

ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA: INTEGRACIÓN CONCEPTUAL DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y GEOMORFOLOGÍA

HYDROLOGICAL DISTRIBUTED SIMULATION STRATEGY: A CONCEPTUAL INTEGRATION OF HYDROLOGY, HYDRAULICS AND GEOMORPHOLOGY

Jaime Ignacio Vélez Upegui

RESUMEN

Vélez Upegui, J.I. Estrategia de simulación hidrológica distribuida: integración conceptual de hidrología, hidráulica y geomorfología. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 37 (144): 393-409, 2013. ISSN 0370-3908.

Se presenta una estrategia de simulación hidrológica distribuida, a la escala de la cuenca y donde se hace una integración conceptual de elementos de la topografía, la hidrología, la hidráulica y la geomorfología. Se describe el modelo conceptual de almacenamientos y flujos y la forma como se integran sus parámetros. El modelo, en su forma más utilizada, se conoce como TETIS. Se hace un recuento de varias aplicaciones de la estrategia de simulación en las distintas versiones del modelo hidrológico, que ha sido utilizado en distintas condiciones geográficas y climáticas con resultados satisfactorios y se ha adaptado para la simulación de otros procesos.

Palabras clave: simulación hidrológica, modelos conceptuales, modelos distribuidos, parámetros modelos hidrológicos.

ABSTRACT

A strategy for distributed hydrological simulation at watershed scale is presented. It is a conceptual integration of elements of topography, hydrology, hydraulics, and geomorphology. This work describes a conceptual model of storages and flows and the way in which different parameters are integrated. The model, in its most widely used version, is known as TETIS. A recount of several applications of the simulation strategy for different versions of the hydrological model is presented. It has been used in different geographical and climatic conditions with satisfactory results and has been adapted to other process simulations.

Key words: hydrological simulation, conceptual models, distributed models, hydrological model parameterization.

Introducción

La hidrología está tratando de atender la necesidad de conocimiento e información, acerca del agua en la biosfera, sus propiedades y su variabilidad espacio-temporal, para apoyar la toma de decisiones conducentes al aprovechamiento racional y sostenible de los recursos naturales y a una ocupación inteligente y sostenible del territorio. El objeto del conocimiento de la hidrología, es un sistema natural complejo donde se involucran procesos físicos, químicos, bióticos, sociales y culturales a distintas escalas espaciales y temporales.

En la hidrología se tienen grandes problemas de observabilidad, por la gran extensión, por la variabilidad espacial y temporal de las distintas variables de interés, por las dificultades de acceso a los sitios de interés para la observación y por la interferencia que puede hacer la instrumentación en lo que se quiere medir. Esto hace que el avance en el conocimiento en la hidrología sea lento e involucre gran incertidumbre.

La simulación se erige como un tercer pilar en la construcción del conocimiento, complementa y muchas veces articula a los otros dos, teoría y experimentación, y juega un papel relevante en el conocimiento de la complejidad (**Wagenberg**, 1985). Para la simulación se construye o configura un modelo conceptual que representa la realidad de lo que se quiere simular, y el modelo en sí mismo constituye una estructura donde se articulan conceptos, a manera de hipótesis.

Dependiendo del asunto que se pretenda abordar, en hidrología se escoge una escala espacial y temporal y se identifican los procesos claves del sistema a estas escalas, se construye un modelo conceptual en el que se relacionan estos procesos incluyendo relaciones cuantitativas entre variables externas, variables de estado, variables dependientes y los parámetros o propiedades de las componentes del sistema. Con la información disponible de observaciones y mediciones de la realidad, se va verificando la coherencia del modelo y de sus resultados, teniendo en cuenta para ello, las limitaciones de la información, la cantidad y calidad de observaciones, la precisión de las mediciones y la incertidumbre que involucra el todo este proceso de observación y medición en un sistema complejo.

Desde lo metodológico se ha fundamentado la evaluación de la modelación hidrológica (**Dooge**, 1986; **Beven**, 1987; **Kuczera et al.**, 1993) en la teoría de refutación de **Popper** (1959). En los modelos hidrológicos hay algunas hipótesis que no son factibles de verificar y sólo es posible, si éste es el caso, refutar. Cuando no se encuentra coherencia entre los resultados del modelo conceptual y lo resultante de la observación o medición se considera que el modelo conceptual no es adecuado y se encuentran elementos para refutar algunas

hipótesis. Se procede entonces a ajustar el modelo sustituyendo las hipótesis que han sido refutadas.

La simulación se presenta así como una estrategia importante para la hidrología, no solo para producir resultados de interés para la toma de decisiones acerca de la ocupación del territorio y del aprovechamiento de sus recursos naturales, si no también para la generación de conocimiento mediante la construcción de modelos conceptuales coherentes a las escalas de interés.

A lo largo de la historia, y en la medida que la hidrología se ha ido consolidando como ciencia, se ha ido construyendo conocimiento con participación de modelos para la simulación. En hidrología es de gran importancia el manejo de las escalas y es claro que en las distintas escalas espacio-temporales no todos los procesos son igualmente determinantes, ni todas las variables son significativas. Los modelos conceptuales se enfocan a la representación en la escala adecuada de los procesos físicos determinantes de la variable que se quiere analizar. Ellos son estructuras donde se articulan almacenamientos y flujos. En los almacenamientos se hace el balance del agua de acuerdo al principio de conservación de masa y los flujos se representan mediante relaciones empíricas en función de los almacenamientos y/o de otras variables, teniendo parámetros que se pueden relacionar con las características del medio.

Un modelo conceptual adaptado para representar a la escala adecuada los procesos físicos determinantes de la variable de interés, constituye una alternativa robusta para atender problemas de distinta naturaleza y con buen desempeño a distintas escalas espaciales y temporales. Este tipo de modelos está soportando, en gran medida, las necesidades operativas de la hidrología y en muchos casos son una solución suficientemente precisa, económica y fácil de utilizar.

En sus orígenes, los modelos conceptuales consideraban la cuenca como una sola unidad espacial y para su representación, independientemente de su variabilidad espacial, cada una de sus características se agregaba en un único valor para toda la cuenca. Igualmente, se consideraba que en cada intervalo de tiempo la precipitación se distribuía de modo uniforme sobre toda la cuenca. Posteriormente, para considerar la variabilidad espacial de la precipitación, la heterogeneidad de la forma del terreno y la variabilidad espacial de las características del suelo y su cobertura, se han ido desarrollando modelos que articulan espacialmente varios elementos denominados unidades de respuesta hidrológica que representan porciones de la cuenca con características homogéneas.

Los avances en la tecnología de adquisición de información, mediante sensores remotos, han permitido obtener mejor in-

formación acerca de la heterogeneidad espacial en la cuenca y de la variabilidad espaciotemporal de algunas variables hidroclimáticas. Así, cada día se puede disponer de más información, de mejor calidad y de mejor resolución para parametrizar, alimentar y verificar los modelos conceptuales. Estos avances permiten recolectar, almacenar, procesar y asimilar cada día más información de campos espaciotemporales de variables hidroclimáticas, por lo que el incremento en la capacidad de obtener y manejar más información favorece de una manera notable la modelación distribuida.

En este artículo se presenta una estrategia de simulación distribuida apoyada en una estructura conceptual de almacenamientos y flujos, en múltiples niveles de celdas cuadradas articuladas en la forma de la red de drenaje (Vélez, 2001). También se hace un recuento de los campos de aplicación en los que se han realizado aplicaciones con distintos fines, a distintas escalas y a distintas resoluciones, en distintas regiones del mundo: Modelos lluvia caudal para las crecidas en cuencas de montaña, Modelos lluvia caudal para predicción de inundaciones, Modelos lluvia caudal de largo plazo para el recurso hídrico, Modelos lluvia caudal que involucran el estado de los almacenamientos subterráneos, Modelos lluvia nivel freático para análisis de estabilidad de laderas y deslizamientos detonados por lluvias, Modelos de producción transporte y almacenamiento temporal de sedimentos, Modelos para la transporte, dilución y asimilación de cargas contaminantes, Modelos de la dinámica espacio temporal de la vegetación y Modelos para la evaluación del impacto del cambio climático.

En el siguiente numeral se describe el modelo conceptual propuesto. Más adelante se presenta un análisis de los principales parámetros que involucra el modelo conceptual: de las celdas y las laderas, de las propiedades físicas del suelo y de la red de drenaje. Por último, se presentan algunos campos de aplicación de la estrategia de simulación y unas conclusiones.

El modelo conceptual distribuido

La estrategia de Simulación Hidrológica Abierta con base en la Onda Cinemática Geomorfológica SHIA-OCG, se trata de la implementación de un modelo conceptual distribuido en el que se articulan elementos de la hidrología, la hidráulica y la geomorfología para representar los procesos de almacenamiento temporal del agua y del flujo del agua en la cuenca. El flujo puede darse como retorno a la atmósfera por evapotranspiración o de escorrentía en sus distintas formas (superficial, subsuperficial y subterránea).

Se trata de un modelo espacialmente distribuido, donde el continuo de la cuenca se ha subdividido en elementos rectangulares (celdas cuadradas), con base en un modelo digital

de elevación en formato raster. Para representar la red de drenaje, la estructura de conexión de las celdas se basa en el esquema de direcciones del flujo D8 (O'Callaghan y Mark, 1984). En este esquema, cada celda entrega el flujo solamente a una celda receptora vecina en la dirección de la mayor pendiente. Todas las celdas de la cuenca quedan conectadas para entregar a una de sus vecinas, aguas abajo en la dirección del flujo, y a través de ésta a otra celda y así continúa hasta la salida de la cuenca. Es decir, que a partir de las direcciones de flujo se configura una red de drenaje que conecta todas las celdas de la cuenca con el sitio de salida. Esta red, aunque más densa, debe representar adecuadamente la red de drenaje de la cuenca real.

Las celdas tienen varios niveles o capas y en cada uno de ellos se representa el almacenamiento temporal y la circulación del agua en una de sus trayectorias. En cada nivel hay un conducto para el flujo vertical hacia niveles vecinos de acuerdo a trayectorias preferenciales, predefinidas de acuerdo a la topografía y a los suelos. Las trayectorias preferenciales de flujo definen una red de drenaje virtual a la que están acoplados los almacenamientos.

Por lo general el flujo es preferentemente vertical hasta alcanzar un umbral o una tasa crítica, a partir de la cual, se generan excedentes que se almacenan temporalmente mientras circulan a través de la misma capa en la dirección de la pendiente hacia otra celda siguiendo una trayectoria preferencial que se constituye como un cauce interno. El flujo continúa pasando de celda en celda en la misma capa hasta encontrar una discontinuidad y entonces se incorpora al cauce. La discontinuidad corresponde a una incisión de la red de drenaje en el terreno.

En la primera versión (Vélez, 2001) el modelo consideraba cinco niveles de almacenamiento y el flujo. En la figura 1 se presenta una gráfica en la que los almacenamientos son esquematizados como tanques y los flujos como flechas que se describe a continuación.

En cada intervalo de tiempo, en cada celda llega una cantidad de agua lluvia a la superficie del suelo. En la celda el flujo es preferentemente vertical y en el primer nivel parte de la lluvia es retenida temporalmente por capilaridad como humedad en el suelo (T1) y sale de allí por evapotranspiración.

Los excedentes de la acción capilar del suelo quedan disponibles para seguir su camino al interior del mismo como agua gravitacional y cuando la cantidad de agua disponible es mayor que la capacidad de infiltración, los excedentes circulan sobre la ladera; el almacenamiento del agua mientras fluye por la ladera como escorrentía superficial se ha representado en un segundo nivel de almacenamiento (T2).

El agua que se infiltra va descendiendo por el interior del suelo hasta que encuentra una reducción de la permeabilidad, y cuando la cantidad de agua infiltrada es superior a la capacidad de infiltración hacia niveles inferiores o percolación, se acumula como agua freática mientras va circulando en dirección de la pendiente por el interior de la capa superior del suelo. Este flujo subsuperficial se ha representado en un tercer nivel de almacenamiento (T3).

El agua que ingresa al interior del suelo, por debajo de la capa superior, percola hasta el acuífero donde se almacena temporalmente mientras fluye muy lentamente como agua subterránea, lo que se ha representado en un cuarto nivel de almacenamiento (T4).

En cada uno de los distintos niveles descritos, el agua sigue su trayectoria en la dirección de la ladera hasta que encuentra un cauce que intercepta el respectivo nivel y allí se almacena temporalmente mientras fluye por el cauce. Esto se ha representado en el quinto nivel de almacenamiento (T5).

El modelo permite una configuración flexible con el número de capas o de niveles (zonas de almacenamiento y flujo) que el modelador considere suficientes para representar adecuadamente los procesos determinantes en la cuenca, de acuerdo al objetivo del estudio. El modelo se ha configurado en distintas regiones del mundo en una gran variedad de condiciones climáticas, con todo tipo de condiciones topográficas y con diferentes tipos de suelos y coberturas. En las distintas configuraciones se han incluido otras capas o niveles (almacenamiento temporal y fusión de nieve; almacenamiento y fusión glaciaria; interceptación, almacenamiento en la vegetación y su evaporación; percolación a otros acuíferos, almacenamiento temporal y circulación a través de ellos).

En cada capa, la cantidad de agua almacenada (conceptualizada como en un tanque) es una variable de estado que no puede exceder una capacidad máxima y no puede ser inferior a una capacidad de almacenamiento muerto o inactivo. Los parámetros que definen las capacidades de almacenamien-

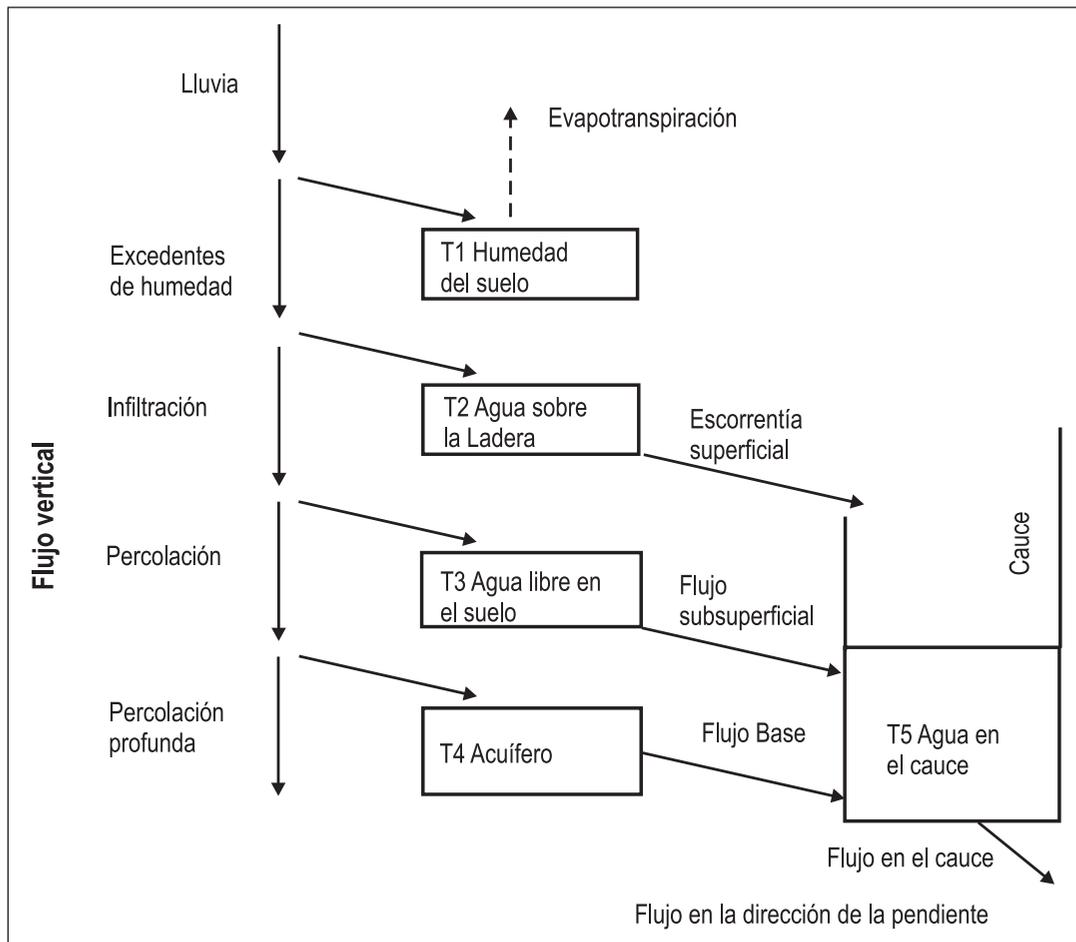


Figura 1. Representación gráfica del modelo conceptual de la primera versión del modelo (Vélez, 2001).

to se relacionan con características físicas del suelo en cada capa o de la cobertura vegetal.

El flujo y almacenamiento temporal en cada uno de los niveles es representado por la ecuación de la onda cinemática, que acopla la ecuación de conservación de masa con una relación empírica para la tasa de flujo a la salida y el almacenamiento temporal; esto garantiza la conservación de masa y la coherencia de los flujos y los almacenamientos en la simulación (Vélez, 2001; Francés et al., 2007). En algunos casos, la ecuación de onda cinemática resultante es no lineal y se requiere de un esquema de solución numérica que no distorsione excesivamente los efectos de la no-linealidad.

Los parámetros de las relaciones empíricas de los flujos de salida en todos los niveles, están relacionadas con las características físicas de la cuenca (cobertura, suelos, morfología). Esto genera un vínculo entre el modelo matemático teórico con la realidad de la cuenca.

Los parámetros del modelo conceptual

Los parámetros de un modelo conceptual que pretende la representación de la física de los procesos determinantes en la cuenca, deben relacionarse con características físicas del sistema natural. En la configuración de un parámetro adecuado para el modelo distribuido se deben verificar dos condiciones: el parámetro debe ser representativo de la variabilidad espacial en la celda, tanto de las características físicas como de las variables involucradas en el proceso que se quiere representar; y el parámetro debe ser adecuado a la variabilidad temporal de las variables involucradas en el proceso y a la resolución temporal del modelo.

En la estrategia de simulación SHIA-OCG (Vélez, 2001) y en el Modelo TETIS (Francés et al., 2007), se ha configurado una estructura de parámetros en la que se hace distinción entre la variabilidad espacial de las características físicas a escala de cuenca, representadas en mapas de parámetros estimados a priori a partir de la información medioambiental disponible, y los parámetros efectivos que se deben emplear en el modelo a escala de celda para tener en cuenta las posibles fuentes de incertidumbre en su estimación y los efectos de escala espacial y temporal.

Para la obtención de los mapas de parámetros efectivos, a partir de los parámetros estimados a priori, se utiliza una función de transformación o de corrección. En la medida que la estimación a priori de los parámetros sea más acorde a la escala espacial y temporal del modelo, la forma de la función de transformación de los parámetros es más simple y puede

ser tan solo un factor multiplicador que ajuste globalmente a los parámetros estimados a priori. Esta estructura, diferenciada en su forma simplificada, permite enfocar el proceso de calibración al conjunto de factores de ajuste facilitando este proceso, ya sea de calibración manual supervisada o de calibración automática (Vélez, 2003; Vélez y Francés, 2004; Francés et al., 2007; Vélez et al., 2009).

Cada uno de los parámetros efectivos y las diferentes proporciones entre ellos puede tomar valores en un rango en que es consistente con la estructura conceptual del modelo. El rango aceptable para los factores de ajuste depende de los procesos que se están representando y de la resolución espacial y temporal en que se ha implementado la simulación. Para cada factor, este rango es definido por el criterio experto de los analistas sobre el conocimiento de la física de los procesos involucrados y del caso de aplicación y su escala.

En la simulación hidrológica se pueden obtener resultados similares con distintos modelos o incluso con el mismo modelo pero con distintas configuraciones, lo que se ha definido como equifinalidad (Beven y Freer, 2001). En el proceso de calibración de un modelo pueden existir distintas combinaciones de parámetros con los que los resultados simulados se ajusten bien a los valores medidos. Es posible obtener buenos ajustes con valores en los parámetros efectivos que no son consistentes con la estructura conceptual del modelo; en este caso la calidad de la calibración sacrifica la capacidad del modelo para representar la realidad y el modelo se convierte en un modelo de caja negra. Por lo que una vez calibrado el modelo, es prudente realizar un análisis cuidadoso del valor de los parámetros a la luz de la forma en que se están representando los procesos en la simulación. Si el conjunto de parámetros obtenidos del mejor ajuste en la calibración no es coherente con la estructura conceptual del modelo, se deben explorar otras combinaciones de parámetros que presenten un ajuste satisfactorio y sean coherentes con el modelo. Si la información disponible para la calibración es de buena calidad y no es posible obtener un ajuste satisfactorio con valores de los parámetros efectivos adecuados a la estructura conceptual del modelo, se tienen elementos para refutar la validez de alguna de las hipótesis que fundamentan la estructura del modelo conceptual y es conveniente la modificación de estas o la incorporación de nuevas hipótesis para modificar su estructura.

Para la preparación de los mapas a priori se ha trabajado en dos direcciones: una en el análisis de la representatividad de los parámetros en la celda y en la ladera y la segunda orientada a la definición de los parámetros del modelo relacionados con la red de drenaje. Estos se detallan a continuación.

Los parámetros en la celda y en la ladera

Los parámetros en la celda y en la ladera están relacionados con las características de la cuenca: relieve, geomorfología, suelos, coberturas y usos del suelo que son características físicas medibles en el campo o en el laboratorio (a partir de muestras tomadas en campo).

Algunas características físicas dependen de la escala de medición; es el caso de características topográficas o geométricas como la longitud de un cauce en un tramo, la pendiente de la superficie del terreno en una ladera, etc.

Hay información de características físicas disponible a una resolución espacial que coincide con la escala de medición; es el caso de las imágenes digitales discretas que es información limitada por la discretización espacial.

Otras veces la información, medida con una resolución, ha sido consolidada a otra resolución (menor) utilizando para tal efecto alguna métrica espacial. Hay que tener en cuenta que la variabilidad espacial de una característica física puede tener un efecto sobre el proceso que se quiere simular. Así, una métrica predefinida de los valores medidos, a mayor resolución, no necesariamente corresponde al valor representativo para la celda, en el contexto del modelo hidrológico.

Cuando se cuenta con información con muy alta resolución, se puede hacer un análisis de la variable para distintas resoluciones de discretización, considerando la métrica pertinente, y obtener así la dimensión fractal de la variable. Esto provee una expresión que permite hacer una corrección del efecto de la discretización de la medición de la variable y transformar los mapas de información disponible en los mapas con la información que requiere el modelo.

La información disponible puede también ser el resultado de la interpolación de valores puntuales o del remuestreo de variables discretas a otra resolución, mediante técnicas de interpolación geométricas o geoestadísticas. El resultado obtenido para la descripción de la variable a mayor resolución depende de la técnica utilizada y no necesariamente es representativo de lo que realmente se tiene en la naturaleza. En este caso, no hay que olvidar que los valores puntuales medidos tienen una incertidumbre asociada al proceso de medición y a la variabilidad local y los valores interpolados, además de albergar la incertidumbre de medición y de variabilidad local de los valores que los generan, incluyen la incertidumbre relacionada con la capacidad del modelo o la técnica de interpolación para representar la distribución espacial de la variable. Puede ser prudente representar la característica con al menos dos elementos: una variable que describa un valor modal y una variable que describa la varia-

bilidad local y la incertidumbre (**Puricelli**, 2003). Para tener una mejor representación se requiere de un modelo conceptual de la variabilidad espacial que ayude a estos procesos de interpolación o de remuestreo, e incluso que ayude a orientar la toma de muestras o las mediciones puntuales en campo.

Una vez se tienen valores representativos de cada una de las características físicas de interés relacionadas con el objeto de la modelación para cada una de las celdas en todo el dominio espacial, se procede a construir mapas con esta información.

Las propiedades físicas del suelo y su variabilidad espacial

Las propiedades físicas del suelo presentan una gran variabilidad espacial que no solo es un asunto de aleatoriedad; es estructurada y esta estructura tiene importancia en los procesos en la cuenca (**Merz y Plate**, 1997). Desde el punto de vista de los procesos hidrológicos, esta estructura de la variabilidad espacial tiene, al parecer, una relación con la estructura topográfica – morfológica (**Merz y Bârdossy**, 1998; **Schmidt et al.**, 1998); en muchos casos se identifica una toposecuenciación en las propiedades hidráulicas del suelo (contenido de agua y conductividad en condiciones de saturación) que se relaciona con su posición en la ladera y la forma de la misma.

Las características topográfico-morfológicas en el sitio y su variabilidad espacial, pueden constituir el soporte para una representación de la variabilidad espacial (**Merz y Bârdossy**, 1998). Estas características topográfico-morfológicas sobre todo el dominio espacial se pueden obtener como resultado del procesamiento del modelo de elevación digital y de la red de drenaje.

En cada sitio, las características topográfico-morfológicas locales (pendiente, curvatura, área drenada a través del sitio, distancia horizontal y vertical a los cauces de la red de drenaje más cercanos, etc.) son factores determinantes de las condiciones para la presencia del agua en el suelo, su circulación y su variabilidad temporal; así, generan condiciones diferenciadoras para la evolución del suelo (formación o deterioro) y en buena medida determinan las propiedades físicas y químicas del suelo. Algunas de éstas propiedades (espesor de la capa superior, granulometría, textura, estructura, porosidad -micro y macro-, conductividad saturada en la superficie, variación de la conductividad con la profundidad, etc.) son determinantes de los patrones de circulación de agua en el suelo, que es el principal modelador del relieve, y a mediano y largo plazo, de las características topográfico-morfológicas. Esta retroalimentación reafirma la relación entre las características topográfico-morfológicas y algunas propiedades físicas de los suelos relacionadas con parámetros del modelo hidrológico.

En condiciones geográficas y climáticas similares, los parámetros del modelo son trasladables a zonas de condiciones similares geológicas, geomorfológicas, de suelos, coberturas y usos del suelo. En cierto modo, la similitud geológica, geomorfológica, de coberturas y de usos del suelo debe corresponder a una similitud de los suelos y de sus parámetros hidrológicos. Esto ha permitido, en un mismo contexto regional, la extrapolación de parámetros a cuencas sin medición (Vélez et al., 2009).

En zonas con muy buena información de las propiedades de los suelos, se pueden explorar relaciones funcionales cuantitativas empíricas entre éstas propiedades y los valores de distintas variables geomorfológicas y ambientales. Las relaciones obtenidas también pueden considerarse de validez regional para su aplicación en condiciones similares.

También se puede clasificar el terreno en términos de sus características morfológicas y ambientales; estas clases pueden servir para orientar el diseño de una estrategia para la medición de propiedades del suelo en todas las clases de terreno en la cuenca o para definir las áreas donde es posible la interpolación de mediciones puntuales. A partir de la información disponible de las propiedades del suelo en cada clase, se puede generar su respectiva tabla de atributos con las propiedades del suelo, donde puede ser un valor único para cada propiedad o un valor modal y un descriptor de su variabilidad local.

Para la clasificación morfológica del terreno hay métodos con distinto nivel de complejidad: desde el trabajo tradicional de cartografía geomorfológica con exploración de campo, el procesamiento automático de mapas digitales usando índices como la distancia vertical al cauce siguiendo la dirección del flujo denominado HAND (Renno et al., 2008) y el Índice Topográfico (Beven y Kirkby, 1979; Merz y Bârdossy, 1998) o de formas más complejas y estructuradas como la utilización de técnicas de procesamiento de imágenes y técnicas de reconocimiento de patrones.

Los mapas raster georreferenciados, al igual que las imágenes digitales discretas, tienen la forma de una matriz bidimensional. Así, considerando a los mapas derivados del DEM y a otros de información ambiental que pueda ser relevante como bandas de una imagen multiespectral, se pueden utilizar técnicas y herramientas de clasificación supervisada y no supervisada para clasificar el terreno (Prima et al., 2006; Arrell et al., 2007). Previamente, es necesario uniformizar todos los mapas a una misma discretización espacial y reescalar los datos de cada mapa en valores enteros para que puedan ser procesados directamente por el software disponible para procesamiento de imágenes. Para la clasificación morfológica del terreno a partir de mapas raster también

se pueden utilizar las técnicas de análisis de texturas que, aunque se desarrollaron para imágenes digitales discretas, también son aplicables a mapas. Patiño (2011), utilizando el método de extracción de texturas, desarrolló un método para clasificación geomorfológica que ha sido aplicada en algunas regiones de Colombia con limitaciones de cartografía geomorfológica, y el resultado obtenido, bastante satisfactorio, ha sido utilizado en la zonificación de la amenaza de inundación (IDEAM, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, 2011).

Los intervalos de tiempo considerados en la simulación, muchas veces determinados por la información disponible y ante la variabilidad temporal de las variables involucradas, pueden ser relativamente largos. Así, en el modelo se distorsionan las variables que tienen una variabilidad de más alta frecuencia, lo que puede tener efecto en los resultados del modelo y obliga a ajustar algunos parámetros.

Cada parámetro efectivo requerido por el modelo tiene un significado físico; teniendo en cuenta las características físicas con las que se relaciona y la escala espacio temporal de los diferentes procesos en la simulación, se puede formular una relación funcional para obtener los mapas con los parámetros efectivos a partir de mapas con valores de las características físicas.

Cuando se cambia la resolución espacial o temporal en la aplicación del modelo, necesariamente cambian los parámetros efectivos. Se pueden configurar nuevamente los mapas de parámetros estimados a priori y acordes con la nueva resolución, o en su defecto, en el proceso de calibración los factores de ajuste que se obtienen serán diferentes a los obtenidos en otras resoluciones.

Los parámetros relacionados con la red de drenaje

La red de drenaje, constituida por cauces donde se concentra y fluye la escorrentía procedente de las laderas, es el resultado de la acción del agua donde las fuerzas erosivas de la corriente han sido mayores que la resistencia del suelo y su cobertura y se manifiesta en el paisaje como una incisión permanente y claramente diferenciable.

Para que un modelo hidrológico conectado sea funcional, debe representar adecuadamente la red de drenaje. La información de la topografía en el modelo de elevación digital debe ser coherente con el mapa de la red de drenaje (conocido como de líneas azules) para que las pendientes en las laderas concentren el flujo en la red de drenaje. Para garantizar esta coherencia es necesario revisar, corregir y ajustar el modelo de elevación digital.

Algunas veces sólo se cuenta con información procedente de campos de radar con el modelo de elevación digital y no se tiene información cartográfica para diferenciar los cauces de la red de drenaje, aunque todas las celdas tengan direcciones de flujo y estén conectadas entre sí formando una red de drenaje en todo el dominio. Puede haber sumideros inexistentes en la realidad, que hay que corregir, y hay celdas donde en la realidad no hay elementos de la red de drenaje. La identificación de las celdas que tienen elementos de la red de drenaje depende de que se haya alcanzado un umbral en las condiciones para la incisión del cauce (**Montgomery y Dietrich**, 1988). Este umbral se puede definir en función de las características del suelo, de la pendiente local y del área acumulada que se drena a través del elemento. Se han desarrollado diferentes algoritmos de extracción automática de la red de drenaje (**Tarboton et al.**, 1991; **Tarboton**, 1997; **Ramírez y Vélez**, 2002; **Castro**, 2010).

La mayoría de modelos conceptuales con base física, estiman la escorrentía de la laderas o subcuencas y luego ésta escorrentía es integrada en los principales cauces de la red de drenaje, donde se hace un tránsito hidráulico. El tránsito hidráulico requiere información acerca de: la pendiente del cauce, la longitud real del tramo de simulación, la forma de la sección transversal del cauce, la rugosidad del lecho y los elementos claves en la disipación de energía. Todo esto implica un levantamiento de campo detallado (levantamiento topográfico y batimétrico, con secciones transversales en el cauce, medición y conteo de piedras en el lecho para estimar la rugosidad). Realizar esta tarea en todos los cauces de la red de drenaje sería bastante costoso y no necesariamente muy eficiente. En la mayoría de las aplicaciones la información completa y detallada sólo se obtiene para un tramo del cauce principal y para el resto de los cauces de la cuenca se hacen simplificaciones que en muchos casos pueden incidir en el resultado del modelo.

En la mayoría de los casos, la información detallada de campo se limita al levantamiento de unas secciones transversales a intervalos irregulares y donde sea relativamente fácil el levantamiento de la sección, y a una inspección del lecho en el cauce para tener una idea de los sedimentos y tener elementos de juicio para escoger un valor para la rugosidad. Luego, el modelo se configura por tramos con un cauce prismático con la sección transversal obtenida del levantamiento de campo, con una rugosidad determinada por el tamaño de los sedimentos y la pendiente entre secciones obtenida del levantamiento topográfico.

Históricamente, la coherencia entre la forma del cauce y el caudal formador se ha planteado desde la estabilidad de canales de riego con la Teoría del Régimen (**Kennedy**, 1890;

Lacey, 1930) y posteriormente desde el equilibrio en canales naturales con la Geometría Hidráulica (**Leopold y Maddock**, 1953). La Geometría Hidráulica propone relaciones empíricas dimensionalmente homogéneas entre el caudal y la forma de la sección del cauce que ocupa el flujo; se han explorado dos versiones: una denominada “de aguas abajo”, que para cualquier cauce relaciona el ancho del cauce a sección llena, la profundidad media del flujo a sección llena y la velocidad media a sección llena con el caudal máximo anual medio; y la denominada “en la estación” que en un mismo sitio relaciona las dimensiones del cauce con el caudal del flujo que lo ocupa.

Muchos autores han estimado valores para los exponentes y coeficientes de estas relaciones para ríos de distinto tamaño, en distintas regiones del mundo y distintas condiciones morfológicas (**Leopold y Wolman**, 1953; **Leopold et al.**, 1964; **Dury**, 1976; **Knighthon**, 1975; **Rosgen**, 1996). Para la Geometría Hidráulica “Aguas Abajo”, se ha encontrado que los exponentes obtenidos en diferentes regiones y para corrientes de distinto orden de magnitud son numéricamente muy cercanos entre sí y se puede considerar que son muy estables, mientras que los coeficientes presentan mayores diferencias y se considera que sólo tienen validez regional en condiciones similares a los de los ríos considerados en la muestra.

Acoplando las relaciones de la “Geometría Hidráulica Aguas Abajo” con las de la “Geometría Hidráulica en la Estación”, en un tramo de un cauce y para cualquier condición de flujo se puede obtener el ancho, la profundidad y la velocidad media en la sección, a partir del caudal y del caudal a banca llena en el sitio, y unos coeficientes y exponentes de Geometría Hidráulica adecuadas a las condiciones morfológicas del tramo en cada intervalo de tiempo.

El caudal a banca llena se ha relacionado con el caudal máximo anual medio y se ha considerado que tiene un período de retorno cercano a 1.5 años (**Leopold et al.**, 1964; **Dury**, 1976; **Richards**, 1982). En distintas regiones del mundo se han obtenido relaciones de escala para la estimación de los caudales en función del área de la cuenca y específicamente en Colombia, **Mesa et al.**, 2002a; **Mesa et al.**, 2002b y **Poveda et al.**, 2007. También se han encontrado relaciones con muy buen ajuste para el caudal máximo anual medio y para su varianza en función del caudal medio multianual que puede estimarse fácilmente mediante el balance hídrico de largo plazo (**Vélez et al.**, 2001).

La posibilidad de contar con un estimado razonable de las características del cauce en toda la red de drenaje, permite un mejor acople del modelo hidráulico que representa el flujo en los cauces dentro del modelo hidrológico. Esto ha permitido que los modelos de este tipo puedan llevar una estrategia en

la modelación hidráulica en todos los elementos de la red de drenaje. La geometría hidráulica representa muy bien los cauces cuando el nivel del flujo está por debajo del de sección llena pero cuando el flujo se desborda se requiere de información adicional de la sección de flujo, dependiendo del entorno geomorfológico.

Como insumos iniciales se tiene un modelo de elevación digital en formato raster cuyo tamaño de celda define la discretización espacial del modelo. Una vez debidamente procesado el modelo de elevación digital se tienen los siguientes productos: un mapa de direcciones de flujo según el esquema D8, un mapa de pendientes, un mapa de número de celdas acumuladas aguas arriba y un mapa con la red de drenaje jerarquizada.

Se asume una red de drenaje virtual y que es representativa de la real. En la red de drenaje virtual hay un solo cauce en cada celda que recibe de todas las celdas aportantes aguas arriba y que se conecta aguas abajo con una sola salida hacia la celda que lo indique el mapa de direcciones de flujo. La pendiente de este cauce, es la que corresponde a la celda en el mapa de pendientes y la forma del cauce es la que debería tener de acuerdo al área drenada, la pendiente y las características morfológicas de la zona en la que se encuentra el tramo de interés de acuerdo con relaciones de la Geometría Hidráulica.

Se supone que la sección del cauce está en una condición cercana al equilibrio, la velocidad del flujo se puede estimar por medio de expresiones para flujo uniforme y el coeficiente de rugosidad se puede obtener de acuerdo al radio hidráulico de la sección del flujo y el tamaño de los sedimentos (**Limerinos**, 1979).

En varios experimentos realizados en corrientes de montaña, en los que se utilizaron trazadores, se encontró que en todos los casos el valor obtenido para el tiempo de viaje a partir de las estimaciones hidráulicas en la secciones de aforo era muy inferior al obtenido del experimento con trazadores (**Vélez et al.**, 2004). En este proceso, aunque se tiene un buen detalle de la sección transversal del cauce, se ha hecho una gran simplificación, no se han tenido en cuenta los patrones de alineamiento horizontal y vertical, muchas veces elementos claves en el almacenamiento temporal y en la disipación de la energía. Para mejorar la estimación de la disipación de energía en cauces con morfología de escalones y pozos, se propuso una componente de la rugosidad relacionada con la geometría del patrón de alineamiento vertical y del caudal (**Vélez et al.**, 2004).

Es claro que el modelo no es la realidad, es una simplificación de ella pero es importante tener cuidado de que ésta

simplificación sea adecuada para los fines que se quieren con la utilización del modelo conceptual.

Para la representación de procesos de transporte y transformación de solutos que se vuelven críticos con caudales bajos, se requiere una mejor representación del cauce, considerando los patrones de alineamiento horizontal y vertical y la información que provee la geometría hidráulica de las secciones transversales es insuficiente. En la literatura se encuentran distintos esquemas de clasificación de cauces, de acuerdo a su morfología: entre otros, **Rosgen** (1994), **Montgomery y Buffington** (1997) y **Flores et al.**, (2006). Estos últimos presentan una metodología que con base en la pendiente del cauce y la potencia específica de la corriente, permite diferenciar la morfología en cuatro tipos: “cascada”, “escalón-pozo”, “lecho plano”, y “pozo-rápido”. Cada una de estas morfologías tiene características específicas respecto a la disipación de energía, la dinámica sedimentológica, la incorporación de oxígeno, la dilución y asimilación de sustancias, la autodepuración del agua y la provisión de hábitat para múltiples especies (**Stewardson**, 2005). Las distintas morfologías tienen diferencias claras en la relaciones de geometría hidráulica; **Jiménez** (2011) obtiene algunas relaciones para corrientes de montaña en Colombia.

Cuando los procesos hidrológicos involucrados en un modelo conceptual se pueden representar mediante la utilización de parámetros relacionados con elementos geomorfológicos, la variabilidad espacial de estos elementos se proyecta al modelo a través de los parámetros.

Se hace necesario trabajar en la construcción de una nueva geometría hidráulica del tramo donde se relacione el caudal con el volumen de agua almacenado en el tramo, la velocidad media en el tramo y la rugosidad en el tramo con elementos de los patrones de alineamiento y para cada tipo de morfología.

Campos de aplicación de la estrategia de simulación

La estrategia de simulación hidrológica distribuida mediante celdas rectangulares, conectadas de acuerdo a trayectorias de flujo y con base en la onda cinemática con parámetros relacionados con características geomorfológicas, inicialmente se le denominó SHIA y el software desarrollado durante varios proyectos de investigación en la UPV (Universidad Politécnica de Valencia, España) se le dio el nombre de TETIS. En Colombia, en UNALMED se han hecho desarrollos paralelos de software en proyectos de investigación y, generalmente, con variantes no lineales en algunas capas o niveles. Estos desarrollos se han reportado como versiones y adaptaciones de SHIA: Modelos lluvia caudal de largo plazo

para el recurso hídrico, Modelos lluvia caudal que involucran el estado de los almacenamientos subterráneos, Modelos lluvia nivel freático para análisis de estabilidad de laderas y deslizamientos detonados por lluvias, Modelos de producción transporte y almacenamiento temporal de sedimentos, Modelos para el transporte, dilución y asimilación de cargas contaminantes, Modelos de la dinámica espacio temporal de la vegetación, Modelos para la evaluación del impacto del cambio climático.

Simulación de crecidas

Las primeras aplicaciones de la estrategia de simulación tenían por objeto configurar un modelo robusto y eficiente para la simulación de crecidas en los cauces a causa de eventos importantes de lluvia sobre la cuenca, para así, mejorar la capacidad de evaluación de amenazas de inundación (Vélez, 2001).

Una de las ventajas de esta estrategia de simulación es que es “abierto” y para las relaciones entre la tasa de flujo y la cantidad de agua almacenada se pueden incorporar las ecuaciones que se requieran, de acuerdo al flujo que se va a representar y a la escala de la cuenca y a la resolución espacial y temporal de la simulación.

Una de las primeras preguntas que se abordó con el modelo se con las ventajas de la representación del flujo de los cauces mediante la ecuación de la onda cinemática no lineal y la solución numérica en un esquema implícito de diferencias finitas, frente a aproximaciones y simplificaciones lineales, y de su impacto en los resultados obtenidos a la escala de la cuenca. Para atender esta inquietud, inicialmente se hicieron experimentos numéricos en una cuenca teórica donde la red de drenaje era un árbol fractal (árbol de Peano) y se encontraron diferencias importantes entre los resultados obtenidos de la solución numérica de la Onda Cinemática no lineal y la solución de un Esquema Simplificado Lineal. Las diferencias en los hidrogramas obtenidos a la salida de la cuenca eran más grandes a medida que aumentaba la magnitud del evento. Los resultados obtenidos son interesantes ya que al sintetizarlos se obtienen expresiones para el caudal pico, el tiempo de respuesta en función de la magnitud del evento con estructuras similares a los reportados en la literatura y obtenidos de datos en cuencas experimentales, cuando se han reportado evidencias de no linealidad en la respuesta hidrológica (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002).

El modelo se implementó en la cuenca experimental del CE-MAGREF (Francia) “Real Collobrieres” y para evaluar el desempeño, se calibró con un ajuste más que satisfactorio, su validación con otros eventos fue de muy buena calidad y siempre, en todos los casos, su desempeño fue superior al de

otros modelos con los que se comparó (Vélez, 2001; Vélez, 2003). Se calibró el modelo en la cuenca principal y se validó espacialmente en dos subcuencas y en todos los eventos analizados la validación espacial fue satisfactoria.

También se utilizó el modelo para reconstruir un evento de crecida en el Barranco de Arás en la localidad de Biescas (Pirineo Aragonés en España) (Vélez, 2001) donde una tormenta generó una crecida con consecuencias fatales. La información de la tormenta para alimentar el modelo fue obtenida a partir campos de reflectividad de radar. En este caso, interesaba saber si era previsible un evento de esa magnitud en esa cuenca, se aplicó el modelo y se compararon los resultados del modelo linealizado y el modelo no lineal. En un modelo de embalses lineales se considera que la velocidad del flujo es estacionaria y, en muchos casos, que no varía significativamente aguas abajo en la red de drenaje. A partir de características morfométricas de la cuenca se puede obtener el tiempo de concentración en la cuenca, y con este tiempo y la longitud del cauce se puede tener un valor representativo de la velocidad en los cauces. Con este valor de la velocidad, se implementó un modelo de tanques lineales y el caudal máximo obtenido para la simulación del evento era casi la mitad del reportado; para poder llegar al valor del caudal reportado habría sido necesario considerar una velocidad cuatro veces mayor a la considerada, lo que difícilmente se habría considerado como razonable. Con el modelo no lineal, la velocidad depende de la magnitud del flujo y el caudal máximo obtenido se ajustó bastante bien al reportado.

También se hizo un análisis de sensibilidad con la información espacio temporal de la lluvia obtenida del procesamiento de campos de reflectividad de radar y pudo concluir que si no se tiene la información con muy buena resolución temporal no se hacen evidentes la ventajas del modelo no lineal y sus resultados son alejados de la realidad, casi tanto como los de los obtenidos de un esquema lineal (Vélez, 2001).

En el mundo de las aplicaciones prácticas la simulación hidrológica los modelos lineales y muy especialmente modelos basados en el Hidrograma Unitario agregado o distribuido, se utilizan con tranquilidad. Esto es preocupante ya que en casos de eventos de gran magnitud, cuando no se considera la no linealidad, los caudales son subestimados, lo que no está del lado de la seguridad.

Así, la estrategia de simulación fundamentada en un comportamiento no lineal del flujo en la red de drenaje tiene un gran potencial para simular las crecidas y especialmente en pequeñas cuencas de montaña. En cuencas pequeñas y con cauces pendientes en más probable que un aguacero significativamente intenso y con una duración comparable al tiempo de concentración del agua en la cuenca, cubra toda el área

de la cuenca y por tanto los efectos de la no linealidad sean más severos. No hay que olvidar que para que el modelo no lineal sea efectivo se requiere alimentar el modelo con campos de precipitación de buena calidad y buena resolución espacio temporal, la cual se puede obtener satisfactoriamente de los radares meteorológicos.

En el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (IIAMA-UPV) se siguió trabajando en el desarrollo del modelo denominado TETIS para distintas aplicaciones en hidrología.

El modelo distribuido ha servido para evaluar los caudales producidos por tormentas de distintas características en una cuenca natural. En la Rambla del Poyo (Valencia -España) se implementó el modelo distribuido TETIS con una resolución de 100 m y para intervalos de simulación de 10 minutos; se generaron lluvias de diseño con modelos estocásticos de generación sintética de campos de lluvia RainGen (**Salsón y García-Bartual, 2003**) con variabilidad espacio temporal (área, intensidad y duración). En los resultados se pudo observar como lluvias con periodo de retorno similar producían caudales con período de retorno sensiblemente diferente (**Francés et al., 2011; Bussi et al., 2012**).

Con el propósito de simular eventos de crecidas en cuencas altamente urbanizadas se utilizó el modelo TETIS en la cuenca experimental de la quebrada San Luis (Manizales – Colombia) que tiene un 40% de su superficie en el área urbana. El modelo ha sido implementado con un tamaño celda de 30 m y para intervalos de simulación de 5 minutos. El desempeño del modelo ha sido excelente tanto en los casos de calibración como de validación.

Predicción de crecidas y sistemas de alerta temprana

El modelo conceptual distribuido se presenta con un buen potencial para la predicción de crecidas y como modelo de apoyo a los sistemas de alerta temprana y para la operación de embalses con posibilidades de laminación de crecidas.

El modelo TETIS fue extendido y adaptado como modelo de apoyo a un sistema de alerta temprana, para su implementación en la cuenca del Río Tajo en España (**Francés et al., 2002**). La adaptación del modelo incluyó varios elementos nuevos: una capa adicional para el almacenamiento temporal de nieve, con el fin de poder simular crecidas por fusión de nieve ante un aumento de la temperatura; inclusión de embalses artificiales para almacenamiento y laminación de crecidas; un módulo de escenarios de lluvia en el futuro inmediato; una estrategia de actualización de las variables de estado para ajustar el modelo a las nuevas mediciones en tiempo real y una estrategia para el manejo de la incertidum-

bre en el pronóstico (**Vélez, 2003**). El modelo tuvo una buena calibración, una validación satisfactoria y ha mostrado un buen desempeño.

El modelo TETIS se integró, además, en el sistema de alarma temprana DELFT FEWS para predicción de avenidas en tiempo real en algunas cuencas de la C.H. del Júcar (Comunidad Valenciana –España) en el Proyecto IT-SAIH para el Ministerio de Medio Ambiente de España (**Múnera y Francés, 2009**).

Simulación del régimen de caudales

La gestión del recurso hídrico requiere tener conocimiento del régimen de caudales en los sitios de interés, y muy especialmente la recesión y los caudales bajos. Para esto se requiere un modelo conceptual y distribuido que sea coherente en las recesiones y en los balances de largo plazo. El modelo TETIS respondía bien a estas necesidades, así, aunque inicialmente fue concebido para la simulación de crecidas, fue extendido y adaptado para trabajar modelación continua.

Este modelo se implementó en distintas zonas de la Comunidad Autónoma del País Vasco en España. Allí se utilizó con una resolución espacial de 50 m con una resolución temporal mayor a la usada hasta el momento (1 día). El ajuste en calibración fue excelente y permitió tener series de caudales para la evaluación del potencial del recurso hídrico en cuencas o subcuencas sin medición. En esta oportunidad se ha incluido al modelo TETIS el método de calibración automática SCE-UA para obtener el conjunto de factores correctores óptimos que emplea el modelo, lo que permite obtener, de una manera rápida y confiable, un conjunto de factores correctores para todas las cuencas estudiadas. Los resultados de la simulación continua han sido muy satisfactorios y han permitido obtener series de caudales en subcuencas sin medición para las series de mediano y largo plazo que han sido de gran utilidad en la gestión del recurso hídrico. Además, muestran que la estrategia de simulación hidrológica en cuencas naturales, mediante modelos conceptuales distribuidos y calibración automática, es factible y eficiente (**Vélez y Francés, 2006**).

En Colombia se han realizado varias aplicaciones del modelo distribuido, para la oferta de caudales y el análisis de caudales mínimos en cuencas abastecedoras de acueductos al Oriente de Medellín, (**Jaramillo et al. 2004**). Para la ordenación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas se requiere estimar caudales en múltiples puntos sobre la red de drenaje y en múltiples condiciones del régimen climático en la cuenca hidrográfica. Con este fin, **Valencia (2008)** implementó el modelo distribuido TETIS en el Río la Miel (Caldas Colombia); en ésta aplicación se utilizó una ma-

lla de celdas cuadradas de 250 m de lado y se utilizó un intervalo temporal de un día. Los resultados obtenidos en calibración y validación se consideran satisfactorios, pero en la validación espacial se evidenciaron las limitaciones de la distribución espacial de las estaciones de medición de lluvia. En la cuenca del Río de Oro (Santander Colombia) se implementó el modelo distribuido TETIS para la modelación de la interacción acuífero-río y el análisis de caudales bajos y su recesión en los períodos secos (**Forero**, 2011). En la región de Urabá (Colombia) se implementó el modelo distribuido en varias cuencas para la evaluación de la cuenta ambiental del agua (**Quintero et al.**, 2005).

Simulación de sistemas integrados de aguas superficiales y subterráneas

La simulación de sistemas integrados de aguas superficiales y subterráneas es de gran ayuda para la gestión sostenible del recurso hídrico, mediante la utilización conjunta de agua superficial y agua subterránea. Inicialmente, se hizo una adaptación del modelo distribuido para simular el sistema integrado (**Restrepo-Tamayo**, 2007). Después de evaluar la flexibilidad del modelo, se consideró que era más práctico acoplar dos modelos: un modelo hidrológico lluvia-escurrentía- recarga para toda la cuenca, y un modelo de agua subterránea para el acuífero, con un módulo interacción acuífero-río.

En una primera iniciativa se acoplaron un modelo hidrológico distribuido para toda la cuenca y un modelo de flujo subterráneo agregado conocido como el modelo pluricelular englobado, el cual tiene soluciones analíticas para casos de acuíferos ideales de formas geométricas elementales (**Restrepo-Tamayo et al.**, 2010). Este modelo ha sido aplicado en la quebrada la Mosca (Antioquia Colombia) bajo la idealización del acuífero real a una forma elemental y considerando una conexión río-acuífero total, para lo cual el modelo se calibró con la información disponible y los ajustes obtenidos y los tiempos de cómputo empleados muestran la capacidad del modelo propuesto para la solución del problema de gestión: el modelo acoplado está en capacidad de representar de forma continua los caudales en la red de drenaje, los almacenamientos en el acuífero y las interacciones río – acuífero. Además puede incorporar captaciones de aguas superficiales y subterráneas como ya ha sido presentado en el caso de las captaciones superficiales por **Restrepo** (2007) y en el caso de pozos por **Pulido-Velázquez et al.** (2005); así constituye una herramienta atractiva para la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

En otra iniciativa se acopla un modelo de flujo subterráneo (MODFLOW) con un modelo hidrológico de almacenamien-

tos y flujos (**Estrada-Restrepo et al.**, 2010). En este modelo acoplado se consideran, de forma conjunta, el régimen de caudales, las características del acuífero y las corrientes superficiales, la recarga del acuífero, y las intervenciones antrópicas como captaciones superficiales y subterráneas. La metodología de modelación acoplada ha sido implementada en casos teóricos de aplicación, para diferentes escenarios de simulación que se presentan en situaciones prácticas. Los resultados de la modelación permiten cuantificar el impacto que tiene la explotación del acuífero sobre la disminución en los caudales superficiales, y la variación de la magnitud del impacto en relación con la distancia del pozo y el caudal extraído. Además han mostrado coherencia espacial y temporal. Como resultado del modelo se obtiene información cuantitativa de la dinámica de la interacción río-acuífero en los distintos escenarios analizados, lo que permite cuantificar la recarga inducida del río al acuífero cuando se extrae agua del acuífero. Este modelo acoplado se presenta, con un buen potencial, como herramienta de apoyo para tomar decisiones en la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

Evaluación de amenaza para deslizamiento

Para la estimación de la amenaza al deslizamiento superficial en laderas, se acopló un modelo hidrológico distribuido, con un modelo sencillo de estabilidad de ladera con el que se evalúa el factor de seguridad de las laderas durante la simulación. El modelo de evaluación se aplicó a condiciones hipotéticas en la Quebrada la Iguaná en Medellín, Colombia (**Vélez, et al.**, 2005). Los resultados obtenidos son bastante coherentes con respecto a la morfología de la cuenca. Para su comparación con el modelo SHALSTAB se implementó este en la misma cuenca, y aunque los resultados de estos dos modelos no son comparables directamente (**Montgomery y Dietrich**, 1994) si se pueden comparar las zonas de mayor amenaza para los dos modelos y en ese caso son bastante similares. La ventaja que ofrece el modelo distribuido que permite considerar la variabilidad espacial en la cuenca de las diferentes características de la ladera, el suelo y su cobertura y se puede hacer una modelación más realista del fenómeno. Para obtener resultados que reflejen correctamente los procesos hidrológicos en la ladera se debe utilizar una resolución espacial suficientemente fina de acuerdo al tamaño de los deslizamientos.

Para la predicción de deslizamientos superficiales activados por lluvias muy intensas, se está implementando la estrategia de simulación hidrológica con una adaptación para evaluación de la estabilidad de laderas; a diferencia de las versiones de TETIS, en este caso, el modelo distribuido tiene un planteamiento no lineal para el flujo subsuperficial en la capa

superior del suelo. El modelo se está implementando para verificación en cuencas donde han ocurrido eventos con numerosos deslizamientos superficiales, pero el objetivo es su utilización como parte de los sistemas de alerta temprana, en zonas urbanas con gran vulnerabilidad y con información de radar meteorológico (Arístizabal et al., 2012).

Simulación de la producción y transporte sedimentos

La estrategia de simulación de la producción y transporte de sedimentos a escala cuenca, se basa en el acoplamiento de dos modelos: uno hidrológico-hidráulico para el agua (la escorrentía en laderas y el flujo en los cauces) y un modelo para producción y transporte de sedimentos. El modelo hidrológico-hidráulico debe considerar la representación del flujo mediante ecuaciones no lineales. Las ecuaciones de transporte del caudal sólido respecto al caudal líquido son no lineales, los efectos de no linealidad en la escorrentía y en el flujo en los cauces se amplifican en la erosión y el transporte de sedimentos.

El modelo CASC2D-SED (Johnson, 1997; Johnson y Julien, 2000) es el resultado de acoplar el modelo bidimensional de escorrentía CASC2D (Julien y Saghafian, 1991) y un modelo de producción y transporte de sedimentos propuesto por Julien (1995). Este modelo, basado en la ecuación de Kilinc y Richardson (1973) para la erosión causada por la lámina de escorrentía sobre un lecho de arena, fue adaptado por Julien para su utilización en otros tipos de suelo y con diferentes coberturas de vegetación y para ello incorporó algunos coeficientes de la USLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier y Smith (1978). Para el transporte de sedimentos en los cauces, el modelo de Julien utiliza la ecuación de Engelund y Hansen (1967). Esta ecuación ha sido reconocida por mejor comportamiento en los distintos tipos de cauces en la cuenca hidrográfica (Machado et al., 2004).

El modelo TETIS-SED (Montoya, 2006) resulta de acoplar el modelo TETIS y el modelo de producción y transporte de sedimentos de Julien (1995). El modelo resultante tiene varias características que los hacen competitivo: tiene la estructura bidimensional de la red de drenaje pero operativamente es unidireccional en la dirección del flujo, la geometría hidráulica provee una representación más estructurada de la red de drenaje sobre toda la cuenca y el flujo en los cauces se calcula de la ecuación de la Onda Cinemática no lineal mediante la solución numérica de un esquema implícito simplificado. Para su evaluación (y comparación con CASC2D-SED) el modelo se implementó en la cuenca Goodwin Creek USA, donde se tenían datos suficientes de características morfológicas del terreno, del suelo y sus coberturas y se

contaba con registros de lluvia sobre toda la cuenca, hidrogramas y sedimentogramas en varias subcuencas y además ya se había implementado el modelo CASC2D-SED (Rojas, 2003). Al comparar los resultados de los dos modelos, se obtienen mejores resultados con TETIS-SED (Montoya et al., 2006).

En esta primera implementación de TETIS-SED, para la escorrentía superficial se consideró una solución simplificada de la onda cinemática que corresponde a la representación de un embalse lineal, mientras que para el flujo en los cauces de la red de drenaje se utilizó la solución numérica de la ecuación de la onda cinemática en un esquema no lineal. Velásquez (2009), configura una segunda versión del modelo de sedimentos acoplado al modelo hidrológico; en este caso la escorrentía superficial en la ladera también se obtiene mediante la solución numérica de un esquema implícito simplificado de la ecuación de la Onda Cinemática de acuerdo a las expresiones propuestas por Vélez (2001) y el resto no difiere sensiblemente de lo implementado por Montoya (2006).

Esta nueva versión también se evaluó en la cuenca Goodwin Creek en USA comparando los resultados de estas dos versiones del modelo. La nueva versión de Velásquez (2009) presenta una mejora en el ajuste de los hidrogramas y los sedimentogramas, tanto el calibración como en validación, pero las diferencias entre el ajuste de las dos versiones del modelo no es muy significativa y las diferencias entre los resultados de las dos versiones del modelo son relativamente pequeñas cuando se las compara con las diferencias entre los valores simulados y observados. Es posible que, con eventos mayores, las diferencias sean más sensibles pero la información disponible para hacer estas evaluaciones aún no es suficiente. Se ha considerado que hay que mejorar la información distribuida y hay que explorar en otras cuencas. Algunas de las ventajas de la estrategia de simulación no fueron efectivas en este caso debido a las características de la cuenca Goodwin Creek, donde prácticamente toda la escorrentía es superficial.

En Colombia, aún no hay información simultánea y de buena resolución de precipitación sobre la cuenca e hidrogramas y sedimentogramas en los cauces, como para poder implementar, calibrar y validar este tipo de modelos de erosión y transporte de sedimentos. Sin embargo, se pueden hacer calibraciones aproximadas aprovechando información disponible. En la rambla del Poyo (Valencia España), Bussi et al. (2012) presentan una "calibración" del modelo TETIS-SED (Montoya, 2006), a partir de la estimación aproximada de las tasas de producción de sedimentos mediante el cubillaje de diques de retención en cauces efímeros (Rodríguez-Lloveras et al., 2012).

Análisis de escenarios para de cambio climático y/o cambio de uso del suelo

En una estrategia de modelación para simular la dinámica de los ciclos del agua y del carbono en ecosistemas de alta montaña ante cambios en el régimen climático, se propuso la estrategia acoplando un modelo para el ciclo del agua con un modelo para el ciclo de carbono. Para el ciclo del agua se propuso la implementación en mediano plazo del modelo TETIS y para el carbono una adaptación al modelo distribuido del modelo Century. En una primera fase, mientras se aumenta la información disponible, se recomendó un modelo semidistribuido de almacenamientos donde se consideran zonas homogéneas de respuesta hidrológica a zonas con cierta similitud de condiciones: climáticas, morfológicas, de suelos y de coberturas y por subcuencas (**IDEAM-Universidad Nacional**, 2007).

En el Plan de Ordenamiento y Manejo del Río Chinchiná se ha implementado el modelo TETIS con una resolución espacial de 90 m y una resolución temporal de 1 día, para la evaluación de escenarios de cambio climático y de cambios de usos del suelo.

Simulación de la dinámica espacio-temporal de la vegetación

El modelo hidrológico TETIS (**Francés et al.**, 2007) se ha acoplado con el modelo de vegetación HORAS (**Quevedo y Francés**, 2009) para la simulación de las dinámicas de la vegetación en el tiempo y en el espacio (**Pasquato et al.**, 2011). Este modelo hidrológico – de vegetación conceptual y distribuido se ha implementado en la cuenca de Valdeinfierno, río Luchena (España). El clima es semiárido con una precipitación anual promedia de 330 mm. La cobertura vegetal es un 60% natural compuesta por matorral y masa forestal. En esta condición la insolación juega un papel importante en la disponibilidad de humedad en el suelo y por ende en el crecimiento de la vegetación (**González-Hidalgo et al.**, 1996). En el modelo, en cada celda la orientación de la ladera determina un parámetro que corrige la evapotranspiración potencial, la vegetación está representada por una variable de estado definida como biomasa foliar y su valor es uno de los factores para obtener la evapotranspiración real a partir de la potencial. El modelo logra una reproducción satisfactoria de la dinámica del NDVI y de las diferencias de densidad de vegetación entre zonas con diferente insolación (**Pasquato et al.**, 2011).

Conclusiones

La estrategia de simulación del modelo hidrológico conceptual, soportado por una estructura topográfica y morfológica

en la topología y en los parámetros del modelo, ha permitido un buen desempeño en distintas regiones del mundo en distintas condiciones geográficas y climáticas.

La simulación distribuida permite incorporar en la simulación la variabilidad espacial de la precipitación y de las condiciones para la evapotranspiración, la heterogeneidad de los suelos y sus coberturas. Además, el modelo distribuido garantiza la coherencia de los resultados obtenidos en cualquier sitio de la red de drenaje.

El modelo distribuido y las versiones más simplificadas han resultado de gran utilidad para distintos fines. Se han adaptado bien a un rango muy amplio de escalas espaciales y de resolución temporal de la simulación.

El modelo para la distribución espacial de las variables físicas, determinantes de los parámetros del modelo hidrológico conceptual distribuido, hace parte integral de la estructura conceptual del modelo hidrológico.

Es notable como la estructura de almacenamientos y flujos se ha podido adaptar para representar procesos relacionados con el ciclo del agua, distintos a los considerados en las formulaciones iniciales.

El modelo hidrológico conceptual ha sido fácil de acoplar para su interacción con otros modelos de muy distinta naturaleza. Esto muestra que tiene un gran potencial para muchas otras aplicaciones.

Agradecimientos

A profesores, compañeros de trabajo y alumnos en las Universidades Nacional de Colombia y Politécnica de Valencia que han participado en la construcción de esta estrategia de simulación.

A las Universidades Nacional de Colombia y Politécnica de Valencia.

A varias instituciones que han apoyado este proceso: ICI España, Ministerio de Educación y Ciencia de España, COL-CIENCIAS, CEDEX de España, IDEAM Colombia.

Referencias

- Aristizábal, E., Vélez J.I., Martínez-Carvajal, H.**, SHIA_LANDSLIDE: a physically based model to predict shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous terrains. (Poster) Primer Simposio Geotécnico y de Ingeniería Geológica. Septiembre 5 al 10 de 2012. Bucaramanga.
- Arrell, K.E., Fisher, P.F., Tate, N.J., Bastin, L.** 2007. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. En: *Computers & Geosciences*. 33 (10): 1366-1381.

- Beven, K. J., Kirkby, M. J.** 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24: 43–69.
- Beven, K. J.** 1987. Towards a new paradigm in Hydrology, *Water for the Future: Hydrology in Perspective*, IASH Publication, 164: 393 - 403.
- Beven, K.J., Freer, J.** 2001a. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. *Journal of Hydrology.*, 249: 11–29.
- Bussi, G., Francés, F., Rodríguez Lloveras, X., Benito, G., Sánchez Moya, Y. y Sopena, A.** 2012. Calibration of a hydrological model using sediment proxy data. *PUB Symposium 2012. Completion of the IAHS decade on Prediction in Ungauged Basins and the way ahead.* October 23-25, 2012. Delft.
- Bussi, G., Francés, F., Salinas, J. L., García-Bartual, R., Pujol, L., Guna, V., Ortiz, E.** 2012. Estimación de mapas de peligrosidad mediante generación de tormentas sintéticas. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2012. 9-12 de septiembre de 2012. ISBN 978-9968-933-06-3. San José, Costa Rica.
- Castro, J. C.** 2011. Metodología para la obtención de modelos digitales de terreno hidrológica y geomorfológicamente coherentes, Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- CORPOCALDAS-ASOCAR-UNAL.** 2013. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Chinchiná, Informe final.
- Dury, G.H.** 1976. Discharge prediction, present and former, from channel dimensions. *Journal of Hydrology*, 30: 219-245.
- Estrada- Restrepo, O. A., Vélez, J. I., Vélez, M.V. y Restrepo-Tamayo, C.** 2010. Modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas para la gestión conjunta del recurso hídrico. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR – AIIH., Noviembre de 2010. Punta del Este, Uruguay.
- Flores, A. N., Bledsoe, B. P., Cuhaciyán, C. O., Wohl, E. E.** 2006., Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data, *Water Resources Research*. 42.
- Forero, J. C.** 2011. Modelo Agregado y Distribuido Sobre la Cuenca Superior del Río de Oro. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Maestría.
- Francés, F., GarcíaBartual, R. and Bussi, G.** 2011. High return period annual maximum reservoir water level quantiles estimation using synthetic generated flood events (Poster). 3rd International Week on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management, Valencia España .
- Francés, F., García-Bartual, R., Bussi, G., Salinas, J. L., Fernández, E.** 2011. Diseño hidrológico de alto período de retorno mediante generación sintética de eventos de crecida. II Jornadas de Ingeniería del Agua “Modelos Numéricos en Dinámica Fluvial”. 5-6 October, 2011. Barcelona, Spain.
- Francés, F., Vélez, J. I., Vélez, J. J. y Puricelli, M.** 2002. Distributed Modeling of Large Basins for Real Time Flood Forecasting System in Spain. Second Federal Interagency Hydrologic Modelling. Conferencia. Las Vegas, USA.
- Francés, F., Vélez, J. I., Vélez, J. J.** 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*. 332, (1): 226–240.
- González-Hidalgo, J., Sánchez-Montahud, J. Bellot-Abad.** 1996. Efecto de la vegetación y orientación de la ladera en perfiles de humedad en el suelo de un ambiente semiárido del interior de España. *Cuadernos I. Geográfica* (22): 81 96.
- IDEAM,** Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. 2011. Implementación de la metodología de zonificación de amenazas por inundaciones para tres grandes cuencas del país (Colombia) .Informe de Investigación.
- Jaramillo, M., Vélez, M. V., Vélez, J. I.** 2004. Estimación de la recarga mediante un modelo hidrológico distribuido. *Memorias del Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología.* Marzo 2004. Medellín.
- Jiménez, M. A., Camacho, L. A., Vélez, J. I.** 2010. A Stream Morphology Classification for Eco-hydraulic Purposes Based on Geospatial Data: A solute transport application case (Poster B33F-0445). *AGU Fall Meeting*, December 13–17, San Francisco, California, USA.
- Jiménez, M. A., Camacho, L. A., Vélez, J. I.** 2010. A Stream Morphology Classification for Eco-hydraulic Purposes Based on Geospatial Data: A solute transport application case. 2010 *AGU Fall Meeting*, Diciembre 13–17 San Francisco, California, USA, Poster B33F-0445.
- Johnson, B. , Eand, P. Y.** 2000. The two-dimensional upland erosion model CASC2D-SED. *The Hydrology-Geomorphology Interface: Rainfall, Floods, Sedimentation, Land Use* (Proceedings of the Jerusalem Conference, May 1999). *IAHS Publ.* 261, 2000. 107 .
- Johnson, B. E.** 1997. Development of a storm-event based two-dimensional upland erosion model. *PhD Dissertation*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Julien, P. Y.** 1995. *Erosion and Sedimentation.* Press Syndicate of the University of Cambridge, New York, USA.
- Julien, P. Y., Saghafian, B.** 1991. CASC2D User’s manual: A two dimensional watershed rainfall-runoff model. Center for Geosciences—Hydrologic Modelling Group, Colorado State University (CER90-91PYJ-BS-12). Fort Collins, Colorado, USA.
- Julien, P. Y., Saghafian, B.** 1995 Raster-based hydrologic modelling of spatially-varied surface runoff. *Wat. Resour. Bull.* 31(3): 523-536
- Kennedy, R. G.** 1895. Prevention of silting in irrigation canals: *Inst. Civil Eng. Proc.*, 119: 281-290.
- Kilinc, M., Richardson, E. V.** 1973. Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. *Hydrology Paper no. 63*, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA.
- Knighon, A. D.** 1975. Variations in at-station Hydraulic Geometry. *American Journal of Science*, 275: 186 - 218.
- Kuczera, G., Raper, G. P., Bras, N. S., Jayasuriya, M. D.** 1993. Modeling yield changes after strip thinning in a mountain ash catchment: an exercise in catchment model validation. *Journal of Hydrology*. 150: 433 - 457.
- Lacey, G.,** 1930, Stable channels in alluvium: *Inst. Civil Eng. Proc.*, 229: 259-384.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., Miller, J. P.** 1964. *Fluvial processes in Geomorphology.* San Francisco, W. H. Freeman.
- Leopold, L.B. , Maddock, T. Jr.** 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U.S. Geological Survey Professional Paper No. 252.* 57 pp
- Limerinos, J. T.** 1969. Relation of the Manning coefficient to measure bed roughness in stable natural channels. *Professional Paper United States Geological Survey.* 650D.
- Machado, D., Aguirre-Pe, J., Moncada, A., Olivero, M.** 2007. Optimización del uso de modelos de transporte de sedimentos en canales y ríos mediante análisis comparativo. *Ciencia e Ingeniería.* 28 (1): 9-18.
- Merz, B., Bárdossy, A.** 1998. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment. *J. Hydrol.* 212-213(1-4): 304-317
- Merz, B., Plate, E. J.** 1997. An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Wat. Resour. Res.* 33(12): 2909-29.

- Mesa, O., Vélez, J. I., Giraldo, J., Quevedo, D.** 2003a. Regionalización de características medias de la cuenca con aplicación en la estimación de caudales máximos. *Meteorol. Colomb.* 7:141-147.
- Mesa, O., Velez, J. I., Giraldo J., Quevedo, D.** 2003b. Adaptación del método del multiescalamiento para la estimación de caudales máximos en Colombia. *Meteorol. Colomb.* 7:149-156.
- Montgomery, D., Dietrich, W. E.** 1988. Where do channels begin? *Nature.* 336, 232-234.
- Montgomery, D. R., Buffington, J. M.** 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin.* 109: 596-611.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E.** 1994. A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding, *Water Resources Research*, 30: 1153-1171.
- O'Callaghan, J. F., Mark, D. M.** 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Compu. Vision Graphics Image Process.* 28: 323 - 344.
- Pasquato, M., Medici, C., Francés, F.** 2011. Aplicación de un modelo conceptual distribuido de vegetación dinámica a una cuenca semiárida del sureste de España. *Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo. Estudios en la zona no saturada del suelo. Volumen X, ZNS 11. Universidad de Salamanca. 19-21 de Octubre de 2011. Salamanca, España.*
- Patiño, D. A.,** 2011. Diseño de una Metodología de Clasificación Automática de Unidades Geomorfológicas en la Geografía Colombiana Utilizando Técnicas de Reconocimiento de Patrones, Maestría en ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, L. A., Barco, O. J., Mantilla, R. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Ramirez, J. M., Botero, B. A., Mejía, M. I., Ceballos, L. I., Zuluaga, M. D., Giraldo, J. D., Quevedo, D. I.** 2007. Linking long-term water balances and scaling to regionalize peak and low flows in Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering – ASCE*, 12 (1): 4-13.
- Prima, O., Echigo, A., Yokoyama, R., Yoshida, T.** 2006. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology* .78 (3-4): 373-386.
- Pulido-Velázquez, M. A., Sahuquillo-Herreraiz, A., Ochoa-Rivera, J. C., y Pulido-Velázquez D.** 2005. Modeling of Stream-Aquifer Interaction: The Embedded Multireservoir Model. *Journal of Hydrology*, 313: 166-181.
- Puricelli, M. M.** 2003. Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.
- Quevedo, D., Francés, F.** 2005. A conceptual dynamic vegetation-soil model for arid and semiarid zones. *Hydrology and Earth System Science* (12): 1175-1187.
- Quintero, F., Vélez, J. I., Blandón, L.** 2005. Modelo hidrológico distribuido para la cuenta ambiental del agua. *Gestión y Ambiente.* 8 (1): 93-105.
- Ramírez, J. M., Vélez J. I.** 2002. Estrategias para la extracción automática de redes de drenaje a partir de Modelos Digitales de Terreno. *Avances en Recursos Hidráulicos.* 9: 69-82.
- Renno, C., Nobre, A., Cuartas, L., Soares, J., Hodnett, M., Tomasevich, J., Waterloo, M.** 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment.* 112 (9): 3469-3481.
- Restrepo-Tamayo, C.** 2007. Modelo Hidrológico Distribuido Orientado a la Gestión de la Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. sede Medellín.
- Restrepo-Tamayo, C., Álvarez-Villa, O., Vélez, J. I., Pulido-Velázquez, M. y Velásquez, N.** 2010. Un modelo hidrológico distribuido acoplado a un modelo de flujo subterráneo para la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR – AIH. Noviembre de 2010. Punta del Este, Uruguay.
- Rhodes, D. D.** 1977. The b-f-m diagram graphical representation and the interpretation of at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science*, 277: 73 - 96.
- Richards, K. S.** 1982. *Rivers, Form and Processes in Alluvial Channels*, Methuen, London.
- Rodríguez Lloveras, X., Bussi, G., Sánchez Moya, Y., Sopena, A., Francés, F., Benito, G.** 2012. Aproximación a las tasas de producción de sedimento mediante el cubicaje de diques de retención en ríos mediterráneos efímeros. XII Reunión Nacional de Geomorfología. 17-20 de septiembre de 2012. Santander, España.
- Rosgen, D. L.** 1994. A classification of natural rivers. *Catena*, 22: 169-199.
- Rosgen, D. L.** 1996. Applied river morphology. *Wildland Hydrology*. Pagosa Springs, Colorado.
- Salsón, S., García-Bartual R.** 2003 A space-time rainfall generator for highlyconvective Mediterranean rainstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3:103-114.
- Schmidt, J., Merz, B., Dikau, R.** 1998. Morphological structure and hydrological process modelling: *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Supplement Band*, 112: 55-66 Berlin Stuttgart .
- Stewardson, M.** 2005. Hydraulic geometry of stream reaches. *Journal of Hydrology*, 306(1-4): 97-111.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodríguez-Iturbe, I.** 1992. A Physical Basis for Drainage Density. *Geomorphology*, 5(1-2): 59-76.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodríguez-Iturbe, I.** 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrologic Processes*. 5(1): 81-100.
- Tarboton, D. G.** 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.
- Valencia, M.** 2008. Modelación Hidrológica Distribuida de Tipo Conceptual, como Elemento para Ordenación y Manejo Ambiental de Cuenca Hidrográficas, Caso de Estudio: Cuenca Hidrográfica del Río La Miel, Departamento de Caldas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.
- Vélez, J. I.** 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.
- Vélez, J. I., Francés, F., Vélez, J. J.** 2002a. No linealidad del flujo en los cauces de la red de drenaje y sus implicaciones en la modelación hidrológica. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.
- Vélez, J. I., Villarraga, M. R., Álvarez, O. D., Alarcón, J. E., Quintero, F.** 2005. Modelo distribuido para determinar la susceptibilidad al deslizamiento superficial por efecto de tormentas intensas y sismos. *Boletín de Ciencias de la Tierra* (17): 85-96.
- Vélez, J. J., Francés, F.** 2006. Recursos hídricos en la Comunidad Autónoma del País Vasco usando modelación distribuida y calibración automática. *Memorias del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre 2006.*

Vélez, J. J., Vélez, J. I., Francés, F. 2002b. Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.

Vélez, J. J., Puricelli, M., López-Unzueta, F., 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

Wagensberg, J. 1985. Ideas sobre la complejidad del mundo, *Metemas MT 9*, ISBN: 978-84-7223-453-6, 160 pág., Ed Tusquets, España.

Wischmeier, W. H., Smith, R. E. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook no. 537. US Dept Agriculture, Washington DC, USA.

Recibido: 7 de febrero de 2013

Aceptado para su publicación: 6 de septiembre de 2013