

Combinación Bayesiana de datos pluviométricos e imágenes del Radar Meteorológico mediante Block Kriging y Filtro de Kalman. Aplicación en España

Enrique Ortiz⁽¹⁾, Ezio Todini⁽²⁾

⁽¹⁾ HidroGaia, Avda. Juan de La Cierva 27, Parque Tecnológico 46980-Paterna Valencia, eortiz@hidrogaia.com

⁽²⁾ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Bologna, Ezio.Todini@unibo.it

1 Introducción

La precipitación es una variable atmosférica caracterizada por un comportamiento altamente variable, por eso es muy complicado proporcionar una descripción cuantitativa espacial precisa. Por un lado las medidas pluviométricas se pueden considerar como una estimación de lluvia cuantitativamente bastante precisa, pero no pueden reproducir la distribución espacial de dicha lluvia, y por otro lado los radares meteorológicos proporcionan una mejor representación espacial del campo de precipitación que los pluviómetros, pero más pobre en la estimación cuantitativa de la lluvia.

En la presente comunicación se presenta una metodología basada en el uso conjunto del Block Kriging y la combinación bayesiana con filtro de Kalman (Kalman, 1960) para combinar ambas fuentes de información asumiendo la independencia del origen de errores de ambas medidas (Pluviómetros y Radares), con el objetivo de obtener un campo espacio-temporal de precipitaciones más verosímil, con una reducción substancial del sesgo y una reducción de la varianza de los errores estimados, obteniéndose una consiguiente mejora de la fiabilidad de las estimaciones del campo espacio temporal de precipitación.

En la actualidad esta metodología se encuentra operativa en España en los SAIH de las Confederaciones Hidrográficas del Segura, Júcar y Tajo y actualmente en implantación operativa en la Confederación Hidrográfica del Duero con el objetivo de alimentar en tiempo real, con los campos de precipitación combinados, los modelos hidrológicos incluidos en sus Sistemas de Ayuda a la Decisión. La combinación se realiza con los datos de pluviometría registrados por el SAIH y las imágenes radar de la Agencia Estatal de Meteorología.

2 Radar meteorológico

El radar meteorológico es una herramienta de gran potencialidad para cualquier aplicación que requiera un conocimiento detallado del campo espacio temporal de lluvia. Sus características principales,

capacidad para proporcionar una información detallada del campo de lluvia (del orden de un valor cada km^2) a intervalos de tiempo breves (cada 7-10 minutos), sobre grandes extensiones y de forma distribuida, lo han convertido en un instrumento esencial para las labores de vigilancia meteorológica.

Por otro lado el radar meteorológico se presenta también como una herramienta de gran utilidad en el campo la modelación hidrológica cara a la previsión de inundaciones, adaptándose perfectamente a la utilización de modelos hidrológicos distribuidos que permiten pronosticar caudales no únicamente en la salida de una cuenca, sino en cualquier sección del río donde sea necesario una prevención de los riesgos (en consonancia con la idea de situación dispersa de los elementos a proteger frente al riesgo de inundaciones). Así la combinación radar meteorológico-modelos distribuidos es fundamental en nuestras áreas dada la gran variabilidad espacial de la lluvia, la pequeña escala de los núcleos convectivos (difícil de captar incluso con redes de pluviómetros densas) y las pequeñas dimensiones de las cuencas.

En España en los últimos años se ha producido un gran interés por la utilización del radar con fines hidrológicos y al esfuerzo realizado por el Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que ha implantado una red de 15 radares que cubre el conjunto del territorio peninsular español. En un principio y aún actualmente operativo se dispone de imágenes radar a resolución espacial de $2 \times 2 \text{ Km}^2$ y resolución temporal diezminutal, siendo el producto intercambiado con la DGA la composición nacional de acumulación horaria sobre el CAPPI-0.5 (cod. McIDAS, datos en mm, $n = 1520 \times 1520$ pixeles, $\text{res} = 2 \times 2 \text{ km}^2$, 8 bits); ahora bien, desde Julio de 2006 se está realizando un proyecto de modernización de la red de radares de AEMET recientemente finalizado que modifica la resolución de los productos radar a $1 \times 1 \text{ Km}^2$ y resolución temporal de 7.5 minutos en formato GRIB y que actualmente también se están intercambiando (cod. GRIB, datos R en mm/h, $n = 480 \times 480$, $\text{res} = 1 \times 1 \text{ km}^2$, 8 bits) por cada uno de los radares, es decir aún no se dispone

de un producto a esta resolución a escala de composición nacional, que se realizará en breve. Hasta entonces la combinación entre los datos del radar meteorológico y la red de pluviómetros SAIH se está modelando con el modelo RAINMUSIC con la composición nacional a resolución espacial de 2x2 km² y acumulación horaria, estando el modelo preparado para comenzar a integrar los datos a la nueva resolución espacio temporal.

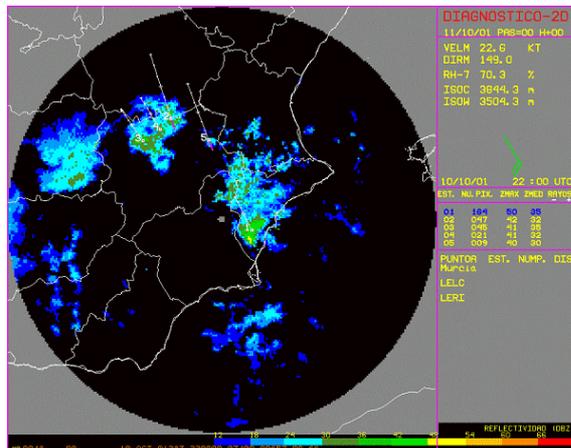


Fig. 1.- Imagen del Radar de Murcia 2x2 Km². Fuente AEMET.

Frente a esa potente implantación del radar meteorológico se produce la paradoja de que la utilización de sus datos con fines hidrológicos era hasta hace poco en España básicamente cualitativa, de modo que las aplicaciones hidrológicas que se podrían extraer de su medida cuantitativa son limitadas y se reducen a entornos muy experimentales y controlados. La razón es el complejo proceso de correcciones al que se deben someter las medidas de radar para transformarlas en datos cuantitativos fiables (Joss y Waldvogel, 1990; Sempere Torres y Sánchez-Diezma, 2003) y la dificultad para implantar dichas correcciones en un entorno operacional.

Históricamente, las primeras estrategias de calibración de la medida de lluvia por radar trataron de ajustar el campo de reflectividad radar (suponiendo que éste proporcionaba la distribución espacial de la lluvia más acertada) a las medidas registradas por los pluviógrafos (que se supone la medida cuantitativa correcta de la lluvia, aunque de carácter puntual) (ver por ejemplo la revisión de Wilson y Brandes, 1979). Dichos ajustes no lograron reducir las importantes discrepancias observadas entre las medidas del radar y los pluviómetros, en parte porque esas discrepancias derivan del hecho de que la medida radar y la de los pluviómetros tienen un carácter distinto que puede llegar a introducir diferencias importantes entre ambos aparatos (Zawadzki, 1975).

A partir de mediados de los 80 se empezó a adoptar una visión más realista del problema, conforme se tuvo una comprensión mucho más clara de los errores que afectan a la medida de lluvia radar, de la importancia de cada uno de ellos y de la necesidad de un cuidadoso proceso de calibración o corrección de dichos errores (Zawadzki, 1984).

Así, el ajuste cuantitativo de los datos radar se ha de entender como un proceso que tiene un carácter específico para cada radar, ya que la importancia de cada uno de los errores va a depender tanto del propio radar, como de su entorno y la climatología de la zona donde se encuentra instalado. La corrección meticulosa de cada uno de esos errores permite llegar a un estadio final en el que la comparación con los pluviómetros se suele entender más como un control de calidad que una calibración.

El radar con resolución de 2x2 km² tiene un radio de 240 km. La información de base que miden es la intensidad de los ecos en decibelios (Z), la unidad Z es el llamado factor de reflectividad que representa la suma de los diámetros elevados a la sexta potencia, de los dispersores (gotas de agua de las nubes) que existen en la unidad de volumen atmosférico de donde procede el eco radar. El valor en dbZ es igual a 10x(log Z – log Z₀) siendo Z la reflectividad medida por el radar y Z₀ igual a 1mm³/m³. El valor en dbZ guarda una estrecha relación con la intensidad de precipitación. Por debajo de 12 dbZ generalmente no existe precipitación, pero una cantidad de 60 dbZ, indica precipitaciones muy intensas. La relación entre Z y la intensidad de precipitación (expresada en mm/h) no es unívoca. Se suele utilizar la la relación de Marshall-Palmer (1948):

$$Z = a R^b$$

Donde,

Z factor de reflectividad [mm⁶ mm⁻³]

R intensidad de lluvia [mm/h]

a = 200 constante experimental para lluvia, 50 para llovizna y 800 para chubasco

b = 1.6 constante experimental

Estas constantes experimentales son las recomendadas para lluvias normales. Estas pueden variar según la intensidad de la lluvia.

Para un acimut dado, los datos corresponden a volúmenes atmosféricos en forma de troncos de un cono limitados por un haz de ángulo sólido de 0.9 y 2 km de resolución radial. Estos volúmenes, como es de esperar, son tanto mayores cuanto más nos alejamos del emplazamiento radar.

La posición y tamaño de cada uno de los volúmenes depende de las condiciones de propagación electromagnética que existen en la atmósfera en el momento en el que se realiza el barrido.

En condiciones estándar, el haz del radar se va elevando sobre el terreno conforme se aleja del radar, de modo que, el centro del volumen de donde procede el eco se llega a situar en el límite de operación (240 km desde el radar) a 5 km de altura y el diámetro de las bases del cono lleva a valer en este punto, algo menos de 5 km.

El radar tiende a subvalorar la intensidad de lluvia cuando el volumen del que procede el eco tiene amplias zonas fuera de la masa precipitante. Por eso, en situaciones estratiformes en que la masa de precipitación suele ser amplia pero confinada entre el suelo y un nivel no demasiado alto, el dato va perdiendo significado a distancias superiores de 120 km. En situaciones convectivas, sin embargo, eso no sucede por el gran desarrollo de los cumulonimbus y el dato es válido en todos los dominios de la imagen.

Cuando las condiciones de propagación electromagnética no son estándar, el radar yerra al asignar la altura sobre el terreno de donde proviene el eco. Una atmósfera inestable provoca que el radar suponga menor altura de la que realmente existe y en una atmósfera estable ocurre exactamente lo contrario. Cuando la estabilidad es acusada, empiezan a aparecer en la imagen, ecos de tierra que no se relacionan con la precipitación, pero cuya textura y características, no pueden engañar al usuario con cierta experiencia.

Debido a la dificultad de estimar el valor de lluvia en suelo derivado de las imágenes radar se ha implantado un modelo que permite combinar los datos de radar ya transformados en precipitación (realizada por AEMET) con los datos puntuales de precipitación de la red SAIH obteniendo un campo espacial de precipitación más preciso cuantitativamente.

3 Combinación Bayesiana entre Radar y Pluviómetros

El dato pluviométrico ofrece una información bastante precisa, sin embargo proporciona una información escasa por lo que concierne la distribución espacial de la precipitación, sobretodo en el caso de que se haya una situación de tipo convectivo. Por otro lado, los radares son capaces de delinear los límites espaciales de una tormenta, a pesar de ser una información cuantitativamente cargada de errores muchas veces bastantes significativos. Por tanto se ha proporcionado una combinación Bayesiana de los dos tipos de información, con el objetivo de proporcionar una

información resultante que tenga buenas características en cuanto a distribución espacial y a precisión cuantitativa de la precipitación.

El primer problema que hay que solucionar consiste en que las medidas pluviométricas se refieren a un punto, y no pueden ser directamente comparadas con los valores del radar promediados sobre una malla de $2 \times 2 \text{ Km}^2$. Por tanto se ha utilizado el Block Kriging, que es una extensión de la técnica geoestadística del Kriging, con el intento de regionalizar los datos pluviométricos a escala radar. En el Block Kriging el peso que cada medida pluviométrica puntual tiene sobre el píxel está calculado en función de la distancia, el variograma, que describe la dependencia espacial entre el área estimada y las medidas puntuales y que puede ser isótropo o anisótropo. La técnica de la combinación Bayesiana con el Block-Kriging actualiza los parámetros de la función del variograma en cada paso temporal usando el estimador de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood, Todini, 2001).

Si se considera (ver fig. 2) por ejemplo la siguiente distribución espacial de pluviómetros y cobertura radar en el espacio Ω . Los dos tipos de sensores proporcionan una medida de precipitación en el intervalo tiempo ΔT .

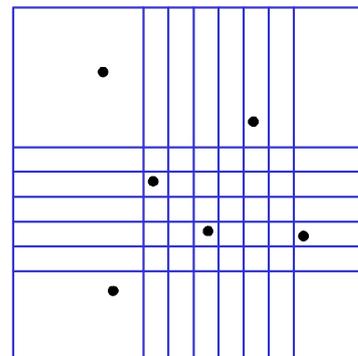


Fig. 2.- Representación esquemática de los datos radar y pluviométricos

Se utiliza la técnica del Block Kriging para regionalizar las medidas de precipitación procedente de los pluviómetros en los píxeles del radar, para que la escala espacial de la medida pluviométrica sea compatible con el dato radar, y asumiendo que los registros pluviométricos son insesgados, una vez determinado la estima del error, se aplica el filtro de Kalman para obtener una estima a posteriori combinando la estima a priori proporcionada por la medida ya tratada con el Block Kriging, en el contexto Bayesiano.

Una vez acabada la estimación del error de las estimaciones ya tratadas con el Block Kriging, la combinación Bayesiana entre radar y pluviómetros utiliza el filtro de Kalman para combinar las

estimaciones radar con los registros pluviométricos en un contexto Bayesiano. La combinación bayesiana Blok Kriging – Radar (BKR) considera las estimaciones radar y pluviométricas proporcionadas a cierto paso temporal, completamente independientes de las estimaciones del paso temporal anterior. Por esta razón el filtro aplicado no considera el conjunto de ecuaciones que compone el algoritmo del filtro de Kalman y por esto no es necesario actualizar el estado del sistema pasando de un time step al otro, se consideran solo las ecuaciones de actualización de las medidas, mientras las ecuaciones de predicción temporal se ignoran. La tabla 1 resume las ecuaciones de actualización de las medidas del filtro de Kalman, donde z_t es la medida, H es la matriz identidad, x_t es el estado estimado, v_t es el error, x'_t es la estimación a priori, x''_t es la estimación a posteriori, K_t es la ganancia de Kalman; R_t es la matriz de covarianza del ruido de la medida, P'_t es la matriz de covarianza de los errores de la estimación a priori, P''_t es la matriz de covarianza de los errores de la estimación a posteriori. En las ecuaciones numeradas según la tabla 1 (1) hasta (4) el índice t no implica ninguna relación entre los pasos temporales, siendo las matrices resultantes actualizadas en cada paso temporal y por tanto se efectúa la combinación Bayesiana entre los dos tipos de estimación escogiendo el campo de precipitación proporcionado por el radar como la estimación a priori x'_t y el campo proporcionado por el Block-Kriging de los datos pluviométricos como vector de medida z_t . (Mazzetti, 2004).

$z_t = Hx_t + v_t$ <p>ecuación de medida (1)</p>
$K_t = P'_t H^T (HP'_t H^T + R_t)^{-1}$ <p>ganancia de Kalman (2)</p>
$x''_t = x'_t + K_t (z_t - Hx'_t)$ <p>actualización del estado (3)</p>
$P''_t = (I - K_t H) P'_t$ <p>actualización de la covarianza del error (4)</p>

Tabla 1.- Ecuaciones discretas de la actualización de la medida del filtro de Kalman

A continuación se presenta un esquema resumen de los pasos para conseguir la combinación Bayesiana entre radar y pluviómetros (Todini 2001):

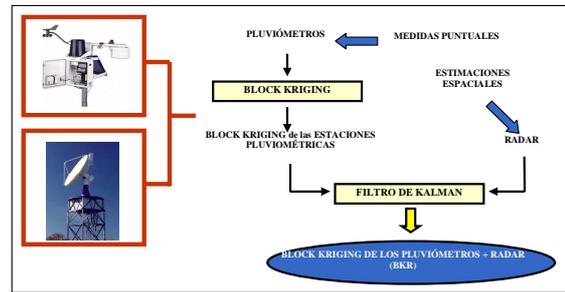


Fig. 3.- Esquema de funcionamiento de la técnica de combinación Bayesiana entre radar y pluviómetros

4 Ejemplo de aplicación en las Confederaciones Hidrográficas del Segura y del Júcar

En la actualidad se ha instalado el modelo de combinación bayesiana RAINMUSIC dentro de los Sistemas de Ayuda a la Decisión de los SAIH de las Confederaciones Hidrográficas del Segura, Júcar y Tajo con el objetivo de proveer campos espacio temporales de precipitación verosímiles para acoplarlos a los modelos hidrológicos y realizar previsión de caudales en distintos puntos unidas a las previsiones de el modelo de área limitada HIRLAM provisto por la AEMET.

A continuación se muestra las características topológicas de la implantación en cada una de las Confederaciones especificando las áreas de Block Kriging que incluyen las celdas con resolución radar $2 \times 2 \text{ Km}^2$ y las macroáreas que se utilizarían en el caso de disponer medidas de lluvia por Satélite (Eumetsat) que podrían también combinarse junto con los datos de radar y pluviómetros en caso de disponer de las mismas.

4.1 Confederación hidrográfica del Segura

En el ámbito territorial de la cuenca del Segura se ha establecido como área elemental para realizar el Block Kriging a partir de los datos pluviométricos del SAIH Segura cuadrados que contienen cinco píxeles radar de $2 \times 2 \text{ Km}^2$ es decir un área de $20 \times 20 \text{ Km}^2$ y una resolución de macroárea igual a cinco áreas de block Kriging como se muestra en la figura 4.

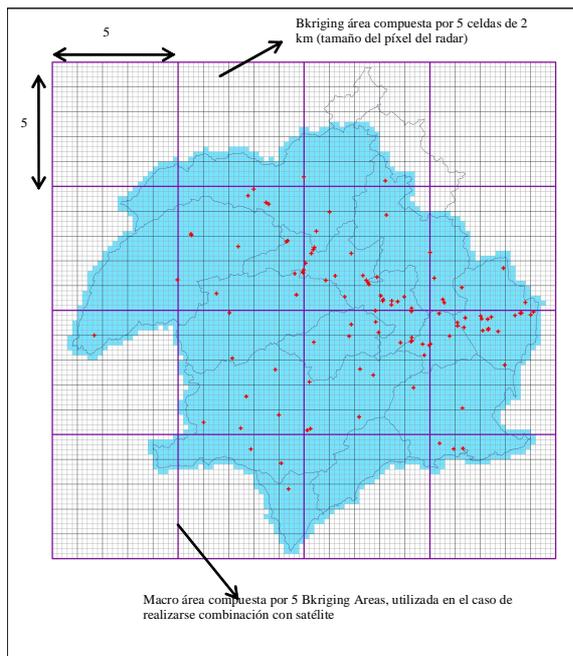


Fig. 4.- Discretización de la cuenca del Segura para la combinación Radar-Pluviómetros a resolución 2x2 Km²

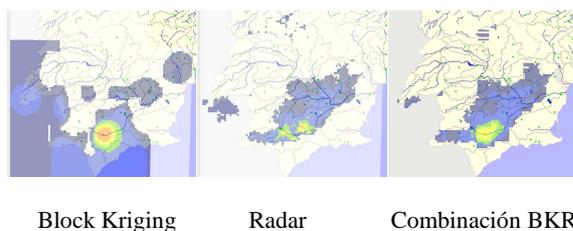


Fig. 5.- Resultado de una combinación Radar-Pluviómetros en la cuenca del Segura

4.2 Confederación hidrográfica del Júcar

En el ámbito territorial de la cuenca del Júcar se ha establecido como área elemental para realizar el Block Kriging a partir de los datos pluviométricos del SAIH Júcar cuadrados que contienen cinco píxeles radar de 2x2 Km² es decir un área de 20x20 Km² y una resolución de macroárea igual a cuatro áreas de block Kriging como se muestra en la figura 6, en la cual no se muestra la rejilla de 2x2 Km² por resolución y claridad de la imagen.

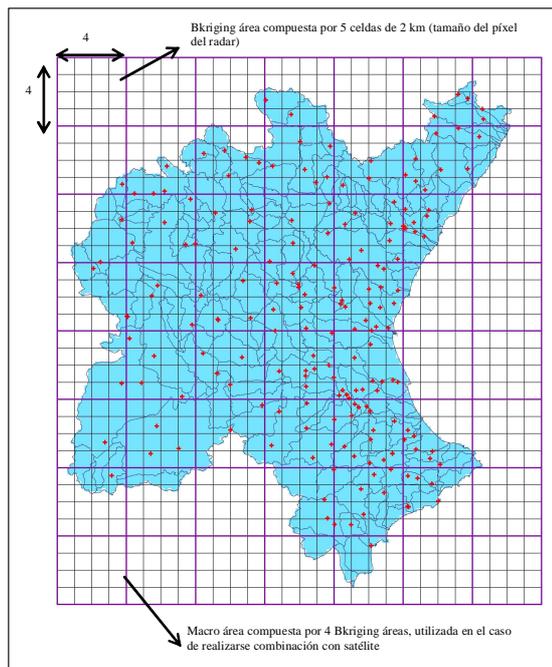
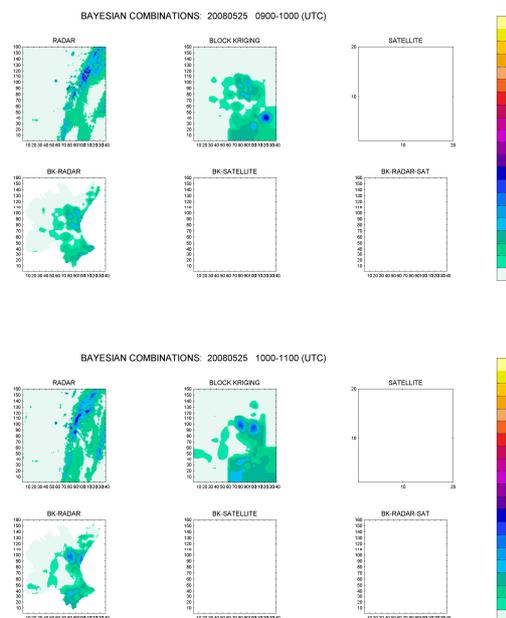


Fig. 6.- Discretización de la cuenca del Júcar para la combinación Radar-Pluviómetros a resolución 2x2 Km²

A continuación se presenta en la siguiente figura algunos time steps de la combinación realizada entre las imágenes radar de AEMET y los pluviómetros del SAIH de la cuenca del Júcar a escala horaria en un episodio de lluvias del mes de Mayo de 2008.



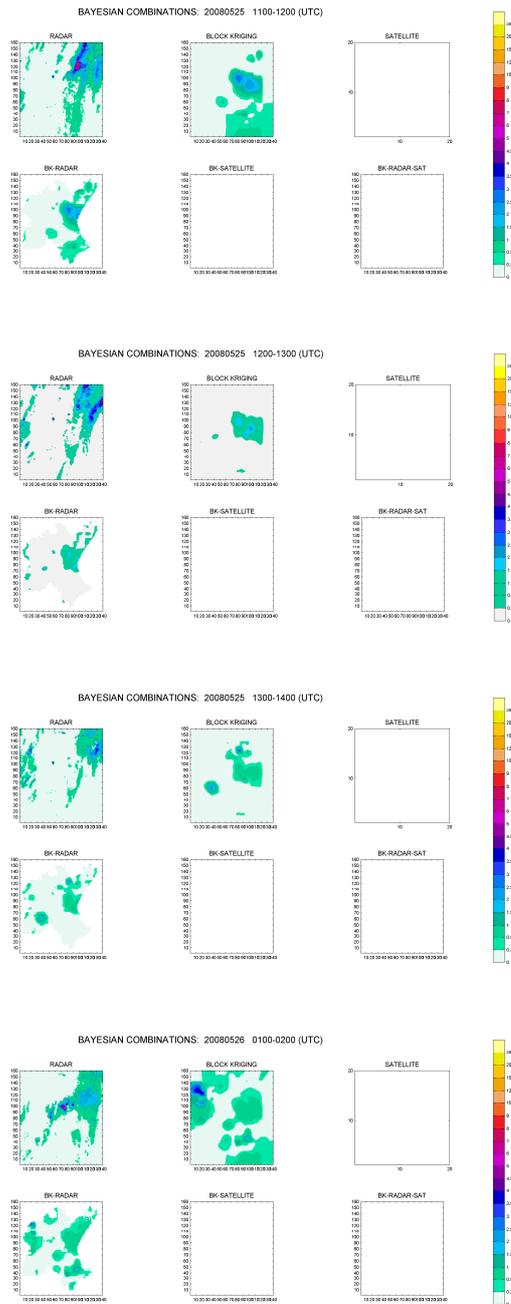


Fig. 7.- Resultados en la cuenca del Júcar para la combinación Radar-Pluviómetros a resolución 2x2 Km2

5 Referencias Bibliográficas

Kalman, R.E. 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering, 35-45.

Joss, J. and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurements and hydrology. Battan memorial and 40th anniversary of the radar meteorology, AMS, 577-606.

Marshall, J.S. and Palmer, W.M. The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, Vol. 5 (1948), pp. 165-166.

Mazzeti, C., 2004. Multi sensor rainfall estimation for flood forecasting. Tesi di Dottorato. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali. Università degli Studi di Bologna.

Sempere Torres, D. and R. Sánchez-Diezma, 2003: Could we play hydrology with radars? International Conference on Advances in Flood Forecasting in Europ, Rotterdam, The Netherlands, p.14.

Todini, E., 2001. Bayesian conditioning of radar to rain-gauges, Hydrol. Earth System Sci., 5:225-232.

Todini, E., 2001 (Part 1). Influence of parameter estimation uncertainty in Kriging. Part 1. Theoretical development, Hydrol. Earth System Sci., 5(2):215-223.

Wilson, J. W. and E. A. Brandes, 1979: Radar measurement of rainfall- a summary. Bull. Amer. Meteor. Soc., 60, 1048-1058.

Zawadzki, I., 1975: On radar-rain gauge comparison. J. Appl. Meteor., 14, 1430-1436.

Zawadzki, I., 1984: Factors affecting the precision of radar measurement of rain. 22th Conf. on Radar Meteorology, Zurich, Switzerland, 251-256.