1996, GPS Sounding of the Atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary Results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 1.

http://gama.am.ub.es/edrina

©: Quedan reservados todos los derechos. (Ley de Propiedad Intelectual del 17 de noviembre de 1987 y Reales Decretos).
Documentación elaborada por el autor/a para EOI.
Prohibida la reproducción total o parcial sin autorización escrita de EOI.