

IMPLEMENTACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DISTRIBUIDO DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL PARA SU UTILIZACIÓN EN SISTEMA DE ALERTA CONTRA INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL A° LUDUEÑA.

Hernán Stenta⁽¹⁾, Gerardo Riccardi⁽²⁾, Erik Zimmermann⁽²⁾, Pedro Basile⁽²⁾, Carlos Scuderi⁽²⁾, Juan Pablo Rentería⁽²⁾, Soledad Mendez Zacarías⁽²⁾

(1) Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones. Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Prov. de Santa Fe.

(2) Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCElyA. Universidad Nacional de Rosario.

Montevideo 970 (2000) Rosario, Argentina.-Telefax: +54+341-4721167 – e-mail: hstenta@santafe.gov.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la descripción metodológica para la implementación y explotación del modelo matemático distribuido, físicamente basado CTSS8 (Riccardi, 2000) con alto grado de detalle en la cuenca del A° Ludueña (Rosario,SF) en el contexto de su utilización en el sistema de alerta contra inundaciones. Se utilizó información de macro-topografía a partir del escaneo, georreferenciación y digitalización de cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar, complementándose con información de relevamiento de campo provisto por el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (MASPyMA) de la Provincia de Santa Fe. Se definieron las características de los terraplenes (carreteros y ferroviarios) de mayor importancia respecto a su interferencia al escurrimiento superficial a partir de recopilación de información en entidades oficiales y de relevamientos de campo. Conjuntamente se definieron las correspondientes obras de arte (alcantarillas y puentes) en los cruces de los canales con dichos terraplenes. Se definieron un total de 220 km de terraplenes; 10 puentes y 62 alcantarillas. Se definió la red de drenaje y sus características a partir de reconocimiento en campo de los principales cursos y de relevamientos provistos por el MASPyMA. Se definió una red de cursos de 370 km. A partir de la implementación y calibración del modelo matemático se realizó la explotación para una serie de eventos observados entre los meses de Noviembre de 2008 a Marzo de 2009. Los registros de precipitación y de niveles son obtenidos a partir de la red telemétrica instalada en la cuenca. Se obtuvieron resultados satisfactorios para el presente nivel de avance (en términos de niveles de agua) en los principales cursos de la cuenca. Es de destacar que la operación del modelo comenzó a mediados del año 2008, contándose sólo con los eventos ocurridos entre Noviembre 2008 a Marzo 2009. Se concluye que resulta indispensable contar con mayor cantidad de eventos registrados de modo de realizar un continuo mejoramiento de la descripción de la respuesta de la cuenca mediante modelación matemática y se remarca la potencialidad de los modelos distribuidos orientados a su utilización en sistemas de alerta.

Palabras Clave: modelos distribuidos; sistemas de alerta, escurrimiento superficial.

INTRODUCCION

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. Esto condujo al uso de métodos numéricos en hidrología y en el modelado hidrológico. 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. Durante esta época se produjo un rápido desarrollo de descripciones matemáticas de muchos procesos hidrológicos individuales, tales como el escurrimiento superficial, flujo en canales, infiltración, evaporación, intercepción, flujo sub-superficial y almacenamiento en depresiones, que fueron incorporados a modelos hidrológicos. 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 (Moore et al., 1991).

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 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). El desarrollo de nuevos modelos o el mejoramiento de modelos existentes continúa hoy en día.

El conocimiento y descripción del proceso de generación y traslado del escurrimiento superficial en una determinada región es de suma importancia. El mismo está directamente vinculado, por ejemplo, a la generación de inundaciones, pudiendo afectar por lo tanto vidas humanas; además el conocimiento de este proceso es sumamente útil a la hora de plantear el manejo integral a nivel de cuenca y, en el caso puntual del presente trabajo resulta sumamente útil para su utilización en un sistema de alerta contra inundaciones.

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 2009 y Marzo de 2009. El modelo matemático se utilizará para el sistema de alerta temprana contra inundaciones en la cuenca del A° Ludueña (SF, Argentina)

DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS

El presente trabajo se desarrolló en conjunto con personal técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (Prov. de Santa Fe) y el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

En el desarrollo del trabajo se realiza una breve descripción del modelo matemático utilizado; posteriormente se describen en detalle los pasos metodológicos llevados a cabo para la constitución del modelo matemático distribuido en la cuenca del A° Ludueña; se realiza la calibración y validación del modelo y se resumen los resultados alcanzados mediante la utilización del modelo matemático en una serie de eventos ocurridos en el verano 2008-2009. El trabajo constituye un primer nivel de avance en la implementación del modelo matemático para su utilización en el sistema de alerta contra inundaciones en la cuenca del A° Ludueña.

Descripción del Modelo Matemático

En el presente estudio se utilizó el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional denominado CTSS8 (Riccardi, 2000). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, et al, 1995 y Riccardi, 1997 y 2002). Actualmente, 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.

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 fijar 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).

Horrit y Bates (2001) utilizan el modelo Lisflood-FP, basado en esquemas de celdas y aproximación de onda difusiva con intercambio de caudal entre celdas en sentido unidimensional. En su trabajo, los autores concluyen que este tipo de aproximación resulta computacionalmente más simple y arroja resultados muy similares a los obtenidos con una discretización en diferencias finitas más compleja de la ecuación de onda difusiva. Se remarca la importancia de esta conclusión debido a que ambos modelos (CTSS8 y Lisflood-FP) tienen la misma aproximación para la descripción de la propagación del flujo; por lo que se asume que el modelo utilizado resulta suficientemente adecuado para los fines del presente trabajo, en su capacidad de reproducir los procesos involucrados en la propagación del flujo superficial.

El modelo CTSS8 es operado desde la plataforma computacional SIMULACIONES 2.0 (Stenta et al., 2005) desarrollada en entorno de Windows; la plataforma facilita el ingreso y definición de datos al modelo y el análisis e interpretación de los 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 (Figura 1); perteneciendo a la provincia de Santa Fe, República Argentina; engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 800 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, sea mediante trazado de canales sobre cursos existentes, trasvasamiento de aportes hacia cuencas vecinas o tendido de una densa red de vías de comunicación.

El balance medio anual se caracteriza por una precipitación anual de 967 mm, una evapotranspiración de 923 mm con un excedente de 43,8 mm. El caudal base del arroyo es de 0,50 m³/s, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m³/s y en extraordinarias (R > 50 años) caudales superiores a 400 m³/s. (Riccardi et al., 2002).

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

La información básica para la implementación del modelo matemático en la cuenca del A° Ludueña se obtuvo principalmente de relevamientos realizados por el MASPpyMA. Asimismo se contó con información recopilada en distintos organismos oficiales.

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 IGM, puntos relevados en campo y curvas de nivel digitalizadas del IGM. El tratamiento de la información comprendió:

a) Escaneo de Cartas: Se realizó el escaneo de todas las cartas originales del Instituto Geográfico Militar que involucra la cuenca en estudio. Se escanearon un total de 8 cartas. Figura 2.

b) Georreferenciación de las cartas escaneadas: Se utilizó un programa específico de tratamiento de imágenes. 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 (en formato jpg). 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 hidrológico-hidráulico se consideró un error en planimetría tolerable de 50 m. En la verificación se emplearon como “puntos de control” cruces de rutas, cruces de caminos, cruces ferroviarios, como así también cruces de obras viales y ferroviarias con cursos de agua.

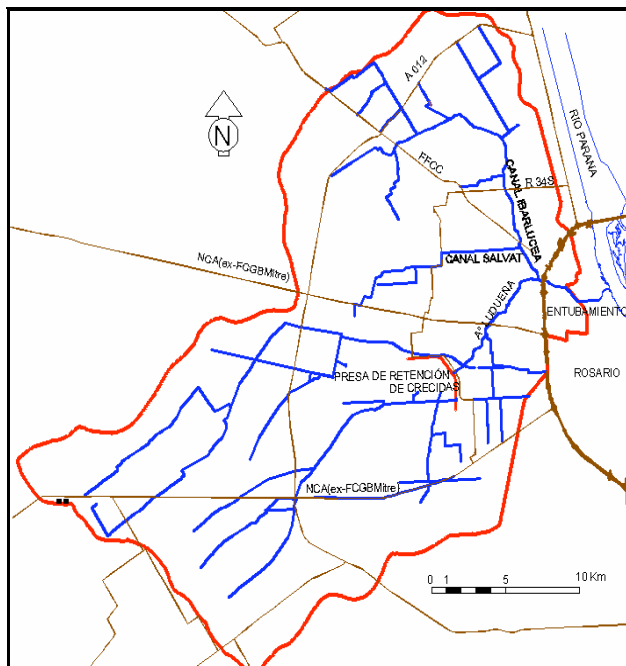


Figura 1. Cuenca del A° Ludueña

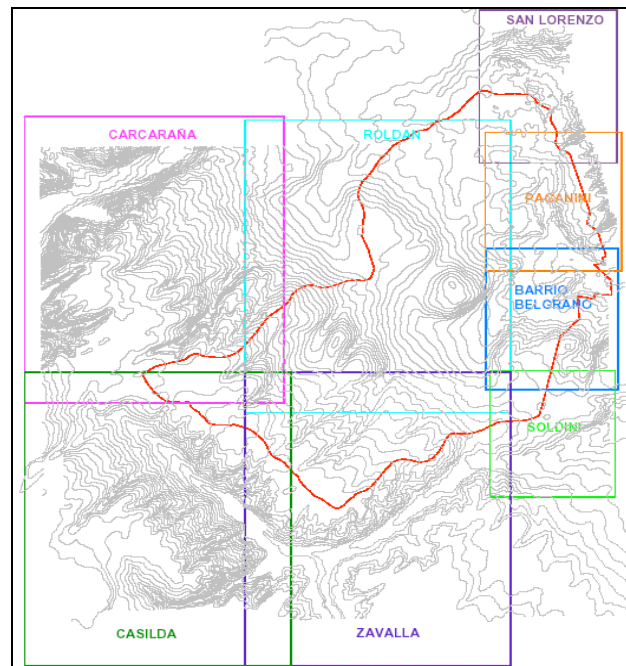


Figura 2. Cartas topográficas del IGM. A° Ludueña

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. La vectorización se realizó con un software de diseño asistido por computadora (CAD) ya que el entorno de estos programas resulta más ágil que la misma aplicación de un sistema de información geográfico (SIG). Las coordenadas de los puntos de la polilínea y la propiedad elevación (cota) se imprimieron en archivos ASCII con el soporte computacional para vectorización de curvas de nivel Puntos3d.dvb (Rentería, 2003) que opera bajo el sistema CAD. 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. La densificación en sectores planos del terreno se realizó con la doble finalidad de evitar posibles errores a la hora de la utilización del algoritmo de interpolación debido a la falta de datos y para generar un modelo digital del terreno de alto nivel de detalle donde la resolución máxima esté definida por la distancia menor entre curvas de nivel representadas en los mapas. 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: Para la creación del modelo digital del terreno en una base regular (cuadrangular), 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.

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. De esta forma se procede a “recortar” la cuenca a partir del modelo digital del terreno generado. Se consideró como sección de control de la cuenca la confluencia 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 realizados por MASPpyMA y recorridas de campaña por todos los distritos incluidos parcial o totalmente en el sistema hídrico del arroyo Ludueña.

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 cargaron 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 realizados por el MASPpyMA y por información de diferentes organismos públicos (Plan Circunvalar Rosario; Dirección Nacional de Vialidad, Dirección Provincial de Vialidad).

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 realizados por el MASPpyMA.

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 (coincidente con la cota de calzada del terraplén carretero o la cota de riel en los terraplenes ferroviarios) 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 (Figura 3); 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 registrados por 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 (Tabla 1).

Tabla 1. Alturas Hidrométricas y Cotas IGM desembocadura A° Ludueña

Fecha	Hidrómetro Rosario	Cota IGM Desembocadura A° Ludueña
30/11/08	3.29	6.58
02/02/09	2.04	5.33
10/02/09	1.73	5.02
20/02/09	1.92	5.21
03/03/09	2.23	5.52

Tormentas simuladas y obtención de la Lluvia Neta

A partir de los registros de los sensores pluviográficos instalados en la cuenca del A° Ludueña se contó con información de lluvia total en 5 eventos ocurridos en 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 Se (obtenido en función del Índice de Precipitación Antecedente IPA) y del coeficiente de permeabilidad vertical saturada Kv. Los valores de Kv y Se se obtuvieron en forma distribuida en la cuenca mediante la definición de los diferentes tipos de suelos a partir de las cartas de suelos del INTA (INTA, 1979, 1983 y 1988). Figura 4.

En la Tabla 2 se muestran las características de las tormentas simuladas; valores de lluvia total y lluvia neta media.

Tabla 2. Características de las tormentas

Fecha	PRECIPITACIÓN TOTAL					PRECIPITACION NETA
	Media (mm)	Roldán (mm)	Ibar. (mm)	Pérez (mm)	Zavalla (mm)	Media (mm)
29-30/11/08	50.3	6.8	31.5	75.3	51.0	10.1
02-03/02/09	74.1	56.8	37.8	95.0	102.3	13.3
10-11/02/09	66.3	59.5	54.3	88.8	69.8	14.3
20-22/02/09	72.6	65.5	64.8	61.8	87.0	11.5
03-04/03/09	88.5	84.5	86.3	97	88.8	18.5

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 (Stenta, 2008; Riccardi, 2007). Los coeficientes y parametros resultantes son: Coeficiente de rugosidad en cursos: 0.03 – 0.035; Coeficiente de rugosidad en planicies (valles): 0.08 – 0.11; Coeficiente de descarga en alcantarillas y puentes: 0.8 – 0.9; 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)

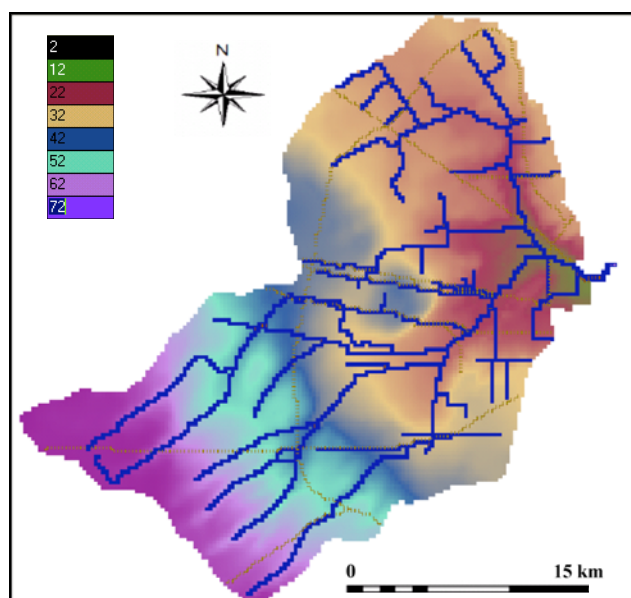


Figura 3. Modelo de la Cuenca del A° Ludueña.

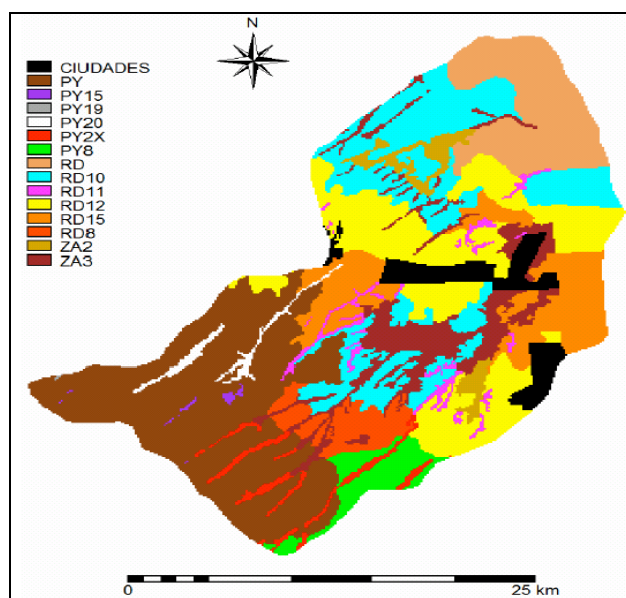


Figura 4. Mapas de suelos (asociaciones). Cuenca del A° Ludueña.

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

Una vez generado el modelo y obtenido los valores de lluvia neta se procedió a la explotación del mismo para las diferentes tormentas.

A modo de ejemplo se muestran (Figuras 5 a 9) 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 (Figura 8).

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 ante posibles desbordes, se registraron resultados sumamente adecuados, como los presentados en las Figuras 5, 6, 7 y 9.

Se observó, en forma general, que en cada tormenta la mitad de los sensores limnimétricos no funcionaron adecuadamente registrando valores incoherentes o no registrando valores (Figura 7: Limnigrama Observado en Embocadura), es decir, las mayores dificultades encontradas en las diferentes tormentas registradas y simuladas se presentaron respecto al comportamiento de los sensores limnimétricos; lo que dificulta la tarea de comparación de resultados y ajuste del modelo matemático.

ANALISIS DE RESULTADOS

Teniendo en consideración que existen incertidumbres de los registros de los limnímetros motivados por fallas, oscilaciones inadmisibles, 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:

- Presa de Retención de Crecidas
- Ludueña Puente de Avda. Circunvalación
- Ludueña en Embocadura

Para lluvias muy intensas y abundantes con un periodo de retorno relativamente alto, el contenido de humedad inicial del suelo así como su distribución espacial no es un parámetro a considerar en la respuesta hidrológica de las cuencas estudiadas; 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 esorrentía (Gómez, 2000)

En función de lo anterior; 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 (Figura 8) en términos de limnigramas pueden ser atribuibles a la extracción 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 lamina caída generan menores incertidumbres a la hora de 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.

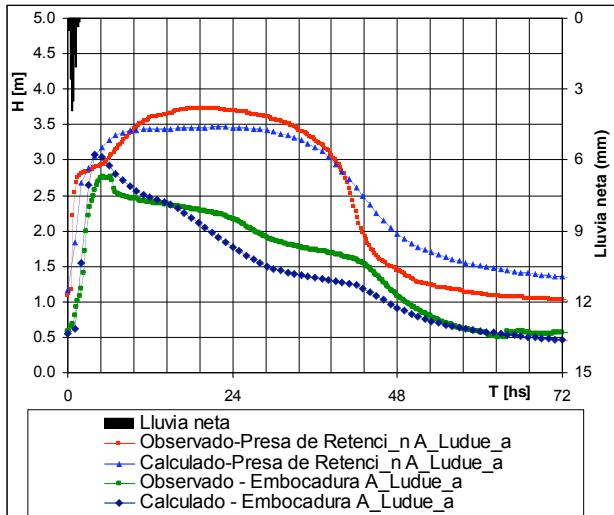


Figura 5. Tormenta 30/11/08.

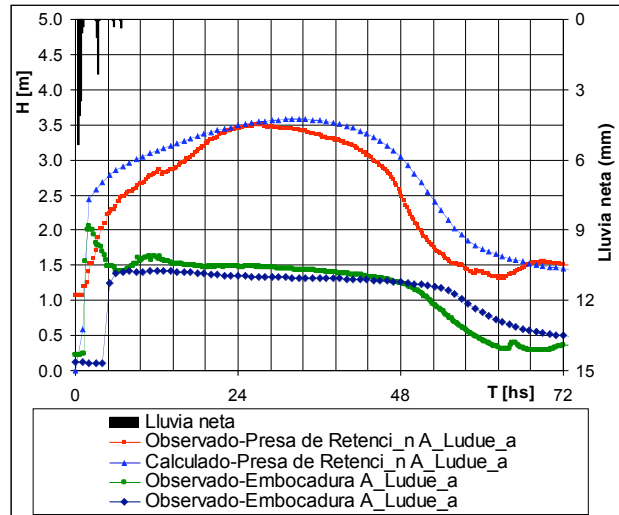


Figura 6. Tormenta 02/02/09.

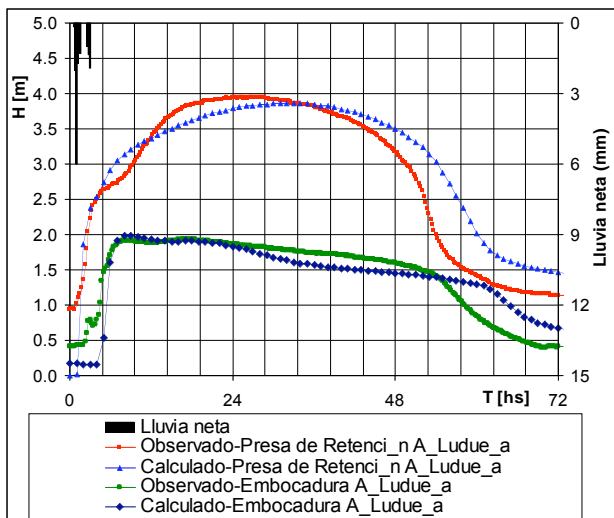


Figura 7. Tormenta 10/02/09.

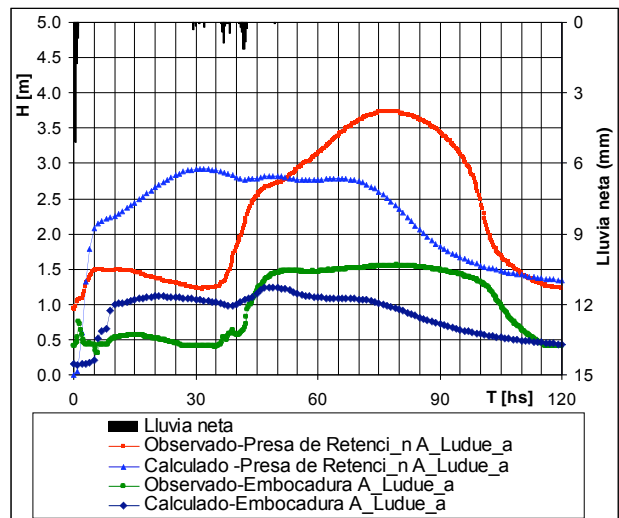


Figura 8. Tormenta 20/02/09.

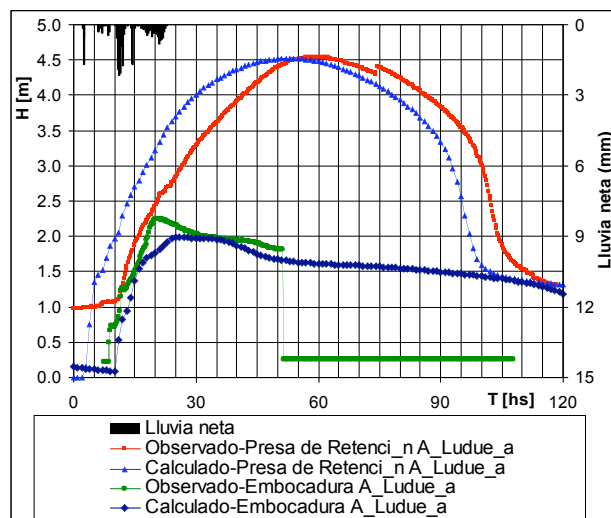


Figura 9. Tormenta 03/03/09.

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).

En función de lo anterior, 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.

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. 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, etc.

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.

BIBLIOGRAFIA

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
- Departamento de Hidráulica (DH)** (2005), *Informe Final Plan Director de Desagües Pluviales ciudad de San Lorenzo*, FCEIA; UNR, Rosario.
- 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
- Horrit, M. S. y Bates, P. D.** (2001) “*Predicting floodplain inundation: Raster-based modeling versus the finite element approach*”. *Hydrolog. Process.*, 15, 825-842.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1979)**. *Carta De Suelos De La República Argentina. Hoja 3360-19. Casilda*. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1983)**. *Carta De Suelos De La República Argentina. Hoja 3360-20 y 21.Arroyo Seco-San Nicolás de los Arroyos*. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1988)**. *Carta De Suelos De La República Argentina. Hoja 3360-13 y 14.Cañada de Gomez - Rosario*. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Argentina
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (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.
- 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.; E. Zimmermann, y R. Maurig** (1995). “*Mathematical Modelling of flood for the delimitation of zones with inundation risk*”. International Symposium on Runoff Computations for Water Projects, IAHS, San Petesburgo.
- Riccardi, G.** (1997). “*The mathematical modelling for the delimitation of inundation risk zones*”. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815, Wallingford, pp.127-136.
- Riccardi, G.** (2000) *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba.
- Riccardi, G.; Scuderi, C. y Stenta, H.** (2002) “*Modelado de Escurrimiento Superficial con Alto Nivel de Detalle en la Cuenca del Arroyo Ludueña. Santa Fe. Argentina.*” XIX Congreso Nacional del Agua. Villa Carlos Paz, Argentina. CD ROM ISBN 987-20378-1-7. Cap. Hidrología Superficial y Subterránea.T33. pp. 1-10.
- 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.
- Stenta, H.; 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 III° 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.