



Modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en zona de llanura y su utilización en sistema de alerta contra inundaciones en la Cuenca del A^o Ludueña

Hernán Stenta¹, Gerardo Riccardi^{1,2}, Erik Zimmermann^{1,3}, Pedro Basile¹, Carlos Scuderi^{1,3}, Juan Rentería¹ y Lucía Odicini¹

¹ Departamento de Hidráulica (EIC) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nac. de Rosario. Riobamba 245 bis (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina.

² CIC-CIUNR. Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

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

RESUMEN

Se presenta la metodología de implementación del modelo matemático VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009) en la cuenca del A^o Ludueña (Rosario, Santa Fe) y su explotación para el sistema de alerta contra inundaciones en dicha cuenca. Se realizó la explotación para una serie de eventos observados entre los meses de Noviembre-2008 hasta Marzo-2009. La precipitación total en la cuenca y los niveles de agua en diferentes puntos de la red de cursos se obtuvieron a partir de estaciones de aforos instaladas en la cuenca. Los resultados obtenidos en términos de variación temporal de niveles de agua en los principales cursos de la cuenca resultan satisfactorios. Se remarca la potencialidad de la utilización de modelos distribuidos en sistemas de alerta contra inundaciones en zonas de llanura con importantes alteraciones antrópicas como ser terraplenes, puentes, alcantarillas y canales artificiales.

Palabras clave: modelos distribuidos, zona de llanura, sistemas de alerta.

ABSTRACT

In this work, the methodology of implementation of VMMHH 1.0 mathematical model (Riccardi et al., 2009) in the basin of A^o Ludueña (Rosario, Santa Fe) is presented. The VMMHH 1.0 model exploitation's for flood forecasting was made. Operation was performed for events observed between November, 2008 and March-2009. The total precipitation and flow levels were obtained from gauging stations within the basin. The results indicated that the temporal variation of flow levels in the principal reaches is satisfactory. It evidences the importance of used distributed models applied to flood forecasting in lowland areas with anthropogenic disturbances such as embankments, bridges, culverts and artificial channels.

Keywords: distributed models, flatland basins, flood forecasting.

Introducción

Un modelo hidrológico es un ensamble de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico, la estructura y arquitectura de dicho modelo están determinadas por el objetivo para el cual el modelo es construido (Singh y Woolhiser, 2002).

El modelado hidrológico comenzó con el desarrollo de la ingeniería civil en el siglo XIX para el diseño de caminos, canales, servicios a ciudades, sistemas de drenaje, puentes, etc. El origen del modelado puede remontarse al desarrollo del método racional (Mulvany, 1850) y un modelo de "evento" para relacionar caudal pico a intensidad de la lluvia (Imbeau, 1892).

El período entre los años 1960 a 1975 puede ser visto como la era del "modelado hidrológico", en el cual numerosos desarrollos han ocurrido en la ciencia hidrológica debido al reconocimiento de las deficiencias de los viejos métodos de análisis y a la creciente disponibilidad de computadoras digitales. Los modelos hidrológicos desarrollados en esa época estaban principalmente orientados a predecir cantidades tales como volúmenes y caudales, en la sección de control o en subcuencas. La mayoría de los modelos eran de parámetros concentrados o en el mejor de los casos tenían en cuenta en forma muy grosera la variabilidad espacial de procesos y características de las cuencas. Entre los años 1985 y 1990 se incrementó el énfasis en la

necesidad de predecir variables hidrológicas distribuidas a resoluciones de detalle. Puede ser denominada como la era del “modelado espacial”. Los datos de elevación digital y el sensoriamiento remoto de las características de la cuenca (por ejemplo, cobertura de vegetación) son vistos como datos de entrada esenciales para la nueva generación de modelos hidrológicos y de calidad de agua (Moore et al., 1991).

Una de las aplicaciones actuales de mayor importancia respecto a la modelación matemática del escurrimiento superficial lo constituye la implementación en sistemas de alerta temprana contra inundaciones. La posibilidad de predecir las variaciones de niveles de agua, los niveles máximos, las permanencias de agua y las potenciales áreas afectadas ante un proceso de crecida en diferentes sectores dentro de una cuenca hidrográfica resulta hoy día de suma utilidad, teniendo como finalidad primordial la de proteger la vida de los habitantes de las zonas vulnerables y poner en acción una serie de medidas tales como planes de contingencia, entre otras.

En este contexto, el presente trabajo está orientado a la descripción metodológica para la implementación, calibración y validación y explotación de un modelo matemático físicamente basado cuasi-2D, hidrológico-hidráulico para una serie de tormentas ocurridas entre los meses de Noviembre de 2008 y Marzo de 2009. El modelo matemático se utilizará para el sistema de alerta temprana contra inundaciones en la cuenca del A° Ludueña (Santa Fe, Argentina).

Descripción del Modelo Matemático

En el presente estudio se utilizó el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). El sistema surge de la fusión del modelo matemático CTSS8 (Riccardi, 2000) y de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional 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. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se

plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow et al., 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación.

Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma, las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

El modelo conceptual utilizado por el sistema VMMHH 1.0 parametriza la variabilidad de la morfología del terreno dentro de la celda considerando una sección triangular con un punto bajo central y pendientes laterales. La sección transversal efectiva de almacenamiento y conducción es, entonces, representada por una aproximación triangular dentro de cada celda.

La ventaja fundamental de este modelo con aproximación de onda difusiva y simulación del flujo cuasi-bidimensional frente a otros modelos de tipo cinemático, está relacionada con la posibilidad de transmitir información en cualquier dirección del dominio bidimensional. Esto hace que no se deban prefiar los sentidos de escurrimiento y especificar los funcionamientos hidráulicos de elementos (por ejemplos embalses) pudiendo el modelo discernir en cada paso de tiempo las direcciones del escurrimiento superficial de acuerdo a los gradientes hidráulicos (Riccardi, 2005). El modelo se implementó mediante la utilización de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005) que permite la interacción gráfica y visual para el ingreso de información y visualización de resultados.

Descripción de la Cuenca del A° Ludueña

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O (Fig. 1) perteneciendo a la provincia de Santa Fe (Argentina) engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km² y una pendiente media de 1,4 por mil. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Funes-Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La cuenca presenta un grado importante de intervención antrópica (tendido de una densa red de vías de comunicación y canales artificiales, entre otros).

En la cuenca se presentan, en la parte alta de la misma, suelos bien drenados, de permeabilidad moderada a moderadamente lenta, no susceptibles a anegamiento y aptos para la agricultura (del tipo argiudoles vérticos) y en la parte central y norte (zona deprimida), se presentan suelos con drenaje insuficiente y afectados por las fluctuaciones de la napa freática (asociación de argiudoles vérticos y natracualfes típicos) (INTA, 1990). La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente el cultivo de soja y en menor medida el maíz y el trigo.

Implementación, calibración y explotación del Modelo Matemático

Implementación del modelo matemático en la cuenca del A° Ludueña

Generación del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la georreferenciación y vectorización de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y puntos relevados en campo. El tratamiento de la información comprendió:

a) Escaneo de cartas: Se realizó el escaneo de todas las cartas originales del Instituto Geográfico Nacional que involucra la cuenca en estudio. Se escanearon un total de 8 cartas.

b) Georreferenciación de las cartas escaneadas. El procedimiento llevado a cabo consistió en asignar coordenadas a puntos de las cartas topográficas, valiéndose de coordenadas conocidas de los mismos puntos,

denominados puntos de control. El sistema de proyección plana empleado fue el Gauss-Krüger (GK) - faja 5 Argentina Posgar 94, Datum WGS 84.

c) Importación de las cartas georreferenciadas en sistema CAD: desde un sistema CAD fueron importados los archivos de las imágenes georreferenciadas. Seguidamente se superpusieron las cartas georreferenciadas con los planos digitales del parcelario verificando en la construcción del mosaico que el error observado fuera aceptable, a los efectos del uso para el modelo matemático se consideró un error en planimetría tolerable de 50 m.

d) Vectorización de las curvas de nivel: mediante polilíneas se graficaron cada una de las curvas de nivel y posteriormente se le asignó el valor de cota. Las coordenadas de los puntos de la polilínea y la propiedad elevación (cota) se imprimieron en archivos ASCII mediante la utilización del algoritmo Puntos3d.dvb (Rentería, 2003). Se definieron aproximadamente 90000 puntos que conforman las curvas de nivel de las 8 cartas topográficas trabajadas. El archivo de texto obtenido constituye el MDT con dominio espacial irregular.

e) Incorporación de puntos individuales: a los efectos de mejorar la representación del MDT se incorporaron una serie de puntos de relevamientos topográficos de detalle en diferentes sectores de la cuenca. Asimismo, se densificaron los datos en aquellas zonas de relieve plano. Se admitió una variación lineal entre cotas de dos curvas de nivel sucesivas ya que no se conoce la variación real y la información de partida no puede resolver dicho nivel de detalle. Incluidos los puntos individuales de coordenadas (x,y) y elevación conocida (z), el MDT quedó conformado por aproximadamente 96000 puntos con coordenadas X,Y,Z georreferenciadas.

f) Generación de modelo digital del terreno regular: se utilizó un programa de tratamiento de datos topográficos que incluye algoritmos de interpolación. En este caso se empleó el algoritmo de interpolación de Kriging. La base de datos equiespaciada cada 250 metros permite definir el modelo digital del terreno que será utilizado por el modelo matemático hidrológico-hidráulico de la cuenca. De esta forma el dominio espacial de la cuenca ha quedado definido por aproximadamente 12000 puntos equiespaciados. El MDT generado se cargó utilizando la plataforma Simulaciones 2.0 como primer paso para la constitución del modelo.

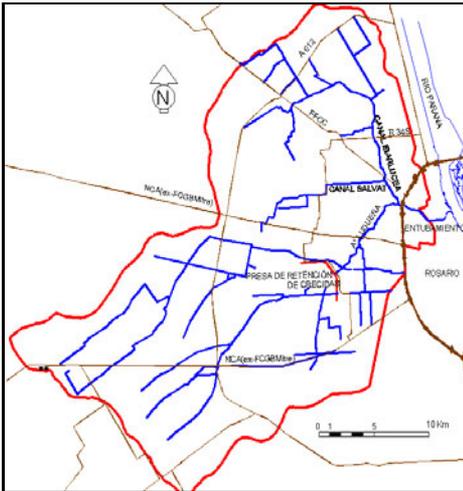


Fig. 1. Cuenca del A° Ludueña

g) Delimitación de la cuenca: una vez generado el modelo digital del terreno para el tamaño de grilla 250, se procede a la delimitación de la cuenca. Esta delimitación se realiza en base a los datos de las curvas de nivel, es decir, por medio de la divisoria de aguas topográfica y contemplando en los casos que así lo requieran los posibles límites físicos que generan terraplenes carreteros y ferroviarios. Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del A° Ludueña con el Río Paraná.

Modelación de la red hídrica

a) Recopilación de información: para la definición de las características de los cursos se contó con información de relevamientos topográficos y recorridos de campaña.

b) Definición de cursos: se definieron las trazas georreferenciadas de los cursos. Dichas trazas, en formato (DXF), se importaron en la plataforma visual Simulaciones 2.0 y se definieron las celdas ríos en el modelo matemático. Cada celda río posee las siguientes características: base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada celda. Se definieron un total de 1479 elementos río, generando una extensión de 370 Km de cursos.

Modelación del trazado vial y ferroviario

a) Recopilación de información: para la definición de las características de los terraplenes carreteros y ferroviarios se contó con información de relevamientos topográficos

y con información de diferentes organismos públicos.

b) Definición de terraplenes: al igual que en la red de cursos, para los terraplenes se definieron las trazas, georreferenciadas, y se importaron en la plataforma. Luego se definieron las características siguientes: cota de coronamiento y coeficiente de descarga. El coeficiente de descarga representa al terraplén funcionando como vertedero en una situación de desborde. Se definieron un total de 845 vinculaciones tipo terraplén, generando una extensión de 220 Km.

Modelación de alcantarillas y puentes

a) Recopilación de información: la información relacionada a las características de las alcantarillas se obtuvo a partir de los relevamientos topográficos.

b) Definición de alcantarillas y puentes: identificadas, mediante su ubicación planimétrica, se importaron a la plataforma las diferentes alcantarillas y puentes. Se definieron las siguientes características: ancho, coeficiente de descarga, cota de fondo y altura. Previendo la situación de desborde del terraplén, se definió la cota del coronamiento del mismo y el coeficiente de descarga correspondiente. Se ingresaron un total de 62 alcantarillas y 10 puentes en toda la cuenca.

El modelo se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 250 m de lado (Fig. 2) lo que se representa mediante 11855 celdas (10376 celdas valle y 1479 celdas río) y 23345 vinculaciones entre celdas (845 tipo terraplenes, 10 puentes, 62 alcantarillas, 1426 entre celdas río, 18481 entre celdas valle y 2521 entre celdas valle y río).

Condiciones de borde, condiciones iniciales y entradas del modelo

Para cada simulación se definieron siguientes condiciones de borde, iniciales y entradas al modelo: a) alturas de agua en todas las celdas del modelo: se obtuvo a partir de considerar la situación de caudal en los cursos principales al inicio de cada tormenta, b) lluvia neta en cada celda: corresponde a las diferentes tormentas simuladas en base a los registros de lluvias totales obtenidos mediante las estaciones pluviográficas, condiciones de humedad antecedentes y características del tipo y cobertura del suelo. Se utilizó el método de Green y Ampt para computar las pérdidas, c) condiciones de borde aguas abajo: asociada a la cota del Río Paraná en la fecha de cada tormenta imponiendo una curva tipo altura-tiempo.

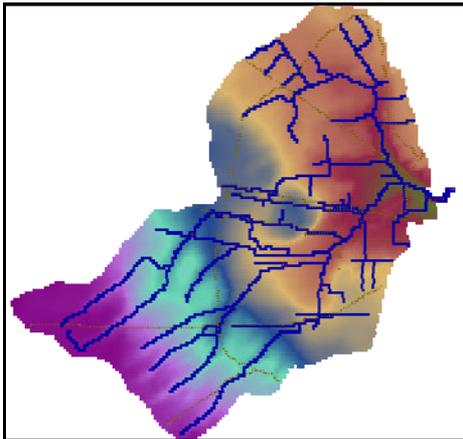


Fig. 2. Modelo de la Cuenca del A° Ludueña.

Calibración y validación del modelo

El modelo fue utilizado con los parámetros calibrados y validados en simulaciones realizadas en trabajos antecedentes. Se emplearon los parámetros asociados a las funciones de almacenamiento y conducción en celdas, de resistencia al escurrimiento en cursos y en planicies de inundación y los coeficientes de descarga en puentes y alcantarillas obtenidos por medio de calibraciones realizadas para tormentas de los años 1994, 1996 y 2007 (Riccardi, 2007, Stenta, 2008). Los coeficientes y parámetros resultantes son: Coeficiente de rugosidad en cursos: 0.028 – 0.033, Coeficiente de rugosidad en planicies (valles): 0.08 – 0.10, Coeficiente de descarga en alcantarillas y puentes: 0.75 – 0.85, Coeficiente de desborde de terraplenes: 0.2, características de la sección de conducción y almacenamiento dentro de la celda: Sección triangular, inclinación: 0.019 V: 1 H. (Stenta, 2008).

Explotación del Modelo para los eventos ocurridos en el verano 2008-2009

A partir de los registros de los sensores pluviográficos instalados en la cuenca del A° Ludueña (4 sensores) se contó con información de lluvia total en 5 eventos ocurridos entre los meses de Noviembre 2008 – Marzo 2009. Para obtener el hietograma de lluvia neto, que es una de las variables de entrada al modelo, se utiliza el método de Green y Ampt.

Para ello es necesario conocer dos parámetros asociados al tipo de suelo, a su historia previa de humedad y a las propiedades físico-químicas del mismo, estas características son contempladas a través del grado de

saturación efectiva inicial del suelo S_e , obtenido en función del Índice de Precipitación Antecedente IPA (Zimmermann et al., 2009) y del coeficiente de permeabilidad vertical saturada K_v (Zimmermann et al., 2008). Los valores de K_v y S_e se obtuvieron en forma distribuida en la cuenca a partir de la definición de los diferentes tipos de suelos (INTA, 1990) la definición de las asociaciones de suelos y su posterior digitalización y georreferenciación. La vinculación entre la información distribuida espacialmente de asociaciones de suelos y su asignación a las celdas del modelo matemático se realizó mediante la utilización de un sistema de información geográfica.

En la Tabla 1 se muestran las características de las tormentas simuladas, valores de lluvia total y lluvia neta media.

Tabla 1. Características de las tormentas.

Fecha	Prec. Total Media (mm)	Prec. Neta Media (mm)
29-30/11/08	50,3	10,1
02-03/02/09	74,1	13,3
10-11/02/09	66,3	14,3
20-22/02/09	72,6	11,5
03-04/03/09	88,5	18,5

A modo de ejemplo se muestran (Figs. 3 a 7) los limnigramas observados y calculados en dos secciones características de la cuenca: Presa de retención de crecidas y Embocadura (sector urbano de Rosario) para las tormentas simuladas. Asimismo se grafica el hietograma neto medio en la cuenca.

Se observa un adecuado ajuste para ambas secciones, en las tormentas del 30/11/08, 02/02/09, 10/02/02/09 y 03/03/09. Resultados similares se encuentran para la sección del A° Ludueña en el puente de Av. de Circunvalación (sector peri-urbano de la ciudad de Rosario). Para la tormenta del 20/02/09 se registraron diferencias entre los valores observados y calculados para las alturas de agua (Fig. 6).

En la cuenca se cuenta con un total de 11 sensores de registros de alturas de agua. El modelo permite obtener los valores en cada una de dichas secciones donde se ubican los sensores. Los resultados obtenidos muestran diferencias entre los valores observados y calculados del orden de ± 0.30 m. Los mayores errores registrados son de aproximadamente 0.50 m en sensores ubicados en la parte media y alta de la cuenca, en sectores rurales. En las

secciones de mayor relevancia, respecto a los impactos en sectores poblados ante posibles desbordes, se registraron resultados sumamente adecuados, como los presentados en las Figs. 3, 4, 5 y 7.

Análisis de resultados

Teniendo en consideración que existen incertidumbres de los registros de los limnómetros motivados por fallas, oscilaciones, ausencias de sensor, no es posible establecer conclusiones certeras respecto a las diferencias halladas entre los resultados de las simulaciones realizadas en la reproducción de cada evento para todos los sensores instalados en la cuenca.

No obstante puede afirmarse que, en el estado de avance del desarrollo del modelo de pronósticos, se logra una aceptable aproximación a los valores máximos de niveles de agua registrados en lo que respecta a las estaciones limnimétricas de: a) Presa de Retención de Crecidas, b) Ludueña Puente de Avda. Circunvalación y c) Ludueña en Embocadura.

Gómez (2000) indica que para lluvias muy intensas y abundantes con un período de retorno relativamente alto, el contenido de humedad inicial del suelo así como su distribución espacial no es un parámetro con un peso fundamental en la respuesta hidrológica de la cuenca, por el contrario, para las precipitaciones moderadas, la humedad antecedente y la forma en que ésta se distribuye dentro de la cuenca es un factor fundamental de entre los que controlan la generación de escorrentía (Gómez, 2000). Para las tormentas ocurridas en el período en estudio, que pueden ser consideradas como tormentas de poca magnitud se remarca la importancia y el impacto que tienen las condiciones iniciales en la respuesta de la cuenca, lo que se traduce en una mayor incertidumbre a la hora de obtener el hietograma de lluvia total.

Las diferencias encontradas en la respuesta de la tormenta del 20/02/09 (Fig. 6) en términos de limnigramas pueden ser atribuibles a la determinación de la lluvia neta en función de las consideraciones realizadas para cuantificar las pérdidas de escurrimiento. Estudios que actualmente se están llevando a cabo indican que modificaciones en la consideración de las pérdidas mejoran los resultados en los limnigramas simulados.

Por el contrario, las tormentas de larga duración y de importante lámina caída generan menores incertidumbres a la hora del evaluar la

lluvia neta. En este sentido, se simuló la lluvia ocurrida en marzo de 2007 (en el cual precipitaron 365 mm en toda la cuenca en 5 días con 100 mm caídos el quinto día). Los resultados fueron sumamente satisfactorios en términos de limnigramas en las secciones de mayor relevancia.

La curva de descenso o recesión, en forma general, puede ser considerada independiente de las variaciones de la intensidad de la lluvia y de las infiltraciones, y depende en gran medida de las características físicas de la red hidrográfica y del volumen de agua retenido en la cuenca (Orsolini et al., 2001). Se observó un adecuado ajuste en la representación de la curva de recesión de los limnigramas en las diferentes tormentas y en las estaciones que se contó con registro, lo que indica una representación matemática de la red hidrográfica y del relieve de la cuenca consistente según los registros obtenidos y los resultados de las simulaciones.

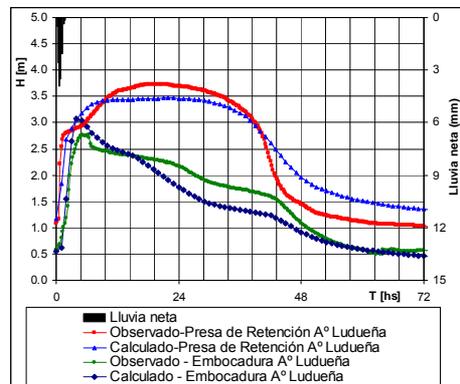


Fig. 3. Tormenta del 30/11/08.

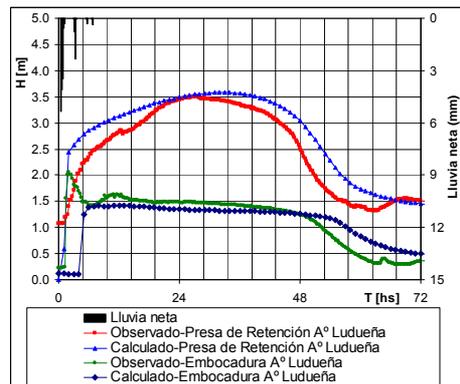


Fig. 4. Tormenta del 02/02/09.

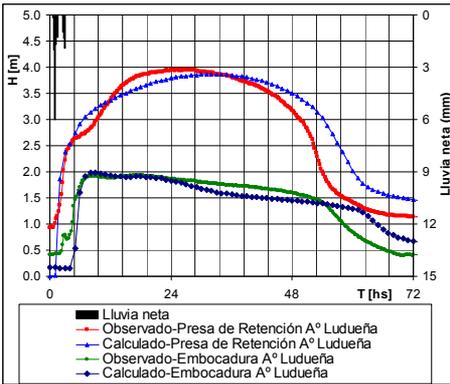


Fig. 5. Tormenta del 10/02/09.

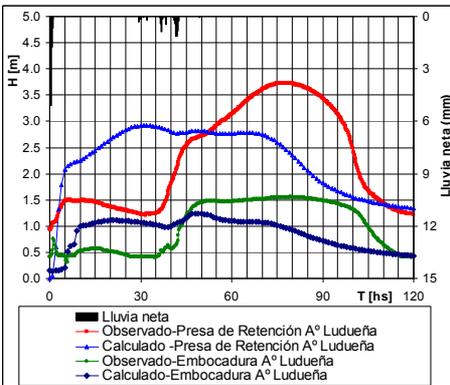


Fig. 6. Tormenta del 20/02/09.

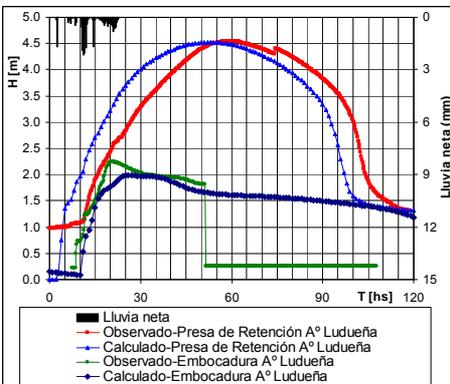


Fig. 7. Tormenta del 03/03/09.

Conclusiones

Considerando el nivel de avance del modelo matemático, implementado a partir de Noviembre de 2008 se remarca el importante grado de ajuste o reproducción de los niveles

máximos de agua en secciones de relevancia de la cuenca del A° Ludueña. En la actualidad se continúa trabajando en el mejoramiento y desarrollo del modelo.

Resulta de interés remarcar el grado de información brindada por modelos matemáticos distribuidos de alto nivel de detalle como el implementado en la cuenca del A° Ludueña en el marco del sistema de alerta contra inundaciones. Es posible obtener valores de alturas, caudales y velocidades en todo el dominio de la cuenca. Por el contrario se requiere una mayor dedicación en lo que respecta al ingreso de información para la constitución del mismo y para la calibración. A su vez, superada esta etapa se potencian los beneficios.

Se indica la importancia de avanzar en lo que respecta a la descripción y cuantificación de las pérdidas de escurrimiento, principalmente respecto a las pérdidas iniciales y al proceso de infiltración, ya que tienen un importante impacto en la respuesta de la cuenca. Por el contrario, en lo que se refiere a las pérdidas asociadas al almacenamiento superficial, el modelo, debido al alto nivel de detalle en su distribución espacial reproduce los sectores bajos en forma explícita por medio del modelo digital del terreno.

A fin de reducir las incertidumbres respecto a la cuantificación de las pérdidas iniciales se está trabajando en el tratamiento de imágenes satelitales para determinar en forma distribuida el tipo de cobertura del suelo. El análisis de gabinete de las imágenes satelitales se encuentra correlacionado con el seguimiento de campos testigos, mediante reconocimiento del tipo de cobertura, características del cultivo y/o suelo.

Se resalta la importancia de contar con registros continuos y confiables tanto de las variables de ingreso al modelo como ser la precipitación total como de las variables que representan las respuestas del sistema, es decir, los niveles de agua en diferentes puntos de la cuenca. Las variables antes mencionadas permiten avanzar en la descripción del fenómeno de transformación lluvia-caudal y de traslado del escurrimiento superficial. De manera directa, lo descrito anteriormente se encuentra relacionado a la necesidad de mantenimiento de la red telemétrica, tanto desde el punto de vista físico como de calibración de los sensores.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la ANPCYT y al MASPOMA (SF) por el apoyo mediante PICTO 23187 y Convenio MASPOMA-FCEIYA, UNR.

Referencias

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, V. T., Maidment, D. R. y Ways, L.M. 1994. *Hidrología Aplicada*. Mac Graw-Hill, Bogotá. 554 p

Gómez Plaza, A. 2000. Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica. *Tesis Doctoral. Departamento de Proyectos y Planificación Rural. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes*.

Imbeau, M. E. 1892. La Durance: Regime, crues et inundations. *Ann. Ponts Chaussees*, Mem. Doc., Ser., 3(1), 5–18 (in French).

INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Tomo II. Proyecto PNUD Argentina 85/019. 677 pag. ISBN 950-432964-2

Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. 5(1): 3-30.

Mulvaney, T. J. 1850. On the use of self-registering rain and flood gauges. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 4(2), 1-8.

Orsolini, H., Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. 2001. *Hidrología. Procesos y Métodos*. UNR Editora. 185 p.

Rentería J. P. 2003. Soporte para digitalización de curvas de nivel en cuencas regionales. *Trabajo de adscripción*. Cátedra Hidrología e Hidráulica Aplicada, Carrera de Ing. Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. U.N.R.

Riccardi, G. 2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para

ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba*.

Riccardi, G. 2005. Modelación Matemática de Flujos a Superficie Libre. *Curso de Maestría en Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Fac. de Cs. Exactas, Ing. y Agrim. UNR

Riccardi, G. 2007. Reporte Técnico sobre inundaciones ocurridas en la semana del 26 al 31 de Marzo de 2007. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. Abril de 2007. 12 pag.

Riccardi G., Zimmermann E., Mancinelli A., Scuderi C., Basile P., Rentería J., Garcia P. 2009. Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. *Informe de Avance 4*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCEIYA. UNR.

Singh, V. P. y Woolhiser, D. A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 7, No. 4. pp 270-292.

Stenta, H., Rentería, J. P. y Riccardi, G. 2005. Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. 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. Trabajo Inédito. *Tesis Doctoral. FCEIYA, UNR, Rosario-Santa Fe*.

Zimmermann, E. D., Scuderi, C. M., Riccardi, G. A., Stenta, H. R., Basile, P. A., García, M. L. y Rentería, J. P. 2008. Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia, Sept 2008, 10 p.

Zimmermann, E. D., Basile, P. A., López, C., Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C. y Rentería, J. P. 2009. Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut, Argentina, 11 p.