

# *Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales*

*Caso de estudio para vertientes de alta montaña*

## *Development of hydrological models and surface process modelization*

*Study case in high mountain slopes*

Recibido para evaluación: 30 de Septiembre de 2011  
Aceptación: 01 de Diciembre de 2011  
Recibido versión final: 21 de Diciembre de 2011

Juan Carlos Loaiza<sup>1</sup>  
Valentijn R. N.<sup>2</sup>

### RESUMEN

Los modelos hidrológicos son útiles por varias razones y entre otras porque permiten predecir los flujos al interior de los sistemas hidrológicos, lo cual es importante en la predicción de inundaciones y fenómenos violentos asociados a los flujos de agua, especialmente en materiales con un alto grado de meteorización. La combinación de estos modelos con predicciones meteorológicas, especialmente con modelos para precipitación, permite modelar el comportamiento del agua en el suelo. En muchos casos, este tipo de modelos es muy sensible a la evapotranspiración. En estudios climáticos, los procesos superficiales tienen que ser representados adecuadamente. Si se buscan resultados fiables, la calibración y la validación de modelos hidrológicos es una componente muy importante en la aplicación de este tipo de modelos. Este artículo se trata de un ejercicio práctico de aplicación de información hidrológica completa a escala detallada para una cuenca de alta montaña, considerando los usos y tipos de suelo representativos. La información de humedad del suelo, infiltración, escorrentía y precipitación es utilizada en la calibración y validación de un modelo hidrológico completo "TOPLATS" para la simulación del comportamiento de la humedad del suelo. Los resultados encontrados demuestran que es posible la implementación de un modelo hidrológico mediante la utilización de información de humedad del suelo y ecuaciones de calibración para Filtro de Kalman Extendido (EKF).

**Palabras claves:** Modelos hidrológicos, humedad del suelo, cuencas de alta montaña, dinámica del agua, Filtro de Kalman Extendido.

### ABSTRACT

Hydrological models are useful because allow to predict fluxes into the hydrological systems, which is useful to predict floods and violent phenomenon associated to water fluxes, especially in materials under a high meteorization level. The combination of these models with meteorological predictions, especially with rainfall models, allow to model water behavior into the soil. On most of cases, this type of models is really sensible to evapotranspiration. On climatic studies, the superficial processes have to be represented adequately. Calibration and validation of these models is necessary to obtain reliable results. This paper is a practical exercise of application of complete hydrological information at detailed scale in a high mountain catchment, considering the soil use and types more representatives. The information of soil moisture, infiltration, runoff and rainfall is used to calibrate and validate TOPLATS hydrological model to simulate the behavior of soil moisture. The finds show that is possible to implement an hydrological model by means of soil moisture information use and an equation of calibration by Extended Kalman Filter (EKF).

**Key words:** Hydrological models, soil moisture, high mountain catchments, water dynamics, Extended Kalman Filter.

---

1. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

2. Pauwels, Profesor de la Universidad de Gante, Bélgica. Laboratorio de hidrología y manejo de aguas

## 1. INTRODUCCIÓN

La regulación de los recursos hídricos y sus efectos sobre el ecosistema, asociados a las dinámicas antrópicas, son una prioridad especialmente en ambientes húmedos y semi- húmedos. En sistemas con una variabilidad intra- anual de la precipitación, la dinámica del agua del suelo tiene un fuerte impacto en las actividades antrópicas (Rius *et al.*, 2001; Ceballos *et al.*, 2002; Gallart *et al.*, 2005). En España, los sistemas hidrológicos han cambiado su dinámica durante el periodo 1921- 1999, asociado al predominio de las superficies forestales (Gallart y Llorens, 2001). Durante las últimas cinco décadas, los usos del suelo en las montañas del Pirineo han tenido un fuerte cambio en las dinámicas del uso del suelo de cultivos a pasturas y finalmente bosques. Estos cambios de uso del suelo son comunes en todas las áreas de alta montaña española (Lasanta, 1988; Ubalde *et al.*, 1999). Es bien conocido que cambios en los usos del suelo tienen un fuerte impacto en la dinámica hidrológica de las cuencas (Ubalde *et al.*, 1999; Gallart *et al.*, 2005; Orozco *et al.*, 2006). Uno de los puntos más importantes en el estudio de la dinámica hidrológica de una cuenca es la cantidad de agua almacenada en el suelo. Una determinación detallada de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo es importante para el estudio, comprensión y manejo de procesos biofísicos. En la práctica, la asimilación de datos asociados a humedad del suelo ha encontrado varias limitantes asociadas a los altos costos de medir directamente en campo. La gran heterogeneidad natural y problemas de escala hacen difícil hacer una descripción realista de los procesos hidrológicos en un sistema. Una alternativa es la utilización de modelos para simulación de la humedad del suelo. Estos modelos pueden sintetizar la distribución espacial de condiciones meteorológicas (lluvias), usos del suelo e información topográfica para producir predicciones del comportamiento esperado de la humedad del suelo en largos periodos de tiempo. La mayor dificultad en la aplicación de estos modelos radica en la definición de los parámetros hidrológicos. Muchos de estos parámetros hidrológicos pueden ser medidos directamente, y otros parámetros deben ser estimados mediante un procedimiento de calibración. Este procedimiento de calibración fluctúa desde la utilización de ecuaciones empíricas que pueden ser resueltas analíticamente, o a partir de sistemas complejos o ecuaciones diferenciales parciales que requieren de sistemas de algoritmos sofisticados que exigen soluciones computacionales complejas (Houser, 1998; Schuurmans *et al.*, 2003; Crow *et al.*, 2005; Goegebeur y Pauwels, 2007). Para conocer los valores de humedad del suelo en diferentes combinaciones de tipos y usos del suelo en cuencas de alta montaña mediterránea, se utilizó el modelo hidrológico TOPLATS en la asimilación de información para humedad del suelo. Este trabajo muestra una de tantas estrategias utilizadas para calibrar y validar modelos hidrológicos a diferentes escalas, concretamente busca mostrar un problema asociado a la implementación de modelos hidrológicos para humedad del suelo en zonas de alta montaña.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Zona de estudio

La Ribera Salada está localizada en el Pre- Pirineo meridional Catalán al NE de España; es una de las corrientes tributarias de la Cuenca del Río Ebro, con un área de 222,5 km<sup>2</sup> (Ver: figura 1). El relieve es tabular con predominio de pendientes entre 12 - 25 % y 25 - 50 %, con un rango de altitud entre 420 y 2.385 m. El sustrato consiste de conglomerados masivos, areniscas calcáreas y arcillolitas calcáreas. Los suelos son superficiales, calcáreos y pedregosos. Mas información acerca de la geología de la Cuenca puede consultarse en IGME (2001); ICC (2002). Algunos suelos son clasificados como Lithic y Typic Ustorthents (SSS, 2010). Información completa de suelos puede encontrarse en Orozco (2006). Los usos del suelo predominantes son bosque de vegetación de ribera, subalpino y submediterráneo. La zona agrícola corresponde a cultivos de papas, alfalfa y cereal con un bajo nivel de fertilización y pastos de alta montaña con un bajo nivel tecnológico (Ubalde *et al.*, 1999), (Ver: tabla 1). El clima es mediterráneo tendiendo a subalpino en las partes altas. La temperatura media de la Cuenca es 5.1° C en invierno y 20° C en verano, con valores de evapotranspiración de 400 mm en verano y 108 mm en invierno.

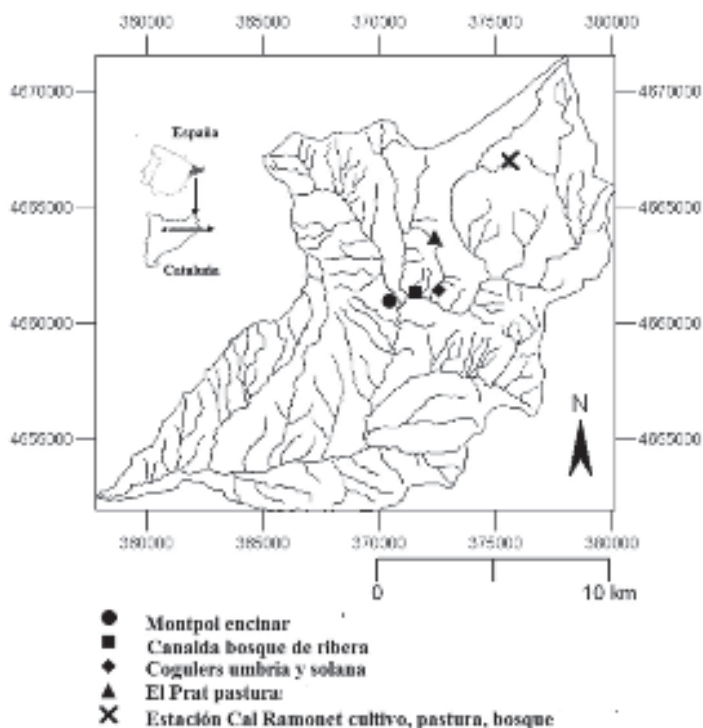


Figura 1. Zona de estudio

Estación	Uso del suelo	Tipo de suelo (SSS 2010)
Montpol encinar	<i>Quercus Ilex</i> (18)	Typic Calcustepts (4)
Canalda bosque de ribera	<i>Buxus Sempervirens</i> <sup>1</sup> <i>Pinus Sylvestris</i> <sup>1</sup> <i>Quercus Ilex</i> <sup>1</sup> (12)	Typic Ustifluvents (1)
Cogulers umbria	<i>Pinus Sylvestris</i> (25)	Typic Ustorthortents(25)
Cogulers solana	<i>Pinus Sylvestris</i> (25)	Typic Calcustepts (4)
El Prat pastura	Pasture (8)	Typic Haplustepts (12)
Cal Ramonet cultivo	<i>Solanum Tuberosum</i> <sup>2</sup> <i>Triticum Sativum Vulgare</i> <sup>2</sup> <i>Medicago Sativa</i> <sup>2</sup> <i>Onobrychis Viciifolia</i> <sup>2</sup> (15)	Typic Calcudolls(7)
Cal Ramonet pastura	Mountain Pasture (6)	Typic Calcudolls(7)
Cal Ramonet bosque	<i>Pinus uncinata</i> (18)	Miscellaneous Rock (1)

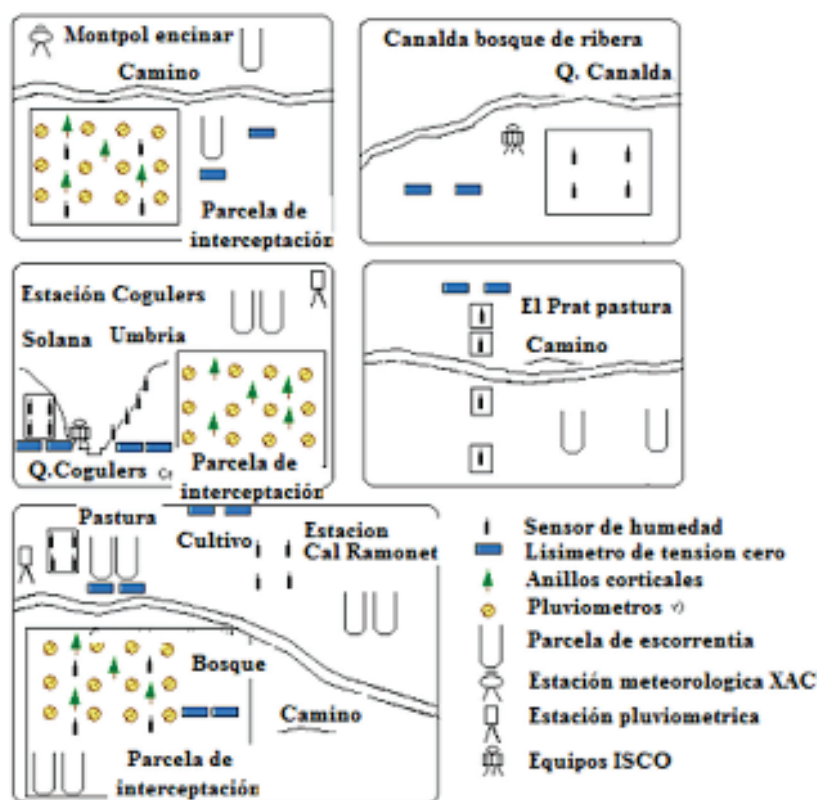
Tabla 1. Usos del suelo y tipos de suelo en los sitios de estudio (% en paréntesis).

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Desde 1997 hasta el presente, la cuenca de la Ribera Salada ha sido sujeta a gran número de investigaciones hidrológicas. En este estudio, cinco sitios han sido seleccionados de acuerdo a su representatividad en cuanto a suelos y usos del suelo para toda la cuenca (Ver: figura 2). La escorrentía superficial se midió mediante parcelas de escorrentía cerradas (área promedio 30 m<sup>2</sup>) implementadas con colectores tipo Gerlach's de (100 x 20 cm). Para medir la percolación se instalaron lisímetros a 20 – 50 cm de profundidad de acuerdo a las características del suelo. Los lisímetros consisten en una placa metálica de 20 x 30 cm, siendo su función la de coleccionar el agua infiltrada. La interceptación por el dosel se midió mediante la implementación de parcelas de interceptación compuestas por

pluviómetros y anillos para flujo cortical. Las ecuaciones para flujo cortical para cada uso del suelo fueron implementadas por Solsona (2005). Los parámetros físicos para conductividad hidráulica se midieron mediante el infiltrómetro de disco. La distribución de tamaño de partículas se calculó por el método del hidrómetro y humedad del suelo entre -33 Kpa y -1500 kPa (SSS, 1992). La caracterización pedológica de los perfiles de suelo fue realizada de acuerdo a los criterios de SSS (1993, 2010). La humedad del suelo se midió cada hora, mediante sensores de humedad tipo ECH<sub>2</sub>O, los cuales fueron calibrados in situ de acuerdo a las recomendaciones del fabricante Decagon®, obteniendo ecuaciones lineales de calibración para cada tipo de suelo, con R<sup>2</sup> que fluctúa entre 0,74 - 0,92. Más información relacionada con la calibración de sensores de humedad y características físicas de los suelos se puede encontrar en Loaiza & Pauwels (2008a). En la estación meteorológica de Montpol, propiedad de la Red Agrometeorológica de Cataluña (XAC), se midieron temperatura, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar neta, radiación global y precipitación a escala horaria.

Figura 2. Diseño experimental



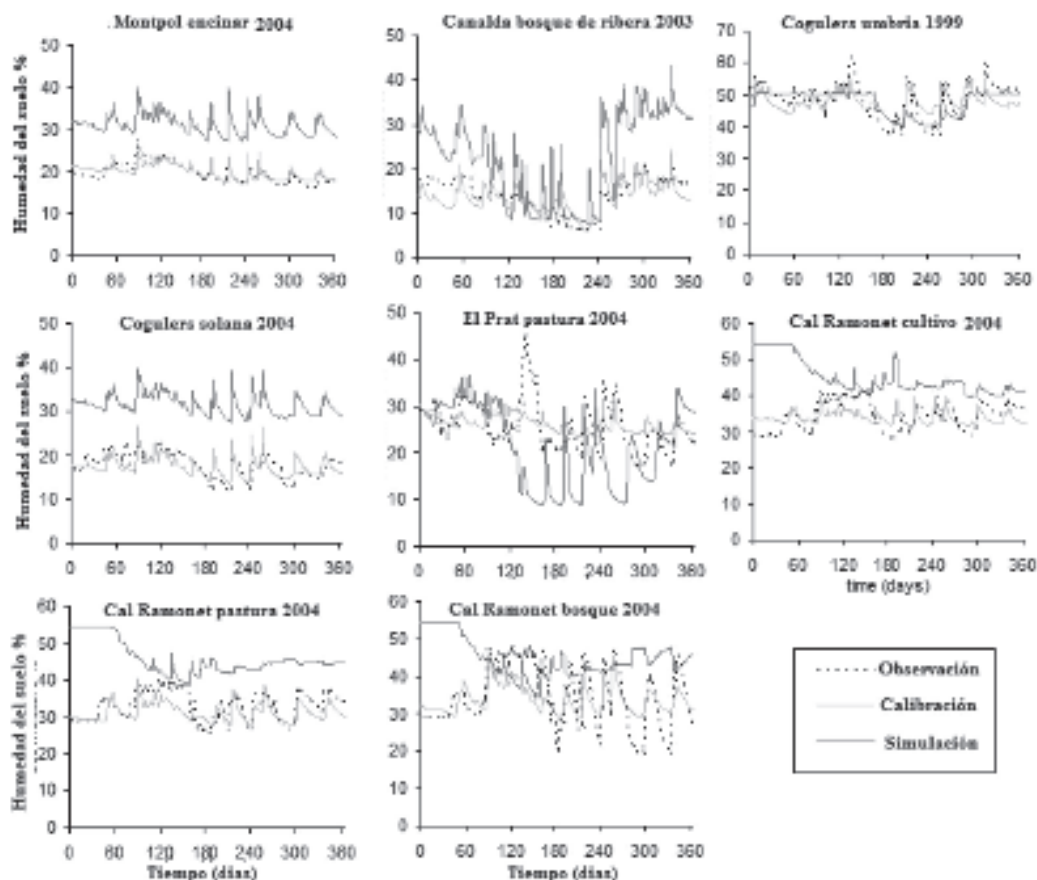
#### 4. MODELO HIDROLÓGICO Y ECUACIONES DE CALIBRACIÓN

Este modelo está basado en balances de masa y energía; es un modelo desarrollado con el objetivo de representar la variabilidad espacial en suelos, vegetación y datos atmosféricos en los balances de agua y energía su estado y flujos al interior de un sistema. Este modelo funciona como un sistema que representa la variabilidad espacial y distribución lateral del agua subsuperficial en base en la topografía local y la transmisividad del suelo, un proceso generalmente ignorado por muchos esquemas de transferencia suelo- vegetación- atmosfera (Famiglietti & Wood, 1994a, 1994b; Peters-Lidard *et al.*, 1997; Pauwels & Wood, 1999a, 1999b). Este modelo ha sido utilizado en la simulación de la humedad del suelo en diferentes ambientes (Houser *et al.*, 1998; Pauwels *et al.*, 2001, 2002; Zhao *et al.*, 2004; Bormann, 2005; Crow *et al.*, 2002, 2005; Loaiza & Pauwels, 2008b). Algunos autores combinan parámetros medidos con parámetros generados por el modelo, lo que sugiere

una aproximación a la estimación de la humedad del suelo mediante la combinación de modelos hidrológicos con valores de humedad del suelo observados. El Filtro Kalman ha sido desarrollado recientemente por Kalman (1960); Maybeck (1979); Welch & Bishop (1995); Aubert *et al.* (2003). Ha sido aplicado en áreas diversas como la aeroespacial, navegación marina, instrumentación de plantas nucleares, modelación demográfica, manufactura, hidrología y muchas otras. Este tipo de ecuaciones es usado cada vez mas por diferentes autores para simular y calibrar modelos hidrológicos para flujos de agua y energía, como lo demuestran los trabajos realizados por Crow & Wood (2002); Kumar & Kaleita (2003); Schuurmans *et al.* (2003); Aubert *et al.* (2003); Loiza & Pauwels (2008a). La metodología usada para calibrar el modelo ha sido desarrollada por Goegebeur & Pauwels (2007). La metodología está basada en las ecuaciones para el Filtro Extendido de Kalman. Las ecuaciones son aplicadas iterativamente a través de procesos de iteración, basado en la estimación de parámetros, para una descripción mas detallada referimos Goegebeur & Pauwels (2007); Loiza & Pauwels (2008a).

## 5. RESULTADOS

La evolución de los valores para humedad del suelo simulada, validada y medida a escala diaria para los ocho sitios estudiados puede observarse en la figura 3.



**Figura 3.** Humedad del suelo calibrada (TOPLATS) bajo diferentes usos del suelo en la Cuenca de la Ribera Salada (Periodo de calibración 1 año)

Estudiando el modelo sin calibrar, en todos los casos, los valores simulados son más altos que los valores observados. En este caso, los valores simulados difieren entre 10 – 20%, debido a la tendencia del modelo a almacenar toda el agua infiltrada al interior del perfil de suelo. Al calibrar el modelo utilizando los parámetros de calibración (Loiza & Pauwels, 2008a), disminuye dicha diferencia hasta alcanzar el 3.9 – 8.9 %, simulando de manera correcta el comportamiento del agua en el perfil de suelo. Los valores promedio entre los valores observados, simulados y calibrados pueden observarse en la tabla 2.



**Tabla 2.** Humedad del suelo promedio para los valores observados simulados y calibrados

Estación	Humedad del suelo %				
	O	S	C	Dif (O/S)	Dif (O/C)
Montpol encinar	19.72	31.03	19.80	11.31	0.08
Canalda bosque de ribera	13.86	22.59	13.68	8.73	0.18
Cogulers umbría	48.1	49.79	47.72	1.69	0.38
Cogulers solana	17.48	29.78	17.51	12.3	0.03
El Prat pastura	25.3	17.57	26.24	7.73	0.94
Cal Ramonet cultivo	34.18	44.94	34	10.76	0.18
Cal Ramonet pastura	32.65	45.03	31.13	12.38	1.52
Cal Ramonet bosque	34.06	43.44	33.88	9.38	0.18

O: Observado, S: Simulado, C: Calibrado, Dif: Diferencias

En Montpol encinar, las diferencias entre los valores observados y simulados son de 0 - 3.9%. Los valores de calibración muestran una buena aproximación respecto a los valores medidos con pequeñas diferencias al principio y final de la calibración y en algunos periodos puntuales en la parte media de la gráfica. Para Canalda bosque de ribera, las diferencias de humedad del suelo (observado vs. calibrado) son 0.004 – 6.1 %, y los valores más bajos corresponden a las estaciones más secas. El comportamiento de la curva de calibración tiende a ser similar al observado, excepto al principio del periodo de calibración y en casos puntuales en la parte media de la gráfica, donde los valores de humedad observados son muy bajos. Para Cogulers umbría, los valores de humedad del suelo son más altos respecto a los demás sitios estudiados. La diferencia calibración y observación es de 0.01 – 6.4%; el gráfico de calibración muestra un comportamiento semejante al de las mediciones prediciendo correctamente el comportamiento de los picos de humedad.

Bajo condiciones de solana (Cogulers), la tendencia entre los valores calibrados y observados es similar al comportamiento de la estación de Montpol. La humedad del suelo calibrada y observada oscila entre 0.014 y 4.8 %. En la estación del Prat, se puede observar que la gráfica de los datos calibrados coincide con los valores observados. Esta coincidencia es mayor en la parte media del gráfico, habiendo pequeñas diferencias entre gráficas bajo condiciones de baja humedad bajo o bien en condiciones de cambio de humedad muy abruptos. Las diferencias entre humedad del suelo (simulado- calibrado) van de 0.006 a 5.2%.

En Cal Ramonet cultivos, se observan valores de humedad bastante altos, siendo la diferencia entre ambos valores (observación- simulación) de 0.015 – 5.3%. Los resultados para calibración son cercanos a los valores medidos. Para Cal Ramonet pasto, el comportamiento de la simulación es bastante bueno respecto a los valores medidos. La diferencia observada entre ambos es de 0.0047 – 4.7%. Por último en Cal Ramonet bosques, la humedad observada y calibrada fluctúa entre 0.025 – 8,5%, y los valores de calibración son cercanos a los datos observados. Los gráficos de calibración difícilmente pueden simular los comportamientos abruptos de la humedad del suelo en las mediciones de campo. Se encontró que en el 95% de los casos, la diferencia entre los valores observados y calibrados es menos del 6.4%, excepto en cal Ramonet bosques, donde la diferencia alcanza el 8.5%. Observando los gráficos de calibración, se puede concluir que la calibración a través de todo el proceso no puede predecir el comportamiento de los picos de humedad (para condiciones de humedad y sequedad del perfil de suelo). Para condiciones de saturación, la diferencia entre calibración y observación es mayor que bajo otras condiciones, alcanzando valores desde 10 – 15%, en condiciones de baja humedad esta diferencia no excede el 5%.

**Tabla 3. Infiltración total y escorrentía en la Ribera salada durante el periodo de estudio**

Estación	Lluvia	O	S	C	O	S	C
Montpol encinar	545	387	415	424	6.6	9.4	0
Cogulers solana	545	346	189	322	1.9	136	3.1
El Prat pastura	545	544	421	517	1.3	99	2.9
Cal Ramonet cultivo	785	783	645	730	3.5	85	0
Cal Ramonet pastura	785	751	684	711	2.1	31	4
Cal Ramonet bosque	785	424	320	391	2.9	78	6.5

O: Observado, S: Simulado, C: Calibrado, Dif: Diferencias

Para las componentes de infiltración y escorrentía superficial relacionadas con la humedad en el modelo, se puede observar la respuesta de estas dos componentes respecto a los valores de calibración para humedad del suelo durante el año de calibración (Ver: tabla 3).

En este caso, los valores de infiltración real en Cogulers Solana, Cal Ramonet bosque y Cal Ramonet pasto son mayores a los valores simulados. En las otras estaciones de muestreo, los valores medidos son menores que los valores simulados. Al realizarse la calibración del modelo en base a datos horarios de humedad del suelo, se presenta una buena correlación entre los resultados para valores reales y simulados. Estas diferencias pueden ser atribuidas al efecto de sitio. De acuerdo con Houser *et al.* (1998), se deben a la dificultad del modelo para reproducir exactamente las condiciones medioambientales, en este caso, la variabilidad espacial de la zona de raíces. Respecto a la escorrentía, es difícil obtener resultados concluyentes, si tenemos en cuenta que solo es un 0.41 – 1.6% de la lluvia total, lo cual concuerda con los reportes de López- Bermúdez *et al.* (1998) y Durán *et al.* (2008) en zonas de bosque y pasturas mediterráneas. De acuerdo con Katra *et al.* (2008), la pedregosidad superficial crea unas condiciones microambientales favorables a la retención y control del agua lluvia y la escorrentía superficial. El efecto de la escorrentía en el balance hídrico total no es muy relevante. Debido a sus valores tan bajos es difícil de modelar, sin embargo debe ser tenido en cuenta en el cálculo de la infiltración.

## 6. CONCLUSIONES

Respecto al comportamiento hidrológico de la Cuenca, la pedregosidad y alta porosidad de los suelos tienen un efecto importante en el comportamiento hidrológico de todo el sistema. En general, los suelos tienden a tener bajos contenidos de humedad y en la mayoría de los casos la lluvia no alcanza a suplir la demanda por evapotranspiración. Es así que, en la regulación de la escorrentía y la infiltración, las características físicas de los suelos son el factor regulador, mucho más que la precipitación. En orden de importancia, las componentes que tienen un mayor peso dentro de los flujos hidrológicos en la cuenca objeto de estudio son infiltración, precolación, intercepción y escorrentía (Loaiza & Pauwels, 2008a). Los resultados para la calibración del modelo TOPLATS demostraron que los datos de un año a escala horaria son suficientes para la calibración del modelo. La utilización de parámetros para Filtro de Kalman Extendido (EKF) ha mejorado la eficiencia del modelo en más de un 80%. Este ejemplo muestra el potencial de los modelos hidrológicos calibrados en la predicción del comportamiento de la humedad del suelo en cuencas con una adecuada información instrumental.



## BIBLIOGRAFIA

- Aubert, D., Loumagne, C., Oudin, L., 2003. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall- runoff model. *J.Hydrol.* 280. p. 145- 161.
- Bormann, H., 2005. Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multi- scale TOPLATS model. *Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.* 2. p. 2183- 2217.
- Ceballos, A., Martínez- Fernández, J., Santos, F., and Alonso, P., 2002. Soil- water behaviour of sandy soils under semiarid conditions in the Duero Basin (Spain). *Journal of Arid Environments*, 51, 501- 519
- Crow, W. T. & Wood, E. F., 2002. The value of coarse- scale soil moisture observations for regional surface energy balance modeling. *J. Hydromet.* 3 (4). p. 467- 482.
- Crow, W. T., Chan, S. T. K., Entekhabi, D., Houser, P. R., Hsu, A. Y., Jackson, T. J., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Shi, J. C., Zhan, X., 2005. An observing system simulation experiment for Hydros radiometer- only soil moisture products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensors.* 43 (6). P. 1289- 1303
- Durán, Z. V. H., Rodríguez, P. C. R., Francia, M. J. R., Cárceles, R. B., Martínez, R. A., Pérez, G. P. 2008. Harvest intensity of aromatic shrubs vs. soil erosion: An equilibrium for sustainable



- agriculture (SE Spain). *Catena*. 73. p. 107- 116.
- Famiglietti, J. S. & Wood, E. F., 1994a. Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res.* 30 (11). P. 3061- 3078.
- Famiglietti, J. S. & Wood, E. F., 1994b. Application of multiscale water and energy balance models on a tallgrass prairie. *Water Resour. Res.* 30(11). p. 3079- 3093.
- Gallart, F. and Llorens, P., 2001. Water resources and environmental change in Spain. A key issue for sustainable integrated catchment management. *Cuadernos de investigación geográfica.*, 27, 7- 16.
- Gallart, F., Latron J. & Llorens P., 2005. Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environments. The Vallcebre research basins (Southeaster Pyrenees). I : hydrology. In: Garcia, C. and Batalla, R.J (Eds). *Catchment dynamics and river processes: Mediterranean and other climate regions*. ELSEVIER. P. 1- 16.
- Goegebeur, M. & Pauwels, V. R. N., 2007. Improvement of the PEST parameter estimation algorithm through Extended Kalman Filtering. *J. Hydrol.*, 337 (3- 4), p. 436- 451.
- Houser, P. R., Shuttleworth, W. J., Famiglietti, J. S., Gupta, H. V., Kamran, H. S., Goodrich, D. C., 1998. Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resour. Res.* 34 (12). p. 3405- 3420.
- Institut Cartografic de Catalunya, ICC, 2002. Mapa geològic de Catalunya, escala 1:250.000. Generalitat de Catalunya. 2da edició.
- Instituto Geológico Minero de España, IGME, 2001. Mapa geológico de España escala 1:50.000, San Lorenzo de Morunys - 291. Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).
- Kalman, R. E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. J. Basic Eng .* 82D. p. 35- 45.
- Katra, I., Lavee, H & Sarah, P., 2008. The effect of rock fragment size and position on topsoil moisture on arid and semi-arid hillslopes. *Catena*. 72. p. 49- 55.
- Kumar, P. & Kaleita, A. L., 2003. Assimilation of near- surface temperature using extended Kalman filter. *Advances in Water Resources*. 26. p. 79- 93.
- Lasanta, T., 1988. The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos.*, 132, p. 15- 36.
- Loaiza Usuga, J. C & Pauwels, V. R. N., 2008a. Calibration and multiple data set- based validation of a land surface model in a mountainous Mediterranean study area. *J. Hydrology*. 356 (1- 2). P. 223 - 233.
- Loaiza Usuga J. C. & Pauwels V. R. N., 2008b. Use of soil moisture sensors in the determination of soil moisture content (Calibration ecuations). *Suelos Ecuatoriales*. SCCS. 38(1). p. 24- 33.
- López- Bermúdez, F., Romero- Dýaz, A., Martýnez- Fernandez, J., 1998. Vegetation and soil erosion under a semi- arid Mediterranean/ climate: a case study from Murcia Spain. *Geomorphology*. 24. p. 51- 58.
- Maybeck, P., 1979. *stochastics models, estimation, and control (vol 1)*.Academic Press. New York.
- Orozco, M., Poch, R. M., Batalla, R. J., Balasch, J. C., 2006. Hydrochemical budget of a Mediterranean mountain basin in relation to land use (The Ribera Salada, Catalan Pre - Pyrenees, NE Spain). *Z.Geomorph. N. F.* 50. p. 77- 94.
- Pauwels, V. R. N. & Wood, E. F., 1999a. A soil- vegetation- atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes 1. Model improvements. *J. Geoph. Res.* 104(D22). P. 27, 811- 27, 822.
- Pauwels, V.R.N. & Wood, E. F. 1999b. A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes 2. Application and validation. *J. Geoph. Res.* 104(D22). p 27,823 -27,829.



- Pauwels, V. R. N., Hoeben, R., Verhoest, N. E. C., Troch, F. P., 2001. The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small - scale basins through data assimilation. *J. Hydrol.* 251. p. 88- 102.
- Pauwels, V. R. N., Hoeben, R., Verhoest, N. E. C., Troch, F. P., Troch, P. A., 2002. Improvement of TOPLATS - based discharge predictions through assimilation of ERS - based remotely sensed soil moisture values. *Hydrological Processes.* 16. p. 995- 1013.
- Peters- Lidard, C. D., Zion, M. S., Wood, E. F., 1997. A soil vegetation atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes. *J. Geoph Res.* 102 (D4). P. 4303- 4324.
- Rius, J., Batalla, V. R., and Poch, R. M., 2001. Monitoring water and sediment yield in Mediterranean mountains watersheds: preliminary results. 10<sup>th</sup> international soil conservation organization meeting held may 24 – 29. *Pardue University- USDA – ARS.* 223– 228.
- Schuurmans, J. M., Troch, P. A., Veldhuizen, A. A., Bastiaanssen, W. G. M., Bierkens, M. F. P., 2003. Assimilation of remotely sensed latent heat flux in distributed hydrological model. *Adv. Water Resour.* 26. p. 151- 159.
- Solsona, C. C., 2005. Intercepció i trascol en tres tipus de cobertura forestal al Solsonès - Unpubl. MsC. Thesis. Universitat de Lleida. 134 p. (En Catalan)
- SSS, 1992. Soil survey laboratory methods manual. Soil Conservation Service. U.S. Dept. of agriculture. Rpt. N° 42. Washington. D. C.
- SSS, 1993. Soil Survey Manual. Soil Survey Division Staff. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18.
- SSS. 2010. Keys to Soil taxonomy. SSS Soil Conservation Service. Agric. US Gov printing office. Washington, D.C. SSS. 1992. Soil survey laboratory methods manual. Soil Conservation Service. U.S. Dept. of agriculture. Rpt. N° 42. Washington. DC.
- Ubalde, J.M., Rius, J., Poch, R.M. 1999. Monitorización de los cambios del uso del suelo en la cabecera de la Cuenca Ribera Salada mediante fotografía aérea y SIG ( El Solsonès, Lleida, España). *Pirineos.* 153- 154. p. 101- 122.
- Welch, G. & Bishop, G., 1995. An introduction to the Kalman Filter Technical Report TR 95- 041. Department of Computer Science. Univ. North Carolina. Chapel Hill. NC.
- Zhao, C., Feng, Z., Chen, G., 2004. Soil water balance simulation of alfalfa (*Medicago Sativa* L.) in the semiarid chinese loess plateau. *Agricult. Water Manag.* 69. p. 101- 114.



