



Pronóstico de niveles para alerta de crecidas en el Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

Carlos Marcelo Scuderi. Depto. de Hidráulica. Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nacional de Rosario. Rosario. Santa Fe. Argentina.

e-mail: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

Gerardo Adrián Riccardi. Depto. de Hidráulica. Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nacional de Rosario. Rosario. Santa Fe. Argentina.

e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

Erik Daniel Zimmermann. Depto. de Hidráulica. Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nacional de Rosario. Rosario. Santa Fe. Argentina.

e-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Con el objeto de reducir la vulnerabilidad ante inundaciones en el Gran Rosario (Santa Fe, Argentina) la Autoridad Hídrica Provincial gestionó la instalación de una red para registro de variables hidrológicas, junto con el desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles. En este trabajo se presentan el modelo matemático distribuido empleado y algunos resultados parciales. El modelo consta de cuatro módulos: generación de lluvia, determinación del estado de humedad antecedente del suelo, cálculo de pérdidas iniciales, y simulación de escurrimiento superficial y pronóstico de niveles. El desempeño del modelo fue satisfactorio en términos de comparación entre limnigramas observados y pronosticados. En eventos de mediana magnitud se evidencia la sensibilidad de los resultados al estado de humedad antecedente del suelo, mientras que para eventos importantes los resultados presentan mayor certidumbre.

Palabras clave: inundaciones, modelos matemáticos distribuidos, pronóstico de niveles, sistemas de alerta hidrológico.

Levels forecast for flood warning in Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

ABSTRACT

In order to reduce flooding vulnerability in Rosario city and surroundings (Santa Fe, Argentina) the Provincial Water Authority managed the installation of a telemetric network to monitoring hydrological variables, along with the development of a river levels forecasting model. This paper presents the structure of the mathematical model used and some partial results. The model's architecture is based on four modules: rainfall generation, estimation of antecedent soil moisture conditions, initial loss and infiltration calculation, and runoff simulation and levels forecast. The performance of the proposed model was successful in terms of comparison between measured and forecasted levels. Medium-size events evidence the sensitivity of the results to the antecedent soil moisture conditions; while the results for important rain events have greater certainty.

Keywords: distributed mathematical models, floods, hydrological alert systems, levels forecast.

INTRODUCCIÓN

La región de la Llanura Pampeana (centro-este de la República Argentina) posee fuentes seguras de agua para abastecimiento humano junto a condiciones para el desarrollo agrícola-ganadero. A través de los años la migración de la población rural hacia las ciudades, en procura de un mejor nivel de vida, hizo que casi el 90% de la población viva en ciudades, incrementando la presión sobre estos sistemas. Este factor sumado a otros hechos como la impermeabilización de los suelos debido a prácticas agrícolas intensivas y al cada vez más creciente negocio inmobiliario, hacen que las metrópolis presenten mayor vulnerabilidad frente a las inundaciones, cobrando mayor importancia la protección de vidas humanas y de bienes materiales.

Las medidas a tomar frente a las inundaciones pueden ser estructurales y no estructurales. Las primeras actúan sobre los fenómenos durante su formación y ocurrencia, modificando las características hidrológicas e hidráulicas de la cuenca, mientras que las otras plantean la convivencia del hombre y el agua a través de la disminución de los daños producidos por las inundaciones. Los sistemas de alerta contra inundaciones pertenecen al segundo grupo, siendo su objetivo el seguimiento y pronóstico de eventos que pudieran ocasionar riesgo para la población, ayudando en los procesos de toma de decisión.

Los sistemas de alerta, generalmente, se componen de una red de sensores que recolectan datos hidrológicos, un sistema de transmisión de datos desde cada sensor hasta un centro de control, un modelo matemático de pronóstico de niveles y opcionalmente un modelo de predicción de lluvias. Los sensores registran principalmente, valores de precipitación y nivel de agua en secciones particulares de los cursos, permitiendo conocer en todo momento el estado hidrológico de la cuenca. La transmisión de los datos puede realizarse de diferentes formas (radio, telefonía, fibra óptica o satelital), siendo función del costo y fiabilidad del soporte de transmisión. El centro de control es el lugar físico donde se halla la infraestructura necesaria para recibir, almacenar y manipular los datos recogidos por los sensores y donde se realizan los pronósticos a través del uso de un modelo matemático de crecidas. Dos cualidades principales demandadas a un sistema de alerta son la precisión en el cálculo de niveles y la rapidez de respuesta, ya que su objetivo fundamental es la anticipación a la ocurrencia del evento.

Los modelos matemáticos utilizados en alerta de crecidas pueden ser físicamente basados o de caja negra (Hsu et al. 2003). Los primeros consiguen representar con mayor rigor los mecanismos internos que se desarrollan en la cuenca durante el transcurso de una crecida (Ogden et al. 2000). Cuando además son distribuidos, el nivel de detalle que aportan estos modelos se consigue a expensas de la gran cantidad de datos requeridos para su funcionamiento, del recurso computacional necesario y del incremento en el tiempo de cálculo, tiempo que en situaciones es escaso ante un posible alerta. En contrapartida, los modelos de caja negra, al no considerar las leyes físicas que intervienen en los fenómenos, relacionan la precipitación caída con el nivel de agua en los cursos de forma muy simplificada (Kothyari and Singh 1999). Respecto de la velocidad de cálculo, los modelos de caja negra pueden resultar más eficientes que los físicamente basados, ya que por no requerir de una elevada cantidad de parámetros para su funcionamiento, otorgan resultados en un tiempo menor. La principal falencia de estos modelos es que no permiten considerar la variabilidad espacial de las precipitaciones ni la heterogeneidad de la cuenca.

Aplicaciones prácticas de modelos distribuidos a pronóstico de crecidas fueron hechas por Cabral et al. (1990) citados por Bras and Garrote (1995) utilizando un MDT de 400 m x 400 m de tamaño de grilla para una subcuenca del río Arno (Italia) de 840 km². La precipitación fue

medida con 6 pluviómetros dentro de la cuenca y 24 pluviómetros externos, utilizando 5 tormentas para calibración y 5 para validación. Hsu et al. (2003) aplicaron un modelo distribuido, con corrección por cada paso de tiempo, a pronóstico de crecidas del río Tanshui (Taiwán) obteniendo valores del coeficiente de determinación de $R^2 = 0.95$ y de la raíz del error cuadrático medio de $RMSE = 0,41$ m para paso de tiempo de 3 h. Kothyari and Singh (1999) modelaron una cuenca de la India de 17157 km^2 , con un modelo concentrado, tomando 6 eventos para calibración y 4 para validación, logrando resultados con valores de $R^2 = 0.79$ y $RMSE = 837 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para calibración y $R^2 = 0.79$ y $RMSE = 314 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para validación. Localmente, Scuderi et al. (2006, 2007) utilizaron un modelo distribuido para pronóstico de crecidas del arroyo Ludueña con celdas de $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$, obteniendo errores de $\pm 20 \%$ en niveles.

El objetivo de este trabajo es presentar la estructura del modelo de pronóstico de niveles, su puesta en operación, calibración y aplicación durante eventos lluviosos a la cuenca del arroyo Ludueña (provincia de Santa Fe, Argentina). A la fecha de cierre de este trabajo han sido analizadas un grupo de tormentas de mediana importancia ($P < 120 \text{ mm}$).

CUENCA EN ESTUDIO

Localizada en el sureste de la provincia de Santa Fe, República Argentina, la cuenca del arroyo Ludueña se sitúa entre los paralelos $32^\circ 45'$ y $33^\circ 08'$ S y los meridianos $61^\circ 04'$ y $60^\circ 39'$ O. La red hídrica principal, con una longitud de 140 km , está compuesta por el arroyo Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat con sus tributarios. En la figura 1 se representa el límite de cuenca con línea blanca, la red hídrica principal en azul y los terraplenes en negro.

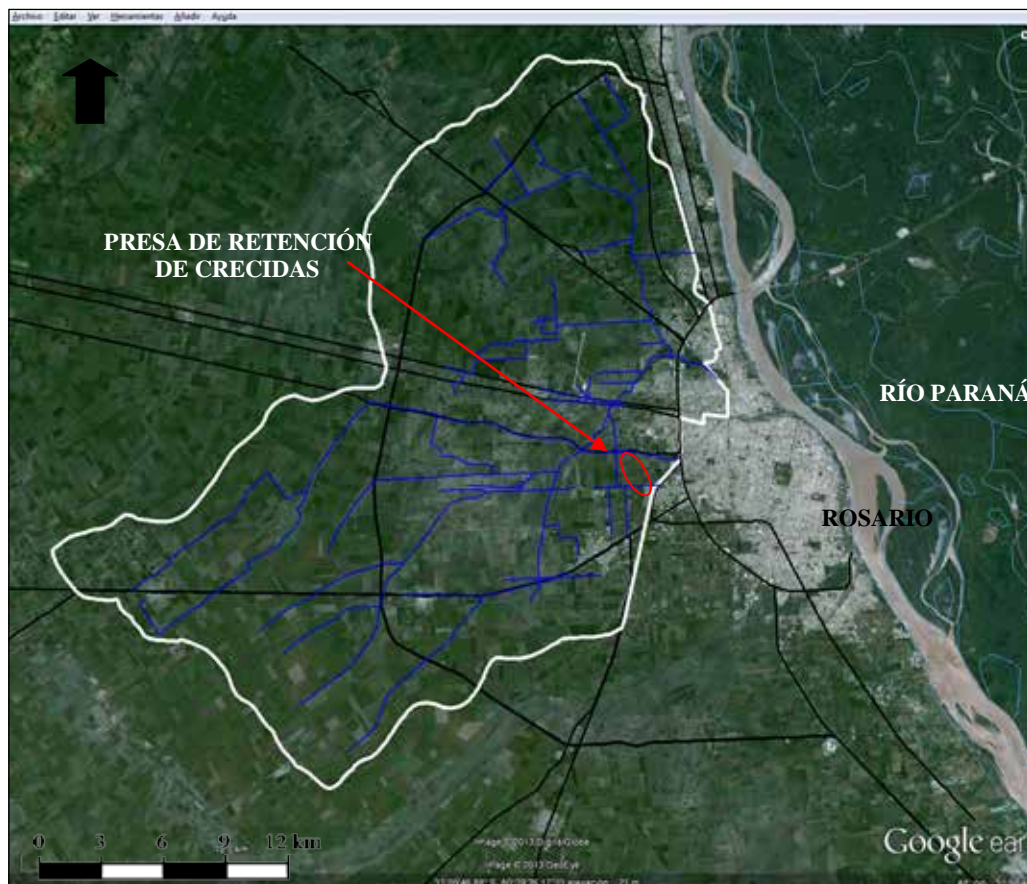


Figura 1. Cuenca del arroyo Ludueña. Límite, cursos principales y terraplenes

En épocas lluviosas se agregan gran cantidad de pequeños cursos incrementando la longitud del sistema hasta 370 km. El área de aporte es de 740 km² y su elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. El caudal base medio diario del arroyo Ludueña es de 0,5 m³.s⁻¹, alcanzando 80 m³.s⁻¹ en crecidas ordinarias y 400 m³.s⁻¹ en eventos extraordinarios con recurrencia mayor que 50 años. El suelo predominante es de tipo arcilloso limoso con permeabilidad moderada a moderadamente lenta y pendiente media de 2.5 m.km⁻¹. La precipitación media anual es de 960 mm, registrándose el 68% en el período primavera-verano (octubre a marzo). La superficie ocupada por los centros urbanos se estima en 35 km² (5% del área total), mientras que la región se encuentra atravesada por numerosas vías de comunicación, tanto viales como ferroviarias, con una extensión aproximada de 220 km. La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose la producción de soja, maíz y trigo.

En el Gran Rosario se producen inundaciones periódicas, entre éstas cabe destacar el desborde del arroyo Ludueña en 1986 que afectó 2000 ha y 80000 habitantes. Esto ha llevado a las autoridades a ejecutar un conjunto de obras de saneamiento, llevando la capacidad de evacuación del sistema de 75 m³.s⁻¹ a 285 m³.s⁻¹ en un lapso de 50 años. Conjuntamente, en el año 1996 se puso en servicio una presa de retención de crecidas (figura 1) que regula el 53% del área de la cuenca. La creciente afectación de las inundaciones sobre la ciudadanía y la propiedad han alertado a las autoridades de que el saneamiento de la región no puede efectuarse solamente con obras estructurales, por lo que se comenzó a estudiar el empleo de obras no estructurales, como la regulación del uso del suelo por medio de mapas de inundación (Riccardi et al. 2001) citados por Scuderi et al. (2007).

Entre el 26 y 30 de marzo del 2007, la cuenca del arroyo Ludueña recibió un evento extraordinario (365 mm en 5 días), con una recurrencia mayor que 500 años. Este evento contribuyó a la firma de un convenio entre el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de Rosario y la autoridad provincial del agua (Riccardi et al. 2008). En dicho convenio se estudiaron las características físicas e hidráulicas de la cuenca: nuevos canales, obras de arte y caminos, canales clandestinos y la modificación del uso del suelo (emprendimientos urbanísticos y ampliación de la frontera agrícola). Estos dos últimos aspectos impermeabilizan el suelo y según Zimmermann (1995) citado en Scuderi et al. (2007) parecieran disminuir los tiempos de concentración de la cuenca. La actualización de las condiciones físicas e hidráulicas de la cuenca y la instalación de una red de sensores de medición de variables hidrológicas junto con el empleo de un modelo de pronóstico de niveles, constituyen el punto de partida para la implementación de un Sistema de Alerta contra inundaciones a tiempo real, tarea que significó la segunda etapa del convenio.

Red telemétrica de sensores

A comienzos del año 2007 fueron instalados 4 sensores pluviométricos (marca Global Water, modelo RG200, con boca de 6 pulgadas de diámetro y resolución de 0,25 mm) y 11 limnimétricos (transductor de presión sumergible, marca Global Water, modelo WL400, rango de 0 a 30 pies y precisión de ±0,1% de la escala completa), la localización de los mismos dentro de la cuenca se presenta en la figura 2. Además de estos instrumentos, fue emplazada una estación meteorológica (Zavalla, ver figura 2a) para monitoreo de variables climáticas rutinarias como radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento. En correspondencia con la localización de los pluviómetros y algunos de los sensores limnimétricos son medidos también la profundidad del manto freático y la humedad del suelo. Debido a que los datos se encuentran accesibles sin tratamiento alguno, se hace necesario estudiar su consistencia.

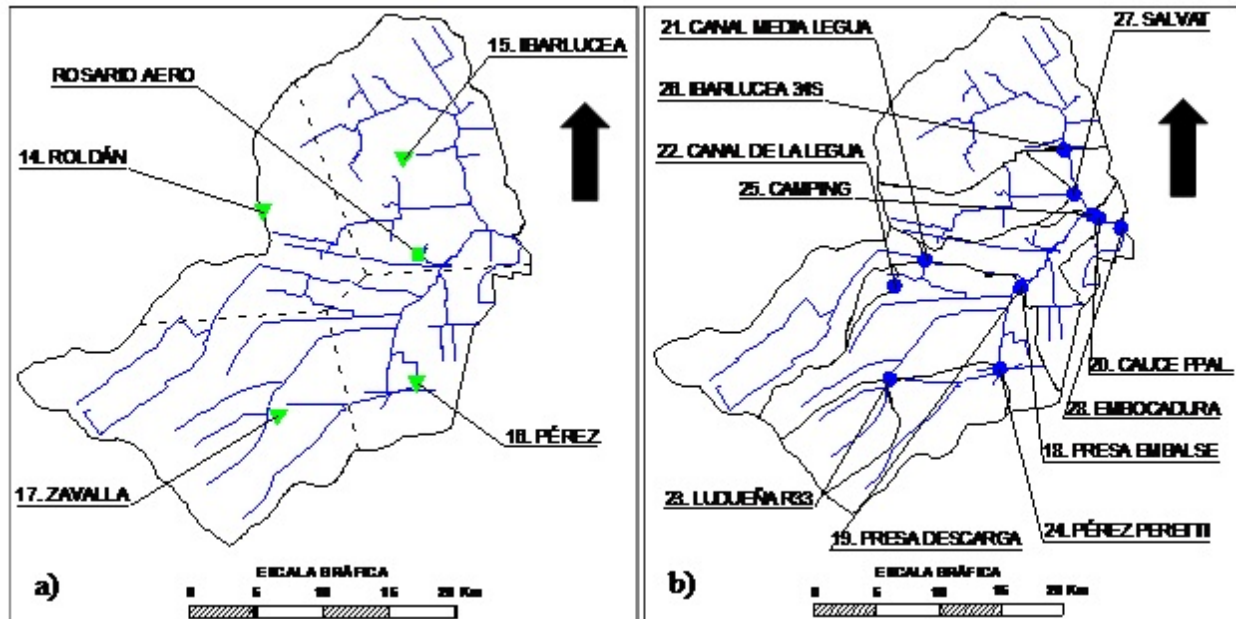


Figura 2. Red telemétrica de sensores: a) pluviómetros y b) limnímetros

Los datos de los pluviómetros Roldán, Ibarlucea, Pérez y Zavalla, inicialmente registrados cada 15 minutos, fueron agregados a nivel diario y, posteriormente, comparados con la estación de testeo Rosario Aero (Servicio Meteorológico Nacional), empleando el método de dobles acumulaciones. El resultado arrojó que durante el período evaluado, 01/07/2007 a 31/07/2009, las estaciones pluviométricas miden sistemáticamente por debajo de la estación de testeo (entre un 24% y 14% en menos). Por otra parte, para los sensores limnimétricos fue estudiado el comportamiento de cada uno de ellos durante la ocurrencia de los principales eventos registrados en el período de estudio. Cabe hacer aquí una diferencia en cuanto al funcionamiento de los sensores pluviométricos y limnimétricos; si bien los primeros poseen un registro continuo y valores medidos físicamente posibles, los segundos en cambio han presentado algunas fallas durante la ocurrencia de las tormentas. Por otra parte, es importante destacar los hechos de vandalismo a que fueron sometidos varios de los sensores limnimétricos como rotura de cables, sustracción de las fuentes de alimentación o incluso de los propios sensores.

MODELO DE PRONÓSTICO DE NIVELES

El modelo de pronóstico de niveles fue desarrollado en el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario (Riccardi et al. 2008) en el marco de un convenio celebrado entre la autoridad hídrica provincial y la mencionada institución. El modelo se basa en un desarrollo de Riccardi (2000) escrito en lenguaje de programación Fortran y una interfaz gráfica amigable tipo “ventanas” entre modelo y operador, que ofrece una manera ágil y sencilla para el ingreso de datos y la posterior interpretación de resultados, propuesta por Rentería y Stenta (2003) citados en Stenta (2008). A continuación se esquematiza la estructura modular del modelo (figura 3) y se describe cada módulo en particular.

Módulo 1: generador de precipitación distribuida

Genera para cada unidad de discretización de la cuenca el hietograma total correspondiente, aplicando la metodología de polígonos de Thiessen en función de los pluviómetros activos, para asignar el valor de lluvia puntual total medido con intervalo de 15 minutos a cada elemento de la

cuenca. Permite tanto el ingreso de datos de los 4 pluviómetros instalados en la cuenca, como de pluviómetros externos a la misma en caso de falla de alguno. El ingreso de los datos puede realizarse tanto en forma automática, a través de la recepción de datos a medida que son registrados por la red de sensores, como en forma manual (Riccardi et al. 2008). Este módulo también realiza el chequeo de los datos suministrados, como por ejemplo el intervalo de tiempo de registro, la aparición de datos inconsistentes, o la indicación de períodos con falta de datos.

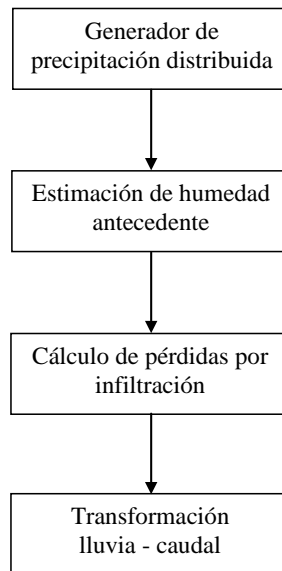


Figura 3. Esquema modular del modelo de pronóstico

Módulo 2: estimador de la condición de humedad antecedente de la cuenca

El conocimiento del estado de humedad antecedente en la cuenca al inicio de un evento constituye una de las mayores incertidumbres para realizar el pronóstico de niveles; sin embargo en situaciones extremas, tanto de sequía como de lluvias prolongadas, la incertidumbre de esta variable disminuye notoriamente. Para este trabajo, se propone utilizar el Índice de Precipitación Antecedente (*IPA*), un parámetro indicador del estado de humedad de la cuenca que puede ser vinculado al grado de saturación efectivo *Se* (Zimmermann et al. 2009). El *IPA* es función de la lluvia caída el día anterior y de un coeficiente de decaimiento *k* que depende del día del año, ecuaciones (1) y (2) :

$$IPA_n = P_n + IPA_{(n-1)}.k_n \tag{1}$$

$$k_n = k_1 + (k_2 - k_1) \cdot \frac{e^{-\frac{IPA_{(n-1)}}{365}}}{e^{-\frac{IPA_{(n-1)}}{365}} + 1} \tag{2}$$

donde *IPA_n* es el índice de precipitación antecedente para el día *n* [mm]; *P_n* es la precipitación correspondiente al día *n* [mm]; *k_n* es un coeficiente de decaimiento función de la pérdida por evapotranspiración; *k₁*=0.980 y *k₂*=0.995 son constantes ajustadas a través del balance hídrico medio anual de la cuenca y *n* indica el día del año. Los valores *k₁* y *k₂* fueron ajustados de modo que, para una condición frecuente de *IPA* se tenga un decaimiento de 5.0 mm.día⁻¹ para verano y de 1.3 mm.día⁻¹ para invierno, aproximadamente equivalentes a la tasa media de evapotranspiración medida en la zona. Se fijaron como límites del *IPA* valores de 114 mm y 288

mm, correspondientes a la lámina equivalente al punto de marchitez permanente (R_{PMP}) y a la lámina equivalente de saturación (R_{SAT}) respectivamente. Respecto de las condiciones de almacenamiento en el suelo, se definieron los siguientes parámetros característicos: profundidad radicular de cultivo de 600 mm (preponderancia de soja); humedad volumétrica para la capacidad de campo $q_{CC}=0.36$; humedad volumétrica para el punto de marchitez permanente $q_{PMP}=0.19$ y humedad volumétrica para la saturación $q_{SAT}=0.48$ (Zimmermann et al. 2009).

Módulo 3: cálculo de pérdidas por infiltración

Para considerar el término de infiltración durante una tormenta, se adoptó el método de Green y Ampt, el cual permite calcular la tasa de infiltración f [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$] y la profundidad acumulada de agua infiltrada en función del tiempo F [mm] a partir de los parámetros: (a) conductividad hidráulica vertical del suelo K [$\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$], (b) potencial de succión del suelo en el frente húmedo ψ [mm], (c) porosidad h , y (d) humedad inicial q_i . Las expresiones de la infiltración f y de la profundidad de agua infiltrada F pueden consultarse en Chow et al. (1994).

La conductividad hidráulica vertical K media fue determinada con diferentes cartas de suelo que fueron digitalizadas y georreferenciadas, identificando 14 asociaciones en la cuenca; el valor de K promedio ponderado para toda la cuenca hallado fue del orden de $100 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Zimmermann et al. 2008). Este parámetro es función de la composición textural y de las características fisico-químicas del suelo. La metodología para estimar la conductividad de cada asociación se presenta en Zimmermann et al. (2008) pero básicamente se realizó para cada una de ellas una ponderación de las diferentes conductividades asociadas al espesor de cada estrato.

El potencial de succión ψ fue calculado utilizando los parámetros de la curva de Van Genuchten a y n , obtenidos a partir de datos de composición textural y características fisico-químicas de cada asociación según ecuación (3) (Rawls et al. 1983 citado en Zimmermann et al. 2009):

$$\psi = \frac{2(n-1)+3}{2(n-1)+2} \cdot \frac{I}{2\alpha} \quad (3)$$

En el cálculo de la variación de humedad Dq intervienen la porosidad efectiva q_e definida como el contenido máximo de humedad posible (que es igual a la diferencia entre la porosidad h y la humedad residual del suelo q_r) y el grado de saturación efectiva Se . La variación de humedad del frente puede escribirse como (Zimmermann et al. 2009):

$$Dq = (1 - Se)q_e = (1 - Se)(h - q_r) \quad (4)$$

$$Se = \frac{q - q_r}{h - q_r} \quad (5)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (5), Zimmermann et al. (2009) propusieron vincular el Índice de Precipitación Antecedente (IPA) con el grado de saturación efectivo Se mediante ecuación (6):

$$Se = \frac{IPA_n - R_{PMP}}{R_{SAT} - R_{PMP}} \quad (6)$$

Módulo 4: transformación lluvia - escurrimiento superficial

El modelo utilizado para pronóstico de niveles es un modelo hidrológico-hidráulico distribuido desarrollado por Riccardi (2000) y denominado CTSS8, basado en el esquema de celdas interconectadas propuesto por Cunge. El mismo permite analizar el escurrimiento cuasi-bidimensional, reproduciendo los procesos hidrológicos e hidráulicos del fenómeno físico de transformación lluvia escurrimiento, siendo posible aplicarlo en ambientes rurales como urbanos. Considera en cada unidad de discretización los procesos de precipitación, pérdidas por intercepción, infiltración, almacenamiento superficial, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. El escurrimiento superficial resultante puede ser propagado por ríos, canales, valles de inundación, calles y diferentes estructuras hidráulicas como puentes o vertederos, usando diferentes leyes, desde la aproximación cinemática de la ecuación de cantidad de movimiento hasta una aproximación a la ecuación dinámica (Riccardi 2000). La fortaleza del modelo de permitir el cálculo de niveles en cada elemento del dominio y de caudales y velocidades en cada vinculación, tiene como contrapartida una gran cantidad de información para su utilización: topografía de la cuenca; características geométricas, físicas e hidráulicas de los cursos; terraplenes y obras de arte; coeficientes de rugosidad de Manning para cursos y valles; nivel de agua inicial en cada celda del dominio; hietograma neto de la tormenta y condición de borde en el punto de cierre de la cuenca.

La información topográfica se volcó en un Modelo Digital del Terreno (MDT) al que se le efectuaron sucesivas mejoras (Riccardi 2000; Stenta 2008; Riccardi et al. 2008). Diferentes fuentes de información fueron utilizadas: planos, relevamientos de campo con GPS, cartas topográficas, planos catastrales, etc. Para la identificación de canalizaciones clandestinas se trabajó con Google-Earth conjuntamente con recorridos de campo. La información que estaba en formato papel fue escaneada y georreferenciada al sistema Gauss Krugger Faja 5 (Posgar 94), posteriormente se vectorizaron las curvas de nivel y finalmente, usando un software de interpolación, se generó una grilla cuadrangular equiespaciada de 250 m x 250 m (figura 4). Algunos valores característicos del MDT para la cuenca modelada son: a) dominio definido por 11855 elementos y 23370 vinculaciones; b) cursos de agua representados mediante 1510 elementos y terreno natural representado por 10345 elementos; y c) 845 vinculaciones terraplén y 114 vinculaciones alcantarillas y puentes.

Respecto de las características geométricas, base de fondo (*BF*) y profundidad (*P*), de los principales cursos de la cuenca, se tiene para el arroyo Ludueña, *BF* desde 8 a 25 m y *P* desde 3,5 a 5,0 m; para el canal Ibarlucea, *BF* entre 7 y 35 m y *P* entre 1,5 y 5,0 m; y para el canal Salvat, *BF* desde 2 a 3 m y *P* desde 1,5 a 2,5 m. El coeficiente de rugosidad de Manning utilizado para los cursos fue propuesto entre 0,028 y 0,033, mientras que para los elementos valle el mismo estuvo entre los valores de 0,080 y 0,120 (Riccardi 2000; Stenta 2008). Por otra parte, la creciente presión antrópica ejercida sobre la cuenca a través de la gran cantidad de terraplenes construidos afecta directamente al funcionamiento de la misma, ya que estos taludes constituyen una barrera no natural a la escorrentía superficial, actuando al mismo tiempo como almacenadores de flujo. En contrapartida, la ejecución de canales particulares para la evacuación rápida del agua de los campos productivos sin el consentimiento de la autoridad hídrica, produce la aceleración del escurrimiento hacia aguas abajo disminuyendo el tiempo de concentración. Para la puesta en marcha del modelo se requiere fijar el nivel de agua inicial en cada celda, que en general se define para las celdas valle como 0. Mientras que para los cursos puede hacerse una ejecución previa del programa introduciendo el caudal base del arroyo Ludueña ($0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) para, posteriormente, utilizar los valores de cota en las celdas de los cursos obtenidos en dicha

ejecución como condición de altura inicial. Además de estas condiciones iniciales es necesario definir la condición de borde en la sección aguas abajo de la sección de control de la cuenca, que en este caso se encuentra representada por la cota del río Paraná.



Figura 4. Modelo digital del terreno de la cuenca del arroyo Ludueña

Protocolo de trabajo ante el inicio de una tormenta

El protocolo de trabajo para pronóstico de niveles puede ser descrito según: (a) adquisición desde una red interna de los datos de los sensores pluviométricos y posterior consistencia de los mismos; (b) determinar a partir de las estaciones anteriores, por metodología de Thiessen, la lámina total de lluvia correspondiente a cada elemento del dominio de la cuenca; (c) estimar la condición de humedad antecedente del suelo, a partir del índice de precipitación antecedente (*IPA*), (d) determinar las pérdidas como suma de un término de pérdidas iniciales constante más un término de infiltración calculado por medio del algoritmo de Green y Ampt; (e) calcular la lámina de lluvia neta en cada elemento del dominio de la cuenca; (f) asignar los niveles iniciales de agua en cada elemento del dominio de la cuenca; (g) identificar la condición de borde aguas abajo de la sección de control; (h) ejecutar el modelo matemático para pronóstico de niveles, considerando que a partir del inicio del pronóstico de niveles la lluvia es cero, es decir en este trabajo no se considera pronóstico de lluvia; (i) comparación en secciones características entre niveles pronosticados y registrados por los limnómetros; (j) en forma optativa, planteo de otras condiciones de humedad antecedente, nuevas ejecuciones del modelo matemático y comparaciones.

Selección de tormentas y generación de lluvia neta

Durante el período 01/07/2007 al 31/07/2009 no se tuvieron episodios de magnitud que produjeran inundaciones importantes en la cuenca. Para el desarrollo del trabajo, que consiste en

el pronóstico de niveles con orientación a la implementación de un sistema de alerta contra inundaciones, fueron seleccionados los 5 mayores eventos ocurridos durante el periodo mencionado. Para eventos menores a los elegidos, los niveles registrados en correspondencia con los limnómetros permanecieron muy por debajo de los niveles de desborde, razón por la cual los mismos no revisten mayor importancia. Los valores registrados por cada sensor (y de la estación Rosario Aero) son mostrados en la tabla 1. A partir de estos datos y de su posterior corrección se construye el hietograma total con intensidades de precipitación cada 15 minutos.

Tabla 1. Eventos seleccionados (en mm)

Fecha	Rosario	Roldán	Ibarlucea	Pérez	Zavalla
29/11/2008	116	7	46	80	53
02/02/2009	88	57	38	95	102
10/02/2009	62	60	52	89	70
20/02/2009	86	66	65	62	87
03/03/2009	111	85	86	97	89

Para acotar la incertidumbre en la cuantificación de la tasa de infiltración fueron testeadas algunas metodologías. El propósito de ello es la mejora en la comparación entre volúmenes calculados por el modelo de pronóstico y volúmenes excedentes escurridos que son medidos indirectamente en función de los niveles registrados por los sensores (Riccardi et al. 2008). Entre estas propuestas se mencionan: a) diferentes funciones de pedotransferencia para definir los parámetros conductibilidad hidráulica vertical del suelo K y potencial de succión del suelo en el frente húmedo ψ ; b) planteo de valores alternativos de la lámina equivalente al punto de marchitez permanente (R_{PMP}) y de la lámina equivalente de saturación (R_{SAT}) asociadas al cálculo del grado de saturación efectiva del suelo Se ; c) pérdida inicial por interceptación y almacenamiento superficial variable entre 3 y 12 mm; y d) aplicación de un coeficiente de modificación para los parámetros K , ψ y Se , con variación en un rango de $\pm 25\%$. La mejor estimativa de niveles se obtuvo adoptando los siguientes parámetros: pérdida inicial de 9 mm; coeficiente de afectación para K igual a 0,80 y coeficiente de afectación para ψ de 0,90.

En la tabla 2 se presentan para cada evento, la precipitación en Rosario Aero, la precipitación media en la cuenca en función de los sensores, la condición de humedad antecedente a través del (IPA), y los valores mínimo y máximo de precipitación neta asociados a la aplicación de las propuestas mencionadas. Para realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros K y Se , se optó por multiplicar a cada uno de ellos por 3 factores: (0,75) (1,00) (1,25) y, a partir de las diferentes combinaciones entre ellos fueron obtenidas nueve alternativas iniciales (que involucran parámetros de permeabilidad y condiciones iniciales), a ser aplicadas al pronóstico de niveles asociado a cada evento.

Tabla 2. Precipitación media, IPA y Pneta para los eventos seleccionados (en mm)

Fecha	Rosario	Pmedia	IPA	Pneta min/max
29/11/2008	116	50,2	202	11 / 19
02/02/2009	88	74,1	155	11 / 18
10/02/2009	62	66,2	215	11 / 19
20/02/2009	86	72,4	250	12 / 21
03/03/2009	111	88,5	263	23 / 39

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada uno de los eventos de precipitación elegidos (tabla 1) fue asociado con las nueve alternativas iniciales consideradas para “alimentar” al modelo y una vez ejecutado el mismo, se obtuvo una familia de 9 pronósticos por evento; posteriormente estos pronósticos fueron comparados con los niveles medidos. Por motivo de espacio solamente se presentan los resultados obtenidos para dos eventos, los ocurridos con fecha 10/02/2009 y 03/03/2009. En las tablas 3 y 4 se indican los niveles máximos y tiempos al pico medidos y pronosticados junto con los entornos de trabajo de estas variables y la condición inicial que ofrece el mejor ajuste. En la figura 5 se presentan, a modo de ejemplo, los limnigramas observados y pronosticados: la parte izquierda corresponde al evento del 10/02/2009 y la derecha al día 03/03/2009.

En dicha figura, se representan los limnigramas medidos en línea continua, los pronosticados que mejor ajustan con cuadrados y los límites superior e inferior asociados con las 9 alternativas iniciales en línea discontinua (a veces no aparecen visibles por estar superpuestos con algún otro limnigrama). Aunque los pronósticos no fueron realizados en tiempo real, el protocolo de trabajo descrito anteriormente sirvió para poner en práctica la metodología propuesta junto con la evaluación del comportamiento del modelo. En la situación de pronóstico en tiempo real, los parámetros K y γ se consideran fijos, mientras que el coeficiente Se está afectado por los valores 1,0 y 1,3 para permitir obtener un entorno en los niveles pronosticados.

Tabla 3. Niveles máximos y tiempo al pico medidos y pronosticados. Evento 10/02/2009

sensor	nivel máximo [m]			tiempo al pico [h]		
	medido	pronosticado	entorno	medido	pronosticado	entorno
18	3,94	3,87 (c5)	2,90 a 4,63	26	32	22 a 40
21	1,68	1,28 (c3)	0,93 a 1,28	6	27	21 a 27
25	1,69	1,65 (c5)	1,39 a 1,89	19	9	8 a 10
26	1,14	1,29 (c8)	1,21 a 1,86	11	10	8 a 11
28	1,93	2,05 (c2)	1,60 a 2,12	17	8	8 a 10

Tabla 4. Niveles máximos y tiempo al pico medidos y pronosticados. Evento 03/03/2009

sensor	nivel máximo [m]			tiempo al pico [h]		
	medido	pronosticado	entorno	medido	pronosticado	entorno
18	4,53	4,52 (c6)	1,96 a 5,04	59	53	23 a 57
21	1,75	1,34 (c3)	0,42 a 1,34	28	42	27 a 42
25	2,00	1,77 (c3)	0,69 a 1,77	25	26	25 a 26
26	2,06	1,41 (c3)	0,55 a 1,41	28	19	19 a 28
28	2,45	1,98 (c3)	0,96 a 1,98	23	26	26 a 28

Para evaluar los pronósticos calculados, fueron utilizados los siguientes índices: el coeficiente de determinación R^2 , la raíz del error cuadrático medio RMSE y el error relativo porcentual entre valor pronosticado y observado $E(\%)$. Los resultados se presentan en las tablas 5 y 6.

Para un sistema de alerta es fundamental lograr la mayor certeza tanto en el nivel máximo a que llegará el agua en una sección en particular como en el tiempo en el que se producirá dicho máximo. Puede apreciarse a partir de la figura 5, al analizar la rama ascendente de los limnigramas, que los pronósticos para las secciones de 18, 25 y 28 reproducen bien los niveles máximos alcanzados y sus correspondientes tiempos de ocurrencia.

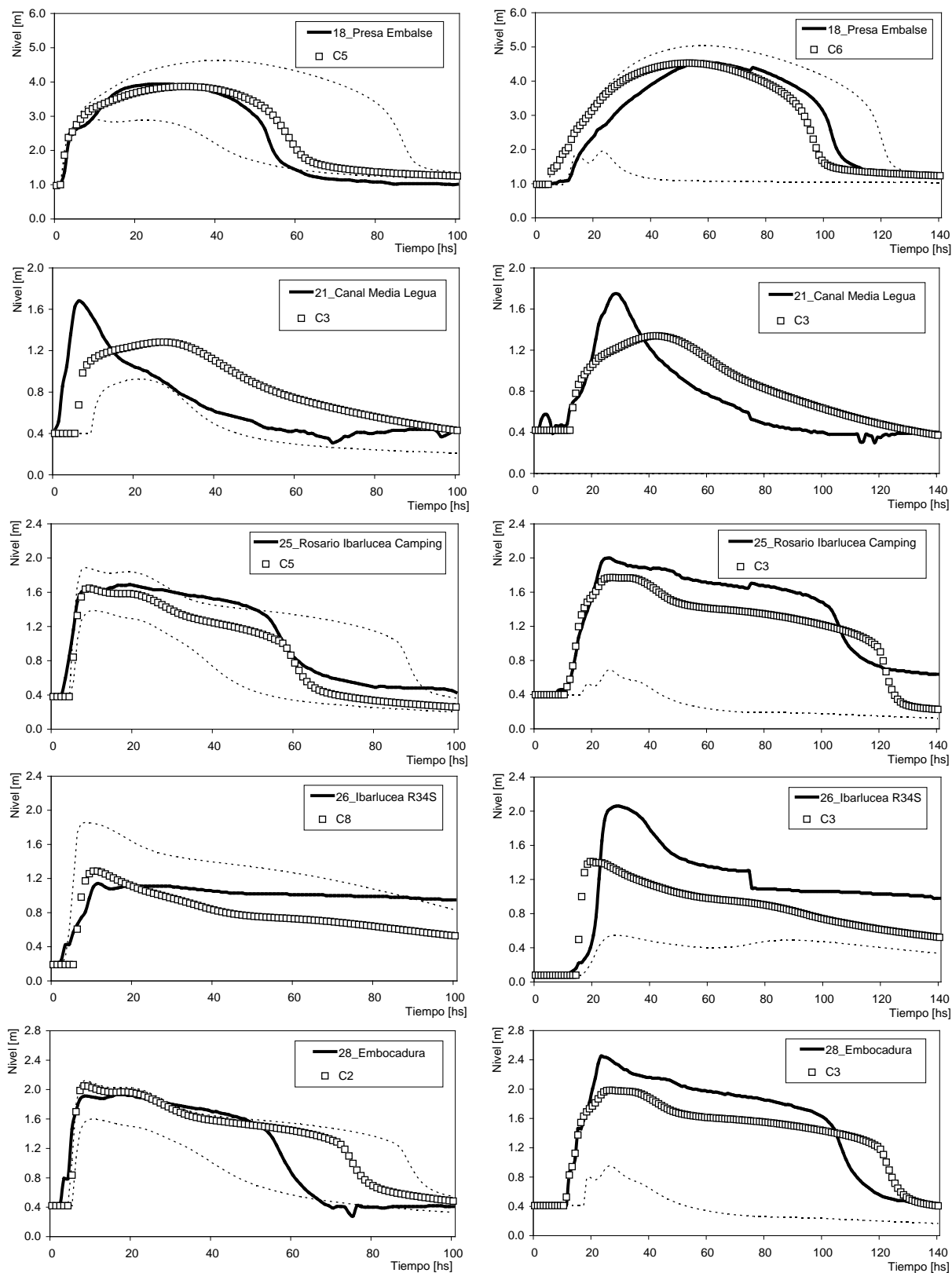


Figura 5. Limnigramas observados y pronosticados: izquierda 10/02/09, derecha 03/03/09

Tabla 5. Índices calculados para el evento del 10/02/2009

sensor	R ²	RMSE [m]	E(%) máx/mín	diferencia máxima [m]
18	0.96	0.36	+ 63 / - 6	1.07 (hora 55, rama descendente)
21	0.27	0.37	+ 109 / - 75	1.22 (hora 5, rama ascendente)
25	0.97	0.19	+ 1 / - 55	0.47 (hora 4, rama ascendente)
26	0.50	0.27	+ 45 / - 67	0.42 (hora 99, rama descendente)
28	0.72	0.36	+ 255 / - 47	0.92 (hora 70, rama descendente)

Tabla 6. Índices calculados para el evento del 03/03/2009

sensor	R ²	RMSE [m]	E(%) máx/mín	diferencia máxima [m]
18	0.93	0.53	+ 87 / - 47	1.49 (hora 99, rama descendente)
21	0.67	0.26	+ 72 / - 33	0.54 (hora 27, rama ascendente)
25	0.87	0.26	+ 32 / - 65	0.34 (hora 47, rama descendente)
26	0.60	0.45	+ 374 / - 50	1.06 (hora 18, rama ascendente)
28	0.87	0.32	+ 114 / - 22	0.65 (hora 118, rama descendente)

En cambio en las secciones 21 y 26 (para el 03/03/2009) los niveles pronosticados no alcanzan a reproducir los niveles medidos, estando generalmente por defecto. Esto puede ser indicativo de una mayor cantidad de precipitación ocurrida en la zona de aporte a dichas secciones que los pluviómetros instalados en la cuenca no alcanzaron a registrar. Respecto de la variabilidad entre registros pluviométricos durante un evento, al considerar que la separación máxima entre sensores es de 22 km, se sabe que no hay influencia de efectos topográficos que expliquen la misma, siendo de esperar que dicha variabilidad responda a la propia distribución areal de los eventos. De aquí surge la recomendación de incrementar la cantidad de sensores pluviométricos para mejorar la representatividad espacial del evento y poder llegar a registrar mejor los máximos locales.

En esta etapa del desarrollo, no se considera el pronóstico de lluvias a partir del tiempo de pronóstico, es decir se considera que a partir de dicho tiempo la lluvia es cero. Por otro lado, el hecho de utilizar un horizonte de pronóstico de 100 h es adecuado, a los efectos de poder visualizar cómo logra representar el modelo la rama descendente de los limnigramas. Generalmente, el nivel máximo se produce dentro de las primeras 48 h de ocurrida la lluvia, por lo que este sería un tiempo adecuado de pronóstico para lograr reproducir la rama ascendente de los limnigramas.

Dado que el sistema se encuentra en etapa de puesta a punto, el desempeño de los sensores en tiempo real, tanto de precipitación como de niveles, presentó algunos problemas; para mejorar la efectividad de los mismos se recomienda su seguimiento periódico.

Una herramienta que resultó interesante durante la ocurrencia de los eventos fueron las imágenes suministradas por el radar meteorológico de la ciudad de Pergamino (113 km de distancia) provistas por el Servicio Meteorológico Nacional, que permitieron observar cualitativamente la dirección de avance de los frentes de tormenta.

CONCLUSIONES

La experiencia en el uso del modelo matemático hidrológico-hidráulico de parámetros distribuidos propuesto para pronóstico de niveles en la cuenca del arroyo Ludueña ha resultado satisfactoria. Respecto a la confiabilidad de manejo y la estabilidad en el uso del modelo, ha quedado evidenciado a través de numerosos testeos, depuración de errores y un intensivo uso, que estos programas desarrollados localmente son robustos y de manejo sencillo.

Para los eventos analizados se ha visto que los limnigramas y los valores y tiempos asociados con los niveles máximos registrados son reproducidos en forma adecuada. En cuanto al tiempo de cálculo requerido, se obtuvo para un pronóstico con horizonte de 100 h de simulación, un tiempo de alrededor de 11 minutos, siendo un tiempo más que suficiente para permitir elaborar diferentes pronósticos, análisis de resultados y toma de decisiones. Pese a que durante el periodo analizado no se registraron eventos de magnitud, pudo desarrollarse la metodología de trabajo y fue propuesto un protocolo de acciones a seguir con respecto al pronóstico de niveles a ser utilizado al inicio de una tormenta (Riccardi et al. 2008).

La determinación del grado de humedad antecedente al inicio de una tormenta, la capacidad de infiltración que presenta el suelo y la distribución areal de la lluvia total constituyen las mayores fuentes de incertidumbre. Para contemplar la incertidumbre de la condición antecedente, se multiplicó al grado de saturación efectiva del suelo Se por 1,3 para tener un pronóstico de máxima y se lo mantuvo en 1,0 para obtener un pronóstico de mínima, permitiendo de esta forma establecer un rango de pronóstico de niveles asociado a la situación de pronóstico en tiempo real.

Los sensores pluviométricos presentaron ciertas fallas en el registro de datos; sin embargo, dado que todos los sensores miden por debajo de la estación de testeo Rosario Aero, se recomienda la verificación de los mismos. Respecto de los sensores limnimétricos, los mismos han estado frecuentemente sometidos a acciones de vandalismo (sustracción de paneles solares y sensores, corte de cableado eléctrico, etc.), mostrando algunas fallas en el registro de datos. Además se observa que los cambios en la configuración física e hidráulica de la cuenca se producen cada vez con mayor velocidad, de aquí la importancia de invertir recursos y tiempo en campañas de recolección de datos en campo.

La puesta a punto de un sistema de alerta en llanura exige conocer detalladamente además de la configuración física e hidráulica de la cuenca, las constantes modificaciones introducidas por el hombre como terraplenamientos, canalizaciones, urbanizaciones, las cuales influyen el escurrimiento superficial y por consiguiente la generación de posibles inundaciones. Otro aspecto a considerar es lograr una serie de registros pluviométricos y limnimétricos consistentes y de larga duración, para efectuar pronósticos con incertidumbre más acotada y permitir el análisis de crecidas pasadas. Solo el compromiso de todos los actores involucrados (gubernamentales, privados y sociales) logrará arribar a un sistema de alerta confiable y estable en el tiempo.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido realizado en el ámbito de una beca de doctorado financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Los autores agradecen al personal del Depto. de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de Rosario y al Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe (MASPyMA).

REFERENCIAS

- Bras, R. L. and Garrote, L.** (1995). "A distributed model for real-time flood forecasting digital elevation models", *Journal of Hydrology*, ELSEVIER B.V., Vol. 167, pp. 279-306.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R. and Mays, L. W.** (1994). "Hidrología aplicada", Ed. McGraw-Hill Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 584 p.
- Hsu, M. H.; Fu, J. C. and Liu, W. C.** (2003). "Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan", *Journal of Hydrology*, ELSEVIER B.V., Vol. 283, pp. 267-280.
- Kothyari, U. C. and Singh, V. P.** (1999). "A multiple-input single-output model for flow forecasting", *Journal of Hydrology*, ELSEVIER B. V., Vol. 220, pp. 12-26.
- Ogden, F. L.; Sharif, H. O.; Senerath, S. U. S.; Smith, J. A.; Baeck, M. L. and Richardson, J. R.** (2000). "Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997", *Journal of Hydrology*, ELSEVIER B.V., Vol. 228, pp. 82-100.
- Riccardi, G. A.** (2000). "Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos", Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. A.; Zimmermann, E. D.; Basile, P. A.; Mancinelli, A. M.; Scuderi, C. M.; Rentería J. P. y García P.** (2008). "Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo". Informes técnicos 1, 2, 3, y 4. Departamento de Hidráulica. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina.
- Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A. y Zimmermann, E. D.** (2006). "Pronóstico preliminar de crecidas en tiempo pseudo real en una cuenca de llanura", XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre, 10 p.
- Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A. y Zimmermann, E. D.** (2007). "Predicción de crecidas para un curso de llanura basada en un modelo hidrológico distribuido de celdas", XXI Congreso Nacional del Agua, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Mayo, 14 p.
- Stenta, H.** (2008). "Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Ecurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura", Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Zimmermann, E. D.; Scuderi, C. M.; Riccardi, G. A.; Stenta, H. R.; Basile, P. A.; García, M. L. y Rentería, J. P.** (2008). "Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas", XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Sept 2008, 10 p.
- Zimmermann, E. D.; Basile, P. A.; López, C.; Riccardi, G.; Stenta, H.; Scuderi, C. y Rentería, J. P.** (2009). "Condiciones antecedentes para la tormenta de diseño en el área del gran Rosario", XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut, Argentina, 11 p.