**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

# MODELACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS DE CRECIDA PRODUCIDAS POR EL VACIAMIENTO DE UN ESTANQUE

**MARICARMEN GUERRA PARÍS.[1]**
**RODRIGO CIENFUEGOS CARRASCO.[2]**
**DOMÉNICO SCIOLLA PYÑEIRO.[3]**
**ENRIQUE ROSA VOLLMANN.[4]**

## RESUMEN

La ocurrencia de crecidas rápidas y de gran magnitud se ha visto acrecentada en las últimas décadas presumiblemente por el fenómeno del calentamiento global. Por consiguiente se hace necesario el cuantificar las variables hidrodinámicas asociadas así como las consecuencias de estas crecidas con el fin de mejorar el diseño y operación de obras de infraestructura o definir zonas de riesgo. El fenómeno de vaciamiento de lagos glaciares, por ejemplo, ha sido objeto de gran interés en los últimos años debido a su aparente mayor frecuencia. En laboratorio, este fenómeno puede modelarse en forma simplificada como la descarga instantánea de un volumen de agua contenido en un estanque hacia un tramo de río a escala. Este trabajo presenta resultados de una experiencia de este tipo desarrollada en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los datos experimentales son luego utilizados para evaluar la habilidad del modelo numérico SURF_WB para representar este tipo de eventos. Este modelo resuelve las ecuaciones de Saint-Venant mediante un esquema de volúmenes finitos balanceado con la capacidad de capturar resaltos hidráulicos. Los resultados muestran que el modelo numérico es capaz de representar cualitativamente el fenómeno, entregando una buena estimación de las amplitudes del frente de onda y de los tiempos de llegada. Sin embargo existen diferencias en las curvas de recesión de los hidrogramas que podrían explicarse por problemas en la implementación de las condiciones de borde. Es importante recalcar sin embargo que las condiciones experimentales analizadas constituyen un exigente test para la evaluación de modelos numéricos que en principio podrían representar este tipo de eventos.

[1]Estudiante de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC – mail: mnguerra@uc.cl
[2]Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC – mail: racienfu@ing.puc.cl
[3]Estudiante de Ingeniería Civil de Industrias, diploma en Ingeniería Hidráulica, PUC – mail: dascioll@uc.cl
[4]Técnico Instrumentista, Instituto Nacional de Hidráulica – mail: erosa@inh.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo se ha acrecentado la necesidad de entender y modelar los efectos de fenómenos ambientales extremos tales como crecidas, tsunamis o vaciamiento de lagos, debido a las importantes consecuencias que ellos tienen en términos del daño a la infraestructura, las vidas humanas, además de los impactos económicos y sociales asociados. Con el objeto de mejorar la protección y el diseño de obras de ingeniería y también tomar medidas adecuadas de prevención es indispensable contar una buena estimación de las variables hidrodinámicas relevantes tales como altura de agua, velocidades, caudal y áreas inundadas.

En los últimos años han ocurrido varias inundaciones producidas por vaciamientos de lagos glaciales[1] en la región de Aysén. Estos fenómenos naturales han sido probablemente exacerbados por el llamado calentamiento global. De hecho en abril y octubre de 2008, hubo dos grandes eventos en el río Colonia, tributario del río Baker, producto del vaciamiento del Lago Cachet-II. En ambas ocasiones se generó un aumento de la superficie libre superior a los 4,5m y un caudal peak sobre los 3.000$m^3$/s en el río Baker después de la confluencia con el Colonia[2]. Por otra parte, en abril de 2007, un movimiento telúrico produjo un importante deslizamiento de tierra hacia el mar en la zona conocida como Punta Cola cerca de Puerto Chacabuco, generando olas de hasta 6m de altura que se propagaron luego a través del fiordo.

Estos ejemplos sirven para reafirmar la necesidad de desarrollar herramientas de modelación para describir este tipo fenómeno y así contribuir al diseño de infraestructura, a la operación de instalaciones hidráulicas, o a la definición de zonas de riesgo. Más aún, es importante tener en cuenta que es altamente probable que la recurrencia de estos eventos aumente en el futuro.

La modelación matemática de escurrimientos superficiales, constituye entonces una valiosa herramienta para evaluar las consecuencias de este tipo de fenómenos. Sin embargo, la adecuada representación de flujos a inercia dominante necesita técnicas matemáticas específicas para su modelación, debido entre otros, a las características topográficas en donde ocurren, los cambios bruscos de torrente a río o vice-versa o la existencia de zonas secas y mojadas. Estas características no son capturadas correctamente por los métodos numéricos tradicionales.

El objetivo de este trabajo consiste en testear el modelo numérico SURF_WB (Marche, 2005) frente a nuevos datos experimentales asociados a la propagación de una onda de crecida generada por el vaciamiento de un estanque en un tramo de río a escala. Estas experiencias han sido realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile y permiten evaluar el comportamiento del modelo para condiciones exigentes que incorporan las características y complejidades antes mencionadas.

---

[1] Conocidas como GLOF por sus siglas en inglés, Glacial Lake Outburst Flood
[2] Estación monitoreo satelital sector río Baker, DGA.

El trabajo se enfoca tanto en los resultados experimentales como en la habilidad del modelo numérico para reproducir la evolución de la superficie libre y el *run-up* y *run-down* en diferentes zonas. Se realizó una campaña de medición en el modelo físico y posteriormente, una modelación numérica del fenómeno sobre la batimetría digital del tramo de río.

## 2. MONTAJE EXPERIMENTAL

La experiencia de vaciamiento de estanque fue conducida en un tramo de río a escala construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Este modelo físico cuenta con las características necesarias para simular escurrimientos en régimen impermanente sobre topografías fuertemente variables.

El modelo de río comienza con una zona encajonada y de pendiente adversa (-2,4%). Luego, hacia aguas abajo comienza a ensancharse, con zonas de pendiente adversa y favorable, que varían entre ±8%, con una pendiente promedio -0,8%. El modelo de río tiene una extensión de 12m y un ancho de 4,5m.

Aguas arriba del modelo se encuentra un estanque de almacenamiento de agua contenida por una compuerta, la cual se abre rápidamente para liberar el volumen acumulado. El volumen liberado genera una onda que se propaga hacia aguas abajo, produciendo variaciones en la superficie libre que son registradas para ser analizadas y comparadas con el modelo numérico (ver Figura 1).

Las variaciones del nivel de agua dentro del estanque se miden utilizando un transductor de presión marca KPSI, de membrana venteada. El transductor registra datos de voltaje a 100Hz durante 60s y la calibración es tal que 1V equivale a 1cm de columna de agua. En las secciones del río se utilizan sondas resistivas que permiten registrar las variaciones de voltaje correspondiente a las variaciones de la superficie libre sobre la altura de agua inicial. Cada sonda registra datos de voltaje a 100Hz por 60s y fueron calibradas de tal manera que 0,5V medidos correspondiesen a 1m de variación de superficie libre. La medición de cada serie de tiempo comienza algunos instantes antes de la apertura de la compuerta.

Para la experiencia se dispuso de tres sondas resistivas (Figura 1), por lo que sólo fue posible recolectar datos simultáneos en tres puntos de medición por ensayo. Sin embargo, se realizaron varias repeticiones del experimento bajo las mismas condiciones trasladando las sondas hacia aguas abajo hasta completar 14 secciones. Así, se obtuvo información a lo largo de 8,4m en la dirección x (Figura 2).

Los datos obtenidos de las sondas resistivas y del transductor de presión fueron posteriormente procesados. Se realizó un ajuste de las amplitudes para fijar el cero de la medición y una sincronización temporal tomando como referencia el transductor de presión ubicado en el estanque, el cual llevó el registro de la variación de nivel en el estanque en todos los experimentos realizados.

(a) (b)

Figura 1. (a) Modelo físico del río, (b) Sondas resistivas, compuerta y estanque.

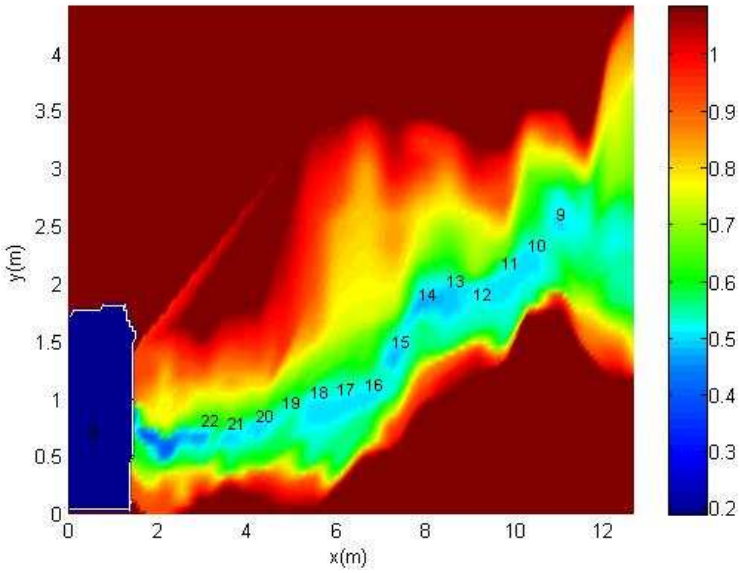


Figura 2. Batimetría digital del río en [m] y puntos de adquisición de datos numerados.

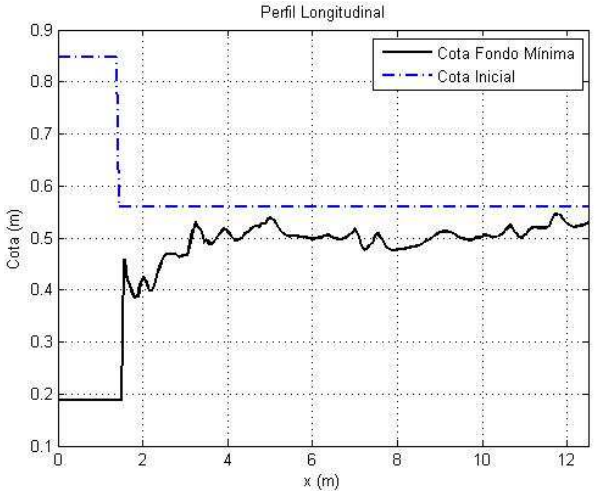

Figura 3. Perfil longitudinal del modelo físico y condición inicial para la superficie libre

Como condiciones iniciales de cada experimento se fijó una cota de superficie libre igual a 0,84m en el estanque y de 0,56m en el río (Figura 3). A modo de verificación se efectuaron en cada ensayo al menos 2 repeticiones de las mediciones observándose diferencias relativas menores al 5% entre ellos. En todos los puntos de medición, las series de tiempo adquiridas concuerdan en cuanto a amplitudes observadas y tiempos de llegada del frente (Figura 4).

Las mediciones en el estanque muestran un descenso acelerado del nivel de la superficie libre, disminuyendo 0,2m en 10s. El nivel final en el estanque es cercano a los 0,5m. (Figura 4a). En el primer punto de medición del río (sección 22), a 1,57m de la salida del estanque hacia aguas abajo, el frente arriba a los 1,5s. En esta serie se observan dos *peaks*, de 0,12m y 0,14m, de amplitud, detectados a los 1,9s y 7,2s respectivamente (Figura 4b). En el punto ubicado en la sección 16, a 5,2m de la salida del estanque, el frente de onda se detecta a los 3,4s, con un *peak* de amplitud igual a 0,16m observado a los 4s (Figura 4c), siendo éste el máximo entre todas las series de tiempo. Finalmente, en el último punto de medición (sección 9), a 9,5m de la salida del estanque, el frente se detecta a los 5,9s y se observa un *peak* máximo de 0,11m, detectado a los 7,2s de medición (Figura 4d). La intensidad de la señal comienza a disminuir uniformemente en todos los perfiles luego de 25s aproximadamente, alcanzando una amplitud media en todo el río de 0,009m a los 60s.

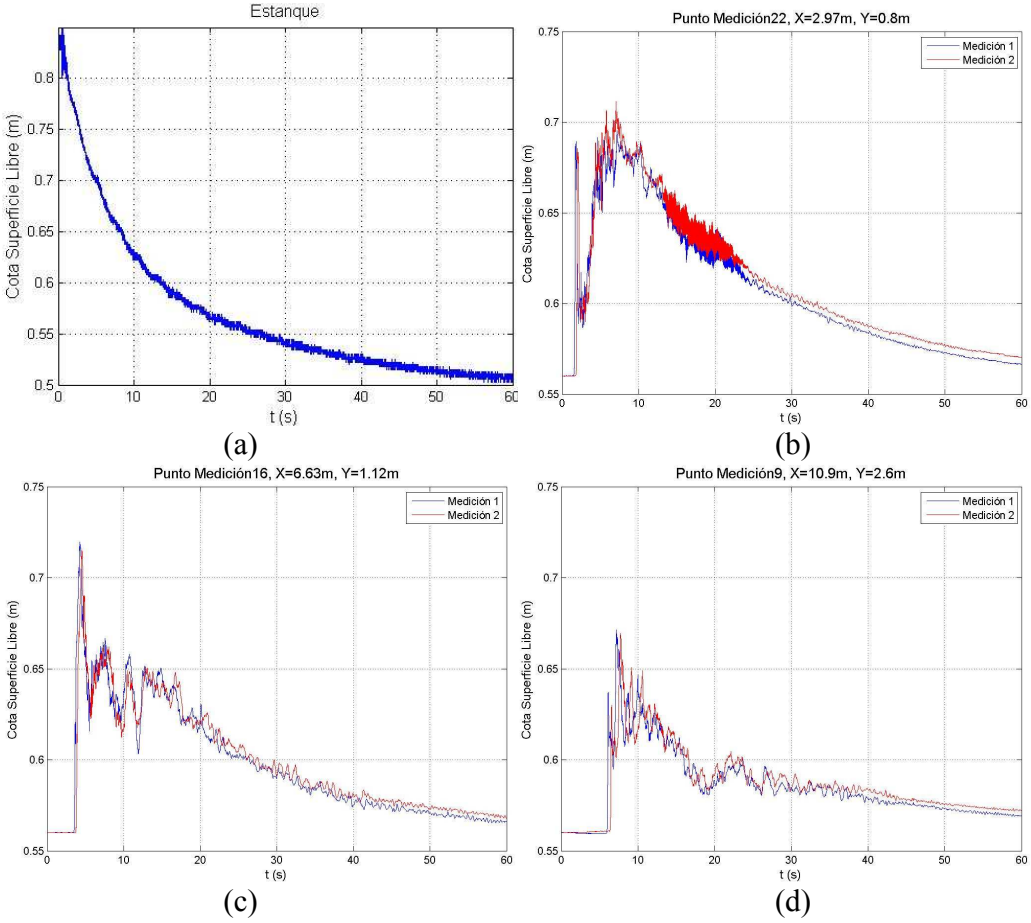


Figura 4. Evolución nivel de la superficie libre, (a) en el estanque, (b), (c) y (d) en diferentes perfiles del río.

## 3. MODELO SURF_WB

El modelo numérico SURF_WB fue utilizado para la simulación computacional de la experiencia de laboratorio de vaciamiento de estanque. SURF_WB es un modelo bidimensional que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant (Ec. (1)) desarrollado por el Dr. Fabien Marche (Marche, 2005). El modelo es capaz de lidiar con flujos subcríticos y supercríticos sobre topografías fuertemente variables y posee la habilidad de capturar resaltos hidráulicos, manejar la interfaz seco-mojada, preservar la positividad de la altura de agua y mantener el estado estacionario y reposo (Marche et al, 2007).

El sistema de ecuaciones de Saint-Venant (SV) se define como:

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y = S(U) \tag{1}$$

Donde:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad F(U) = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{g}{2}h^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad G(U) = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{g}{2}h^2 \end{pmatrix}, \quad \mathrm{S}(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ ghd_x \\ ghd_y \end{pmatrix}$$

$(\ )_\alpha$ denota la derivada parcial con respecto a α; $u$ y $v$ representan la velocidad promediada en la vertical en las direcciones x e y respectivamente, y $h$ es la altura de agua local. F(U) y G(U) son las funciones de flujo en ambas direcciones respectivamente y S(U), representa al término fuente de la pendiente de fondo ($d_x$,$d_y$).

Las ecuaciones de SV son resueltas utilizando un esquema de volúmenes finitos balanceado (Ec. 2). Este esquema utiliza un solver de Riemann aproximado, VFRoe-ncv (Gallouët et al, 2003), en conjunto con el método de reconstrucción hidrostática de segundo orden propuesto por Audusse et al. (2004) para incorporar el término fuente asociado a la topografía variable. El solver VFRoe-ncv es capaz de interactuar con zonas secas y proporciona al modelo la capacidad de mantener la positividad de la altura de agua. Por otro lado, el método de la reconstrucción hidrostática permite al modelo preservar los estados estacionarios y de reposo.

La formulación bidimensional semi-discreta de volúmenes finitos del sistema de la Ec. (1) está dada por:

$$\frac{d}{dt}U_{i,j}(t) + \frac{1}{\Delta x}\left(F^-_{i+\frac{1}{2},j} - F^+_{i-\frac{1}{2},j}\right) + \frac{1}{\Delta y}\left(G^-_{i,j+\frac{1}{2}} - F^+_{i,j-\frac{1}{2}}\right) = S_{i,j} \tag{2}$$

donde el vector de variables conservativas discreto y centrado en la celda es $U_{i,j} = \left(h_{i,j}, h_{i,j}u_{i,j}, h_{i,j}v_{i,j}\right)$, $F^{\mp}_{i\pm\frac{1}{2},j}$ y $G^{\mp}_{i,j\pm\frac{1}{2}}$ representan los flujos numéricos a través de las

interfaces de la celda en cada dirección respectivamente, y $S_{i,j}$ es la discretización del término fuente. Las expresiones equivalentes a cada flujo numérico se muestran en las Ecs. (3) a (6). Para mayor información y detalles sobre estos términos y su correspondiente desarrollo, el lector queda referido a Marche (2005) y Marche et al. (2007). Luego,

$$F^{-}_{i+\frac{1}{2},j} = F^{*}_{i+\frac{1}{2},j} + S_{i+\frac{1}{2}-,j} \ , \ F^{+}_{i+\frac{1}{2},j} = F^{*}_{i+\frac{1}{2},j} + S_{i+\frac{1}{2}+,j} \tag{3}$$

$$F^{*}_{i+\frac{1}{2},j} = F(U_{i+\frac{1}{2},j}(0, U_{i+\frac{1}{2}-,j}, U_{i+\frac{1}{2}+,j})) \tag{4}$$

y

$$G^{-}_{i,+\frac{1}{2}} = G^{*}_{i,j+\frac{1}{2}} + S_{i,j+\frac{1}{2}-} \ , \ \mathrm{G}^{+}_{i,j+\frac{1}{2}} = G^{*}_{i,j+\frac{1}{2}} + S_{i,j+\frac{1}{2}+} \tag{5}$$

$$G^{*}_{i,j+\frac{1}{2}} = G(U_{i,j+\frac{1}{2}}(0, U_{i,j+\frac{1}{2}-}, U_{i,j+\frac{1}{2}+})) \tag{6}$$

Donde $F^{*}_{i+\frac{1}{2},j}$ y $G^{*}_{i,j+\frac{1}{2}}$ corresponden a los flujos numéricos calculados utilizando el solver VFRoe-ncv, $S_{i+\frac{1}{2}\pm,j}$ y $S_{i,j+\frac{1}{2}\pm}$ representan el balance del término fuente con el flujo de cantidad de movimiento (Audusse, 2004), y $U_{i+\frac{1}{2}\pm,j}$ y $U_{i,j+\frac{1}{2}\pm}$ simbolizan a las variables de estado reconstruidas hidrostáticamente.

El modelo SURF_WB, incorpora además otros solver, por ejemplo solver exacto de Riemann, y diferentes condiciones de borde, abierto, absorbente/generador, pared sólida, etc. El modelo ha sido ampliamente validado contra variadas soluciones analíticas, problemas que involucran topografía variable, movimiento de la línea de costa y convergencia hacia estados estacionarios.

La modelación numérica de la experiencia de vaciamiento de estanque en SURF_WB requirió de la batimetría digital del río y estanque, así como la definición de condiciones de borde y parámetros de simulación. No se utilizó en estas aplicaciones fricción ni viscosidad. El modelo entregó valores de altura de aguas y velocidad de flujo en ambas direcciones en todo el dominio de estudio.

## 4. RESULTADOS

SURF_WB fue capaz de simular el fenómeno de vaciamiento del estanque y la propagación del frente de ondas sobre el río. Los resultados numéricos concuerdan cualitativamente con los resultados experimentales en cuanto a *peaks* generados y tiempos de llegada. El modelo logró capturar discontinuidades observadas en la experiencia de laboratorio, así como también resaltos y recirculación debida al contacto del flujo con obstáculos topográficos, fue también capaz de manejar la interacción entre zonas secas y mojadas, y de converger hacia el estado estacionario (Figura 5).

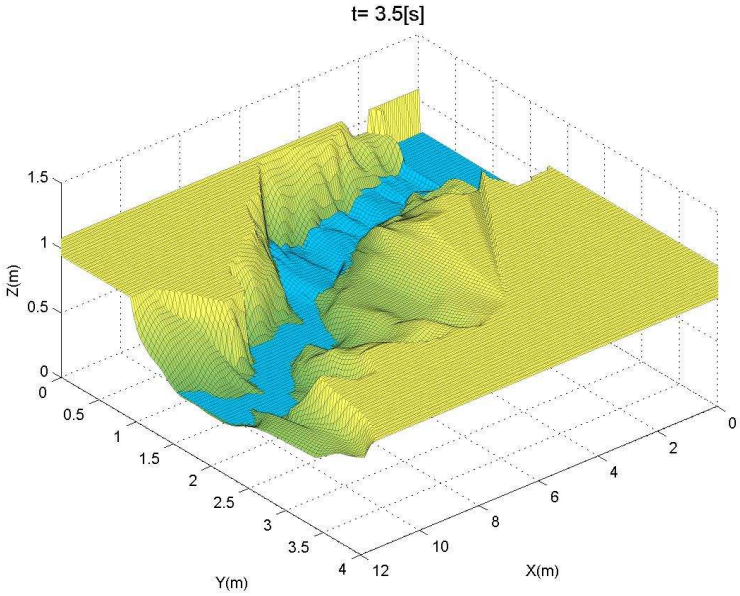


Figura 5. Efecto del vaciamiento de estanque sobre superficie libre del río.

En base a los resultados obtenidos se estudiaron tres variables: tiempo de llegada del frente, amplitudes máximas, y volumen por unidad de área bajo las sondas resistivas al cabo de 60s de simulación.

Los resultados numéricos proporcionados por el modelo SURF_WB que se mostrarán a continuación corresponden a una grilla de $\Delta x$=0,065m, $\Delta y$=0,045m, cota inicial de la superficie libre igual 0,56m, velocidad y caudal iniciales nulos y CFL=0,8. La batimetría digital utilizada consiste en una malla rectangular en coordenadas cartesianas de 12,7m de largo por 4,5m de ancho, cuya información se obtuvo a partir de perfiles medidos en el modelo físico y posterior interpolación de éstos utilizando MATLAB® (Figura 2).

Se verificó que los tiempos de llegada del frente de onda a los puntos de medición (sondas virtuales) son bien reproducidos por el modelo numérico, con un error relativo igual a 7% en la última sonda de medición (Figura 6). Las predicciones del modelo indican que el frente avanzaría inicialmente con mayor rapidez en el modelo numérico, alcanzando la primera sonda virtual (sección 22) a los 0,8s. Hacia aguas abajo el modelo predice una desaceleración del frente, llegando en tiempos similares a los experimentales en las secciones 16 y 9, con 3,1s y 6,4s respectivamente. Las diferencias iniciales se explicarían

principalmente por el mecanismo de apertura del estanque, el que es instantáneo en el modelo numérico pero se realiza en un tiempo finito en la operación manual de la compuerta.

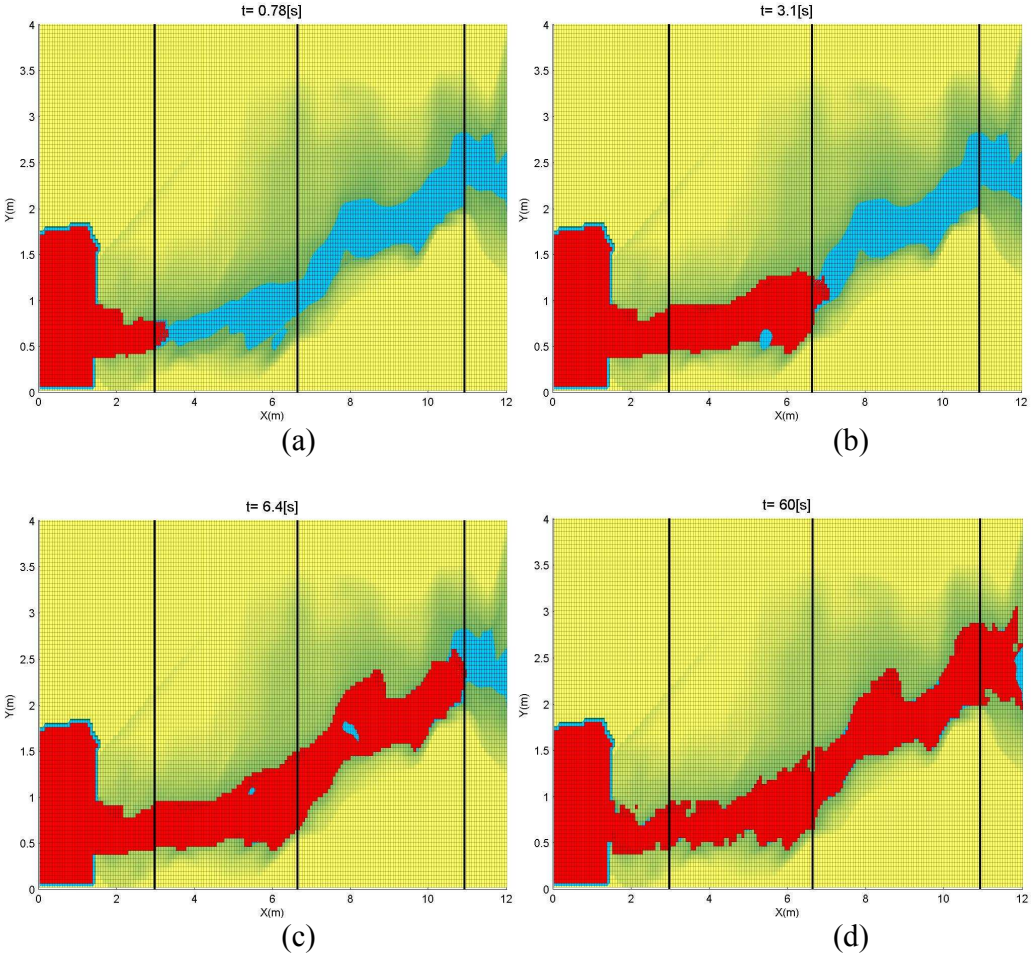


Figura 6. Avance del frente de ondas sobre altura inicial. Rectas corresponden a las secciones 22, (x=2,97m), 16 (x=6,63m) y 9 (x=10,9m). (a) 0,8s, (b) 3,2s, (c) 6,4s, (d) 60s.

En cuanto a la amplitud de los *peaks* que se observan en las series de tiempo presentadas en la Figura 6 se encontraron diferencias que varían según el perfil estudiado. El modelo numérico subestima las amplitudes máximas en la mayoría de los casos, no así los tiempos de llegada de éstos. Por ejemplo, para la sonda virtual ubicada en la sección 22, el modelo predice un primer *peak* de amplitud igual a 0,10m a los 1,13s y un segundo *peak* de 0,15m a los 2,9s. Sin embargo, el modelo rebaja la amplitud de los peaks hacia aguas abajo, con diferencias relativas de hasta 20%. Luego de la ocurrencia de los *peaks*, el modelo predice una disminución más lenta de la altura de agua que los datos experimentales, sobreestimando la amplitud de la curva de recesión a partir de los 20s de simulación. Finalmente, la amplitud decae constante y establemente hacia el estado estacionario, alcanzándose una amplitud promedio de 0,025m a los 60s de simulación que es mayor al observado en la experiencia. No está claro el origen de las diferencias detectadas en la

segunda parte de los hidrogramas, pero podrían deberse a algún problema en la definición de las condiciones de borde aguas abajo del modelo numérico, o a una representación inadecuada de la batimetría del río.

Por último, se calculó el volumen por unidad de área que pasó bajo cada sonda virtual y se comparó con los valores experimentales. Estos valores difieren de una sonda a otra debido a su ubicación, estimándose un error promedio cercano al 20%. Nuevamente, estas diferencias están fundamentalmente asociadas a la incorrecta representación de la curva de recesión en el modelo numérico.

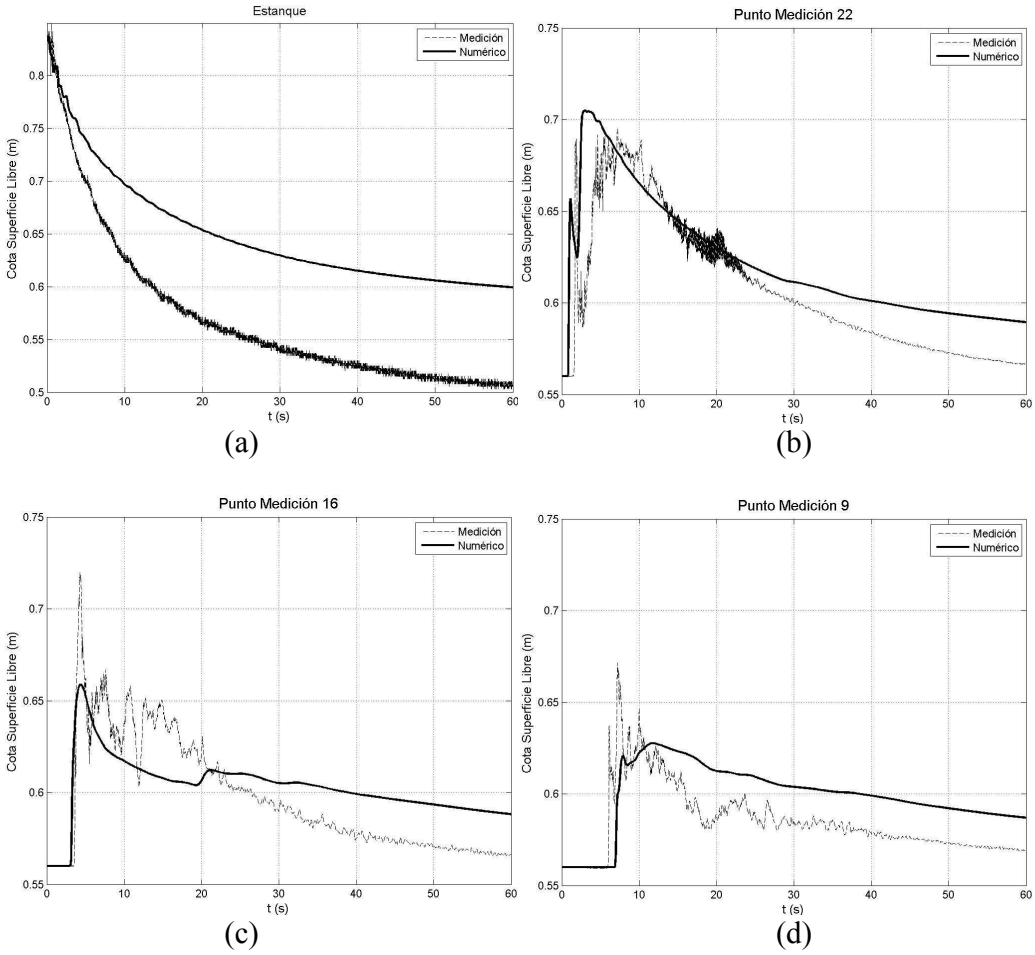


Figura 7, Comparación de series de tiempo de variación de la superficie libre, (a) en estanque, (b), (c) y (d) diferentes perfiles.

## 5. CONCLUSIONES

De la experiencia de laboratorio se obtuvieron datos de alta resolución para las variaciones de la superficie libre en un tramo de río a escala, asociadas a la propagación de una onda de

crecida generada por el vaciamiento de un estanque. Estos datos son de gran interés para testear modelos matemáticos y numéricos y evaluar si son apropiados para representar este tipo de fenómenos en condiciones naturales, ayudando así a ilustrar, de manera simplificada, los efectos de eventos de gran magnitud, como vaciamientos de lagos, rompimientos de presa, y sus consecuencias sobre zonas aledañas.

A pesar de las diferencias cuantitativas entre las predicciones del modelo numérico y los resultados experimentales, el modelo SURF_WB fue capaz de representar el fenómeno de vaciamiento de estanque sobre las circunstancias del experimento. Los tiempos de llegada son acordes a los experimentales, así como la magnitud de los *peaks*. La mayor diferencia es en la curva de recesión de los hidrogramas, causada probablemente por una falla en las condiciones de borde aguas abajo o en una inadecuada representación de algunos perfiles de río.

Las diferencias encontradas entre los resultados experimentales y numéricos dependen de diversos factores. Uno de ellos es el funcionamiento de la compuerta. En la experiencia de laboratorio ésta fue levantada manualmente, a diferencia del modelo numérico, en el cual desaparece instantáneamente. Ésto puede generar oscilaciones extras en el estanque y el retraso del vaciamiento, efectos que se propagarán a lo largo del modelo físico. Otros factores son la interpolación de datos batimétricos y el uso de una malla cartesiana regular, lo que puede significar la pérdida de ciertos detalles en zonas donde es necesario una mejor resolución.

SURF_WB resulta ser una herramienta apropiada, robusta y útil para deducir el comportamiento del flujo en la realidad y las singularidades que pueden aparecer. Sin embargo, en casos como éste, es posible conseguir mejoras si el modelo permitiese una discretización del dominio flexible y más eficiente, logrando una mejor representación del flujo en zonas complejas, por ejemplo en una curva cerrada, angosta y encajonada.

Los resultados obtenidos, tanto experimentales como numéricos, indican la gran magnitud de los efectos que un evento como el simulado puede tener en la realidad. Considerando los resultados obtenidos, el nivel de la superficie libre podría aumentar en un 35% en cuestión de segundos. Ésto ilustra la necesidad de definir previamente las posibles regiones afectadas, programas de evacuación, si se trata de zonas habitadas, y planes de restauración de las tierras, estructuras y maquinarias afectadas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Hidráulica, por los instrumentos de medición y la asistencia técnica para el desarrollo de las experiencias, al Dr. Fabien Marche de la Universidad de Montpellier por permitirnos el uso del modelo SURF_WB y guiarnos en su implementación, y a Eduardo González, técnico del Depto. de Ing. Hidráulica y Ambiental de la PUC por el apoyo prestado en las experiencias.

## REFERENCIAS

Audusse, E., Bouchut, F., Bristeau, M-O., Klein, R. y Perthame, B. 2004. A fast and stable well-balance scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows. SIAM Journal on Scientific Computing, 25(6), 2050-2065.

Galloët, T., Hérard, J-M., y Seguin, N. 2003. Some approximate Godunov schemes to compute shallow-water equations with topography. Computers & Fluids, 35, 479-513.

Marche F. 2005. Theoretical and Numerical Study of Shallow Water Models. Aplications to Nearshore Hydrodinamics. PhD thesis, LUniversit_e Bordeaux I.

Marche, F., Bonneton, P., Fabrie, P., y Seguin, N. 2007. Evaluation of well-balance bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53, 867-894.