

El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe, Argentina

**Gerardo A. Riccardi⁽¹⁾⁽²⁾, Erik D. Zimmermann⁽¹⁾⁽³⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾⁽³⁾,
Hernan R. Stenta⁽⁴⁾, Carlos M. Scuderi⁽⁴⁾, Marina L. Garcia⁽⁴⁾ y
Juan P. Rentería⁽⁵⁾**

*(1) Profesor Adjunto, (2) Investigador CIC-CIUNR, (3) Investigador CONICET,
(4) Becario Doctoral CONICET, (5) Docente Investigador
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina.
riccardi@fceia.unr.edu.ar*

Resumen: Se describe la implementación de una herramienta tecnológica de modelación matemática de escurrimiento superficial cuyo objetivo fue lograr su aptitud para la simulación de eventos de crecidas históricas y la simulación a tiempo real en vistas a su futura utilización en sistemas de alerta hidrológico contra inundaciones. Asimismo fue objetivo el promover la integración de tecnologías de sistemas de información geográfica con modelos matemáticos de escurrimiento superficial para la gestión de la información de entrada y salida de los modelos. El modelo matemático hidrológico-hidráulico físicamente basado fue implementado en las cuencas de los arroyos Ludueña (693 km²), Saladillo (3144 km²) y Cañada de Gómez (266 km²) en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. La comparación entre hidrogramas y limnigramas observados y calculados determinan diferencias máximas no superiores al 15% y las diferencias establecidas en los tiempos de retardo observados y computados fueron inferiores al 10%. Estas diferencias han sido consideradas aceptables. En la cuenca donde el modelo fue empleado como herramienta de predicción a tiempo real el modelo ha mostrado una aceptable capacidad de pronóstico.

Palabras clave: Escurrimiento superficial, modelación matemática, hidrología.

INTRODUCCIÓN

El control y aprovechamiento de los recursos hídricos en general y la seguridad ante inundaciones de un territorio en particular, es un tema que preocupa, con diferentes grados de intensidad, a la población, a los profesionales involucrados en tal sector y a las autoridades responsables de la toma de decisiones.

En la región del sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) con un clima subtropical y lluvia media anual cercana a los 1000 mm, se presentan sistemas hidrológicos de llanura en los cuales los excedentes hídricos superficiales se vinculan directamente a la generación de inundaciones, por lo que el avance en el conocimiento de

la descripción del escurrimiento superficial es de vital importancia como aporte a la planificación regional integral de los recursos hídricos. Por otra parte, el análisis dinámico de las perturbaciones antrópicas que inciden sobre los sistemas hidrológicos demanda herramientas de simulación para diagnóstico, pronóstico, reproducción de eventos históricos y planificación que permitan introducir alteraciones como cambios en el uso y ocupación de la tierra, cobertura, canalizaciones, etc. desde un nivel de detalle de parcela rural.

Lamentablemente en nuestra región la conjunción total o parcial de factores como: presentación de lluvias intensas máximas y en caso extremas, escasa planificación del control de los excedentes hídricos superficiales, obras proyectadas parcialmente construidas, desconocimiento de las respuestas hidrológicas actuales de los sistemas hídricos, falta de toma sistemática de datos hidrológicos, inexistencia de sistemas de alerta hidrológico ante inundaciones, ausencia de planificación de uso agrícola del suelo, existencia parcial de medidas no estructurales de zonificación de planicies de inundación, entre las más relevantes, han hecho adquirir a eventos lluviosos las características de catástrofes con pérdidas de vidas humanas y materiales. Se han producido a través de los años alteraciones en el ambiente hidrológico producidas mayormente por acciones del hombre, como aumento de la impermeabilidad de las cuencas por usos agrícolas, canalizaciones clandestinas y/o no planificadas, y otras alteraciones como evidencias de cambios de régimen de precipitaciones, aumento y/o fluctuaciones de las napas subterráneas, que han dado como resultado global un aumento en la generación de escurrimiento superficial.

Estas modificaciones de las respuestas hidrológicas de los sistemas hídricos deben ser claramente descriptas y cuantificadas y en este aspecto se encuadra específicamente este proyecto. En este sentido se ha implementado en las cuencas de los arroyos Ludueña (693 km²), Saladillo (3144 km²) y Cañada de Gómez (226 km²) un modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado, que ha permitido describir la respuesta hidrológica por evento de las cuencas en término de caudales, alturas de agua y velocidades de flujo con el menor margen de error posible, tanto en la salida o sección de control de la cuenca como en puntos característicos dentro de la misma.

OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es el desarrollo de herramientas apropiadas de modelación matemática hidrológica-hidráulica físicamente basadas, para la descripción y simulación de generación, movimiento y almacenamiento de excedentes hídricos superficiales en sistemas hidrológicos de llanura, orientados a su utilización en descripción y análisis de crecidas históricas y simulación a tiempo real. Además constituyen objetivos del proyecto propuesto:

- generar herramientas tecnológicas (o mejoramiento de las existentes) para la reproducción del fenómeno y su aplicación para el mejoramiento de la interacción entre el hombre y el subsistema hídrico;

- dotar a las herramientas existentes con capacidad de simulación de crecidas históricas, de capacidad para la simulación a tiempo real en vistas a su futura utilización en sistemas de alerta hidrológico contra inundaciones;
- promover la integración de tecnologías de sistemas de información geográfica con modelos matemáticos de escurrimiento superficial para la gestión de la información de entrada y salida de los modelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Modelo de Simulación Hidrológica-Hidráulica

Se ha partido de un modelo ya desarrollado, objetivando la capacidad de simular con mayor nivel de detalle para mejorar la determinación de parámetros de flujo en todo punto del dominio espacio-temporal de cálculo. Fue prioridad lograr la aptitud del modelo para su uso como herramienta de descripción de escurrimiento de crecidas históricas y además lograr que su estructura, velocidad de cálculo, pre y post procesamiento de información de entrada/salida y confiabilidad sea compatible con su posible utilización en simulación de escurrimiento a tiempo real.

El modelo matemático empleado, CTSS8, está basado en esquemas de celdas como los propuestos por Cunge (1975). En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original (Riccardi, 2000). Actualmente, el sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos.

El proceso de precipitación puede ser representada variable en cada unidad de discretización espacial lo que permite el uso de la distribución resultante de cualquier algoritmo de distribución espacial de precipitaciones.

La intercepción en follaje puede ser considerada en cada celda del dominio espacial como: (a) constante en el tiempo, expresada en milímetros de lámina de precipitación o (b) variable en el tiempo en función de una ecuación de balance de agua en cobertura vegetal (Rutter et al., 1971) que relaciona la precipitación, el almacenamiento en cobertura, el drenaje desde la cobertura y la tasa de evaporación potencial. Para la utilización de este último método deben definirse la capacidad de almacenamiento de la cobertura (mm), la relación entre la superficie de intercepción y la superficie de la celda, la evaporación potencial (mm), en tanto que el drenaje de la cobertura hacia el suelo puede ser computado mediante una ecuación de decaimiento donde deben definirse la tasa de drenaje y el parámetro de decaimiento exponencial.

Las pérdidas de escurrimiento pueden ser estimadas en base a: (a) el bien conocido método de CN (USSCS, 1975) y (b) por el también conocido método de Green & Ampt (GA) (Green y Ampt, 1911; Rawls et al., 1983). Asimismo como mejoramiento en el método de GA se ha incorporado el algoritmo de Green y Ampt con Redistribución (GAR) (Ogden y Saghafian, 1997; Muñoz-Carpena y Gowdish, 2005) que permite

contemplar, la redistribución del perfil de humedad del suelo en los hiatos de lluvia presentes en una tormenta, con la consiguiente recuperación de la tasa de infiltración. Para el empleo del método de GA o GAR deben especificarse en cada unidad espacial los siguientes parámetros del suelo: la porosidad, la humedad inicial, la humedad de saturación, la permeabilidad hidráulica saturada y el potencial de succión.

El almacenamiento superficial es descrito por el modelo mediante la propia descripción del modelo digital del terreno y en los casos en que esto no sea posible, especialmente en discretizaciones gruesas donde el paisaje suele ser suavizado para reproducir la morfología general del terreno, puede ser introducido como volumen disponible en cada celda. En el caso de utilización del método de número de curva CN tanto la intercepción en cobertura como el almacenamiento superficial son calculados mediante la abstracción de pérdida inicial del método.

El escurrimiento resultante, puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de cantidad de movimiento, 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 (Riccardi et al., 2002).

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 de tipo valle o tipo río; la diferencia fundamental entre ambos tipos está relacionada con la forma de almacenamiento y conducción del flujo dentro de dicha celda representativa del dominio. De esta forma la cuenca resulta constituida en celdas que representan las áreas tributarias a los cursos de agua (celdas valle) y celdas que constituyen los cursos de agua (celdas río). Los parámetros hidráulicos a definir en cada vinculación entre celda son el coeficiente de resistencia de Manning y el coeficiente de pérdida de energía o el coeficiente de gasto en el caso de alcantarillas, puentes y terraplenes, según corresponda.

Habida cuenta que la observación sistemática del escurrimiento superficial desde celdas tributarias en zonas de llanura ha evidenciado que, para una satisfactoria representación aproximada de la dinámica propagatoria del flujo no encausado, es necesario representar de la mejor manera posible en compatibilidad con la información disponible los procesos de conducción y almacenamiento en las celdas tributarias, el modelo permite un tratamiento singular para considerar estos mecanismos.

Tratamiento de la conducción y almacenamiento en celdas valle: el escurrimiento transitando por celdas tributarias de una cuenca de llanura puede asemejarse a un flujo mantiforme con pocos centímetros de tirante. Asimismo, puede verificarse mediante la observación del mecanismo hidráulico que dicho flujo no forma una lámina completa en

toda una celda, sino que se estructura mayormente en pequeños hilos de escurrimiento, surcos (muy relevante si se trata de áreas de cultivos) y pequeñas zanjas que se van interconectando a medida que aumenta el caudal y conectando a su vez eventuales depresiones aisladas. Este mecanismo está fuertemente vinculado al microrelieve presente en la superficie. Un perfil esquemático del terreno natural se representa en la Figura 1a. Solamente en el caso de que el escurrimiento tenga un tirante relativamente importante (por encima de toda irregularidad del terreno y vegetación presente en la celda), el ancho completo de la sección transversal estará disponible para el almacenamiento y la conducción del flujo. El modelo conceptual utilizado por el modelo hidrológico-hidráulico CTSS8 para la geometría de almacenamiento y conducción es el que se representa en la Figura 1b. La sección transversal efectiva de almacenamiento y conducción es representada por una aproximación triangular o trapezoidal de ancho inferior An_{\min} , en la que la pendiente transversal es el parámetro geométrico ITA, ambos parámetros definen la altura máxima, h_{\lim} . Si la altura de agua en la celda supera el valor máximo h_{\lim} , el ancho ocupado en la sección es el ancho de la celda. En este tipo de celdas es necesario definir la resistencia al escurrimiento en el valle, el ancho mínimo (An_{\min}) y la pendiente lateral (ITA).

Conducción y almacenamiento en celdas de cursos de agua: en las celdas de cursos de agua el modelo permite la adopción de secciones transversales de tipo triangular, rectangulares o trapezoidales. Esta sección se ubica en el centro de la celda y el valle al igual que en el caso anterior puede contener pendientes laterales (Figura 1c). En este caso deben definirse las dimensiones geométricas del curso (ancho de la base de fondo (BF); taludes laterales y profundidad), la pendiente lateral del valle (ITA) y la resistencia al escurrimiento en el curso y en el valle.

Gestión de Datos del Modelo: en la gestión de datos de entrada y parámetros del modelo como para la gestión de resultados (alturas, caudales y velocidades) se utilizó la plataforma de análisis en entorno gráfico SIMULACIONES (Stenta et al., 2005), diseñada especialmente como herramienta de gestión de datos de entrada y salida del modelo. La plataforma permite el intercambio de información desde y hacia sistemas de información geográfica y otros sistemas de representación digital. Actualmente el modelo permite hasta la definición de 55000 elementos cuadrangulares para poder ser operado en computadoras del tipo PC o portátiles.

Las cuencas en estudio

Las cuencas donde se ha aplicado el modelo son las correspondientes a las de los arroyos Ludueña y Saladillo y la cuenca de la Cañada de Gómez. Dichos cursos de agua se ubican en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. Los dos primeros cursos de agua son afluentes del río Paraná en tanto que el restante es un afluente del río Carcarañá (este a su vez también es afluente del río Paraná). Las cuencas presentan características de sistemas hídricos de llanura con una precipitación media anual de 950-1000 mm anuales distribuida mayormente entre los meses de octubre a abril.

Cuenca del Arroyo Ludueña: la red de cursos permanentes (cursos naturales y canales) es de aproximadamente 110 km., el área en estudio es de 693 km² con una pendiente media del cursos principal del 1.33 ‰. La pendiente local media en el valle es del orden del 2.7 ‰. 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.

Cuenca del Arroyo Saladillo: posee aproximadamente 3144 km² de extensión superficial. La longitud del curso principal de es más de 145 km, totalizando entre todos los cursos permanentes una longitud de 380 km. Los caudales para lluvias de recurrencias ordinarias están en el rango de 200-300 m³/s, en tanto que para R = 50 años el caudal esperable es del orden de 1200 m³/s. El arroyo Saladillo recorre la provincia de oeste-sudoeste a este-noreste, su pendiente media es de 0.6 m/km, verificándose en ciertos sectores pendientes de hasta 10 m/km.

Cuenca de la Cañada de Gómez: posee aproximadamente 266 km² de extensión superficial. La longitud del curso principal es de 25 km, totalizando entre todos los cursos permanentes una longitud de mas de 90 km. Los caudales para lluvias de recurrencias ordinarias están en el rango de 100-130 m³/s, en tanto que para R = 50 años el caudal esperable es del orden de 500 m³/s. La pendiente media del curso principal es de 2.1 m/km.

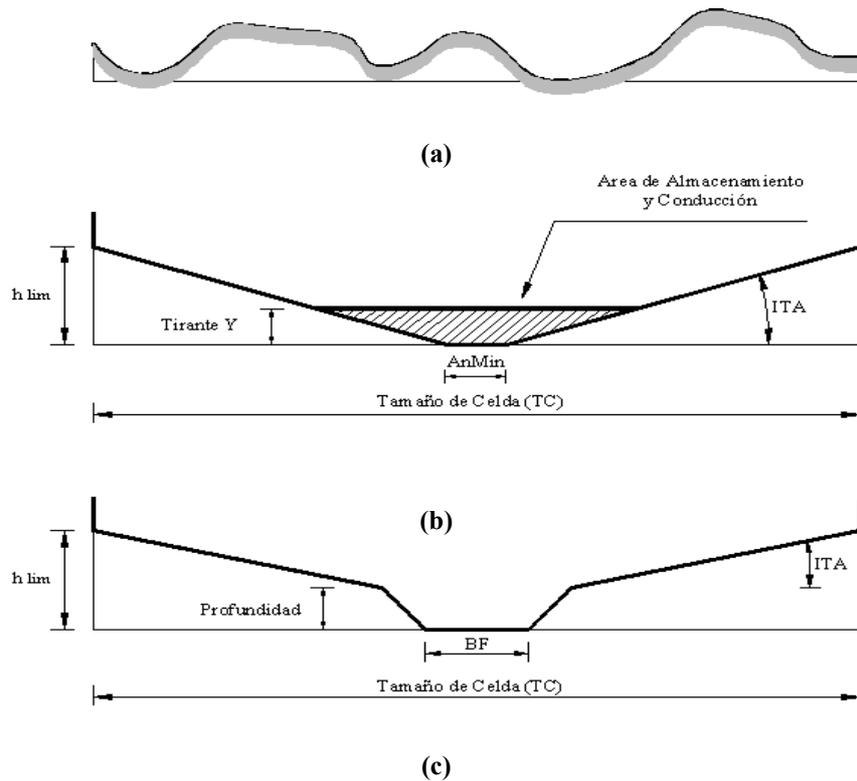


Fig. 1. Geometría del almacenamiento y la conducción en celdas. (a) Perfil natural esquemático; (b) Geometría perfil celdas valle y (c) Geometría perfil celdas del curso.

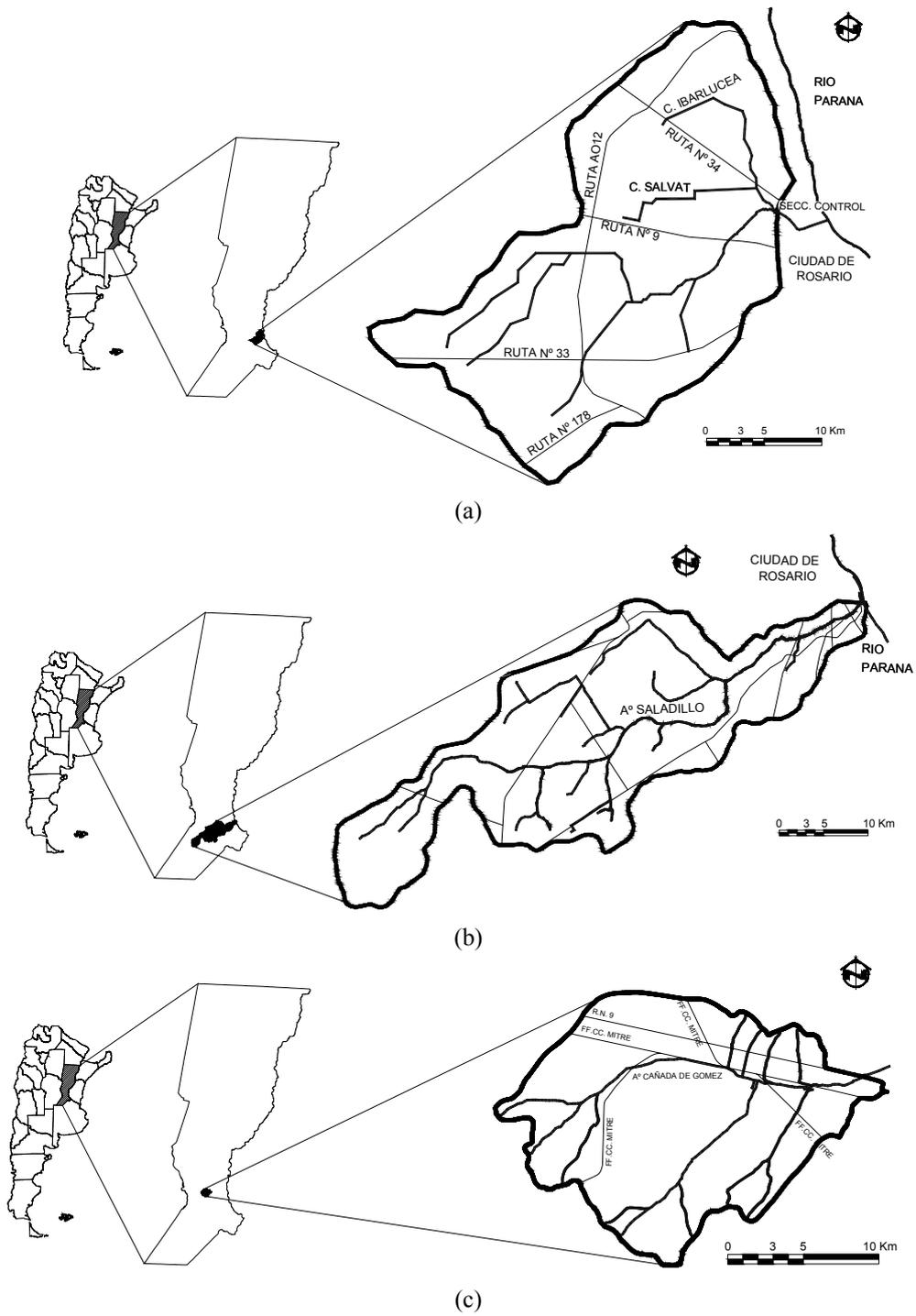


Fig. 2. Cuencas en estudio. (a) Arroyo Ludueña; (b) Arroyo Saladillo; (c) Cañada de Gómez

En la Tabla 1 se presentan una síntesis de las características físicas de las cuencas con influencia directa en la respuesta hidrológica. En la Figura 2 se presentan las planimetrías indicativas de las cuencas.

Tabla 1. Características Físicas Arroyos Ludueña, Saladillo y Cañada de Gómez

	Arroyo Ludueña	Arroyo Saladillo	Cañada de Gómez
Área A (km ²)	693	3144	266
Perímetro P (km)	135	352	74
Diferencia de Cota máxima curso principal ΔZ_{CP} (m)	43	83	49
Diferencia de Cota máxima valle ΔZ_{VALLE} (m)	55	97	55
Longitud de cursos permanentes L_C (km)	110	380	91
Longitud de curso principal L_{CP} (km)	32	145	25
Pendiente media curso principal S_{0CP} (‰)	1.33	0.57	2.1
Índice de Compacidad $I_c = P / (2 * (\pi A)^{0.5})$ (adim)	1.45	6.734	1.28
Densidad de Drenaje $D_d = L_C / A$ (km/km ²)	0.16	0.12	0.34
Índice de Rugosidad ΔZ valle x D_d (adim)	8.8	11.7	18.7
Capacidad específica de almacenamiento en cursos $Ae_c = \text{Vol. Almacenamiento cursos} / L_C$ (m ³ /me)	10.0	45	15.43

En lo que concierne al tiempo de concentración, la cuenca del arroyo Ludueña tiene un $t_c \approx 120$ hs en tanto que a la cuenca del arroyo Saladillo le corresponde un $t_c \approx 300$ hs y la cuenca de la Cañada de Gómez tiene un valor de $t_c \approx 24$ hs.

Implementación del Modelo

Para llevar a cabo la implementación del modelo en las cuencas de estudio se ha efectuado una múltiple aplicación de tecnologías bajo entorno gráfico para el pre-procesamiento de datos, el procesamiento mediante modelación hidrológica-hidráulica de la información y post-procesamiento de la misma para la interpretación de resultados. La información se procesó mediante Sistemas de Información Geográfica en formato "raster", la que sirvió de entrada para el modelo hidrológico-hidráulico, el cual se implementó mediante una grilla de discretización espacial con elementos cuadrangulares.

La primera etapa la constituyó la construcción del modelo digital del terreno (MDT), involucrando la definición de la cota altimétrica representativa de cada unidad de discretización o celda, la definición de los cursos de agua permanentes e impermanentes, la traza y la altimetría de todos los terraplenes ferroviarios y carreteros y la ubicación de estructura de importancia como puentes, alcantarillas y vertederos. La información utilizada se obtuvo a partir de:

(a) Sistema de información Geográfica del Instituto Geográfico Militar SIG250 (IGM, 2007) en escala 1:2500000,

- (b) escaneo, digitalización y georeferenciación de cartas topográficas (IGM, 1930 a 1982) en escala 1:50000 y 1:100000,
- (c) desde el procesamiento de imágenes satelitales y
- (d) desde campañas topográficas parciales antecedentes y actuales.

Cabe destacar que al tratarse de la reproducción de crecidas históricas, algunas con más de 20 años de antigüedad, el ambiente de modelación en cada una de las cuencas no fue el mismo para todas las crecidas, especialmente en lo concerniente a uso y ocupación del suelo, y dimensiones y longitudes de cursos de agua artificiales y naturales recalanzados, como así también en la cantidad de estructuras viales.

La clasificación textural de los suelos, necesaria para la definición de parámetros hidráulicos de los suelos, se realizó a partir de la escaneo, digitalización y georeferenciación de las cartas de suelos en escala 1:50000 del Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1972 a 1988).

Las coberturas vegetales de los suelos se definieron mediante el análisis de imágenes satelitales y, además, en el caso de la cobertura actual, mediante contrastación en campo. Para ello se consideraron un grupo de parcelas rurales testigo en las cuencas, en las cuales se realizó el seguimiento mensual de tipo de cobertura, incluyendo tipo de cultivo y estado de crecimiento y la posterior correlación con el procesamiento de imágenes. Para el caso de la constitución del modelo en crecidas históricas se utilizaron las imágenes satelitales disponibles más cercanas temporalmente a las fechas de los eventos de crecidas conjuntamente con información cualitativa histórica de cobertura de cultivos existentes en institutos oficiales de estadísticas agropecuarias.

En la descripción de la infiltración se utilizaron los métodos del número de curva CN y de Green y Ampt (GA). Preliminarmente los valores medios de CN (condición II) en cada unidad de discretización espacial se definieron a partir de asociar valores establecidos en bibliografía con cobertura vegetal y tipos de suelos. La determinación de los números de curva CN para condición II mediante técnicas de procesamiento de imágenes satelitales y la contrastación en campaña mostró una distribución de aproximadamente suelos de tipo C en un 60% y suelos tipo D en un 40 % de la extensión superficial de las cuencas estudiadas (ver Scuderi et al., 2008). Posteriormente, los valores de CN fueron calibrados en función de los volúmenes precipitados y escurridos en crecidas observadas. En el caso del método GA (conductividad hidráulica del frente húmedo y potencial de succión) se determinaron a partir de digitalización de cartas de suelo, de las características físicas y químicas de los suelos y la posterior aplicación de funciones de pedotransferencia las que permitieron definir diversos parámetros hidráulicos de los suelos (ver Zimmermann et al., 2008). La condición de número de curva antecedente en cada evento fue definida en base a la cantidad de lluvia precipitada en los 30 días previos y en el caso del método de Green y Ampt en base a la estimación de la humedad inicial al comenzar la lluvia.

En lo que respecta a la intercepción, si bien el modelo está preparado para describir un balance a nivel de cobertura, la información disponible en lo referente a los parámetros necesarios es escasa para su aplicación por lo que se optó por un planteo de definición de la intercepción y el almacenamiento superficial incluidos dentro de la abstracción de pérdidas iniciales del método del CN. En el caso de utilización del método de Green y Ampt para describir la infiltración, la intercepción y el almacenamiento superficial fueron determinados a partir de la información de cobertura y a la aplicación de parámetros asociados citados en bibliografía y en base a trabajos antecedentes (Zimmermann, 2003).

Los parámetros de resistencia de flujo no encausado se definieron a partir de la cobertura vegetal del uso del suelo y la asociación con parámetros recomendados en bibliografía y modelaciones antecedentes (Riccardi, 2000; Riccardi et al., 2002; Wilson y Atkinson, 2003). En tanto que los parámetros de resistencia para flujo encausado se propusieron a partir de ajustes antecedentes y recomendaciones de bibliografía (Riccardi et al., 2002; Chow, 1993). Estos parámetros fueron luego convenientemente calibrados.

A los efectos de analizar la influencia sobre la respuesta hidrológica de la cuenca ante la variación del tamaño de la grilla se realizaron constituciones con diferentes discretizaciones. Las constituciones de los modelos se realizaron con los siguientes tamaños de la grilla cuadrangular: 125 m, 250, 500 y 1000 m en la cuenca del Arroyo Ludueña; 250, 500, 1000 y 2000 m en la cuenca del Arroyo Saladillo y 125, 250, 500 y 1000 m en el Arroyo Cañada de Gómez.

Calibración y Explotación del Modelo

Calibración: la información disponible para la calibración del modelo en las cuencas en lo referente a crecidas históricas es sumamente escasa. En el caso de la cuenca del arroyo Ludueña se contó con información de lluvia (5 estaciones) y caudal (2 estaciones) en 5 eventos relevantes de los últimos 20 años. En la cuenca del arroyo Saladillo la información confiable es de 2 crecidas importantes aunque en este caso la información de lluvia es mayormente a escala diaria, lo que significa asumir una serie de hipótesis de distribución temporal subdiaria que agrega cierta incertidumbre adicional a los resultados. En la cuenca del arroyo Cañada de Gómez la información apta para calibrar el modelo se ha encontrado en un solo evento de características extraordinarias. En todas las cuencas existe además información de al menos 3-5 eventos adicionales donde se cuenta con información de lluvia diaria y alturas de agua máxima en puntos característicos del escurrimiento como puentes y alcantarillas en sus vías de drenaje principales. En el caso de crecidas históricas con información de caudales y lluvias totales fueron utilizadas para calibrar los parámetros globales de infiltración y los parámetros de resistencia en el escurrimiento tanto del flujo mantiforme como encausado.

En lo que concierne al proceso de infiltración al momento se han definido y calibrado los números de curva CN asociados a cada evento en tanto que en el corto plazo se prevé el ajuste de los parámetros de Green y Ampt. La calibración de los números de curva se realizó en función de los volúmenes precipitados y observados y la posterior

inferencia del CN. Los valores hallados de CN en condición media de humedad antecedente (condición II) fueron entre 70-77, en tanto que para condiciones de tiempo seco severo (condición I) se hallaron valores entre 55-60 y en condiciones de humedad antecedente elevada (condición III) se hallaron valores entre 85-90.

Dado que los valores de CN (condición II) obtenidos a partir de bibliografía difirieron de los inferidos en el proceso de calibración, para la misma condición II; éstos fueron redefinidos tomando como válidos los hallados a partir de la información observada. Es de destacar que los valores obtenidos a partir de bibliografía son entre un 10 – 15% superiores a los obtenidos mediante el proceso de calibración.

El almacenamiento superficial y la intercepción fueron calibrados indirectamente a partir del ajuste los números de curva. Los valores resultantes del ajuste del almacenamiento superficial no contemplado por el MDT (Rentería et al., 2006) y la intercepción en cobertura vegetal se han podido delimitar en un rango de valores de acuerdo a la situación de humedad antecedente, fijándose valores porcentuales de la precipitación total:

- (a) para eventos con antecedentes lluviosos no importantes dentro de los 30 días anteriores se han establecido valores entre el 50% al 20% de precipitación total para lluvias de 50 mm y 200 mm respectivamente
- (b) para eventos con lluvia antecedente > 50 mm dentro de los 30 días anteriores correspondió un rango entre el 16% y el 3% de la precipitación total para lluvias de 50 mm y 200 mm respectivamente.

Los coeficientes de resistencia al escurrimiento resultante del proceso de calibración han resultado con los siguientes valores:

- (a) 0.100 - 0.120 para el flujo predominante mantiforme (80-95% uso rural con cultivos)
- (b) 0.030-0.040 para el flujo encausado en cursos de agua naturales y canales
- (c) 0.040-0.060 para el flujo por líneas de escurrimiento no bien definidas y no permanentes.

Los coeficientes de gasto de alcantarillas y puentes se ajustaron en un rango de 0.80-0.95. En tanto que los coeficientes de gasto asociados al sobrepaso de terraplenes viales y ferroviarios trabajando como vertederos de cresta ancha se ajustaron entre 0.40-0.60.

En las Figuras 3, 4 y 5 se presentan hidrogramas resultantes en las secciones de salida de las cuencas para escenarios de calibración.

La Figura 3 (a) corresponde a una crecida sobre el arroyo Ludueña con inicio el 17/03/1994, con una precipitación total media sobre la cuenca de 148 mm, con un valor máximo de 210 mm y mínimo de 128 mm. La precipitación neta calculada mediante la integración de los volúmenes salientes de la cuenca resultó de 38 mm. La condición antecedente fue próxima a la condición I con un CN medio ponderado ≈ 56 . En este

evento pudieron ajustarse satisfactoriamente los hidrogramas en la sección de salida de la cuenca (Estación Circunvalación) y en una sección de control interna donde aporta aproximadamente un 60% de la cuenca sobre la rama Ludueña (Estación Golf).

La Figura 3 (b) corresponde a una crecida sobre el arroyo Ludueña ocurrida con inicio el 03/04/1994. La cuenca estaba en un estado cercano a la saturación con el antecedente de 148 mm precipitados el 17/03/1994. La precipitación total media sobre la cuenca fue de 153 mm (máximo: 190 mm y mínimo: 130) y la precipitación neta de 111 mm. La condición antecedente fue próxima a la condición III con un CN medio ponderado ≈ 86 . De acuerdo con la relación IDR existente en la región ambas lluvias pueden considerarse de una recurrencia 10-12 años.

La Figura 4 corresponde a una crecida sobre el Arroyo Saladillo los días 23 y 24 de abril de 1986. Al tratarse de una cuenca sumamente extensa, la lluvia no fue homogénea en toda la extensión superficial de la cuenca, observándose valores de 250 mm en la cuenca baja y 100-150 mm en la cuenca alta. La lluvia neta integrada a partir de los volúmenes escurridos fue de aproximadamente 90 mm. En este evento la lluvia media antecedente fue de 30 mm precipitados en los 10 días anteriores. Considerando la lluvia observada sobre la porción espacial de la cuenca con mayor incidencia sobre el caudal pico (Riccardi et al., 2007) la recurrencia del evento se asocia a 50 años.

La Figura 5 corresponde a un evento extremo en la cuenca de la Cañada de Gómez donde precipitaron en un foco máximo de 40 km² de una tormenta convectiva alrededor de 200 mm en aproximadamente 6 hs., en el resto de la cuenca la precipitación fue sumamente heterogénea con valores inferiores a los del foco. En este caso la precipitación neta computada en la sección de salida de la cuenca fue de 115-120 mm. La precipitación media antecedente en este evento fue de 50 mm precipitados en los 10 días anteriores. En función de la IDR de la región este evento fue considerado de una recurrencia superior a la milenaria.

A modo de cuantificación global de los ajustes logrados puede afirmarse que en el caso de la comparación entre hidrogramas y limnigramas observados y calculados el coeficiente de correlación R² se determinó entre 0.80 y 0.90, en tanto que en el caso de comparaciones de valores puntuales máximos de caudales, alturas de agua y tiempos al pico las diferencias se establecieron entre 5 -15%.

Influencia del tamaño de grilla: fueron también estudiados otros aspectos de la modelación como la influencia del tamaño de la grilla cuadrangular de modelación sobre la dinámica propagatoria en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo. En el caso del arroyo Ludueña se ensayaron tamaños de grilla desde 125 m a 1000 m en tanto que en el arroyo Saladillo se ensayaron grillas desde 250 m a 2000 m (ver Stenta et al., 2008). En este trabajo se concluye que para lograr una adecuada similitud en términos de respuesta hidrológica de la cuenca; es necesario escalar la ITA desde 0.025 para la discretización de 125 m a 0.009 para la discretización de 1000 m ; en tanto que si se escala coeficiente de resistencia en el valle, el mismo debe variar de un valor medio de

0.120 para la discretización de 125 m y debe aumentarse a 0.275 para la discretización de 1000 m incluso perdiendo gran parte de su significado físico para lograr la misma respuesta. En el caso del arroyo Saladillo el escalado de ITA indicó que para lograr similitud hidrológica entre un tamaño de grilla de 250 m y un tamaño de grilla de 2000 m debe pasarse de un valor de 0.025 a 0.016, en tanto que para el coeficiente de resistencia en el valle es necesario pasar de 0.100 (grilla de 125 m) a 0.175 (grilla de 2000 m) (ver Stenta et al, 2008)

Determinación de zonas de vulnerabilidad: en las cuencas de los arroyos Saladillo y Cañada de Gómez se ha investigado mediante la simulación de crecidas con distintas ubicaciones espaciales de tormentas intensas, acerca de las zonas con vulnerabilidad a inundaciones. Las tormentas ensayadas corresponden a dos eventos reales extremos observados en la región; un primer escenario está asociado a una elevada intensidad y corta duración: 200 mm precipitados en 6 hs en una zona de 40 km², en tanto que el segundo evento se asocia a un elevado volumen: 400 mm precipitados en 5 días (ver Rentería et al., 2008). En el caso de la tormenta concentrada se procedió a “mover” el foco de la tormenta en el dominio espacial de la cuenca de modo de determinar escenarios críticos de alta vulnerabilidad.

Predicción a tiempo real: en el caso de la aplicación en la cuenca del arroyo Ludueña, el modelo fue utilizado en un evento ocurrido el pasado marzo de 2007 como herramienta de predicción a tiempo real, permitiendo establecer un pronóstico de caudal máximo con un error de $\pm 10\%$ con 6 horas de anticipación. En el evento de referencia precipitaron alrededor de 350 a 400 mm sobre la cuenca durante 5 días, constituyendo esta duración, el episodio de mayor lluvia de la historia en que se dispone de registros pluviométricos en la región. La precipitación neta integrada en la salida de la cuenca se valorizó en 150 mm. En la Figura 6 se presentan los hidrogramas pronosticados de máxima y de mínima y el observado en tal evento. La utilización del modelo en línea durante tal evento permitió con la suficiente antelación planificar la hipotética evacuación de un populoso barrio de la ciudad de Rosario.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A pesar de la deficitaria información histórica principalmente de alturas de agua y caudales, la comparación entre hidrogramas y limnigramas medidos y calculados determinan diferencias máximas no superiores al 15% en las cuencas modeladas. En el caso de eventos con información de hidrogramas y limnigramas con agregación temporal horaria la reproducción de los tiempos de retardo ha arrojado diferencias entre valores observados y computados inferiores al 10%. Estas diferencias han sido consideradas aceptables.

En la cuenca donde ha sido empleado el modelado como herramienta de predicción a tiempo real el modelo ha mostrado una aceptable capacidad de pronóstico.

Se evidencia que la capacidad tecnológica de simulación del conjunto de técnicas empleadas supera la información de datos de entrada del modelo como de parámetros característicos de los procesos (intercepción, almacenamiento, infiltración, escurrimiento) disponible actualmente en las cuencas estudiadas.

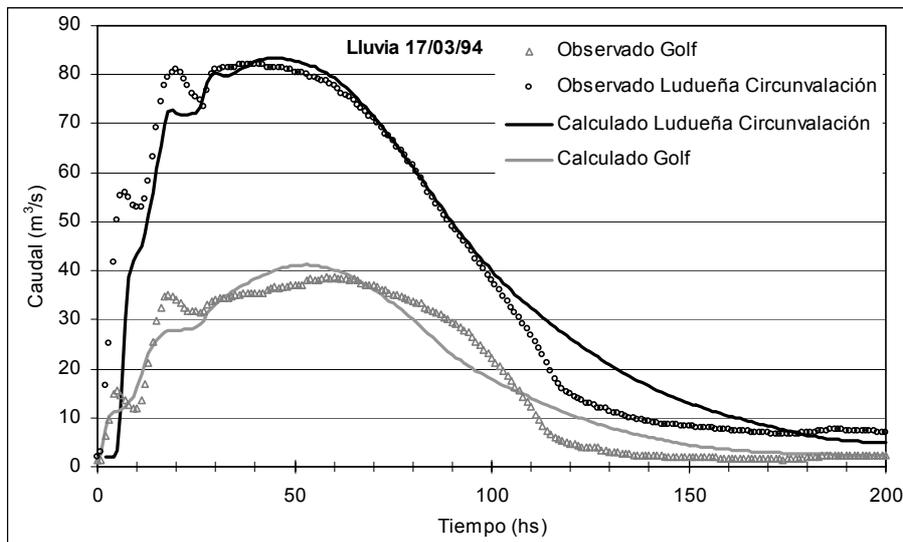
Si bien el grado de aproximación a la reproducción de crecidas históricas como así también el pronóstico a tiempo real puede considerarse aceptable resulta claro que debe avanzarse en una mayor estructura de recolección sistemática de información espacial y temporal de lluvia, humedad antecedente del suelo, alturas de agua y caudal. También resulta de importancia el monitoreo sistemático mediante imágenes satelitales de la cobertura del suelo por lo menos una vez en cada estación del año para la actualización de información del modelo. En lo que respecta a las características hidráulicas de los suelos se evidencia la necesidad de incrementar sustancialmente la definición de la curva de almacenamiento de los suelos mediante ensayos en campo y monitoreo de humedad en la vertical durante tormentas reales.

Dado que la herramienta utilizada se trata de un modelo físicamente basado, el objetivo perseguido siempre es la mejor descripción posible a nivel de celda de variables de flujo como altura, velocidad y caudales, no solo para el mejoramiento de la dinámica del escurrimiento en si misma sino para poder utilizar dichas variables como base hidrodinámica para la descripción de otros procesos como erosión/sedimentación. En este sentido, en lo referente a la descripción de la dinámica propagatoria a nivel de pequeños grupos de celdas se evidencia en las cuencas de llanura estudiadas, la necesidad de representar con la mayor fidelidad posible parámetros tales como el índice de drenaje, el índice de rugosidad y la capacidad de almacenamiento en cursos de agua a nivel de cada elemento de la grilla. Esta información no es de sencilla obtención ya que en algunos casos ni con el procesamiento sistemático de imágenes satelitales se pueden “ver”. Al momento, esta necesidad se ha podido cubrir parcialmente mediante trabajos de observación y relevamiento expeditivo en campaña en sectores considerados como representativos de porciones de cuencas.

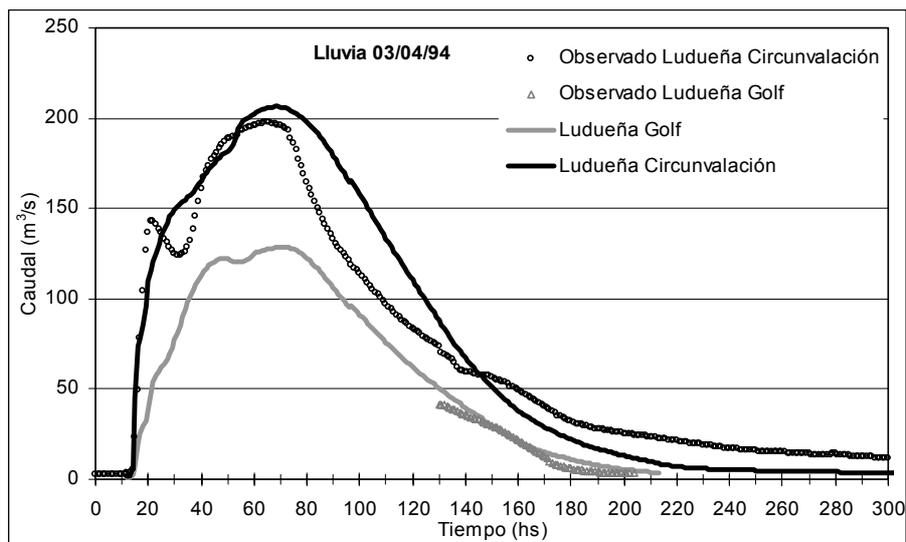
BIBLIOGRAFÍA

- Cunge, J. (1975). *Two Dimensional Modelling of Flood Plains*. Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.). W. Res. Pub., Fort Collins, 1975, pp. 705-762.
- Chow V.T. (1993), *Hidráulica de los Canales Abiertos*. Mc Graw Hill, Editorial Diana, México. 6ta ed.
- Green, W. and G. Ampt (1911), “Studies in soil physics”, *J. Agric. Sci.*, 4, pp. 1-24.
- IGM (2007), *SIG250 Sistema de Información Geográfica proveniente de la información de la carta topográfica de escala 1:250.000*, Instituto Geográfico Militar de la República Argentina.
- IGM (1930 a 1982), *Cartas Topográficas de la República Argentina a Escala 1:50000 a 1:100000*, Instituto Geográfico Militar de la República Argentina.
- INTA (1972 a 1988), *Cartas de Suelo de la República Argentina*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Muñoz-Carpena R y L. Gowdish (2005), “Aplicación del Método de Infiltración de Green-Ampt con Redistribución de Humedad del Suelo entre Encharcamientos”, *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, Ed. F.J Samper Calvete y A. Paz González, Vol. VII, pp. 205-213.

- Ogden F. and B. Saghafian (1997), "Green and Ampt Infiltration with Redistribution", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(5), pp. 388-393.
- Rawls W., D. Brakensiek and N. Miller (1983), "Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109(1), pp. 62-70.
- Rentería J., H. Stenta, G. Riccardi y C. Scuderi (2008), "Análisis de Vulnerabilidad de Eventos Pluviosos Extremos Observados de Alta Variabilidad. Caso de Aplicación: Cuencas de los A° saladillo y Cañada de Gómez, Llanura del sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina", *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia. (en revisión)
- Rentería J., H. Stenta, G. Riccardi y C. Scuderi (2006), "Análisis de la Respuesta Hidrológica en la Cuenca del Ao Saladillo (Sta Fe Argentina) aplicando dos modelos Digitales de Terreno", *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 53-HSS-R4116, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Riccardi, G. (2000), "Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos," *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II*, Córdoba, Argentina, pp. 159-168.
- Riccardi, G., C. Scuderi y H. Stenta (2002), "Modelado de Escurrimiento Superficial con Alto Nivel de Detalle en la Cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina", Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Argentina.
- Riccardi G., H. Stenta y J. Rentería J. (2007), "Análisis del Aporte de Escurrimiento Superficial en Cuencas De Llanura Mediante Modelación Distribuida", XXI Congreso Nacional de Agua, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Rutter A., A. Kershaw, P. Robin and A. Morton (1971), "A predictive model of rainfall interception in forests. 1 Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine", *Agric. Meteorol.*, 9, pp. 367-384.
- Scuderi, C., H. Stenta, G. Riccardi, E. Zimmermann, P. Basile, M. Garcia y J. Renteria, (2008), "Estimación de Mapas Distribuidos de CN e Influencia de la Agregación Espacial Mediante Modelación Matemática Distribuida", *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia. (en revisión)
- Stenta, H., J. Rentería y G. 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, Argentina.
- Stenta, H., G. Riccardi y P. Basile (2008), "Similitud Hidrológica en el Escurrimiento Superficial en Cuencas Rurales mediante Modelación Matemática Distribuida", *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia. (en revisión)
- USSCS (1975), *United State Soil Conservation Service, Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55*, Segunda Ed., SCS-USDA, Washington, D.C.
- Wilson, M. and P. Atkinson (2003), "Sensitivity of a flood inundation model to spatially-distributed friction", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International*, Vol.3, pp. 1579-1581.
- Zimmermann, E. (2003), "Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 2. Estrategias para la calibración", *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 114, 2, pp. 147-158.
- Zimmermann, E. C. Scuderi, G. Riccardi, H. Stenta, P. Basile, M. Garcia y J. Renteria, (2008), "Asignación de Parámetros Hidráulicos de Suelos utilizando Composición Textural, Características Físicas y Estratigráficas", *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia. (en revisión).



(a)



(b)

Fig. 3. Hidrogramas en calibración en Arroyo Ludueña.
(a) Lluvia 17/03/94 y (b) Lluvia 03/04/94.

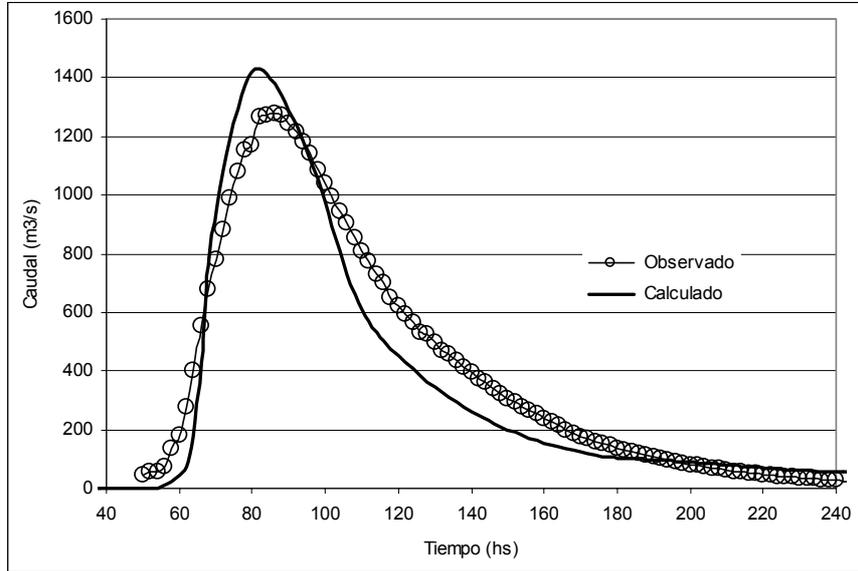


Fig. 4. Hidrograma en calibración Arroyo Saladillo. Lluvia 22 al 24 de abril de 1986.

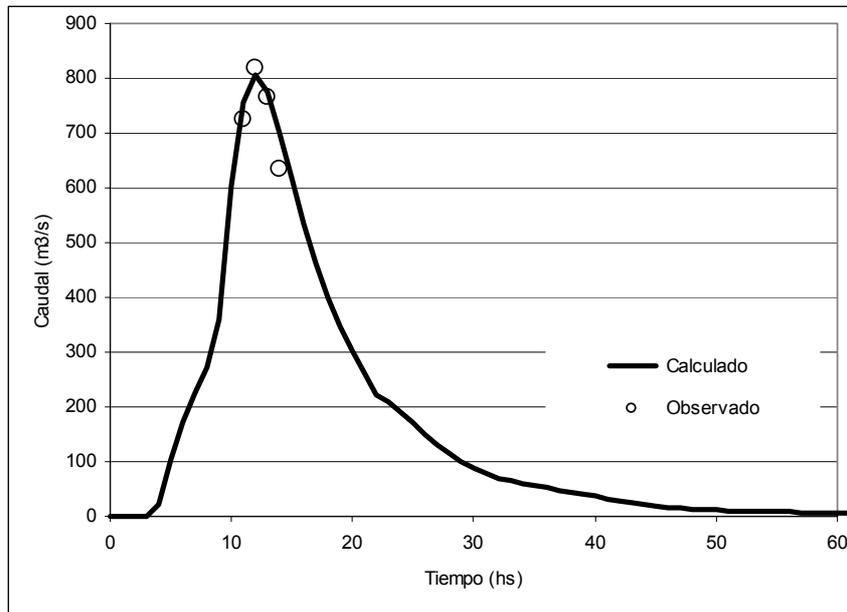


Fig. 5. Hidrograma en calibración Cañada de Gómez. Lluvia 22 de Noviembre de 2000.

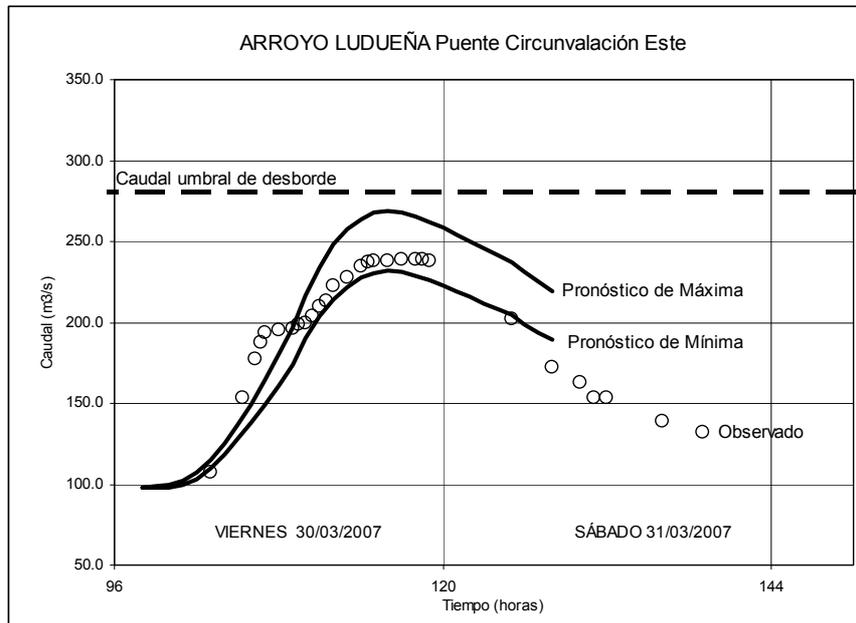


Fig. 6. Pronóstico a tiempo real en Arroyo Ludueña 30/03/2007