

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE MODELACIÓN
MATEMÁTICA 1D, 2D, 3D Y MODELACIÓN FÍSICA EN UN VERTEDERO LATERAL
EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO**

FERNANDA ABARZUA T.¹
RODRIGO HERRERA H.²
FRANCISCO ULLOA C.³
LUIS ZAMORANO R.⁴

RESUMEN

El diseño de obras hidráulicas para flujos tridimensionales, es complejo ya que no existe un desarrollo teórico acabado; por esta razón, se utilizan fórmulas empíricas. Sin embargo, aplicar fórmulas empíricas implica realizar aproximaciones, ya que estas relaciones están limitadas a las condiciones experimentales. Esto añade incertidumbre a los cálculos por lo que se recurre a herramientas de modelación. En este caso, se estudia un vertedero lateral en régimen supercrítico, diseñado por un consultor para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Se comparan cuatro herramientas alternativas de diseño: modelación física, modelación numérica 1D en Hec-Ras, modelación 2D, en Mike 21 e Iber, y modelación 3D en Open Foam. El objetivo es comparar los resultados de los modelos numéricos con el modelo físico y cuantificar las diferencias. A pesar que el flujo sobre el vertedero de la obra en estudio no cumple con la consideración de presión hidrostática de los modelos 1D y 2D, aún así, es de interés estimar los errores, ya que actualmente son las herramientas de uso más extendido en el diseño de ingeniería en Chile. De los resultados obtenidos, se concluye que el modelo en 3D es el que logra representar los tipos de escurrimiento a lo largo de la zona de estudio. No obstante, este resultado tiene validez en la medida que es contrastado con modelación física, y además, se conocen los supuestos y limitaciones que definen la base del modelo numérico.

¹Ingeniero Jefe de Proyecto, Instituto Nacional de Hidráulica - fernandaabarzua@inh.cl

²Ingeniero Jefe de Proyecto, Instituto Nacional de Hidráulica - rodrigoherrera@inh.cl

³Ingeniero Jefe de Proyecto, Instituto Nacional de Hidráulica - franciscoulloa@inh.cl

⁴Jefe de Ingeniería y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica - luiszamorano@inh.cl

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería hidráulica, la modelación física y la simulación matemática constituyen dos técnicas diferentes para la resolución de problemas hidráulicos complejos de diversa naturaleza (Balairón et al., (2014)). En Chile, para diseñar obras hidráulicas que se escapen de los supuestos considerados en las formulaciones empíricas, generalmente, se recurre a la modelación física. Producto de los avances en la tecnología y la evolución de la programación numérica, en los últimos años se ha comenzado a implementar modelos numéricos en 1D, 2D y 3D, siendo los más comunes los modelos de 1D y 2D en lámina libre. Actualmente, se cuenta con paquetes comerciales y códigos abiertos desarrollados por centros de investigación y Universidades. El gran riesgo de esta herramienta es que los software de modelación y principalmente los software comerciales, son utilizados para las labores habituales de diseño, muchas veces desconociendo el esquema numérico, los algoritmos numéricos y su aplicabilidad.

En este trabajo se comparan cuatro herramientas alternativas de modelación, modelo 1D y base teórica, modelo físico, modelo 2D y modelo 3D. Las herramientas de modelación son aplicadas al diseño de un veredero lateral que desvía una fracción del flujo transportado por un canal abierto en régimen supercrítico. Los resultados de los modelos numéricos se comparan con los medidos en el modelo físico, analizando los ejes hidráulicos y el caudal captado por el vertedero lateral.

El objetivo de esta investigación es contrastar los resultados de las herramientas computacionales de diversa complejidad numérica con el modelo físico e identificar y cuantificar las diferencias en las variables controladas, a modo de poder inferir la importancia de conocer las limitaciones y supuestos de cada paquete de modelación y de ambas técnicas de modelación aplicadas a un caso de estudio.

2. CASO DE ESTUDIO

En el marco del proyecto *Diseño Definitivo de las Obras Hidráulicas del Parque la Aguada* de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la empresa consultora de ingeniería CYGSA S.A. diseña un vertedero lateral de cresta redondeada en la ribera sur del canal zanjón en una zona en la que el canal presenta régimen supercrítico. En la Figura 1 se esquematiza en planta el diseño de la obra.

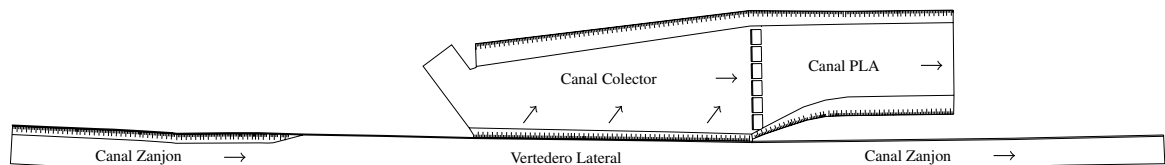


Figura 1: Esquema de la vista en planta del modelo Físico

Los vertederos laterales son obras hidráulicas de excedencia utilizados en canales abiertos, para captar y desviar una fracción del caudal transportado por el canal principal. A pesar de ser una obra poco eficiente, ya que la relación entre el caudal captado y el largo del vertedero es baja y, además, requiere de un canal colector que contenga y dirija el caudal vertido, es una obra que se utiliza frecuentemente debido a su bajo costo y a que no necesita supervisión en la etapa de operación (Mery (2013)). Los fenómenos que afectan al flujo sobre el vertedero y que se deben considerar al diseñar

esta obra, son las perturbaciones al inicio y al final del vertedero, las cuales dependen directamente de la velocidad en el canal de aproximación; la velocidad del flujo al inicio del vertedero, que determina la curvatura de las líneas de corriente y, por ende, los valores de la presión sobre el vertedero; y la variación de la altura de escurrimiento a lo largo del canal, lo cual está relacionado con el régimen de escurrimiento que presente el canal principal (Dominguez (1999)). En el caso de flujos subcríticos, régimen bajo el cual generalmente se diseñan estas obras, los fenómenos mencionados anteriormente tienen menor relevancia, ya que la velocidad del flujo es despreciable en comparación a la altura de carga. Por el contrario, en el caso de flujos supercríticos, estos fenómenos tienen relevancia, ya que la velocidad del flujo es significativa en comparación a la altura de carga (Savage and Johnson (2001)). En flujo supercrítico, el perfil sobre el vertedero es decreciente y curvo, y en régimen subcrítico el perfil sobre el vertedero es creciente y curvo (De Marchi (1934)). El cálculo teórico del caudal vertido involucra al coeficiente del vertedero que es un indicador de las condiciones de escurrimiento sobre el vertedero. Este coeficiente es función del número de Froude, de la profundidad de aguas arriba y del largo del vertedero Ranga Raju et al. (1979). Si bien, la predicción para flujos supercríticos presenta una cierta complejidad, debido a que probablemente son flujos no uniformes, con alta turbulencia y con presencia de ondas transversales, estos flujos siguen siendo materia de estudio, ya que en ocasiones por limitaciones geográficas, demográficas y económicas es la solución hidráulica que mejor se ajusta a las condiciones del proyecto. En el proyecto Parque la Aguada se da precisamente esta condición. El diseño de esta obra se realizó, en primera instancia, con la relación empírica propuesta por Dominguez (1999) y una modelación 1D desarrollado en Hec-Ras. A continuación se describen en detalle las obras hidráulicas que componen el sistema.

La obra en estudio considera la siguiente infraestructura:

- Canal Zanjón: este primer tramo tiene una longitud de 265 m. Los primeros 50 m tiene sección semi-trapecial, a continuación, una transición triangular y finaliza con 205 m en sección rectangular de ancho variable. Pendiente 0.8 % y revestido de hormigón.
- Vertedero Lateral: el vertedero lateral es de pared gruesa redondeada de 65 m de longitud y 2 m de altura. Se ubica en el lado sur del canal Zanjón .
- Canal Colector: es un canal trapecial revestido de hormigón. El primer tramo contempla un largo de 65 m y un ancho basal variable de 16 a 26.5 m, al final de este tramo se proyectan seis dientes disipadores para controlar el flujo que conduce el canal colector. El segundo tramo también es revestido de hormigón y el diseño contempla un largo de 20 m y un ancho basal variable desde 26.5 a 17 m. En este tramo la ladera sur tiene un talud 2:1 (H:V) y la ladera norte consiste en una transición curva que inicia con talud 1:1 y termina con talud 3:1. El canal Colector empalma con el canal Parque la Aguada.
- Canal Parque la Aguada (canal PLA): el canal PLA es un canal recubierto de hormigón con sección trapecial de talud sur 2:1 (H:V) y talud norte 3:1. El ancho basal es constante e igual a 17 m.

3. MODELOS

Diseño y Modelo 1D: HEC-RAS

Para el diseño del vertedero lateral se utilizó la herramienta de modelación HEC-RAS; programa unidimensional desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de E.E.U.U. El diseño consta de dos etapas, en la primera se define la forma y las dimensiones del vertedero aplicando la ecuación 1 que relaciona el caudal por unidad de largo (q_x) con el ángulo del paramento vertical del vertedero con respecto a la dirección del flujo ($\varphi(\alpha)$) que a su vez depende del ángulo formado por la dirección del flujo con respecto al umbral del vertedero (α), el coeficiente de gasto que contempla la disminución de la eficiencia del vertido ($m(x)$) y la carga sobre el vertedero ($H(x)$). En este cálculo teórico se considera que el perfil sobre el vertedero es lineal y que la dirección de la velocidad sobre el vertedero no varía en a lo largo de la cresta del vertedero (x).

$$q_x = \varphi(\alpha) m(x) \sqrt{2g[H(x)]} \quad (1)$$

con

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha) &= 0,80 + 0,2\text{sen}(\alpha) \\ m(x) &= 0,0069Ln\left(h_0 - \frac{h_0-h_1}{L}x\right) + 0,3317 \end{aligned}$$

La segunda etapa consistió en modelar en HEC-RAS el proyecto del Parque la Aguada en su totalidad, es decir, 3.5 km del canal Zanjón y 4.5 km del canal PLA (incluyendo el canal Colector). Es importante mencionar que las condiciones de borde que determinan el escurrimiento en la zona de estudio se imponen fuera de los límites del caso en estudio.

Modelo Físico

El modelo físico se diseña bajo el criterio de la similitud de Froude y tiene una escala geométrica 1:20. Esta escala se define considerando el análisis de semejanza hidráulica, las limitaciones constructivas (espacio, capacidad de bombeo, tiempos de construcción, entre otros), y analizando los efectos de escala, de tal manera de evitar que fenómenos despreciables en prototipo se tornen relevantes en el modelo. Se considera un escurrimiento permanente en régimen turbulento, con paredes hidrodinámicamente rugosas, por lo que se considera válida la ecuación de Manning. Las condiciones geométricas se obtienen de la topografía y de los planos del diseño del proyecto de la DOH. El modelo se construyó en acrílico cuyo número de Manning se estima en 0.009, valor que escala con la rugosidad del prototipo. El canal principal se alimenta con un sistema de bombeo y retroalimentación. En las entradas y salidas se controla el caudal mediante flujómetros inductivos. El caudal de entrada se escala con la crecida centenaria, en prototipo corresponde a 177.7 m³/s y en modelo 99.3 l/s. Para controlar las perturbaciones del flujo al inicio del modelo, se instala un aquietador de piedras de río en el estanque entrada y, en la sección de entrada al modelo, tubos de pvc de media pulgada. Se imponen dos condiciones de borde que se determinan a partir del análisis de los resultados del modelo en HEC-RAS. La condición de borde aguas arriba del canal Zanjón, se establece debido a que es régimen supercrítico, y se impone la altura de escurrimiento obtenida con HEC-RAS en la sección 1 (ver ubicación en Figura 2). Por otro lado, respecto de la condición

de borde aguas abajo del canal colector, en la sección 19, el modelo en HEC-RAS predice un escurrimiento subcrítico que controla el escurrimiento hacia aguas arriba, hasta la base del vertedero. Ante la incertidumbre que genera dicho resultado debido al origen tridimensional del flujo de entrada al canal Colector, y considerando que la finalidad del ensayo de modelación física consiste en el diseño de elementos de disipación; en el modelo físico se impone altura crítica, que representa la altura mínima de escurrimiento en la sección 19 que controla el flujo hacia aguas arriba, hasta el pie del vertedero. Ante la incertidumbre que genera dicho resultado debido al origen tridimensional del flujo de entrada al canal Colector, y considerando que la finalidad del ensayo de modelación física consiste en el diseño de elementos de disipación; en el modelo físico se impone altura crítica, que representa la altura mínima de escurrimiento en la sección 19 que controla el flujo aguas arriba.

Modelos bidimensionales

Los modelos bidimensionales, que cada vez tienen más uso debido al incremento de la capacidad computacional, se basan generalmente, en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant o de aguas poco profundas. Estas ecuaciones se obtienen al promediar en la vertical las ecuaciones de Reynolds (RANS) y la de continuidad. Las principales consideraciones de estas ecuaciones son la distribución hidrostática de presiones, que implica que no haya componentes significantes de velocidad en la dirección vertical (Sabbagh-Yazdi et al. (2007)), y que las pérdidas de carga en régimen impermanente pueden ser simuladas usando las ecuaciones de Manning o de Chézy, las que son válidas para régimen permanente. Para efectos de este estudio se evalúa la aplicación al diseño de una herramienta comercial de amplio uso en la industria, Mike 21, y un modelo de libre acceso, Iber.

Modelo 2D : Mike 21

Mike 21 es un programa computacional desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute) para resolver modelos de distintas áreas de la hidráulica como hidráulica marítima, ingeniería ambiental, hidráulica fluvial y transporte de sedimentos. Es un programa modular, es decir, dependiendo de la variable de interés existen módulos independientes (DHI (2014)). En este caso, se utiliza el modelo hidrodinámico que resuelve numéricamente las ecuaciones de aguas poco profundas (2D-SWE). El modelo resuelve numéricamente discretizado el dominio en elementos de volumen finito que conservan las propiedades del fluido y que no se transponen con los volúmenes vecinos, así el volumen total del fluido es igual a la suma de los volúmenes de control considerados. Los elementos pueden ser triángulos y/o cuadriláteros. Para el cierre de la turbulencia se utiliza la aproximación de Boussinesq y se pueden escoger entre dos formulaciones, Smagorinsky o viscosidad de remolinos constante. La rugosidad del fondo y paredes se puede definir mediante el número de Manning o de Chezy.

Modelo 2D : Iber

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de marea en estuarios. El modelo Iber consta

de 3 módulos de cálculo principales: módulo hidrodinámico, módulo de turbulencia y módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones 2D-SWE. El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, permitiendo utilizar diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En la versión actual se incluye el modelo parabólico, el modelo de longitud de mezcla y el modelo $k - \varepsilon$.

Modelo 3D: Open Foam

La dinámica de fluidos computacional, o CFD por su sigla en inglés, resuelve ecuaciones mediante esquemas complejos con alta precisión. En el caso de flujos turbulentos se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds, RANS, que suponen fluido incompresible, newtoniano y que la velocidad en un flujo turbulento tiene fluctuaciones cuasi o pseudo aleatorias que pueden analizarse estadísticamente mediante una ecuación de cierre de turbulencia.

OpenFoam (Open Field Operation and Manipulation) es programa de código abierto de dinámica computacional de fluidos, producido por OpenCFD Ltd. Sus orígenes provienen de finales de los 80s, en el Imperial College (Londres), cuando un grupo de personas decidió desarrollar una herramienta capaz de realizar simulaciones genéricas y flexibles. Fue lanzado como código abierto, en el año 2004 bajo la Licencia Pública General de GNU. OpenFoam está escrito en C ++ , diseñado para correr en sistemas UNIX o UNIX-, como Linux. Utiliza un enfoque orientado a objetos que hace que el código sea comprensible y modificable por el usuario con el fin de adaptarlo a cada caso en particular. Básicamente, OpenFoam es una biblioteca usada para crear ejecutables, conocidos como aplicaciones, diseñados con el fin de resolver un caso de estudio determinado. Hay dos tipos de aplicaciones: *solvers*, que han de resolver los casos; y las utilidades, que están diseñadas para ejecutar el pre y post proceso de los datos. Los *solvers* utilizan una malla tridimensional no estructurada de volúmenes finitos, y permiten resolver problemas desde flujos incompresibles, compresibles, modelos multifase y transferencia de calor, entre otros. Adicionalmente, está la opción de paralelizar los cálculos en procesadores múltiples mediante MPI (message passing interface). Para el caso de este estudio, se utiliza el *solver* InterFoam, que resuelve un sistema bifásico empleando el método VOF (Volume of Fluid) y la ecuación de cierre de turbulencia $k - \varepsilon$.

4. ANTECEDENTES DE LAS MODELACIONES

El caso modelado corresponde al caudal de la crecida centenaria, que en prototipo se estima en $177.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados del ensayo en modelo físico, que se utilizan como base para el análisis comparativo, son las alturas de escurrimiento en el canal Zanjón, en el vertedero y en el canal Colector. En la zona del umbral del vertedero, los datos disponibles corresponden a la altura de agua con respecto al fondo del canal principal justo antes de ingresar al vertedero. En el caso de los modelos bidimensionales, la grilla utilizada se obtuvo luego de un proceso iterativo, ya que las altas velocidades del flujo y la fuerte pendiente del vertedero obligó a aumentar la resolución de la malla en la zona del vertedero y en los bordes del modelo, a fin de incrementar la estabilidad numérica. En ambos modelos bidimensionales se implementa una técnica de modelación similar aguas arriba del dominio de modelación, mediante la extensión del canal Zanjón 120 m aguas arriba,

permitiendo que el flujo tienda a la altura normal de escurrimiento en la sección 1. Aguas abajo del canal Colector, también se aplica la técnica de extender el dominio de modelación, imponiendo en este caso altura crítica, que condiciona escurrimiento subcrítico hacia aguas arriba, hasta que se genera el resalto que compatibiliza este escurrimiento con el de régimen supercrítico al pie del vertedero. En la Tabla 1 se detallan las condiciones básicas de inicialización de las modelaciones.

Tabla 1: Condiciones de modelación

Condición	Hec-Ras	Mike 21	Iber	Open Foam
Tipo de Modelo	1D	2D	2D	3D- Bifásico(VOF)
Esquema	Diferencias finitas	Volúmenes Finitos	Volúmenes Finitos	Volúmenes Finitos
Tipo de malla	Perfiles Transversales	Estructurada/No Estructurada	Estructurada/No Estructurada	No Estructurada
Duración [s]	-	3600	1800	130
Manning	0.017	0.017	0.017	k_o
Modelo Turbulencia	-	Smagorinsky $C_s = 0,3^*$	$k - \epsilon$	$k - \epsilon$
Condiciones de Borde Canal Zanjón / A.Arriba / A.Abajo	Descarga (260 m. aguas arriba de la zona de estudio	Descarga / Flather Condition	Descarga / Supercrítico	$v=cte. \alpha=cte. k - \epsilon=cte.$
Condiciones de Borde Canal Colector A.Abajo	Crisis (300 m. aguas abajo de la zona de estudio)	Curva de Gasto	Crítico	$v=gradiente 0$ $\alpha=gradiente 0^{**}$ $k - \epsilon=gradiente 0$
Nº elementos	191 perfiles	50568	16130	900000
Tamaño elemento max-min [m^2]	2000-100	1.5-0.004	5-0.005	1.57-0.002
Tiempo de cómputo [hr]	0.003	27	6	8
Time step promedio [hr]	-	0.002	0.002	10^{-7}
Límite seco-mojado [m]	-	0.005-0.05	0.01	-
Propiedades del Computador	S/I	Procesador Intel (R) Core (TM) i7 3.3GHz - 16 GB RAM Paralelización: 4 nucleos.	Procesador Intel (R) Core (TM) i7 3.4 GHz- 16 GB RAM Paralelización: 4 nucleos.	HPC SGI UV 2000 Intel xeon ES-4600-512 RAM Paralelización:80 núcleos

* Coeficiente de Smagorinsky, Mike 21 recomienda valores entre 0.25-1.00

** α corresponde a la variable que representa la fracción volumétrica de agua/aire en la celda, donde 1 corresponde a la totalidad del volumen de la celda con agua y 0 a toda la celda con aire

En el caso del modelo 3D, el proceso de construcción de la malla de modelación, requiere de una discretización en la vertical lo suficientemente fina para poder representar con una resolución

apropiada las bajas alturas de escurrimiento en la zona del canal Colector. La implementación de las condiciones de borde no requiere extender el dominio de modelación. Aguas arriba, en el canal Zanjón, se impone la condición de régimen supercrítico obtenida en HEC-RAS, mientras que aguas abajo se establece una condición de gradiente zero para la velocidad. De lo anterior, cabe destacar que si bien, la geometría del modelo numérico es la misma que la construida en modelo físico, la condición de borde impuesta aguas arriba no considera ningún parámetro que permita simular el efecto de aquietamiento y distribución uniforme del flujo generado por la incorporación en el modelo físico de tubos de pvc, lo cual magnifica las ondas transversales generadas inmediatamente aguas abajo de esta condición de borde en el modelo numérico.

5. RESULTADOS

A continuación se comparan los resultados de la modelación física y numérica, estableciendo como base de la comparación la modelación física. Los resultados obtenidos en los modelos 2D corresponden a profundidades instantáneas, lo que es válido considerando que bajo régimen permanente, estos modelos presentan variaciones temporales de la altura de escurrimiento marginales o casi nulas. En el caso del modelo RANS 3D, se consideran los valores medios temporales ya que la variación temporal es observable debido a que el modelo es capaz de reproducir las fluctuaciones turbulentas medias. La comparaciones se realizan en cinco perfiles longitudinales, dos ejes en el canal Zanjón, denominados Eje Norte y Eje Sur; y tres ejes en el canal Colector, denominados Eje Norte, Eje Central y Eje Sur. Los datos del modelo físico se midieron 20 secciones como se muestra en la Figura 2. Por su parte, los resultados de las modelaciones numéricas se presentan mediante curvas discretizadas con un espaciamiento máximo de 2 m. En la Figura 3 y 4 se comparan los resultados obtenidos en el Eje Norte y Eje Sur del canal Zanjón, respectivamente.

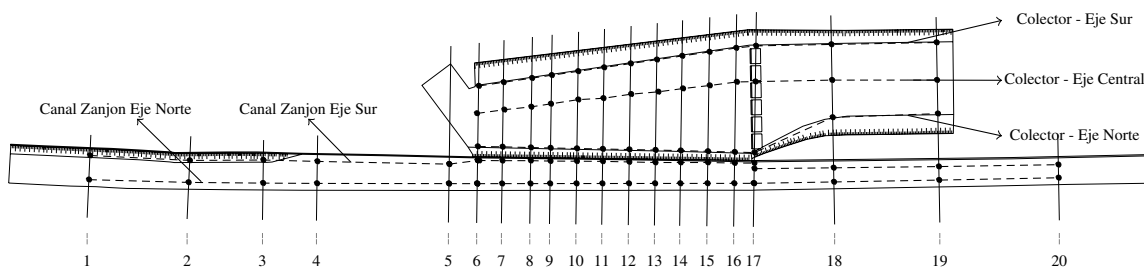


Figura 2: Ubicación de los ejes longitudinales analizados, perfiles transversales y puntos de medición. Vista en planta.

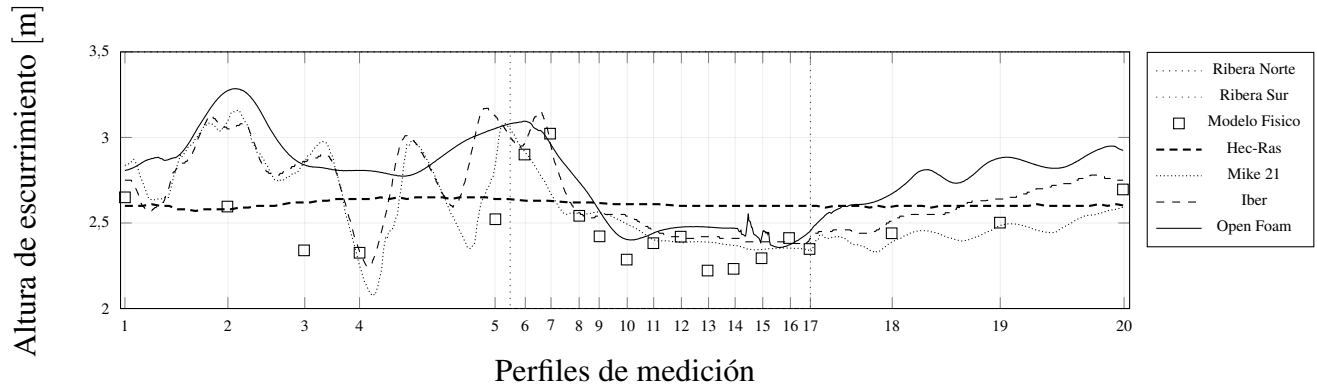


Figura 3: Gráfico comparativo entre el eje hidráulico medido y los simulados, en el Eje Norte del canal Zanjón

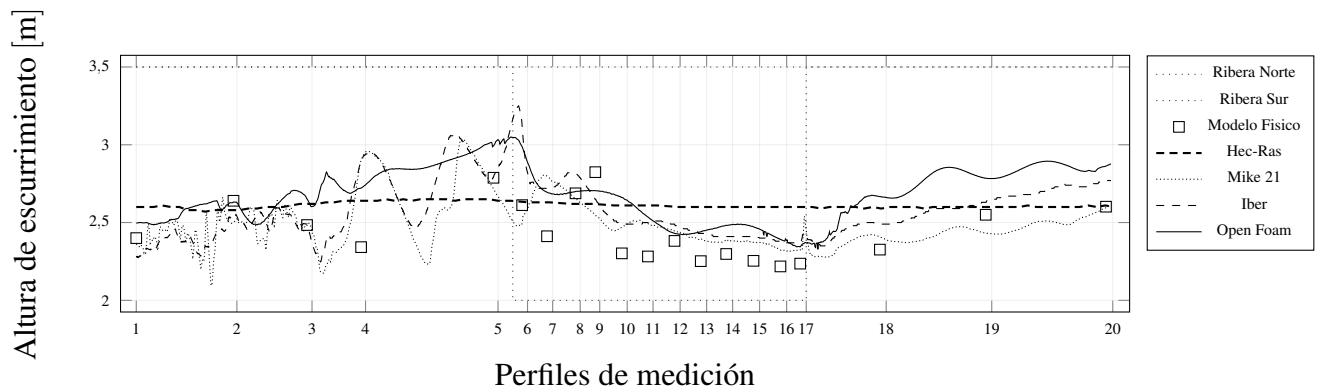


Figura 4: Gráfico comparativo entre el eje hidráulico medido y los simulados, en el Eje Sur del canal Zanjón

Aguas arriba del vertedero lateral se observa la variabilidad de las alturas de escurrimiento en la transversal debido a la presencia de ondas estacionarias. Aguas abajo del vertedero no se observan ondas estacionarias importantes y el flujo mantiene una altura estable. Como se observa en las figuras 3 y 4 las diferencias en los resultados entregados por los modelos matemáticos 3D y 2D con Hec-Ras es evidente, El modelo Hec-Ras mantiene una altura estable en todo el eje longitudinal, con un valor cercano al promedio de los máximos y mínimos de los modelos 2D y 3D. La diferencia porcentual máxima de los datos de Hec-Ras con los datos medidos es de un 17% y promedio de un 9%. Los datos de los dos modelos 2D siguen una misma tendencia presentando una diferencia porcentual entre ellos máxima de un 10% y promedio de un 3%. En comparación con los datos medidos en el modelo físico, los modelos 2D presentan una diferencia porcentual máxima y promedio de 26% y 7% respectivamente. El modelo 3D presenta un ajuste similar a los modelos 2D con una diferencia porcentual máxima de un 26% y promedio de un 9%.

Generalmente el gasto de un vertedero, se estima en relación a la altura de carga sobre el vertedero. En la Figura 5 se muestran las alturas de carga estimadas por cada modelo, en él se observa que la altura de carga tiende a disminuir a lo largo del umbral del vertedero, sin embargo no se ajusta a una perfil lineal como se consideró en el diseño. El modelo Hec-Ras calcula alturas de carga mayores a las medidas en el modelo físico. La Tabla 2 resume los caudales captados por el vertedero lateral. El caudal vertido en el modelo Hec-Ras es un 13% mayor al del modelo físico mientras que

los modelos 2D y 3D alcanzan valores muy cercanos al medido en el modelo físico, presentando diferencias del orden del 3 %.

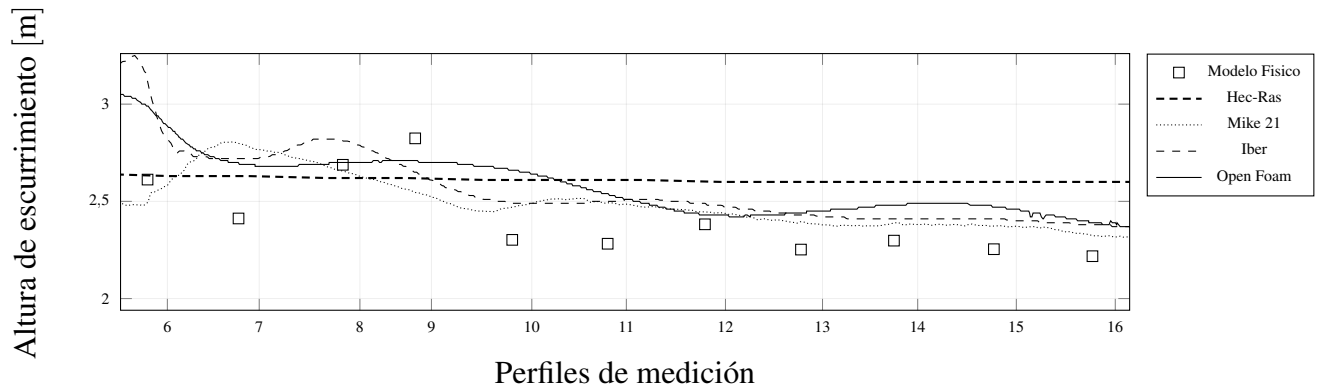


Figura 5: Gráfico comparativo entre altura de carga en el vertedero medida y simuladas

Tabla 2: Caudal captado por el vertedero lateral

Modelo	Caudal Vertedero [m^3/s]
Modelo Físico	39.9
Hec-Ras	45.0
Mike 21	38.8
Iber	39.3
Open Foam	41.0

El caudal ingresa al canal Colector desde la ribera norte, donde se ubica el vertedero lateral. En el modelo físico, el flujo al pie del vertedero, presenta régimen supercrítico con una altura cercana a los 20 cm, velocidad aproximada de 15 m/s y con dirección de 45° con respecto al umbral del vertedero. En la ribera opuesta al vertedero se observa un aumento de altura y en la zona de los dientes un resalto. Aguas abajo de los dientes se observa un flujo con número de Froude variable en la sección transversal.

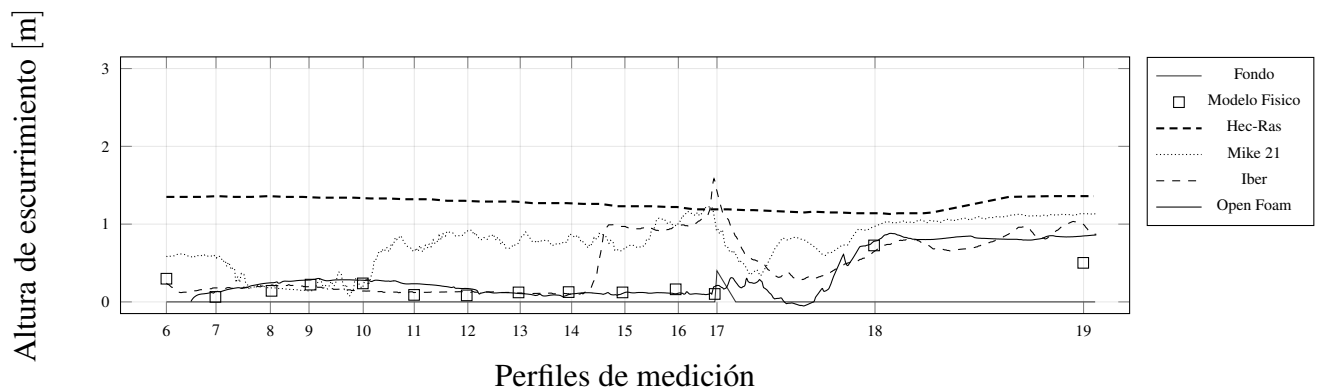


Figura 6: Gráfico comparativo entre el eje hidráulico medido y simulados, en el Eje Norte del canal colector

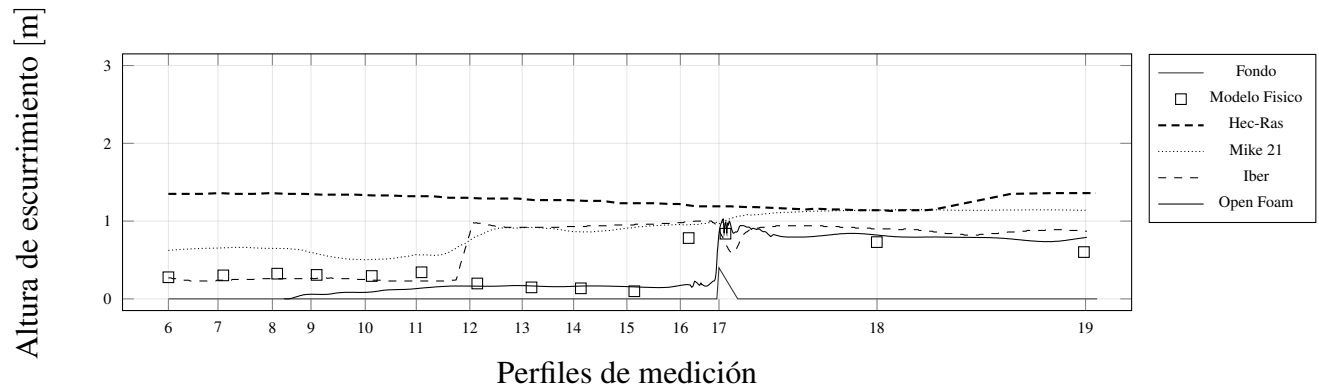


Figura 7: Gráfico comparativo entre el eje hidráulico medido y simulados, en el Eje Central del canal colector

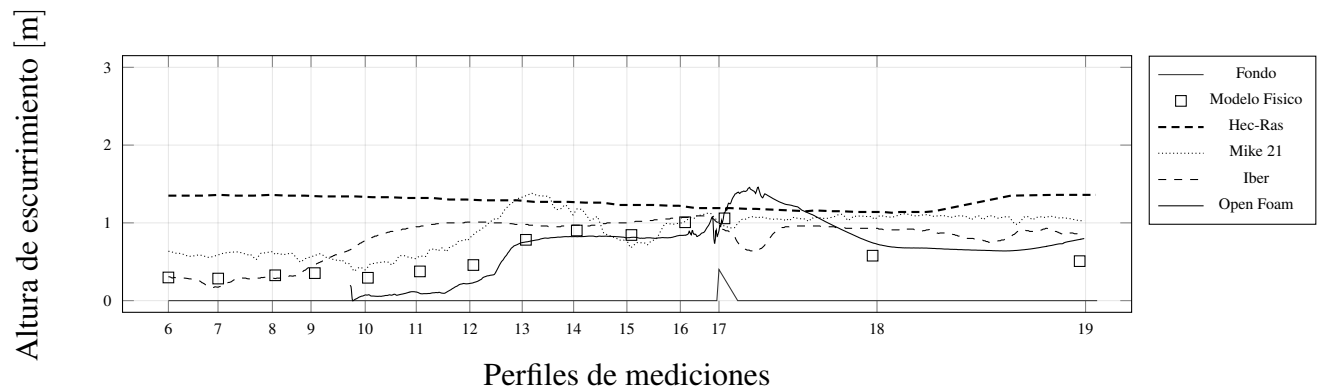


Figura 8: Gráfico comparativo entre el eje hidráulico medido y simulados, en el Eje Sur del canal colector

Como se observa en las Figuras 6, 7 y 8 las alturas modeladas tienen importantes diferencias con las alturas medidas. El modelo en Hec-Ras, mantiene una altura estable en todo el eje longitudinal, con valores, en su mayoría, superiores a los estimados por los modelos 2D y 3D. A diferencia del sector canal Zanjón, los modelos 2D presentan una diferencia mayor entre sí, la diferencia máxima y mínima son 0.73 m y 0.01 m respectivamente. En relación a los datos medidos, el modelo en Mike 21 tiene una diferencia porcentual promedio de 225% y el modelo en Iber de 151% . El modelo 3D es el modelo que presenta el mejor ajuste con los datos medidos con una diferencia porcentual promedio de un 46% .

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para caracterizar la incertidumbre de las herramientas de modelación numérica aplicadas al caso estudio, se presenta una gráfica con los resultados de las alturas de escurrimiento modeladas y medidas en el modelo físico, adimensionalizadas con la altura normal del flujo medida en la sección inicial del modelo físico. Los gráficos muestran el ajuste para cada eje longitudinal de medición en modelo físico. Se calcula también, la diferencia cuadrática media (ecuación 2) de cada modelo numérico en el canal Zanjón, canal Colector y perfil Vertedero.

$$\sqrt{\sum_i [(h_{\text{numérico } i} - h_{\text{físico } i}) / h_{\text{físico } i}]^2} \quad (2)$$

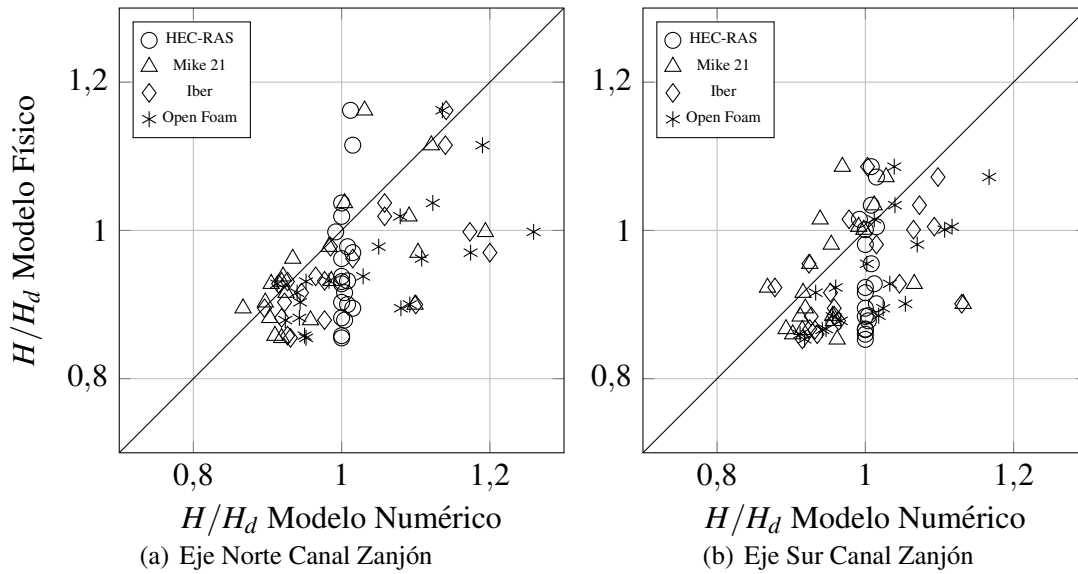


Figura 9: Gráficos comparativos entre los datos medidos y los simulados, en el Canal Zanjón

Tabla 3: Diferencia cuadrática media por modelo en valores de prototipo [m]

Modelo	Canal Zanjón	Canal Colector	Perfil Vertedero
Hec-Ras	0.243	0.945	0.273
Mike 21	0.212	0.467	0.193
Iber	0.220	0.419	0.188
Open Foam	0.263	0.182	0.212

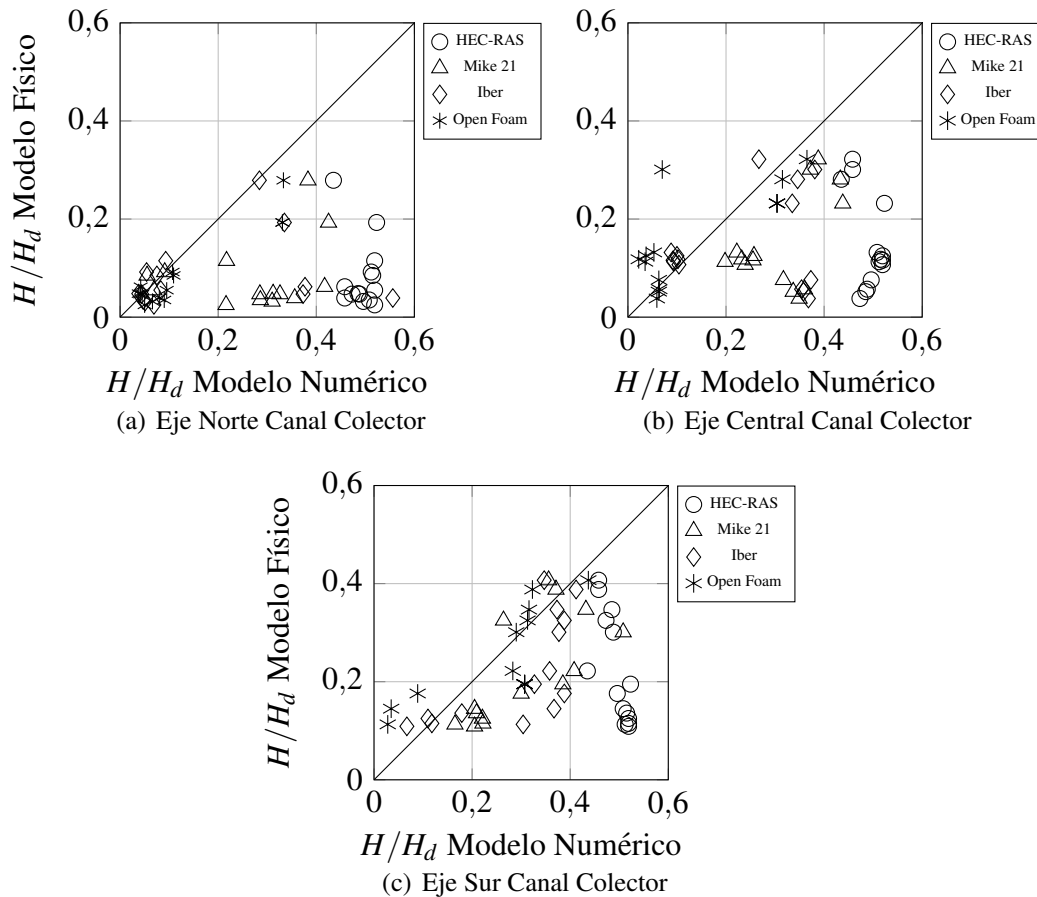


Figura 10: Gráficos comparativos entre los datos medidos y los simulados, en el Canal Colector

A lo largo de ambos perfiles longitudinales del canal Zanjón se observa que los modelos numéricos 2D y 3D tienden a sobreestimar las alturas de escurrimiento, presentando una diferencia cuadrática media entre 21 y 26 *cms*. Sin embargo, es notable la mayor precisión numérica al predecir las alturas de escurrimiento en el perfil del Vertedero, en comparación a las zonas aguas abajo y aguas arriba de este. En el flujo supercrítico del canal Zanjón, las alturas de escurrimiento están fuertemente influenciadas por la presencia de ondas estacionarias, cuya magnitud y dirección dependen directamente de la condición de borde impuesta aguas arriba del modelo numérico, y de la discretización geométrica modelada. Lo anterior revela la alta dependencia entre la capacidad del modelo numérico de predecir del comportamiento hidráulico del flujo supercrítico en el canal principal, y la configuración del modelo definida por el modelador.

En el caso de los modelos 2D y 3D, el mayor ajuste cualitativo de las alturas de escurrimiento se obtiene en el perfil del vertedero, lo cual se refleja en la un error entre -1.3 y 1 m^3/s en la predicción del valor del caudal captado por el vertedero.

En el caso del canal Colector el modelo numérico 1D determina una altura homogénea de régimen subcrítico, a lo largo del eje longitudinal y tiene una diferencia cuadrática media de 95 *cms*, sin la capacidad de representar el resalto. Por su parte, los modelos numéricos 2D, si bien representan el cambio de régimen en el canal Colector, tienden a sobreestimar las alturas de escurrimiento, lo cual es esperable debido a que no son capaces de reproducir la física del flujo en el vertedero. La

diferencia cuadrática media en este sector está entre 41 y 47 *cms*, para Iber y Mike 21, respectivamente. Se puede apreciar cualitativamente que del modelo Iber se obtienen valores más cercanos a las alturas de escurrimiento generadas al inicio del canal Colector y además, en el eje central detecta de manera precisa el inicio del resalto. El modelo en OpenFoam presenta el mejor ajuste en este tramo, en todos los ejes longitudinales, con una diferencia cuadrática media menor a 20 *cm*. El ajuste obtenido en el modelo 3D depende de realizar una discretización geométrica vertical menor a 10 *cm*, en la zona del canal Colector, a modo de calcular con la resolución apropiada las alturas bajas al inicio del canal.

En la Figura 11 se presenta la correlación gráfica de los resultados de las alturas de escurrimiento modeladas y medidas en modelación física y en la Tabla 4, la diferencia cuadrática media de cada modelo numérico.

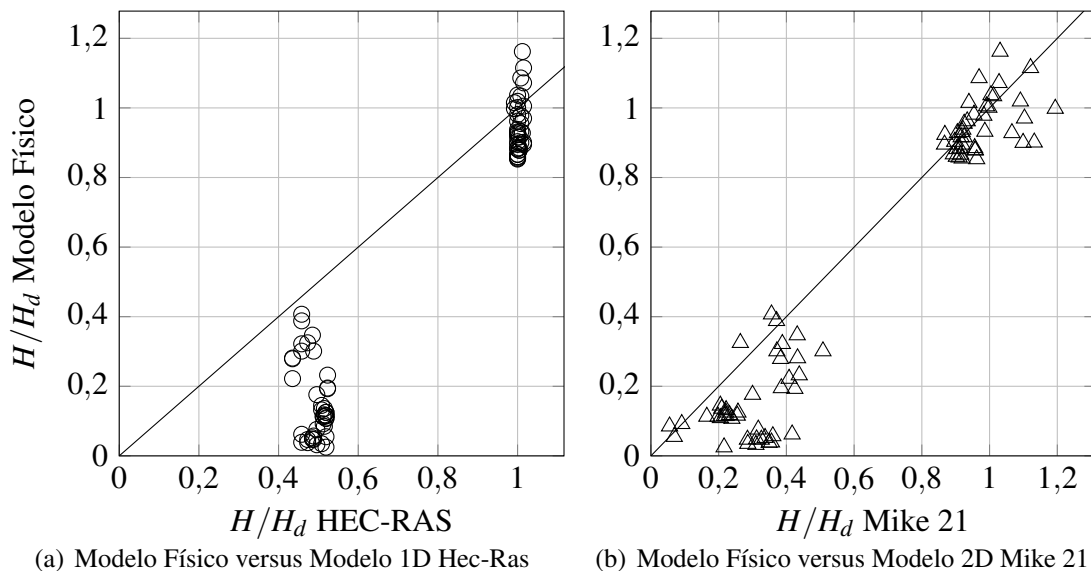


Figura 11: Gráficos comparativos entre los datos medidos y los simulados

Tabla 4: Diferencia cuadrática media en valores de prototipo [m]

Experiencia	Hec-Ras	Mike 21	Iber	Open Foam
Tr=100 años	0.698	0.365	0.337	0.229

Cualitativamente se puede apreciar como el modelo Hec-Ras tiende a una mayor sobreestimación de las alturas de escurrimiento, con una diferencia cuadrática media de 70 *cms*. La menor dispersión se obtiene de los resultados de la modelación 3D, con una diferencia cuadrática media de 23 *cms*.

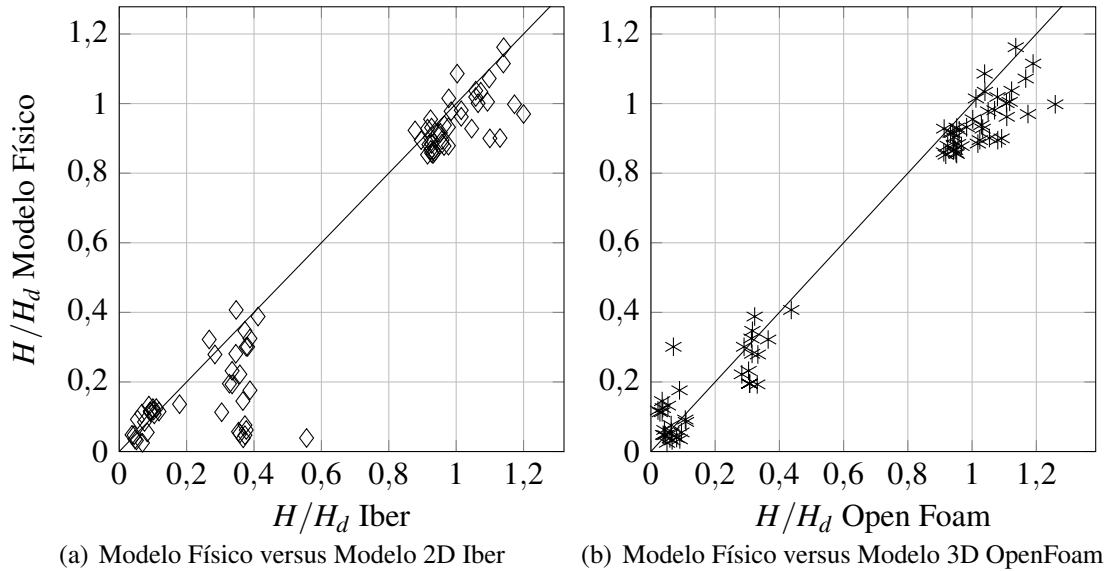


Figura 12: Gráfico comparativo entre los datos medidos y los simulados

7. CONCLUSIONES

A partir del estudio aplicado a un caso complejo de diseño de ingeniería, se evidencia el riguroso manejo que se requiere al aplicar las herramientas de modelación numérica, que son en algunos casos utilizadas sin el adecuado conocimiento de los supuestos y las leyes físicas que son base del modelo numérico, así como de los algoritmos de resolución numérica implementados. En la práctica, lo anterior se ve reflejado en la implementación de condiciones de borde e iniciales con alto grado de incertidumbre, ya que no representan el comportamiento hidráulico del sistema. Un buen ejemplo de lo planteado anteriormente, se refleja en el resultado obtenido con modelación en 1D, donde no es posible representar la variabilidad del eje hidráulico sobre el perfil del vertedero, y sin embargo, el valor obtenido del caudal captado por el vertedero es cercano al medido en el modelo físico, es decir, se obtiene un valor de diseño cercano pero sin representar la física del fenómeno. En general, para sistemas de obras hidráulicas complejas, tanto las formulaciones teóricas como la modelación en 1D se transforman en herramientas preliminares de diseño. Respecto de los modelos bidimensionales, su validez es adecuada dependiendo del tramo de estudio. En el tramo del canal Zanjón, logran reproducir el eje hidráulico y el caudal captado por el vertedero, generando resultados válidos que pueden ser utilizados para el dimensionamiento del canal. Sin embargo, en el tramo del canal Colector los resultados son inválidos, por cuanto las ecuaciones no son capaces de reproducir la física en la caída del flujo sobre el vertedero, (líneas de flujo curvas, implicando componente vertical de flujo y distribución de presiones no hidrostáticas). Esto genera una discontinuidad, donde las condiciones aguas arriba del canal Colector no permiten reproducir el comportamiento hidráulico en esta zona. Por lo anterior, estos modelos tienen una aplicación limitada en cuanto al diseño de elementos de disipación de energía en el caso estudiado. El modelo numérico 3D permite obtener valores de los parámetros de altura y velocidad que representan de manera más precisa los distintos regímenes de flujo en el caso estudio, generando información valiosa respecto de los aspectos de diseño de interés tanto en cuanto al dimensionamiento de las

obras de conducción y disipación de energía, como a la selección de materiales de construcción. En adelante, si bien se espera una mayor capacidad de cómputo de los ordenadores, que permitan refinar y acelerar los cálculos, la alta incertidumbre asociada a la definición del comportamiento hidráulico del sistema precisamente en los bordes del modelo y de la condición inicial, evidencian la necesidad de contar con una herramienta como la modelación física que permita validar los resultados obtenidos.

Referencias

- Balairón, L., López, D., Morán, R., Ramos, T., and Toledo, M. (2014). Avances en investigación aplicada mediante model física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas. *Ingeniería del agua*, 18(1):57.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., and Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1):1–10.
- Chen, Q., Dai, G., and Liu, H. (2002). Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):683–688.
- CYGSA (2004). *Diseño Definitivo Obras Hidráulicas Parque La Aguada, Informe Final, Tomo II-Diseño Definitivo*. CYGSA Chile S.A.
- De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali. *Lae Energia elettrica*, 11(11):849–860.
- DHI (2014). *Mike 21 and Mike 3 Flow Modelo FM Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation*.
- Dominguez, F. J. (1999). *Hidraulica*. Santiago, Chile., sexta edición edition. ISBN 956-11-0793-6.
- Mery, H. (2013). *Hidraulica aplicada al diseño de obras*. Santiago, Chile., ril editores edition.
- Ranga Raju, K. G., Gupta, S. K., and Prasad, B. (1979). Side weir in rectangular channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(5):547–554.
- Sabbagh-Yazdi, S., Zounemat-Kermani, M., and Mastorakis, N. E. (2007). Velocity profile over spillway by finite volume solution of slopping depth averaged flow. *WSEAS TRANSACTIONS ON APPLIED AND THEORETICAL MECHANICS*, 2(3):85.
- Savage, B. M. and Johnson, M. C. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(8):640–649.
- Tennekes, H. and Lumley, J. (1972). *A firts course in turbulence*.
- Warren, I. and Bach (1992). Mike 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7(4):229–240.