

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**PROPAGACIÓN DEL ERROR DE LA LLUVIA ESTIMADA POR SATÉLITE
EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN UNA CUENCA
EXTRATROPICAL MEDITERRÁNEA**

Lia Ramos Fernández^{1,2} y Félix Francés García²

liarf@lamolina.edu.pe, ffrances@hma.upv.es

1 Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

2 Instituto de Investigación en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, España.

CONTENIDO

RESUMEN:

La lluvia estimada por satélite está sujeta a diversos errores que introducen incertidumbre que debe evaluarse y cuantificarse para su uso en modelación hidrológica. Por esta razón, el objetivo de este estudio es obtener la propagación del error de la lluvia al caudal simulado, a través de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca extratropical mediterránea, para evaluar la utilidad de la lluvia estimada de satélite en aplicaciones hidrológicas, como una alternativa a los pluviómetros convencionales, escasos en algunas zonas con características similares a la zona de estudio. Información de pluviómetros se usó para evaluar dos productos de lluvia estimada de satélite con diferente resolución espacial (0.25° y 0.04°) a escala diaria para un periodo de tiempo de 01 Enero de 2003 a 31 de Octubre de 2009 al este de la Península Ibérica. Los resultados con el producto de última generación (PERSIANN-CCS) son esperanzadores.

ABSTRACT:

Satellite-estimated rainfall is subject to a number of errors that introduce uncertainty and this should be assessed and quantified in order to be used in hydrological modeling. For this reason, the main purpose of this work is obtain the error propagation of rain to simulated flow by a distributed hydrological model in an extratropical Mediterranean basin, to evaluate the usefulness of satellite-estimated rainfall in hydrological applications, as an alternative to conventional gauges, scarce in some areas with similar characteristics to the area of study. Ground gauge rainfall were used to evaluate two satellite-estimated rainfall products with different spatial resolutions (0.25° and 0.04°) at daily resolution for period length from January 1, 2003 to October 31, 2009 in the eastern Iberian Peninsula. The results with the last generation product (PERSIANN-CCS) are promising.

PALABRAS CLAVES:

Modelación hidrológica distribuida, Teledetección de lluvia, PERSIANN, PERSIANN-CCS.

INTRODUCCIÓN

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. Recientes avances especialmente en términos de evaluación cuantitativa de patrones de lluvia, resolución del sensor y frecuencia de muestreo, abren nuevos horizontes en aplicaciones hidrológicas a escala global (AghaKouchak *et al.*, 2010; Nikolopoulos *et al.*, 2010; Kidd and Levizzani, 2011). 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.

Sensores que operan en longitudes de onda del infrarrojo (IR) de satélites geoestacionarios, proporcionan información útil sobre nubes de tormenta identificándolas por su baja temperatura en el tope de la nube; en cambio, sensores de microondas pasivos (PMW), comúnmente instalados en satélites de baja órbita, reflejan la distribución vertical de hidrometeoros en la nube pero tienen baja frecuencia espacio temporal. Hay pocos productos de lluvia estimada de satélite, destacando los resultados producidos por el algoritmo PERSIANN (<http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/>), que usa una red neuronal para combinar alta frecuencia de muestreo de imágenes infrarrojas de nubes en satélites geoestacionarios con la alta calidad de datos del sensor de microondas del satélite de baja órbita TRMM a resolución espacial de 0.25° (Sorooshian *et al.*, 2000; Sorooshian *et al.*, 2002; Sorooshian *et al.*, 2005; Hsu and Sorooshian, 2008; Kuo-lin and Sorooshian, 2008). Recientemente, la nueva versión PERSIANN-CCS (<http://fire.eng.uci.edu/CCS/>) introduce la categorización de las nubes en base a la altura en el tope, geometría y textura, estimada a partir de imágenes de satélite para obtener intensidades de lluvia de diferentes nubes, lo que ayuda en la detección de nubes cirros y distinguir diferentes sistemas convectivos, además de conseguir una resolución espacial de 0.04° (Hong *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2007; Kuo-lin *et al.*, 2010). Kuo-lin *et al.* (2010) indican que PERSIANN-CCS obtiene mejores coeficientes de correlación con nubes frías (menos de 253°K), pero se requiere más investigación para capturar nubes cálidas. Bitew y Gebremichael (2010) evaluaron el producto PERSIANN-CCS con lluvia diaria de pluviómetros en terreno montañoso de Etiopía y sus resultados indican que subestima la lluvia 50% en lluvias máximas y 49% en lluvia mensual; además tiene dificultad en detectar lluvias menores de 1.6 mm/día.

La lluvia estimada por satélite está sujeta a diversos errores debido a problemas instrumentales, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, relación no lineal entre la variable observada y la lluvia, entre otras razones (Nikolopoulos *et al.*, 2010). Hossain and Anagnostou (2006), Bellerby y Sun (2005) desarrollaron modelos para caracterizar la compleja naturaleza estocástica del error. En ese sentido, Sorooshian *et al.* (2011) indican que es necesario investigar las propiedades del error en diferentes regiones climáticas, regímenes pluviales, condiciones superficiales, estaciones del año y altitud. Estos errores introducen a su vez incertidumbre que debe evaluarse y cuantificarse en las aplicaciones hidrológicas. Es así que Hsu *et al.* (2002) evaluaron el caudal de la cuenca del río Leaf (1949 km²), afluente del río Mississippi, con lluvia PERSIANN y modelo hidrológico SAC-SMA, obteniendo alta incertidumbre con caudales máximos. Similares resultados reportaron los trabajos de Moradkhani *et al.* (2006), Moradkhani y Meskele (2010) con lluvia PERSIANN-CCS en la misma cuenca. Muy recientemente, varios estudios se han enfocado en la aplicación hidrológica de la lluvia estimada por satélite. Así, El-Sadek *et al.* (2011) simuló el caudal del río Mimbres en USA (cuenca de 477 km²) con lluvia PERSIANN y utilizando el modelo hidrológico SWAT, reportando eficiencia de Nash–Sutcliffe (E) de 0.19 en calibración y concluyendo que la lluvia PERSIANN puede no ser adecuada para esta cuenca montañosa.

Asimismo, Bitew and Gebremichael (2011a) (2011b) evaluaron la lluvia PERSIANN a través de los modelos SWAT y MIKE SHE en las cuencas Gilgel Abay (1656 km²) y Koga (299 km²) en Etiopía de topografía compleja, clima semihumedo y lluvia anual de 1300 mm con un 70% en verano. Estos

autores reportaron un pobre rendimiento del caudal simulado diario, y el aumento del área de la cuenca de 299 km² a 1656 km² deteriora las simulaciones obtenidas. Finalmente, Demaria et al. (2011), investigaron la estimación de la lluvia en el caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCSs) mediante el producto PERSIANN, en la cuenca del río La Plata (3.2×10⁶ km²), reportando una subestimación de la lluvia media y sobrestimación de las áreas de tormenta. Asimismo, con el modelo hidrológico VIC evaluaron la localización espacial de la lluvia en la subcuenca del río Iguazu (70,000 km²) y concluyeron que la modelación hidrológica de la cuenca disminuye el efecto del error de PERSIANN en la localización de la lluvia.

En este sentido, el objetivo de este estudio ha sido la evaluación de la propagación del error de la lluvia al caudal simulado, a través del modelo hidrológico distribuido TETIS (Francés *et al.*, 2002; Francés *et al.*, 2007) en una cuenca mediterránea (y por tanto extratropical), es decir, con un clima distinto de los trabajos reportados anteriormente.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en la cuenca del río Júcar (Figura 1), que desemboca en el mar Mediterráneo con un área drenada de 21500 km², caudal promedio de 43 m³/s y altitudes máximas de 1700 msnm. La lluvia media anual es de 500 mm (pero varía desde algo más de 200 en algunas zonas hasta los 1000 mm en zona montañosa). Las lluvias son principalmente de origen Mediterráneo, en los casos más extremos causados por Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) usualmente en otoño (51% de lluvia anual). Las precipitaciones de origen Atlántico tienen mayor contribución en las zonas montañosas de la cuenca (38% de lluvia anual) con tendencia a decrecer hacia la costa. Información de pluviómetros fueron usados para evaluar dos productos de satélite con diferente resolución espacial, 0.25° (formato ASCII) y 0.04° (formato binario), a escala diaria para el período del 01 de Enero del 2003 al 31 de Octubre del 2009.

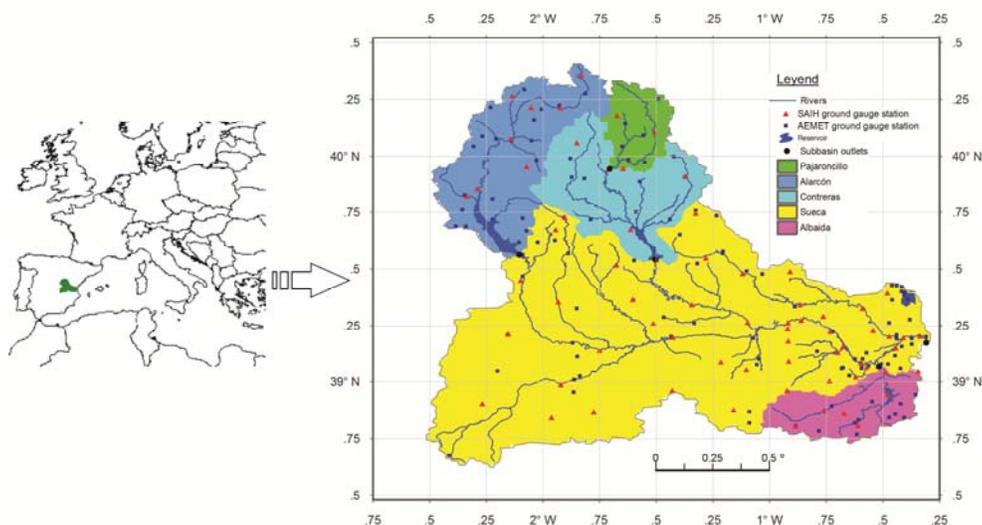


Figura 1.- Ubicación geográfica de la cuenca del río Júcar en la parte oriental de la Península Ibérica (Valencia, España).

Se evaluó el patrón espacio-temporal de la lluvia y su particular orografía y climatología, que influye en la detección de la lluvia por los satélites; y por lo mismo, hace complejo su uso en aplicaciones hidrológicas. Por lo que, se caracterizó la distribución espacio-temporal de la lluvia de pluviómetros y lluvia estimada de satélite. Los productos de satélite se re proyectaron con el método del vecino más cercano, a proyección UTM. Para generar campos de lluvia de pluviómetros con la

misma resolución de los productos de satélite, se usó interpolación IDW. Los campos de lluvia mensual y anual se obtuvieron adicionando campos de lluvia diaria y mensual respectivamente.

Para el procesamiento de los datos, fue necesario escribir un programa en MATLAB y ArcGIS-Toolbox, que permitió automatizar el procesamiento de los datos. En el caso de lluvia areal, se calculó por interpolación IDW como output del modelo TETIS, a diferentes escalas de cuenca (861, 1301, 2883, 3427 y 21523 km²). Se cuantificó el grado de dependencia entre los productos de lluvia, usando análisis de correlación con test estadísticos Pearson y Kendall. También se evaluó la eficiencia de la lluvia a través de E, ratio de RMSE-desviación estándar de observaciones (RSR), error del volumen, matrices de probabilidad de acierto de lluvia y técnicas gráficas (“scatter plot” con histogramas, “box plot” y mapas).

El procedimiento seguido en la modelación hidrológica con el modelo TETIS está descrito en Francés et al. (2007) y Vélez et al. (2009). La propagación del error se analizó a través de hidrogramas simulados con lluvia estimada de satélite que se compararon con hidrogramas obtenidos usando pluviómetros como lluvia input (lluvia de referencia), y esto se cuantificó con los índices E, RSR y error en volumen. Para facilitar la interpretación de la propagación del error los índices de eficiencia de lluvia versus caudal son graficadas, visualizándose si el error en la lluvia se propaga en un error igual a la escorrentía ó se amortigua ó empeoran a través de la modelación hidrológica para diferentes escalas de cuenca.

RESULTADOS

Las correlaciones entre la lluvia estimada a partir de satélite y la obtenida mediante los pluviómetros en tierra es aceptable a escalas anuales (Figura 2) y mensuales (Figura 3), pero pobre a escala diaria.

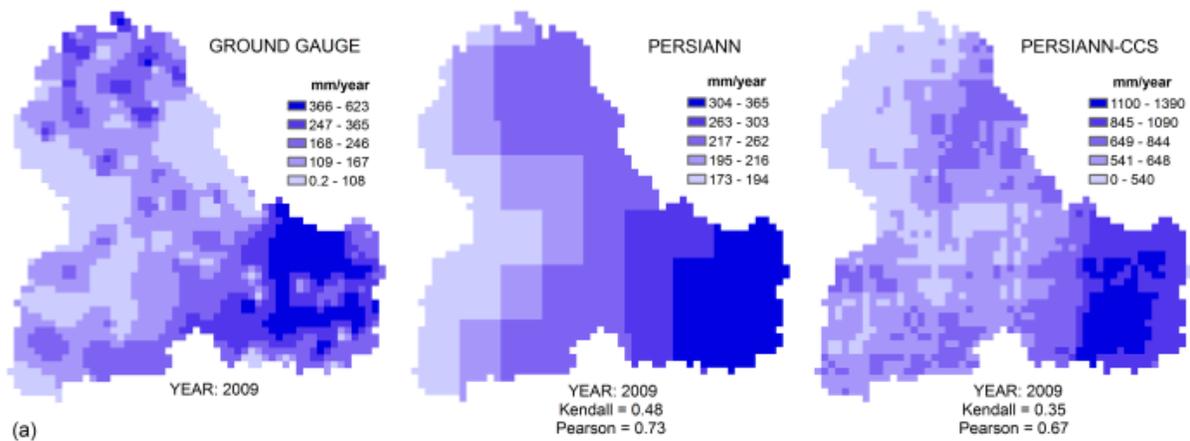


Figura 2.- Lluvia estimada en la cuenca del río Júcar en el año 2009 a partir de pluviómetros en tierra y satélite (PERSIANN y PERSIANN-CCS).

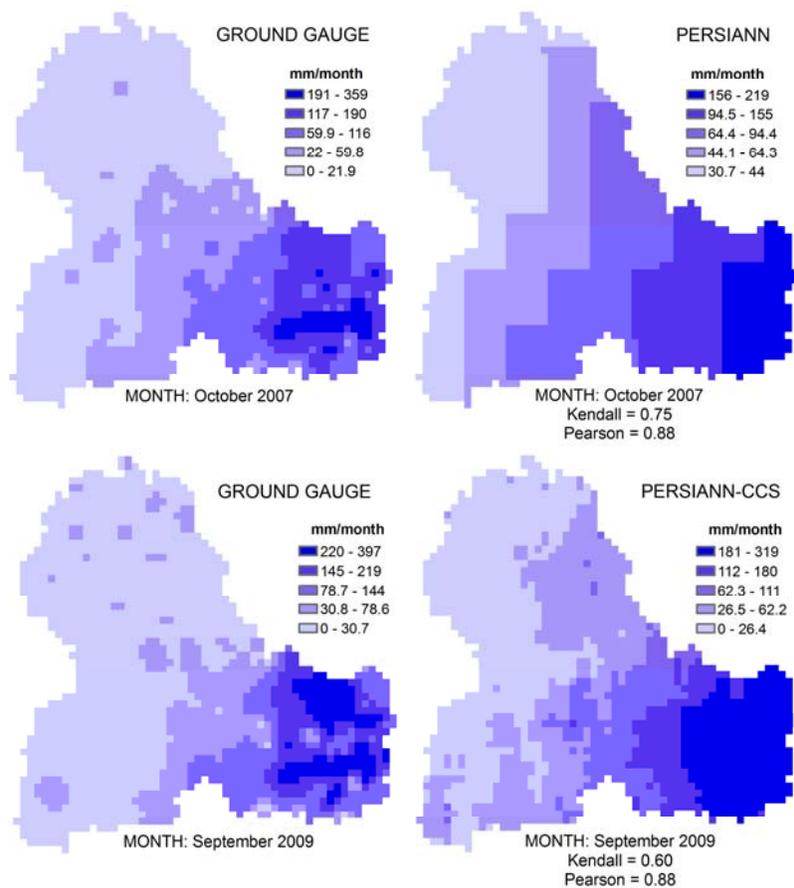


Figura 3.- Lluvia estimada mensual en la cuenca del río Júcar a partir de pluviómetros en tierra y satélite. Arriba: Con PERSIANN en Octubre 2007. Abajo: Con PERSIANN-CCS en Septiembre 2009.

En la Región Noroeste de la cuenca caracterizada por montañas del Sistema Ibérico, altitudes muy altas y presencia de lluvia orográfica; la lluvia estimada de satélite tiende a subestimar de 4 a 42% a escala anual, sobreestimar de 21 a 241% a escala mensual dependiendo de la resolución de satélite. En cambio, en la Región Sureste, caracterizada por altitudes bajas con presencia de lluvia Mediterránea y SCMs; tiende a sobreestimar 157% con PERSIANN-CCS y subestimar 28% con PERSIANN a escala anual; además, subestima de 11 a 31% a escala mensual dependiendo de la resolución de satélite.

Con lluvia areal diaria a diferentes escalas de cuenca, la lluvia de satélite obtiene lluvias máximas con errores muy altos, sobreestimando con frecuencia lluvias ligeras. En general, PERSIANN-CCS tiene mayor probabilidad de acierto de lluvia, además, valores más altos que pluviómetros y PERSIANN (excepto a 21523 km²). Se obtiene valores de E que varían de -0.93 a 0.16, RSR de 0.9 a 1.4 y error del volumen de -42 a 71%, dependiendo de la resolución de satélite (Figura 4). En el caso de cuencas pequeñas, tienen mejor RSR y E; también tienen mejor rendimiento en error del volumen pero solo con PERSIANN-CCS, excepto a 1301 km² (subcuenca cercana a la costa) debido posiblemente a que está afectada por lluvias mediterráneas inestables por SCMs.

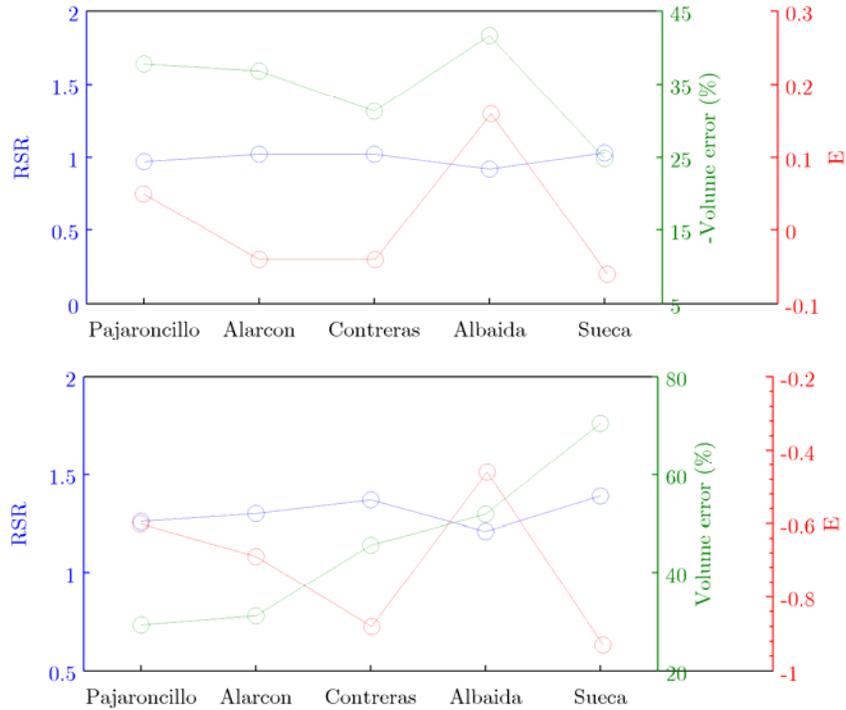


Figura 4.- Índices de eficiencia de lluvia areal diaria, respecto de la estimación con pluviómetros. Arriba: PERSIANN. Abajo: PERSIANN-CCS

Con respecto a la modelación hidrológica (Figura 5); con lluvia PERSIANN se obtiene una pobre performance con valores de E, RSR y error de volumen de 0.27, 0.85 y -10.48% en calibración; -2.02, 1.74 y 54.08% en validación temporal. En cambio, con lluvia PERSIANN-CCS (30% más que con pluviómetros), se obtiene una aceptable performance, con valores de E, RSR y error de volumen de 0.51, 0.70 y -7.55% en calibración; -0.90, 1.38 y 53.93% en validación temporal; además el hidrograma simulado en calibración reconoce muy bien el flujo base y detecta la mayoría de picos y días en que ocurren los eventos, también reconoce el caudal máximo pero subestima su valor en 48%.

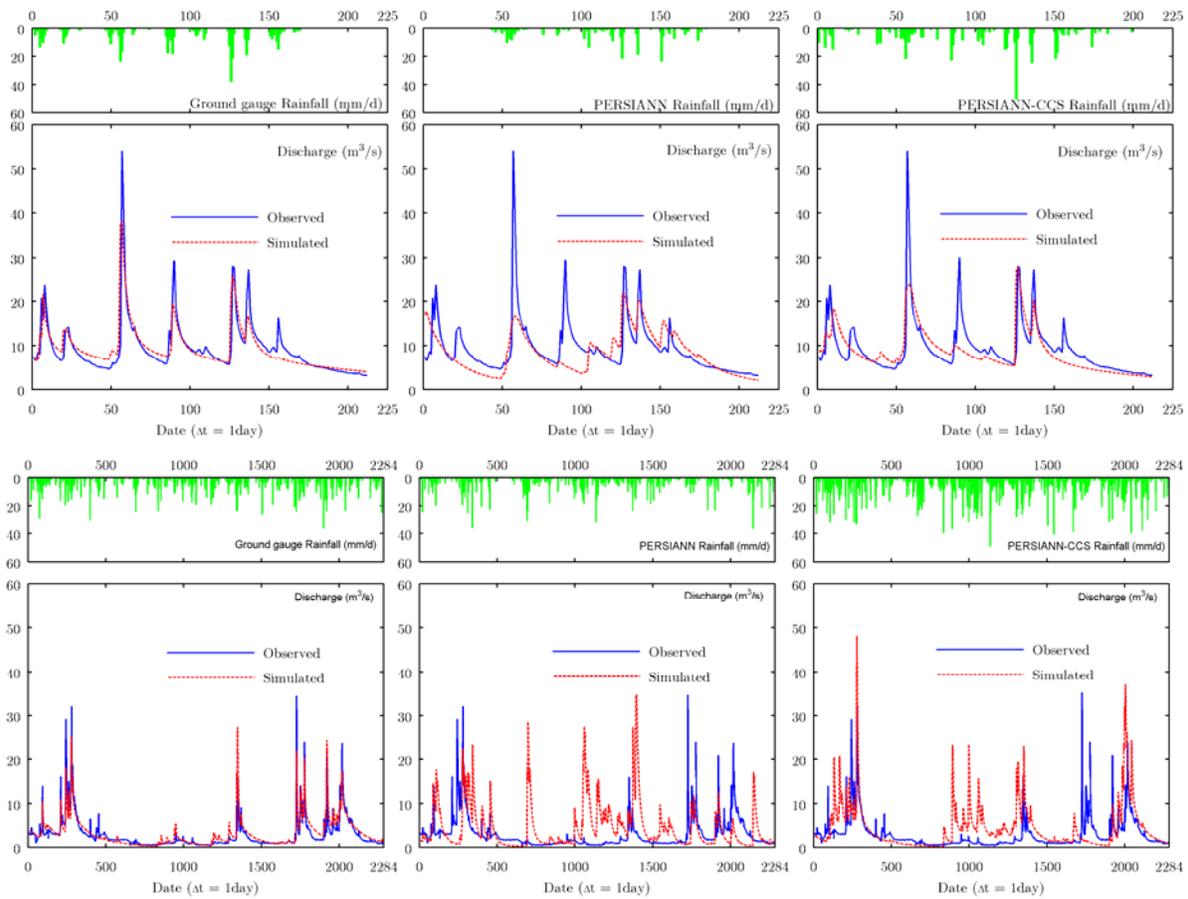


Figura 5.- Hidrogramas generado en la calibración (arriba) y validación temporal (abajo) en la estación Pajaroncillo con los tres escenarios de lluvia.

En lo que respecta a la propagación del error de la estimación de la lluvia a la simulación de la escorrentía (Figura 6), el error en volumen de la lluvia se amortigua a través de la modelación hidrológica; y el error de la lluvia en términos de E y RSR, empeoran con la modelación hidrológica, excepto en cuencas pequeñas como Pajaroncillo (861 km²) y Albaida (1301 km²), que están perfectamente ajustados con la línea 1:1

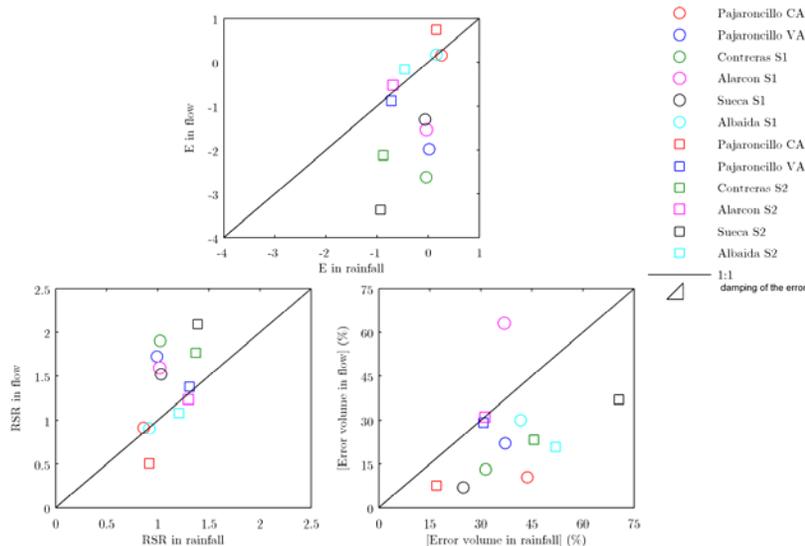


Figura 6.- Propagación del error de la lluvia a la escorrentía con PERSIANN (S1) y PERSIANN-CCS (S2).

CONCLUSIÓN

La lluvia estimada por satélite está sujeta a diversos errores que introducen incertidumbre en los resultados obtenidos. Por lo tanto, eliminar el error en las estimaciones de lluvia mediante satélites es clave para su aplicación hidrológica. Se evaluó dos productos de lluvia estimada de satélite con diferente resolución espacial (PERSIANN y PERSIANN-CCS con resoluciones de 0.25° y 0.04° respectivamente) a través de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca extratropical, en particular mediterránea.

Los resultados, específicos para la zona de estudio, indican que las correlaciones entre la lluvia estimada a partir de satélite y la obtenida mediante los pluviómetros en tierra son aceptables a escala anual y mensual, pero pobre a escala diaria. En la zona montañosa la lluvia estimada de satélite tiende a subestimar a escala anual y sobreestimar a escala mensual. Mientras que en la zona costera tiende a sobrestimar con PERSIANN-CCS y subestimar con PERSIANN a escala anual; además, la precipitación se subestima a escala mensual debido posiblemente a que está afectada por lluvias mediterráneas inestables por SCMs.

En la modelación hidrológica, se obtienen pobres resultados con PERSIANN, mientras que con PERSIANN-CCS puede decirse que son aceptables. Es decir, el nuevo producto de estimación de la lluvia además de mejorar la resolución espacial también mejora en cuanto a su fiabilidad de uso en modelación hidrológica.

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, aunque el error de la lluvia en términos de E y RSR, empeoran con la modelación hidrológica.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido subvencionado por la Universidad Nacional Agraria La Molina UNALM (Perú), Fundación Carolina (España) y el Ministerio Español de Ciencia e Innovación a través del proyecto Consolider-Ingenio “SCARCE” (2010-CSD2009-00065).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AghaKouchak A, Nasrollahi N, Li J, Imam B, Sorooshian S.** (2010). Geometrical Characterization of Precipitation Patterns. *Journal of Hydrometeorology* 12: 274-285 doi: 10.1175/2010jhm1298.1.
- Bellerby T, Sun J.** (2005). Probabilistic and ensemble representations of the uncertainty in an IR/MW satellite precipitation product. *Journal of Hydrometeorology* 6: 1032–1044.
- Bitew M, Gebremichael M.** (2010). Evaluation Through Independent Measurements: Complex terrain and humid tropical region in Ethiopia. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*: 205-214.
- Bitew MM, Gebremichael M.** (2011a). Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 1147-1155 doi: 10.5194/hess-15-1147-2011.
- Bitew MM, Gebremichael M.** (2011b). Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* 47: W06526 doi: 10.1029/2010wr009917.
- Demaria EMC, Rodriguez DA, Ebert EE, Salio P, Su F, Valdes JB.** (2011). Evaluation of mesoscale convective systems in South America using multiple satellite products and an object-based approach. *J. Geophys. Res.* 116: D08103 doi: 10.1029/2010jd015157.

- El-Sadek A, Bleiweiss M, Shukla M, Guldan S, Fernald A.** (2011). Alternative climate data sources for distributed hydrological modelling on a daily time step. *Hydrological Processes* 25: 1542-1557 doi: 10.1002/hyp.7917.
- Francés F, Vélez JJ, Vélez JJ.** (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332: 226-240 doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.032.
- Francés F, Vélez JJ, Vélez JJ, Puricelli M.** (2002). Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain In *Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*. Las Vegas, USA.
- Hong Y, Gochis D, Cheng J, Hsu K, Sorooshian S.** (2007). Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network. *Journal of Hydrometeorology* 8: 469-482 doi: 10.1175/JHM574.1.
- Hong Y, Hsu K, Gao X, Sorooshian S.** (2004). Precipitation estimation from remotely sensed imagery using artificial neural network-cloud classification system. *Journal of Applied Meteorology* 43: 1834-1853.
- Hossain F, Anagnostou E.** (2006). A two-dimensional satellite rainfall error model. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 44: 1511-1522.
- Hsu K, Sorooshian S.** (2008). Satellite-Based Precipitation Measurement Using PERSIANN System. In *Hydrological Modelling and the Water Cycle*, Sorooshian S, Hsu K, Coppola E, Tomassetti B, Verdecchia M, Visconti G (eds). *Water Science and Technology Library*; 27-28.
- Kidd C, Levizzani V.** (2011). Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 1109-1116 doi: 10.5194/hess-15-1109-2011.
- Kuo-lin H, Behrangi A, Bisher I, Soroosh S.** (2010). Extreme precipitation estimation using satellite-based PERSIANN-CCs algorithm. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*: 49-67.
- Kuo-lin H, Sorooshian S.** (2008). Satellite-Based Precipitation Measurement using PERSIANN system. *Water Science and Technology Library* 63: 27-48.
- Moradkhani H, Meskele TT.** (2010). Probabilistic Assessment of the Satellite Rainfall Retrieval Error Translation to Hydrologic Response. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*: 229-242.
- Nikolopoulos EI, Anagnostou EN, Hossain F.** (2010). Error propagation of satellite-rainfall in flood prediction applications over complex terrain: A case study in Northeastern Italy. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*: 215-228.
- Sorooshian S, AghaKouchak A, Arkin P, Eylander J, Foufoula-Georgiou E, Harmon R, Hendrickx J, Imam B, Kuligowski R, Skahill B, G S-J.** (2011). Advanced concepts on remote sensing of precipitation at multiple scales. *Bulletin of the American Meteorological Society* doi: 10.1175/2011BAMS3158.1.
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, Maddox RA, Hong Y, Gupta HV, Imam B.** (2002). Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRM satellite information. *Journal of Climate* 15: 983-1001.
- Sorooshian S, Hsu K-L, Gao X, Gupta HV, Imam B, Braithwaite D.** (2000). Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81: 2035-2046 doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2.
- Sorooshian S, Hsu K-L, Imam B, Yang H.** (2005). Global Precipitation Estimation from Satellite Image using Artificial Neural Networks In *International G-WADI Modelling Workshop*. National Institute of Hydrology, India. 28 February - 5 March 2005.