

Aplicación de un modelo hidrológico distribuido de celdas al pronóstico de niveles en un curso de llanura

Carlos M. Scuderi^(1,4), Gerardo A. Riccardi^(2,4) y Erik D. Zimmermann^(3,4)

(1) Becario Doctoral Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

(2) Investigador Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario (CIUNR).

(3) Investigador Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

(4) Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIyA - UNR).

Riobamba 245 bis. Rosario (2000), Argentina. Telefax: +54-341-4808541.

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

Resumen: La ocurrencia de eventos hidrológicos importantes y las grandes pérdidas económicas producidas en la región del gran Rosario (Pcia. de Santa Fe), han llevado a la instalación de un sistema de monitoreo pluviométrico y niveles de agua en los principales arroyos de la zona. Este hecho, junto al desarrollo de un modelo de predicción de niveles, constituye la base para la operación de un sistema de alerta contra inundaciones. En el marco descrito anteriormente, este trabajo propone estimar los niveles de agua, con horizonte de predicción de 6 horas, en una sección de control del arroyo Ludueña. El cálculo de niveles es efectuado con un modelo hidrológico distribuido, basado en el concepto de celdas. La metodología requiere datos de la topografía del terreno, de la precipitación neta cada seis horas, y de las rugosidades del valle y de los cursos de agua. El procedimiento propone, una vez iniciado un evento de lluvia (tiempo T_0), el cálculo del nivel para seis horas después del inicio del mismo, es decir T_6 . Posteriormente, cuando se llega a la hora seis, se compara el resultado dado por el modelo con el nivel registrado en la sección de control. En esta etapa se reajustan los valores de niveles calculados por el modelo en T_6 y se vuelve a predecir para la hora doce (T_{12}); trabajando así en forma sucesiva durante la ocurrencia de la tormenta. Debido a la gran escasez de datos existentes en la zona, ya que la red de medición se encuentra en fase de instalación, los resultados obtenidos fueron validados con tres eventos ocurridos en el año 1994; encontrándose dentro de límites aceptables, con un error porcentual máximo en altura de agua del 20%. Se observó que la distribución espacial de la lluvia, el uso de la tierra, la condición de humedad antecedente del suelo, y los coeficientes de rugosidad en valle y canales presentan gran incertidumbre por lo que se recomienda efectuar el registro continuo de estas variables en campo con el objeto de mejorar la eficiencia de su modelación y consecuentemente la del pronóstico.

Palabras clave: cuencas de llanura, inundaciones, sistema de alerta, modelos hidrológicos distribuidos.

INTRODUCCIÓN

La región centro este de la República Argentina, denominada Llanura Pampeana, cuenta con excelentes suelos para agricultura y ganadería y con fuentes seguras de agua para abastecimiento humano. Estas inmejorables condiciones alientan el establecimiento de grandes urbes, tendiendo a concentrar un elevado número de personas en pequeños sectores (Tucci y Bertoni, 2003). La creciente presión antrópica, la impermeabilización de suelos y la destrucción de los mismos debido a prácticas agrícolas intensivas (principalmente de soja), hacen que la región presente mayores condiciones de vulnerabilidad frente a inundaciones; por lo que la protección de vidas humanas como de bienes materiales cobra cada vez mayor importancia.

En las últimas dos décadas se han producido devastadoras inundaciones en la región sur y centro de la provincia de Santa Fe. Cabe destacar entre estos eventos, el desborde del A° Ludueña en el año 1986 que afectó unas 2000 ha y 80000 habitantes de la zona noroeste de la ciudad de Rosario (Riccardi et al., 2001) y la crecida del A° Saladillo que afectó la ciudad de Villa Gobernador Gálvez en el mismo año. Más recientemente, los desbordes del A° Cañada de Gómez que atraviesa la ciudad homónima, en el año 2000, en el que se produjeron 3 víctimas fatales y en el año 2003 el desborde del río Salado en la ciudad de Santa Fe, que se cobró 23 vidas humanas y afectó a 100000 personas (27% de la población de la ciudad).

Las medidas a tomar frente a las inundaciones pueden ser clasificadas en dos grandes grupos; estructurales y no estructurales (Berga, 1995; Georgakakos et al., 1999). Básicamente la diferencia entre ellas, es que las primeras actúan sobre los fenómenos durante su formación y ocurrencia modificando las características hidrológicas e hidráulicas de la cuenca. Mientras que las medidas no estructurales, cuyo objeto es impedir o reducir los daños producidos por las inundaciones, tienen como fin alcanzar la convivencia en un determinado espacio entre el hombre y el agua. Dentro de estas medidas pueden ser clasificados los sistemas de alerta contra inundaciones. Por otra parte, es sabido por los hidrólogos que ninguna solución estructural contra inundaciones o crecidas es totalmente segura, ya que, al estar éstas diseñadas sobre la base de criterios estadísticos existe siempre un “riesgo residual” debido a la falla técnica de las obras o a la excedencia de las precipitaciones de diseño utilizadas (Plate, 2002). Sin embargo este “riesgo residual” puede ser minimizado a través del uso de los sistemas de alerta, los cuales permiten realizar el seguimiento continuo y pronóstico de la evolución de los eventos que potencialmente pudieran provocar situaciones de riesgo para la población, llegando a ser una herramienta de gran ayuda ante la decisión de ordenar la evacuación de un sector con el suficiente tiempo de anticipación.

La principal cualidad requerida por un sistema de alerta es la rapidez de respuesta, es decir lograr una adecuada velocidad en el procesamiento y generación de resultados, ya que su principal objetivo es poder anticiparse a la ocurrencia del evento. Un segundo requerimiento, no menos importante que el anterior, es alcanzar la suficiente precisión en la determinación de los niveles de agua para poder actuar en consecuencia según sea el grado de peligrosidad del evento. Estos requisitos constituyen la principal diferencia entre

la modelación de sistemas de alerta y la clásica modelación hidrológica o hidráulica. Aldana Valverde (2002) señala las premisas que debe cumplir la modelación de sistemas de alerta para ser utilizada en tiempo real: (a) sencillez de operación, (b) precisión de resultados, (c) tiempo de ejecución breve y (d) capacidad de calibración automática de parámetros.

Un sistema de alerta está integrado por una red de sensores de recolección de datos hidrológicos, un sistema de transmisión de datos desde los sensores hacia el centro de control, un modelo matemático de previsión de crecidas y optativamente un modelo de pronóstico de lluvias. Los sensores de recolección de datos adquieren y registran, principalmente, valores de precipitaciones y niveles de agua en los cursos. Estos sistemas permiten conocer en tiempo real el estado hidrológico de la cuenca, teniendo un elevado costo de implantación y estando sometidos frecuentemente a acciones de vandalismo por estar instalados en zonas rurales. El sistema de transmisión de datos puede utilizar vía telefónica o satelital, siendo la elección de una u otra función del costo y fiabilidad del soporte de transmisión. Mientras que el centro de control es el lugar o espacio físico donde se encuentra la infraestructura necesaria para recibir, almacenar y manipular los datos recogidos por los sensores y donde se realizan los pronósticos a través de la implementación de un modelo matemático de crecidas.

Los modelos matemáticos para alerta temprana de crecidas pueden ser clasificados según su concepción en dos tipos, distribuidos o concentrados (Hsu et al., 2003). Los modelos hidrológicos distribuidos, físicamente basados, son particularmente aptos para lograr una mejor representación de los mecanismos que se desarrollan en una cuenca durante el transcurso de una crecida (Ogden et al., 2000). Su principal debilidad es requerir una gran cantidad de datos para su funcionamiento (topografía, red de cursos, coeficientes de rugosidad, tipo de suelo, humedad del suelo, uso del suelo, obras hidráulicas, terraplenes, etc.), lo cual hace que la velocidad de cálculo, a veces, no sea la adecuada para predecir niveles con la adecuada rapidez. En contrapartida, los modelos agregados tipo caja negra, al no considerar las leyes físicas que operan dentro de la cuenca, relacionan la precipitación caída con el nivel de agua en los cursos de una manera muy simplificada (Kothyari y Singh, 1999). Respecto de la velocidad de cálculo, los modelos concentrados o agregados parecen ser superiores a los distribuidos, ya que por no requerir una elevada cantidad de datos para su funcionamiento, otorgan resultados en un tiempo menor. La principal falencia de estos modelos es no incorporar la variabilidad espacial de las precipitaciones ni la heterogeneidad de la cuenca; siendo estas causas, generalmente, las que promueven el uso de los modelos distribuidos.

Lamberti y Pilati (1996) proponen utilizar un modelo completo, basado en las ecuaciones de Saint Venant, para calibrar un modelo más simple, el cual será utilizado para realizar el pronóstico de niveles en tiempo real; recomendando además que la elección del modelo para pronósticos sea función de una evaluación entre precisión requerida y economía de recurso computacional. Concordando con los anteriores, Gaume et al. (2004), en un estudio realizado de la crecida producida en el río Aude (Francia), señalan que la reproducción de la misma no es viable utilizando un modelo hidrológico concentrado, por lo que recomiendan el uso de modelos que logren un mejor

entendimiento de los procesos hidrológicos; observando además que el uso del suelo adquiere importancia secundaria en el comportamiento hidrológico de la cuenca durante una crecida. En la utilización de modelos distribuidos aplicados a sistemas de pronóstico de crecidas, Bras y Garrote (1995) citan a la descripción topográfica detallada de la cuenca y a las mediciones instantáneas de la evolución espacial de la precipitación como los principales elementos a ser tenidos en cuenta. Sin embargo, el conocimiento del estado inicial de la cuenca ha mostrado ser de extrema importancia para el desenvolvimiento del modelo. Jasper et al. (2002) indican que el pronóstico de crecidas puede ser mejorado acoplado al modelo hidrológico un modelo atmosférico de predicción de precipitaciones. Así mismo, estos autores demuestran que pequeños errores en la estimación de la dirección de avance de la tormenta, la distribución espacial de la lluvia, o la cantidad precipitada pueden producir grandes errores en el pronóstico de niveles. En este tema, la utilización del radar constituye una interesante herramienta para la evaluación cualitativa de las estructuras tanto espaciales como temporales de los campos de lluvia (Bras y Garrote 1995; Jasper et al. 2002).

Aplicaciones prácticas de modelos distribuidos en pronóstico de crecidas fueron hechas por Cabral et al. (1990) citado por Bras y Garrote (1995) utilizando un modelo numérico del terreno de 400 m x 400 m de tamaño de grilla (5252 elementos en total) para una subcuenca del río Arno (Italia) de 840 Km². Los datos de precipitación fueron obtenidos por medio de 6 pluviómetros dentro de la cuenca y 24 pluviómetros más situados alrededor de la misma; utilizando de un total de 10 tormentas, 5 para calibración y 5 para validación del modelo.

Kothyari y Singh (1999) aplicaron un modelo concentrado a una cuenca de la India de 17157 Km², tomando 6 eventos para calibración y 4 eventos para validación, demostrando que estos modelos dan razonablemente buenos resultados ($R^2=0.792$ y $RMSE=837 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para el periodo de calibración y $R^2=0.792$ y $RMSE=314 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para el periodo de validación).

Hsu et al. (2003) aplicaron un modelo distribuido, basado en las ecuaciones de continuidad y momentum, con corrección por cada paso de tiempo, al pronóstico de crecidas del río Tanshui en Taiwan, obteniendo valores de $R^2=0.830$ y $RMSE=0.676 \text{ m}$ para paso de tiempo de 6 hs y $R^2=0.948$ y $RMSE=0.405 \text{ m}$ para paso de tiempo de 3 hs.

En la Argentina, Caamaño Nelli et al. (1998) utilizaron tres modelos de tipo producto de potencias, uno con niveles en secciones aguas arriba, otro con precipitaciones y un tercero que emplea niveles y precipitaciones. A partir de 57 eventos, los modelos fueron calibrados con 49 y verificados con 8; obteniendo coeficientes de determinación del orden de 0.82.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un procedimiento para el pronóstico de crecidas en tiempo real con corrección en cada paso de tiempo, orientado a la posterior implementación de un sistema de alerta contra inundaciones. El cálculo de la lluvia neta ó efectiva se basa en el método del número de curva (CN) desarrollado en 1972 por el Soil Conservation Service (SCS). El proceso de transformación de lluvia neta en

escurrimiento superficial se realiza utilizando un modelo hidrológico-hidráulico distribuido desarrollado por Riccardi (2000). Como herramienta para el ingreso de información y procesamiento de resultados se utiliza una plataforma gráfica tipo “ventanas” diseñada por Rentería y Stenta (2003), a partir de un lenguaje de programación orientado a objetos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

La cuenca del A° Ludueña (Figura 1), localizada en la parte sureste de la provincia de Santa Fe, República Argentina; se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' y 60° 39' O.

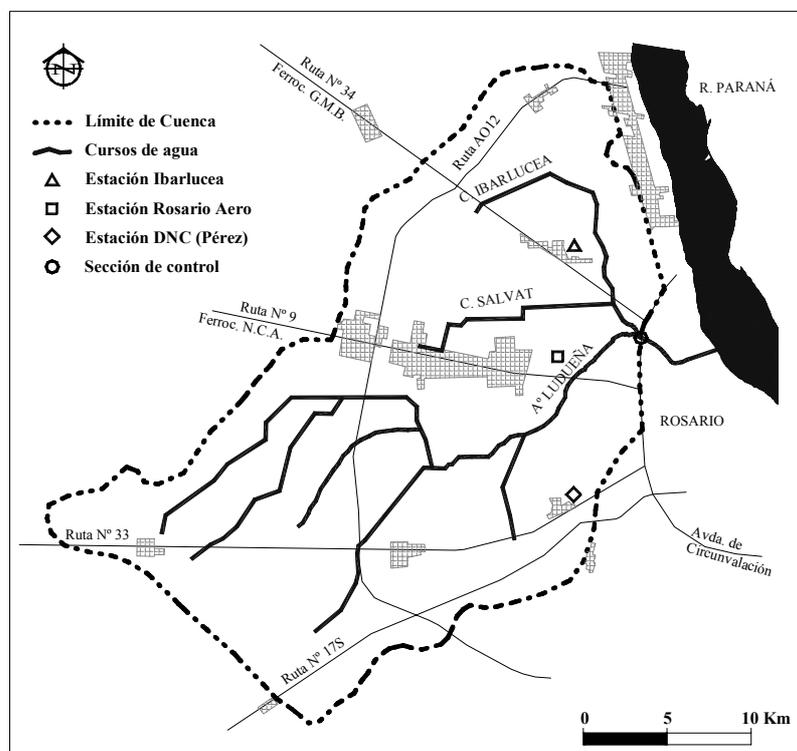


Fig. 1. Región de estudio, cuenca del A° Ludueña

La red hídrica principal está compuesta por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, con una longitud total de aproximadamente 140 Km, no obstante en épocas lluviosas una gran cantidad de pequeños cursos se agrega a los anteriores contribuyendo al drenaje de la misma. El área de aporte es de 700 Km² y su elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. El caudal base del arroyo Ludueña es de 0.50 m³.s⁻¹, en tanto que en crecidas ordinarias se alcanzan los 80 m³.s⁻¹ y en extraordinarias (R > 50 años)

caudales superiores a los $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Riccardi et al., 2002). El suelo predominante es de tipo arcilloso-limoso presentando condiciones de permeabilidad moderada a moderadamente lenta (Pouey, 1998), con pendiente media del orden de $1.0 \text{ m} \cdot \text{Km}^{-1}$. La precipitación media anual es de 985 mm, distribuyéndose en un 62% en el período primavera-verano correspondiente a los meses de octubre a marzo. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios, lo que permite observar una fuerte acción antrópica ejercida sobre ella. El área ocupada por centros urbanos, de alta impermeabilidad, se estima en 5% (aproximadamente 35 Km^2) distribuido entre 9 poblaciones. La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente la producción de soja, maíz y trigo. Zimmermann (1995) destaca que el uso del suelo de la región ha sufrido un cambio sustancial a partir del año 1970, donde se ha pasado del cultivo de pasturas para ganadería a una agricultura extensiva, modificando la hidrología superficial de la cuenca. Parece ser que estos hechos han producido una disminución en el tiempo de concentración de la cuenca junto a una creciente impermeabilización, con el consiguiente aumento de caudales y disminución en el tiempo de concentración del sistema. Esta situación ha llevado a los organismos gubernamentales municipales y provinciales a realizar obras estructurales (Tabla 1), entre ellas canalizaciones parciales en los arroyos y una presa de retención de crecidas.

Tabla 1. Cronología de las obras ejecutadas en la cuenca del A° Ludueña

Fecha	Obra realizada	Capacidad ^(*)
1940-1943	Entubamiento del A° Ludueña	110
1948	Construcción del Canal Ibarlucea. Longitud: 17 Km	
1962-1964	Canalización del A° Ludueña. Longitud: 10 Km	
1964-1968	Construcción del conducto Aliviador Olivé. Longitud: 1.4 Km	180
1994	Construcción del conducto Aliviador 2	330
1995-1996	Presa de retención de crecidas, situada en la localidad de Pérez	

(*) Indica la capacidad total del conjunto de las obras en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Además se han elaborado medidas no estructurales como planos de mancha de inundación para varias recurrencias (Riccardi et al., 2001), con el objeto de reglamentar el uso del suelo en las zonas donde existe riesgo de anegamiento.

Breve Descripción del modelo

El modelo de transformación lluvia caudal adoptado es un modelo hidrológico-hidráulico distribuido desarrollado por Riccardi (2000) y denominado CTSS8, el cual está basado en el conocido esquema de celdas interconectadas propuesto inicialmente por Cunge. El mismo es particularmente apto para el análisis de escurrimiento cuasi-bidimensional, permitiendo reproducir los procesos hidrológicos e hidráulicos presentes en el fenómeno físico de transformación lluvia-caudal, siendo aplicable tanto a ambientes rurales como urbanos. Haciendo posible plantear, en cada unidad de discretización, los procesos de

precipitación, pérdidas por intercepción y almacenamiento superficial e infiltración. El escurrimiento directo resultante puede ser propagado utilizando diferentes leyes, que abarcan desde la aproximación cinemática de la ecuación de cantidad de movimiento hasta una aproximación a la ecuación dinámica, a través de ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas, y varias estructuras hidráulicas como puentes, vertederos, etc. (Riccardi, 2005). El modelo CTSS8 fue desarrollado en lenguaje de programación Fortran, por lo que ofrece una cierta rigidez en su utilización. Una solución a este inconveniente fue propuesta por Rentería y Stenta (2003) al desarrollar una interfaz amigable tipo “ventanas” entre el modelo y el usuario; ofreciendo una manera ágil y sencilla de configuración de la cuenca a analizar, entrada de datos e interpretación de resultados.

Preparación de datos requeridos por el modelo

La potencialidad del modelo es poder calcular caudales, velocidades y alturas de agua en cualquier punto del dominio de estudio. Para su puesta en funcionamiento se requiere de un modelo topográfico del terreno (MDT); de las características geométricas, físicas e hidráulicas de los cursos, terraplenes y obras hidráulicas presentes en la cuenca; del hietograma neto de la tormenta a analizar y del coeficiente de rugosidad de Manning tanto para el valle como para los cauces.

El modelo topográfico del terreno (MDT) fue obtenido a partir de un mapa de la cuenca con curvas de nivel equiespaciadas cada 2.5 m (Scuderi y Stenta, 2002), por lo que es considerado como de buen nivel de detalle. Los coeficientes de rugosidad de Manning fueron estudiados en trabajos anteriores (Riccardi et al., 2001; Riccardi et al., 2002) estableciendo un rango de variación para el coeficiente de rugosidad en valle de 0.100 a 0.300 y para los cursos de agua de 0.030 a 0.050. En este estudio se fijaron estos valores en 0.160 para el valle y 0.040 para los cursos de agua. El contenido de humedad en el suelo de la cuenca al inicio del pronóstico es de vital importancia, sin embargo esta variable es de difícil cuantificación por lo ofrece gran incertidumbre. La variabilidad espacial de las lluvias ofrece otra gran fuente de incertidumbre, pudiéndose utilizar imágenes de radar para el seguimiento cualitativo de los campos de lluvia. Por su parte, Arnaud et al. (2002) indican que la variabilidad en la distribución espacial de las lluvias tiene generalmente efectos moderados para eventos extremos; mientras que Ogden et al. (2000) señalan que predicciones de confianza requieren una representación precisa de la variabilidad tanto espacial como temporal de las precipitaciones.

Selección de Tormentas

La cuenca del A° Ludueña (durante el período 1994-1996) poseía solo tres estaciones pluviométricas, denominadas Ibarlucea, Rosario Aero (en el aeropuerto de Rosario) y Despacho Nacional de Cargas (DNC) en la localidad de Pérez. Sumado a esta baja densidad de pluviómetros (1 pluviómetro cada 233 Km²) se tiene el problema de que están distribuidos muy cerca uno del otro, logrando una baja representatividad de la distribución espacial de las lluvias en la cuenca. La escasez de información respecto de registros limnimétricos conjuntamente con datos de precipitaciones, hace muy difícil la

validación del modelo para aplicaciones de pronóstico de crecidas en tiempo real. Sin embargo, se tienen datos de lluvia y niveles en forma conjunta, de tres tormentas registradas en el año 1994, período en el cual se contaba con una estación limnimétrica situada en la sección de control de la cuenca (señalada con un círculo en la Fig. 1, en la intersección del A° Ludueña con la Avda. de Circunvalación). La información pluviométrica se encuentra discretizada en intervalos de una hora de duración y su distribución espacial se realiza aplicando el método de polígonos de Thiessen. Los registros limnimétricos son convertidos a caudales utilizando la curva cota-caudal para dicha sección de control. Las características principales de los eventos seleccionados son presentadas en la Tabla 2:

Tabla 2. Características principales de las tormentas seleccionadas

Tormenta	Precipitación media [mm]	Duración [hs]	Nivel de agua máx. ^(*) [m]	Tiempo de pico [hs]	Caudal pico [m ³ .s ⁻¹]
17-03-94	148.7	36.0	3.78	44.0	82.0
03-04-94	158.1	61.0	5.59	64.5	194.5
01-05-94	59.1	50.0	4.52	52.0	122.2

(*) altura de agua correspondiente al paso del caudal pico en la sección de control

Estimación de la Precipitación neta

El cálculo de la precipitación neta se realiza utilizando el método del Número de Curva (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service en 1972 (Chow et al., 1994). El procedimiento seguido se especifica en Scuderi et al. (2006), por lo que no se desarrolla nuevamente en este trabajo. No obstante es de destacar la modificación introducida al cálculo de la lluvia antecedente, que propone considerar 30 días de anterioridad a la fecha de la tormenta a analizar en vez de tomar los 5 días que son utilizados habitualmente. Esta modificación surgió como consecuencia de que el planteo de utilizar solo 5 días anteriores a la ocurrencia de los eventos, generaba lluvias netas demasiado pequeñas que no podían reproducir los limnigramas observados. Una probable explicación para este hecho puede ser el tipo de suelo que se encuentra en la región, de tipo arcilloso-limoso, el cual aparentemente posee gran capacidad de retención de humedad.

Para la elección del número de curva CN deben ser determinados además del valor de la precipitación antecedente, el tipo de suelo y el uso del mismo. El tipo de suelo que se tiene en la cuenca puede ser clasificado como perteneciente al grupo hidrológico C en un 90% y al grupo D en un 10 %, mientras que el uso del suelo predominante de la cuenca es la agricultura, por lo que el valor del número de curva propuesto para la condición antecedente de humedad normal ó II, obtenido por ajuste, es de CN(II)=78.0 (Scuderi et al., 2006). El método ha sido desarrollado para la condición II, por lo que para condiciones de humedad diferentes se proveen ecuaciones que permiten el cálculo del CN (Chow et al., 1994):

$$CN(I) = \frac{4.2 CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}, \quad CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (1)$$

Aplicando las ecuaciones (1) al valor de CN(II) adoptado, pueden obtenerse los valores de CN(I)=59.8 y CN(III)=89.1. Una vez obtenidos los CN para las distintas condiciones de humedad antecedente puede calcularse la precipitación neta. En la Tabla 3 pueden apreciarse las diferencias entre el método original y el modificado:

Tabla 3. Modificación de precipitación antecedente (Pa) y precipitación neta (Pn)

Tormenta	Pa 5 días [mm]	Grupo	CN	Pn media [mm]	Pa 30 días [mm]	Grupo	CN	Pn media [mm]
17-03-94	9.4	I	59.8	45.6	16.5	I	59.8	45.6
03-04-94	0.7	I	59.8	63.0	169.4	III	89.1	125.1
01-05-94	0.0	I	59.8	4.5	161.7	III	89.1	34.2

Pronóstico en tiempo real

El pronóstico de niveles es efectuado para incrementos de tiempo de 6 hs al considerar que los registros de niveles y precipitaciones son actualizados en ese período de tiempo. El esquema de cálculo (Fig. 2) comienza en el tiempo T0 (inicio de la tormenta), utilizando como dato de entrada el hietograma neto hasta el instante T1 (6 hs después del comienzo de la tormenta) siendo el nivel pronosticado en el instante T2 (correspondiente a la hora 12 desde el inicio de la tormenta). Se plantea la hipótesis de suponer en el período de pronóstico lluvia cero, es decir que para el primer pronóstico entre el instante T1 y T2 la lluvia neta se considera cero.

La primer “corrida” del modelo se realiza para un valor fijo de rugosidad de Manning para las celdas valle de 0.16 y para las celdas río de 0.04, se convino en elegir como parámetro de ajuste la rugosidad de Manning de las celdas río, la cual se convierte en un parámetro que engloba además de la rugosidad propia del curso otros mecanismos físicos que ocurren durante la crecida que el modelo no puede considerar, perdiendo con esto la idea de rugosidad del curso. Luego de la primer corrida se compara el nivel alcanzado por el modelo en el tiempo T1 (tiempo a partir del cual comienza el pronóstico propiamente dicho) con el nivel observado para ese mismo instante, a partir de lo cual se hacen sucesivas corridas, modificando el valor del coeficiente de ajuste, para igualar el valor de altura observado en T1. Una vez alcanzado ese nivel, el valor de altura que arroja el modelo 6 hs después del tiempo T1 se convierte en el nivel pronosticado en el tiempo T2, constituyendo así el primer punto de pronóstico de niveles.

Transcurridas 6 hs desde el instante T1 (correspondiente a la hora 12 desde el inicio de la tormenta) y teniendo la actualización de los registros de precipitación y niveles, se compara el nivel pronosticado con el valor observado para el tiempo T2 corrigiendo el primero, por medio de varias corridas, para eliminar el error de predicción (Δh) durante el

primer intervalo de pronóstico. Esta corrección para el tiempo T2, produce el pronóstico de un nuevo nivel para el tiempo T3 (18 horas desde el inicio de la tormenta), el cual constituye el segundo punto de pronóstico. Sucesivamente en el tiempo, se sigue el procedimiento descrito de predicción-corrección para intervalos de 6 hs, hasta completar el tránsito de la crecida.

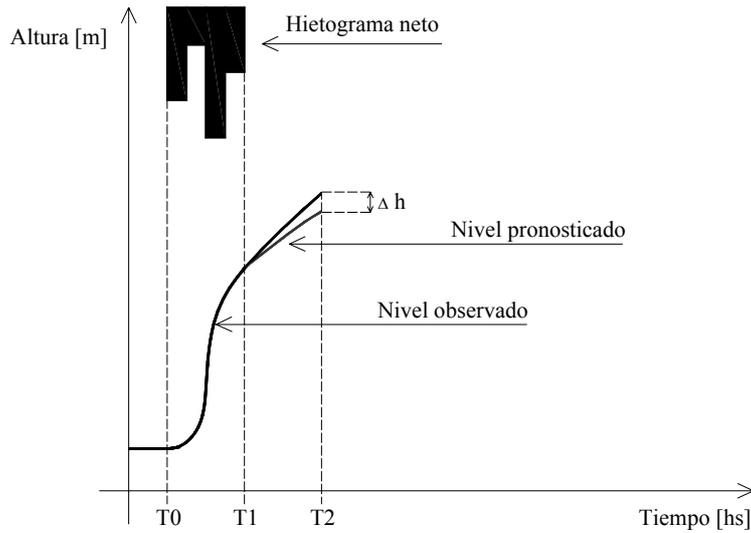


Fig. 2. Esquema de cálculo de pronóstico

Para establecer la bondad del pronóstico del modelo se utilizaron cuatro índices, el coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe NS, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error relativo porcentual entre el valor pronosticado y el observado:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum [(Ho_i - Ho)(Hc_i - Hc)]}{\sqrt{\sum (Ho_i - Ho)^2} \cdot \sqrt{\sum (Hc_i - Hc)^2}} \right\}^2 \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Ho_i - Hc_i)^2}{\sum (Ho_i - Ho)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left[\sum_1^n (Ho_i - Hc_i)^2 \right]} \quad (4)$$

$$E(\%) = \left(\frac{Hc_i - Ho_i}{Ho_i} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Donde Ho_i es el valor observado en el tiempo i , Ho es el valor medio de los valores observados en el periodo analizado, Hc_i es valor pronosticado en el tiempo i , Hc es el valor medio de los valores pronosticados en el periodo analizado, y n es el número de instantes i durante el cual se desarrolla el pronóstico. La eficiencia evaluada a través del criterio de Nash-Sutcliffe es comúnmente utilizada para evaluación de modelos debido a que este índice involucra la estandarización del residuo de la varianza, no estando influenciado por la longitud de la serie (Kachroo y Natale, 1992 citados por Kothyari y Singh, 1999).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los pronósticos con antecendencia de 6 hs, obtenidos para las tormentas del 17/03/94, 03/04/94 y 01/05/94, correspondientes a la sección de control son presentados en la Fig. 3, mientras que los índices descritos en las ecuaciones (2) a (5) se muestran en la Tabla 4.

Las gráficas fueron representadas hasta el tiempo 90 hs, debido a que en este tiempo los hidrogramas se encuentran en período de recesión. La curva en color azul representa la respuesta del modelo en tiempo “pseudo real” (Scuderi et al., 2006) para la condición de ingreso de lluvia total y simulación del evento completo, debido a que el tiempo al pico del hidrograma es menor que el tiempo de ocurrencia de la tormenta para los tres eventos (ver Tabla 2). La línea de trazos roja, representa la evolución del coeficiente de ajuste a lo largo del pronóstico, verificándose que en los períodos en que los niveles disminuyen el coeficiente de ajuste aumenta y viceversa.

Tabla 4. Parámetros estadísticos

Tormenta	R ²	NS	E(%) máx / mín	RMSE [m]	Dif máx [m]
17/03/94	0.651	0.612	+ 7.1 / - 8.5	0.127	- 0.32
03/04/94	0.449	0.281	+ 16.8 / - 8.7	0.326	+ 0.77
01/05/94	0.884	0.356	+ 13.5 / - 21.2	0.557	- 0.95

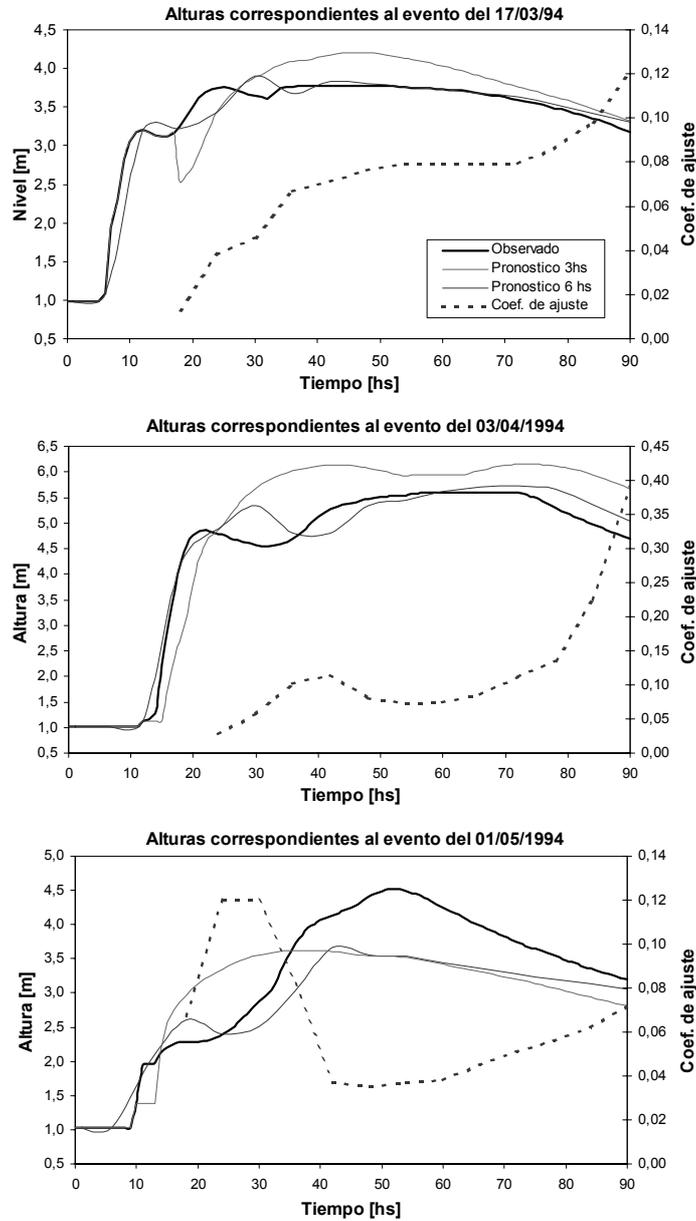


Fig. 3. Pronóstico de niveles con 6 horas de antecedencia

Estos datos permiten establecer que el solo análisis del coeficiente R^2 no es suficiente para determinar el grado de bondad de un modelo. Por ejemplo si tomamos la tormenta del 01/05/94 vemos que pese a tener un R^2 de 0.884, el valor de RMSE de 0.557 (que mide cuanto se aleja cada valor observado de su respectivo pronosticado) es bastante elevado, cuando debería tender a cero.

También fue analizado el caso en que el coeficiente de rugosidad de Manning de los cursos fue fijado en 0.04 y se utilizó como coeficiente de ajuste el coeficiente de rugosidad de Manning en las celdas valle. A modo de ejemplo se muestra la tormenta del día 17/03/94 en la Fig. 4 donde pueden observarse las respectivas gráficas, la de color rojo manteniendo constante la rugosidad del valle en 0.16 (modificando la rugosidad del curso como factor de ajuste) y la de color azul fijando la rugosidad del curso en 0.04 (variando la rugosidad del valle como factor de ajuste). Puede observarse que la gráfica de color azul presenta una mayor dispersión en el período inicial del pronóstico (hasta la hora 24), por lo que para este caso ofrece mejores resultados fijar la rugosidad del valle y manipular la rugosidad del curso.

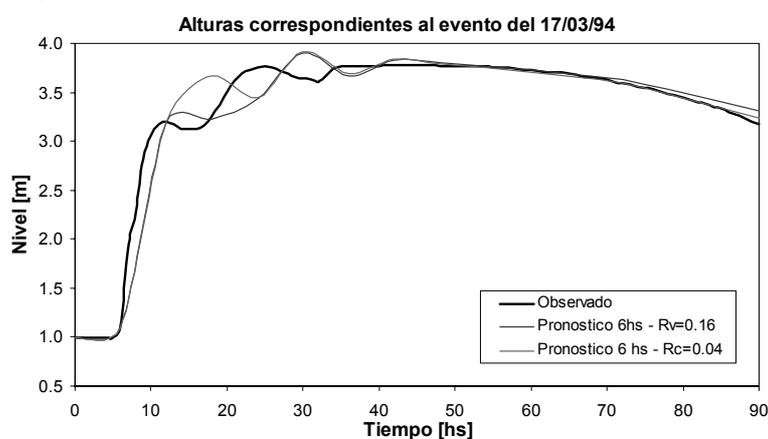


Fig. 4. Comparación entre pronósticos fijando diferentes parámetros

Posteriormente fue investigado si la disminución en el tiempo de antecedencia produce alguna mejora en los pronósticos de niveles, para lo cual fue fijado un nuevo tiempo de antecedencia de 3 hs. Este nuevo tiempo de antecedencia fue implementado en los eventos de fecha 17/03/1994 y 03/04/1994, ver Figura 5. La comparación de los parámetros estadísticos para el tiempo de antecedencia $T_a = 6$ hs y $T_a = 3$ hs se muestra en la Tabla 5. De la misma puede apreciarse la significativa mejora obtenida al disminuir el tiempo de antecedencia del pronóstico, ya que esto aumenta en gran medida los coeficientes R^2 y NS, además de disminuir el RMSE, los errores relativos y las diferencias máximas.

Tabla 5. Comparación de parámetros estadísticos entre $T_a = 6$ hs y $T_a = 3$ hs

Índice	Tormenta del 17/03/94		Tormenta del 03/04/94	
	$T_a = 6$ hs	$T_a = 3$ hs	$T_a = 6$ hs	$T_a = 3$ hs
R^2	0.651	0.857	0.449	0.762
NS	0.612	0.843	0.281	0.678
E(%) máx / mín	+ 7.1 / - 8.5	+ 7.1 / - 6.6	+ 16.8 / - 8.7	+ 11.3 / - 5.0
RMSE [m]	0.127	0.080	0.326	0.215
Dif máx [m]	- 0.32	- 0.24	+ 0.77	+ 0.54

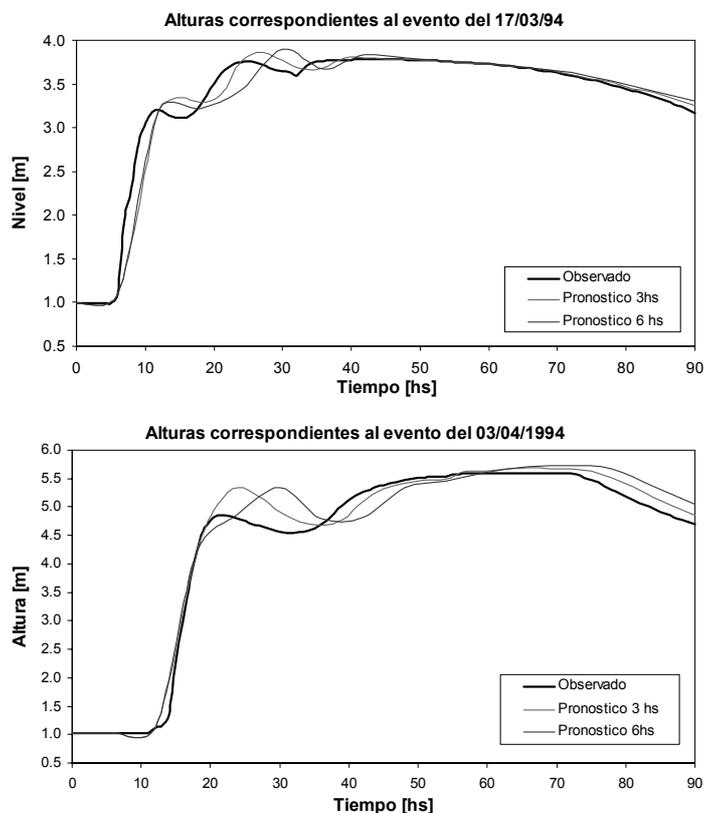


Fig. 5. Comparación de pronósticos entre $T_a = 6$ hs y $T_a = 3$ hs

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

La cuestión fundamental a mejorar en el estudio del pronóstico de crecidas en tiempo real, es la escasez de información limnigráfica y pluviométrica que se tiene de la cuenca. La cuenca (en el período analizado) contaba solo con 3 pluviómetros, otorgando una baja densidad de 1 pluviómetro cada 233 Km^2 ; mientras que, por ejemplo, en un estudio sobre predicción de lluvias llevado a cabo por Arnaud et al. (2002) la densidad es de 1 pluviómetro cada 51 Km^2 . Cabe acotar que este hecho está siendo solucionado a través de la implementación de una red de sensores de niveles y pluviómetros. El incremento en la densidad de pluviómetros junto al uso de imágenes de radar puede disminuir la incertidumbre respecto de la distribución espacial de la precipitación y mejorar el estudio de los campos de lluvia.

Otro parámetro que indudablemente debe ser mejor representado o modelado es el contenido de humedad del suelo, ya que el mismo fija la condición de humedad antecedente al comienzo de una tormenta. Para ello la medición en campo como

herramienta fundamental y el uso de imágenes de radar como elemento auxiliar pueden contribuir claramente a mejorar este problema.

La modificación planteada al método del número de curva CN, respecto al número de días en que se toma la precipitación antecedente (Scuderi et al., 2006), produce una considerable mejora en los pronósticos de niveles. El grado de variabilidad, tanto espacial como temporal, en el uso del suelo está comenzando a ser estudiado en esta región con ayuda del análisis y clasificación de imágenes satelitales (Scuderi y Stenta, 2006).

Pese a que el modelo hidrológico distribuido utilizado no fue desarrollado específicamente para realizar pronósticos en tiempo real, ha demostrado un desempeño más que adecuado. En cuanto a la rapidez y estabilidad del mismo como así también de la plataforma de ingreso y tratamiento de resultados, la experiencia ha resultado sumamente satisfactoria, demostrando la alta confiabilidad que presentan estas herramientas.

El procedimiento propuesto para el pronóstico en tiempo real con tiempo de antecedencia de 6 hs, con vistas a un sistema de alerta temprano contra inundaciones, basado en un modelo hidrológico distribuido de transferencia lluvia-escurrimiento superficial y en el método del número de curva CN para el cálculo de la precipitación neta, analizado para tres eventos de importancia, permite arribar a pronósticos de niveles con un error respecto de los niveles observados de +17% y -21%.

La disminución en el tiempo de antecedencia de 6 hs a 3 hs mejora notablemente los pronósticos, para dos casos estudiados, aumentando sustancialmente los coeficientes de determinación y de eficiencia y disminuyendo la diferencia entre valor observado y pronosticado, los errores relativos y las diferencias máximas absolutas. Esta conclusión coincide con las vertidas por Barros y Kim (2001) al asegurar que los pronósticos con menor tiempo de anticipación producen mejores resultados.

Un sistema de previsión de crecidas a tiempo real debe presentar un menor grado de incertidumbre que el aquí obtenido, por lo que se recomienda a los efectos de lograr un incremento en la eficacia del mismo, implementar el seguimiento en campo de las variables involucradas tales como el contenido de humedad del suelo y la variación de los coeficientes de rugosidad de Manning para el valle y los cursos a lo largo del año. Tornándose, por ello, cada vez más importante la inversión a efectuar en investigación y campañas de recolección de datos en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldana Valverde, A. L. (2002). *Planificación, diseño y utilización de herramientas de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real*. Jornadas sobre Sistemas de Ayuda a la Decisión ante Problemas Hidráulicos e Hidrológicos en Tiempo Real, CEDEX, España.
- Arnaud, P.; C. Bouvier; L. Cisneros y R. Domínguez (2002) *"Influence of rainfall spatial variability on flood prediction"*. Journal of Hydrology, 260, pp. 216-230.
- Barros, A. P. y G. Kim (2001) *"Quantitative flood forecasting using multisensor data and neural networks"*. Journal of Hydrology, 246, pp. 45-62.

- Berga, L. (1995). "Aplicación de los Sistemas de Previsión de Avenidas. Experiencias y Problemática". Jornadas sobre el SAIH en la Gestión Hídrica, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, España.
- Bras, R. L. y L. Garrote (1995) "A distributed model for real-time flood forecasting digital elevation models". *Journal of Hydrology*, 167, pp. 279-306.
- Caamaño Nelli, G. E.; G. E. Libovich y L.E. Colladon (1998) "Pronostico estadístico en tiempo real de crecidas para cursos serranos". Congreso Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina.
- Chow, V. T.; D. R. Maidment y L. W. Mays (1994). *Hidrología aplicada*. McGRAW HILL Interamericana S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 584 p.
- Gaume, E.; M. Livet; M. Desbordes y J. P. Villeneuve (2004) "Hydrological análisis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999". *Journal of Hydrology*, 286, pp. 135-154.
- Georgakakos, K. P.; T. M. Carpenter; J. A. Sperflage; T. Sweeney y D. L. Fread (1999) "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems". *Journal of Hydrology*, 224, pp. 21-44.
- Hsu, M. H.; J. C. Fu y W. C. Liu (2003) "Flood routing with real-time stage correction meted for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan". *Journal of Hydrology*, 283, pp. 267-280.
- Jasper, K.; J. Gurtz y H. Lang (2002) "Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model". *Journal of Hydrology*, 267, pp. 40-52.
- Kothiyari, U. C. y V. P. Singh (1999) "A multiple-input single-output model for flow forecasting". *Journal of Hydrology*, 220, pp. 12-26.
- Lamberti, P. y S. Pilati (1996) "Flood propagation models for real-time forecasting". *Journal of Hydrology*, 175, pp. 239-265.
- Ogden, F. L.; H. O. Sharif; S. U. S. Senerath; J. A. Smith; M. L. Baeck y J. R. Richardson (2000) "Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997". *Journal of Hydrology*, 228, pp. 82-100.
- Plate, E. J. (2002) "Flood risk and flood management". *Journal of Hydrology*, 267, pp. 2-11.
- Pouey, N. (1998). *Erosión Hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos*. Universidad Nacional de Rosario Editora, Rosario, Argentina, 164 p.
- Rentería, J. P. y H. R. Stenta (2003). "Software con entorno gráfico tipo Windows para simulación de escurrimiento superficial en cuencas rurales de llanura asistido con motor de cálculo modelado con celdas". Proyecto Final de Ingeniería, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina.
- Riccardi, G. A. (2000). "Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos". Tesis Doctoral, FCEyN, UNC, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. A.; E. D. Zimmermann y R. Navarro (2001). "Áreas inundadas en el Sistema Hídrico del A° Ludueña en Distrito Rosario". Informe de Avance 1. Convenio Municipalidad de Rosario-FCEIyA, Rosario, Argentina.
- Riccardi, G. A.; C. M. Scuderi y H. R. Stenta (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. A. (2005) *Modelación matemática de flujos a superficie libre*. Libro electrónico, capítulo 3. CURIHAM, FCEIyA, Universidad Nacional de Rosario. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar/>
- Scuderi, C. M. y H. R. Stenta (2002) "La modelación de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle de la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina". Informe de Adscripción, CURIHAM, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina.
- Scuderi, C. M.; G. A. Riccardi y E. D. Zimmermann (2006) "Pronóstico preliminar de crecidas en tiempo pseudo real en una cuenca de llanura". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Scuderi, C. M. y H. R. Stenta (2006) "Estimación del Número de Curva (CN) a partir de la interpretación de imágenes satelitales en la cuenca del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina". (En prensa). Cuadernos del CURIHAM.
- Tucci, C. E. M. y J. C. Bertoni (2003). *Inundações Urbanas na América do Sul*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Brasil, 471p.
- Zimmermann, E. D. (1995) "Implicancias Antrópicas en los Procesos de Inundaciones de Áreas Llanas". Jornadas Regionales Interdisciplinarias sobre Ambiente. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina.