

Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada

Eliana Jorquera^a, Juan F. Weber^a, Santiago M. Reyna^b

^a Laboratorio de Hidráulica – Dpto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional.

^b Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exáctas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba.

E-mail: ejorquera@civil.frc.utn.edu.ar – jweber@civil.frc.utn.edu.ar - santiagoreyna@gmail.com

RESUMEN: Un modelo hidrológico, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. En la actualidad se dispone de una amplia variedad de modelos, los cuales han sido planteados bajo ciertas hipótesis cuyo claro entendimiento garantiza su correcto uso. En el presente trabajo se revisan y comparan modelos hidrológicos distribuidos desde dos enfoques distintos. Por una parte se analiza el estado del arte de la modelación hidrológica distribuida con mayor énfasis en los procesos hidrológicos superficiales., entre ellos se destacan PRMS; MIKE-SHE, ANSWERS (eventos y continuo), TOPMODEL, ATHYS, TREX, AQUA y JAMS. Las principales diferencias son la discretización espacial de la cuenca, la simulación continua o de eventos aislados y el enfoque utilizado para la representación de los procesos dominantes.

El segundo enfoque apunta al análisis de los modelos hidrológicos integrados. Un sistema integrado de flujos superficial-subsuperficial incluye una componente superficial, una subsuperficial, condiciones de borde de la interfase (entre ellas), condiciones de borde externas y condiciones iniciales. Las diferencias de los distintos modelos radica en la estrategia planteada para representar cada uno de los sistemas y su interacción. Se observó que en su mayoría éstos vinculan el modelo de agua subterránea MODFLOW con distintos modelos para el flujo superficial. Otro enfoque observado es el acoplamiento de la resolución numérica de las ecuaciones de Saint Venant para el flujo superficial, con la ecuación de Richards para la componente subterránea. Dentro del primer caso se pueden nombrar MODBRANCH y ECOFLOW. Y en el segundo grupo, CRITERIA 3D e IRENE.

Se considera el análisis de las bases de cada modelo puede ser de utilidad para determinar en qué situaciones resulta conveniente utilizar uno u otro, como así también para identificar sus principales potencialidades y limitaciones, y en función de ellas establecer las necesidades a satisfacer en el desarrollo de nuevos modelos compatibles con los datos disponibles de las cuencas locales.

INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, busca representar los procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de obras hidráulicas y hasta mediados del siglo XX se limitó a expresiones matemáticas simples para representar mecanismos individuales involucrados en los procesos del ciclo hidrológico. En la década de los 60, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Standford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1995). Sin embargo, las máquinas disponibles eran caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de este campo.

Además, los sistemas hidrológicos son naturalmente continuos, es decir, los flujos de agua entre la atmósfera, la superficie y el subsuelo son continuos. Sin embargo, las diferentes escalas temporales del flujo de agua en estos dominios permite descomponer el ciclo hidrológico en tres componentes individuales. Esta desagregación posibilita una mejor comprensión de los procesos y aporta una simplificación matemática-computacional, no obstante, conduce a modelos incompletos (Furman, 2008). Un sistema integrado de flujos superficial-subsuperficial incluye una componente superficial, una subsuperficial, condiciones iniciales y de borde externas y en la interfase. Siendo estas últimas las que permiten efectivizar el acoplamiento.

De acuerdo a la literatura se encuentran principalmente dos estrategias de modelación con fuerte base física: una vincula el modelo de agua subterránea MODFLOW con distintos modelos para el flujo superficial y la otra acopla las ecuaciones diferenciales que rigen el flujo superficial y el subterráneo. Un tercer enfoque conceptualiza la cuenca a través de reservorios hipotéticos. A continuación se presenta una breve síntesis de las principales capacidades de algunos modelos de amplia difusión en el medio.

ANSWERS – AREAL NONPOINT SOURCE WATERSHED ENVIROMENT RESPONSE SIMULATION

ANSWERS es un modelo hidrológico y de producción y transporte de sedimentos arealmente distribuido que simula el flujo superficial y en el subsuelo. El objetivo del mismo fue proporcionar información sobre los efectos que el uso del suelo, la gestión y las prácticas de conservación o las estructuras podrían tener sobre la calidad y cantidad de agua en cuencas agrícolas. Fue orientado para la simulación de eventos en su versión original (Beasley y Huggins, 1982) y continua en el tiempo en ANWERS 2000 (Dabral y Cohen, 2001).

La hipótesis fundamental es: “En cada punto de la cuenca existe una relación funcional entre la tasa de escorrentía superficial y aquellos parámetros hidrológicos que influyen en el escurrimiento.” Para aplicar

este enfoque, el concepto de punto es relajado al de *elemento*, definido como aquella área dentro de la cual todos los parámetros hidrológicamente significativos son uniformes. El mismo debe ser lo suficientemente pequeño de modo que los cambios arbitrarios de los parámetros de un solo elemento tengan una influencia insignificante sobre la respuesta de toda la cuenca. La cuenca se asume compuesta de elementos cuadrados.

ANSWERS 1982

Esta versión permite la simulación de eventos. Los elementos individuales, forman un sistema compuesto donde sus datos topográficos determinan las direcciones de flujo en función de la máxima pendiente. La interacción entre ellos ocurre porque el flujo superficial, subsuperficial y subterráneo de cada elemento proviene de sus elementos adyacentes. En todos los otros aspectos, son hidrológicamente independientes. La salida del flujo de un elemento se distribuye en dos flujos salientes a los elementos adyacentes horizontal y vertical (Figura 1).

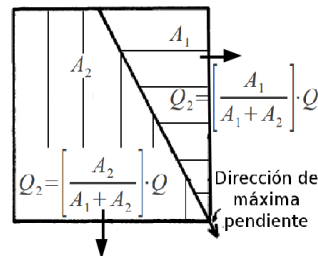


Figura 1.- Separación de los componentes del flujo. ANSWERS 1982 (Beasley y Huggins, 1982)

Los cursos de agua son caracterizados por un patrón diferente de elementos, *elementos de canal* (segmento de canal) que subyacen en la red de elementos de flujo superficial. Éstos funcionan como elementos duales, actuando como un elemento de flujo superficial ordinario, pero todo el flujo saliente va hacia su segmento de canal y de éste va hacia el próximo segmento aguas abajo, que recibe flujo de otros segmentos de canal y de su propio elemento de flujo superficial.

Cada una de las componentes hidrológicas es expresada como una tasa, las cuales pueden ser sustraídas de la tasa de precipitación. Las diferencias entre las tasas de entrada y salida son integradas en el tiempo obteniendo el volumen en cada elemento y la altura de lámina disponible para el escurrimiento. La tasa de escurrimiento saliente se obtiene aplicando una función de escurrimiento que considere la detención superficial y el escurrimiento propiamente dicho. Las relaciones entre componentes utilizadas para cuantificar los procesos hidrológicos son en general ecuaciones empíricas.

ANSWERS 2000

ANSWERS-2000 es un modelo de simulación continua y de base física. Las modificaciones incorporan algoritmos de base física para algunos procesos hidrológicos y de erosión y una interfaz gráfica de usuario denominada QUESTIONS. Este modelo ha sido desarrollado en Fortran-77.

El paso de tiempo en los días que no llueve es diario y en los días con precipitación es de 30 segundos. Luego que comienza la lluvia, parte de la precipitación es interceptada por la vegetación hasta satisfacer el

reservorio de intercepción potencial. La infiltración es modelada con la ecuación de Green y Ampt. Cuando la tasa de precipitación supera la infiltración el agua se acumula en microdepressiones del terreno, satisfecha la capacidad de este almacenamiento el agua está disponible para el flujo superficial. El escurrimiento superficial y en canales se simula con la ecuación de Manning adoptando el radio hidráulico igual a la profundidad media del flujo en el elemento. La evapotranspiración se calcula con el método de Ritchie, sus parámetros son: temperaturas, radiación solar e índice de área foliar diarios. El modelo no trata en detalle la dinámica del agua en la zona subsuperficial. El flujo subsuperficial se asume como una función lineal del almacenamiento y la percolación tiene lugar en una única capa de suelo, a través de una relación lineal.

Este software es de disponibilidad gratuita y código fuente abierto. La principal ventaja es que permite variar el intervalo de tiempo de cálculo en función si llueve o no. Esto posibilita en cuencas de respuesta rápida, analizar con una mayor discretización temporal las crecidas y en las épocas de estiaje no inutilizar recursos computacionales. La desventaja es que no considera con gran nivel de detalle los procesos subsuperficiales.

TREX: TWO-DIMENSIONAL RUNOFF, EROSION, AND EXPORT MODEL

TREX, es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes. Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación e intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve (HDR-HydroQual, Inc. , 2011).

El ciclo hidrológico comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera a la de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning.

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad.

Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, (http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/TREX%20Web%20Pages/TREX-Home.html), tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos.

TOPMODEL

TOPMODEL es un modelo hidrológico distribuido y continuo. Se basa en dos premisas fundamentales: la dinámica de la zona saturada puede ser aproximada mediante una sucesión de estados estacionarios en un área a drenada a un punto en la ladera. Y el gradiente hidráulico de la zona saturada puede ser aproximado por la pendiente topográfica local, expresada como $tg(\beta)$ (Figura 2) (Beven y Kirkby, 1972). Los parámetros del mismo pueden ser interpretados físicamente y la cantidad de ellos se trata de mantener mínima para garantizar que los valores determinados en la calibración sean más fácilmente identificables (Beven, 2001).

Dentro de un intervalo de tiempo existe homogeneidad espacial en la tasa de recarga que contribuye a una determinada área saturada. TOPMODEL establece relaciones entre la transmisividad del suelo y el déficit de almacenamiento en una determinada área, de acuerdo a ella se define el índice topográfico (I.T.) y en función de él, el déficit de almacenamiento. De esta relación se desprende que aquellos puntos con igual I.T. tendrán igual respuesta. Éste índice representa la tendencia de un punto en la cuenca a desarrollar condiciones saturadas. Para el cálculo del mismo, es necesario conocer el ángulo de la pendiente, el área drenada y la transmisividad saturada. Los dos primeros, se determinan a partir de un DEM y la transmisividad lateral horizontal saturada se considera homogénea espacialmente, por lo tanto el I.T. es expresado como:

$$I.T. = \frac{a}{tg(\beta)} \quad (1)$$

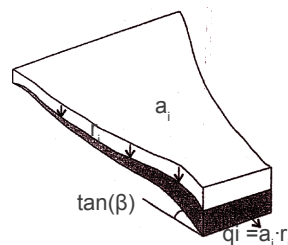


Figura 2: Definición del área de drenaje y la pendiente topográfica TOPMODEL (Beven, 2001).

Para calcular el área de aporte superficial (o subsuperficial), el I.T. se expresa como una función de distribución de probabilidad, con el objeto de lograr una ventaja computacional. Como cada punto con igual valor de I.T. tiene igual respuesta hidrológica, el patrón espacialmente distribuido de la napa freática se determina calculando un sólo valor por índice, reduciendo la cantidad de cálculos. Por lo tanto, para cada intervalo de tiempo el modelo calcula la lluvia caída en la zona saturada, la cual llegará al cauce como flujo superficial o subsuperficial junto con la precipitación excedente de la zona no saturada luego de la infiltración. El modelo se completa con la representación de la zona no saturada y el tránsito en el cauce. Los esquemas utilizados para estos dos módulos son simples para facilitar la estimación de los parámetros. No tienen en cuenta explícitamente los efectos de la heterogeneidad del suelo o la presencia de macroporos.

El código fuente está disponible en http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm, la versión actual es más apta para cuencas con suelos poco profundos y topografía moderada, que no sufren períodos de sequía excesivamente largos.

ATHYS – ATELIER HYDROLOGIQUE SPATIALISE

El ATHYS es una plataforma de modelación desarrollada por el IRD (Institut de Recherche pour le Développement) para ser utilizada en aplicaciones de gestión, predicción y pronóstico. Es un software gratuito disponible para distintos sistemas operativos y de código abierto escrito en Fortran. MERCEDES (Maillage Élémentaire Régulier Carré pour l'Étude Des Ecoulements Superficiels – Mallado Elemental Regular Cuadrado para el Estudio De los Ecurrimientos Superficiales) es el módulo de modelación hidrológica distribuida. Se basa en la discretización espacial de la cuenca en celdas regulares cuadradas y fue concebido para la simulación de los escurrimientos cuya componente preponderante es de origen superficial (<http://www.athys-soft.org/v1/Index.html>).

La simulación considera la interrelación de las celdas de dos formas: celdas independientes o interactivas. En el primer caso, las pérdidas se calculan en cada celda a partir de la lluvia recibida por esa celda y en el segundo, se computan además las contribuciones de las celdas aguas arriba. La elección del modo de conexión entre celdas, determina el modo de transferencia. En la modalidad de celdas independientes, la transferencia se aplica exclusivamente a la lluvia neta producida por la celda, la cual se transfiere a la salida de la cuenca, sin tener en cuenta las contribuciones de las celdas vecinas, ni las pérdidas en el lecho del río. Este esquema resulta potente computacionalmente y es numéricamente estable a los cambios de resolución temporal y espacial. El hidrograma completo de la crecida es obtenido como suma de los hidrogramas elementales generados sobre el conjunto de las celdas. El principal inconveniente es que no permite hacer el balance de los volúmenes en cada celda para cada instante de tiempo, lo que impide tratar algunos casos complejos como la infiltración en el lecho del río durante la transferencia, el almacenamiento en retenciones, etc. En la modalidad de celdas interactivas, la transferencia se realiza celda a celda, de aguas arriba hacia aguas abajo. Este esquema permite tratar los casos más complejos, pero implica mayores tiempos de cálculo y puede ser sensible a la resolución espacial. Las funciones de producción determinan la fracción de la lluvia bruta que va a escurrir hacia la salida de la cuenca. MERCEDES incorpora funciones del tipo hortoniano, del tipo de áreas de aporte y esquemas conceptuales. Éstas, pueden ser operadas de modo continuo.

La principal ventaja de este modelo es que es de código fuente abierto y está disponible gratuitamente, además es flexible y versátil ya que permite seleccionar distintas funciones de producción. Por otra parte, simula de forma muy simplificada los procesos subsuperficiales y los tiempos de cálculo son fijos.

AQUA

AQUA es un modelo hidrológico que utiliza técnicas numéricas para simular el flujo superficial en los grandes paisajes de llanura. En los cincuenta, Ulam y Von Neumann concibieron la idea de una ingeniosa herramienta matemática denominada autómatas celulares (AC). Notaron que ciertos fenómenos se pueden simular con la integración de células finitas, que interactúan de acuerdo a reglas simples basadas en consideraciones heurísticas. Las reglas de interacción, pueden o no guardar semejanza con las leyes físicas que gobiernan el fenómeno. Sin embargo, para fluidos, se encontró que los promedios estadísticos tendían a la solución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan la situación, típicamente la ecuación de Navier-Stokes (Delponte et al., 2005). AQUA se basa en un balance de masa, que considera entradas, salidas y fuentes en células bidimensionales basadas en un DEM (Vénere y Clause, 2002).

Para la representación del flujo superficial, cada elemento del DEM se toma como una célula unitaria unidimensional conectada por válvulas que se abren y se cierran con las células vecinas, lo que permite que el agua fluya impulsada por las diferencias de elevación entre ellas. Para ello, AQUA aísla grillas de 3x3 alrededor de cada célula y primero calcula la cantidad de agua contenida en las células vecinas, luego las organiza de acuerdo a su altura y por último distribuye el agua en las células comenzando con la de menor altitud, con la precaución de que el nivel del agua sea igual en todas las células (Figura 3).

El procedimiento se repite hasta cubrir toda la cuadrícula. Este algoritmo funciona bien para flujos bajos, ya que flujos altos conllevan a situaciones de inestabilidad numérica. Para evitar esto, se incluye un coeficiente de relajación α que puede interpretarse como el inverso de un coeficiente de rugosidad. La lluvia, la infiltración y evapotranspiración se modelan como fuentes en cada celda. Existen varios modelos para representar la infiltración y la evapotranspiración, la selección del más adecuado es una tarea del usuario.

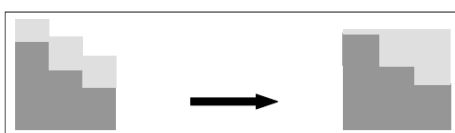


Figura 3: Balance de agua entre celdas vecinas AQUA (Vénere y Clause, 2002)

La versión más reciente de este modelo, AQUA – GRAPH utiliza para la representación interna un grafo no dirigido (Delponte et al., 2005). Cada célula está representada por un nodo y las relaciones de vecindad entre éstas por arcos, así el volumen de agua transferido depende de las diferencias de alturas totales y del costo del arco. La flexibilidad de esta estructura permite simular el escurrimiento en el terreno y en el río utilizando diferentes escalas temporales. Las condiciones de contorno pueden ser cerradas representadas con la ausencia de arcos que conecten con ese borde, o abiertas conectando con nodos de altura muy baja.

Este modelo fue desarrollado para zonas de llanuras, debería evaluarse su desempeño en cuencas de montaña y analizar si es posible su uso en tales casos. Además simula solamente la componente superficial del flujo.

MODFLOW

MODFLOW es un programa que resuelve numéricamente la ecuación de flujo subterráneo tridimensional para un medio poroso. El flujo subterráneo es simulado con una aproximación en diferencias finitas en bloque centrado (block-centered finite-difference approach). Considera acuíferos confinados o no confinados y flujos producidos por acciones externas (Harbaugh, 2005). Posee una estructura modular que consiste en un programa PRINCIPAL y subrutinas independientes, agrupadas en “paquetes”. Cada paquete resuelve una característica específica del sistema hidrológico, lo cual facilita el desarrollo de capacidades adicionales.

La ecuación diferencial en derivadas parciales utilizada en MODFLOW es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

donde: K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes x, y, z, suponiendo éstos paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica, h es la altura piezométrica, W el caudal volumétrico por unidad de volumen de fuentes y sumideros, S_s el almacenamiento específico del medio poroso y t el tiempo. S_s , K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} pueden ser funciones del espacio y W del tiempo y del espacio. La ecuación 2 describe el flujo de agua subterránea en condiciones de no equilibrio, en un medio heterogéneo y anisotrópico. Esta ecuación junto con la especificación de las condiciones de flujo o altura piezométrica en los bordes del acuífero y la especificación de las condiciones iniciales, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de agua subterránea, la cual en MODFLOW se resuelve a través de técnicas numéricas. El proceso conduce a un sistema de ecuaciones lineales simultáneas algebraicas, su solución da alturas piezométricas en puntos específicos en el tiempo y el espacio. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución de la altura piezométrica en función del tiempo que podría ser obtenida por medio de una solución analítica de la ecuación diferencial del flujo.

MODBRANCH: MODELO ACOPLADO DE FLUJOS SUPERFICIAL – SUBTERRÁNEO PARA SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN CAUCE ACUÍFERO.

Combinando los modelos del USGS MODFLOW y BRANCH, se desarrolló un modelo acoplado de flujos superficial y subterráneo. Se denominó a este código MODBRANCH. BRANCH es un modelo numérico unidimensional utilizado para simular flujos impermanentes en redes de canales (Swain y Wexler, 1996).

El modelo BRANCH considera en la ecuación de continuidad los términos que describen los flujos entre el cauce y el acuífero en función de la conductancia del cauce y las diferencias entre éstos en cada etapa. BRANCH calcula el nuevo estado en el curso de agua para cada intervalo de tiempo en una simulación basada en las condiciones de borde aguas arriba, las propiedades de la corriente y el nivel inicial y estimado en el acuífero. Luego, el nivel en el acuífero es calculado en MODFLOW en función del estado de la

corriente y las propiedades del acuífero. Este proceso es repetido hasta que se cumple el criterio de convergencia para la corriente y el nivel del acuífero. Debido a que el paso de tiempo utilizado en la modelación del agua subterránea es mucho mayor al utilizado para el flujo superficial, se manejan múltiples intervalos de tiempo en BRANCH dentro de un sólo paso de tiempo en MODFLOW.

ECOFLOW

Este es un modelo hidrológico distribuido que integra matemática y físicamente ECOMAG y MODFLOW (Sokrut, 2001). ECOMAG es un modelo con base física espacialmente distribuido, inicialmente fue desarrollado para monitoreos ecológicos regionales. Consiste en dos módulos principales, uno que describe los procesos hidrológicos en la cuenca y el segundo describe la transformación y transporte de contaminantes. La hipótesis básica es que una cuenca puede ser subdividida en un mosaico de elementos regulares de 2 Km por 2 Km de área, en función del tipo de suelo, su uso y la cobertura vegetal, cada uno de los cuales puede ser visto como unidad hidrológica. El modelo describe los procesos de infiltración, evapotranspiración, flujos superficial, subsuperficial y subterráneo y acumulación y derretimiento de nieve. Dentro de cada unidad se distinguen cinco capas donde ocurren los diferentes procesos hidrológicos: una capa superficial, dos capas de suelo (superior e inferior), una subterránea y una cubierta de nieve. El flujo superficial a lo largo de la pendiente del elemento es descrito por la ecuación de la onda cinemática unidimensional y la ecuación de Manning. Para la infiltración se supone que una función exponencial decreciente que depende de la conductividad y del flujo superficial. En términos generales, el modelo termina planteando una ecuación de balance de masas para cada una de las capas. La integración de este modelo con MODFLOW se realiza añadiendo a las ecuaciones que gobiernan el flujo en ECOMAG: un término sumidero para simular el flujo de agua al acuífero y un término fuente que represente la recarga desde acuífero.

ECOFLOW ha sido desarrollado e incorporado en Arc View. Plantea el principio de modelación de múltiple escala, combinando una representación más detallada de las condiciones de flujo del agua subterránea con el modelo de cuenca de mesoescala.

SHE – SYSTÈME HYDROLOGIQUEE EUROPÉEN

El Sistema Hidrológico Europeo, SHE, es un sistema de modelación hidrológica de base física desarrollado en conjunto por el Instituto Danés de Hidráulica, el Instituto Británico de Hidrología y la consultora francesa SOGREAH (Abbott et al., 1986a y b). SHE simula toda la fase terrestre del ciclo hidrológico, o cualquier fracción de la misma. Posee una arquitectura modular. El intercambio de datos entre módulos, así como la coordinación de la ejecución simultánea de los mismos, que pueden tener incluso pasos de tiempo independientes, es coordinado por un proceso central. La distribución espacial de los parámetros, las lluvias

y la respuesta hidrológica es lograda horizontalmente mediante una grilla ortogonal y verticalmente cada una de las celdas es representada mediante una columna con distintas capas horizontales.

Los procesos hidrológicos son modelados mediante representaciones en diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento; y ecuaciones empíricas para ciertos procesos. La versión actual se denomina MIKE SHE y es comercializada por el Instituto Danés de Hidráulica (<http://mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKESHE.aspx>).

Las componentes que modela SHE son: derretimiento de nieve, interceptación vegetal, evapotranspiración, flujo superficial y en canales, y flujo subsuperficial en la zona saturada y no saturada. El modelo asume que para los terrenos con mayores pendientes, el flujo en la zona no saturada subsuperficial es esencialmente vertical y en la zona saturada es principalmente horizontal. El resultado es una estructura del modelo en el cual las columnas de flujo no saturado, de una dimensión y profundidad variable; se vinculan con el flujo superficial en dos dimensiones en zona saturada (Refsgaard y Storm, 1995). Esta hipótesis disminuye los costos y tiempos computacionales. Sin embargo, plantea el problema de vincular los modelos numéricos del subsuelo unidimensional y bidimensional en una interfaz variable en el tiempo (la capa freática).

Este modelo simula con un gran nivel de detalle todas las componentes del ciclo hidrológico, posee una fuerte base física, con lo cual los parámetros surgidos de la aplicación del mismo no requerirían calibración y serían extrapolables a cuencas con características similares. No obstante, es un software propietario y de código fuente cerrado, lo cual limita su disponibilidad.

PRMS – THE PRECIPITATION-RUNOFF MODELING SYSTEM (USGS)

PRMS es un sistema de modelación hidrológica determinístico y distribuido desarrollado para evaluar los impactos de las diversas combinaciones de precipitación, clima y uso del suelo sobre los caudales, la producción de sedimentos y la hidrología de la cuenca a escala de eventos o continua en el tiempo (Leavesley et al., 2005). Su diseño modular otorga un marco flexible para la mejora del mismo. La versión 3.0.0 y su código fuente en JAVA están disponibles en la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/software/oui_and_mms_s/prms.shtml.

Este modelo divide la cuenca en unidades en función de la pendiente, orientación, elevación, tipo de suelo, cobertura vegetal y distribución de la precipitación. Asume que cada unidad es homogénea respecto a su respuesta hidrológica y a las características mencionadas; denominandolas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). El balance de agua y energía es calculado para cada HRU. La suma de las respuestas de todas las HRU ponderadas en función de su área, producen la respuesta de la cuenca.

El modelo requiere datos diarios de precipitaciones (pluvial y/o nival), temperaturas del aire mínimas y máximas y radiación solar. El modelo de pérdidas considera que la interceptación vegetal es función de la

densidad de la cobertura vegetal y el almacenamiento disponible en la vegetación de cada HRU. Para simular el contenido de humedad en el suelo, el sistema de cuenca es conceptualizado como una serie de reservorios.

El reservorio de la zona del suelo representa la parte del suelo que es capaz de perder agua por evaporación y transpiración, se considera como un sistema de dos capas (zona de recarga y zona inferior). Las pérdidas de la zona de recarga ocurren por evaporación y transpiración y en la zona inferior por transpiración. Las entradas provienen de la infiltración. La escorrentía superficial en cada HRU se calcula utilizando el concepto de área de aporte. El porcentaje de contribución de una HRU a la escorrentía es función de la humedad del suelo antecedente y la lluvia. El flujo subsuperficial se representa mediante un reservorio que simula la componente de respuesta relativamente rápida del flujo en la zona saturada–no saturada del suelo y en el acuífero. El movimiento vertical del agua es función del volumen disponible y un coeficiente de tránsito lineal. El reservorio de agua subterránea simula la componente lenta del flujo desde el acuífero. Se plantea un reservorio lineal y se considera que es la fuente de todo el flujo base, las entradas pueden provenir del reservorio del suelo o subsuperficial. El modelo considera el almacenamiento y tránsito en la red de drenaje, las entradas a cada tramo son la suma de los caudales de aporte de todas las HRU y de los caudales subsuperficial y subterráneo aguas arriba del mismo. Posee dos métodos para el tránsito basados en la ecuación de continuidad: tránsito lineal y método de Puls modificado.

Este modelo simula las componentes subsuperficiales mediante un esquema simplificado de reservorios interconectados. Posee un paso de tiempo fijo con lo cual generar una mayor discretización temporal en las crecidas implica grandes tiempos de cálculo.

JAMS – JENA ADAPTABLE MODELLING SYSTEM. J2000

El modelo J2000 es un sistema de modelación física basado en la ecuación de balance hídrico. Es adecuado para sistemas hidrológicos de grandes áreas (de más de 1000 km²) y está disponible en la web el modelo y su código fuente en JAVA (http://jams.uni-jena.de/ilmswiki/index.php/Hydrological_Model_J2000g).

Al igual que su modelo antecesor PRMS se basa en el concepto de HRU. La simulación de los procesos se lleva a cabo en distintos módulos: interceptión y evapotranspiración, agua en el suelo, agua subterránea, tránsito lateral y tránsito en el cauce. La cuenca se representa como una serie de reservorios interconectados.

La evapotranspiración potencial se calcula con la ecuación de Penman-Monteith en un proceso previo a la simulación. La interceptión depende de la lluvia y la capacidad máxima de este almacenamiento. Las salidas del mismo se dan por evaporación.

El módulo del suelo se estructura en unidades de procesos (infiltración, evapotranspiración) y unidades de almacenamiento (almacenamiento de poro medio: MPS y de poro grande: LPS). La capacidad de infiltración se estima con una función empírica de acuerdo al déficit de saturación y la tasa de infiltración máxima. Esta

tasa se comporta como un umbral, superada la misma, el agua sobrante se almacena en las depresiones en el terreno o está disponible para la escorrentía superficial. La precipitación infiltrada ingresa al MPS y LPS en función del grado de saturación del primero. El movimiento del agua en el suelo vertical y lateral se produce en el LPS. El agua que está en el LPS después de un intervalo de tiempo se puede difundir en el MPS.

El módulo de agua subterránea distingue un depósito superior de agua subterránea (RG1) de material suelto degradado con alta permeabilidad y un depósito inferior de agua subterránea (RG2) en fracturas y fisuras de la roca madre. La entrada a estos resulta de la componente vertical de la escorrentía del módulo del suelo. El vaciado puede ser por escorrentía subterránea lateral o por elevación capilar en la zona no saturada. La escorrentía total resulta de la suma de cuatro componentes individuales: el componente con mayor dinámica temporal es el escurrimiento directo y rápido (RD1), el componente lento escurrimiento directo (RD2), y las dos componentes que simulan el escurrimiento base (RG1 y RG2). El módulo de tránsito lateral describe la transferencia de agua en una cascada de flujo de HRU a HRU, es una relación $n:1$, en donde una HRU puede tener varios flujos de entrada pero sólo uno de salida. El módulo de tránsito describe los fenómenos de flujo en el canal a través de la aproximación de la onda cinemática y el cálculo de la velocidad del flujo de acuerdo a la ecuación de Manning–Strickler.

Este modelo simula las componentes subsuperficiales en forma conceptual mediante reservorios. No permite considerar la diferencia temporal con que ocurren los fenómenos en la cuenca ya que el paso de tiempo de cálculo del mismo es fijo, de modo que para simular las crecidas en detalle se deben simular con igual paso de tiempo los períodos sin lluvia, en donde los procesos tienen una dinámica mucho más lenta.

SHALL3

El modelo SHALL3 (Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura, versión 3), discretiza el dominio espacial en celdas interconectadas sobre las cuales se cuantifican flujos y balances de agua. Es un modelo cuasi-3D de celdas para áreas de llanura, que permite contemplar las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada y en la zona saturada. Los procesos hidrológicos superficiales son: interceptación vegetal y almacenamiento superficial, éstos se modelan mediante un esquema de reservorios. En la zona no saturada el modelo se basa en la ecuación de Richards, la resolución de la misma se realiza en términos de la humedad volumétrica mediante un esquema explícito en diferencias finitas (Zimmermann y Riccardi, 2000). Los modelos de flujos horizontales, tanto el superficial como el subterráneo, se basan en esquemas de celdas. Éstos permiten simular el movimiento multidireccional mediante el intercambio de flujo entre celdas con cualquier dirección contenida en el plano, pero con leyes de intercambio unidimensionales. El flujo superficial puede ser propagado mediante distintas leyes de descarga desde la aproximación cinemática de la ecuación de momento hasta una aproximación a la ecuación dinámica. Estas leyes permiten la simulación de tránsito por ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas y redes de conductos cerrados. El flujo subterráneo es simulado mediante la ecuación de Darcy. La estructuración de los modelos de flujos

horizontales en esquemas de celdas permite la discretización del dominio espacial en “capas” de celdas homólogas, superficiales y subterráneas, vinculadas por los modelos de flujos verticales. Las ecuaciones gobernantes para el flujo en ambos modelos son de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento. La resolución numérica se realiza a través de un esquema implícito.

El ensamble entre las distintas rutinas computacionales que representan diversos procesos hidrológicos, se realiza considerando que cada rutina (asociada a un subproceso) puede operar independientemente, con sus archivos de entrada y de salida. Las rutinas operan bajo una secuencia lógica durante un período de simulación determinado. El intercambio de información entre cada rutina se logra mediante la lectura y escritura de archivos que se actualizan permanentemente. Pueden cuantificarse dinámicamente variables de estado y los flujos de humedad y vapor. Esta aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a gran escala y en el largo plazo.

VIC

El modelo de Capacidad de Infiltración Variable (VIC, por sus siglas en inglés) es un modelo hidrológico semidistribuido de macroescala, utilizado para las aplicaciones que van desde la gestión de recursos hídricos a interacciones tierra-atmósfera y cambio climático. VIC divide la cuenca a través de una grilla de celdas y realiza un balance de agua y de energía en cada celda. Sus principales características son: variabilidad dentro de la grilla de la vegetación y de la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo, flujo base como una recesión no lineal, modelación de múltiples capas de suelo con capacidad de infiltración variable (Gao et al., 2009). Cada una de las celdas se describe por N+1 mosaicos de cobertura vegetal, considerando N tipos de vegetación y suelo desnudo. Para cada cobertura vegetal, se asignan valores típicos de sus principales características. Asociado a cada tipo de cobertura hay una capa de interceptación vegetal y múltiples capas de suelo. Las dos capas superiores del suelo representan la respuesta dinámica de la lluvia infiltrada, utilizando la curva de infiltración variable para considerar la heterogeneidad espacial de la generación del escurrimiento. La capa inferior del suelo inferior recibe agua de la capa media a través de la percolación la cual es regulada por la relación de Brooks-Corey para la conductividad hidráulica no saturada. El escurrimiento de esta capa se simula de acuerdo al modelo Arno. Aunque la característica clave de VIC es la consideración de variación de cobertura a escala subcelda, las características del suelo (tales como: conductividad hidráulica, textura del suelo, etc) permanecen constantes para cada celda. En el modelo, la distribución de humedad de suelo, la infiltración, el drenaje entre capas de suelo y el escurrimiento superficial y subsuperficial son calculados para cada mosaico de cobertura vegetal en cada paso de tiempo.

La simulación del tránsito de caudales en VIC se hace en un modelo separado de tránsito basado en una función de transferencia lineal. VIC ha sido adaptado para permitir la representación de efectos de gestión del agua que incluyen la operación de reservorios, desvíos para riego y retorno de flujos.

CRITERIA 3D

Es un modelo para cuencas experimentales de base física, tridimensional que utiliza modelos conceptuales para ciertas fases del ciclo hidrológico (Bittelli et al., 2010). Criteria-3D, se basa en el método de las diferencias finitas integradas (esquema centrado de volumen finito). Considera el flujo de agua en la zona saturada, no saturada y escurrimiento superficial. Las condiciones de borde en el cierre de la cuenca son: drenaje libre o ausencia de flujo. Las condiciones de bordes atmosféricas son flujo positivo ingresando a la superficie (precipitación) o negativo. El modelo no simula flujos preferenciales, transporte de solutos y flujo en canales.

Para describir el flujo en la matriz del suelo se utiliza la ecuación de Richards. Para el flujo superficial se utiliza la aproximación de la onda difusiva de la ecuación de Saint-Venant utilizando el coeficiente de rugosidad de Manning para representar la resistencia al flujo. Las propiedades del suelo se determinan con el modelo de van Genuchten-Mualem y un modelo de van Genuchten – Mualem modificado.

En resumen, la formulación matemática y numérica de la ecuación de continuidad es la base para el acoplamiento de las componentes superficial y subterránea. Este esquema permite simultáneamente resolver ambas ecuaciones mediante la derivación de una ecuación de balance de masas única. Para el flujo subterráneo, el volumen elemental es constante y cambia el contenido volumétrico de agua, mientras que en el flujo superficial el volumen del elemento puede cambiar. El modelo permite especificar condiciones de borde en función del tiempo y del espacio. La estructura computacional permite describir el acuífero base de forma irregular y de varias profundidades.

La evapotranspiración potencial ETP es calculada utilizando la fórmula de Penman – Monteith. La transpiración vegetal se basa en el enfoque de Driessen y Konijn. La evaporación real del suelo está limitada por el contenido de agua en el suelo, y la transpiración real (T) se obtiene reduciendo la máxima transpiración de acuerdo al potencial de agua en el suelo y a la densidad de las raíces.

Este modelo posee una fuerte base física, sin embargo su principal limitación es que es aplicable a escala de parcelas experimentales y no simula el flujo en canales.

IRENE 3D

IRENE es un modelo integrado 3-D de flujo superficial y flujo subterráneo saturado (Integrated suRface watEr-grouNdwatEr modEl) compuesto por un submodelo de flujo superficial 3-D, FLOW-3DL, y un submodelo 3-D de flujo subterráneo saturado. Permite la vinculación detallada entre el flujo superficial y subterráneo en áreas adyacentes o debajo de cuerpos de agua superficiales (Spanoudaki et al., 2009).

FLOW-3DL utiliza un esquema semiempírico para resolver las ecuaciones gobernantes del flujo superficial. Para ello deben imponerse condiciones de borde, las cuales pueden ser cerradas, en donde la velocidad normal al borde es nula, o abiertas, en las cuales se fija la velocidad o el nivel de la superficie libre. Además puede simular procesos de humedecimiento y secado. El submodelo de flujo subterráneo resuelve las ecuaciones para flujo subterráneo saturado, tridimensional de densidad constante (ecuación de continuidad y la ley de Darcy). Las condiciones de borde son de tres tipos: Dirichlet o carga hidráulica, Neumann o condiciones de flujo y Cauchy o condiciones dependientes de la carga. Además, en un acuífero no confinado deben satisfacerse condiciones de borde de Dirichlet y cinemáticas. La elevación de la superficie libre es una incógnita a priori y también forma parte de la solución.

Para resolver las ecuaciones de flujo superficial y subterráneo se utiliza el método de diferencias finitas. El dominio computacional es discretizado con celdas ortogonales, las variables escalares son calculadas en el centro de la celda y las componentes de velocidades en el centro de las caras de las celdas. En la dirección vertical, las capas pueden ser distorsionadas para reflejar los bordes de las formaciones geológicas.

Los submodelos de flujos superficial y subterráneo son acoplados a través de una interfase común, utilizando la ley de Darcy para estimar las componentes de la velocidad. Debido a que para el agua superficial se asume una distribución hidrostática de presiones, la altura piezométrica en la celda es igual a la elevación de la superficie libre. Por lo que la velocidad en la interfase se calcula en función de la elevación de la superficie libre y de la conductividad hidráulica. Este enfoque garantiza la eficiencia computacional a bajo costo y considera la transferencia de masa y de momento entre los dominios (Spanoudaki et al., 2009).

Este modelo es aplicado a pequeña escala y su objetivo principal es simular las interacciones de flujo superficial y subterráneo debajo de cuerpos de agua, hasta el momento ha sido aplicado a casos teóricos simplificados.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS

La zona de estudio seleccionada se encuentra en la región serrana de la provincia de Córdoba. Estas cuencas se caracterizan por tener grandes pendientes, lo que implica tiempos de concentración pequeños y una respuesta hidrológica rápida. Además, la distribución anual de las precipitaciones presenta dos ciclos bien diferenciados: uno húmedo de octubre a marzo y uno seco de abril a julio. La combinación de estos dos factores hace que los procesos hidrológicos dominantes y sus escalas temporales sean bien diferenciados en ambos ciclos. Ésto, sumado al aumento de la demanda del recurso, genera la necesidad de tener conocimiento de los procesos hidrológicos dominantes en los dos ciclos. Para ello se considera que los modelos integrados son una herramienta muy potente ya que permiten representar el comportamiento de la cuenca en crecidas y estiajes.

El proceso de selección de la cuenca consideró que para la implementación de un modelo hidrológico distribuido de tipo integrado se requiere contar con información hidrometeorológica con continuidad temporal y alta densidad areal. En función de esto, sólo dos cuencas en la región cumplen con dichas características: la cuenca del río de La Suela con información histórica y la cuenca del río San Antonio.

La aplicación del modelo ANSWERS en su versión continua posee la ventaja de contar con un paso de tiempo variable en función de si llueve o no en la cuenca, esto permite considerar la diferencia temporal con que suceden los fenómenos hidrológicos. El inconveniente de este modelo es que no representa con gran detalle el flujo subsuperficial. El modelo TREX ya ha sido aplicado a la cuenca del río de La Suela mostrando un buen desempeño (Stehli et al., 2011), no obstante sólo permite la simulación de eventos, con lo cual la utilización del mismo implicaría su modificación de modo de considerar los procesos de forma continua en el tiempo. ATHYS también permite la simulación continua y presenta las ventajas de ser de código fuente abierto y de poseer varias funciones de producción, sin embargo simula los procesos subsuperficiales en forma muy simplificada y el paso de tiempo de cálculo es fijo. AQUA es un modelo hidrológico que utiliza técnicas numéricas para simular el flujo de las aguas superficiales en los grandes paisajes de llanura, con lo cual debería evaluarse su aplicabilidad a cuencas de montaña donde los flujos son mucho más rápidos y adicionar la componente subsuperficial y subterránea del flujo.

El modelo ECOFLOW plantea la modelación multiescala, así la modelación superficial de la cuenca se realiza en celdas de 2km de lado. Debido al tamaño de las cuencas locales (menores a 500 km²) y la heterogeneidad del paisaje se considera que dicha representación espacial no permitirá considerar cada celda como un elemento hidrológicamente homogéneo. MIKE-SHE es un sistema de modelación hidrológica distribuido e integrado de base física, no obstante es un software propietario lo que limita su disponibilidad. Los modelos PRMS y JAMS poseen una estructura similar, ambos conceptualizan la cuenca mediante una serie de reservorios interconectados, son de código fuente abierto y de diseño modular. Su desventaja es que no permiten considerar los flujos superficial y subsuperficial con distintos pasos de tiempo de cálculo. El modelo SHALL3 representa el flujo superficial, en la zona no saturada y en la zona saturada del suelo, así como también sus interacciones, no obstante es apto para la aplicación en áreas de llanura. VIC es un modelo orientado a la simulación de procesos hidrológicos e interacciones tierra- atmósfera, sin embargo ha sido desarrollado como un modelo macroescala lo cual no es compatible con las dimensiones del sistema de estudio.

CRITERIA 3D es un modelo integrado tridimensional que considera el flujo en la zona saturada, no saturada y el escurrimiento superficial, no obstante es de aplicación a pequeñas cuencas experimentales y no simula el flujo en canales. El modelo IRENE, es un modelo integrado tridimensional de flujo superficial y subterráneo saturado, que no considera lo que ocurre en la zona vadosa. Además ha sido aplicado a pequeña escala y su principal objetivo es simular la interacción del flujo superficial y subterráneo debajo de cuerpos de agua.

CONCLUSIONES

De lo expuesto se observa que a partir del DEM de una cuenca, hay fundamentalmente dos estrategias para la discretización espacial de la cuenca. Una de ellas es mediante una grilla de celdas cuadradas, en las cuales se desarrollan los procesos hidrológicos, ésta se usa en ANSWERS, TREX, ATHYS, MIKE-SHE, AQUA, SHALL3 y VIC. Pero este último al ser un modelo de macroescala permite la variación espacial de ciertas características dentro de una misma celda. La otra estrategia utiliza el concepto de unidad de respuesta hidrológica (HRU), la cual clasifica las celdas ortogonales en función de ciertas características de modo que ante un mismo impulso, las unidades hidrológicas iguales tendrán idéntica respuesta hidrológica, así los cálculos en el modelo se realizan para cada HRU. Este concepto es utilizado por TOPMODEL, PRMS y JAMS.

Con relación al paso de tiempo de cálculo se distinguen modelos de eventos y continuos, ANSWERS y MIKE SHE presentan la ventaja de considerar la distintas escalas temporales de los fenómenos hidrológicos. Respecto a la forma de integración entre los flujos superficial y subsuperficial, se distinguen dos enfoques con fuerte base física, uno vincula el modelo de agua subterránea MODFLOW con modelos de flujo superficial, como son MODBRANCH y ECOFLOW. El otro enfoque es realizar el acoplamiento de las ecuaciones diferenciales que rigen los flujos superficial y subterráneo en un mismo modelo. MIKE SHE utiliza una aproximación unidimensional vertical para el flujo en la zona no saturada del suelo y en dos dimensiones para el flujo superficial. SHALL3 y VIC utilizan una aproximación unidimensional en la zona no saturada. Mientras que CRITERIA-3D e IRENE plantean un enfoque tridimensional del flujo, pero son aplicables a pequeñas cuencas. Un tercer enfoque, representa la cuenca mediante un sistema de reservorios interconectados que simulan las distintas componentes de flujo superficial, subsuperficial y subterráneo. Ejemplos de este último caso son PRMS y JAMS.

De este análisis se desprende que es necesario un modelo conceptual que considere la simulación del flujo superficial y que tenga en cuenta los fenómenos que ocurren tanto en la zona saturada como no saturada del suelo, considerando la disponibilidad de datos en el sistema de estudio. La estrategia planteada para la cuenca del río La Suela apunta a la modelación de los procesos hidrológicos continuos en el tiempo, considerando la variación espacial de los parámetros que los caracterizan e integrando los flujos superficiales y subterráneos utilizando un enfoque de tipo conceptual. En una próxima etapa se evaluará la aplicabilidad de modelos de este tipo, como son PRMS y JAMS, en el sistema de estudio, como así también la posibilidad de desarrollar un código propio o adaptar uno existente que no cumpla con todos los requerimientos propuestos.

REFERENCIAS

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., 1986a. *An introduction to the European Hydrological System - - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based,*

- distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87: 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J., 1986b. *An introduction to the European Hydrological System - - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87: 61-77.
- Beasley, D. B. Huggins, L. F. 1982. *Answers: User's manual*. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency 54p.
- Beven, K. J. 2001. *Rainfall-runoff modeling*. Wiley.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. *A physically based variable contributing area model of basin hydrology*. Hydrological Science Bulletin 24 (1), 44–69.
- Bittelli, M., Tomei, F., Pistocchi, A., Flury, M., Boll, J., Brooks, E. S., Antonilini, G. 2010. *Development and testing of a physically based, three-dimensional model of surface and subsurface hydrology*. Advances in Water Resources 33.
- Dabral, S., Cohen, M., 2001. *ANSWERS-2000 Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation with Questions Graphical User Interface*. ABE6254 – Simulation of Small Agricultural Watersheds
- Dalponte, D. D., Rinaldi, P. R., Vénere, M. J., Clausse, A. 2005. *Algoritmos de grafos y autómatas celulares: aplicación a la simulación de escurrimientos*. Mecánica computacional, XXIV. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Buenos Aires, Argentina.
- Furman, A. 2008. *Modeling coupled surface–subsurface flow processes: a review*. Vadose Zone Journal 7: 741-756.
- Gao H., Tang Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., Su, F., Sheffield, J., Pan, M., Lettenmaier, D., Wood, E. F. 2009 *Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington. Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University.
- Harbaugh, A. W., 2005. *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—The Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A16. Chapter 16 of Book 6. Modeling techniques, Section A. Ground Water. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A16 U.S.
- HDR-HydroQual, Inc., Colorado State University , Bureau of Reclamation 2011. *TREX Watershed Modeling Framework User's Manual: Model Theory and Description*.
- Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Viger, R.J., Hay, L.E., 2005, *USGS Modular Modeling System (MMS) - Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) MMS-PRMS*, in Singh, V., and Frevert, D., eds., *Watershed Models*: Boca Raton, FL, CRC Press, p. 159-177. Versión on line. (ftp://brrftp.cr.usgs.gov/pub/mows/software/oui_and_mms_s/prms_chap.pdf)
- Refsgaard, J. C., Storm, B. 1995. *Mike SHE*. Chapter 23 in: Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, CO.
- Singh, V. P. 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, CO.
- Sokrut, N., 2001. *A distributed coupled model of surface and subsurface dynamics as a tool for catchment management*. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Land and Water Resources Engineering, Stockholm, Sweden
- Spanoudaki, K., Stamou, A. I., Nanou-Giannarou , A. 2009. *Development and verification of a 3-D integrated surface water–groundwater model*. Journal of Hydrology 375 p 410–427 .
- Stehli, P. T., Weber, J. F., Jorquera, E., 2011 *Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos*. Mecánica Computacional XXX, 4705 – 4705 (Resumen). Asociación Argentina de Mecánica Computacional. ISSN: 1666-6070.
- Swain, E.D., Wexler, E.J., 1996. *A coupled surface-water and groundwater flow model (Modbranch) for simulation of stream–aquifer interaction*. United States Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations.
- Vénere, M. J., Clausse, A. 2002. *A computational environment for water flow along floodplains*. International Journal on Computational Fluid Dynamics. Vol. 16, pp. 327-330.
- Vieux, B. E., 2004. *Distributed hydrologic modeling using GIS*. Water Science and Technology Library. Volume 48.
- Zimmermann E. D., Riccardi , G. A. 2000 *Modelo de simulación hidrológica superficial para áreas de llanura*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina.

Páginas web

ATHYS: <http://www.athys-soft.org/v1/Index.html>

JAMS: <http://jams.uni-jena.de/>