

# APLICACIÓN DE UN MODELO DISTRIBUIDO FÍSICAMENTE BASADO AL PRONÓSTICO DE NIVELES PARA UN CURSO DE LLANURA DEL SUR DE SANTA FE

Carlos M. Scuderi<sup>1</sup>, Gerardo A. Riccardi<sup>1,2</sup> y Erik D. Zimmermann<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Hidráulica y Centro Universitario de Investigaciones HidroAmbientales (CURIHAM).

<sup>2</sup>Investigador CIC-CIUNR. <sup>3</sup>Investigador CONICET. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario (UNR). Riobamba 250 bis. Rosario (2000). Santa Fe. Argentina. Email: cscuderi@fceia.unr.edu.ar. Tel/FAX: (+54 341 4808541).

## RESUMEN

La vulnerabilidad ante inundaciones de la ciudad de Rosario y alrededores se ha incrementado en los últimos años producto del cambio en el uso del suelo de ganadero a agrícola intensivo y de la incesante ocupación de la tierra sin un plan de ordenamiento territorial de las cuencas. A comienzos del año 2007 la Autoridad Hídrica Provincial instaló una red de sensores de precipitación y niveles con el objeto de constituir un sistema de alerta contra inundaciones. Precisamente durante el mes de marzo de ese mismo año en la ciudad de Rosario se produjo un evento extraordinario donde precipitaron 365 mm en 5 días. Por otra parte, se realizó un convenio entre el organismo provincial y el Departamento de Hidráulica para el estudio y actualización del estado de las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo, que concluyó con el desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles orientado a alerta de crecidas. En este trabajo se presenta el modelo matemático distribuido, su implementación en la cuenca del arroyo Ludueña (740 km<sup>2</sup>) y nuevos resultados parciales obtenidos. Los datos de precipitación y niveles utilizados fueron registrados durante el período octubre de 2007 a marzo de 2012, a partir del análisis de los mismos se extrajeron 11 tormentas y 57 limnigramas. Para implementar el modelo distribuido es necesario constituir la cuenca a partir de la definición de los cursos y valles, sus vinculaciones, obras de arte y terraplenes; además debe ser definida la lluvia neta, las condiciones iniciales y de borde. Fueron empleados como parámetros de calibración la conductividad hidráulica saturada  $K$ , el potencial de succión  $\Psi$ , el grado de saturación efectiva  $S_e$  y las pérdidas iniciales  $p_{ini}$ . La selección de la mejor combinación de parámetros se realizó utilizando 12 parámetros estadísticos, entre ellos diferencias absoluta y relativa en el nivel pico, coeficientes  $a$  y  $b$  de la recta de regresión entre niveles observados y simulados, eficiencia del modelo y raíz del error cuadrático medio. El comportamiento del modelo es satisfactorio en términos de niveles pico, llegando en promedio a diferencias del orden de 40 cm entre limnigramas observados y pronosticados.

**Palabras Clave:** Inundaciones, Modelos Matemáticos Distribuidos, Pronóstico de Niveles, Cuencas de Llanura.

## INTRODUCCION

La zona del Gran Rosario, tercera metrópoli del país, pertenece a la Pampa ondulada y se encuentra situada al sur de la provincia de Santa Fe, a la vera del río Paraná. Esta región cuenta con suelos de buena calidad para agricultura y ganadería y con fuentes seguras de agua para abastecimiento humano; condiciones que alientan el establecimiento de grandes urbes y la concentración de un elevado número de personas en espacios reducidos (Tucci y Bertoni, 2003). Estas circunstancias propician un escenario de mayor vulnerabilidad de la población frente a las inundaciones. Por lo que la protección de las personas (generalmente de sectores marginados asentados sobre las márgenes de los cursos de agua o sectores deprimidos) como de los bienes materiales y la infraestructura cobra cada vez mayor importancia.

Desde la década de 1940, las autoridades hídricas provinciales y municipales han ejecutado distintas obras, entre ellas canalizaciones urbanas y rurales, conductos aliviadores y una presa de atenuación de crecidas. Sin embargo, los hechos demuestran que este tipo de medidas por sí solas son insuficientes para mantener el nivel de seguridad frente a las inundaciones. En las últimas dos décadas, principalmente, las autoridades han comenzado a implementar medidas no estructurales, en concordancia con las recomendaciones vertidas por la literatura (Plate, 2003). Actualmente se cuenta con algunas medidas legales sancionadas a nivel provincial (PSF, 2014), como también municipal (MR, 2014); entre ellas la elaboración de mapas de riesgo de inundación mediante modelación matemática hidrodinámica (Riccardi, 1997).

Otra de las medidas no estructurales es el pronóstico de crecidas, uno de los principales desafíos en hidrología operativa (Garrote y Bras, 1995), dada la dualidad existente entre la gran demanda de datos y el elevado nivel de precisión requeridos en la modelación versus la rapidez en la generación de resultados; lo que limitaría en principio el uso de modelos distribuidos para esta tarea (Liu y Todini, 2002; Bandaragoda et al., 2004; Bartholmes y Todini, 2005). No obstante, diferentes autores (Michaud y Sorooshian, 1994; Garrote y Bras, 1995; Carpenter y Georgakakos, 2004; Vieux et al., 2004) coinciden en que la creciente disponibilidad de datos de lluvia espacialmente distribuida, de las propiedades morfológicas distribuidas de la cuenca y de los recursos computacionales con mayor capacidad de cálculo y menor costo, alientan el uso de modelos distribuidos aplicados a pronóstico de crecidas.

Diversos autores (Michaud y Sorooshian, 1994; Garrote y Bras, 1995; Ajami et al., 2004; Bandaragoda et al., 2004; Reed et al., 2004) sostienen que los modelos distribuidos físicamente basados tienen potencialmente la capacidad para describir el estado del flujo (caudales, niveles, velocidades, hidrogramas, limnigramas, etc.) en cualquier punto del dominio dado que se fundamentan en el principio de conservación de masa y del momentum (Vieux et al., 2004). En este sentido se advierte que complejidad no es sinónimo de precisión, es decir que una mayor resolución espacio-temporal no siempre produce un mejor desempeño del modelo (Michaud y Sorooshian, 1994; Reed et al., 2004); sino que, por el contrario, puede generar una mayor incertidumbre en los resultados (Ajami et al., 2004).

En este trabajo se presenta la aplicación y evaluación de un modelo matemático distribuido físicamente basado, CTSS8, al pronóstico de niveles en secciones características de la cuenca del arroyo Ludueña. Para ello se utiliza información de lluvia y niveles correspondiente a once tormentas ocurridas entre octubre de 2007 y marzo de 2012, junto con parámetros hidráulicos relativos a las asociaciones de suelo presentes en la cuenca. Resultados preliminares de este trabajo, que forman parte de los estudios de doctorado que están siendo llevados a cabo por el primer autor, se presentan en Scuderi et al. (2013).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La región del Gran Rosario pertenece, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, a la categoría de clima templado subtropical sin estación seca (verano cálido) o Cfa. La temperatura media anual es de 17.5 °C y la precipitación media anual alcanza los 1018.5 mm, de los cuales el 69% se registran durante el período primavera-verano (octubre a marzo). Los datos provienen del estudio estadístico efectuado por el autor a partir de los datos mensuales suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2014).

### Cuenca en estudio

La cuenca del arroyo Ludueña (figura 1) se ubica entre los paralelos 32° 45' y 33° 07' S y los meridianos 61° 06' y 60° 41' O, siendo su cuerpo receptor el río Paraná. El área de aporte es de 740 km<sup>2</sup> y su elevación varía entre 71.5 m IGN en las nacientes del arroyo Ludueña al O y 16.0 m IGN en la sección de cierre. La red hídrica principal está conformada por el arroyo Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat que, junto con sus tributarios, alcanzan una longitud del orden de 130 km; no obstante en épocas de lluvia se suman gran cantidad de pequeños cursos intermitentes que aumentan dicha longitud hasta 370 km. La pendiente media de la cuenca es de 1.10 m.km<sup>-1</sup>; mientras que para el curso principal se tiene una pendiente media de 1.33 m.km<sup>-1</sup>. El caudal base del arroyo es de 0.5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>; en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>; mientras que en eventos extraordinarios (R > 50) se producen caudales superiores a los 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Riccardi et al., 2002).

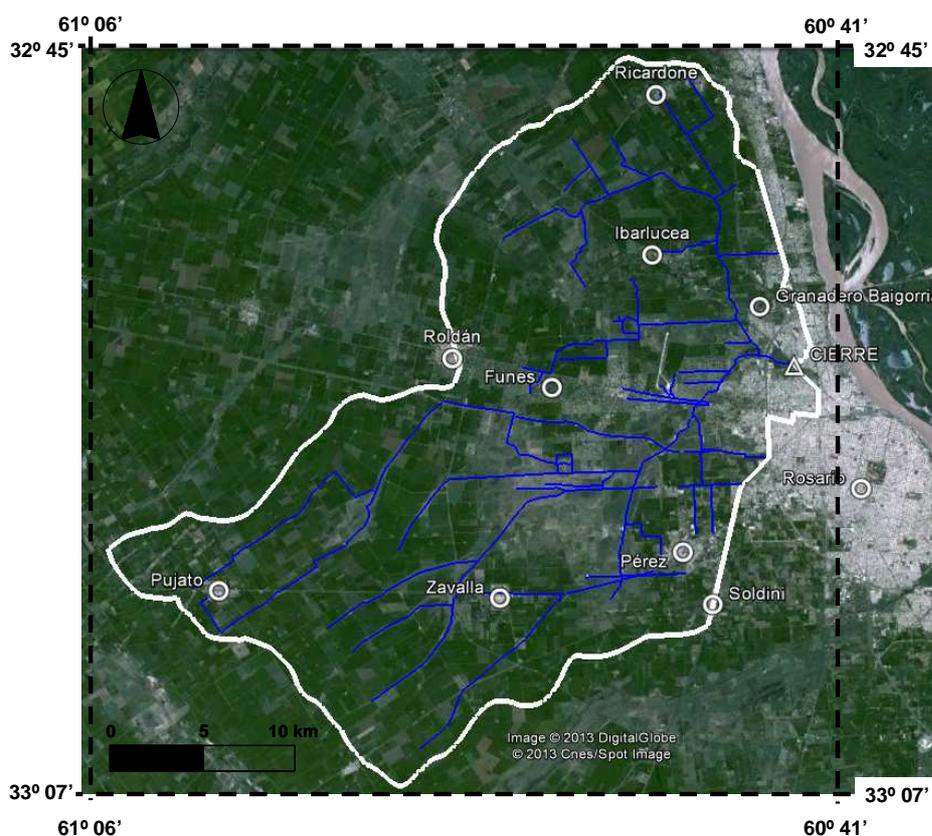


Figura 1. Cuenca del arroyo Ludueña

Presenta un relieve sumamente plano con escasa pendiente y tipo de suelo arcilloso – limoso con permeabilidad moderada a moderadamente lenta. El principal uso del suelo, aproximadamente el 90 % de la superficie de la cuenca, está afectado a la agricultura (destacándose la producción de soja, maíz y trigo), mientras que se considera el 10 % restante dedicado a uso urbano. Se registra

una alta actividad antrópica por el incremento de urbanizaciones y la gran cantidad de vías de comunicación viales y ferroviarias; que modifica el escurrimiento superficial natural.

El incremento en la densidad poblacional por el auge de los emprendimientos urbanísticos y la impermeabilización de los suelos debido a prácticas agrícolas intensivas, favorecen un mayor volumen de escurrimiento superficial junto con una disminución en los tiempos de respuesta. Esto ha llevado a las autoridades a hacer grandes obras de saneamiento, para incrementar la capacidad de evacuación del sistema de  $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en unos 70 años. Además, en el año 1996 se inauguró una presa de retención de crecidas que regula casi el 50% del área de la cuenca.

Por otra parte, entre el 26 y el 30 de marzo del 2007 la cuenca recibió una sucesión de tormentas de características extraordinarias, totalizando 365 mm en 5 días ( $R > 500$  años). En forma concomitante con el evento meteorológico, el río Paraná que es el curso receptor del arroyo, estuvo a una cota elevada (estimada entre 8.18 m a 8.49 m IGN a lo largo de los 5 días) que actuó de tapón hidráulico sobre el sistema Ludueña, circunstancias éstas que pusieron a prueba la capacidad de evacuación de las obras estructurales (Riccardi et al., 2008, 2009).

Es importante conocer estos hechos para explicar como la transformación de la cuenca por parte del hombre, hace que cada vez sea necesaria una mayor capacidad de conducción para intentar mantener el nivel de protección de sus habitantes.

### Datos de precipitación y niveles

La autoridad hídrica provincial (Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente) opera una red de cuatro sensores pluviométricos y once limnimétricos que se hallan diseminados dentro de la cuenca del arroyo Ludueña (figura 2) desde comienzos del año 2007.

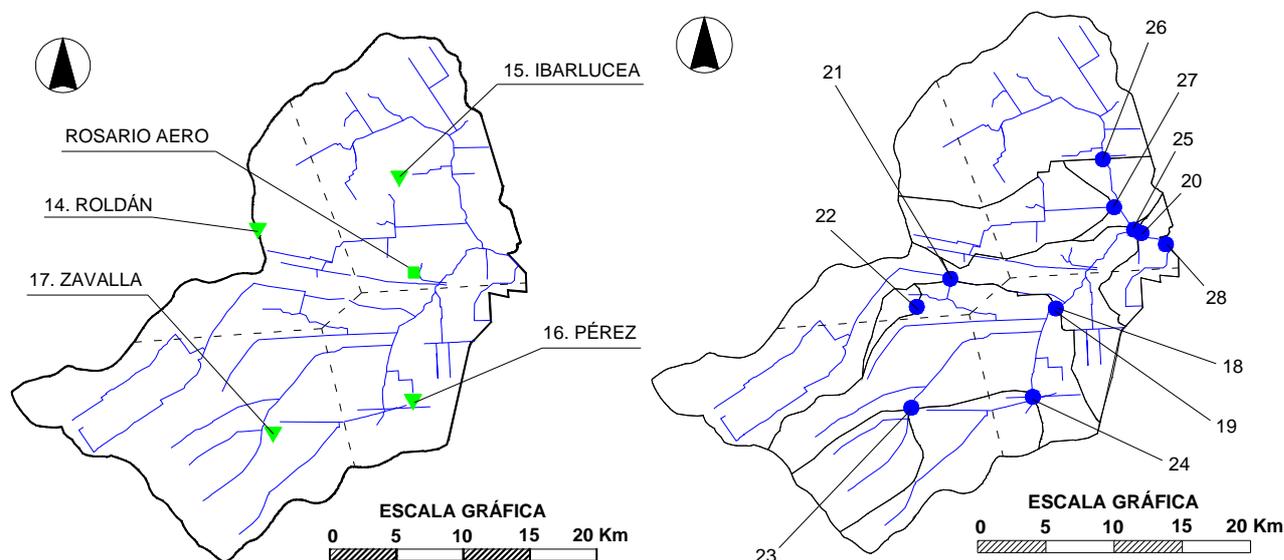


Figura 2. Sensores pluviométricos y limnimétricos

Los sensores pluviométricos son marca “Global Water”, modelo RG200, de 6 pulgadas de boca y cuentan con una apreciación de 0.25 mm. El instrumental instalado para medición de niveles es de marca “Global Water”, modelo WL400, constituido por un transductor de presión sumergible con rango de 0 a 30 pies y precisión de  $\pm 0,1\%$  de la escala completa. El registro de ambas variables hidrológicas se efectúa cada 15 minutos, siendo posteriormente transmitido en forma automática a la estación central. Los datos son almacenados en un servidor y son suministrados sin ningún tipo

de verificación, en una página web. El acceso a los datos fue realizado manualmente desde la página web, a partir de la cesión de los mismos por la autoridad hídrica provincial. El período de datos utilizado en este trabajo comprende desde el mes de octubre de 2007 hasta marzo de 2012.

Luego de una revisión preliminar de los datos de precipitación y para verificar su calidad, se efectuó el contraste de los registros de lluvia medidos en las estaciones de Roldán, Ibarlucea, Pérez y Zavalla con los valores recolectados por la estación Rosario AERO, empleando el método de dobles acumulaciones. Del análisis se verifica que todas las estaciones registran valores por debajo de la estación de testeo, en promedio en un 35%. Estos hechos reflejan la necesidad de efectuar el seguimiento sistemático del funcionamiento de los sensores de precipitación.

En función de los controles efectuados anteriormente se define una tormenta como el evento que cumple con las siguientes condiciones simultáneamente: a) todos los pluviómetros que aportan a la sección de aforos registran datos; b) se considera como dato válido cuando el pluviómetro informa un valor superior a 0.25 mm, por ser ésta la apreciación del instrumento; c) la fecha en que hay datos medidos en las estaciones debe coincidir con la registrada en la estación Rosario AERO. Como resultado de aplicar las pautas enumeradas anteriormente fueron extraídas 11 tormentas.

Respecto de los datos de nivel, el tratamiento seguido fue el siguiente: primero se descartó la presencia de valores negativos o físicamente muy elevados. En una segunda etapa se seleccionaron para cada sensor los limnigramas que tuvieran un comportamiento regular, es decir donde se aprecia una rama ascendente, un pico y una rama descendente. Posteriormente, sobre cada limnigrama se analizó la existencia de falta de datos, completando con el valor inmediato anterior al dato faltante.

Como resultado del procedimiento efectuado a los datos de niveles observados se obtuvieron 57 limnigramas. A modo de resumen, en promedio se tienen valores de tiempo de base del orden de 109 hs (aprox. 4.5 días) y de tiempo al pico del orden de 23 hs (aprox. 1 día), lo que produce una relación entre tiempo al pico y tiempo de base del orden de 0.22. Por lo que en estas circunstancias se cuenta con un tiempo relativamente suficiente como para poder implementar diferentes acciones en caso de estar en presencia de una situación de alerta de crecidas.

En cuanto a la confiabilidad de los registros limnimétricos no fue posible realizar una comparación para todas las secciones de medición. Sin embargo para algunas tormentas y en ciertas estaciones, fue posible cotejar el sensor con la regla instalada en la sección de aforo. Cabe mencionar respecto al estado de conservación de los limnímetros que posiblemente, por hallarse en lugares alejados de centros poblados han estado sometidos en forma permanente a situaciones de vandalismo como rotura de cables o robo de sensores. Hechos que han contribuido a que la cantidad de datos medidos por los limnímetros no haya estado en concordancia con los datos pluviométricos.

La siguiente etapa fue compatibilizar las fechas de ocurrencia entre datos de precipitación y de nivel; tarea que consistió en detectar las fechas en que simultáneamente se verificó la elevación del nivel de agua y el registro de precipitación en todos los pluviómetros que aportan a dicha sección de aforo. Seleccionados dichos eventos, les fueron impuestos dos requisitos más para llegar a constituir un evento válido a ser empleado en este trabajo: a) la precipitación total caída en la subcuenca asociada al limnómetro supera los 10 mm y b) el nivel de agua en la sección estudiada registra un incremento mayor al 15% de la máxima variación experimentada durante el período analizado. El criterio de descartar eventos chicos por medio de las dos restricciones anteriores, radica en que, dado que el objetivo es pronosticar niveles en situaciones de posibles crecidas interesa considerar u otorgar mayor peso a los eventos relativamente más importantes que fueron medidos a lo largo del período de registro.

## **Breve descripción e implementación del modelo matemático distribuido**

Para el pronóstico de niveles se empleó el modelo matemático físicamente basado creado por Riccardi (2001) denominado CTSS8. Dicho modelo tiene la ventaja de ser desarrollado en el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario; otorgándole gran flexibilidad para realizar cambios en el mismo. Es un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasi-bidimensional distribuido fundamentado en el esquema de celdas interconectadas propuesto por Cunge en 1975. Los primeros desarrollos publicados del modelo se remiten al año 1992 (Riccardi, 1992).

Respecto del pronóstico de crecidas Scuderi et al. (2007) emplearon este modelo con un tamaño de grilla de 1000 m x 1000 m en la cuenca del arroyo Ludueña, analizando 3 tormentas del año 1994. Scuderi et al. (2009) y Scuderi et al. (2010) analizaron la cuenca del Ludueña con una nueva configuración de tamaño de grilla de 250 m x 250 m (Riccardi et al., 2008, 2009) para tormentas registradas en el período nov-2008 a mar-2009, y posteriormente Riccardi et al. (2013) extienden la aplicación del modelo al análisis de un mayor número de tormentas.

El modelo simula los procesos hidrológicos e hidráulicos presentes en la transformación lluvia-caudal con énfasis en el escurrimiento superficial, tanto en ambientes rurales como urbanos; cuantificando el escurrimiento a través del intercambio de flujo entre celdas en cualquier dirección por medio de leyes unidimensionales. Sobre cada unidad de discretización es factible considerar los procesos de precipitación, pérdidas por intercepción y almacenamiento e infiltración. El escurrimiento superficial remanente se puede propagar a través de un conjunto de leyes de descarga que contempla diferentes aproximaciones (desde cinemática hasta dinámica) de la ecuación de cantidad de movimiento; permitiendo de esta manera realizar el tránsito por ríos, canales, valles de inundación, calles y redes de conductos cerrados. Además fueron incorporadas diferentes leyes de descarga para considerar el flujo por secciones singulares como puentes, vertederos, embocaduras, etc. Las ecuaciones gobernantes consideradas para el movimiento del flujo son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento.

La implementación del modelo CTSS8 requiere del cumplimiento de diferentes etapas para poder iniciar una simulación: generar un modelo digital del terreno de la cuenca a estudiar, definir las celdas y vinculaciones, estimar la precipitación total, cuantificar las pérdidas y la lluvia neta, establecer las condiciones iniciales y de borde.

El modelo digital del terreno (MDT) permite conocer la topografía del dominio en forma detallada. El MDT de la cuenca del arroyo Ludueña ha experimentado una evolución continua y permanente a raíz de las modificaciones producidas en la cuenca a lo largo del tiempo, en este trabajo se emplea un MDT con resolución de grilla de 250 m x 250 m, constituido en el marco del Convenio Rehidrología (Riccardi et al., 2008, 2009).

A partir del MDT se delimita la cuenca en función de curvas de nivel y de los límites definidos por terraplenes viales y ferroviarios que modifican el escurrimiento natural. La sección de control de la cuenca es la desembocadura del arroyo Ludueña en el río Paraná, así la cantidad de elementos que representan la cuenca es 11855. Por otra parte, quedaron definidos 1479 elementos río que conforman una longitud de 370 km de cursos (permanentes y temporarios, canales y cunetas de ruta con capacidades de conducción relevantes) y 10376 elementos valle que aportan a los anteriores. Respecto de las vinculaciones entre celdas, de las 23370 generadas, 845 corresponden a terraplenes (longitud aproximada de 211 km), 104 a alcantarillas, 10 a vertederos y 22411 son genéricas. El coeficiente de gasto usado en puentes y alcantarillas estuvo en el entorno 0.80 a 0.95.

La estimativa de la precipitación total distribuida se realiza a partir de las cuatro estaciones pluviométricas mediante el procedimiento de polígonos de Thiessen. Posteriormente, el cálculo de la lluvia neta se efectúa utilizando el algoritmo de pérdidas de Green y Ampt (Chow et al., 1994); el que requiere conocer ciertos parámetros como la condición de humedad antecedente de la cuenca y algunas características físicas que rigen la tasa de infiltración que son función del tipo de suelo.

El grado de saturación efectiva del suelo  $S_e$  es uno de los parámetros que presenta mayor incertidumbre, por lo que Zimmermann et al. (2009) propone evaluarlo en forma simplificada con el índice de precipitación antecedente  $IPA$ . Mientras que los parámetros porosidad efectiva  $\theta_e$ , conductividad hidráulica vertical saturada  $K_v$  y potencial de succión  $\Psi$  pueden establecerse en función del tipo de suelo. Estos últimos fueron obtenidos empleando los mapas de suelos de la provincia de Santa Fe (INTA, 1981). En la cuenca se identificaron tres series de suelos, Peyrano, Roldán y Zavalla que al combinarse en diferentes proporciones dan lugar a 14 asociaciones de series de suelos, siendo éstas las que deben ser consideradas en la modelación. Para estimar los parámetros de las asociaciones se consideró el porcentaje de participación de las series dentro de cada asociación y las propiedades correspondientes a cada serie (Zimmermann et al., 2008).

Las condiciones iniciales dadas por los caudales y alturas de agua en las celdas son requeridas para iniciar la simulación, para las celdas valle en general se define el nivel de agua inicial en cero. Mientras que para la red de cursos puede hacerse una simulación previa usando el caudal base (para el arroyo Ludueña  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) para luego utilizar los valores de cota generados en las celdas río como condición de altura inicial para simulaciones posteriores. La condición de borde aguas abajo está dada por la cota de agua del cuerpo receptor del dominio en estudio (para el arroyo Ludueña es el río Paraná) el día en que se realiza la simulación o corrida del modelo.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dado que los parámetros relacionados con la condición de humedad antecedente, ciertas características físicas de los suelos y las pérdidas iniciales presentan gran incertidumbre (Vieux et al., 2004) se realizó un análisis de sensibilidad de los mismos. El procedimiento seguido se efectuó en coincidencia con Bandaragoda et al. (2004) y Riccardi et al. (2008, 2009), que ajustan distintos parámetros a través de un grupo de multiplicadores que escalan los mismos pero manteniendo las diferencias relativas entre los elementos del modelo según la información inicial.

Los parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad fueron: la conductividad hidráulica vertical saturada  $K_v$ , el potencial de succión  $\Psi$ , el grado de saturación efectiva  $S_e$  y el valor de las pérdidas iniciales  $p_{ini}$ . De acuerdo con la bibliografía citada anteriormente, se adoptó emplear un multiplicador del 30%, es decir que al valor de cada uno de los tres parámetros señalados más arriba se lo multiplica entre 0.7 y 1.3 en incrementos de 0.1. Mientras que fueron asignados valores de pérdida inicial que variaron entre 1 y 19 mm, en intervalos de 2 mm cada uno. De esta se consideraron 7 multiplicadores para cada uno de los tres parámetros indicados junto con 10 valores de pérdidas iniciales, obteniendo una cantidad de  $7 \times 7 \times 7 \times 10 = 3430$  simulaciones por cada tormenta analizada. Dado que se contó con 11 eventos para ser evaluados, fueron realizadas un total de  $11 \times 3430 = 37730$  simulaciones. Las mismas fueron realizadas en una computadora con procesador Intel Core i7 3770 de 3.4 GHz de velocidad con 8 Gb de memoria Ram.

Luego de realizadas las simulaciones, el siguiente paso consistió en seleccionar el juego de parámetros que produce los “mejores resultados”. Para ello se generaron diferentes muestras con los registros de los limnómetros activos, en total 57, durante la ocurrencia de cada una de las once

tormentas consideradas. A su vez cada una de las muestras fue subdividida en dos grupos uno de calibración y otro de testeo, que cumplieran con la siguiente condición: el número de limnigramas (sin importar a cual tormenta pertenece) de uno de los grupos no debe diferir en más del doble que el otro; es decir por ejemplo con 57 limnigramas se puede tener un grupo con 19 y el otro con 38, mientras que se descartan las muestras donde uno de los grupos tenga 18 limnigramas o menos. De esta forma quedaron constituidas 691 muestras para ser evaluadas.

Después de identificadas las muestras, debe elegirse algún criterio para evaluar el grado de “ajuste” de cada una de las 3430 simulaciones para las 691 muestras. En este sentido existe una falta de acuerdo entre los investigadores respecto de una metodología para evaluar modelos (Loague y Green, 1991; Tedeschi, 2006).

El criterio sugerido en este trabajo fue emplear diferentes índices estadísticos que permiten cuantificar distintas características entre valores observados y simulados, como la forma y el valor pico del limnigrama, entre otras. Se usaron 12 estadísticos, entre ellos la diferencia máxima relativa [%] y absoluta [m] en el pico, la raíz del error cuadrático medio [m], el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (que son los indicadores que se presentan a continuación), diferencias máximas y mínimas en el limnigrama completo, diferentes coeficientes de correlación, desvío medio y los coeficientes a y b de la recta de regresión entre niveles observados y simulados.

Posteriormente, para cada muestra se calculan los 12 estadísticos asociados a las 3430 simulaciones. En una siguiente instancia se aplica un método de ordenamiento que evalúa (nuevamente para cada una de las muestras) para cada estadístico cuál es la mejor combinación de parámetros (multiplicadores y valor de pérdida inicial) otorgando un índice asociado al mismo. Sumando cada uno de dichos índices se puede hallar cuál es la mejor combinación de parámetros asociada a cada muestra. A partir de ello, puede contabilizarse la cantidad de repeticiones de cada grupo de parámetros y el que se repite la mayor cantidad de veces será el elegido.

El grupo de parámetros hallado fue  $0.7 K_v$ ,  $0.8 \Psi$ ,  $1.3 Se$  y  $pini = 17$  mm. A continuación, en la tabla 1, se exhiben los estadísticos obtenidos empleando la situación de parámetros óptimos para los 11 eventos analizados. El signo negativo para la magnitud  $dpico$  indica que el modelo genera resultados por debajo del valor observado, mientras que el signo positivo indica lo contrario.

**Tabla 1. Estadísticos medios para parámetros óptimos, por evento**

Evento	dpico [%]	dpico [m]	CE [ad]	RECM [m]
26/10/07	- 86.1	- 0.68	- 1.11	0.19
31/10/07	- 2.5	- 0.34	- 0.03	0.50
27/11/08	+ 16.0	+ 0.11	- 0.74	0.39
29/11/08	- 36.7	- 0.74	0.50	0.53
02/02/09	+ 23.3	+ 0.43	- 1.23	0.92
10/02/09	+ 24.2	+ 0.43	0.37	0.54
20/02/09	+ 9.3	+ 0.17	0.55	0.40
03/03/09	- 23.1	- 0.54	0.34	0.61
10/10/09	- 25.7	- 0.38	- 0.28	0.42
13/03/12	- 13.3	- 0.11	0.34	0.15
19/03/12	+ 7.8	+ 0.08	0.44	0.26

Respecto del nivel máximo o pico (dpico), los resultados muestran que en 9 de los 11 eventos se alcanza una diferencia menor o igual al 25.7% entre niveles observados y simulados; estando los niveles pronosticados tanto por arriba como por debajo de los observados. Diferencia que se traduce en valores absolutos en un máximo de 0.54 m. Dicha diferencia entre valores simulados y observados en el nivel pico puede ser considerada como adecuada para requerimientos de pronóstico en alerta de crecidas.

En cuanto al coeficiente de eficiencia (CE), para la totalidad de eventos se tuvieron valores en el rango de -1.23 a 0.55 (valor medio -0.08). Mientras que la raíz del error cuadrático medio se mantuvo entre 0.15 y 0.92 m (valor medio 0.45 m) para la totalidad de eventos.

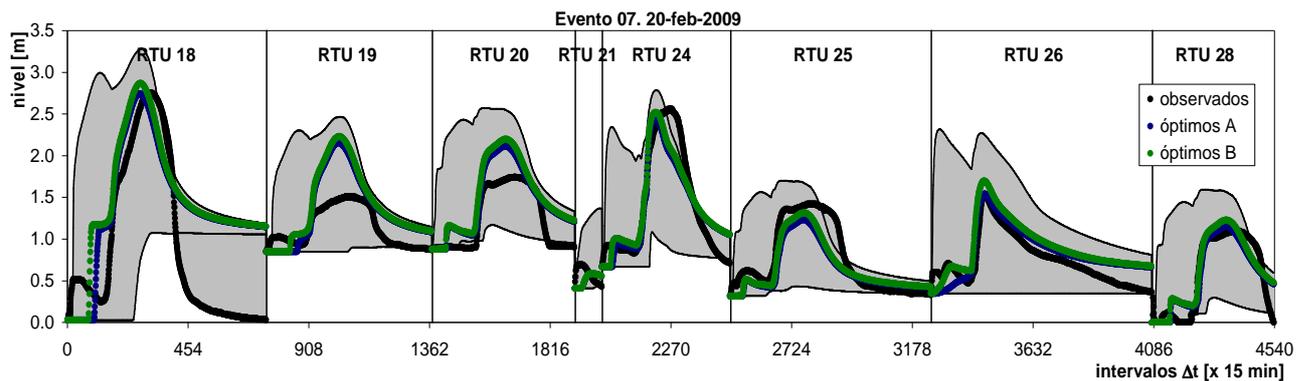
En esta etapa del análisis se presenta el comportamiento del modelo en términos de niveles para visualizar mejor los resultados. En las figuras 3 y 4 se muestran los valores observados y pronosticados para los limnigramas de los eventos 07 y 08, eventos elegidos por ser los que presentaron la mayor cantidad de estaciones limnimétricas activas.

En cada figura, en la parte superior se muestran los niveles observados y sus correspondientes pronosticados para dos situaciones denominadas óptimos A y B. La primera refiere a la combinación de parámetros que producen los mejores resultados a partir de los 12 índices estadísticos calculados considerando solamente los limnigramas asociados al evento analizado, mientras que la situación óptimo B corresponde al análisis explicado anteriormente considerando todos los limnigramas registrados.

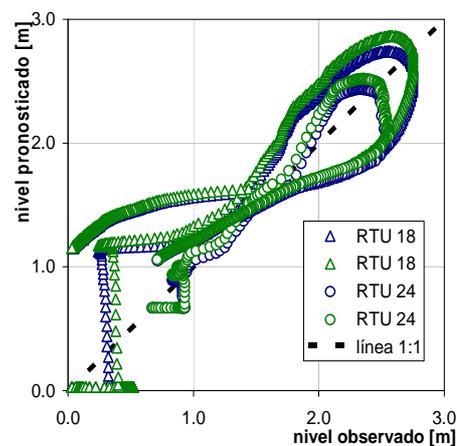
Mientras que en la parte inferior izquierda se presentan los valores de niveles y tiempos al pico observados y pronosticados con sus respectivas diferencias (absolutas y relativas). En tanto que en la parte inferior derecha de cada figura se muestra la correlación existente entre niveles observados (en el eje x) y simulados (en el eje y) para los dos limnigramas que registraron los mayores niveles. El área de color gris en las figuras representa el conjunto de limnigramas obtenidos a partir de las 3430 simulaciones efectuadas.

Respecto del evento 07 (figura 3) se aprecia una buena concordancia entre niveles observados y pronosticados, con excepción de los sensores RTU 19 y 20. Específicamente para el caso de los niveles pico se verifica que en 5 de los 8 limnigramas el nivel pico pronosticado es mayor que el observado en 0.31 m en promedio (20% de los valores medidos promedio), mientras que en los 3 restantes el nivel pico pronosticado es menor que el medido en promedio en 0.08 m (8% de los niveles medios observados). Para los tiempos de pico se observa que en 7 de los 8 limnigramas los pronósticos adelantan los mismos en promedio en unas 7 horas y media (10% de los tiempos medios pico medidos), mientras que en solamente uno se genera un retraso en el nivel pico de 9 horas (correspondiente al 164% del tiempo medido).

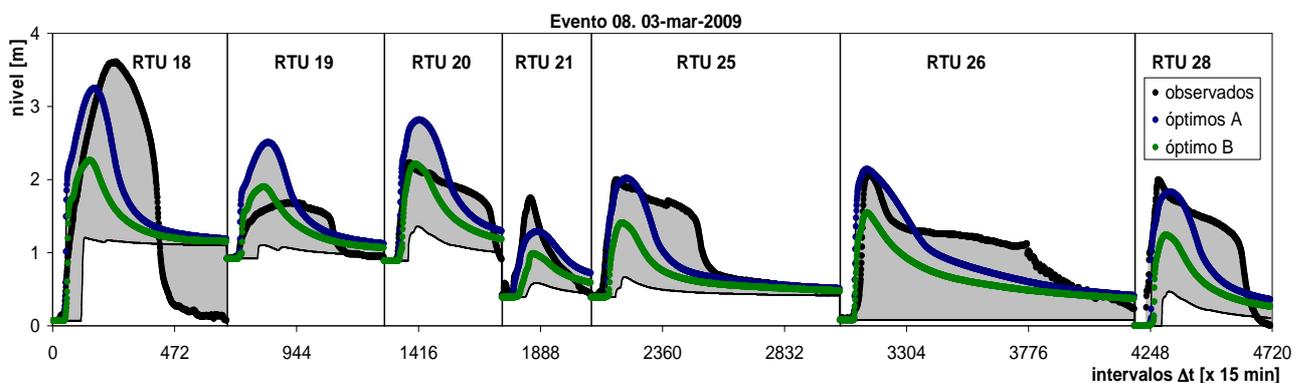
Teniendo en cuenta el evento 08 (figura 4) se verifica la adecuada concordancia entre limnigramas observados y pronosticados. Si nos referimos al nivel pico se observa que en 6 de los 7 limnigramas el modelo produce resultados con nivel pico menor que los medidos con una diferencia promedio de 0.66 m (29% de los valores pico promedio registrados), mientras que en el restante se tiene un exceso de 0.21 m respecto del nivel pico medido (12% del nivel observado). Ahora considerando el tiempo al pico, se encuentra que en 4 de los 7 limnigramas se pronostican tiempos de pico con retraso promedio del orden de las 4 horas y media (lo que representa un 19% de los tiempos medios registrados), mientras que en los restantes 3 limnigramas los resultados indican un adelantamiento temporal promedio del orden de 17 horas (30% de los tiempos observados).



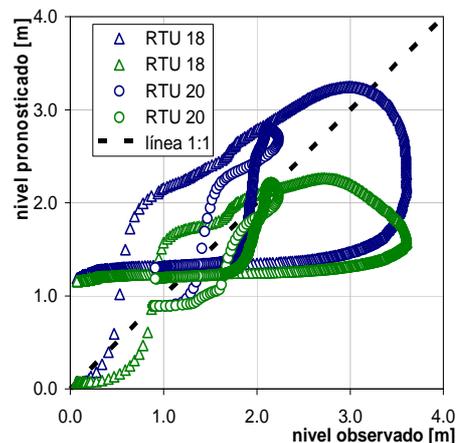
magnitud	RTU	observado	pronóstico		dif. absoluta (m)		dif. relativa (%)	
			A	B	A	B	A	B
nivel pico [m]	18	2.75	2.74	2.87	-0.01	+0.12	-0	+4
	19	1.51	2.15	2.23	+0.64	+0.72	+42	+48
	20	1.75	2.12	2.20	+0.37	+0.45	+21	+26
	21	0.70	0.59	0.59	-0.11	-0.11	-16	-16
	24	2.56	2.44	2.52	-0.12	-0.04	-5	-2
	25	1.42	1.23	1.32	-0.19	-0.10	-13	-7
	26	1.54	1.54	1.70	0.00	+0.16	0	+10
tiempo pico [hs:min]	18	75:00	66:15	67:45	-08:45	-07:15	-12	-10
	19	74:45	66:00	67:15	-08:45	-07:30	-12	-10
	20	78:00	69:00	68:30	-09:00	-09:30	-12	-12
	21	05:30	16:00	14:30	+10:30	+09:00	+191	+164
	24	62:15	49:30	49:15	-12:45	-13:00	-20	-21
	25	72:15	66:15	68:45	-06:00	-03:30	-8	-5
	26	49:45	50:00	49:30	+00:15	-00:15	+1	-1
28	79:30	67:00	68:00	-12:30	-11:30	-16	-14	



**Figura 3. Evento 07. 20-feb-2009. Niveles observados y pronosticados.**



magnitud	RTU	observado	pronóstico		dif. absoluta (m)		dif. relativa (%)	
			A	B	A	B	A	B
nivel pico [m]	18	3.61	3.25	2.27	-0.36	-1.34	-10	-37
	19	1.69	2.51	1.90	+0.82	+0.21	+49	+12
	20	2.23	2.82	2.21	+0.59	-0.02	+26	-1
	21	1.75	1.29	0.99	-0.46	-0.76	-26	-43
	25	2.00	2.02	1.41	+0.02	-0.59	+1	-30
	26	2.06	2.14	1.55	+0.08	-0.51	+4	-25
	28	2.00	1.83	1.24	-0.17	-0.76	-9	-38
tiempo pico [hs:min]	18	59:30	39:00	35:15	-20:30	-24:15	-34	-41
	19	58:45	38:30	33:30	-20:15	-25:15	-34	-43
	20	23:45	33:00	28:30	+09:15	+04:45	+39	+20
	21	27:30	32:30	29:15	+05:00	+01:45	+18	+6
	25	24:00	33:00	29:00	+09:00	+05:00	+38	+21
	26	27:30	24:45	25:30	-02:45	-02:00	-10	-7
	28	22:45	32:45	29:00	+10:00	+06:15	+44	+27



**Figura 4. Evento 08. 03-mar-2009. Niveles observados y pronosticados.**

## CONCLUSIONES

Las variables con mayor influencia en la generación de escurrimiento son: la variabilidad espaciotemporal de la precipitación, las características morfológicas de la cuenca (red hidrográfica, área, forma, pendiente, tipo de suelo, geología, cobertura), la condición de humedad antecedente del suelo al inicio del evento, las simplificaciones de los procesos asumidas por el modelo, y la selección de parámetros y metodología de calibración del mismo (Michaud y Sorooshian, 1994; Garrote y Bras, 1995; Ajami et al., 2004; Carpenter y Georgakakos, 2004; Vieux et al., 2004).

La potencialidad del modelo distribuido físicamente basado CTSS8 consiste en simular el comportamiento de cualquier punto dentro del dominio; en el contexto de alerta de crecidas puede ser consultado el nivel de agua en cualquier punto de la red hidrográfica de la cuenca. Por otra parte al haber sido desarrollado localmente es relativamente sencillo realizar modificaciones en el mismo.

La contrapartida que tienen este tipo de modelos es el requerimiento de un gran volumen de datos y el tratamiento de la información para poder constituir la representación de la cuenca sobre la que se trabaja, dado que es necesario recabar información topográfica, física, de cobertura y de uso del suelo, de las obras de arte y terraplenes, etc. Otra desventaja es el tiempo de cálculo que consume una simulación, por ejemplo para 285 horas de simulación (el evento más extenso) se requirió un tiempo de aproximadamente 2 horas con un procesador Pentium i7-3770 de 3.40 GHz.

Respecto de la longitud de datos registrados, Michaud y Sorooshian (1994) hablan de un período de 5 años de mediciones para tener una serie de tamaño relativamente grande. Si bien para la región en estudio se cuenta con una serie de datos en principio extensa (desde el año 2007), en los primeros 5 años de la misma solo pudieron extraerse 11 tormentas para trabajar, dados los numerosos fallos en el instrumental. Se aconseja realizar un mantenimiento pormenorizado de los sensores de precipitación y en particular de los medidores de niveles.

Técnicas de teledetección pueden ser empleadas para disminuir la incertidumbre en las condiciones de humedad antecedente del suelo a través del uso de imágenes satelitales. Hoy en día son de uso común y existen softwares de procesamiento que hacen relativamente fácil su tratamiento. No obstante para trabajar con este tipo de tecnologías siempre es imprescindible contar con datos de relevamiento de campo, que no siempre se encuentran disponibles.

Los resultados obtenidos en esta etapa del estudio respecto de los niveles pico son alentadores, para la totalidad de los 11 eventos se tienen diferencias medias entre valores observados y pronosticados, tanto en exceso como en déficit, del orden de 40 cm. Mientras que para los tiempos de pico, los resultados arrojan diferencias del orden de 9 horas y media de adelantamiento para el valor pronosticado respecto del observado y del orden de 7 horas para la situación inversa.

## BIBLIOGRAFIA

- Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T. y Sorooshian, S. 2004.** "Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system". *Journal of Hydrology*, 298: 112-135.
- Bandaragoda, C., Tarboton, D. y Woods, R. 2004.** "Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project". *Journal of Hydrology*, 298: 178-201.
- Bartholmes, J. y Todini, E. 2005.** "Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting". *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(4): 333-346.
- Carpenter, T. y Georgakakos, K. 2004.** "Continuous streamflow simulation with the HRCDHM distributed hydrologic model". *Journal of Hydrology*, 298: 61-79.

- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994.** "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá, Colombia, 584 p.
- Garrote, L. y Bras, R. 1995.** "A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models". *Journal of Hydrology*, 167: 279-306.
- INTA. 1981.** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Suministro de diferentes cartas de suelo.
- Liu, Z. y Todini, E. 2002.** "Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model". *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(5): 859-881.
- Loague, K. y Green, R. 1991.** "Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application". *Journal of Contaminant Hydrology*, 7: 51-73.
- Michaud, J. y Sorooshian, S. 1994.** "Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed". *Water Resources Research*, 30(3): 593-605.
- MR. 2014.** Municipalidad de Rosario. Acceso internet: [www.rosario.gob.ar](http://www.rosario.gob.ar)
- Plate, E. 2003.** "Regional Consultation Europe – Report for EWC II". Second International Conference on Early Warning. 28 – 29 July 2003, Potsdam, Germany, 38 p.
- PSF 2014.** Provincia de Santa Fe. Acceso internet: [www.santafe.gob.ar](http://www.santafe.gob.ar)
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F. y Seo, D. 2004.** "Overall distributed model intercomparison project results". *Journal of Hydrology*, 298: 27-60.
- Riccardi, G. 1992.** "Un Modelo Matemático Cuasi-Bidimensional de Celdas para escurrimientos cuasi-dinámicos". Proc. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD, Cartagena, Colombia.
- Riccardi, G. 1997.** "The flood propagation modelling for the management of development on flood plains of Rosario Region, Argentina". en *River Flood Hydraulics*, (J. Watts, ed.), HR Wallingford Ltd, UK, 127-136.
- Riccardi, G. 2001.** "Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos". Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba, Argentina.
- 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, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina
- Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Mancinelli, A., Scuderi, C., Rentería, J. y García, P. 2008, 2009.** "Modelo de Simulación a tiempo real en Sistema de Alerta Hidrológico en las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo". Informes Técnicos I, II, III y IV. Convenio entre el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente y el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E. y Trivisonno, F. 2013.** "Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real". *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. IV, núm. 1, enero-marzo 2013, p. 83-105. México.
- Scuderi, C., Riccardi, G. y Zimmermann, E. 2007.** "Predicción de crecidas en tiempo real para un curso de llanura basada en un modelo hidrológico distribuido de celdas." XXI Congreso Nacional del Agua. San Miguel de Tucumán. Tucumán. Mayo 2007. 14 p. Publicación de Trabajo Completo en CD. Tema: Planificación, T238.
- Scuderi, C., Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H., Rentería J. y Ciabattari, M. 2009.** "Sistema de alerta a tiempo real en la zona del Gran Rosario. Resultados Preliminares." XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut, Noviembre 2009, 11 p.
- Scuderi, C., Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H., Rentería, J. y Ciabattari, M. 2010.** "Hacia la constitución de un Sistema de Alerta Hidrológico en el área del Gran Rosario. Experiencias Aprendidas". Primer Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires. ISSN: 978-987-543-392. Editorial Martin, Mar del Plata. pp. 201-208. Setiembre 2010.
- Scuderi, C., Riccardi, G. y Zimmermann, E. 2013.** Pronóstico de niveles para alerta de crecidas en el Gran Rosario, Santa Fe, Argentina. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXIV, No. 2, May-Ago 2013, p. 88-102. Centro de Investigaciones Hidráulicas. La Habana. Cuba.
- SMN. 2014.** Servicio Meteorológico Nacional. Datos meteorológicos suministrados en formato digital.
- Tedeschi, L. 2006.** "Assessment of the adequacy of mathematical models". *Agricultural Systems*, 89:225-247.
- Tucci, C. y Bertoni, J. (organizadores). 2003.** "Inundações urbanas na América do Sul". Ira. ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2003, 150 p.
- Vieux, B., Cui, Z. y Gaur, A. 2004.** "Evaluation of a physics-based distributed hydrologic model for flood forecasting". *Journal of Hydrology*, 298: 155-177.
- Zimmermann, E., Scuderi, C., Riccardi, G., Stenta, H., Basile, P., García, M. y Rentería, J. 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., Basile, P., López, C., Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C. y Rentería, J. 2009.** "Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario", XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut, Argentina, 11 p.