

SIMULACIÓN AGREGADA Y DISTRIBUIDA DE UN ÁREA DE LLANURA: ARROYO SANTA CATALINA, PARTIDO DE AZUL, BUENOS AIRES

Georgina Cazenave, Luis Vives y Adolfo Villanueva
Instituto de Hidrología de Llanuras. CC 44. 7300. Azul
cazenave@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

Se modeló matemáticamente el escurrimiento superficial de una cuenca mixta (nacientes en el borde oriental de las sierras de Azul y el resto de su superficie en la llanura pampeana) con distintos programas: uno agregado y otro distribuido. En este trabajo se presenta el estudio del funcionamiento hidrológico de la misma y la comparación de los resultados obtenidos para la simulación de eventos. En la modelación se empleó el programa agregado HEC-HMS del U.S. Army Corps of Engineers, y el modelo distribuido Sistema de Simulación SSHH-I de la Universidad Nacional de Rosario. Se empleó para este último un modelo digital del terreno (MDT) de detalle, construido mediante técnicas de interferometría a partir de imágenes radar. La comparación entre los modelos se hizo considerando dos aspectos: i) caudales y volúmenes a la salida de la cuenca, a la manera tradicional; y ii) tomando en cuenta la capacidad de representar la distribución espacial del agua en la superficie de la cuenca, que es un factor crítico de la inundaciones en áreas de llanura. El empleo de un MDT de detalle permitió representar mejor el movimiento superficial del agua y las áreas de almacenamiento en este tipo de relieve que es de morfología básicamente llana.

Palabras clave: modelos agregados, modelos distribuidos, MDT, áreas de llanuras

ABSTRACT

The surface drainage of a mixed river basin (headwater on the Eastern edge of the Azul hills and middle and low areas on the Pampean plain) was simulated with two hydrological models, a lumped model and a grid model. This work presents the analysis and comparison of the results obtained from the simulation of some flood events. The lumped model used was HEC-HMS, from the U.S. Army Corps of Engineers. The distributed model was System of Simulation SSHH-I, from Rosario National University. For this last model, the digital elevation model (DEM) used was obtained using radar images interferometry techniques. Comparison between the models was made considering two aspects: i) discharge and volumes at the basin outlet; and ii) the capacity to represent the space distribution of water on the surface of the river basin, that is a critical factor for the floods in plain areas. The use of a grid DEM allowed a better representation of the surface movement of water and of storage areas, the being very common in this type of relief, characterized by a basically level morphology.

Key Words: lumped model, distributed model, DEM, plain areas

INTRODUCCIÓN

La llanura pampeana es un área de muy baja pendiente, donde el relieve es muy suave y la red de drenaje no está bien definida. Eso genera un comportamiento hidrológico atípico del sistema, en especial durante inundaciones. Varios fenómenos condicionan el comportamiento hidrológico de las llanuras:

- el escurrimiento puede tomar caminos diferentes dependiendo de la altura de agua;
- en inundaciones el escurrimiento en lámina es muy frecuente, a veces más que el encauzado;
- el almacenamiento en áreas bajas del terreno tiene mucho peso en el balance hídrico;
- el peso relativo del movimiento vertical del agua es mucho mayor que en sistemas hidrológicos típicos;

Durante las inundaciones, el concepto de convergencia del escurrimiento hacia una red de drenaje, que es la principal vía de movimiento del agua, no es aplicable. La capacidad de escurrimiento de los cauces es muy pequeña, y el valle de inundación no está bien definido. Eso genera inundaciones de poca profundidad y gran extensión; un arroyo de pocos metros de ancho puede tener un frente de inundación del orden de varios kilómetros. En la Figura 1 se pueden ver los innumerables cuerpos de agua que quedan luego del paso de una inundación, cuando se produce el fenómeno de llenado y encañamiento de áreas bajas y el agua ocupa, de manera discontinua, superficies del orden de centenas o miles de km².

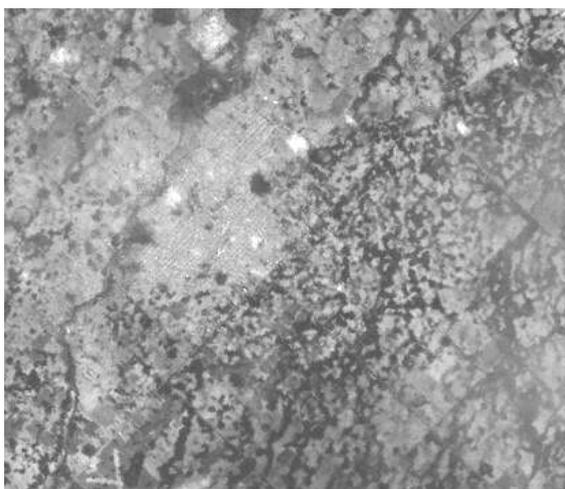


Figura 1. Patrón de anegamiento típico de la llanura en la zona de Azul, Prov. de Buenos Aires (imagen Landsat 7, composición RGB 5-4 -3 del 20/08/2002).

El partido de Azul, situado en la Pampa Húmeda, es asolado periódicamente por estos fenómenos. La ciudad de Azul, cabecera del partido, tiene aproximadamente 50000 habitantes. La principal actividad económica del partido es la producción agropecuaria. Por esto es que las inundaciones producen cuantiosas pérdidas en la zona rural, con impacto también en la zona urbana.

Dado que el objetivo principal de este trabajo es la comparación entre un modelo agregado y uno de grilla se tomó, por una cuestión de escala, la subcuenca del arroyo Santa Catalina como cuenca representativa de la cuenca del Azul, para el análisis de variables y comparación de los resultados de los modelos utilizados. Esta cuenca cuenta con características similares a la cuenca del Azul y toda la información necesaria para la modelación hidrológica a una escala de trabajo menor.

La utilización de la expresión “de grilla” es deliberada, dado que este trabajo se refiere a un tipo muy específico de modelo distribuido. El tipo de modelo utilizado tiene la capacidad de representar el relieve, y su relación con el escurrimiento sobre la superficie del terreno con un grado de detalle y precisión tan alto como el del modelo digital de elevación disponible

La utilización de modelos de escurrimiento basados en modelos digitales del terreno de detalle, permite una adecuada representación del escurrimiento superficial complejo característico de esta zona. Este tipo de relieve es de morfología básicamente llana con pequeñas depresiones que almacenan agua gran parte del año y marcan en el paisaje un sinnúmero de cuerpos de agua de variadas dimensiones que participan y definen la respuesta de la cuenca ante precipitaciones intensas.

OBJETIVOS

El objetivo de este artículo es analizar el comportamiento de dos modelos matemáticos de simulación del escurrimiento superficial, uno agregado y otro distribuido, y su capacidad de representar el funcionamiento hidrológico en un área de llanura, la cuenca del arroyo Azul.

La comparación entre los modelos se hizo considerando dos aspectos: i) caudales y volúmenes a la salida de la cuenca, a la manera tradicional; y ii) tomando en cuenta la capacidad de representar la

distribución espacial del agua en la superficie de la cuenca, que es un factor crítico de las inundaciones en áreas de llanura.

La distribución areal de los anegamientos calculados con el modelo distribuido fue cotejada con las imágenes satelitales de épocas próximas a las inundaciones (las disponibles sin nubes) para comparar los patrones de escurrimiento y la representatividad del modelo digital del terreno utilizado.

ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo Azul ocupa prácticamente la totalidad de la superficie del partido homónimo. En la zona central de la misma se halla la ciudad de Azul (Figura 2), que se encuentra a la salida de la cuenca superior. El relieve de esa cuenca es típico de llanura pero bordeado por el extremo oriental de las sierras de Azul.

A los efectos de simular las crecidas en el arroyo Azul, se estudió la cuenca del arroyo Santa Catalina (121 km²) que es similar a la del Azul Superior (1135 km²), con una cabecera serrana que luego se transforma en la llanura de transición, de relieve ondulado con depresiones que encierran espejos de agua de distintas dimensiones y permanencias. Por las características fisiográficas, su cercanía a la ciudad, la información disponible y la necesidad de comparar modelos matemáticos del escurrimiento superficial se eligió esta cuenca como área de estudio (Figura 3) donde la escala de trabajo permitió alcanzar con mayor detalle los objetivos planteados.

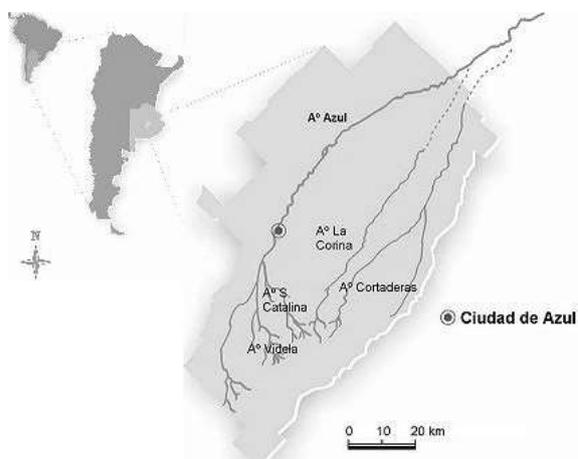


Figura 2. Partido de Azul y traza de los arroyos.

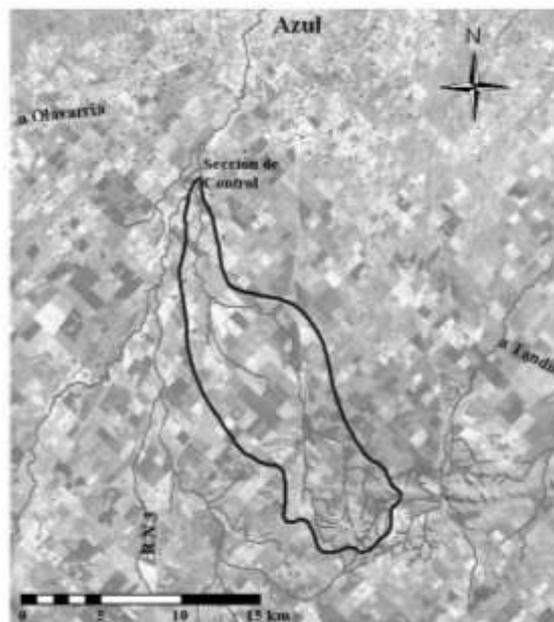


Figura 3. Cuenca del arroyo Santa Catalina (imagen Spot 2, julio 1986, composición RGB XS3-XS2-XS1).

La sección de control en el arroyo Santa Catalina se encuentra en el cruce con la RN3 y dispone de datos de alturas observadas para los eventos de 2001 y 2002 que produjeron inundaciones de diferentes magnitudes en la ciudad de Azul. Se cuenta con la relación de nivel - caudal (curvas h-Q), y un limnómetro digital que registra las variaciones de nivel del arroyo durante distintos eventos.

El módulo del arroyo durante los años 2003-2005 fue de 0,25 m³/s, pero en el 2002 (año húmedo) se estima que el módulo fue aproximadamente constante de 0,90 m³/s. El caudal del arroyo puede variar desde pocos metros cúbicos a 15 m³/s (caudal para el cual el nivel de agua alcanza el tablero del puente) o más de 30 m³/s (cuando desborda la misma anegando la ruta).

Las tormentas que se estudiaron en este trabajo son aquellas del 2001 y 2002 donde se disponía información pluviométrica - pluviográfica (en Chillar y Azul) e hidrogramas en la sección de control de la cuenca del Santa Catalina. En la Tabla 1 se presenta un resumen de la información y se detalla la relación entre el volumen medido bajo el hidrograma y el precipitado en el área de la cuenca (coeficiente de escorrentía). En los eventos analizados se observan dos situaciones para las respuestas de la cuenca: las de primavera-otoño con aproximadamente el 30% de escurrimiento directo y las de invierno con coeficientes de escorrentía superiores al 35%. Esta separación se debe a la fuerte explotación agrícola que

cubre más del 80% de la superficie de la cuenca, donde los ciclos de cultivos regulan la cobertura vegetal. Así se tiene una alta resistencia al escurrimiento durante los meses de verano y mínima en los de invierno, según el estado de la cobertura vegetal. La mínima cobertura vegetal invernal asociada a meses de excesos dan como resultado una respuesta de la cuenca más rápida que en los meses de verano, cuando el sistema es deficitario. Si bien, en general, los meses más lluviosos son los de verano también son los meses en que se usa el agua de reserva en el suelo que durante el otoño se repone. De este modo, satisfecha la capacidad de almacenamiento del suelo, se tiene desde mayo a diciembre los meses de excesos hídricos (Figura 4).

Tabla 1. Datos pluviométricos, estado del acuífero y caudales del A° Santa Catalina.

		Tormenta			
		Octubre 2002	Agosto 2002	Mayo 2002	Junio 2001
Características del evento	Precipitación (mm)	72	93,8	85,5	144,7
	Tiempo lluvia (hs)	15	19	22	15
	Int. máx. en una hora (mm/h)	25,9	15,3	29,6	31,8
	Lluvia antec. 30 días (mm)	142	34	68	32
	Prof. NF (m)	0,7	0,6	1	1,2
Crecida	Caudal pico (m ³ /seg)	13,7	38	20,4	112 (*)
	Tiempo pico (hs)	48	29	61	21
	Volumen (mm)	20,6	34,7	27,2	75,1(*)
	Coefficiente de escurrimiento (%)	28,6	36,9	31,8	51,9(*)

(*) Valor extrapolado, sección desbordada

A esta información se suma la caracterización geométrica de cada una de las subcuencas: longitudes y pendientes promedio de cauce, secciones tipo; y la caracterización necesaria para el modelo: longitudes de escurrimiento y pendientes promedio de los planos, rugosidades características de cauces y planos para la cuenca del arroyo Santa Catalina. La cuenca se divide en tres zonas: un área de aporte superior con pendientes superiores al 1%, un área intermedia de transición hacia un área inferior de llanura ondulada.

Para tener la caracterización de la superficie de escurrimiento la información de las cartas de suelo del

INTA proveen la clasificación de suelos según la Soil Taxonomy (USDA Soil Survey Staff, 1975) (Figura 5). Los parámetros de infiltración se tienen en cuenta mediante los ensayos de infiltración realizados con la metodología de doble anillo en distintos puntos de la cuenca del Santa Catalina para suelos argiudoles típicos, que cubren gran parte de la superficie de la cuenca, y la humedad antecedente (IHLLA, 2000).

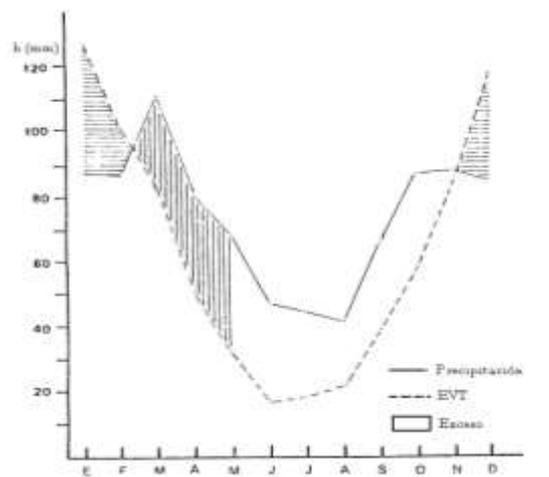


Figura 4. Balance Hídrico de Azul. Serie 1901-1985 (Sala et al., 1987).

Para la determinación de la humedad antecedente se toma la precipitación de los 7 y 30 días anteriores a la tormenta (para tener idea de la condición inmediata y anterior de presencia de agua en la cuenca), la evolución de los niveles freáticos en la zona y la condición de los cultivos (Tabla 1).

Los niveles freáticos empleados son obtenidos a partir de la red de piezómetros del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) distribuidos en la cuenca, los cuales se miden trimestralmente. En la Figura 6 se representa la evolución de los niveles de pozos de observación en la cuenca del A° Santa Catalina. Si bien la profundidad de la napa freática es diferente para cada pozo, todos ellos presentan la misma evolución en el tiempo. Para el evento de Agosto de 2002 se tiene el mayor volumen almacenado en el acuífero y para Junio de 2001 el mínimo del período considerado, siendo para Mayo y Octubre de 2002 situaciones intermedias. Los niveles freáticos altos modifican, por su proximidad con la superficie, la humedad de suelo que se encuentra muy por encima de los valores normales. Esto se ve potenciado en los meses de invierno cuando el sistema hidrológico funciona con excesos hídricos (Figura 4), que es lo que ocurre en los eventos de

Agosto de 2002 y Junio de 2001 que precisan una calibración diferente a la de los eventos de Mayo y Octubre de 2002.

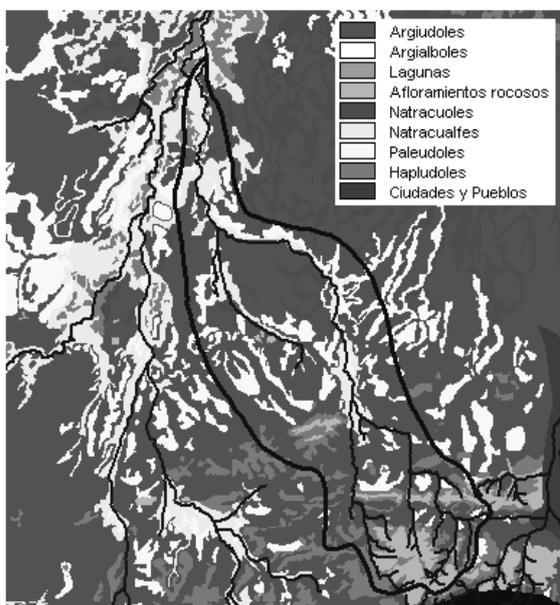


Figura 5. Grupos de suelo según Soil Taxonomy (Fuente INTA)

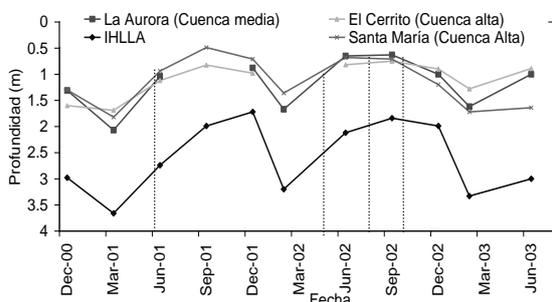


Figura 6. Evolución de las profundidades de niveles freáticos. Cuenca del Santa Catalina.

La condición de los cultivos se obtiene con el Índice de Vegetación Normalizado Diferencial (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), Rouse et al., 1974). Este índice permite observar el nivel de desarrollo de la vegetación en las diferentes regiones y sintetiza el resultado de la marcha de cultivos y pastizales en el tiempo. El estado de la cobertura vegetal, así como el patrón de uso de las tierras predominantes en cada zona y el estado de crecimiento de los cultivos se obtienen a partir del tratamiento de imágenes satelitales. La ecuación que calcula este índice a partir de las bandas rojo visible (R) e infrarrojo cercano (IRC) es la siguiente:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (1)$$

Si bien no se tienen los datos del NDVI del año 2002, se adopta una condición tipo dada a partir del análisis de las imágenes del año 2001. En la Figura 7 queda claramente definido el grado de cobertura vegetal, máximo para el evento de Octubre de 2002, mínimo para Junio de 2001 y Agosto de 2002, y una situación intermedia para el mes de Mayo de 2002. Este grado de cobertura vegetal representa la facilidad o dificultad que encuentra el agua al escurrimiento, así para los meses de invierno el NDVI menor representa una condición de máximo escurrimiento mientras que para el otoño o primavera el crecimiento o presencia de vegetación obstaculiza el escurrimiento y favorece la infiltración.

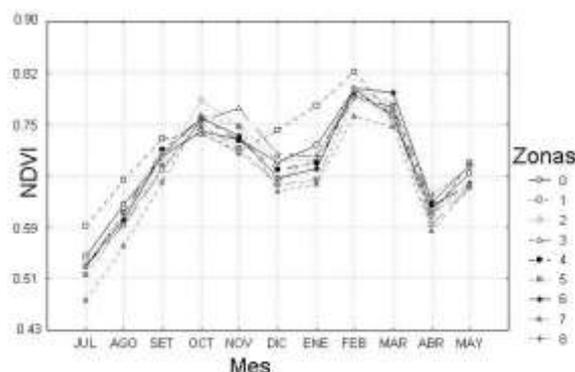


Figura 7. Evolución de NDVI (adimensional) para distintas zonas de la cuenca Santa Catalina de Julio de 2001 a Mayo de 2002. Spot 4 Product Vegetation (Gandini M., 2003. Comunicación personal).

MODELO AGREGADO – PROGRAMA HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (Scharffenberg and Fleming, 2006) simula, a partir de un evento de lluvia, el escurrimiento superficial de un área. A través de rutinas de abstracción de lluvias calcula el hietograma de precipitación efectiva que se emplea para el cálculo de la transformación lluvia-escurrimiento. La cuenca se representa como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos del proceso lluvia-escurrimiento de cada subcuenca. Cada uno de estos componentes requiere un conjunto de parámetros que especifican las características particulares de los mismos y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. Como resultado se obtienen hidrogramas en los puntos requeridos dentro de la cuenca.

La determinación de la lluvia neta para los eventos se cuantificó con el método del Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (S.C.S.) del U.S.D.A. (1985), que tiene en cuenta las condiciones de lluvia antecedente, uso de las tierras y tipo de suelo que son fundamentales para la caracterización de la respuesta de la cuenca. Si tenemos en cuenta que la clasificación hidrológica de suelo corresponde al Grupo B (suelos poco profundos, margas arenosas), el uso de tierra es agrícola y la condición de humedad II (clase antecedente de humedad) el rango de CN varía entre 56 y 69.

Para la representación de las zonas hidrológicas se dividió la cuenca en trece subcuencas que cierran en la sección de control ubicada en la intersección del arroyo con la Ruta Nacional N° 3. La subdivisión fue de detalle ya que el relieve de la parte superior tiene fuerte influencia en el hidrograma de salida de la cuenca por sus tiempos de concentración cortos para eventos de alta intensidad.

Para este área de estudio se aplicó onda cinemática (Chow, 1994). El método se utilizó siguiendo el concepto que asume el programa Kineros (Documentation-Overland Flow, en: <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>) el que asume que el caudal es una función potencial de la altura, con lo cual pasa a ser una relación empírica caudal-almacenamiento y no una ecuación de base física. De todas maneras, las pendientes de la cabecera de la cuenca (mayores al 1%) son las que imponen mayormente los tiempos y caudales pico de los hidrogramas de salida.

El método adoptado para la propagación en canales para la cuenca del arroyo Santa Catalina fue el método de Muskingum Cunge para ruteos en canales usando las ecuaciones de Manning (CEWRC-HEC, 1990), ya que permitió la definición de las secciones en los distintos tramos de los cauces y afluentes, y adoptar una rugosidad para fondo y para márgenes.

MODELO DISTRIBUIDO – PROGRAMA SSHH-I

El programa Simulaciones Hidrológicas (SSHH-I) es un modelo que permite la simulación hidrológica-hidráulica de escurrimiento superficial en dominios bidimensionales con unidades de discretización

ortogonales (denominadas celdas o elementos). Es un modelo de base física, que utiliza en cada elemento de la cuenca formulaciones hidráulicas reconocidas (Riccardi, 2000).

Los parámetros que utiliza son: la rugosidad de Manning, tanto para escurrimiento en superficie (n_v) como en canal (n_r); y los parámetros de almacenamiento (i_{ta}) y conducción (i_{tc}) en el elemento, que describen las variaciones de las características hidráulicas de la celda como función de la variación de la altura de agua. Se considera también como parámetro, aunque usado por fuera del modelo, el número de curva (CN), con el cual se determinaron los hietogramas netos de cada evento.

La definición del modelo para la cuenca del Arroyo Santa Catalina se realizó a partir del modelo digital del terreno (MDT) obtenido de imágenes radar (Eulliades y Vénere, 2003) con una resolución de 200 x 200 m (Figura 8). Una vez definida el área general (dominio de simulación) que incluye la cuenca, se delimita la zona activa, es decir, los elementos que pertenecen a la cuenca cuyo cálculo se realiza con las formulaciones de escurrimiento en la superficie del terreno. También se determinaron los elementos que constituyen la traza del arroyo los cuales se definen como canal y son calculados con ecuaciones para flujo encauzado.

El modelo utiliza hietogramas de lluvia neta, que deben ser calculadas previamente a la simulación del escurrimiento. El modelo distribuido tiene en cuenta explícitamente los bajos que forman parte del almacenamiento superficial (bajos, pequeñas lagunas y bañados). El almacenamiento (nivel de agua) para todos los elementos que componen el sistema simulado, es una condición inicial del modelo. Si se considera un estado inicial de cálculo en que la cuenca tiene altura de agua cero en todos los elementos, es necesario considerar el volumen adicional de llenado de los bajos en las pérdidas. Si, por el contrario, se establece que en determinados elementos se tiene una altura de agua (como condición inicial para zonas de almacenamiento superficial) el volumen que se quitará del hietograma total será menor, dependiendo del estado de llenado que presenten las zonas bajas. Esta regulación se trabaja con el método de abstracción del CN, que para un valor de CN mayor incorpora al sistema el volumen adicional de llenado de bajos necesario.

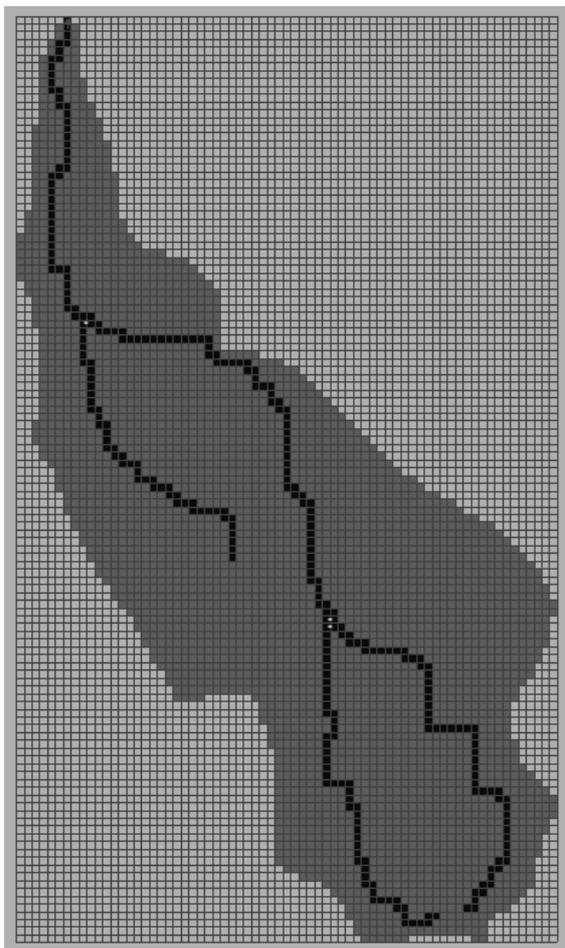


Figura 8. Discretización de la cuenca del arroyo Santa Catalina

RESULTADOS

HEC-HMS: El modelo con el programa HEC-HMS reprodujo correctamente caudales y tiempos de los picos, aunque por los métodos adoptados es necesario ser cuidadoso en el manejo de los parámetros que resultan de mayor sensibilidad, como la pendiente, la rugosidad y el número de curva. En general los ajustes obtenidos de caudales se pueden considerar buenos y los parámetros calibrados son coherentes.

Durante la calibración se observó que el hidrograma de respuesta de cada subcuenca es muy sensible a la rugosidad hidráulica. Para el escurrimiento sobre el terreno se utilizó un n de Manning de 0,1 a 0,22. Este último es un valor elevado debido a la altura relativa de rugosidad, es decir, el tirante de escurrimiento no supera los 0,50 m a 0,80 m que es la altura que alcanzan los cultivos de soja o maíz en la planicie de inundación. Otros ejemplos de n de

Manning elevados pueden ser encontrados en USACE, 2000 y Arcement and Schneider, 1989. La variación de la rugosidad del terreno es función de la época, ya que en el invierno además de haber menor cobertura de cultivos, los almacenamientos superficiales se encuentran frecuentemente saturados y funcionan encadenados acelerando la respuesta del escurrimiento. En cauces la rugosidad varía entre 0,02 a 0,1, este último valor en algunos cursos efímeros. El n de 0,02 es más bajo que lo sugerido por la literatura para cauces naturales porque no fue posible reproducir con los valores recomendados los hidrogramas observados. Se eligió como sección representativa una sección compuesta, con cauce principal y planicie de inundación. Los valores de rugosidad en la planicie fueron semejantes a los del terreno.

La sensibilidad del modelo depende tanto de la rugosidad como de la pendiente (entre 5 y 0.1 %, según sea zona de cabecera o de transición). En las zonas de mayor pendiente ésta domina el flujo y su traslado pasando la rugosidad a tener menor importancia. Para aquellas zonas donde la pendiente es de transición, la rugosidad de las superficies de escurrimiento determina el tiempo de respuesta del hidrograma. Finalmente, en la cuenca baja (zona de pendientes bajas), la respuesta de la cuenca depende del estado de saturación de los almacenamientos superficiales que determinan la capacidad de la misma de retener el agua o permitir su transporte. Por ello no depende principalmente de la pendiente, sino del número de curva y la rugosidad.

SSHH-I: Para reproducir el volumen bajo el hidrograma con el modelo SSHH-I se utilizó un número de curva más alto que en el HEC-HMS. Esto es debido a que hay un volumen de agua que queda retenido en las depresiones del terreno y es representado explícitamente por el modelo pero no por el HEC-HMS. La causa es que el MDT tiene capacidad de representar esas características (salvo errores propios del MDT), y el modelo no genera escurrimiento hasta que el nivel de agua no supera la cota de los bordes de esas depresiones. Ese efecto podría haber sido en principio representado en el HMS con la abstracción inicial (I_a), pero la concepción conceptual de I_a no está orientada a ese tipo de fenómeno. En función de eso, se optó por trabajar sólo con el CN, cuya relación con las características físicas del terreno es más clara.

En cuanto a la magnitud del caudal máximo y tiempo al pico el ajuste es bueno. Esto se debe a la dis-

cretización espacial dada por el modelo digital del terreno que regula a través de las depresiones los volúmenes de agua que aportan a la sección de salida. Esto se traduce en un buen ajuste de las curvas de crecida y de agotamiento. Los volúmenes calculados también tienen un ajuste adecuado.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE AMBOS MODELOS

i) de los hidrogramas

Los hidrogramas calculados por cada modelo y el hidrograma observado se representan en las figuras 9, 10, 11 y 12 para cada uno de los eventos. Los hidrogramas calculados con el modelo distribuido no reproducen en todos los casos el caudal y tiempo al pico pero la forma de los mismos se asemeja mejor a los observados. Posiblemente se podría obtener un mejor ajuste si se zonificaran los parámetros del escurrimiento en la superficie de la cuenca. También se debe tener en cuenta que los caudales observados en Junio de 2001 tienen errores debido a que el arroyo desbordó y el nivel del agua cubrió la calzada del puente sobre la RN3. Además, para este evento, no se contó con datos de distribución de lluvia en la cuenca alta y se adoptó la distribución de cuenca baja. La incertidumbre de esta tormenta también está dada por la gran variabilidad de lluvia total en la cuenca, que presenta un núcleo con precipitaciones superiores a los 180 mm (en la cabecera de la cuenca del Santa Catalina) y registros de 80 mm aguas abajo de la sección de control.

El modelo agregado, por el contrario, calcula el pico del hidrograma con mayor fidelidad pero las curvas de crecida y recesión se encuentran muy lejos de los hidrogramas reales. En los eventos de invierno fue necesaria una calibración diferente para acelerar el escurrimiento. Esto se consiguió bajando la rugosidad tanto del terreno como del canal. En los canales fue necesario utilizar un valor de rugosidad por debajo de los recomendados en la literatura. Con los valores usuales de rugosidad en cauce (USACE, 2000 y Barnes, 1967), ni aún bajando mucho la rugosidad de la planicie. Debido a este ajuste las diferencias en los volúmenes son notorias para los hidrogramas calculados por el programa HEC-HMS (Tabla 2). Con el cambio de las rugosidades se obtiene una mejor distribución temporal del pico pero no mejora la forma de las curvas de crecida y recesión, que los modelos distribuido, por su representa-

ción más real del terreno, obtienen una mayor semejanza al observado.

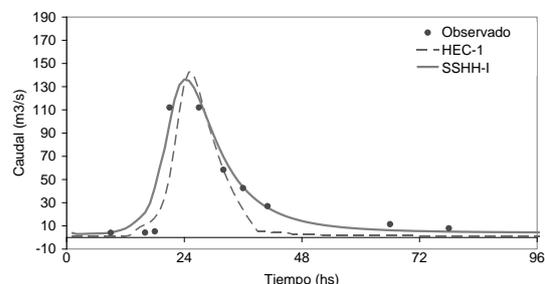


Figura 9. Comparación de hidrograma observado y simulado. Junio de 2001.

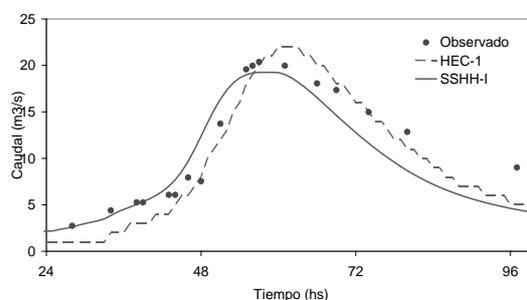


Figura 10. Comparación de hidrograma observado y simulado. Mayo de 2002.

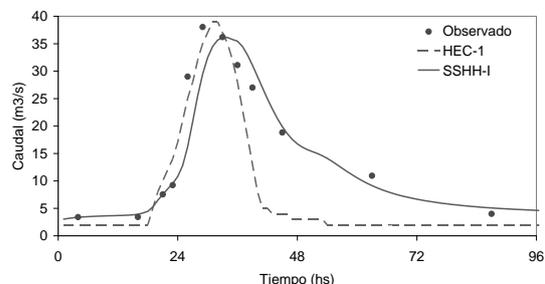


Figura 11. Comparación de hidrograma observado y simulado. Agosto de 2002.

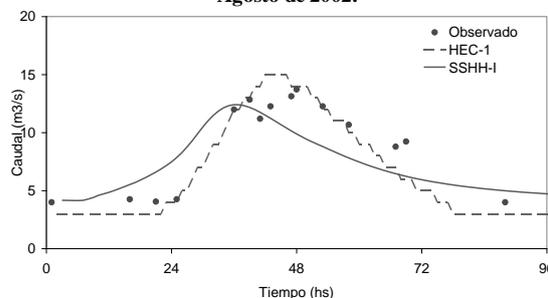


Figura 12. Comparación de hidrograma observado y simulado. Octubre de 2002.

La representación a través del MDT de los almacenamientos de agua en el terreno y el uso de una condición inicial permitió reproducir más acertadamente la regulación (retención/escorrentía) que éstos producen durante el movimiento del agua sobre la superficie de la cuenca. También en función de esto fue posible usar básicamente los mismos parámetros en todos los eventos, a diferencia del HEC-HMS en que fue necesario adoptar una cierta “estacionalidad” para los parámetros.

Tabla 2. Características de hidrogramas observados y calculados de cada evento

Junio 2001			
Variable	Observado	HEC-HMS	SSHH-I
Caudal pico (m ³ /s)	112 (*)	143	136
Tiempo al pico (hs)	21	25	24
Volumen (hm ³)	9.1	5.7	8.5

(*) Caudal extrapolado. Sección desbordada

Mayo 2002			
Variable	Observado	HEC-HMS	SSHH-I
Caudal pico (m ³ /s)	20.4	22.3	19.3
Tiempo al pico (hs)	61	54	56
Volumen (hm ³)	3.3	2.9	2.7

Agosto 2002			
Variable	Observado	HEC-HMS	SSHH-I
Caudal pico (m ³ /s)	38	39	36.2
Tiempo al pico (hs)	29	31	33
Volumen (hm ³)	4.2	2.5	4.2

Octubre 2002			
Variable	Observado	HEC-HMS	SSHH-I
Caudal pico (m ³ /s)	13.7	15.3	12.4
Tiempo al pico (hs)	48	44	36
Volumen (hm ³)	2.5	2.4	2.6

ii) de los parámetros

En cuanto a los parámetros calibrados, en la Tabla 3 se detallan los parámetros comunes y los específicos de cada uno de los programas. Se observa que el HEC-HMS y SSHH-I comparten parcialmente la rugosidad y el CN, que si bien son diferentes varían dentro de un rango aceptable.

Las rugosidades, como se comentó anteriormente, responden para el HEC-HMS a una cuestión de caracterización de la cuenca según la estación climática que describe de manera general el tipo de cobertura y necesidad hídrica. En el caso del SSHH-I no hace falta esta separación. La utilización del MDT permite tener en cuenta las retenciones en superficie y su estado anegamiento, por lo cual no hace falta una calibración diferente para reproducir los hidrogramas observados. Sólo se adopta una pequeña variación de la rugosidad en el canal que describe mejor las secciones características del arroyo en cuenca baja y cuenca alta.

Tabla 3. Resumen de los parámetros utilizados en el HEC-HMS y SSHH-I.

		Parámetros	HEC-HMS	SSHH-I
Comunes	n _V	Otoño/primavera	0.22	0.22
		Invierno	0.10	
	n _R	Otoño/primavera	0.10	0.08-0.05
		Invierno	0.02	
		CN	56-69	62-71
SSHH-I		i _{Tc}		0.13
		i _{Ta}		0.13

Las diferencias en los CN adoptados está basada en la valoración de un volumen de agua extra que queda retenido como almacenamiento superficial en el terreno y que es representado en el modelo digital del terreno que utiliza el modelo SSHH-I pero no en el HEC-HMS. Si bien el método del CN contempla las abstracciones iniciales, entre ellas los almacenamientos superficiales, es una determinación de difícil cuantificación. Por ello se adoptó la misma abstracción inicial en ambos casos y se obtuvo el volumen suplementario necesario para el modelo distribuido aumentando el CN.

Los parámetros específicos del SSHH-I son los de almacenamiento y conducción dentro de la celda (Rentería y Stenta, 2003) y tienen un único valor para la cuenca, ya que el modelo no permite discretizar espacialmente este parámetro.

iii) de los almacenamientos

Para realizar un análisis espacial del MDT utilizado en el modelo distribuido se comparan los resultados con imágenes satelitales Landsat. El proceso de comparación requiere tener para cada evento simulado dos imágenes, una anterior que permita evaluar la acumu-

lación previa de agua en el terreno (condición antecedente) y otra posterior con el anegamiento resultante debido a un evento de lluvia. Del conjunto de eventos estudiados sólo se encontraron imágenes satelitales libres de nubosidad en el área de estudio para el evento del 13 de junio de 2001. Las imágenes corresponden a los meses de mayo y agosto de 2001, ambas muy distantes temporalmente del evento.

Para poder tener una idea cualitativa de los resultados obtenidos a partir del uso del MDT se comparó la simulación del evento de junio de 2001 con la situación posterior registrada en la imagen satelital del 9 de agosto de 2001. En la imagen satelital la condición es altamente húmeda porque al invierno lluvioso se agrega un evento de 68 mm registrado 4 días antes del paso del satélite, lo cual permite suponer que si bien no es la imagen correspondiente temporalmente al evento de junio de 2001 podría ser una situación similar.

La imagen calculada corresponde a las 100 horas de simulación cuando el hidrograma calculado por el programa ha pasado completamente por la sección de salida. Los resultados del SSHH-I tienen una discretización de 200 m (definida en función la capacidad de cálculo del programa) mientras que la imagen satelital 30 m, pero a pesar de esta diferencia pueden observarse en ambas los almacenamientos de agua en el terreno así como las vías de escurrimiento (Figura 13).

En la Figura 13 se observa que las zonas con agua en la imagen generada por el SSHH-I forman un patrón o esquema de encharcamiento similar al que se ve en la imagen de satélite pero con mayor área. Esa diferencia de área es causada en buena medida por la diferencia en la resolución del modelo (200 m) y la de la imagen (15 m). Para el SSHH-I, una celda de 200x200 m aparece como inundada uniformemente, siendo que en la realidad es posible que eso corresponda, por ejemplo, a un anegamiento de menor área y mayor profundidad. No se dispone de valores de profundidad de agua para los almacenamientos para verificar ese tipo de diferencias. En los resultados del modelo los cursos de agua simulados también aparecen con un tamaño superior al normal, ya que son cursos pequeños, del orden de 10 m de ancho. Además, por causa de la vegetación de las márgenes, no son identificados como agua en la clasificación de la imagen de satélite.

La diferencia de fecha entre el final de la simulación y la imagen es otra causa para la diferencia de área inundada. En la realidad, parte del agua almacenada se ha ido perdiendo por infiltración y evaporación.

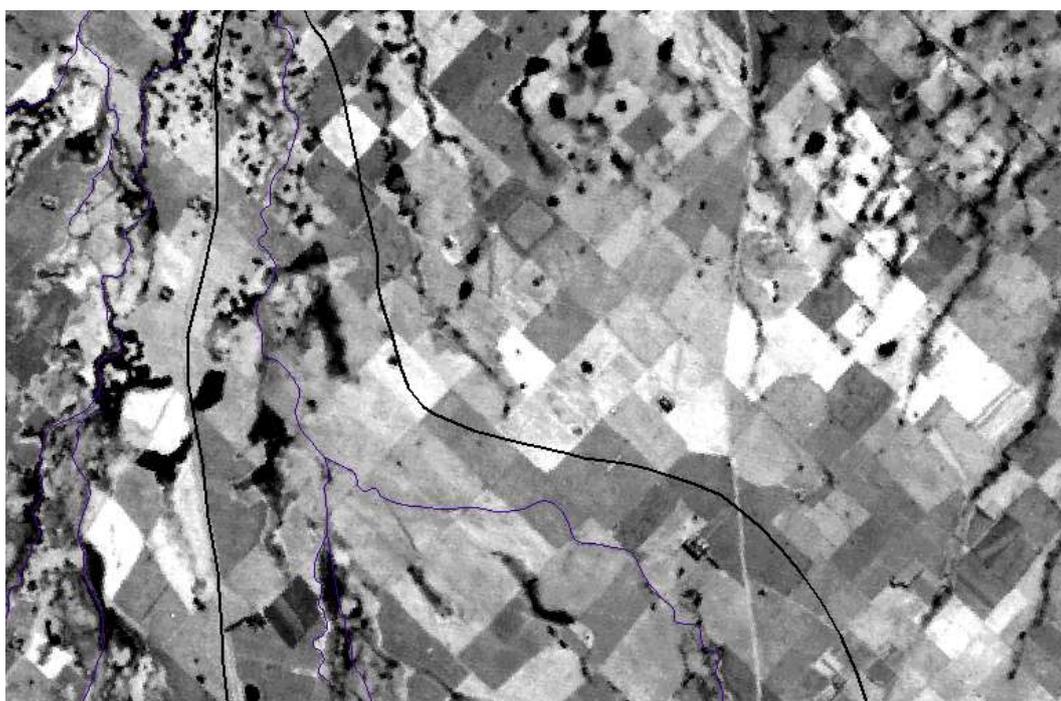
Debido a que en el modelo el agua no infiltra ni evapora, una vez que el agua queda confinada el almacenamiento en una celda se mantiene indefinidamente.

El patrón de anegamiento calculado por el SSHH-I está fuertemente influenciado por el MDT, particularmente en relación a puntos de acumulación de agua. En otras palabras, para que el modelo acumule agua en una depresión, ésta debe estar representada en el MDT. Comparando el MDT con algunas transectas relevadas en campo se detectaron diferencias puntuales y de microrelieve. Si bien el MDT describe adecuadamente la morfología de la superficie del terreno y en cotas promedio es correcto, puede estar ignorando o exagerando lomadas y depresiones en las cuales se almacena el agua.

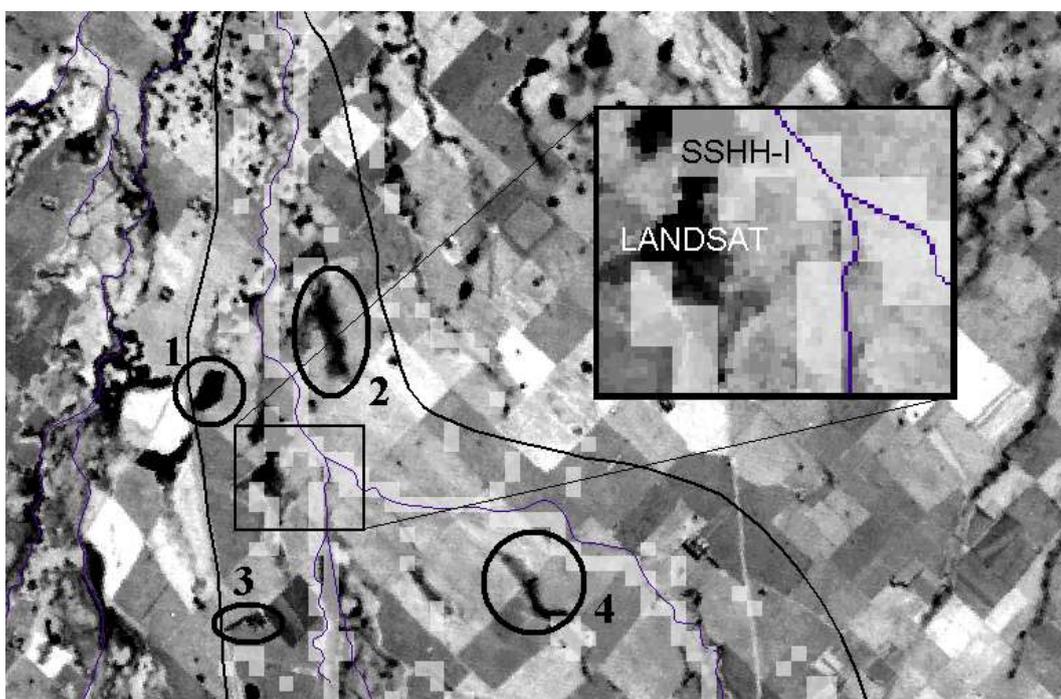
Existen también problemas con la interpretación de espejos de agua, arboledas o construcciones (detectadas por la imagen radar) que si no son corregidas quedan como alturas de terreno. Como ejemplo de lo anterior se pueden tomar las áreas marcadas como (1), (2), (3) y (4) en la figura 13 b). En los 4 casos, la imagen presenta áreas oscuras, que parecen acumulación de agua, y que la simulación no detecta. Un análisis de detalle reveló que las áreas (1), (2) y (4) no están adecuadamente representadas en el MDT. El área (3) no es acumulación de agua, sino una arboleda. Definir cuantitativamente y solucionar estas diferencias requiere del estudio particular del MDT, aspecto que está fuera del alcance de este trabajo.

Otro caso interesante que surge de la utilización de imágenes de satélite para análisis de acumulación de agua se puede ver en la Figura 14. En la imagen aparecen varias áreas oscuras, con el aspecto generalmente asociado a un cuerpo de agua. Sin embargo, un análisis cuidadoso revela que esos "cuerpos de agua" son en realidad la sombra de algunas nubes. En la Figura 14 están marcadas algunas de las nubes con su correspondiente sombra/"cuerpo de agua".

A pesar de estas diferencias, la utilización de un MDT de detalle en la definición de las vías de escurrimiento y áreas de aporte es un avance significativo en la representación de la cuenca. En función de lo observado en este trabajo, en áreas llanas sería mejor no limitar la modelación y el MDT a una "cuenca" definida de antemano, sino que se debiera tomar un área que abarque la zona en estudio y una zona marginal que asegure que el movimiento del agua es debido a la topografía y no a una definición impuesta. Con este procedimiento se disminuiría el error que puede generarse al calcular el área de aporte en zonas de llanura.



a) imagen de satélite con el vector del curso de agua



b) imagen de satélite con los resultados del modelo superpuestos.

Figura 13. Comparación de imagen satelital Landsat 5TM, composición RGB 5-4-3 del 9 del Agosto de 2001 con anegamientos calculados por SSH-I para el evento del 13 de junio de 2001. Parte inferior de la cuenca del arroyo Santa Catalina.



Figura 14. Falsos cuerpos de agua causados por sombra de nubes

CONCLUSIONES

Con la combinación de metodologías adoptadas en el modelo agregado HEC-HMS (CN-SCS, onda cinemática y Muskingum-Cunge) hubo dificultades para ajustar simultáneamente la forma del hidrograma (tiempo y caudal de pico) y el volumen escurrido. En general, fue necesaria una “solución de compromiso”, buscando un resultado aceptable para ambas cosas. El modelo distribuido SSHH-I permitió obtener una mejor combinación del ajuste de las curvas de crecida y recesión de los hidrogramas con el ajuste de volumen. La incorporación al modelo de algoritmos para simulación continua es una posibilidad interesante, y permitiría pensar en términos de modelación integrada y gestión de recursos hídricos.

La utilización de modelos digitales del terreno de detalle en modelos hidrológicos distribuido permite reproducir mejor el funcionamiento de la cuenca, especialmente en las de llanura. La aparición, poste-

rior al desarrollo de este trabajo, del SRTM (NASA, 2001) de 90 metros de resolución hace viable la aplicación de este tipo de técnica sin costos adicionales, ya que ese MDT es gratuito y accesible en la web.

Es importante en cualquiera de los modelos, y especialmente en los distribuidos, tener en cuenta que los almacenamientos en áreas bajas del terreno pueden tener mucha influencia sobre la velocidad de respuesta de cuencas en zonas de llanura. La evaluación correcta de esta variable puede ser crítica para obtener buenos resultados en la simulación.

La distribución espacial de los anegamientos calculados en el modelo SSHH-I dependerá del MDT utilizado, de la discretización adoptada y de las condiciones de humedad antecedente. Para la evaluación espacial es necesario contrastar las zonas de anegamiento del modelo con imágenes satelitales (varias fechas) y verificación en campo siempre que sea posible. La utilización de imágenes satelitales

además puede permitir estimar las condiciones iniciales de humedad y cobertura de la cuenca, ajustando mejor el modelo de escurrimiento.

La precisión del modelo digital del terreno utilizado es un factor crítico para la calidad de los resultados en la modelación hidrológica distribuida. En función de eso es necesario un trabajo previo de verificación del MDT, comparando con otras fuentes de información y con relevamientos en campo en los puntos críticos. Esa información complementaria permite corregir las discrepancias que el MDT pueda tener con el terreno natural.

Según los objetivos de la aplicación, se deben analizar las ventajas y desventajas de cada tipo de modelo. Si se busca representar fundamentalmente caudal y tiempo de pico (e. g. alerta de crecidas), con información simple y de rápida obtención, el programa HEC-HMS tiene las características necesarias. En cambio, si se busca representar el movimiento del agua sobre la superficie de la cuenca, representando la distribución espacial de la inundación y su impacto sobre la cuenca, los modelos distribuidos como el SSHH-I son los indicados.

BIBLIOGRAFÍA

- Arcement G. and Schneider V., 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2339. Metric Version, <http://www.usgs.gov/>
- Barnes H., 1967. Roughness Characteristics of Natural Channels. United State Geological Survey Water-Supply Paper 1849.
- CEWRC-HEC. 1990. HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual. Hydrologic Engineering Center. U. S. Army Corps of Engineers.
- Chow V., Maidment D. y Mays L. 1994. Hidrología Aplicada. Ed. Mc Graw Hill.
- Euillades P. y Vénere M. 2003. Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol 19, pp. 33-43.
- IHLLA. 2000. Avance metodológico en el tratamiento de los recursos hídricos en una cuenca de llanura. Proyecto CIC-UNCPBA. Informe Final. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Argentina.
- NASA. 2001. SRTM, Shuttle Radar Topography Mission. <http://seamless.usgs.gov/>, <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Rentería J y Stenta H. 2003. Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial. Tesis de Grado Ingeniería Civil. Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. Inédito.
- Riccardi G. 2000. Cell model for hydraulic modeling. Journal of Environmental Hydrology. Vol. 8, paper 15, 1-13.
- Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D. and Harlan J. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA / GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, p. 371.
- Sala J. M., Kruse E. y Agugliano R. 1987. Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Informe 37, 235 p.
- Scharffenberg W and Fleming M. 2006. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual. U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- USACE, 2000. Hydrologic Modeling System HECHMS, Technical Reference Manual, Hydrologic Engineering Center.
- USDA Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys
- USDA. 1985. National Engineering Handbook, Section 4. Soil Conservation Service, United States Government Printing Office, Washington.

Artículo recibido el 03/2008 y aprobado para su publicación el 03/2009.