

# MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN A ESCALA PROTOTIPO

<sup>1</sup>D'Angelo Leiza, <sup>1</sup>Reyes Gian, <sup>2</sup>Zabaleta Federico y <sup>3</sup>Bombardelli Fabián

<sup>1</sup>UIDET Hidromecánica, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina

<sup>2</sup>CTR Stanford University, California, USA

<sup>3</sup>Civil and Environmental Department, UC Davis, USA

leizadangelo@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La incorporación natural de aire en el resalto hidráulico en estructuras de disipación de energía puede tener efectos ambientales contrastantes: niveles moderados contribuyen a la oxigenación beneficiosa del agua, mientras que la aireación excesiva puede generar sobresaturación de gases totales disueltos (TDG), lo que a su vez puede causar la enfermedad de las burbujas en los peces (Weitkamp y Katz, 1980).

La modelación física en escala Froude presenta limitaciones significativas debido a efectos de escala en la aireación, que escala con el número de Weber, con subestimación de la incorporación de aire respecto a condiciones reales. Chanson y Gualtieri (2008) demostraron efectos de escala críticos en resaltos hidráulicos, restringiendo la extrapolación confiable de resultados experimentales a condiciones reales de operación.

Este trabajo evalúa de forma preliminar las capacidades de un modelo numérico multifásico para flujos auto-aireados, validando los resultados con datos experimentales en escala prototipo.

## METODOLOGÍA

Se utilizaron los datos del Experimento 1 de Wang et al. (2023) correspondiente al resalto tipo D formado aguas abajo de la compuerta de 5 m en el canal del río Bao (Figura 1a). Las condiciones experimentales fueron: caudal específico  $q_w = 1.16 \text{ m}^2/\text{s}$ , tirante inicial  $h_1 = 0.135 \text{ m}$ , velocidad  $V_1 = 8.6 \text{ m/s}$ ,  $Fr = 7.47$ , y  $Re = 1.16 \times 10^6$ .

La geometría comprende una plataforma horizontal de 2 m, seguida de una pendiente de  $14^\circ$  por 4.12 m, un cuenco horizontal de 20 m, con una expansión horizontal desde 5 m hasta 50 m de ancho.

Las simulaciones 2D se realizaron en OpenFOAM utilizando el modelo trifásico (agua + aire-continuo + burbujas) desarrollado por Zabaleta et al. (2023, 2024).

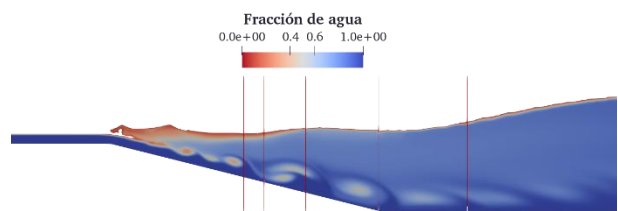


Figura 1.- (a) Configuración experimental de Wang et al. (2023); (b) Zona del resalto del dominio computacional.

El dominio computacional emplea malla estructurada con tamaño mínimo de 2.5 cm y refinamiento en zonas de interés (Figura 1b).

Se definieron cinco secciones transversales para extracción de perfiles de validación. Las condiciones de borde incluyen: entrada con velocidad uniforme, paredes con funciones de pared, tope con intercambio libre de aire, y salida con condición de vertedero. El costo computacional es aproximadamente 4.5 horas por cada segundo real simulado con 5 núcleos de un procesador AMD Ryzen 7 5700G, demostrando viabilidad práctica para evaluaciones paramétricas.

## RESULTADOS

### Hidrodinámica

Los perfiles de velocidad (Figura 2) reproducen satisfactoriamente la estructura del resalto: jet de alta velocidad en la zona inferior, zona de recirculación con velocidades negativas en el roller, y transición hacia flujo uniforme aguas abajo.

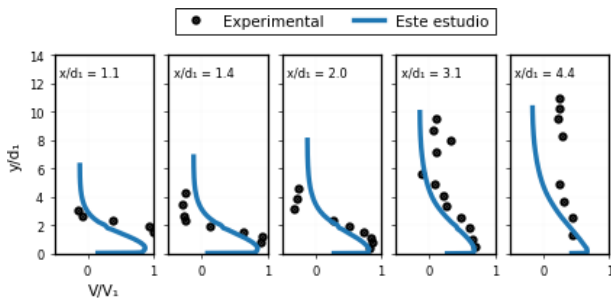


Figura 2.- Perfiles de velocidad experimental vs CFD en cinco secciones transversales.

La Tabla 1 presenta métricas cuantitativas preliminares en las cinco secciones transversales seleccionadas (visibles en Figura 1b), con coeficientes de correlación  $R^2 > 0.81$  en todos los casos.

Tabla 1.- Coeficientes de correlación  $R^2$  para perfiles de velocidad.

$x/d_1$	1.1	1.4	2.0	3.1	4.4
$R^2$	0.91	0.92	0.91	0.81	0.84

### Concentración de aire

Las distribuciones verticales de concentración de aire (Figura 3) capturan la posición y magnitud de los picos y el decaimiento hacia la superficie libre. La evolución longitudinal muestra una disminución progresiva de las concentraciones máximas, consistente con la difusión y retorno de las burbujas hacia la superficie. Sin embargo, hay discrepancias considerables en los primeros perfiles.

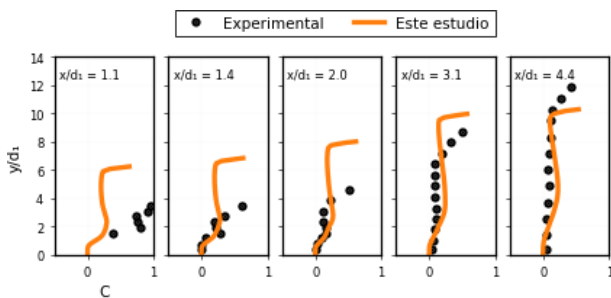


Figura 3.- Perfiles de concentración de aire experimental vs CFD en cinco secciones transversales.

Los mejores ajustes se obtienen en secciones alejadas del pie del resalto, donde fenómenos tridimensionales complejos no capturados por la aproximación 2D limitan la precisión de las predicciones.

### CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los resultados preliminares de evaluación de un modelo CFD multifásico contra datos experimentales a escala prototipo, mostrando capacidad prometedora para reproducir las características principales de resaltos hidráulicos tipo D. Los coeficientes de correlación  $R^2 > 0.81$  para perfiles de velocidad demuestran que el modelo captura satisfactoriamente la hidrodinámica del fenómeno.

La metodología supera limitaciones de efectos de escala inherentes a la modelación física tradicional, ampliando las posibilidades para el diseño seguro de estructuras hidráulicas.

A pesar de las discrepancias identificadas en los primeros perfiles, la metodología constituye una herramienta complementaria valiosa para evaluar alternativas de diseño desde etapas tempranas, potencialmente reduciendo costos de modificaciones posteriores.

El trabajo futuro incluye: estabilización completa de las simulaciones y eventual acoplamiento con modelos de transporte de TDG para evaluación ambiental integral.

### REFERENCIAS

Chanson, H., & Gualtieri, C. (2008). Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), 35-44.

Wang, H., Tang, R., Bai, Z., Liu, S., Sang, W., & Bai, R. (2023). Prototype air-water flow measurements in D-type hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 61(1), 145-161.

Zabaleta, F., Márquez Damián, S., & Bombardelli, F.A. (2023). A novel three-phase mixture approach for the numerical modeling of self-aerated flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 408, 115958.

Zabaleta, F., Bombardelli, F.A., Márquez Damián, S., 2024. Numerical modeling of self-aerated flows: Turbulence modeling and the onset of air entrainment. *Physics of Fluids* 36, 043337. <https://doi.org/10.1063/5.0197678>

Weitkamp, D.E. y M. Katz (1980). "A review of dissolved gas supersaturation literature". *Transactions of the American Fisheries Society*, 109(6), pp. 659-702.