

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELO DE INUNDACIÓN ACOPLADO CON MORFODINÁMICA PARA  
FLUJOS HIPERCONCENTRADOS**

**SEBASTIÁN NASH C.<sup>1</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA M.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

En este trabajo se estudia la interacción entre la dinámica de un flujo hiperconcentrado y los patrones morfológicos de fondo, con especial énfasis en el proceso de erosión de barreras costeras intermitentes. Para ello, se desarrolla un modelo numérico basado en las ecuaciones de aguas someras, acoplado con la ecuación de Exner que estima las variaciones morfológicas del lecho incorporando el transporte de sedimentos en suspensión. El modelo se valida utilizando dos experimentos de laboratorio reportados previamente en la literatura, mostrando buen desempeño en la reproducción del flujo y de las formas de fondo. Posteriormente, se aplica este modelo para estudiar el proceso de erosión de una barrera costera de arena, inspirada en la barrera existente en la desembocadura del estero Marga Marga (Región de Valparaíso, Chile). Los resultados numéricos indican que, frente a un aumento del caudal fluvial, la barrera comienza a erosionarse por su abertura lateral, evolucionando posteriormente hacia una erosión dominada por sobrepaso, con un comportamiento similar al de un vertedero. El modelo ha mostrado un gran potencial para reproducir la dinámica de erosión de este tipo de barreras, las cuales son relevantes en el estudio de inundaciones urbanas, donde podrían desempeñar un rol crucial en la propagación de la inundación.

---

<sup>1</sup> Alumno de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: sanash@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: cescauri@uc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones se encuentran entre los desastres naturales más frecuentes a nivel mundial (Balaian et al., 2024; Z. Liu et al., 2018) y se estima que causan cerca de la mitad de todas las muertes humanas provocadas por amenazas naturales (FitzGerald et al., 2010; Lee & Vink, 2015). Entre 1980 y 2020, se registraron más de 4.800 desastres relacionados con inundaciones en todo el mundo, con un promedio anual de más de 5.900 muertes y pérdidas económicas que superan los 21 mil millones de dólares estadounidenses (Duan et al., 2022). Se espera que los riesgos e impactos de las inundaciones aumenten significativamente en el futuro debido a la urbanización y al cambio climático (Wang et al., 2023). El rápido crecimiento urbano ha incrementado la exposición de la población e infraestructura crítica en zonas propensas a inundaciones (Yari et al., 2019), mientras que los cambios en los patrones de precipitación y el aumento del nivel del mar intensifican la frecuencia y severidad de las inundaciones urbanas (Chen et al., 2021; IPCC, 2023).

Las crecidas repentinas (conocidas como *flash-floods* en inglés) son eventos breves y abruptos de inundación que se desencadenan cuando precipitaciones intensas superan la capacidad de infiltración del suelo, produciendo típicamente un caudal máximo dentro de las seis horas posteriores al inicio de la lluvia (WMO, 2006). Estos eventos ocurren comúnmente en regiones montañosas con pendientes pronunciadas, donde el escurrimiento rápido arrastra grandes cantidades de sedimento y escombros, generando flujos de detritos de carácter hiperconcentrado. La concentración de sedimentos y los esfuerzos asociados desempeñan un papel fundamental durante los eventos de inundación, ya que influyen en la dinámica de propagación y, en consecuencia, en la severidad de los impactos (Contreras & Escauriaza, 2020). Estos flujos pueden causar importantes pérdidas económicas y afectar negativamente el bienestar humano (Al-Ali et al., 2024). En entornos urbanos, estos flujos hiperconcentrados pueden: (i) aumentar los costos humanos y financieros relacionados con su remoción (Lai et al., 2024), (ii) bloquear los sistemas de drenaje, elevando el riesgo de anegamientos superficiales en términos de profundidad y extensión (J. Liu et al., 2022), (iii) provocar la agradación de cauces, reduciendo su capacidad hidráulica e incrementando su rugosidad (García, 2008), y (iv) transportar sedimentos que bloquean la desembocadura de los cauces al mar, desviando la inundación hacia áreas urbanas (Contreras et al., 2024).

Respecto al punto (iv), tanto estos impactos como las dinámicas que los generan siguen siendo poco estudiados y requieren una mejor comprensión y modelación. En particular, la dinámica de intercambio de sedimentos entre el lecho y el flujo cumple un rol clave, ya que controla tanto la formación como la remoción de estas barreras, en conjunto con el oleaje. Estas estructuras, que dan origen a estuarios intermitentes, son comunes en la zona central de Chile. Un caso representativo es la desembocadura del estero Marga Marga en Viña del Mar, donde se ha observado la formación recurrente de una barrera que se encuentra parcialmente abierta, ya que a veces se abre naturalmente y en otras ocasiones es intervenida con maquinaria para restablecer el flujo hacia el mar. Sin embargo, los procesos que regulan su estabilidad y remoción siguen siendo poco comprendidos. El objetivo de este estudio es profundizar en la dinámica de los flujos hiperconcentrados y sus interacciones sedimentarias, con énfasis en la erosión de estas barreras por acción fluvial.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se basa en estudiar la interacción entre la hidrodinámica y los procesos morfológicos mediante simulaciones numéricas. Para ello, se desarrolló un código computacional basado en principios físicos, y se utilizan experimentos reportados en la literatura para evaluar su desempeño. Una vez validado el modelo, este se aplica al análisis de la remoción de una barrera sedimentaria ficticia, inspirada en la barrera de la desembocadura del Marga Marga. De tal manera, esta metodología permite comprender en detalle la dinámica de remoción de la barrera durante una crecida fluvial.

### 2.1 MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones de aguas someras se obtienen luego de integrar en la vertical las ecuaciones de Navier-Stokes, asumiendo que la distribución de presiones en el flujo es hidrostática. Estas ecuaciones son ampliamente utilizadas para este tipo de flujos (Cao et al., 2006; George & Iverson, 2014; Han et al., 2015; Xia et al., 2023; Nash et al., 2024). El modelo computacional desarrollado, denominado SCORE (*Shallow water with ConcentratiOn Responding to Exner evolutions*), se basa en estas ecuaciones para describir la conservación de masa y momento de la mezcla y emplea una formulación que incorpora además la dinámica del transporte de sedimentos y las interacciones morfológicas. A continuación, se presentan las ecuaciones que rigen estos procesos:

$$\partial_t U + \partial_x F + \partial_y G = S_B + S_S + S_C + S_{ED} \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \\ hC \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \\ huC \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \\ hvC \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_B = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh\partial_x(z_b) \\ -gh\partial_y(z_b) \\ 0 \end{bmatrix}; S_S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_x}{\rho_m} \\ \frac{\tau_y}{\rho_m} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$S_C = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{gh^2}{2} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m} \right) \partial_x(C) \\ -\frac{gh^2}{2} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m} \right) \partial_x(C) \\ 0 \end{bmatrix}; S_{ED} = \begin{bmatrix} \frac{E - D}{1 - p} \\ -\frac{(\rho_0 - \rho_m)(E - D)u}{(1 - p)} \\ -\frac{(\rho_0 - \rho_m)(E - D)v}{(1 - p)} \\ E - D \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde  $\rho_s$ ,  $\rho_w$  y  $\rho_m$  corresponden a la densidad del sedimento, del agua y de la mezcla, respectivamente,  $t$  indica el tiempo,  $h$  es la profundidad del agua,  $u$  y  $v$  son las velocidades promediadas en profundidad en las direcciones  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$ , respectivamente.  $g$  es la aceleración de gravedad,  $C_v$  es la concentración volumétrica de sedimentos promediada en la vertical,  $z_b$  es la elevación del lecho,  $\tau_x$  y  $\tau_y$  representan los esfuerzos totales dentro del flujo en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente.  $E$  y  $D$  son las tasas de erosión y deposición, respectivamente, y  $p$  corresponde a la porosidad del lecho. El término fuente se dividió en cuatro términos de acuerdo a su efecto, el término  $S_B$  incluye el efecto de la pendiente del fondo,  $S_S$  contiene la fricción de fondo y los esfuerzos internos de la mezcla,  $S_C$  corresponde a cantidad de movimiento generado por gradientes de concentración, mientras que  $S_{ED}$  son las fuentes de masa y cantidad de movimiento por los procesos de erosión y deposición.

El acoplamiento con la evolución morfológica se logra aplicando estos flujos en la ecuación de Exner:

$$\partial_t(z_b) = \frac{D - E}{1 - p} \quad (5)$$

Para representar la resistencia al flujo  $\vec{\tau}_i$ , se utilizan formulaciones empíricas que dependen fuertemente de la concentración de sedimentos, el tamaño de las partículas, la viscosidad del fluido y la velocidad del flujo. Los detalles de dichas formulaciones se pueden encontrar en Contreras & Escauriaza (2020), donde se propone una modificación del modelo cuadrático de O'Brien que permite representar de manera consistente un amplio rango de concentraciones de sedimentos, evitando el uso de distintos modelos empíricos según el tipo de flujo.

Para darle cierre al sistema, se emplean las formulaciones semiempíricas propuestas por Cao et al. (2004) para representar los procesos de erosión y deposición. Estas expresiones permiten vincular las tasas de intercambio vertical de sedimentos con las condiciones hidrodinámicas del flujo y las propiedades del sedimento:

$$E = \begin{cases} \psi(\theta - \theta_c)uh^{-1}d^{-0.2} & \text{if } \theta > \theta_c \\ 0 & \text{if } \theta \leq \theta_c \end{cases} \quad (6)$$

$$D = C_b w_0 (1 - C_b)^m \quad (7)$$

donde  $\theta$  corresponde al parámetro de Shields definido como  $\theta = \tau_b / (\rho_s - \rho_w)gd$ ,  $\tau_b$  es el esfuerzo de corte en el lecho,  $\theta_c$  es el parámetro de Shields crítico,  $d$  es el diámetro medio del sedimento y  $\psi$  es una constante empírica. Para este trabajo se utiliza  $\psi = 0,015 m^{1.2}$ ,  $C_b$  corresponde a una estimación de la concentración cerca del lecho,  $w_0$  es la velocidad de sedimentación y  $m$  es un exponente experimental, en este caso igual a 2.

## 2.2 MODELO NUMÉRICO

Para resolver el sistema acoplado, se implementa un esquema fraccionado, un método que divide el sistema en pasos que se resuelven sucesivamente. En el primer paso se resuelven los términos relacionados con la fricción del flujo, es decir la siguiente ecuación:

$$\partial_t U = S_S \quad (8)$$

Esta se resuelve utilizando el método semiplicito de Liang & Marche (2009) con la ecuación de Manning. Luego, se resuelve el paso hiperbólico, el cual corresponde al sistema:

$$\partial_t U + \partial_x F + \partial_y G = S_B + S_C + S_{ED} \quad (9)$$

Para este paso, se utiliza un esquema de tipo Godunov *shock-capturing* con volúmenes finitos, el cual se basa en la resolución de problemas de Riemann (Leveque, 2002). Para resolver los problemas de Riemann se utiliza el *solver* HLL (Toro, 2001). El modelo es de primer orden en el espacio y la integración temporal se realiza con el método de Euler explícito de primer orden. La discretización del término fuente se realiza siguiendo el enfoque de Wu et al. (2018), asegurando la preservación exacta de los estados estacionarios (por ejemplo, agua en reposo sobre una topografía variable) incluso en presencia de procesos de erosión/deposición y esfuerzos adicionales. Como condición de estabilidad se utiliza el criterio CFL definido según la suma de las áreas barridas por cada componente de la celeridad.

El tercer paso consiste en resolver la ecuación de Exner. Esta se resuelve utilizando un esquema explícito según:

$$z_{b_i}^{n+1} = z_{b_i}^n + \frac{\Delta t}{1 - p_i} (D - E)_i^n \quad (10)$$

donde  $n$  indica el instante de tiempo, mientras que  $i$  corresponde a la celda y  $\Delta t$  es el paso de tiempo. En la práctica, la resolución numérica de esta ecuación presenta ciertas dificultades. A diferencia del sistema hiperbólico anterior, los flujos en la ecuación de Exner dependen muy débilmente de la variable conservada  $z_b$  (Escauriaza & Williams, 2025), lo que impide calcular los valores propios del sistema y, por tanto, establecer un criterio de estabilidad clásico. Debido a esto, se utiliza el mismo  $\Delta t$  que en la etapa hiperbólica (y de fricción), pero con un número de CFL reducido para evitar oscilaciones no físicas. En este caso, se utilizó  $CFL = 0,2$ .

Para mejorar la eficiencia computacional del modelo, se implementan técnicas de computación de alto rendimiento (HPC), utilizando descomposición de dominio espacial y comunicación entre procesos a través del protocolo MPI. Cada procesador resuelve una porción del dominio, y la información entre subdominios se intercambia mediante celdas fantasma que actúan como condiciones de borde locales.

### 3 RESULTADOS

A continuación, se presentan dos comparaciones entre resultados numéricos y datos experimentales con el objetivo de evaluar el desempeño del modelo SCORE. Es importante destacar que no se realizó ningún proceso de calibración para ajustar el modelo a los resultados experimentales. Más bien, el propósito de esta comparación es verificar que el modelo sea capaz de representar de forma fenomenológica los procesos físicos observados en los experimentos.

Una vez validado que el código reproduce adecuadamente el comportamiento observado a nivel fenomenológico, se presentan los resultados de un caso idealizado, inspirado en la desembocadura del Marga Marga, con el fin de estudiar el proceso de erosión en zonas costeras. En este caso, se espera que el modelo capture las características principales del fenómeno, y que los resultados entregados representen una proyección coherente de lo que podría ocurrir bajo dichas condiciones.

#### 3.1 ROMPIMIENTO DE PRESA SOBRE LECHO EROSIONABLE

Para probar el desempeño de SCORE frente a transientes fuertes, como un rompimiento de presa, y su capacidad para capturar patrones de erosión y la evolución de formas de fondo, se utilizó el experimento de laboratorio realizado en la Université Catholique de Louvain y reportado por Soares-Frazão (2012). Este experimento, cuyo montaje se muestra en la Figura 1, consiste en un rompimiento de presa sobre una capa erosionable de arena de 8,5 cm de espesor. Para más detalles sobre el diseño experimental, condiciones iniciales y parámetros utilizados, se recomienda revisar el trabajo original. Para las simulaciones del experimento se utilizó una malla computacional de 5 cm de resolución.

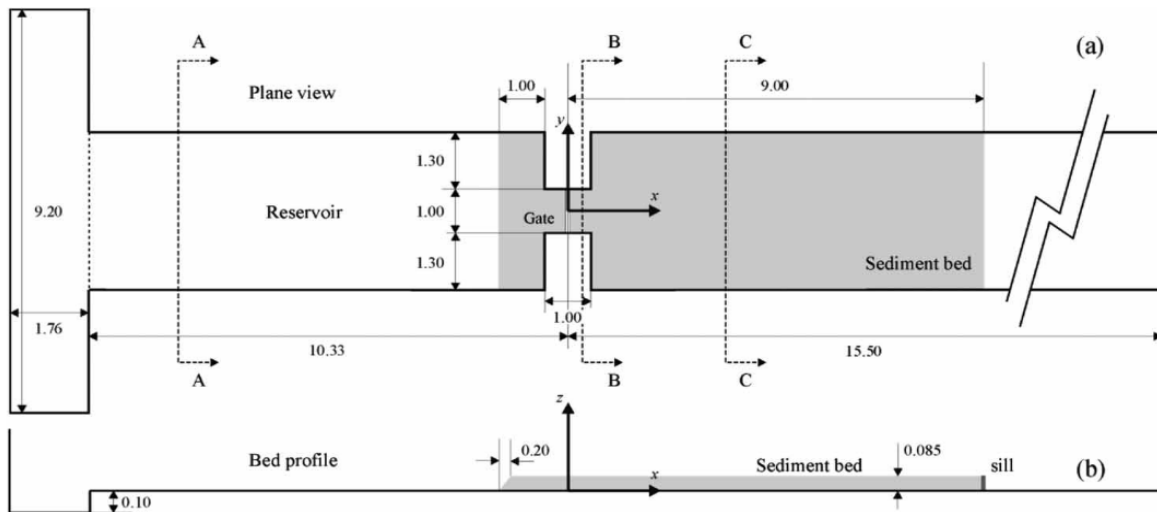


Figura 1: Montaje del experimento 1 de UC Louvain: (a) vista en planta; (b) vista lateral.  
(Fuente: extraído de Soares-Frazão (2012))

Según el nivel de agua en la parte aguas abajo, se consideran dos casos. El Caso 1 corresponde a un frente seco, donde la arena se encuentra completamente saturada pero no hay agua en la superficie. El Caso 2 corresponde a un frente mojado, donde la superficie libre

inicial es de 0,15 m aguas abajo. Esta configuración experimental permite, con el mismo montaje, evaluar el comportamiento de SCORE frente a condiciones de frente seco y mojado.

En la Figura 2 se muestran los resultados del nivel del lecho luego de 20 segundos. En a) y c) se presentan los resultados experimentales para el Caso 1 (frente seco) y el Caso 2 (frente mojado), respectivamente. En b) y d) se muestran los resultados numéricos obtenidos con SCORE para el mismo instante de tiempo, también para el Caso 1 y el Caso 2, respectivamente.

En ambos casos, SCORE captura adecuadamente la forma general de la zona erosionada y la extensión de la pluma de sedimentación aguas abajo. Sin embargo, el modelo tiende a sobreestimar la erosión del lecho en la zona inmediatamente aguas abajo de las compuertas, alcanzando el lecho no erosionable (zona blanca). En cambio, en los experimentos, si bien también se llega a dicho fondo, la extensión de esta zona es menor. En el Caso 1, se reproduce correctamente el patrón del lecho, destacándose una acumulación de sedimentos a lo largo de las paredes laterales. En el Caso 2, el modelo también representa adecuadamente la morfología general, aunque no logra capturar todas las estructuras periódicas en el lecho observadas experimentalmente. Estas ondulaciones podrían requerir modelos de mayor resolución espacial o estar asociadas a inestabilidades sedimentológicas que no son capturadas con el enfoque actual.

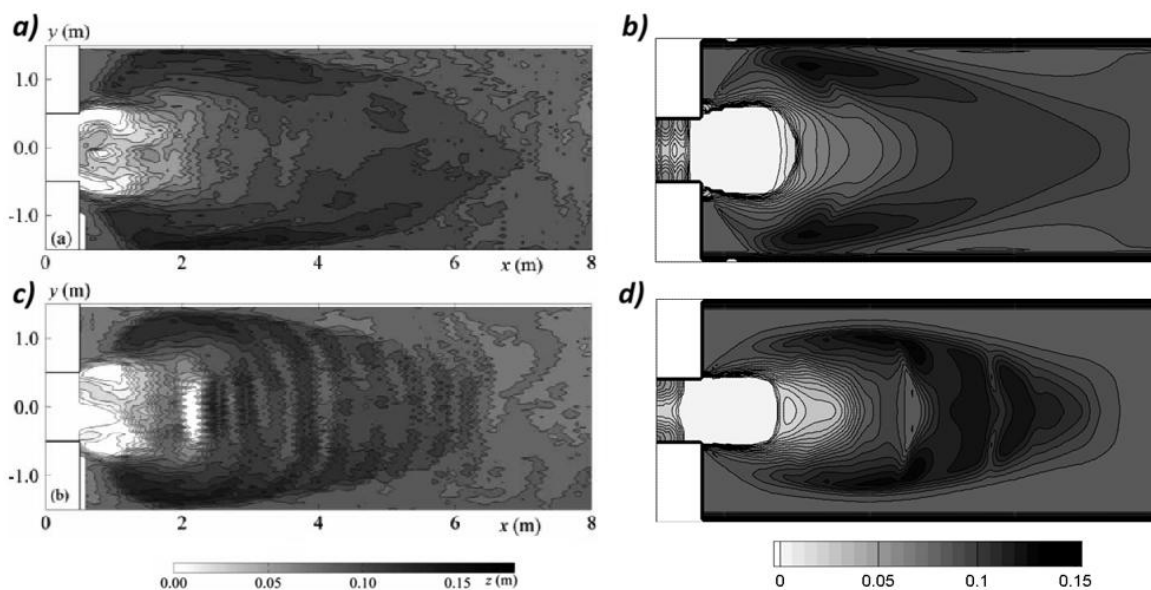


Figura 2: Nivel del lecho luego de 20 s para: (a) Caso 1 experimental; (b) Caso 1 numérico, (c) Caso 2 experimental; (d) Caso 2 numérico.

(Fuente: (a) y (c) extraídos de Soares-Frazão (2012), (b) y (d) elaboración propia)

### 3.2 ROMPIMIENTO DE PRESA CON EXPANSIÓN ABRUPTA SOBRE LECHO EROSIONABLE

Para evaluar SCORE en casos de transientes hidráulicos con cambios geométricos abruptos, se utilizó un experimento de rompimiento de presa con una expansión súbita sobre un lecho erosionable de arena. Esta configuración genera una rápida variación en las condiciones de

flujo, generando una zona de recirculación y patrones complejos de erosión y sedimentación en el fondo. El experimento fue realizado en la Université Catholique de Louvain y reportado por Goutiere et al. (2011). En la Figura 3 se muestra el montaje experimental, donde el borde derecho está abierto y los demás cerrados. El lecho está compuesto por una capa erosionable de arena de 10 cm de espesor. Para la simulación se empleó una malla computacional con resolución de 1 cm.

En la Figura 4 se presentan los resultados del nivel final del lecho. La fracción del dominio que se muestra corresponde al área justo después de la expansión, marcada en rojo en la vista en planta de la Figura 3. En a) se muestra el resultado experimental, mientras que en b) se presenta el lecho final simulado con SCORE. El nivel está referido al nivel inicial del lecho, por lo que los valores negativos (zonas negras) corresponden a áreas de erosión, y los valores positivos (zonas blancas) indican zonas de deposición. De la Figura 4 se puede observar que, a nivel general, SCORE captura adecuadamente las zonas de erosión y deposición, especialmente la acumulación de sedimentos en la pared superior. También reproduce el área de erosión localizada justo después de la expansión abrupta. Sin embargo, se observa una sobreestimación de la erosión, particularmente cerca del borde inferior. Esto podría deberse a que, en la realidad, existe una pared que ejerce un esfuerzo sobre el flujo y reduce la velocidad localmente en esa zona, disminuyendo así su capacidad erosiva. Esta condición no está considerada en el modelo numérico desarrollado.

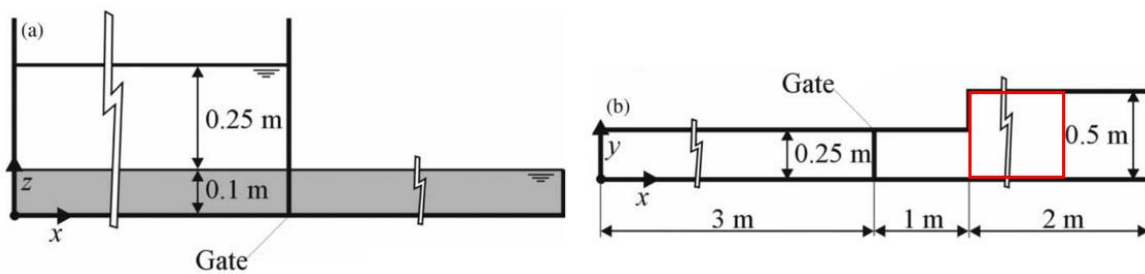


Figura 3: Montaje del experimento 2 de UC Louvain: (a) vista lateral; (b) vista en planta. (Fuente: modificado de Goutiere et al. (2011))

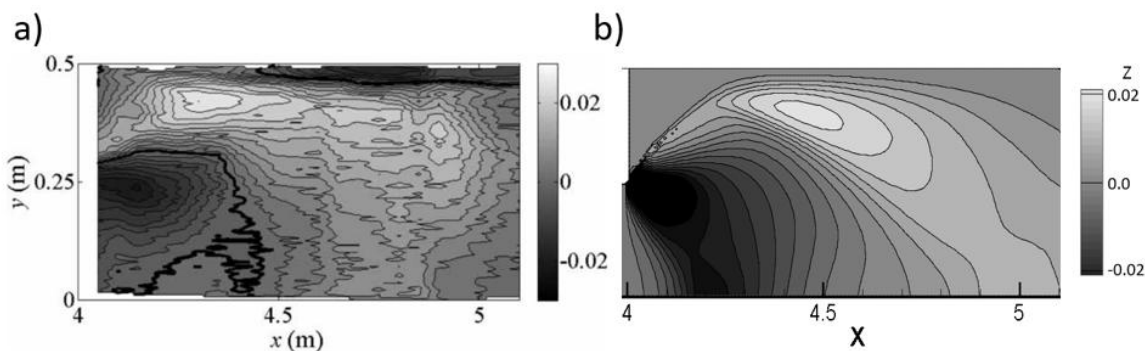


Figura 4: Nivel final del lecho: (a) experimental; (b) numérico. (Fuente: (a) extraído de Goutiere et al. (2011), (b) elaboración propia)

### 3.3 EROSIÓN DE BARRERA DE SEDIMENTOS

Con el objetivo de comprender fenomenológicamente el proceso de erosión de la barrera de sedimentos en la desembocadura del estero Marga-Marga ante una crecida fluvial (ver Figura 5a), se diseñó un modelo simplificado (ver Figura 5b). Este modelo consiste en una barrera de arena con una pequeña abertura, donde la barrera es completamente erosionable, mientras que el resto del canal representa un lecho no erosionable.

Para evaluar el comportamiento morfológico de esta barrera sintética frente a distintos escenarios de crecida, se introdujo un flujo de izquierda a derecha compuesto por un caudal base constante, sobre el cual se superponen pulsos periódicos de caudal de magnitud mayor al caudal base cada 30 segundos. Este hidrograma sintético representa, de forma idealizada, una crecida fluvial con variaciones temporales en el caudal, como las que ocurren durante eventos de lluvia intensa en cuencas urbanas con alta pendiente. La finalidad es estudiar cómo la barrera responde ante la llegada intermitente de estos aumentos sucesivos en el caudal, evaluando su estabilidad y evolución morfológica.

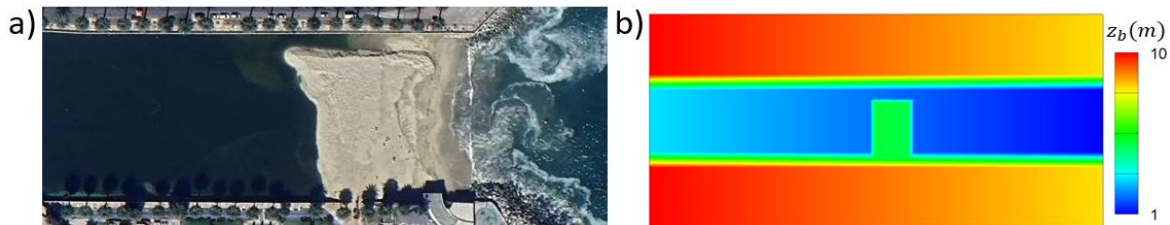


Figura 5: (a) Desembocadura del estero Marga Marga; (b) Modelo idealizado.  
(Fuente: (a) extraído de Google Earth, (b) elaboración propia)

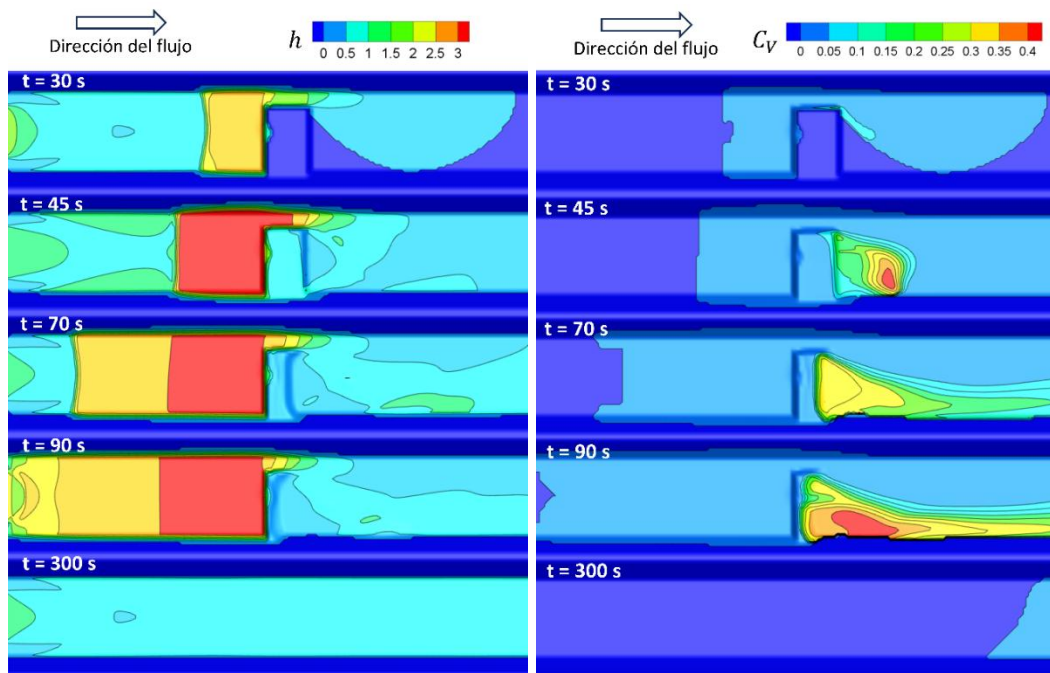


Figura 6: Evolución del proceso de erosión de la barrera sintética. En el panel de la izquierda se muestra la altura de agua y en el de la derecha la concentración de sedimentos.  
(Fuente: elaboración propia)

En la Figura 6 se muestran los resultados para distintos tiempos. En el panel izquierdo se presenta la altura del flujo, mientras que en el derecho se muestra la concentración volumétrica de sedimentos.

A los 30 s, cuando aún se mantiene únicamente el caudal base, la barrera no ha sido sobrepasada. Esto genera un efecto de estancamiento y un resalto hidráulico aguas arriba. Solo una pequeña porción en el centro de la barrera ha comenzado a erosionarse. Esto se refleja en un leve aumento de la concentración de sedimentos, donde el material que entra en suspensión es arrastrado hacia la salida por el flujo que atraviesa la abertura lateral. A los 45 s, ya ha llegado el primer pulso de caudal hasta la barrera. Se observa un aumento significativo en la altura del agua aguas arriba de la barrera, lo que provoca su sobrepaso. Una vez que el flujo comienza a escurrir por encima de la barrera, se acelera en la bajada, intensificando la erosión y generando una mayor incorporación de sedimentos en la columna de agua, lo que se manifiesta en un incremento de la concentración. A los 70 s, el volumen de agua estancada continúa creciendo, tanto en altura como en extensión. En el lado derecho de la barrera, se observa claramente un efecto de vertedero, con una aceleración pronunciada del flujo y una intensa remoción de sedimentos. A los 90 s, la barrera ha sido prácticamente destruida, permaneciendo solo una porción frontal que todavía contiene el flujo embalsado aguas arriba. La morfología erosionada de la barrera se aprecia claramente en el mapa de altura de agua. Finalmente, a los 5 minutos, la barrera ha sido completamente erosionada, y se observa cómo los últimos remanentes de sedimento están por abandonar el dominio computacional hacia la derecha.

#### **4 CONCLUSIÓN**

El modelo SCORE consiste en una herramienta numérica que permite comprender los procesos de erosión, transporte y deposición que dan forma al lecho. Al compararlo con datos experimentales y aplicarlo a una configuración idealizada de barrera, permite analizar en detalle la dinámica acoplada entre el flujo y los sedimentos. Además, los experimentos realizados son fundamentales para un proceso posterior de calibración de los coeficientes. Sin embargo, el modelo presenta limitaciones propias de su carácter bidimensional integrado en la vertical, lo que implica que no resuelve explícitamente los perfiles verticales de velocidad ni la turbulencia. Además, emplea formulaciones semiempíricas para modelar procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos.

Si bien se trata de un proceso de interacción complejo, donde coexisten los efectos del oleaje, la heterogeneidad del lecho y la presencia de zonas no erosionables en canales naturales, entre otras variables, un modelo simplificado como el aquí propuesto, permite identificar los procesos gobernantes y comprender de manera fenomenológica las dinámicas principales del sistema, sirviendo como base para luego incorporar mayor realismo y complejidad en las simulaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento entregado por CIGIDEN para asistir al congreso.

## REFERENCIAS

- Al-Ali, Z., Abulibdeh, A., Al-Awadhi, T., Mohan, M., Al Nasiri, N., Al-Barwani, M., Al Nabbi, S., & Abdullah, M. (2024). Examining the potential and effectiveness of water indices using multispectral sentinel-2 data to detect soil moisture as an indicator of mudflow occurrence in arid regions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 103887.
- Balaian, S. K., Sanders, B. F., & Abdolhosseini Qomi, M. J. (2024). How urban form impacts flooding. *Nature Communications*, 15(1).
- Cao, Z., Pender, G., & Carling, P. (2006). Shallow water hydrodynamic models for hyperconcentrated sediment-laden floods over erodible bed. *Advances in Water Resources*, 29(4), 546-557.
- Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., & Carling, P. (2004). Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(7), 689-703.
- Chen, X., Zhang, H., Chen, W., & Huang, G. (2021). Urbanization and climate change impacts on future flood risk in the Pearl River Delta under shared socioeconomic pathways. *Science of The Total Environment*, 762, 143144.
- Contreras, M. T., & Escauriaza, C. (2020). Modeling the effects of sediment concentration on the propagation of flash floods in an Andean watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 221-241.
- Contreras, M. T., Nash, S., & Escauriaza, C. (2024). Anthropogenic effects on flood hazards in a hyper-arid watershed: The 2015 Atacama floods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(15), 5362-5376.
- Duan, Y., Xiong, J., Cheng, W., Wang, N., He, W., He, Y., Liu, J., Yang, G., Wang, J., & Yang, J. (2022). Assessment and spatiotemporal analysis of global flood vulnerability in 2005–2020. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 80, 103201.
- Escauriaza, C., & Williams, M. (2025). Antidune simulations using continuum-based models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(1), e6058.
- FitzGerald, G., Du, W., Jamal, A., Clark, M., & Hou, X.-Y. (2010). Flood fatalities in contemporary Australia (1997–2008). *Emergency Medicine Australasia*, 22(2), 180-186.
- Garcia, M. (2008). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers.
- George, D. L., & Iverson, R. M. (2014). A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. II. Numerical predictions and experimental tests. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2170), 20130820.
- Goutiere, L., Soares-Frazão, S., & Zech, Y. (2011). Dam-break flow on mobile bed in abruptly widening channel: Experimental data. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 367-371.
- Han, Z., Chen, G., Li, Y., Tang, C., Xu, L., He, Y., Huang, X., & Wang, W. (2015). Numerical simulation of debris-flow behavior incorporating a dynamic method for estimating the entrainment. *Engineering Geology*, 190, 52-64.

IPCC. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; Cambridge Core.

Lai, R., Li, J., Wang, P., Guo, Y., Xu, L., Zhang, X., Wang, M., & Zhang, X. (2024). Cumulative sedimentation hazard map of urban areas subject to hyperconcentrated flash flood: A case study of Suide County in the Wuding River basin, China. *Journal of Flood Risk Management*, 17(3), e12996.

Lee, S., & Vink, K. (2015). Assessing the vulnerability of different age groups regarding flood fatalities: Case study in the Philippines. *Water Policy*, 17(6), 1045-1061.

Leveque, R. J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press.

Liang, Q., & Marche, F. (2009). Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms. *Advances in Water Resources*, 32(6), 873-884.

Liu, J., Cao, Z., Li, X., Wang, W., Hou, J., Li, D., & Ma, Y. (2022). Modelling urban flooding integrated with flow and sediment transport in drainage networks. *Science of The Total Environment*, 850, 158027.

Liu, Z., Lao, J., Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, J., Wang, H., & Jiang, B. (2018). Association between floods and typhoid fever in Yongzhou, China: Effects and vulnerable groups. *Environmental Research*, 167, 718-724.

Nash, S., Escauriaza, C., Finaud-Guyot, P., Jahn, W., & Rousseau, A. (2024). Single porosity model: Exploring the spatial resolution limits in complex urban patterns. *Journal of Hydrology*, 637, 131239.

Soares-Frazão, S., Canelas, R., Cao, Z., Cea, L., Chaudhry, H. M., Die Moran, A., El Kadi, K., Ferreira, R., Cadórniga, I. F., Gonzalez-Ramirez, N., Greco, M., Huang, W., Imran, J., Le Coz, J., Marsooli, R., Paquier, A., Pender, G., Pontillo, M., Puertas, J., ... Zech, Y. (2012). Dam-break flows over mobile beds: Experiments and benchmark tests for numerical models. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 364-375.

Toro, E. F. (2001). *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. Wiley.

Wang, M., Fu, X., Zhang, D., Chen, F., Liu, M., Zhou, S., Su, J., & Tan, S. K. (2023). Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways. *Science of The Total Environment*, 880, 163470.

WMO. (2006). *Technical Regulations. Volume III: Hydrology*, WMO-No. 49. World Meteorological Organization (WMO).

Wu, G., Yang, Z., Zhang, K., Dong, P., & Lin, Y.-T. (2018). A Non-Equilibrium Sediment Transport Model for Dam Break Flow over Moveable Bed Based on Non-Uniform Rectangular Mesh. *Water*, 10(5), 616.

Xia, X., Jarsve, K. T., Dijkstra, T., Liang, Q., Meng, X., & Chen, G. (2023). An integrated hydrodynamic model for runoff-generated debris flows with novel formulation of bed erosion and deposition. *Engineering Geology*, 326, 107310.

Yari, A., Ardalan, A., Ostadtaghizadeh, A., Zarezadeh, Y., Boubakran, M. S., Bidarpoor, F., & Rahimiforoushani, A. (2019). Underlying factors affecting death due to flood in Iran: A qualitative content analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, 101258.