

Durante la última década, diversos grupos de investigación se han enfocado en el desarrollo de la tecnología de sensores de satélites y su explotación con el fin de obtener en tiempo real una estimación de la lluvia a escala global. Y es clara la utilidad de estas mediciones, tanto para los modelos de circulación global como para la modelización hidrológica en escalas menores, como sería el caso de cuencas poco o nada instrumentalizadas y con ello, fortalecer la capacidad de gestión de los recursos hídricos, mejorar la predicción del clima y desastres naturales y ofrecer rigor científico que ayude a tomar decisiones informadas. Actualmente, la lluvia estimada por satélite está sujeta a diversos errores debido a problemas instrumentales, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas y relaciones complejas entre las variables observadas y la lluvia, entre otras razones (Nikolopoulos *et al.*, 2010; Semire *et al.*, 2012); esto podría limitar su uso en aplicaciones hidrológicas, por lo que la reducción de este error es clave para su aplicación hidrológica.

El objetivo de la tesis es evaluar la utilidad de dos productos de lluvia estimada de satélite, a través de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca mediterránea extratropical, como una alternativa de estimación de la precipitación en aquellas regiones donde los pluviómetros convencionales son escasos o inexistentes. La zona de estudio es la cuenca del río Júcar que está localizada al este de la península Ibérica (Valencia, España) con un área drenada de 21,500 km<sup>2</sup>, caudal medio de 43 m<sup>3</sup>/s, lluvia media de 500 mm y temperatura media de 14° C. El relieve está formado por cadenas de montañas del sistema Ibérico, una meseta continental y una llanura costera; con altitudes máximas de 1770 msnm. Los productos de satélite tienen una resolución temporal diaria y resolución espacial de 0.25° (PERSIANN) y 0.04° (PERSIANN-CCS). Estos productos estiman la lluvia a partir de información de múltiples satélites geosincrónicos (GOES, GMS, MeteoSat) que se actualizan con información de satélites con sensores de microondas pasivos (TRMM, NOAA, DMSP). La información hidrometeorológica con base en tierra (lluvia, caudal, temperatura e información de embalses) ha sido proporcionada por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) y el Sistema Automatizado de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del río Júcar (SAIH-CHJ) para un período de tiempo del 01 de Enero del 2003 y el 31 de Octubre del 2009.

Para caracterizar el error de la lluvia estimada de satélite, se comparó con la lluvia de referencia con base en tierra, a través de herramientas estadísticas que permiten sintetizar el análisis y tener una visión más detallada del error. Así, para cuantificar el grado de dependencia se usó el análisis de correlación con test estadístico de Pearson y Kendall. Además, se obtuvieron: índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (E), ratio de la raíz del error cuadrático medio y la desviación estándar de las observaciones (RSR), error en volumen (Ev), estadísticos de detección, curva doble masa y técnicas gráficas. Respecto al desempeño del modelo hidrológico, se evaluó a través de índices de eficiencia y técnicas gráficas, en calibración, validación y propagación del error.

Los resultados, específicos para la zona de estudio, indican que las correlaciones espaciales entre la lluvia estimada a partir de satélite y la lluvia de referencia, es aceptable a escala anual, menos

aceptable a escala mensual, pero pobre a escala diaria. En invierno la correlación diaria es más débil, debido a que las lluvias se concentran más en las zonas montañosas y tal vez, este efecto orográfico no está bien detectado por los satélites. Por el contrario, en verano se observa el patrón opuesto, con correlación positiva significativa, posiblemente por la mayor presencia de días sin lluvia (valor cero). Esto se ve reflejado en valores más altos con el coeficiente de Pearson en verano, ya que la presencia de ceros favorece una mayor correlación; en cambio el coeficiente de Kendall representa mejor estos casos, ya que resiste el efecto de valores extremos (valores mínimos en este caso). También se obtienen errores altos con lluvias máximas y con frecuencia sobrestimación de lluvias ligeras.

En general, la lluvia PERSIANN-CCS sobrevalora, mientras que PERSIANN subestima a diferentes escalas de agregación de cuenca. Además, PERSIANN tiene mayor probabilidad de detección de lluvia, pero también de falsas alarmas. La detección de lluvia es menor en la subcuenca del río Albaida (zona costera con lluvias torrenciales y probables SCM en otoño) que en la subcuenca de Pajaroncillo (zona montañosa con lluvias orográficas). Es decir, estas diferencias en la detección por los dos productos de satélite, están siendo influenciadas por las características climáticas y fisiográficas de la zona, que coincide con lo reportado por Hossain y Huffman (2008).

El error en volumen (Ev) de la lluvia, para todas las escalas de agregación de cuenca, subestima con PERSIANN y sobrestima con PERSIANN-CCS. Este error tendrá consecuencias en la modelación hidrológica; sin embargo, desde el punto de vista de la modelación, el error se corrige mejor con la sobrestimación que con la subestimación de la lluvia. La cuenca Albaida (1301 km<sup>2</sup>) tienen mejor rendimiento en términos del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) en la estimación de la lluvia con los dos productos de satélite posiblemente por la mayor presencia de lluvias convectivas que el satélite identifica mejor, y que coincide con lo reportado por Ebert *et al* (2007). En cambio la cuenca más pequeña Pajaroncillo (861 km<sup>2</sup>) tiene mejor rendimiento en Ev pero solo con el producto PERSIANN-CCS. Al respecto, la lluvia orográfica en Pajaroncillo (altitud de 1009 a 1726 msnm) no está siendo bien detectada por el satélite debido a que las montañas emiten una radiación muy variable que dificultan la detección de los satélites con sensores de microondas pasivos, reportado por Levizzani (2008); sin embargo este efecto pareciera que disminuye con una mejor resolución de satélite.

La calibración de los parámetros del modelo hidrológico TETIS ha permitido elevar el rendimiento en la modelación. También, diversos autores realizaron una calibración de su modelo hidrológico para mejorar el rendimiento con los productos de lluvia estimada de satélite (Stisen y Sandholt, 2010; Bitew y Gebremichael, 2011b; Bitew *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2012). Es así que, en la modelación hidrológica, se obtienen rendimientos “insatisfactorios” con PERSIANN, mientras que con PERSIANN-CCS los rendimientos pasan a ser “satisfactorios”. Los resultados son alentadores con lluvia PERSIANN-CCS y tal parece que una mejor resolución de los datos raster de la lluvia, una menor FIAS y un error de sobrestimación en el volumen de la lluvia, ocasionan que este producto de satélite se adapte mejor en la modelación hidrológica. Similares

resultados respecto a productos de satélite con mejor resolución espacial, son reportados por Nikolopoulos *et al.* (2010) con el producto KIDD (4 km) de mejor resolución espacial, respecto de los productos TRMM-3B42 (0.25°) y KIDD (25 km). Por el contrario, en la modelación con lluvia PERSIANN, una resolución espacial grosera de los datos raster de la lluvia y el error de la subestimación en el volumen de la lluvia están afectando negativamente a la modelación, ya que hay insuficiente lluvia que alimente el Ciclo Hidrológico, pero esto posiblemente se esté amortiguando con la mayor probabilidad de detección de la lluvia PERSIANN.

Como el modelo hidrológico trata de mantener un comportamiento similar al caudal observado (ya que la estrategia de calibración es una función de este caudal y no de algún componente del balance hídrico), se obtiene que el factor corrector de evapotranspiración se reduce un 71% con PERSIANN e incrementa un 32% con PERSIANN-CCS para finalmente obtener una evapotranspiración que se reduce con PERSIANN e incrementa con PERSIANN-CCS. Un comportamiento similar es reportado en el componente de evapotranspiración con subestimación de lluvia PERSIANN, por Bitew y Gebremichael (2011b) y Moreno *et al.* (2012).

En lo que respecta a la propagación del error de la estimación de la lluvia a la simulación hidrológica, el error en volumen de la lluvia se amortigua a través del proceso de transformación lluvia-escorrentía. Al contrario del error de la lluvia en términos de E y RSR, que empeoran con la modelación hidrológica, excepto en las cuencas más pequeñas como Pajaroncillo (861 km<sup>2</sup>) y Albaida (1,301 km<sup>2</sup>).

De cara a mejorar las posibilidades de uso práctico de la lluvia de satélite, se implementó un modelo Bayesiano para combinar información de pluviómetros con lluvia PERSIANN-CCS con diferentes densidades de pluviómetros en la subcuenca montañosa de Pajaroncillo. Los resultados, específicos para la zona de estudio, indican que el valor medio de la lluvia estimada con PERSIANN-CCS mejora a partir de densidades menores a 100 km<sup>2</sup>/pluviómetro. Por el contrario, para densidades mayores de 100 km<sup>2</sup>/pluviómetro, el valor medio empeora en un rango del 20 al 200%, según aumente la densidad de la red de pluviómetros. Se encontró un comportamiento similar con el resto de estadísticos. Así, es clara una mejora significativa en los estadísticos para una densidad menor a 100 km<sup>2</sup>/pluviómetro, con incremento de POD, CSI, PC y HSS, y reducción de FAR. Además, se observa una mejora notable del FBIAIS en todas las densidades de pluviómetros, con la excepción de la densidad de 45 km<sup>2</sup>/pluviómetro. Los índices de eficiencia de lluvia E, RSR y Ev, se estabilizan a una densidad menor a 100 km<sup>2</sup>/pluviómetro.

En lo que respecta a la modelación hidrológica utilizando el modelo Bayesiano de combinación de lluvia, se obtienen rendimientos “buenos” a “muy buenos” con densidades menores a 100 km<sup>2</sup>/pluviómetro, obteniendo el mejor rendimiento para una densidad de 72 km<sup>2</sup>/pluviómetro en el que su hidrograma reproduce adecuadamente el flujo base y la forma de la curva de recesión, detecta la mayoría de caudales máximos y días en que ocurren, pero subestima su valor máximo en un 37%. No se debe descartar que esta subestimación podría deberse a que en regiones montañosas,

como Pajaroncillo, las estaciones pluviométricas tienden a estar en los valles y con ello subestimar la lluvia orográfica (Ebert *et al.*, 2007; Álvarez, 2011). Respecto a la propagación del error de la lluvia, resulta que el error en volumen de la lluvia se amortigua en todas las densidades de pluviómetro (a excepción con una densidad de 431 km<sup>2</sup>/pluviómetro), pero empeora en términos de E y RSR, excepto para densidades menores a 172 km<sup>2</sup>/pluviómetro.

Como conclusión final se puede decir que el nuevo producto de estimación de lluvia PERSIANN-CCS, además de incrementar su resolución espacial, también mejora en cuanto a su fiabilidad de uso en la modelación hidrológica, especialmente si se combina con datos de pluviómetro, convirtiéndose en el punto de partida de futuras investigaciones.