

Simulación continua con cambio de escala temporal para la estimación de la humedad inicial en predicciones hidrológicas tempranas

David Ocio Moreno¹, Christian Stocker², Ángel Eraso Alberdi², Óscar de Cos Mier¹, José María Sanz de Galdeano²

¹SENER INGENIERÍA Y SISTEMAS S.A. Avda. Zugazárte, 56. 48930 – Las Arenas (Vizcaya)

¹AGENCIA VASCA DEL AGUA. C/Orio, 1-3. 01010 – Vitoria-Gasteiz (Álava)

Correo electrónico: david.ocio@sener.es

1 Introducción

Con la mejora progresiva de las técnicas de modelización hidrológica, la popularización de la adquisición remota y en tiempo real de datos hidrometeorológicos y la mayor precisión de las predicciones meteorológicas, los Sistemas de Alerta Temprana frente a Inundaciones han experimentado en los últimos años un gran crecimiento. El objetivo final perseguido con estos sistemas es el aumento del tiempo de aviso previo a la ocurrencia de los daños por inundación, de manera que éstos puedan ser mitigados en la medida de lo posible con el concurso eficiente de los servicios de emergencia (Carsell *et al.*, 2004)

Resulta evidente que, sin el empleo de predicciones numéricas, el tiempo máximo de aviso disponible comprende desde la ocurrencia de la precipitación hasta la superación del umbral hidrológico de inicio de daños (USACE, 1996). Dicho tiempo puede resultar suficiente en cuencas de mediana o gran extensión, en las que el desarrollo de la crecida es lento, permitiendo no sólo una correcta gestión del fenómeno con la información procedente de estaciones remotas, sino también el ajuste en tiempo real de modelos de simulación hidrológica e hidráulica (Da Ros y Borga, 1997). Desafortunadamente, en cuencas con tiempo de concentración reducido, la operativa anterior resulta inviable, debiéndose recurrir a técnicas de predicción temprana basadas en pronósticos meteorológicos a corto plazo (simulación numérica o datos radar) y al empleo de modelos hidrológicos previamente calibrados (Collier, 2007; Smith *et al.*, 2007) Este esquema es también extensible a situaciones en las que se desee establecer alertas o iniciar medidas de protección antes incluso de que comience la respuesta hidrológica de la cuenca (Clark *et al.*, 2007)

Sin embargo, en todos estos casos, la estimación fiable de las condiciones existentes de humedad antecedente resulta fundamental para garantizar una predicción acertada (Berthet *et al.*, 2009). Dado que los procesos hidrológicos son esencialmente no lineales, incluso pequeñas variaciones de las condiciones iniciales pueden provocar una elevada incertidumbre en la estimación de los caudales fluyentes (Zehe y Blöschl, 2004). Varias son las técnicas disponibles para conseguir la solución deseada, pudiéndose agrupar fundamentalmente en dos familias: las que suponen la adopción de valores empíricos o calibrados de la humedad al inicio del evento y las que descansan en una simulación continua de la fase terrestre del ciclo hidrológico.

En el primer grupo destacan las que emplean medidas reales de lisímetros en puntos discretos de la cuenca, distribuyéndolas posteriormente mediante técnicas de interpolación espacial o a partir de tendencias históricas (Huang *et al.*, 2007). No obstante, las medidas reales no son siempre fácilmente transportables a los modelos matemáticos de simulación, pues suelen disponer de varios parámetros relacionados con la humedad. Recientemente ha cobrado también importancia la teledetección (Jacobs *et al.*, 2003), si bien, con el empleo de imágenes de satélite, solo es posible caracterizar la parte más superficial del suelo (2-5 cm), lo que contrasta con el espesor típico de los horizontes (1-2 m) (Brocca *et al.*, 2010)

Existe a su vez la posibilidad de calibrar de manera automática la humedad inicial mediante algún algoritmo de optimización que implique la maximización de cierta función objetivo basada en el error observado entre simulación y aforo (Madsen *et al.*, 2000; Vélez y Francés, 2008). Lógicamente, esto sólo puede realizarse en algún punto de la rama de ascenso del hidrograma, lo que retrasa el instante de previsión y reduce sensiblemente las posibilidades de actuación en cuencas con tiempo de concentración reducido. Además, ésta opción sólo permite aplicar condiciones de humedad homogéneas en toda la cuenca aforada, ignorando así la usual variación espacial de la humedad en función de la regionalización climática del territorio y su efecto en la escurrentía.

En el segundo grupo, la estimación de la humedad inicial procede de la simulación durante un intervalo variable antes de la ocurrencia del evento (periodo de calentamiento), lo suficientemente extenso como para que su humedad final (antecedente del episodio) no dependa de los valores iniciales adoptados (Kitanidis y Bras, 1980). Esta técnica puede además combinarse con algoritmos continuos de corrección del estado de humedad inicial (filtro de Kalman por conjuntos u otros) que sean capaces de estimar las desviaciones más probables de la precipitación y evapotranspiración a lo largo del periodo de calentamiento, corrigiéndolas para incrementar la fiabilidad de las condiciones de humedad antecedente finalmente adoptadas (Komma *et al.*, 2008). Otra opción consiste en aplicar un enfoque bayesiano (Martina *et al.*, 2006) en el que la precipitación registrada o prevista se combine con la humedad antecedente obtenida por simulación continua para estimar así la probabilidad de superación de un determinado umbral de caudal (Norbiato *et al.*, 2008)

Desde un punto de vista teórico, esta segunda línea de investigación es la que a priori debe ofrecer resultados más rigurosos, por lo que ha sido ampliamente recomendada en el pasado (Linsley, 1982). No obstante, los requerimientos temporales de la operativa en tiempo real, que contrastan con el esfuerzo computacional durante el periodo de calentamiento, y la necesidad de disponer de una mayor información para la modelización, con el coste en inversión en redes y en caracterización física del territorio que esto supone, suponen que todavía la hidrología de evento tenga un papel importante en la previsión hidrológica (Amengual *et al.*, 2008) Como alternativa, Nalbantis (1995) sugiere emplear una simulación diaria para obtener las condiciones de humedad inicial del evento. Usualmente esto implica un cambio de escala temporal (diario-mensual a horario-diezminutal) o incluso espacial (simulación de cuenca general para obtención de humedad en una de sus subcuencas), que por otra parte lleva asociado problemas de consistencia que es necesario abordar (Littlewood y Croke, 2008). Además, en función del modelo hidrológico empleado, la transposición de los valores de la humedad será más o menos directa, lo que condicionará su operatividad en tiempo real. Como alternativa simplificada, se pueden obtener también las condiciones antecedentes medias para distintos escenarios climáticos mediante un análisis estadístico de las variables de estado en una simulación continua de un periodo temporal extenso, aplicando posteriormente las conclusiones en predicción (Martina *et al.*, 2006)

Para evaluar las posibilidades reales de aplicación de la metodología anterior, en el presente trabajo se analiza el comportamiento de dos modelos hidrológicos de simulación continua, de similares características distribuidas (para poder así considerar adecuadamente la variabilidad espacial del territorio), pero con diferente filosofía de cálculo: el TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia, de tipo conceptual, y el MIKE-SHE del Danish Hydraulic Institute, de tipo físicamente basado, para el desarrollo de previsiones hidrológicas tempranas, es decir, anteriores al inicio de la escorrentía.

Como caso de estudio se ha seleccionado la cuenca vertiente al embalse de Ullibarri, de 273 km² de superficie, situada en la cabecera del río Zadorra (cuenca Ebro). Dicha cuenca presenta episodios recurrentes de avenida, incluso con combinación de fusión nival, que deben ser gestionados de forma óptima por los órganos de desagüe de la presa para minimizar los posibles daños en el núcleo urbano de Vitoria-Gasteiz, ubicado aguas abajo y que recibe también las aguas de una intercuenca de 234 km². La importancia de los desembalses preventivos en este caso resulta crucial para evitar la concurrencia de picos de crecida. En consecuencia, se requiere disponer de previsiones fiables de las aportaciones de entrada al embalse esperables con anterioridad al inicio de las lluvias.

La metodología de estudio comprende el retroanálisis de varios episodios históricos de crecida, procediéndose a estimar las condiciones de humedad antecedente mediante simulación previa de un periodo de calentamiento, trasposición de la distribución espacial del estado de humedad de la cuenca, cambio de escala temporal y simulación del periodo de previsión. Al conocerse las precipitaciones reales registradas durante cada evento, se elimina la incertidumbre de las predicciones meteorológicas (no así la de la distribución espacial de la lluvia), por lo que se puede evaluar el comportamiento de los modelos mediante comparación directa con datos de aforo.

2 Materiales y métodos

2.1 Cuenca de estudio

La cuenca del río Zadorra, afluente del río Ebro por margen izquierda, es con 1361 km² la segunda mayor de la Comunidad Autónoma del País Vasco (ver figura 1). Su cabecera, situada en la divisoria que separa la vertiente Mediterránea de la Cantábrica, se beneficia de una pluviosidad relativamente alta (900-1300 mm), lo que ha favorecido el empleo de sus recursos hídricos mediante la ejecución de los embalses conectados de Ullibarri y Urrunaga, con una capacidad conjunta útil de 193 hm³. Estos embalses, concebidos inicialmente como

aprovechamiento hidroeléctrico a través del Salto de Barazar hacia la Cuenca Cantábrica, han ido soportando una demanda urbana cada vez más intensa con el crecimiento demográfico e industrial de la segunda mitad del siglo XX (Puerta, 1990). En la actualidad, el uso hidroeléctrico es compartido con el abastecimiento a una población de en torno a 1.300.000 habitantes en las Áreas Metropolitanas de Bilbao y Vitoria y con una función laminadora condicionada por la progresiva ocupación de la llanura aluvial aguas abajo de las presas (Ibáñez González de Matauco, 2005)



Figura 1 Ubicación de la cuenca de estudio

La extrema sequía que experimentó la cuenca en el periodo 1989-90, con importantes restricciones al consumo, junto con la ocurrencia de la avenida de febrero de 2003, que provocó cuantiosos daños en Vitoria y otros municipios ribereños, pusieron de manifiesto la necesidad de una compatibilización óptima de usos en una infraestructura con un margen operativo cada vez más escaso.

Desde el punto de vista de la gestión de crecidas, la presa de Ullibarri es la que soporta una mayor presión, consecuencia de una mayor cuenca vertiente y de la reducida capacidad de la galería de interconexión con Urrunaga, que es desde donde se produce la turbinación. Este hecho supone la existencia típica de una descompensación de niveles en época de aguas altas, situándose el embalse de Ullibarri normalmente cerca de su umbral de obligado vertido. En este contexto, la disponibilidad de datos en tiempo real procedentes del SAIH Ebro y de la red de Dirección de Meteorología y Climatología del Gobierno Vasco (DMC), la generación de pronósticos meteorológicos a 3 días a nivel regional por el Servicio Vasco de Meteorología (EUSKALMET) y la posibilidad de operar los órganos de desagüe de la presa en adelanto mediante la apertura controlada de sus 7 compuertas, han propiciado que la Agencia Vasca del Agua (URA) decidiera en 2007 establecer un Sistema de Ayuda a la Decisión basado en la calibración de modelos matemáticos para predicción hidrológica en tiempo real, cuya mejora y extensión a todo el País Vasco se encuentra actualmente en fase de desarrollo.

Por su importancia dentro de este futuro SAD, es precisamente la cuenca vertiente al embalse de Ullibarri la escogida en este trabajo para verificar el efecto que las condiciones de humedad inicial pueden tener en los pronósticos hidrológicos y cómo una metodología basada en la simulación continua con cambio de escala temporal puede incrementar los tiempos de alerta.

Esta cuenca, de 270 km² se sitúa en la denominada Llanada Alavesa, una amplia planicie situada en torno a los 500 m.s.n.m y rodeada de estribaciones montañosas (ver Figura 1) En el borde más septentrional se localizan las mayores cumbres, que alcanza los 1272 m.s.n.m. y que reciben la mayor parte de las precipitaciones (1100-1200 mm/año). El límite sur, en cambio, presenta una divisoria menos marcada, sobre todo en la parte occidental, y con menor pluviosidad (800 mm/año) (ver Figura 2a). La temperatura media anual es de 11,9°C. El tiempo de concentración según la formulación de Témez es aproximadamente de 10 horas. Edafológicamente destacan los suelos de tipo Cambisol con un espesor típico de 2 m (ver Figura 2b) asentados sobre un substrato rocoso compuesto fundamentalmente por materiales cretácicos de permeabilidad baja-media (Ver Figura 2c). Esta naturaleza explica el escaso desarrollo hidrogeológico. La mayor parte de la cuenca presenta usos agrícolas de secano, sobre todo ubicados en el centro y sur, mientras que el tercio norte alberga formaciones de arbolado, tanto natural como de plantación, y matorral en las zonas más elevadas (ver Figura 2d)

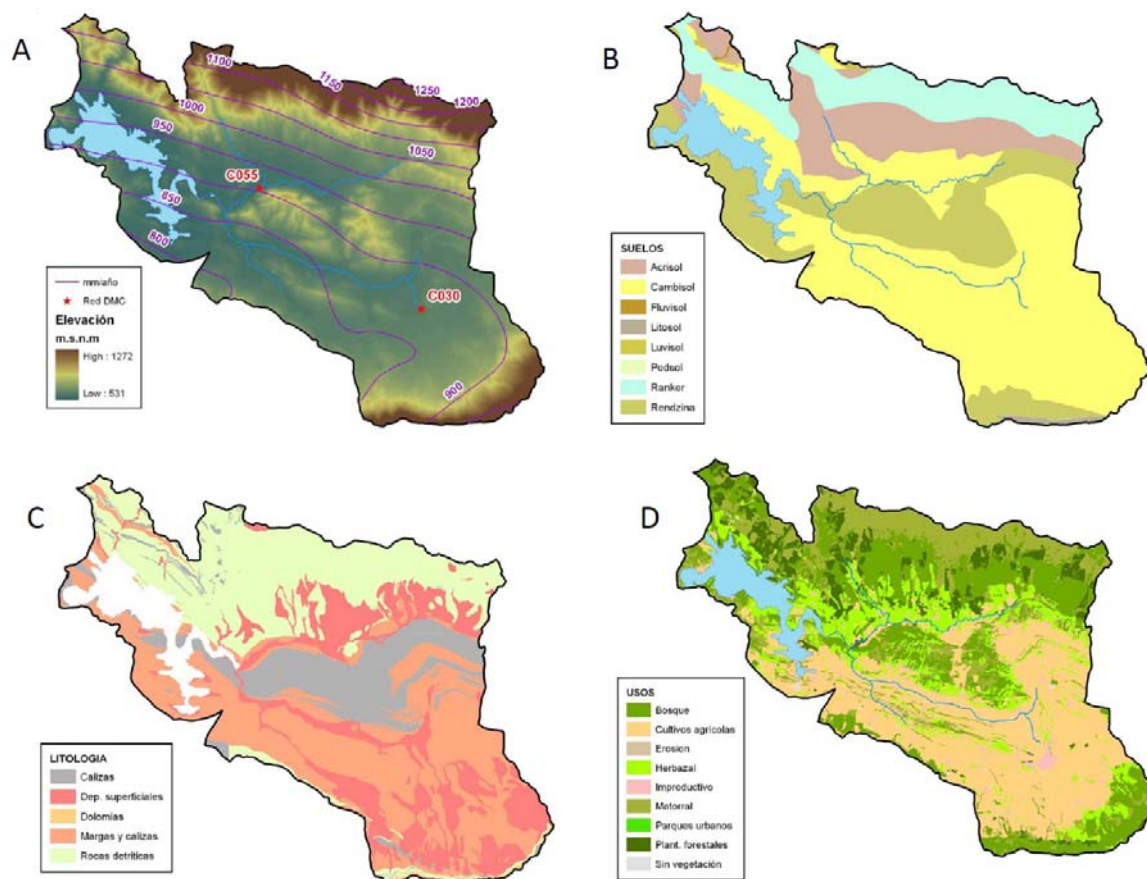


Figura 2 Características de la cuenca vertiente a Ullibarri. A) MDE e isóneas de precipitación media anual (se indica la posición de las estaciones meteorológicas usadas); B) Clasificación FAO de suelos; C) Litología; D) Usos del suelo

2.2 Eventos de calibración

La calibración de los modelos hidrológicos aplicados a la cuenca de Ullibarri y la verificación del efecto que sobre su capacidad predictiva poseen las condiciones de humedad inicial del suelo, requiere disponer de un número suficiente de eventos de crecida, de naturaleza variable, de manera que se pueda testar su funcionamiento en diferentes escenarios. Por otro lado, la selección de eventos de contraste se encuentra condicionada tanto por la disponibilidad de información con la suficiente desagregación temporal como por la necesidad de simular sucesos de relativa entidad que permitan activar los mecanismos usuales que intervienen en las avenidas extraordinarias. En este sentido, se ha optado por seleccionar los 8 eventos recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1 Eventos de calibración

	Feb 2003	May 2003	Dic 2005	Jun 2008	Ene 2009	Sep 2009	Nov 2009	Jun 2010
Día inicio	28/01	05/05	28/12	31/05	24/01	17/09	05/11	14/06
Día fin	06/02	10/05	31/12	04/06	31/01	20/09	12/11	18/06
Precip. 30 días previos (mm)	80,1	58,0	81,7	100,4	61,5	13,0	70,3	51,2
Precip. 5 días previos (mm)	10,4	15,4	3,2	14,8	32,0	11,3	21,3	37,9
Precip. max diaria (mm)	46,4	22,8	28,4	44,3	45,4	74,4	40,0	50,8
Precip max 6 horas (mm)	22,5	11,7	20,1	24,7	26,3	33,4	19,4	25,4
Caudal punta (m ³ /s)	227,2	53,8	100,0	81,4	179,9	25,7	87,0	58,8
Fecha pico (hora UTC)	04/02 13:00	07/05 13:00	30/12 11:00	01/06 03:00	27/01 16:00	18/09 14:00	09/11 12:00	16/06 23:00
Vol. escorrentía (hm ³)	43,59	8,16	8,13	10,78	29,21	1,60	16,19	4,42

Como puede apreciarse, engloban diferentes periodos estacionales, con distintas historias previas de precipitación. Así por ejemplo, los episodios de septiembre de 2009 y junio de 2010 se presentan en condiciones que podrían calificarse como medias-secas mientras que los de febrero de 2003 o enero de 2009 acontecen en condiciones húmedas. La torrencialidad de las lluvias también difiere, con máximos en 6 horas de 33,4 mm en septiembre de 2009. El evento de febrero de 2003 presenta como particularidad la presencia de una acumulación importante de nieve durante el día 31 de enero, cuya fusión súbita por incremento apreciable de temperaturas en coincidencia con lluvias moderadas provocó graves inundaciones aguas abajo de la presa de Ullibarri.

En todos los casos y a falta de datos de aforo, los hidrogramas de avenida se han estimado por balance de entradas y salidas de embalse. En lo que respecta a las precipitaciones y temperaturas, se han empleado los datos de la estaciones C030 Salvatierra y C054 Ozaeta de la red DMC. La obtención de la evapotranspiración potencial de referencia a nivel diario se ha efectuado mediante la formulación de Penman-Monteith y los registros de temperatura máxima y mínima diaria aplicando las simplificaciones sugeridas por la FAO.

2.3 Modelos hidrológicos

Dado el objetivo del trabajo, establecer las posibilidades de una simulación continua para el incremento del tiempo de aviso por alerta hidrológica, se ha decidido aplicar a la cuenca de estudio dos filosofías distintas de modelización para investigar así su diferente aptitud. Se trata, por un lado, del modelo TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia, y por otro lado, del modelo MIKE-SHE del Danish Hydraulic Institute.

El modelo TETIS, de tipo distribuido y conceptual, supone la simulación simplificada y a nivel de celda de la fase terrestre del ciclo hidrológico mediante la linealización de las ecuaciones diferenciales que dominan los distintos procesos implicados. Cada celda aparece representada por cinco tanques dispuestos de manera vertical y que se relacionan con la cobertura nival, el almacenamiento estático (intercepción + detención + humedad capilar), la escorrentía superficial, el almacenamiento gravitacional con el flujo subsuperficial asociado y el acuífero con el flujo base asociado (Vélez, 2001). La infiltración es función exclusiva de la cantidad de agua disponible en superficie y de la conductividad del suelo, supuesta ésta constante e independiente del contenido de humedad del suelo, y afectada por un factor corrector idéntico para toda la cuenca. La traslación de los hidrogramas por la red fluvial se desarrolla mediante la denominada Onda Cinemática Geomorfológica, en la que la forma de la sección de cauce depende de su posición relativa en la cuenca. La velocidad de onda aparece directamente afectada por un factor corrector constante a nivel de cuenca.

La distribución espacial de los tres parámetros fundamentales que dominan el modelo: la altura de agua útil (Hu), la conductividad hidráulica del suelo (ks) y la capacidad de percolación (kp) fue efectuada por Puricelli (2003) y aplicada con éxito para la estimación de recursos hídricos superficiales el ámbito del País Vasco mediante el correspondiente ajuste de varios factores correctores (Vélez *et al.*, 2009)

El modelo MIKE-SHE es de tipo distribuido y físicamente basado, con una formulación avanzada derivada de las ecuaciones constitutivas del fenómeno (Abbot *et al.*, 1986). Posee varias aproximaciones al problema en función de los objetivos del estudio y la disponibilidad de datos (Butts *et al.*, 2004) En su aplicación a la cuenca de Ullibarri y para potenciar su sentido físico, se ha optado por el empleo de la onda difusiva para el flujo en ladera, el método de gravedad (simplificación de la ecuación de Richards despreciando el término de capilaridad) para la simulación de la infiltración, una distribución de tanques lineales interconectados espacialmente según la orografía para la representación del flujo subsuperficial, y la resolución de las ecuaciones Navier-Stokes para la zona saturada del suelo y su flujo base asociado. La propagación de los hidrogramas en el cauce tiene lugar a través del MIKE-11 (Havno *et al.*, 1995) mediante onda cinemática. Con el método por gravedad, la capacidad de infiltración del suelo es función de su humedad, reduciéndose al disminuir ésta.

Los parámetros necesarios para la confección del modelo MIKE-SHE en la cuenca de Ullibarri se han obtenido de la topografía y cobertura vegetal del territorio, así como de la caracterización y espesor de los suelos existentes. A partir de la clasificación FAO de estos últimos y su textura típica, se ha obtenido la conductividad hidráulica saturada, la saturación, la capacidad de campo y el punto de marchitez, mediante las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (2005)

Ambos modelos, TETIS y MIKE-SHE cuentan con algoritmos de acumulación-fusión de nieve basados fundamentalmente en el método del índice térmico o grado-día (Martinec, 1960). La valoración del comportamiento de los modelos a la cuenca de estudio se ha investigado mediante la obtención del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe o R^2 . Este criterio es usado comúnmente para la evaluación de modelos hidrológicos dado que involucra estandarización de la varianza residual y su valor esperado no cambia con la longitud del registro o la magnitud de la escorrentía. En general, se consideran aceptables valores superiores a 0,6 y excelentes si se alcanza 0,8 (Beven, 2000).

3 Resultados

La definición del modelo TETIS en la cuenca vertiente a Ullibarri partió de la configuración inicialmente disponible a nivel diario, respetando los mapas de parámetros existentes, pero recalibrándola con paso diario durante el periodo de octubre de 2002 a junio de 2010, para tener así en cuenta el diferente efecto que las nuevas estaciones meteorológicas seleccionadas, operativas en tiempo real, tienen en la caracterización de la pluviosidad frente a las primitivas estaciones manuales de AEMET. El R^2 alcanzado fue de 0,69.

Según la metodología de previsión hidrológica planteada, esta simulación es la encargada de transmitir las condiciones de humedad inicial a los diferentes eventos simulados mediante la opción que incluye el software de traspaso de la humedad entre simulaciones. La ventaja de esta técnica frente a la obtención y posterior incorporación de los valores promediados de llenado de los distintos tanques consiste en la posibilidad de iniciar la simulación horaria con una distribución espacial de la humedad más realista, que considere, por ejemplo, la mayor pluviosidad de la mitad norte de la cuenca. En la Tabla 2 se presenta el porcentaje medio de llenado del tanque de humedad del suelo o H1 al inicio de cada evento, el de mayor influencia en los resultados de la simulación.

Tabla 2 Resultados de la aplicación de la metodología propuesta para previsión hidrológica temprana

	TETIS		MIKE-SHE	
	Llenado inicial tanque H1 (%)	R^2	Prof. inicial nivel freático (m)	R^2
Febrero 2003	79,6	0,78	-0,53	0,74
Mayo 2003	59,6	0,79	-0,58	0,91
Diciembre 2005	78,2	0,96	-0,55	0,79
Junio 2008	68,8	0,79	-0,56	0,60
Enero 2009	79,5	0,82	-0,42	0,70
Septiembre 2009	8,7	-4,85	-0,65	-0,01
Noviembre 2009	60,6	0,77	-0,64	0,86
Junio 2010	56,8	-0,36	-0,63	0,74

El cambio de escala temporal diaria-horaria supone en TETIS, dada su naturaleza conceptual, la necesidad de una recalibración de los factores correctores asociados a los distintos flujos (Owstrowski *et al.*, 2010), pero manteniendo los que dominan el contenido de agua en el suelo para no desvirtuar así el balance global. En el caso de Ullibarri, los parámetros más sensibles han resultado ser los asociados a la capacidad de infiltración, a la percolación, al flujo base y a la velocidad de onda en canales. Para garantizar la capacidad predictiva del modelo, este proceso de recalibración ha conducido a un conjunto único de factores correctores considerado óptimo en relación con su comportamiento en los 8 eventos seleccionados. En la Figura 3 se presentan las comparaciones gráficas obtenidas y en la Tabla 2 los valores del R^2 alcanzados. A destacar cómo la activación del módulo de nieve consigue elevar el R^2 del evento de febrero de 2003 desde 0,44 a 0,78.

Como puede apreciarse, el modelo TETIS se comporta de forma satisfactoria en los episodios que parten de una condición inicial húmeda, sobrevalorando los caudales punta en los dos episodios con condiciones iniciales más secas, sobre todo en el de septiembre de 2009, en el que el ajuste es claramente deficiente. Este hecho es coherente con el mayor peso que los eventos húmedos han tenido en la calibración y con el hecho de que solo puede adoptarse un factor corrector único para la infiltración, que debe operar tanto en escenarios secos como húmedos. De hecho, se ha comprobado que manteniendo el resto de factores correctores constantes y calculando el asociado a la infiltración que conduzca al máximo valor de R^2 , se obtiene una buena correlación inversa entre éste y la humedad inicial ($\rho_s = -0,84$; $p = 0,002$). Los valores de los factores correctores modificados y el nuevo R^2 alcanzado se muestran en la Figura 4. Queda patente, por tanto, la mejora que para las capacidades predictivas del modelo TETIS tendría la incorporación de alguna función de variación de la infiltración con el contenido de humedad del suelo, incrementado la escorrentía superficial con la saturación (Dunne y Black, 1970)

En lo que respecta al modelo MIKE-SHE, se partió de una discretización en celdas de 500x500 m a partir del Modelo Digital del Terreno disponible, al que se acopló una red fluvial en MIKE-11 con tamaño mínimo de cuenca vertiente de 10 km². Se adoptó un espesor típico de suelo de 2 m, al que se asignaron propiedades edafológicas según cinco clases texturales: arcillosa, arenosa, franca, franco-arcillo-arenosa y franco arenosa. Tras el correspondiente proceso de calibración a nivel diario, se obtuvo un R^2 de 0,6 para el periodo 2002-2010, consiguiéndose determinar la distribución espacial del contenido de humedad del suelo en la zona no saturada y la posición del nivel freático al inicio de cada evento. De ellos, la segunda variable es la que mayor influencia

posee en los resultados de las simulaciones posteriores, dada su estrecha relación con el inicio de la escorrentía subsuperficial, la de mayor peso en las avenidas analizadas. Sus valores se presentan en la Tabla 2.

La ventaja de un modelo físicamente basado como MIKE-SHE es la teórica independencia de los parámetros que lo conforman respecto del intervalo de cálculo, ya que éstos representan propiedades físicas del terreno y no coeficientes de analogías matemáticas. Este aspecto ha sido comprobado en la cuenca de estudio, ya que, manteniendo el mismo conjunto de parámetros y adoptando como condiciones iniciales para las diferentes variables de estado las calculadas en la simulación diaria, se obtienen las comparaciones gráficas recogidas en la Figura 5 con un intervalo de cálculo horario. Los valores de los R^2 correspondientes se presentan en la Tabla 2. En este caso, la activación del módulo de nieve consigue elevar el R^2 del evento de febrero de 2003 desde 0,44 a 0,74. En conjunto, los resultados parecen indicar, por ejemplo, que la incorporación de algoritmos físicamente basados para la infiltración, mejora las capacidades predictivas del modelo en todo tipo de escenarios de humedad del suelo. Esto se consigue, no obstante, sacrificando precisión en periodos húmedos, en una situación que podría definirse como más equilibrada.

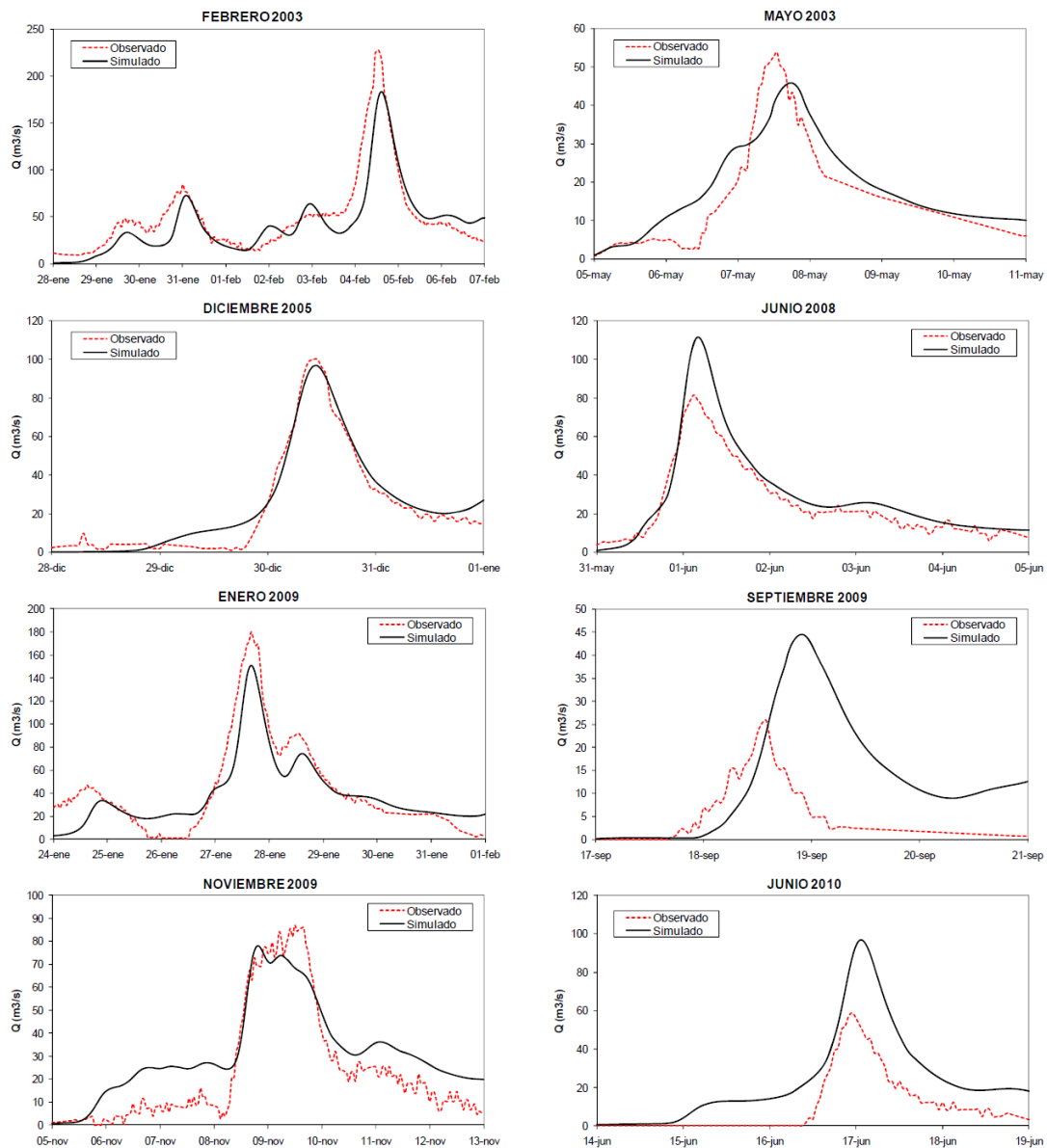
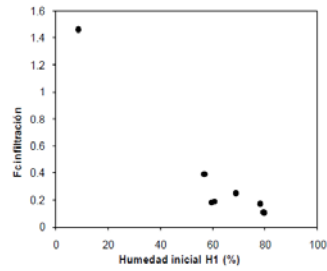


Figura 3 Comparación gráfica de hidrogramas observados en Ullibarri y simulados con TETIS



Evento	Fc infiltración	Nuevo R ²
Febrero 2003	0,10	0,89
Mayo 2003	0,18	0,81
Diciembre 2005	0,17	0,96
Junio 2008	0,25	0,94
Enero 2009	0,11	0,88
Septiembre 2009	1,46	-0,17
Noviembre 2009	0,19	0,78
Junio 2010	0,39	0,53

Figura 4 Modificación del factor corrector de infiltración del modelo TETIS en función de la humedad del suelo

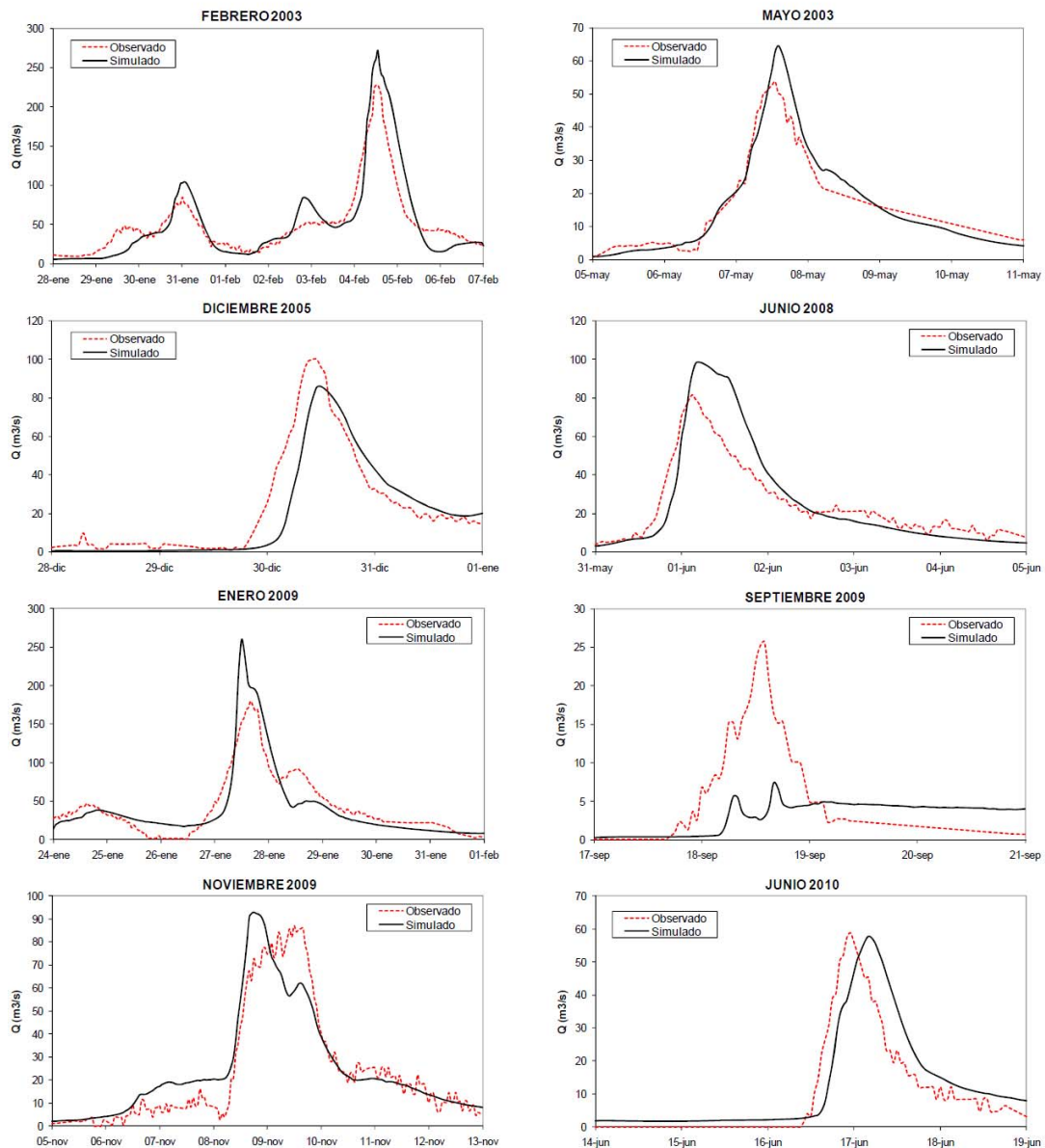


Figura 5 Comparación gráfica de hidrogramas observados en Ullibarri y simulados con MIKE-SHE

Los resultados anteriores confirmarían la validez de la metodología de precalentamiento diario, traspaso de condiciones de humedad y cambio de escala temporal propuesta para la obtención de alertas tempranas con

anterioridad al inicio de la respuesta hidrológica o incluso del inicio de la precipitación. Los hidrogramas resultantes darían una idea aproximada del hidrograma esperable, sobre todo si el modelo empleado incorpora una infiltración variable en función de la humedad del suelo. Adicionalmente, se ha verificado que sería suficiente con disponer de un periodo de precalentamiento con inicio el día 1 de octubre del año anterior al evento para alcanzar unas condiciones de humedad inicial estables partiendo de suelo seco.

La simulación continua a escala diaria de un periodo extenso permite también aplicar una metodología alternativa más sencilla basada en definir el estado de humedad inicial de cada evento a partir de la lluvia antecedente al mismo. Por ejemplo, el Soil Conservation Service sugiere la adopción de condiciones iniciales secas, medias o húmedas para su método de infiltración del número de curva a partir de la precipitación de los 5 días anteriores al evento y el estado de crecimiento de la vegetación de la cuenca. Con una filosofía similar, se ha comparado el estado de llenado del tanque H1 del modelo TETIS con la lluvia acumulada de los 3 meses anteriores, obteniéndose una correlación excelente ($\rho_s = -0,85$; $p < 0,001$, ver Figura 6). Aplicando la relación polinómica obtenida de este ajuste a 4 de los eventos simulados, se obtienen las comparaciones de la Figura 6. Como puede apreciarse, los resultados son similares a los obtenidos con la trasposición completa de las condiciones de humedad (incluso se mejoran en época seca), lo que habilita también esta línea de actuación en predicción hidrológica, sobre todo cuando no se dispone de suficientes medios técnicos, si bien a costa de incorporar más incertidumbre en los resultados debido a la variabilidad propia de los procesos hidrológicos.

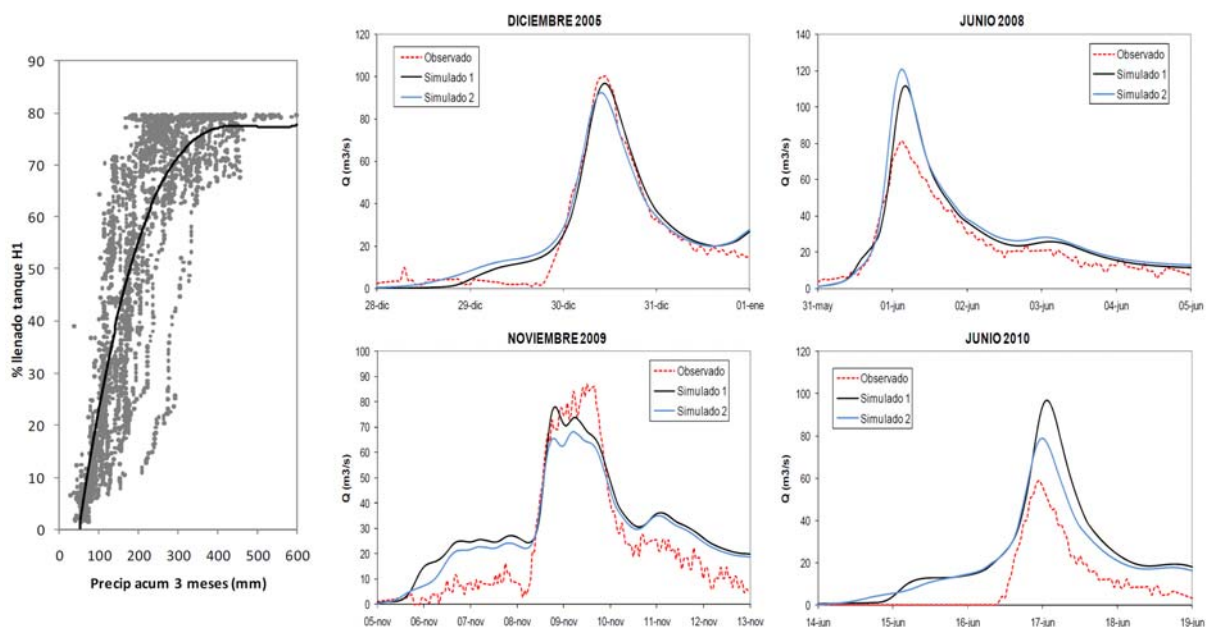


Figura 6 Comparación de la capacidad predictiva de la metodología propuesta (línea negra) frente a una correlación entre precipitación acumulada en los últimos 3 meses y el llenado del tanque de humedad del suelo (línea azul)

Por último y durante el seguimiento de la crecida, los resultados de las simulaciones pueden ser ajustados por comparación con los registros de aforo en la rama de ascenso del hidrograma mediante técnicas estadísticas de caracterización de error detectado (Madsen *et al.*, 2000) o, más simplificada, mediante la modificación de la condición inicial de humedad en un proceso iterativo (Vélez y Francés, 2008). Con respecto a esta última opción y a modo de ejemplo, se ha procedido mediante TETIS al ajuste del porcentaje de llenado del tanque de humedad de suelo en la rama de ascenso de la avenida de junio de 2010, obteniéndose una adecuada corrección del caudal punta resultante, de forma que la alerta asociada pueda modificarse en consecuencia y se consiga una gestión acertada de la crecida (ver Figura 7)

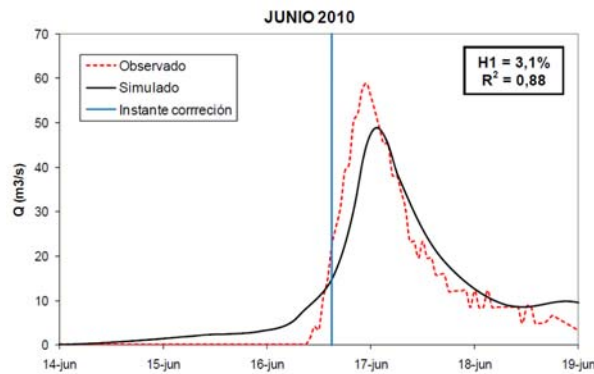


Figura 7 Corrección de la humedad inicial del suelo durante el seguimiento de una crecida

4 Conclusiones

La necesidad de disponer de alertas tempranas en episodios de avenida es fundamental para una efectiva gestión del fenómeno, contribuyendo a una minimización de los daños esperados. Si bien en cuencas grandes o medianas resulta viable esperar a que se inicie la respuesta hidrológica para proceder al ajuste de los modelos matemáticos, en cuencas con escaso tiempo de reacción esto no es posible, por lo que se deben adoptar otro tipo de técnicas que necesariamente impliquen una estimación certera de las condiciones de humedad inicial del evento.

Dejando a un lado las medidas directas o indirectas del estado de humedad del suelo, cuya aplicación a modelos hidrológicos de predicción es todavía incierta, en el presente trabajo se ha analizado la posibilidad de efectuar una simulación continua de la cuenca, con un periodo previo de calentamiento suficientemente largo como para que la humedad en el evento no se vea afectada por las condiciones iniciales adoptadas. Por motivos de operatividad y disponibilidad de información y siguiendo lo sugerido por Nalbantis (1995), la simulación de este periodo de calentamiento se establece a nivel diario, trasladando las condiciones de humedad finales a una simulación posterior del evento a escala horaria. La validez de este procedimiento, tanto desde el punto de vista operativo como funcional, se ha investigado en la cuenca vertiente al embalse de Ullibarri mediante el empleo de dos tipos de modelo distribuido: uno conceptual (TETIS) y otro físicamente basado (MIKE-SHE)

El modelo TETIS ya ha demostrado su buena capacidad predictiva en cuencas de tamaño medio o grande en las que las distintas incertidumbres pueden compensarse entre sí (Munera y Francés, 2009). En cambio su aplicación en cuencas pequeñas resulta incierta, sobre todo cuando se pretende su ajuste a sucesos de naturaleza variable, para los que las simplificaciones efectuadas pueden no ser suficientes para representar la realidad. Los resultados obtenidos apuntan a un comportamiento predictivo satisfactorio siempre y cuando las condiciones de humedad del evento de simulación sean similares a las empleadas en la calibración del modelo. En otros casos, si se quiere disponer de una predicción acertada, se ha demostrado que el modelo requeriría de la implementación de un nuevo algoritmo de infiltración que permita permeabilidad variable en función del contenido de humedad.

El modelo MIKE-SHE también ha manifestado su validez en múltiples escenarios (Graham y Butts, 2005) pero presenta el inconveniente que la sobre-parametrización posee para su adecuada calibración (Perrin *et al.*, 2001), así como una complejidad excesiva al pretender la simulación detallada de todos los procesos hidrológicos, lo que contrasta en ocasiones con la escasez de información base. Los resultados obtenidos en su aplicación a Ullibarri demuestran su capacidad predictiva en todo tipo de escenarios de humedad de suelo, si bien a costa de un ligero empobrecimiento de su funcionalidad en época húmeda.

No son descartables tampoco soluciones más simples, como la estimación estadística de las condiciones de humedad típicas en función de alguna variable climática de fácil obtención, como la precipitación acumulada anterior al evento, que al menos en el caso de Ullibarri ofrecen resultados satisfactorios, si bien de difícil extrapolación a otras cuencas o periodos.

Por otro lado, en los dos modelos aplicados, el traspaso de las condiciones de humedad entre simulaciones resulta operativo, lo que habilita esta línea de trabajo en los Sistemas de Ayuda a la Decisión frente a inundaciones. El grado de similitud entre modelo y realidad es también suficiente como para permitir una adecuada corrección de las predicciones en la medida que progresa la crecida mediante las técnicas habituales de caracterización estadística del error observado (autoregresión con o sin media móvil) o corrección de la humedad inicial.

En cualquier caso, queda patente la conveniencia de incluir varios tipos de modelos hidrológicos de predicción en los SAD, ya que el óptimo en un evento determinado puede variar en función de sus condiciones particulares, no resultando evidente la ventaja que teóricamente un modelo físicamente basado tendría sobre otro conceptual, incluso de tipo agregado (ver por ejemplo discusión en Beven, 1989 y Grayson *et al.*, 1992). Con el objetivo de facilitar la toma de decisiones, la predicción final a generar puede ser un promedio de las procedentes de distintos modelos, con factores de ponderación según la incertidumbre asociada, obtenida mediante una estimación por verosimilitud generalizada (GLUE, ver Beven y Binley, 1992)

5 Referencias bibliográficas

- Abbot, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. y Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, SHE. 2 Structure of a physically-based distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87: 61-77
- Amengual, A., Diomedea, T., Marsigli, C., Martín, A., Morgillo, A., Romero, R., Papetti, P y Alonso, S. 2008. A hydrometeorological model intercomparison as a tool to quantify the forecast uncertainty in a medium size basin. *Natural hazards Earth System Sciences*, 8: 819-938
- Berthet, L., Andréassian, V., Perrin, C. y Javelle, P. 2009. How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 819-831
- Beven, K. y Binley, A. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6: 279-298
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105: 157-172.
- Beven, K. J., 2000. *Rainfall-runoff modelling*. The Primer. John Wiley and sons Ltd. Chichester, U.K.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., Naeimi, V., Bartalis, Z. y Hasenauer, S. 2010. Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7: 4113-4144
- Butts, M.B, Payne, J.T., Kristensen, M. y Madsen, H. 2004. An evaluation of the impact of model structure on hydrological modeling uncertainty for streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 298: 242-266
- Carsell, K.M., Pingel, N.D. y Ford, D.T. 2004. Quantifying the benefit of a Flood Warning System. *Natural Hazards Review*. 5(3): 131-140
- Clark, M., Woods, R. y Ibbitt, R. 2007. Flood forecasts for New Zealand communities. *Water & Atmosphere*, 15(3): 14-15
- Collier, C.G. 2007. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133 (622): 3-23
- Da Ros, D. y Borga, M. 1997. Adaptive use of a conceptual model for real time flood forecasting. *Nordic Hydrology*, 28 (3): 169-188
- Dunne, T., Black, R. D. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6(2): 478-490
- Graham, D.N. y Butts, M.B. 2005. Flexible integrated watershed modeling with MIKE-SKE. En: Sing, V.P. y Frevert, D.K. (eds) *Watershed models*. CRC Press
- Grayson, R.B., Moore, I.D. y McMahon, T.A. 1992. Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 26(10): 2659-2666.
- Havno, K., Madsen, M.N., y Dorge, J. 1995. MIKE-11. A generalised river modelling package. En: Singh, V.P (Ed): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication. Colorado, USA
- Huang, M, Gallichand, J., Dong, C., Wang, Z. y Shao, M. 2007. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes*, 21(11): 1471-1481.
- Ibisate González de Matauco, A. 2005. Variación del riesgo de inundaciones en el río Zadorra (País Vasco) como consecuencia de su regulación. *Investigaciones Geográficas*, 36: 119-1133

- Jacobs, J.M., Myers, D.A. y Whitfield, B.M. 2003. Improved rainfall/runoff estimates using remotely sensed soil moisture. *Journal of American Water Resources association*, 4: 313-324
- Kitanidis, P. y Bras, R. 1980. Real-time forecasting with a conceptual hydrological model.1. Analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, 16: 1025-1033
- Komma, J, Blöschl, G. y Reszler, C. 2008. Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 357: 228-242
- Linsley, R.K. 1982. Rainfall-Runoff Models an Overview. *Proceeding of International Symposium of Rainfall-Runoff Modelling*. Mississippi State University, Mississippi, USA, 3-22.
- Littlewood, G.I y Croke, B.F.W. 2008. Data time-step dependency of conceptual rainfall—streamflow model parameters: an empirical study with implications for regionalization. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (4): 685-695
- Madsen, H., Butts, M.V., Khu, S.T. y Liong, S.Y. 2000. Data assimilation in rainfall-runoff forecasting. 4th Int. Conf. On Hydroinformatics, Cedar Rapids, Iowa, USA.
- Matinec, J. 1960. The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting. IUGG General Assembly of Helsinki, Comission of Surface Waters. *IAHS Publ 51*: 468-477.
- Martina, M.L.V., Todini, E. y Libraron, A. 2006. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrology Earth System Sciences*, 10: 1-14
- Munera, J.C. y Francés, F. 2009. Integración del modelo TETIS en el sistema de alarma temprana DELFT FEWS para predicción de avenidas en tiempo real en algunas cuencas de la C.H. del Júcar. I Jornadas de Ingeniería del Agua. Madrid
- Nalbantis, I. 1995. Use of multiple time-step information in rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 165: 135-159
- Norbiato, D, Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E. y Anquetin, S. 2008. Flash fllood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 262: 274-290
- Ostrowski, M., Bach, M., DeSimone, S.V. y Gamerith, V. 2010. Analysis of the time-step dependency of parameters in conceptual hydrological models. Technical report. Technische Universität Darmstadt, Germany, Graz University of Technology, Austria
- Perrin, C., Michel, C. y Andreassian, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242 (3-4): 275-301
- Puerta, C. 1990. Recursos hidráulicos y demanda de agua en la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Ekonomiaz*, 17: 228-241
- Puricelli, M. 2003. Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- Saxton, K.E. y Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1569-1578.
- Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J. y Krajewski, W.F. 2007. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30 (10): 2087-2097
- U.S. Army Corps of Engineers. 1996. *Hydrologic aspects of flood warning-preparedness programs*. ETL 1110-2-40. USACE Office of Chief of Engineers, Washington, D.C.
- Vélez, J.J. 2001. *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- Vélez, J.J y Francés, F. 2008. Calibración automática de las condiciones iniciales de humedad para mejorar la predicción de eventos de crecida. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 18: 25-36
- Vélez, J.J., López Unzu, F, Puricelli, M. y Francés, F. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 229–246.
- Zehe, E. y Blöschl, G. 2004. Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions. *Water Resources Research*, 40 (10): 1-21