

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

R. Giampieri, P. Tassi, L. Rodríguez, H. Gaudin, y C. 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: vionnet@fich1.unl.edu.ar

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 $150\text{m}^3/\text{s}$ acorde a los registros obtenidos sobre la RP70, cerca 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 que une las ciudades de Santa Fe y 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 150-155 m, aunque con un pilotaje mucho más profundo.

Luego de recurrentes inundaciones, mayormente provocadas por crecidas del río Paraná, la ciudad de Santa Fe decidió construir estructuras de protección. A lo largo del río Salado, sobre el Oeste de la ciudad, se construyó el terraplén Irigoyen que corre de Norte a Sur unos 7 km aproximadamente, con una sobre-elevación de 5,2 m en promedio con respecto a la planicie aluvial del Salado (cota IGM=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). La ocupación de la planicie aluvial 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 $3600\text{m}^3/\text{s}$. 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 1500 millones de dólares, sin contemplar el sufrimiento emocional de los directamente afectados (la cifra oficial de muertos en la ciudad es de 23 personas, (FICH, 2003))



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

Objetivos

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 orienta a reconstruir la topografía del sistema conformado por el cauce principal del río Salado y su planicie aluvial. El trabajo pone 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

El dominio computacional adoptado para la simulación recorre unos 25km del río en dirección N-S, con un ancho promedio de planicie de 3.5 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.

Evaluación de Resultados

La topografía, aún incompleta y con errores significativos (del orden de 1.5m máximo), fue generada con datos

provenientes de la digitalización de cartas topográficas pertenecientes al IGM (Fig.3).

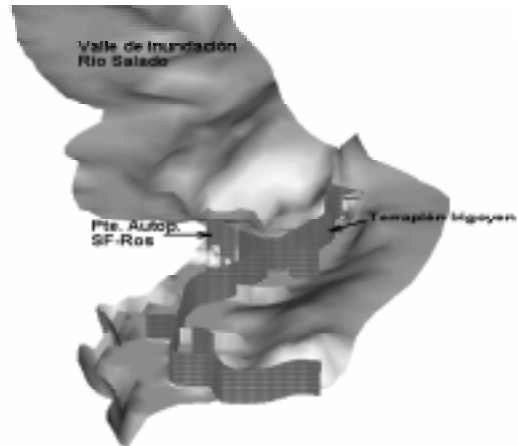


Figura 3.- Topografía recreada de la zona de estudio

Al presente, se llevan ejecutados dos cálculos, basados en mallas no estructuradas de triángulos lineales de diferente discretización, la primera con 3744 elementos y 2075 nodos, y la segunda más refinada con 7765 elementos y 4190 nodos, respectivamente (Fig.4). Los resultados de ambos cálculos son consistentes, y las discrepancias obtenidas en los niveles alcanzados por la superficie libre a un lado y el otro del terraplén es de unos 0.4m. Las mallas utilizadas presentan dos refinamientos específicos, uno en la vecindad del puente de la autopista a Rosario, y otro en la vecindad de la brecha (Fig.2). Mayores detalles se ofrecerán durante el Simposio (Giampieri *et al.*, 2003).

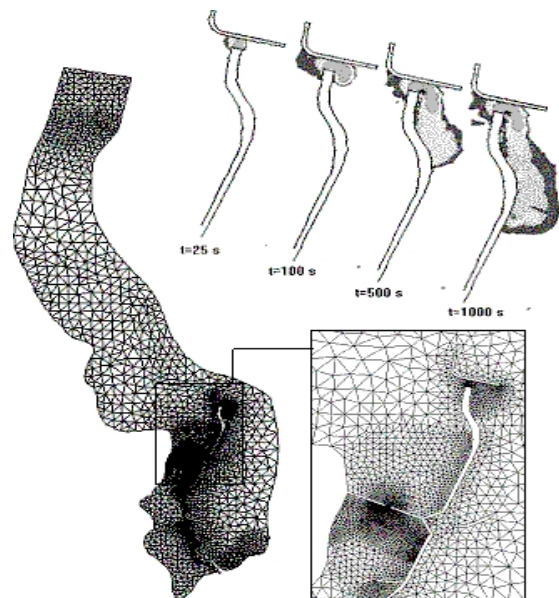


Figura 4. Segunda malla de elementos finitos utilizada, y resultados de la penetración del agua en la ciudad.

Referencias

- FICH (2003):** "La crecida del río Salado: causas que determinaron la inundación de la ciudad de SF"
- EVARSA (2000):** "Anuario Hidrológico de la República Argentina". *Subsecretaría de Recursos Hídricos de la RA.*
- 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.*