

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL DESBORDE DEL RÍO SALADO SOBRE LA CIUDAD DE SANTA FE, ABRIL 2003

Romina Giampieri, Pablo Tassi, Leticia Rodriguez, Horacio Gaudín y Carlos Vionnet

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) - Universidad Nacional del Litoral (UNL)
Ciudad Universitaria. Pje. El Pozo C.C. 217 – 3000 Santa Fe - E-mail: rgiamp@fich1.unl.edu.ar , vionnet@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

Extensas áreas del centro y norte de la Prov. de Santa Fe y su ciudad capital, han sido afectadas por una excepcional inundación del río Salado como resultado de extremas precipitaciones acaecidas sobre la región durante el primer cuatrimestre de 2003. En el mes de abril, entre 300 y 400 mm de lluvia cayeron en la ciudad y en los parte centro y norte del territorio provincial. En la noche del 29 de abril de 2003 casi un tercio de la ciudad estuvo bajo agua. Esta comunicación presenta los resultados de la simulación numérica del evento, en áreas urbanas y suburbanas de la ciudad de Santa Fe. Las simulaciones fueron realizadas con un código de elementos finitos basado en un modelo matemático de onda larga o ecuaciones de aguas poco profundas. Además de otras capacidades, el código posee un algoritmo de secado/mojado de elementos, el cual confiere mayor realismo a los cálculos numéricos. El objetivo fue simular los efectos de la falla de 150m de un terraplén mal concluido, lo que causó la rápida inundación de barrios bajos de la ciudad. Los resultados obtenidos reproducen adecuadamente bien el avance de la onda de inundación en la ciudad, capturando las catastróficas consecuencias del colapso de la estructura de protección.

ABSTRACT

Large areas of central and northern Santa Fe and the State Capital Santa Fe, have been recently affected by an exceptional flood of the Salado River as the result of extreme precipitations over the region during the first quarter of 2003. During April, between 300 and 400 mm of rain fell in Santa Fe city and surrounding areas to the north. By the night of April 29th 2003, almost one third of the city was under water. This communication presents the results of the numerical simulation of the event, in urban and suburban areas of Santa Fe city as well. The simulations were performed with a finite element code based on the long wave mathematical model or shallow water equations. Among other capabilities, the code possesses a wetting/drying element algorithm, which confers more realism to the numerical computations. The aim was to simulate the effect of the failure of a 150m reach of an unfinished levee that caused the rapid flooding of lowland neighborhoods, practically without warning. Numerical results reproduce flood stages within the city during the flood peak, adequately well, capturing the catastrophic consequences of the collapse of the flood-control structure.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Santa Fe fue fundada por el conquistador español Juan de Garay en 1573, sobre la margen derecha de la planicie aluvial del río Paraná, a la vera del río San Javier. A mediados del siglo XVII, la administración local decide trasladar la ciudad unos 80km hacia el sur, en la zona de su actual emplazamiento próxima a la desembocadura del río Salado sobre el sistema aluvial del Paraná (Fig.1). Desde entonces, la ciudad de Santa Fe ha experimentado cíclicas crecidas, alguna de ellas de características excepcionales, según la percepción ocasional de los

daños materiales y personales sufrida por la población. La ciudad, en su crecimiento urbano, fue ocupando paulatinamente parte de la planicie aluvial del río Paraná, hacia el Este, y parte de la planicie del río Salado, hacia el Oeste. Si bien la ciudad mantiene un registro adecuado de la magnitud de las crecidas ocurridas durante el siglo XX, principalmente las debidas al río Paraná, ninguna de ellas tuvo los efectos devastadores, tanto en pérdida de valores materiales como de vidas humanas, del reciente desborde del río Salado ocurrido a fines de abril del corriente año.



Figura 1.- Ciudad de Santa Fe, limitada al Este por el sistema del río Paraná, y al Oeste por el río Salado.

La hidrología del río Salado es muy variable, habiéndose registrado dos picos máximos del orden de los $2700\text{m}^3/\text{s}$ durante las crecidas de 1973 y 1998 en el período 1952-2000. En dicho lapso, se registró un caudal mínimo diario de $7\text{m}^3/\text{s}$ en enero de 1995, mientras que el módulo orilla los $150\text{m}^3/\text{s}$ a la altura de la Ruta Prov. Nro 70 (RP70), en proximidades de la ciudad de Esperanza (Evarsa, 2000).

El régimen pluviométrico medio anual de la Prov. de Santa Fe registra un leve gradiente en la dirección Este-Oeste, disminuyendo de los 1100mm a unos 800mm para el período 1941/70, y de 1200mm a los 900mm para el período 1971/2000. El río, en su tramo inferior, escurre en dirección NO-SE, y se ubica en la zona centro-norte de la Prov. de Santa Fe. El caudal del río Salado se compone principalmente por la descarga de los acuíferos superficiales en períodos secos, y por el exceso de precipitaciones en períodos húmedos. A esta última componente de escorrentía superficial se suman el aporte del río Calchaquí, quien transporta el excedente hídrico de la zona de los Bajos Sub-meridionales del norte santafesino, y aguas abajo, el aporte de los A° Las Conchas, San Antonio, y Cululú. La contribución al caudal de las cuencas alta y media del río Salado son, por lo general, poco significativas en comparación con los aportes recibidos en la cuenca inferior.

Durante la crecida del río Salado del '73, la acción erosiva de la corriente produjo la socavación, y el consecuente colapso de los puentes de la autopista Santa Fe-Rosario. Los puentes tenían una luz de 150m, salvando únicamente el cauce principal del río, donde el ancho de la planicie aluvial es de unos 2000m (lo que representa un coeficiente de contracción del

8%). A pesar del colapso de la estructura vial, los puentes de la autopista fueron reconstruidos en el mismo sitio y con la misma luz de 150m, aunque con un pilotaje mucho más profundo. En años subsiguientes, la ciudad experimentó los embates de crecidas excepcionales del río Paraná (1982/83, 1992 y 1998), de las cuales la de 1983 es aún recordada como una de las más devastadoras del siglo XX. Luego de la crecida de 1992, la ciudad de Santa Fe, en concordancia con el gobierno de la provincia, decide construir una serie de estructuras de protección tanto en el valle aluvial del Salado como del lado de la planicie aluvial del Paraná (subsistema Leyes-Setúbal). A lo largo del río Salado, sobre el oeste de la ciudad, se construyó el terraplén Irigoyen que corre de norte a sur unos 7km, aproximadamente, con una sobre-elevación de 5,2 m en promedio con respecto a la planicie aluvial del Salado (cota IGM de coronamiento, =17.4m). Dos de las tres etapas proyectadas para la construcción de dicho terraplén fueron terminadas. La tercera etapa, que contemplaba la continuación del terraplén hasta conformar un anillo de protección hacia el norte de la ciudad, nunca se materializó. Al error de diseño de reconstruir los puentes de la autopista con la misma luz, se sumó el hecho que la traza adoptada para el nuevo terraplén Irigoyen se ubicó al oeste del terraplén pre-existente (construido por la ciudad a lo largo de los años con una cota de coronamiento menor). En consecuencia, la nueva traza del terraplén Irigoyen tuvo el doble efecto adverso de disminuir la capacidad hidráulica del río para transportar su masa de agua en épocas de creciente, y de favorecer una rápida y no planificada urbanización de zonas que naturalmente pertenecen al río.

Precipitaciones extremadamente intensas sobre el centro-norte de la Prov de Santa Fe, saturaron la cuenca baja del río Salado durante los meses de octubre de 2002 a mayo de 2003. En las últimas semanas de abril de 2003, se produjeron intensas precipitaciones en la cuenca inferior del río Salado, superando en algunas localidades los 400mm. En pocos días, el río desbordó el cauce ocupando su planicie de inundación con inusual intensidad, destrozando puentes y cortando caminos de la estructura vial provincial y nacional, aislando algunas localidades del centro-norte santafesino en su corrida hasta la desembocadura en las inmediaciones de la ciudad de Santa Fe. Durante la noche del 29 de abril, el agua ingresó masivamente a la ciudad por el sector noroeste, a través de una brecha de unos 150m producida en el extremo norte, sin terminar, del terraplén Irigoyen. En pocas horas, la incontenible masa de agua inundó barrios completos, cubriéndolos con alturas de agua que iban de los 2m hasta más de 4m, acorde a la topografía de los barrios afectados. Por entonces, el caudal pico a través del puente de la Autopista Santa Fe-Rosario fue estimado en unos 3600 m³/s. En un cierto momento, casi un tercio de la ciudad estuvo bajo agua (Fig.2), incluyendo desde barrios marginales hasta de clase media y media-alta. El total de las pérdidas económicas producidas por efectos directos e indirectos asociados a la crecida, fue estimada por diversos organismos estatales y privados en más de 1200 millones de dólares (FICH, 2003), sin contemplar el sufrimiento emocional de los directamente afectados (la cifra oficial de muertos en la ciudad es de 23 personas, mientras que 24 personas continúan en la categoría de desaparecidos).



Figura 2.- Vista aérea del terraplén Irigoyen. Su rotura –flecha– permitió el ingreso de agua en la noche del 29/04

OBJETIVO

La presente comunicación técnica intenta reconstruir numéricamente el evento padecido por la ciudad de Santa Fe en las 24 hs que siguieron a la rotura del terraplén Irigoyen. Dado que la simulación numérica propuesta se basa en la conocida aproximación de ondas largas, o ecuaciones de aguas poco profundas, una porción considerable del trabajo se orientó inicialmente a reconstruir la topografía del sistema conformado por el cauce principal del río Salado y su planicie aluvial. El trabajo puso un énfasis especial en reproducir la penetración de la onda de crecida en la ciudad, recreando en tiempo y forma el ascenso del nivel de agua a través de comparaciones entre valores simulados y medidos de cota de superficie libre a un lado y otro del terraplén.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El dominio computacional adoptado para la simulación ocupa aproximadamente un área de 88 km² recorriendo unos 25 km del río en dirección N-S, con un ancho promedio de planicie de 3 km, y extendiéndose desde 3 km al N de la RP70 hasta la confluencia con el río Paraná. El preproceso de información básica fue ejecutado con una batería de software disponible en el Grupo de Estudios Hidro-Ambientales de la FICH, desde el IDL+ENVI de RSI Inc, hasta la interfase SMS de la BYU (Utah). El cálculo fue resuelto mediante el código en elementos finitos producido por EDF de Francia, mientras que la visualización de resultados se hizo con los post-procesadores RUBENS y GID. El código utilizado resuelve las leyes de conservación de la masa de agua y de la cantidad de movimiento en la horizontal, promediadas sobre la turbulencia (aproximación de Reynolds) y sobre la dirección vertical (aproximación de ondas largas). A su vez, el código incluye un algoritmo específico de secado y mojado de celdas, lo que permite una adecuada representación de fenómenos de propagación de ondas de frente abrupto. En la Fig.3 se muestra una perspectiva de la topografía de la zona adoptada para la simulación, donde se aprecia la traza altamente meandrosa del cauce del río Salado, el estrangulamiento de la planicie provocada por la autopista Santa Fe-Rosario, y la traza del terraplén Irigoyen destinado a “proteger” una amplia zona significativamente baja del margen oeste de la ciudad.

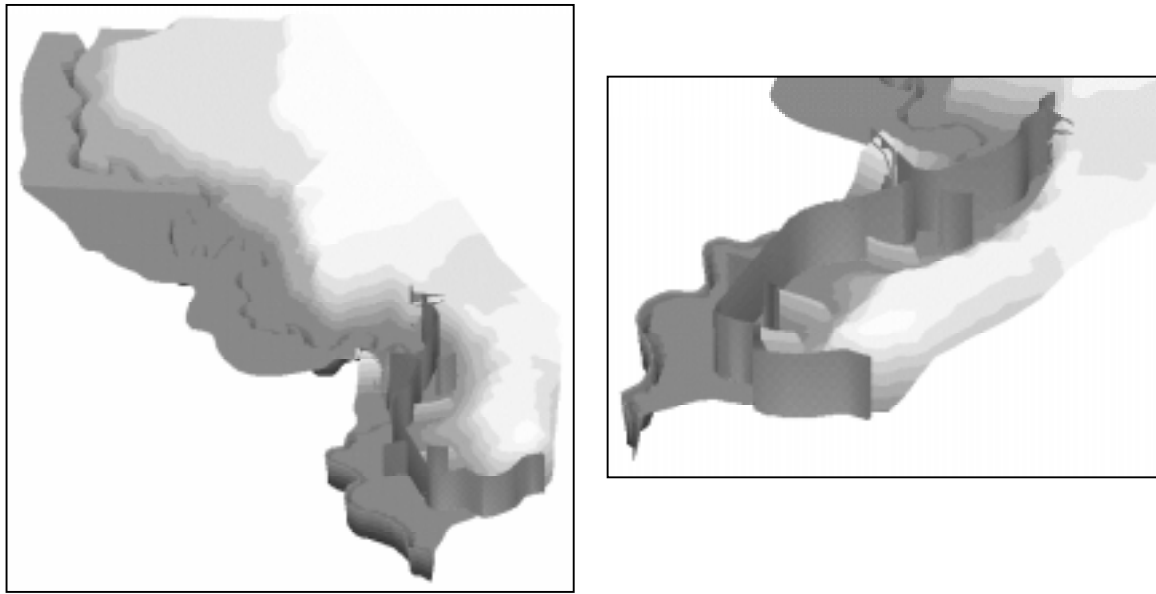


Figura 3.- Topografía recreada de la zona de estudio

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Al presente, se llevan ejecutados tres cálculos completos, basados en mallas no estructuradas (Fig. 4) de triángulos lineales de diferente discretización (Tabla 1). Si bien en la segunda malla se redujo el área del dominio computacional, se refinó en aquellos lugares donde se consideró conveniente (en base a la experiencia previa adquirida durante la primera simulación), como ser el puente de la autopista Santa Fe-Rosario y de la RP70, y la brecha del terraplén al norte de la ciudad. (Giampieri *et al.*, 2003). Estas experiencias previas dieron lugar a la adopción de las mallas definitivas para el cálculo (3 y 4).

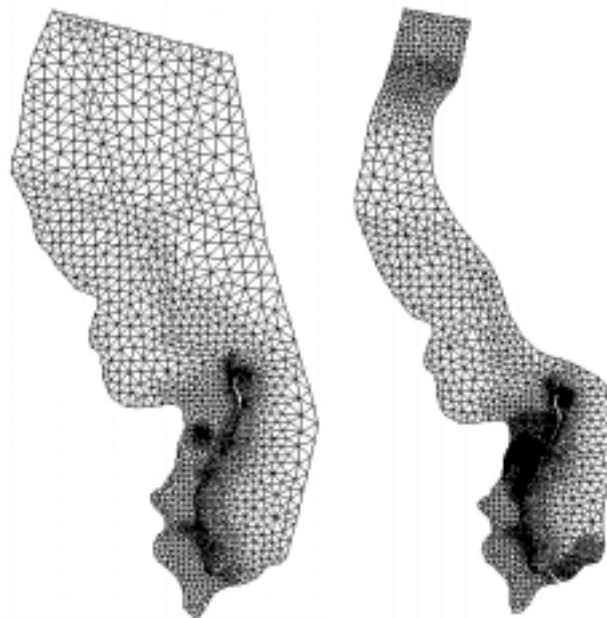


Figura 4.- Distintas mallas de cálculo

Se utilizaron dos valores del coeficiente de fricción para determinar, en principio, la sensibilidad de los resultados a cambio de los valores del parámetro n de rugosidad de Manning ($n= 0.025$ y 0.030).

Se llevaron a cabo dos simulaciones, una para el estado estacionario y otra para el estado transitorio. El objetivo de la primera fue obtener valores iniciales de la profundidad de agua y del campo de velocidades para el escenario transitorio. Condiciones de contorno fueron definidas aguas arriba y aguas abajo del dominio computacional. Aguas arriba se impuso una condición de caudal constante hasta que la descarga alcanzó el valor estimado de $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ y el modelo convergió a un estado estacionario. La condición de contorno aguas abajo fue definida como un nivel constante de agua de 14.2 m IGM a lo largo de la sección transversal de salida, a la altura de la confluencia del Salado con el río Paraná. Para esta simulación estacionaria no fue permitida la entrada de agua a la ciudad.

Tabla 1.- Distintas mallas utilizadas en el cálculo

Malla	# nodos	# elementos	utilizada para el cálculo de
1	5512	9848	topografía
2	2075	3744	topografía e hidrodinámica
3	4190	7765	topografía e hidrodinámica
4	4464	8289	topografía e hidrodinámica

Al término de esta simulación se observa una notable diferencia aguas arriba y aguas abajo del puente de la Autopista Santa Fe-Rosario causada por una severa contracción del flujo. La diferencia simulada fue de $1.7\text{--}1.9\text{m}$, dependiendo de la rugosidad utilizada, mientras que la observada fue estimada en 1.2 m (Fig.5a). Hay dos razones que pueden explicar esta discrepancia: i) que las secciones transversales a la altura del puente de la autopista Santa Fe-Rosario estén incorrectamente representadas (error local), lo que disminuye la conductancia hidráulica de la sección transversal, y por ende, es necesario un desnivel (Δh) mayor para un mismo gasto, ii) que el modelo numérico sea más “lento” que el prototipo, posiblemente atribuido a una incorrecta representación de la topografía (error global). Esto se traduce en un mayor almacenamiento de energía potencial en detrimento de energía cinética.

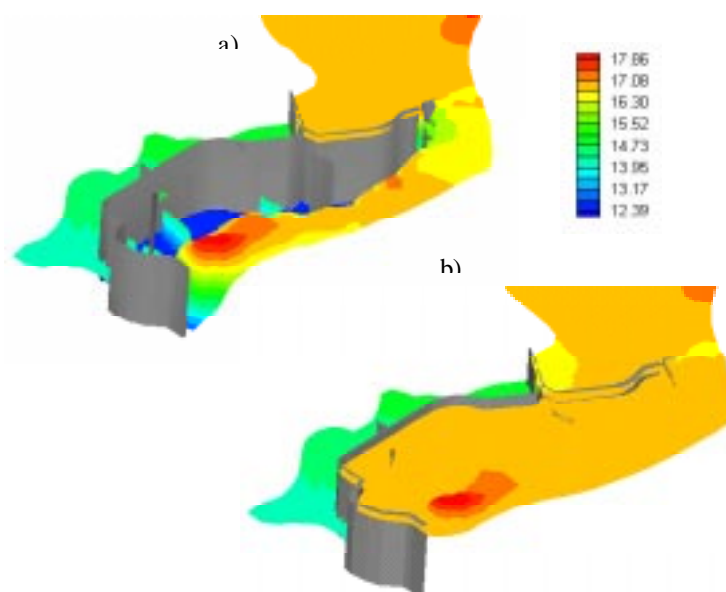


Figura 5.-

Superficie libre (m)

a) final estado estacionario b) final de la simulación

Las mismas condiciones adoptadas para la primera simulación fueron mantenidas en la simulación transitoria, excepto que en esta ocasión se permitió el ingreso de agua a la ciudad a través de una brecha de 150m en el extremo norte del terraplén en correspondencia con su rotura. El paso de tiempo de cálculo fue de 5 segundos. El tiempo de simulación hasta que el agua alcanzó el máximo nivel dentro de la ciudad fue de 26 horas, aproximadamente el mismo tiempo real transcurrido desde la entrada de agua y el comienzo de las voladuras sobre el terraplén, realizadas con el propósito de evacuar el agua desde la ciudad hacia el río. A partir de ese momento la situación hídrica en el interior de la ciudad mejoró paulatinamente, fundamentalmente los barrios Sur y Centro de la ciudad (no así los ubicados al oeste del terraplén). La Fig.6 presenta un perfil ubicado 50 m hacia el Norte del Puente Carretero que une las ciudades de Santo Tomé y Santa Fe. El mismo compara la superficie libre del agua al término de la simulación y aquella publicada en el diario El Litoral el día 4 de mayo de 2003 (datos relevados por la DPOH-Dirección Prov. de Obras Hidráulicas). A pesar de la discrepancia obtenida en los valores absolutos (de cota) a uno y otro lado del terraplén, la diferencia relativa (desnivel) coincide notablemente con el valor reportado.

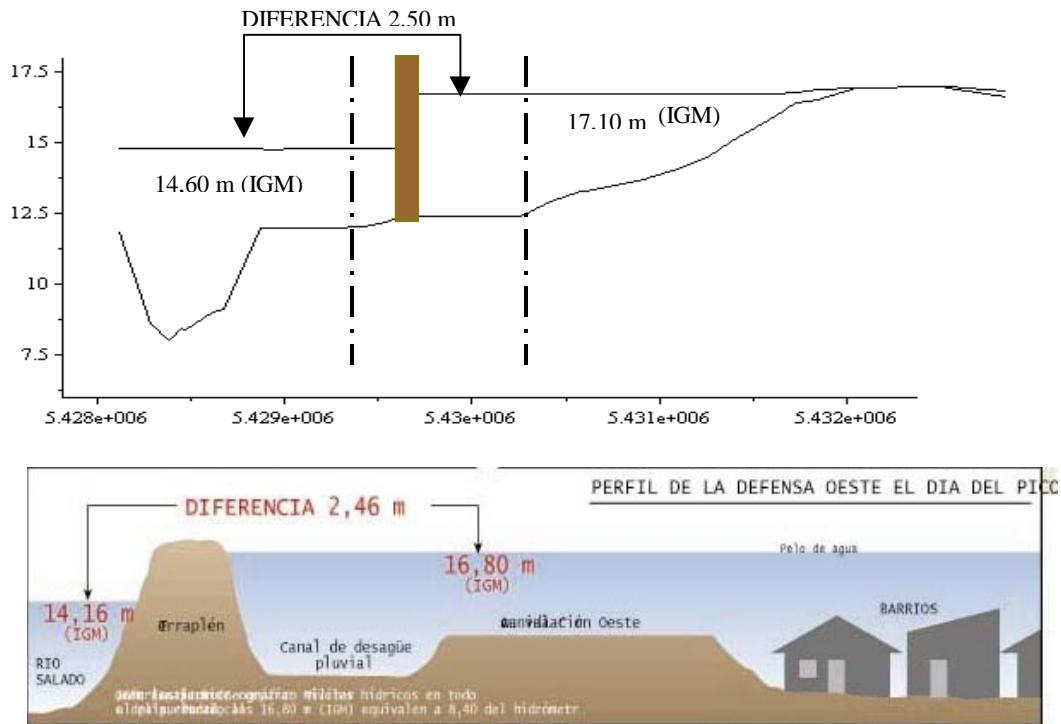


Figura 6.- Comparación entre cotas de superficie libre a un lado y otro del terraplén Irigoyen
a) simuladas, b) observadas (DPOH)

Por último, la Fig.7 muestra una secuencia de la irrupción de la onda de agua a través de la brecha a los 5, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 segundos desde el comienzo de la simulación transitoria. La máxima velocidad simulada en la brecha fue de 4.5 m/s, con un caudal pico ingresante que osciló entre 400 y 600 m³/s (dependiendo de la geometría asumida de la brecha y de la rugosidad adoptada).

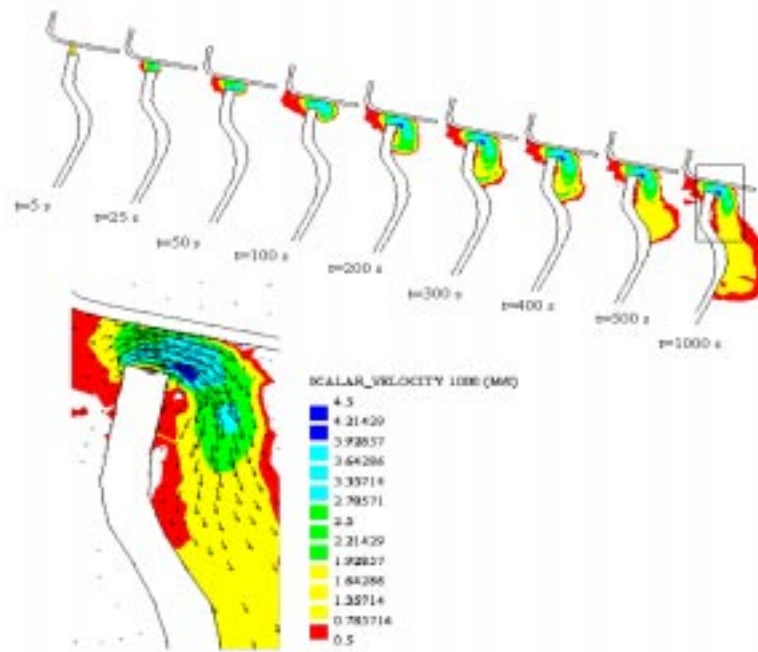


Figura 7.- Avance de la onda de crecida en la ciudad

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la capacidad de herramientas bidimensionales para el tratamiento de casos de estudio que, en algunos aspectos, se asemeja al problema de la rotura de una presa. Desde un punto de vista numérico, es esencial contar con un algoritmo de secado/mojado de elementos en casos donde la propagación de la onda de crecida avanza sobre áreas inicialmente secas. A pesar de algunas discrepancias entre valores calculados y estimados (observados), la simulación realizada puede considerarse altamente satisfactoria teniendo en cuenta la escasa disponibilidad de información básica con la que se trabajó desde un principio. La simulación realizada reproduce adecuadamente varios aspectos de la evolución de la onda de crecida en su paso por el interior de la ciudad. La herramienta en sí tiene utilidad no sólo para reproducir una de las peores catástrofes ambientales de la República Argentina, sino que también puede utilizarse para estudios de diagnóstico o de verificación de estructuras de protección de zonas densamente pobladas que presentan un considerable grado de vulnerabilidad a situaciones hídricas extremas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EVARSA (2000): “Anuario Hidrológico de la República Argentina”. *Subsecretaría de Recursos Hídricos de la RA.*

FICH (2003): “La crecida del río Salado: causas que determinaron la inundación de la ciudad de Santa Fe”

Giampieri R., Tassi P., Rodriguez L., Vionnet C. (2003): “Numerical Simulation of the extraordinary flood of the Salado river, Santa Fe”, *Proceedings ENIEF, Bahía Blanca, Argentina.*