



Estudio de alternativas de obra orientadas a la protección urbana contra inundaciones en la Cuenca del A^o Ludueña utilizando un modelo matemático distribuido

Hernán Stenta¹, Gerardo Riccardi^{1,2}, Raúl Navarro^{1,3}, Erik Zimmermann^{1,4}, Raúl Postiglione^{1,5}, Pedro Basile¹ y Soledad Méndez Zacarías¹

¹ Departamento de Hidráulica (EIC) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nac. de Rosario. Riobamba 245 bis (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina.

² CIC-CIUNR. Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 (2000), Rosario, Santa Fe, Argentina.

³ Dirección Provincial de Protección Urbana Contra Inundaciones. Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente. Provincia de Santa Fe.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁵ Dirección General de Hidráulica y Saneamiento, Municipalidad de Rosario, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: hstenta@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la implementación y explotación del sistema de modelación matemática VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009) en la cuenca del A^o Ludueña (Rosario, Santa Fe, Argentina). Su utilización está orientada al estudio de alternativas de obras que tienen como objetivo principal la protección urbana contra inundaciones de diferentes sectores poblados ante crecidas asociadas a eventos extraordinarios. Se plantearon diferentes obras básicas que incluyeron conductos con captación en diferentes cursos de la red hídrica con descarga directa al Río Paraná; almacenamientos temporarios y terraplenes de defensa en sectores poblados y se plantearon diferentes combinaciones de dichas obras básicas. Se obtuvieron caudales máximos a derivar; alturas de agua y volúmenes de almacenamiento máximo para todas las alternativas planteadas. Se concluye respecto a la importancia; los beneficios y las potencialidades de la implementación y explotación de modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos distribuidos para el estudio de obras orientadas al saneamiento hídrico de una cuenca de llanura.

Palabras clave: obras hidráulicas, cuencas de llanura, modelación matemática.

ABSTRACT

In this work, the implementation and operation of VMMHH 1.0 mathematical model (Riccardi et al., 2009) in the A^o Ludueña basin (Rosario, Santa Fe, Argentina) is presented. The application of VMMHH 1.0 model is oriented to the study of hydraulics structures in order to achieve urban flood protection with extraordinary flood events. The study included different basic hydraulics structures such as derivations with discharge into the Rio Paraná; temporary storage; flood retention; and defense embankments in populated areas. Different combinations of basic hydraulics structures are studied. The maximum flows derived, water depth and maximum storage for all alternatives are obtained. This work highlights the importance, benefits and potentials of the implementation and use of mathematical models for the study of hydraulics structures oriented to the basins drainage.

Keywords: hydraulics structures, flatland basins, mathematical modeling

Introducción

En general, es posible indicar que en los procesos de desarrollos urbanos no planificados desde el punto de vista hídrico se producen impactos mayores ante inundaciones para lluvias similares. Sumado a lo anterior se deben considerar los canales artificiales ejecutados sin un adecuado estudio a nivel integral de cuenca, los procesos de cambio en el uso de suelo (por ejemplo de ganadero a

agrario) y la ejecución de importantes vías de comunicación (autopistas) con su respectiva red de drenaje. Los impactos mencionados precedentemente se evidencian en una reducción de los tiempos de respuesta de la cuenca, un incremento de los caudales máximos y un incremento de los volúmenes escurridos. Los sectores poblados aledaños a zonas bajas son los más vulnerables ante estos impactos. Considerando además de los niveles de agua producto de los impactos ante

inundaciones es de importancia resaltar la permanencia de las aguas y las velocidades de escurrimiento, que potencian los efectos perjudiciales en los habitantes y en forma secundaria en los hechos materiales (inmuebles y demás bienes).

La cuenca baja del A° Ludueña produce el escurrimiento en sectores del caso urbano de la localidad de Rosario. Históricamente, y en general en sectores ubicados en los valles de inundación de cursos de agua se produce, ante eventos de diferentes magnitud impactos sobre los sectores poblados que ocupan dicho valle de inundación. Tal es el caso del A° Ludueña, en los sectores denominados como Barrio Empalme Graneros (sector donde se produce en entubamiento del A° Ludueña) y el denominado Barrio Nuevo Alberdi (ubicado en las márgenes del canal Ibarlucea) a aproximadamente 1000 m aguas arriba de la desembocadura de dicho canal en el A° Ludueña. En este sentido, a lo largo de la historia se han presentado diferentes avances e intervenciones con medidas estructurales y en algunos casos acompañadas de medidas no estructurales.

En la década de los '40, ante la ocurrencia de un evento lluvioso de entre 250 mm y 300 mm precipitados en 3 días, y ante el impacto en sectores poblados se realizó el proyecto y construcción del primer entubamiento, consistente en 2 tubos de diámetro 3,80 m cada uno (denominado Aliviador 1), con una sección neta de escurrimiento de 22,7 m² y con capacidad para evacuar un caudal a sección llena sin desborde de aproximadamente 100 m³/s.

En la década de '60, nuevamente la ocurrencia de un evento de similar características al antes descrito generó impactos en sectores urbanos y se proyectó y construyó un conducto adicional a los dos anteriores de 4,10 m de diámetro (conducto Olivé), con lo que el sistema total contaba con una sección disponible de 35,8 m² y un caudal a evacuar sin desborde de aproximadamente 150 m³/s.

En la década de los '80, se produjo un impacto muy importante en el barrio Empalme Graneros, con alturas de agua en las casas de aproximadamente 2,0 m, ante un evento de aproximadamente 300 mm en 3 días (es decir, de similares características a los anteriores). A partir de dicha situación se realizó el proyecto y ejecución de una serie de obras o medidas estructurales que consistieron en:

- Presa de retención de Crecidas del A° Ludueña (sector sur-oeste de la cuenca, con un

área de aporte en el cierre de la misma de aproximadamente 390 Km² (representando una atenuación del 75 % en términos de caudales)

- Dos conductos aliviadores (Aliviador 2) de sección rectangular de 4,30 m de ancho y 5,05 m de alto cada uno y revestimiento de los dos conductos originales reduciendo su diámetro a 3,30 m. De esta forma se disponía de un área de evacuación de los conductos de 73,7 m² y una capacidad de aproximadamente 285 m³/s (más la presa de retención de crecidas). Es decir se duplicó la capacidad respecto a la década del '60 y se ejecutó una presa de retención de crecidas. Conjuntamente se dispusieron una serie de medidas no estructurales orientadas a limitaciones en términos de ocupación de áreas inundables en sectores aledaños a los principales cursos de aguas.

El sector de entubamientos se encuentra a aproximadamente 2600 m aguas arriba de la descarga del A° Ludueña en el Río Paraná. Allí se produce el pasaje de la sección del A° Ludueña a cielo abierto (canal de 20 m de base de fondo, taludes laterales a 45 ° y profundidades de aproximadamente 6,0 m) en las conducciones cerradas descritas anteriormente (1 conducto circular de 4,10 m, dos conductos circulares de 3,30 m de diámetro cada uno y dos conductos rectangulares de 4,30 m de ancho por 5,05 m de alto cada uno). El entubamiento se extiende por 1400 m. Finalmente el A° Ludueña escurre a cielo abierto hasta su descarga en el Río Paraná.

En Marzo de 2007 se produjo un evento extraordinario, de aproximadamente 365 mm y 400 mm de lluvia total en 5 días. Este evento produjo impactos de diferentes sectores de la zona urbana de Rosario y localidades vecinas. En función de lo anterior surge el planteo de nuevas obras o medidas estructurales y no estructurales.

Entre los años 2008 y 2009 se realizó una obra de transición y embocadura orientada a incrementar la capacidad de evacuación de los entubamientos y se realizó la limpieza del A° Ludueña en la salida de los entubamientos debido a la presencia de sedimentos que reducían la sección disponible al escurrimiento.

Se remarca el impacto producido principalmente por el desarrollo urbano sin una planificación controlada o preestablecida, el incremento de la impermeabilización y el impacto de las vías de comunicación, que en este caso actúan, con sus cunetas, acelerando la respuesta de la cuenca. Se hace notar que los eventos descriptos anteriormente no son muy disímiles entre sí (en términos generales

de duración y láminas) y que los impactos son cada vez mayores, lo que implica a su vez, la necesidad de definición de mayores obras.

En este contexto, el presente trabajo describe la utilización de un modelo matemático hidrológico-hidráulico cuasibidimensional, en el marco de evaluación de obras para protección urbana contra inundaciones en la cuenca del A° Ludueña. Se analizan diferentes alternativas de obras y se obtienen las características de las mismas. Esta definición permite contar con mejor y más precisa información a la hora de la toma de decisión respecto a la alternativa a adoptar para proyectar y construir por parte de la Autoridad Hídrica Provincial.

Descripción de los Trabajos

Se implementó y calibró el modelo matemático en la cuenca del A° Ludueña. Se definieron las diferentes alternativas de obras estudiando la solución para dos escenarios de diseño, con la finalidad de plantear las soluciones mediante dos etapas, considerando una primera etapa a corto plazo y una segunda etapa a mediano o largo plazo. Para cada alternativa propuesta y para cada etapa se realizaron las corridas del modelo y se obtuvieron las variables hidráulicas de interés (caudales máximos, alturas de agua, pendientes hidráulicas, volúmenes y velocidades de flujo) de modo de avanzar en la definición de las dimensiones de las obras.

Descripción del Modelo Matemático

En el presente estudio se utilizó el modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasibidimensional denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2009). El sistema surge de la fusión del modelo matemático CTSS8 (Riccardi, 2000) y de la plataforma computacional Simulaciones 2.0 (Stenta et al., 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow et al., 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de

descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación.

Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma, las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

El modelo conceptual utilizado por el sistema VMMHH 1.0 parametriza la variabilidad de la morfología del terreno dentro de la celda considerando una sección triangular con un punto bajo central y pendientes laterales. La sección transversal efectiva de almacenamiento y conducción es, entonces, representada por una aproximación triangular dentro de cada celda.

Descripción de la Cuenca

La cuenca del A° Ludueña se encuentra situada entre los paralelos 32° 45' S y 33° 08' S y los meridianos 61° 04' O y 60° 39' O (Fig. 1), perteneciendo a la provincia de Santa Fe (Argentina), engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario y desemboca en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km² y una pendiente media de 1,4 por mil. La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Funes-Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La cuenca presenta un grado importante de intervención antrópica (tendido de una densa red de vías de comunicación y canales artificiales, entre otros).

En la cuenca se presentan, en la parte alta de la misma, suelos bien drenados, de permeabilidad moderada a moderadamente lenta, no susceptibles a anegamiento y aptos

para la agricultura (del tipo argiudoles vérticos) y en la parte central y norte (zona deprimida), se presentan suelos con drenaje insuficiente y afectados por las fluctuaciones de la napa freática (asociación de argiudoles vérticos y natracualfes típicos) (INTA, 1990). La agricultura constituye el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente el cultivo de soja y en menor medida el maíz y el trigo.

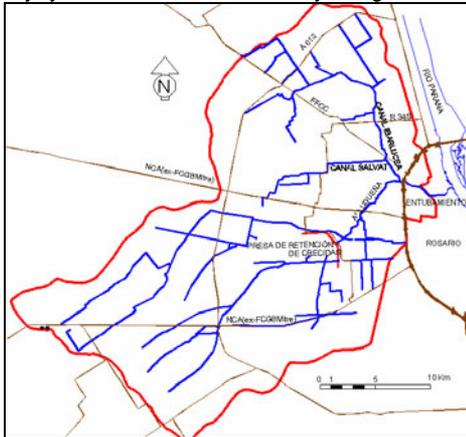


Fig. 1. Cuenca del A° Ludueña

Implementación, Calibración y Validación del Modelo Matemático

La información básica para la implementación del modelo se obtuvo principalmente de relevamientos realizados por el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (Prov. de Santa Fe). Asimismo se contó con información recopilada en distintos organismos oficiales. Los trabajos llevados a cabo para la implementación del modelo en la cuenca del Arroyo Ludueña (Fig. 2) son:

- a) Generación del modelo digital del terreno,
- b) Definición de la red de drenaje,
- c) Definición del trazado vial y ferroviario,
- d) Definición de alcantarillas y puentes,
- e) Definición de las condiciones de borde e iniciales,

f) Calibración y validación del modelo. El modelo fue utilizado con los parámetros calibrados y validados en simulaciones realizadas en trabajos antecedentes. Se emplearon los parámetros asociados a las funciones de almacenamiento y conducción en celdas, de resistencia al escurrimiento en cursos y en planicies de inundación y los coeficientes de descarga en puentes y

alcantarillas obtenidos por medio de calibraciones realizadas para tormentas de los años 1994, 1996 y 2007 (Stenta, 2008; Riccardi, 2007).

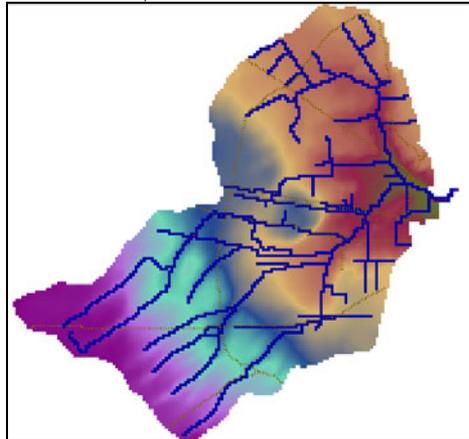


Fig. 2. Modelo de la cuenca del A° Ludueña.

Aplicación del Modelo para Alternativas de Obras

Las diferentes alternativas surgen a partir de considerar: i) una serie de obras básicas, para luego proponer combinaciones de las mismas y obtener la alternativa particular; ii) el planteo de dos escenarios de diseño considerando que en cada escenario se obtienen las obras requeridas para evitar el impacto ante inundaciones. A continuación se describen las obras básicas y los escenarios de diseño.

i) Propuestas de obras básicas

Las diferentes alternativas de obras básicas son: a) derivaciones con captación en el canal Ibarlucea y/o en el A° Ludueña con descarga directa al Río Paraná; b) obra de retención de crecidas en el sector Noreste de la cuenca; c) terraplenes de defensa en sectores aledaños al valle de inundación del canal Ibarlucea (B° Nuevo Alberdi) y d) almacenamientos con desbordes controlados del curso en el sector del Bosque de los Constituyentes (Sector Este de la cuenca). En la Fig. 3 se representan dichas alternativas de obras básicas y se describen a continuación.

- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por Ruta 34 S hasta su descarga en el Río Paraná.

- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por calle Camino Limite (Limite entre Municipios de Rosario y Granadero Baigorria) hasta su descarga en el Río Paraná.

- Captación en el canal Ibarlucea con derivación por calle Salvat hasta Av. de Circunvalación continuando por dicha avenida hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el arroyo Ludueña con derivación por Av. de Circunvalación y por esta última hasta su descarga en el Río Paraná.
- Captación en el arroyo Ludueña con derivación por calle Sorrento hasta su descarga en el arroyo Ludueña.

- Almacenamiento temporario aguas abajo del puente de Av. de Circunvalación y cruce del A° Ludueña en la zona del Bosque de los Constituyentes.
- Obra de retención de crecidas (al norte del cruce de la ruta 34 S y el canal Ibarlucea).
- Terraplén de defensa del barrio Nuevo Alberdi.

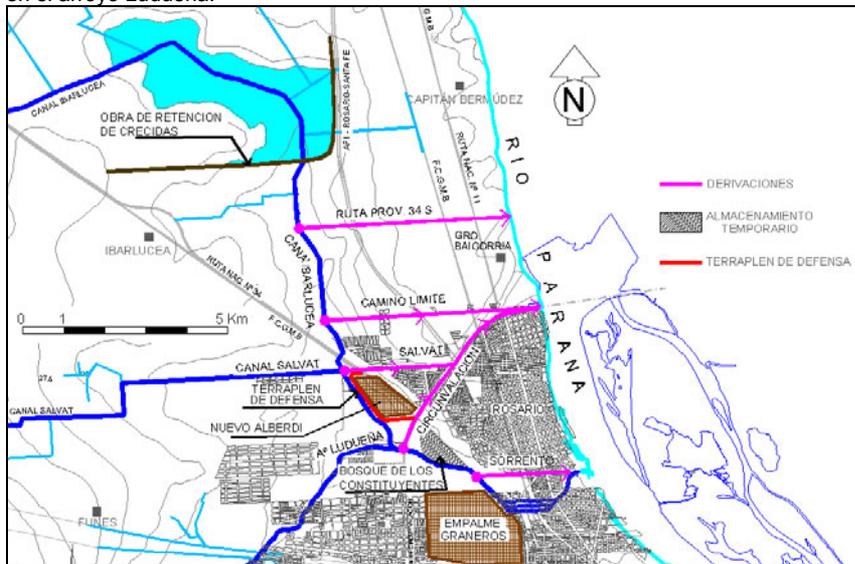


Fig. 3. Alternativas de obras básicas.

ii) Escenarios considerados

Los escenarios corresponden a eventos extraordinarios y surgen del estudio de Rehidrología de la Cuenca del A° Ludueña (DH, 2008). Los mismos presentan las siguientes características:

Recurrencia de la Precipitación Total: 100 años. Duración de la precipitación total: 5 días. (Día 1: 19 mm + Día 2: 45 mm + Día 3: 190 mm + Día 4: 22 mm + Día 5: 18 mm). Distribución diaria mediante bloques alternos. Distribución subdiaria según coeficientes de relación entre láminas de diferentes duraciones (Basile et al., 2009). Distribución areal uniforme. Cota Río Paraná en desembocadura 8,47 m IGN.

Para la determinación de la condición de humedad antecedente se utilizó el concepto de Índice de Precipitación Antecedente (IPA), se vinculó por medio de una regresión lineal el IPA y el número de curva (CN) y se obtuvieron los valores de CN variable por día asociados a diferentes probabilidades de excedencia de

humedad antecedente en base a un estudio estadístico de condiciones de humedad antecedente en tormentas reales (Zimmermann et al., 2009):

1) Escenario E1, CN variable por día: 75,8; 77,4; 81,6; 90; 90. Probabilidad de excedencia $P(x > x_0) = 0.5$. $P_{neta} = 153$ mm.

2) Escenario E2, CN variable por día: 87,3; 88,8; 90; 90; 90. Probabilidad de excedencia $P(x > x_0) = 0.05$. $P_{neta} = 198$ mm. Es posible observar que el escenario E2 produce impactos mayores que el escenario E1.

Limitaciones impuestas para el proyecto de obras

Las limitaciones de mayor relevancia referidas a las condiciones que deben verificar las alternativas de obras propuestas son:

- Sector de Embocadura. Barrio Empalme Graneros. Caudal máximo en la embocadura: 285 m³/s, cota: + 14,80 IGN. La condición de caudales y niveles impuestos está directamente asociado a la protección contra inundaciones

del Barrio Empalme Graneros (dicho barrio se encuentra en el sector de embocadura del A° Ludueña). Niveles superiores implican anegamientos en diferentes sectores del Barrio. La capacidad de descarga se encuentra asociada a una cota del Río Paraná de + 8,53 IGN.

ii) Canal Ibarlucea. Barrio Nuevo Alberdi. Cota de desborde en el sector del Barrio Nuevo Alberdi: + 16,50 m IGN. Niveles superiores implican desborde del canal Ibarlucea e inundación en un sector del Barrio. El sector se encuentra ubicado a aproximadamente 1400 m aguas arriba de la descarga del canal Ibarlucea en el A° Ludueña. Se plantea como alternativa de obra en caso de desborde el diseño de un terraplén de defensa.

Las limitaciones impuestas están asociadas principalmente a evitar inundaciones en sectores densamente poblados, donde se verifican los mayores impactos de inundaciones, referidos fundamentalmente a alturas de agua y permanencia.

La metodología de trabajo consistió en definir las obras necesarias para evitar impactos de inundaciones según las limitaciones impuestas previamente para el escenario E1. Seguidamente, para el escenario E2 se consideran las obras que resultan del escenario E1 y se determinan las obras adicionales. La definición de las obras necesarias mediante este planteo posibilita el

desarrollo del proyecto y ejecución de obras por etapas, donde se definen las obras necesarias para el escenario E1 como requeridas a corto plazo y las obras adicionales asociadas al escenario E2 para mediano o largo plazo.

La propuesta de alternativas de obras y verificación de las limitaciones impuestas en cada escenario es un proceso iterativo debido a las características del modelo matemático. Los mecanismos de generación y traslado del modelo utilizado permiten la propagación de la señal hacia aguas arriba, y en un campo bidimensional, por lo tanto el efecto en la modificación de la respuesta hidrológica-hidráulica de una determinada obra no se conoce a priori. Se requiere proponer y verificar la respuesta en cada alternativa de obra propuesta, observando los resultados de niveles de agua y de caudales impuestos como limitaciones al proyecto de obras.

En una primera instancia se definieron un total de 18 alternativas de obras. Luego, a partir del análisis de prefactibilidad de ejecución de todas las alternativas de obras, se redujo a 11 el número de alternativas. En la Tabla 1 se presentan las alternativas evaluadas.

Análisis De Resultados

A modo de ejemplo se presentan en las Tablas 2, 3 y 4 los resultados principales para las alternativas A1, A3 y A11, respectivamente.

Tabla 1. Combinaciones de obras propuestas.

Alter.	Obras para Escenario E1	Obras para Escenario E2
A1	Salvat y Cam. Limite	Av. De Circunv.
A2	Salvat y R34S	Cam. Limite
A3	Salvat y Almac. al Norte R34S	Cam. Limite
A4	Salvat	Cam. Limite
A5	Salvat y Av. de Circunv.	R34S
A6	Salvat	Sorrento
A7	Salvat, R34S y Cam. Limite	Av. de Circunv.
A8	Salvat y Terraplén Nuevo Alberdi	Sorrento
A9	Salvat, Sorrento y terraplén Nuevo Alberdi	Av. de Circunv.
A10	Av. de Circunv y terraplén Nuevo Alberdi	Sorrento
A11	Salvat, Almac. Bosque Constituyentes y terraplén Nuevo Alberdi	Sorrento

Tabla 2. Resumen de resultados para la Alternativa A1.

Obra	Caudal a derivar (m /s)	Veloc. Media (m/s)	Pendiente Hidráulica (por mil)
Salvat	165	4,13	1,50

Cam. Limite	65	3,68	1,90
Av. de Circunv.	95	3,17	1,00

Tabla 3. Resumen de resultados para la Alternativa A3.

Obra	Caudal a derivar (m ³ /s)	Veloc. Media (m/s)	Pendiente Hidráulica (por mil)
Salvat	165	4,13	1,50
Cam. Limite	70	3,50	1,85
Obra de Retención. Q.máx.Ingreso:130m ³ /s; Qmax.Sal.(laminado): 27 m ³ /s. Cota máx. agua: 25,25 m IGN; Sup. Afectada:15 km ² (25,25 m IGN); Vol. Máx.:16 Hm ³ . Long. Obra de cierre: 5600 m.			

Tabla 4. Resumen de resultados para la Alternativa A11.

Obra	Caudal a derivar (m ³ /s)	Veloc. Media (m/s)	Pendiente Hidráulica (por mil)
Salvat	160	4,10	1,44
Sorrento	70	3,65	2,60
Cota mínima terraplén Nuevo Alberdi: 17,10 m (más revanchas).			
Volumen almacenamiento Bosque de los constituyentes: 0,55 Hm ³ .			

Los resultados del modelo en cada alternativa de obra permiten obtener los valores de las variables hidrológicas e hidráulicas que caracterizan la respuesta de la cuenca y el estado de la misma en función de los requerimientos impuestos. Los resultados se obtienen en términos de las variables de flujo caudales, alturas de agua y velocidades para todo tiempo en todo el dominio espacial.

Como verificación se realizó el análisis de comportamiento de cada una de las alternativas de obras propuestas para una lluvia similar a la ocurrida en Marzo de 2007. Se observó que las alternativas tienen un adecuado margen de seguridad respecto a los límites impuestos, lo que indica que no existirán impactos de importancia si se ejecutará cualquiera de las alternativas propuestas y se produciría una lluvia similar a la ocurrida en Marzo de 2007.

Todas las alternativas propuestas finalmente se dimensionan verificando no inundabilidad en los sectores poblados, a partir de allí se requiere el estudio vinculado al análisis hidroeconómico, de impacto ambiental y de los posibles impactos sociales de algunas de las alternativas de obras. Por ejemplo, respecto al terraplén en el B° Nuevo Alberdi en las márgenes del canal ibarlucea presenta la desventaja de que el caudal se capta en la sección cercana a la embocadura, lo que implica el escurrimiento de todo el caudal en

zonas pobladas, incrementado la vulnerabilidad de dichas zonas. Lo anterior surge del hecho que el terraplén se planteó como alternativa para proteger al B° Nuevo Alberdi sin captación aguas arriba. Asimismo se requiere de obras complementarias como ser estaciones de bombeo para evacuar el desagüe local y tareas de conservación del terraplén.

Respecto a la alternativa de obra de retención de crecidas al Norte de la ruta 34S (Alternativa A3) se observa un importante impacto del área afectada para los niveles de agua alcanzados dentro del embalse. Se observa una reducción importante del caudal, pero dicha condición no se refleja hacia aguas abajo, en los sectores poblados, ya que se suman los aportes de las zonas ubicadas aguas abajo de dicha obra. Asimismo, la zona afectada por la ocupación de las aguas es una zona altamente productiva desde el punto de vista agropecuario. Es decir, esta propuesta de obra no resulta eficiente desde el punto de vista hidráulico, ya que no se reducen notablemente los diámetros de las conducciones ubicadas aguas abajo para evitar impacto de inundaciones.

Respecto a la alternativa de almacenamiento temporario aguas abajo del puente de Av. de Circunvalación y cruce del A° Ludueña en la zona del Bosque de los Constituyentes (A11) se observó que la capacidad de volumen disponible no es relevante para lograr una reducción significativa de los caudales máximos. Asimismo, el espacio actualmente se destina a un área verde de reserva, por lo que es esperable que la dimensión ambiental prevalezca de modo de no intervenir el sector.

Se observó que las obras más eficientes desde el punto de vista hidráulico son aquellas ubicadas en la cercanía de los sectores poblados. A media que la obra planteada se ubica alejada (hacia aguas arriba) de dichos sectores poblados, la misma requiere captar un importante caudal para restablecer condiciones de no desborde aguas abajo.

Debido a la escasa disponibilidad de espacios para plantear áreas de almacenamientos temporarios, sumado al crecimiento urbano de la localidad de Rosario y sus alrededores y a la topografía de la zona no es posible plantear obras de retención de crecidas que sean eficientes en su comportamiento hidráulico y formen parte de la solución integral.

Conclusiones

Los resultados obtenidos reflejan la complejidad en la definición de las obras requeridas para proteger sectores urbanos ubicados en áreas vulnerables ante inundaciones.

Las limitaciones de mayor importancia son la poca disponibilidad de espacios para desarrollar las obras, los elevados costos de las obras y su ejecución en sectores urbanizados. En este sentido una adecuada planificación urbana en conjunto con el seguimiento mediante la autoridad hídrica deben ser necesarios para alcanzar una dinámica sostenible en el tiempo de crecimiento urbano dentro de la cuenca, sin afectar a los pobladores ubicados en los sectores bajos.

Se resalta la potencialidad de utilización de modelos matemáticos distribuidos físicamente basados en estudios de esta índole, donde resulta indispensable contar con información de alto nivel de detalle de variables de flujo distribuidas espacialmente, definir las características de las obras orientadas a la protección urbana contra inundaciones y definir los sectores más vulnerables y los impactos en los diferentes sectores de la cuenca. La información obtenida mediante modelación matemática resulta adecuada y suficiente para la toma de decisión de la alternativa de obra más conveniente.

Los resultados permitieron disponer a la Autoridad Hídrica Provincial de herramientas para la selección de las alternativas de mayor importancia para avanzar a una etapa de anteproyecto de obras y que finalmente permite la definición del proyecto ejecutivo. Asimismo, con la finalidad de lograr sustentabilidad en el tiempo, el estudio permitió la elaboración de una serie de medidas no estructurales orientadas principalmente a la regulación de caudales y a limitaciones en el uso y ocupación del suelo. El planteo de alternativas propuestas en el presente trabajo permite la elaboración y proyecto de alternativas de obras por etapas a corto, mediano y largo plazo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la ANPCYT y al MASPOMA (SF) por el apoyo mediante PICTO 23187 y Convenio MASPOMA-FCElyA, UNR.

Referencias

Basile, P., Riccardi, G., Zimmermann, E., Stenta, H., Scuderi C., Rentaría, J. y González, A. 2009. Derivación de Curvas Intensidad-Duración-Recurrencia unificadas para la Ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. *XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut.

Cunge, J. 1975. Two Dimensional Modelling of Flood Plains. *Cap. 17 Unsteady flow in open channels* (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.). Water Resources Publications, Fort Collins.

Chow, V. T., Maidment, D. y Wags, L. 1994. *Hidrología Aplicada*. Mac Graw-Hill, Bogotá. 554 p
INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca. Tomo II. Proyecto PNUD Argentina 85/019. 677 pag. ISBN 950-432964-2

Riccardi, G. 2000. Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral, FCEFYN, UNC, Córdoba*.

Riccardi, G. 2007. Reporte Técnico sobre inundaciones ocurridas en la semana del 26 al 31 de Marzo de 2007. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. Abril de 2007. 12 pag.

Riccardi, G., Zimmermann, E., Mancinelli, A., Scuderi, C., Basile, P., Rentaría, J. y Garcia, P. 2008. Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. *Informe de Avance 1*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCElyA. UNR.

Riccardi, G., Zimmermann, E., Mancinelli, A., Scuderi, C., Basile, P., Rentaría, J. y Garcia P. 2009. Rehidrología y Modelo de Simulación a Tiempo Real en Sistema de Alerta Hidrológico en las Cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo. *Informe de Avance 4*. Departamento de Hidráulica y CURIHAM. FCElyA. UNR.

Stenta, H., Rentería, J. P. y Riccardi, G. 2005. Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 74. pp 1-13.

Stenta, H. 2008. Efectos del Tamaño de Grilla sobre la Modelación Matemática Distribuida del Escurrimiento Superficial en Cuencas de Llanura. Trabajo. *Tesis Doctoral. FCElyA, UNR, Rosario-Santa Fe*.

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