



Comparación entre modelos hidrológicos semidistribuidos y distribuidos basados en diferentes aproximaciones de la ecuación dinámica. Caso de estudio: sector norte de Chañar Ladeado (Santa Fe, llanura pampeana argentina)

Erik D. Zimmermann, Juan P. Rentería, Hernán Stenta y Gerardo Riccardi

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. Santa Fe. Argentina

Mail de contacto: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se comparan las salidas de dos modelos aplicados en un sistema hidrológico cercano a la localidad de Chañar Ladeado, en un área llana del sector occidental de la provincia de Santa Fe. El primero está basado en una aproximación de onda cinemática tanto para el tránsito mantiforme como el encauzado, con una discretización espacial semidistribuida en 12 segmentos. El segundo es un modelo hidrológico-hidráulico físicamente basado en esquemas de celdas, con aproximación de onda difusiva en todos los sectores del dominio espacial y distribuido espacialmente con tamaño de grilla de 100 m. La función de entrada que fue aplicada a cada modelo consistió en tormentas de diseño asociadas a recurrencias entre 2 y 1000 años. En todas las situaciones el modelo basado en el esquema cinemático sobrevaluó los caudales picos, en un rango entre 1,7 y 2,5 veces para la recurrencia extrema de 1000 años. Se concluye sobre la necesidad de modelar el escurrimiento superficial para sistemas de llanura con esquemas que contemplen la posibilidad de simular efectos de remanso y almacenamientos, caso contrario se evidencia que la sobreestimación de los caudales pico es muy significativa.

Palabras clave: modelación matemática hidrológica, sistemas de llanura, Chañar Ladeado.

ABSTRACT

The outputs of two models used in a hydrological system near the town of Chañar Ladeado in a flat area of the western of the Santa Fe province are compared. The first model is based on a kinematic wave approximation for both, overland and channel routing, with a semidistributed discretization in 12 segments. The second one is a hydrologic-hydraulic model physically based on cell schemes with diffusive wave approximation in all sectors of the spatial domain and spatially distributed grid size of 100 m. The input function for each model consisted of design storms associated with return times between 2 and 1000 years. In all cases the model based on kinematic scheme overvalued peak flow rates, ranging between 1.7 and 2.5 times for the recurrence of 1000 year. The conclusion was the need to model runoff for flatland systems with schemes that provide the possibility to simulate backwater effects and storages, otherwise it is shown that the overestimation of peak flows is highly significant.

Keywords: mathematical hydrological modelling, flatland systems, Chañar Ladeado town.

Introducción

Un gran número de modelos matemáticos hidrológicos, que operan en forma distribuida desde el punto de vista espacial, emplean la simplificación cinemática de la ecuación dinámica como modelo de tránsito mantiforme y encauzado. La extrapolación de este modelo de tránsito en paisajes típicos de llanura puede conllevar a distorsiones importantes en los hidrogramas de salida de los sistemas hidrológicos modelados.

La simplificación cinemática no contempla

efectos de remanso, almacenamientos ni atenuaciones de una onda de crecida. En zonas de llanura donde las pendientes son bajas estos efectos se hacen más marcados, principalmente en sistemas intervenidos por rutas y terraplenes, ante alcantarillas de insuficiente capacidad.

Consecuentemente, se ha desarrollado un sistema de modelación, basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original y actualmente, el sistema permite la simulación de

escurrimiento superficial multi-direccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a cuasi-dinámicas de la ecuación de momentum, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar efectos puntuales se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. El sistema se denominó CTSS8 (Riccardi, 2000).

Complementariamente se desarrolló una plataforma computacional para la gestión y el manejo de información que opera conjuntamente con el modelo de simulación de escurrimiento superficial CTSS8. La plataforma se constituyó con un entorno gráfico, con lo que se realiza de manera más práctica y sencilla todo lo relacionado con la entrada de datos al sistema y con la salida e interpretación de los resultados generados por el modelo, logrando además compatibilidad con otros programas basados en el mismo sistema operativo. Puede vincularse con Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite la agilización de transferencia de información desde y hacia los mismos. Esta plataforma se denominó SIMULACIONES versión 2.0 (Stenta et al., 2005) y permite la representación de mapas de alturas, velocidades y caudales en un dominio bidimensional.

A los fines de realizar un trabajo comparativo, se implementó el modelo de onda cinemática, incluido en el sistema de modelación hidrológica HEC-HMS (HEC, 2006), en un sistema representativo de áreas de la llanura pampeana santafesina, ubicado al oeste de la provincia de Santa Fe, al norte de la localidad de Chañar Ladeado.

El sistema hidrológico considerado no presenta embalses provocados por terraplenes, en consecuencia, para la comparación entre los esquemas cinemático y difusivo, se pretende analizar las distorsiones causadas por almacenamientos geomorfológicos exclusivamente.

Aplicación en la cuenca de estudio

La cuenca de aportes se caracteriza por un relieve plano, de escaso drenaje natural surcado por depresiones en donde se observan lagunas de pequeña magnitud (Fig. 1). El área puede subdividirse en dos subáreas con características morfológicamente diferenciadas: (a) el sector de cabecera de cuenca, cuya característica principal

es la baja pendiente (inferior a 0,4 m/km) y (b) el sector distal de la cuenca, con pendientes mayores (entre 2,8 a 7,6 m/km), con buen drenaje hacia la cañada de Las Totoras (Fig. 1).

La delimitación trazada para el estudio comprende el sector de cabecera al sur, con extensión hacia el NE, siendo la sección de cierre la descarga de la cañada en Las Totoras. Abarca un área del orden de las 2.350 Has. La pendiente media del sector es en la dirección SO-NE y del orden del 3,5 m/km. La extensión del canal principal es de 13 km (Zimmermann et al., 2004).

Se dispuso de mapas de curvas de nivel (IGN) de la zona de estudio en soporte papel, de mapas catastrales en soporte digital (sistema CAD), de imágenes satelitales LANDSAT y de información topográfica relevada durante las tareas de campaña que se realizaron. Toda esta información debió ser adecuada a una misma escala y ubicación geográfica de referencia.

Los mapas de curvas de nivel fueron escaneados, vectorizados y georeferenciados utilizando rutinas del SIG IDRISI[®]. Digitalizadas y referenciadas las curvas de nivel se construyó un modelo digital de terreno (DEM) utilizando las rutinas propias del SIG IDRISI[®].

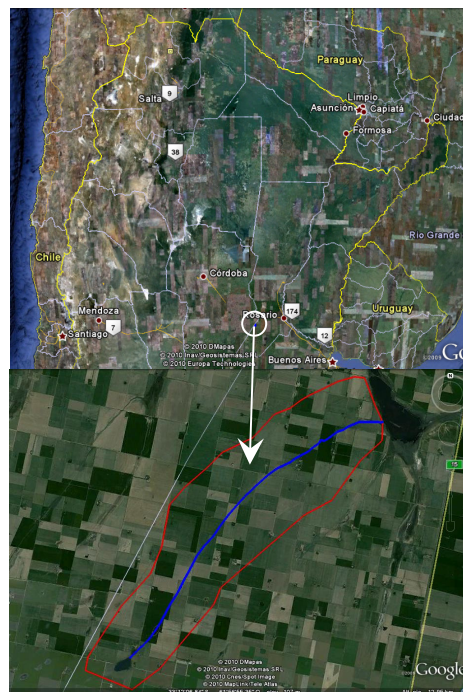


Fig. 1. Imagen de Google Earth[®] con ubicación y límites de cuenca

Estudio de precipitaciones

Para considerar la tormenta de diseño se partió de información pluviométrica recopilada por un productor ubicado al norte de la cuenca. Los registros, tomados diariamente, se extienden en un período de 40 años (1962-2002), para el cual se realizó un estudio probabilístico para duraciones de 24hs. Se contó también con planillas de información pluviométrica tomada por la Cooperativa de Agua Potable de Chañar Ladeado, con registros desde 1985 a la fecha.

Para las láminas pluviométricas se seleccionó la distribución de Pearson de tres parámetros dado que presentó la menor desviación entre muestra y población teórica. Los resultados del estudio estadístico se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Láminas pluviométricas para las recurrencias analizadas.

TR	2 años	5 años	10 años	50 años	100 años	1000 años
P (mm)	87.9	131	161.8	230.8	259.8	355

En Tabla 2 se muestran los hietogramas para recurrencias 2 y 1000 años.

Tabla 2. Hietogramas de diseño adoptados.

Tiempo (hs)	Hietograma 2 años (mm/h)	Hietograma 1000 años (mm/h)
1	0,71	2,87
2	0,77	3,12
3	0,85	3,43
4	0,95	3,82
5	1,07	4,31
6	1,23	4,98
7	1,46	5,92
8	1,82	7,35
9	2,44	9,84
10	3,79	15,31
11	9,39	37,92
12	44,14	178,26
13	5,36	21,63
14	2,96	11,94
15	2,08	8,40
16	1,62	6,55
17	1,34	5,40
18	1,14	4,62
19	1,00	4,05
20	0,89	3,61
21	0,81	3,27
22	0,74	2,99
23	0,68	2,76
24	0,66	2,66

La metodología empleada para la construcción de los hietogramas de diseño fue la de bloques alternos, con intervalos de una hora, utilizando las curvas Intensidad, Duración y Recurrencia de la estación meteorológica Rosario Aero para las recurrencias de diseño adoptadas.

Simulaciones con el modelo CTSS8

Se discretizaron los mapas con una resolución de 100 m por pixel. Con el DEM obtenido se trazaron los límites de la cuenca recortando las imágenes de acuerdo a sus límites. La Fig. 2 presenta el DEM obtenido superpuesto con las curvas de nivel, el plano catastral y los límites de la cuenca.

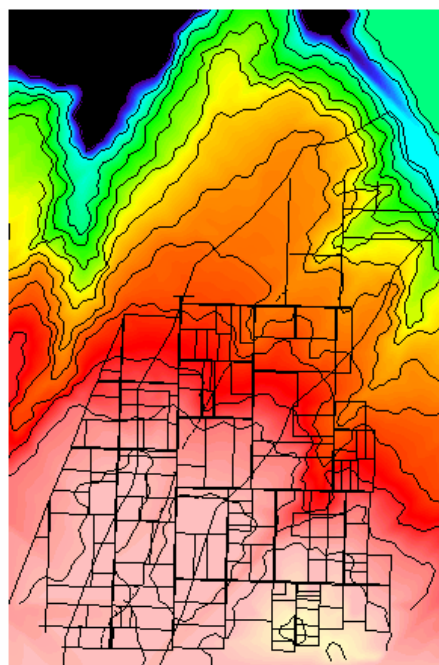


Fig. 2 . DEM junto a curvas de nivel y catastral.

La información procesada mediante SIG en formato "raster" sirvió de entrada para el modelo CTSS8. Para los fines de la simulación hidrológica-hidráulica la cuenca de aporte fue discretizada en una grilla de celdas de 100 m sobre la que se definió la topografía en base al DEM y las coberturas definidas mediante el análisis de las imágenes satelitales. Se tuvo en cuenta la red de avenamiento de la cuenca mediante la interpretación de imágenes satelitales y a las tareas de relevamiento in situ. Se estimaron coeficientes de rugosidad para el

cauce, utilizando la metodología propuesta por Chow (1959) para los canales. Se estimaron también los coeficientes de rugosidad para celdas no encauzadas.

Para esta aplicación, con propósitos de diseño hidráulico se empleó el método del US Soil Conservation Service. El número de curva (CN) se determinó para un suelo tipo C, de drenaje moderado a bajo, con distintas coberturas y diferentes grados de desarrollo vegetal para pendientes del terreno inferiores al 5%. La Fig. 3 muestra un mapa de números de curvas obtenido mediante clasificación de coberturas. Para identificar la zona cultivada se utilizó el índice verde normalizado (NDVI), asignándole un número de curva CN = 74 (píxeles verdes) y al suelo desnudo un CN = 70 (píxeles celestes). A los sectores bajos, cañadas y lagunas, se les asignó un CN = 86 (píxeles claros). En todos los casos se adoptó la condición de humedad antecedente intermedia (AMC II). Estos CN se utilizaron para cada unidad (celda) en que se discretizó la cuenca.



Fig. 3. Clasificación de números de curva CN

Se consideraron las celdas valle y río considerando la cañada principal y se importó el DEM elaborado mediante SIG (Fig. 4).

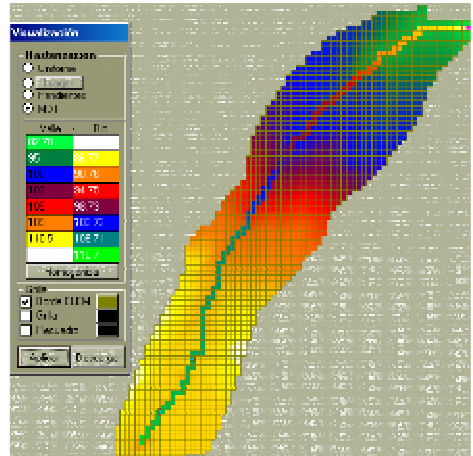


Fig. 4. DEM, discriminando celdas valle y celdas río.

La tecnología de representación permite tener una visión detallada de las áreas anegadas y de los sectores inundados más comprometidos. Pueden representarse mapas de alturas de anegamiento así como también perfiles longitudinales para una hora determinada del transcurso de la crecida.

Simulaciones con HEC-HMS

El modelo HEC-HMS del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., es un paquete integrado de programas de computación especialmente adaptado para estudios hidrológicos de cuencas y cálculos de la relación precipitación-escorrentía y operaciones hidrológicas, con varias opciones de traslados de crecientes en ríos y embalses (HEC, 2006).

La cuenca está representada como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos. Cada uno de los componentes modela un aspecto del proceso precipitación-escorrimento dentro de una porción de la cuenca referida como una subcuenca, las cuales se interconectan para representarla. Una adecuada combinación de funciones de transformación lluvia-caudal (P-Q) en la subcuenca y los componentes de propagación en el flujo encauzado pueden ser usadas para representar las complejidades de la cuenca. Entre las opciones disponibles como herramienta de transformación P-Q se encuentra el modelo de onda cinemática, que permite discretizar el sistema en un conjunto de planos de escurrimiento y canales de drenaje.

Se utilizan tres elementos conceptuales en conexión con el modelado de la onda cinemática: planos de flujo mantiforme, canales colectores y canal principal. Por las características de la simplificación en el modelo de tránsito cinemático, hay que prefiar el sentido de escurrimiento entre los componentes del sistema y los efectos de remanso o discontinuidades como resaltos, no son contemplados.

El sistema estudiado fue subdividido en 4 subcuencas, con sus respectivos planos laterales, y 4 tramos de conducción encauzada (Fig. 5). Para cada componente se adoptaron las mismas rugosidades que las adoptadas para el modelo CTSS8. Los valores de CN y rugosidades de cada subcuenca, se adoptaron promediando los valores obtenidos en las celdas que componen dichas subcuencas.

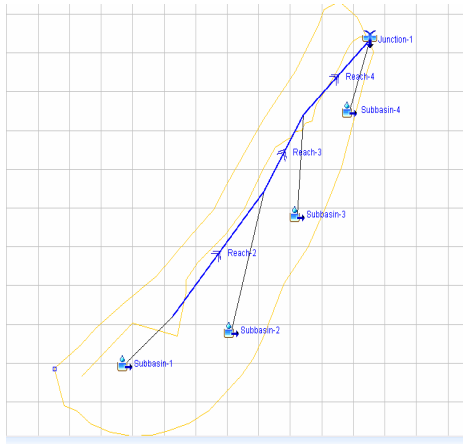


Fig. 5. Discretización adoptada para HEC-HMS

Comparaciones entre ambos modelos

Se compararon los hidrogramas resultantes para las precipitaciones de diseño extremas, es decir, de recurrencias 2 y 1000 años, respectivamente.

Para la primera recurrencia estudiada, las diferencias entre uno y otro modelo fueron significativas, en términos de caudales pico. El modelo cinemático computó $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el modelo de aproximación difusiva $8,2 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa casi la mitad (Fig. 6).

Las discretizaciones utilizadas han sido muy diferentes, y allí se manifiesta un problema de escalas de modelación, que puede ser compensado numéricamente. Rigurosamente, el efecto de escala debe compensarse para hacer

comparativas entre sí las simplificaciones adoptadas en los esquemas de propagación. La relación entre la longitud media del plano de cada subcuenca en el modelo cinemático (1000 m) y el tamaño de grilla del modelo de celdas (100 m) es aproximadamente de 10.

Stenta (2008) analizó el escurrimiento superficial bajo distintas discretizaciones en cuencas de llanura, utilizando el modelo de CTSS8. Llegó a la conclusión que para compensar el efecto de agregación debía incrementarse la rugosidad de Manning en las celdas valle. Para las cuencas de llanura que estudió y para una relación de tamaño de grilla de 10 se debió duplicar la rugosidad para compensar el efecto de agregación.

Duplicando las rugosidades en el modelo de onda cinemática se obtiene un hidrograma de salida compatible con el obtenido en el modelo CTSS8 (Fig. 6).

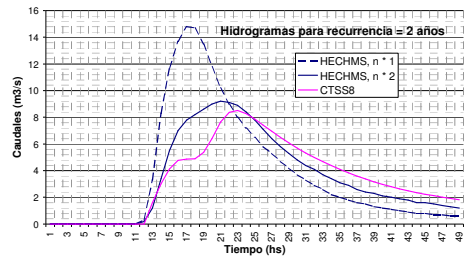


Fig. 6. Hidrogramas para ambos modelos (TR = 2 años)

Esta operación podría considerarse como una "calibración" del modelo de onda cinemática, donde las rugosidades dejan de tener un concepto físico y son consideradas como parámetros de ajuste. Puede observarse la similitud encontrada en los hidrogramas salientes del modelo de celdas y el de onda cinemática cuando se compensa el efecto de escala.

A pesar de esto y hacer comparables los hidrogramas para un tormenta de baja recurrencia, al considerar los hidrogramas para la recurrencia de 1000 años los desfases se tornan importantes nuevamente (Fig. 7).

Aún cuando no hay rutas o alcantarillas que provoquen almacenamientos concretos en los volúmenes de escurrimiento, es significativo el desfase entre los hidrogramas generados por el modelo de onda cinemática, en ambos casos, sin compensar las rugosidades y compensando el efecto de agregación.

Esto pone de manifiesto que, en paisajes de llanura, hay efectos de almacenamientos que se

dan en las celdas del valle que la simplificación cinemática no es capaz de simular y son de importante magnitud en los eventos de elevada recurrencia, aún cuando no existan retenciones provocadas por terraplenes y alcantarillas de poca capacidad.

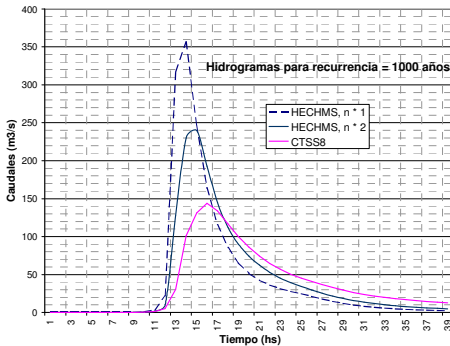


Fig. 7. Hidrogramas para ambos modelos (TR = 1000 años)

Como puede observarse en la Fig. 7, sin compensar el efecto de agregación la relación de caudales pico entre el modelo de onda cinemática y el modelo difusivo es de 2,5 aproximadamente, y compensando efectos de escala, la relación es de 1,67.

Conclusiones

Se comparan las salidas de dos modelos aplicados en un sistema hidrológico cercano a la localidad de Chañar Ladeado, en un área llana del sector occidental de la provincia de Santa Fe. El primero es un modelo hidrológico-hidráulico físicamente basado en esquemas de celdas, con aproximación de onda difusiva en todos los sectores del dominio espacial y distribuido espacialmente con tamaño de grilla de 100 m. El segundo está basado en una aproximación de onda cinemática tanto para el tránsito mantiforme como el encauzado, con un discretización espacial semidistribuida en 12 segmentos, bajo el entorno HEC-HMS.

La función de entrada que fue aplicada a cada modelo consistió en tormentas de diseño asociadas a recurrencias entre 2 y 1000 años.

Debido a los diferentes grados de discretización espacial, se ha compensando los efectos de las diferentes agregaciones aumentando convenientemente la rugosidad de la superficie. El criterio adoptado está acorde a investigaciones realizadas en la zona para analizar efectos de escala en modelos de escurrimiento superficial. Aún compensando

estos efectos el modelo basado en el esquema cinemático sobrevaluó los caudales picos, en un 70 % para la recurrencia extrema de 1000 años.

Se concluye sobre la necesidad de modelar el escurrimiento superficial para sistemas de llanura con esquemas que contemplen la posibilidad de similares efectos de remanso y almacenamientos, caso contrario se evidencia que la sobreestimación de los caudales pico es muy significativa. Debe aclararse que la simulación distribuida no reemplaza la información que brindaría un hidrograma aforado en la sección de estudio, pero ante su ausencia presenta una mejor opción.

Referencias Bibliográficas

- Cunge, J. 1975. Two dimensional modelling of flood plains. Cap. 17. *Unsteady flow in open channels* (Ed, Mahmood K, and Yevjevich V,) Water Resources Publications, Fort Collins.
- Chow VT. 1959. *Hidráulica de Canales Abiertos*. Edit Mc Graw-Hill. Mexico.
- Hydrologic Engineering Center .2006. HEC-HMS version 3.10 User's guide and utility manuals. *User's Manual*. U. S. Army Corps of Engineers. Davis, CA.
- Riccardi, G. .2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica casi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral*, FCEFyN, UNC, Córdoba.
- Stenta, H. R., Rentería, J. P. y Riccardi, G. .2005. Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XX Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. T 74. pp 1-13.
- Stenta, H. .2008.. Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura. *Tesis Doctoral*. FCEIyA, UNR, Rosario-Santa Fe.
- Zimmermann E, Magnaghi E, Rentería JP, Bosio M, Fernández G. .2004.. Saneamiento del área Norte de la localidad de Chañar Ladeado. Informe técnico. Departamento de Hidráulica. FCEIA. UNR. Inédito.