

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESSO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS 2D IBER Y HEC-RAS PARA
MODELACIÓN HIDRÁULICA FLUVIAL: CASO RÍO CAUTÍN, TEMUCO.**

PABLO FRAILE P.¹
PATRICIO CATALÁN²
MIGUEL LAGOS Z.³

RESUMEN

El estudio de áreas de inundación es fundamental para la gestión de amenazas y riesgos, favoreciendo la planificación territorial ante este tipo de eventos. Este tipo de fenómenos se estudia desde una componente hidrológica e hidráulica, permitiendo estimar superficies inundables para eventos de cierto período de retorno. En este estudio se presenta el modelamiento hidrodinámico bidimensional mediante los softwares, HEC-RAS e Iber, con el objetivo de identificar su aplicabilidad y limitaciones en proyectos de ingeniería civil. El estudio consistió en elaborar y analizar resultados de los modelos en cada programa con base en los antecedentes de diseño de las defensas fluviales de un tramo del río Cautín, región de la Araucanía, proporcionados por la Dirección de Obras Hidráulicas. que ha presentado grandes inundaciones frente a eventos de crecidas.

Con base en la revisión de estudios previos y documentación oficial de cada programa para una correcta elaboración de los modelos, se proponen escenarios con diferentes características en cuanto a caudal y presencia de estructuras que modifican el cauce con el fin de evaluar la sensibilidad de los modelos frente a condiciones hidráulicas variables, tratando de mantener las condiciones paramétricas entre modelos constantes. Cada uno de estos es modelado en los programas y posteriormente resuelto mediante las distintas configuraciones disponibles.

Los resultados son favorables en cuanto al desempeño de ambos modelos para resolver el caso estudiado. Esto se evidencia en la comparación de las áreas de inundación, donde las diferencias fluctúan entre un 1% y un 8%. No obstante, se identificaron zonas con discrepancias más notorias, como diferencias de profundidad del orden de los 25 cm, y velocidades que variaron entre 0,8 y 1,8 m/s, según la configuración empleada. Se recomienda un estudio de sensibilidad e idealmente, propender a evaluar más de un modelo para reducir la incertidumbre.

¹ Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María – email: pablo.fraile@gmail.com

² Profesor Titular, Universidad Técnica Federico Santa María – email: patricio.catalan@usm.cl

³ Profesor Asistente, Universidad Técnica Federico Santa María – email: miguel.lagos@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

La gestión territorial frente a la ocurrencia de eventos de inundación requiere la correcta estimación de las superficies afectadas frente a eventos de crecida. Para ello, el enfoque típico considera determinar alturas de escurrimiento, velocidades y áreas inundadas ante un evento hidrológico de cierto período de retorno. Este tipo de estimaciones típicamente se obtiene mediante la modelación hidráulica de crecidas en un tramo de río, donde se esté evaluando la amenaza, y proyectando escenarios para la protección de la ciudadanía e infraestructura crítica ante estos eventos.

En este trabajo se busca desarrollar diferentes modelos bidimensionales en los softwares HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 2021) e Iber (Bladé, et al., 2012), con el fin de determinar y entender las diferencias en su implementación y simulaciones hidráulicas ante distintos escenarios de crecida y presencia de puentes en un tramo de río. Para la implementación, se considera la facilidad de elaborar el modelo, ingreso de los datos, capacidades y limitaciones de cada software. Para la elaboración de los modelos se eligió un tramo del río Cautín, en Temuco, gracias a la información proporcionada por la Dirección de Obras Hidráulicas, correspondiente al estudio Diseño Construcción Defensas Fluviales Río Cautín Urbano (SIGA Ingeniería y Consultoría - DOH, 2016), para el diseño de las defensas fluviales en el área mencionada.

El objetivo del trabajo es un análisis ex post sin la intención de cuestionar el diseño, sino que entender como los resultados de los modelos lo habrían podido modificar, si fuera pertinente. La diferencia de los resultados se estudiará principalmente comparando los valores de las variables hidrodinámicas como cota de escurrimiento y su velocidad, además del alcance de las áreas de inundación en el caso de desbordes, considerando además la influencia de las cepas de un puente, en las variables estimadas.

La elaboración de los modelos no consideró una calibración con respecto a un evento en específico. Aunque sería ideal contar con información histórica de crecidas y cotas de inundación, en este estudio no se incluyó, ya que el propósito es analizar las diferencias entre modelos y no validar un caso concreto.

2. ZONA DE ESTUDIO

El río Cautín se ubica en la IX Región de la Araucanía. Nace en las cercanías del volcán Lonquimay y recorre aproximadamente 174 kilómetros hacia el oeste hasta desembocar en el río Imperial.

La cuenca del río contempla una superficie aproximada de 3.100 km². La Figura 1 presenta el área de estudio, que corresponde a la zona aledaña al río Cautín ubicada entre las ciudades de Temuco y Padre las Casas en el sector Isla Cautín. Este terreno abarca 150 hectáreas y el cauce presenta una longitud de 2,5 km, tramo localizado entre el Puente Viejo a Padre las Casas y el Puente Nuevo Ruta 5.

Debido a las características climáticas de la zona, el río puede alcanzar caudales elevados, y en múltiples ocasiones ha superado su lecho principal, extendiéndose hacia las terrazas adyacentes. Esta situación ha generado importantes inundaciones en sectores poblacionales ribereños (SIGA Ingeniería y Consultoría - DOH, 2016).

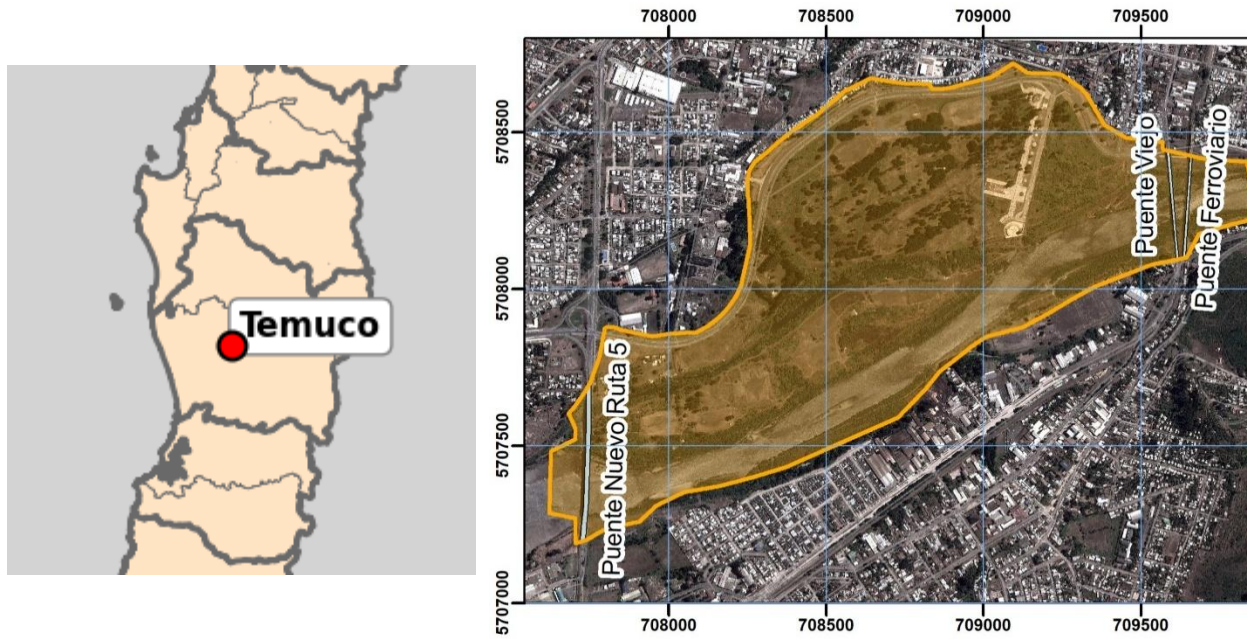


Figura 1. Ubicación área de estudio.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este estudio se basa en los datos obtenidos del proyecto Diseño Construcción Defensas Fluviales Río Cautín Urbano de Temuco y Padre las Casas (SIGA Ingeniería y Consultoría - DOH, 2016), ejecutado y presentado debido al acelerado crecimiento urbano y la necesidad de mitigar los riesgos asociados a las crecidas del río Cautín. Durante el desarrollo del proyecto mencionado, se realizó un levantamiento topográfico de la totalidad del sector mediante la toma de puntos con un GPS geodésico, además de 25 perfiles batimétricos del cauce, en un tramo de 2,4 km, entre el puente ferroviario y el puente de la ruta 5, los cuales son intercalados con los perfiles de la topografía del estudio del Tercer Puente sobre el río Cautín.

Se dispone de los estudios de crecidas realizados para la cuenca del río Cautín, con una superficie aproximada de 2.945 km². Para el cálculo de los caudales de crecidas se realiza una división en tres subcuencas, una principal que tiene como punto de control la estación fluviométrica Río Cautín en Cajón, y las subcuencas del estero Pumalal y Estero Truf-Truf. A partir de los antecedentes presentados se establece que las defensas fueron diseñadas considerando un caudal máximo de 2.630 (m³/s), no habiendo claridad con respecto al período de retorno considerado.

3.1 Fundamentos Teóricos y Numéricos

Para la modelación del flujo se utilizan los modelos bidimensionales HEC-RAS e Iber. Estos están basados en la solución de las ecuaciones de continuidad (1) y momentum (2) en su forma bidimensional.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V + f k \times V = -g \nabla H + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - c_f V + \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (2)$$

donde h es la profundidad del agua, u y v representan las componentes horizontales de velocidad, t el tiempo, q el flujo entrante o saliente por unidad de área, V es el vector velocidad, f es el parámetro de Coriolis, g la aceleración gravitacional, H la cota de la superficie del agua, v_t el coeficiente de viscosidad turbulenta, c_f el coeficiente de fricción de fondo, τ_s el esfuerzo de corte superficial y ρ la densidad del agua.

En los modelos realizados con HEC-RAS se utilizaron la aproximación *Diffusion Wave (DW)* y tres variantes de las *Shallow Water Equations (SWE)*, con el fin de evaluar su influencia en los resultados.

3.1.1. Modelo HEC-RAS

Para los modelos 2D, el software HEC-RAS emplea un esquema de solución basado en volúmenes finitos, permitiendo al usuario trabajar con mallas computacionales no estructuradas. Con respecto a la discretización numérica, la temporal se realiza mediante el método de diferencias finitas, mientras que para la ecuación de continuidad se aplica el método de volúmenes finitos. En el caso de la ecuación de momentum, el tipo de discretización varía según el término, aunque predomina el uso de diferencias finitas.

El programa ofrece 4 configuraciones diferentes para ejecutar un modelo 2D. Es importante destacar que todos estos métodos se resuelven de manera semi-implícita, lo que significa que algunos términos se tratan de forma implícita mientras que otros se resuelven explícitamente. Esta aproximación busca un equilibrio entre estabilidad numérica y eficiencia computacional. Las diferencias fundamentales entre las opciones radican principalmente en el tratamiento de los términos advectivos de la ecuación de momentum.

- a) **Aproximación Diffusion Wave (DW):** Es la configuración por defecto y más simple del módulo 2D del programa, que desprecia varios de los términos, conservando sólo fricción de fondo y presión, por lo tanto, se ejecuta de manera más rápida y estable.
- b) **SWE Inercia Local (SWE-LIA):** Esta configuración usa también una versión simplificada de la ecuación de momentum, incluye los términos de aceleración local, pero ignora los términos de advección, difusión y Coriolis. El gradiente de presión es trabajado de forma similar para todo el conjunto de SWE, diferenciándose de la aproximación de Diffusion Wave en que se regula la contribución de los términos implícitos y explícitos mediante la asignación de un peso.
- c) **SWE Euleriano-Lagrangiano (SWE-ELM):** Se caracteriza por utilizar el enfoque Lagrangiano para los términos de aceleración, siguiendo la trayectoria del término de velocidad. El uso de esta discretización reduce las restricciones de la condición de Courant y proporciona un método de resolución más robusto.
- d) **SWE Euleriano (SWE-EM):** Para este enfoque, la discretización del término de aceleración impone la conservación local de momentum para el volumen de control en una

celda. Los términos de presión barotrópica se tratan de manera similar que en la configuración SWE-ELM, con pequeñas diferencias para adaptarse a la discretización de los términos de aceleración propuesta por Kramer y Stelling (2008).

3.1.2. Modelo Iber

En los modelos desarrollados con Iber se aplicaron esquemas de solución entre primer y segundo orden, con el objetivo de analizar su efecto en la precisión de los resultados. La diferencia entre estas opciones se refiere a la precisión con la que se aproximan las derivadas (Bladé, et al., 2012).

- a) **Primer Orden:** Un esquema de primer orden se caracteriza por su simplicidad y estabilidad numérica, sin embargo, tienden a introducir un elevado grado de difusión numérica al añadir un término proporcional al tamaño de los elementos de la malla. Es por esto que se recomienda utilizar mallas finas para reducir este error o recurrir a un esquema de orden superior.
- b) **Segundo Orden:** Un esquema de segundo orden considera también la segunda derivada de la función, por lo que proporciona una mejor precisión que un esquema de primer orden. Este procedimiento es más complejo y computacionalmente costoso. La recomendación propuesta en el manual indica que en los casos en que existen zonas de recirculación o variaciones de velocidad significativas, no se aconseja utilizar el esquema de primer orden, ya que proporciona campos de velocidad excesivamente difusos.

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de conservación de masa y las ecuaciones de momentum en ambas direcciones horizontales. La solución se obtiene mediante el esquema Upwind de Roe (1980), un método explícito que utiliza la información de las celdas vecinas para calcular los resultados. Este esquema puede implementarse con precisión de primer o segundo orden.

Cabe destacar que ninguno de los modelos incorporó un modelo de turbulencia explícito.

3.2 Parámetros Generales

El procedimiento de solución implica resolver las ecuaciones mencionadas para cada elemento de una malla de cálculo definidas. En el caso de HEC-RAS se utilizan mallas de 76.826 celdas orientadas según zonas de refinamiento y líneas de quiebre. Para el modelo Iber se utilizó un mallado compuesto de 71.794 elementos, manteniendo la misma distribución espacial de zonas con mayor o menor densidad.

Las condiciones de borde externas se ubican en los límites del dominio donde el agua fluye hacia dentro o fuera de éste. En este estudio no se consideran elementos internos que representen una fuentes o sumideros internos del flujo. Para todos los casos se ingresa un hidrograma de entrada de constante con el objetivo de modelar un flujo permanente. En el extremo de salida, se asigna una altura conocida como condición de borde, estimada mediante pendiente de energía en HEC-RAS,

siempre teniendo como criterio ubicar esta condición a una distancia suficientemente lejana a la zona de estudio donde se puede esperar el desarrollo del flujo normal.

La determinación los valores de rugosidad de Manning se realiza mediante el método de Cowan (3), detallado en *Hidráulica de canales abiertos*, (Chow, 1994). Este método determina el valor del coeficiente de rugosidad a partir de la siguiente expresión:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * n_5 \quad (3)$$

Corresponde mencionar que varios de los coeficientes de esta metodología tienen como finalidad incluir efectos de la morfología y características del terreno que un modelo 1D no es capaz de incluir de otra manera (Liu et al., 2024), por lo que no deben ser considerados en el caso bidimensional. Los valores de n adoptados corresponden a 0,033 para el cauce principal, 0,048 para riberas, 0,038 en las planicies de inundación y 0,03 en sectores puntuales de tierra.

Para el caso de Iber se utiliza el valor de Courant por defecto de 0,45, que ha demostrado desarrollar los cálculos de manera estable consistentemente (Bladé, et al., 2012). En el caso de HEC-RAS se selecciona la opción de paso de tiempo variable, que monitoriza los números de Courant para corregirlos dentro del rango especificado para satisfacer la condición y ejecutar la simulación de manera estable. Para esto se establece un valor mínimo de 0,45 y máximo de 1.

Se consideraron además, las siguientes configuraciones respecto del dominio:

- **Situación Actual:** Corresponde al modelo del terreno sin intervenir para una crecida mayor, sin considerar la presencia de los puentes por simplicidad. El caudal de entrada corresponde a $2.630 \text{ m}^3/\text{s}$.
- **Defensas Fluviales:** Representa la solución planteada para el diseño de defensas fluviales. Estas se modelan como una pared vertical que contiene el cauce, por lo que no se genera inundación, pero se deben observar los cambios en otras variables para definir si es una opción viable.
- **Caudal medio con presencia de cepas:** Para este caso se integran las cepas de los puentes como elementos en la malla o terreno, permitiendo estudiar su efecto en el flujo. Se obtiene información de caudales medios diarios de la estación Río Cautín en Cajón, de la que se obtiene un promedio de estos valores para el mes de Julio del año 2022, que corresponde a caudales particularmente altos con respecto a meses y años anteriores, alcanzando un valor de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es importante señalar que se utilizó un caudal de entrada constante y se evaluaron los resultados en un tiempo que permite el desarrollo de flujo permanente.

3.3 Criterios de diseño

Este trabajo consideró los criterios de diseño de defensas fluviales del Manual de Carreteras, Volumen N°3 (Dirección de Vialidad, 2021). En este estudio no se presenta el desarrollo de este análisis, pero se destacan como parámetros clave la velocidad media, altura del flujo en riberas y la extensión de la superficie de inundación.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan un conjunto de resultados que ilustran las principales diferencias obtenidas entre los modelos HEC-RAS e Iber realizados en este estudio. Para esto se seleccionaron distintos puntos de interés, correspondientes a dos perfiles transversales representativos y el sector en que se ubican los puentes, debido a que estos permiten identificar las variaciones significativas en los parámetros hidráulicos simulados.

La Figura 2 muestra la ubicación de las zonas seleccionadas para la presentación de los resultados.

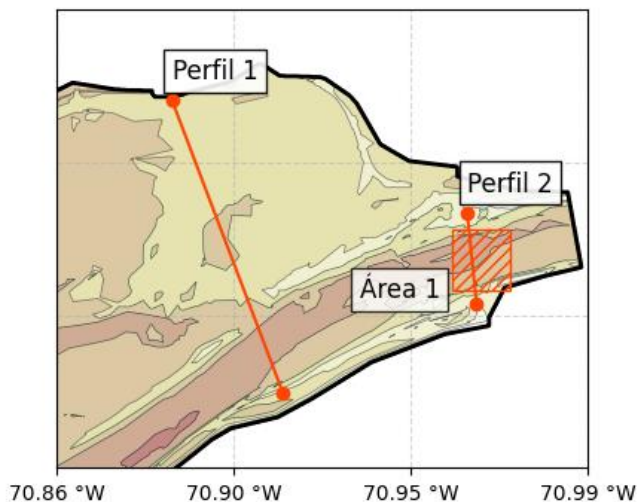


Figura 2 – Ubicación de perfiles transversales y áreas representativas

4.1 Resultados Hidráulicos en Perfiles Transversales

La Figura 3 presenta las alturas de escurrimiento simuladas en el escenario Situación Actual, para el perfil transversal 1. Las diferencias en cota son más evidentes en la ribera izquierda del río, entre los modelos DW y LIA (HEC-RAS) y el resto de las simulaciones.

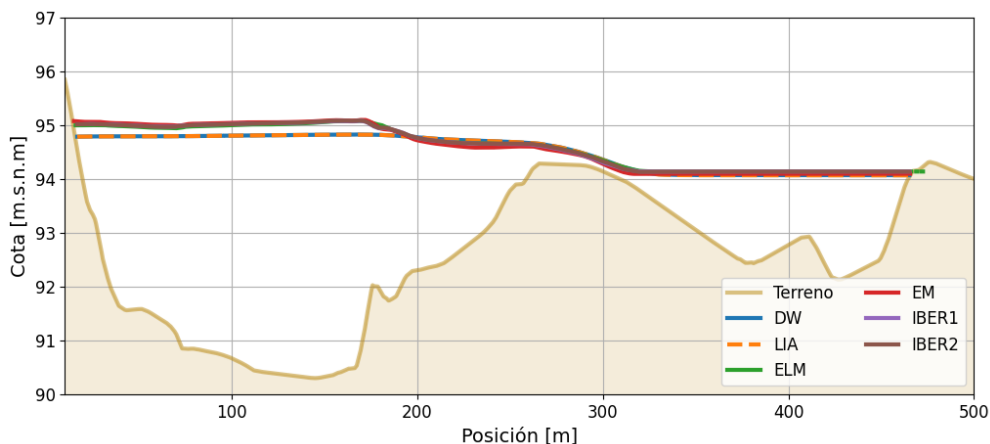


Figura 3 – Resultados altura de la superficie del agua - Perfil Transversal 1

La Tabla 1 muestra los diferentes valores de profundidad según ecuación seleccionada y posición a lo largo del perfil transversal. Se puede notar que las diferencias entre los distintos métodos no son mayores a los 30 cm, valor muy pequeño al considerar una revancha que usualmente adopta un valor de 1 m o como mínimo 50 cm. El criterio anterior sugiere que las diferencias en los resultados no son significativas para el diseño, ya que son mitigadas por los criterios de seguridad.

Tabla 1 – Resumen de profundidades - Perfil Transversal 1

Ecuación	Profundidad [m]			
	Ramal Sur	Ramal Norte	Máximo	Promedio
DW	4,46	1,69	4,54	2,09
LIA	4,46	1,69	4,54	2,09
ELM	4,67	1,76	4,78	2,12
EM	4,70	1,72	4,80	2,24
Iber 1	4,65	1,57	4,76	2,67
Iber 2	4,66	1,56	4,76	2,67

Los resultados presentan gran similitud en cuanto a su valor y en la tendencia de su variación a lo largo del perfil. Las ecuaciones DW y LIA presentan una diferencia numérica considerable con el resto de las ecuaciones y una menor variación entre las alturas máxima y mínima de la profundidad. Cabe destacar que las diferencias entre los resultados de estas dos aproximaciones son prácticamente despreciables, lo que se explica debido a que se analiza un flujo permanente, es decir, en condiciones donde el término de aceleración local se anula. Esta observación se mantiene consistente en todos los escenarios analizados.

La Figura 4 muestra el perfil de velocidades correspondiente a la ribera sur de la sección transversal de la Figura 3. Se observa que los puntos que presentan cambios significativos coinciden con aquellos asociados a variaciones en la altura presentados previamente. Las ecuaciones DW y LIA presentan una caída abrupta en el punto donde se produce el cambio en el lecho, mientras que el resto muestra un descenso gradual en esa zona. Las mayores variaciones en los resultados se dan por las ecuaciones DW y SWE-LIA, precisamente en las secciones mencionadas, alcanzando diferencias de 1,22 m/s.

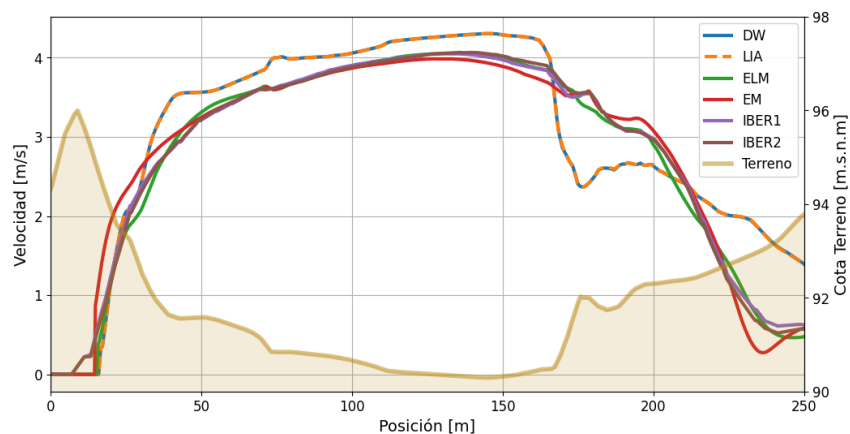


Figura 4 – Resultados distribución de velocidades - Perfil Transversal 1

4.2 Superficie de Inundación

Para verificar que las obras de defensa cumplen con su objetivo, una herramienta útil es la comparación de los mapas de inundación generados para conocer la extensión que alcanza un potencial desborde del río. La Figura 5 presenta las alturas de escurrimiento simuladas por HEC-RAS SWE-EM, en una situación actual, y ante la presencia de defensas fluviales.

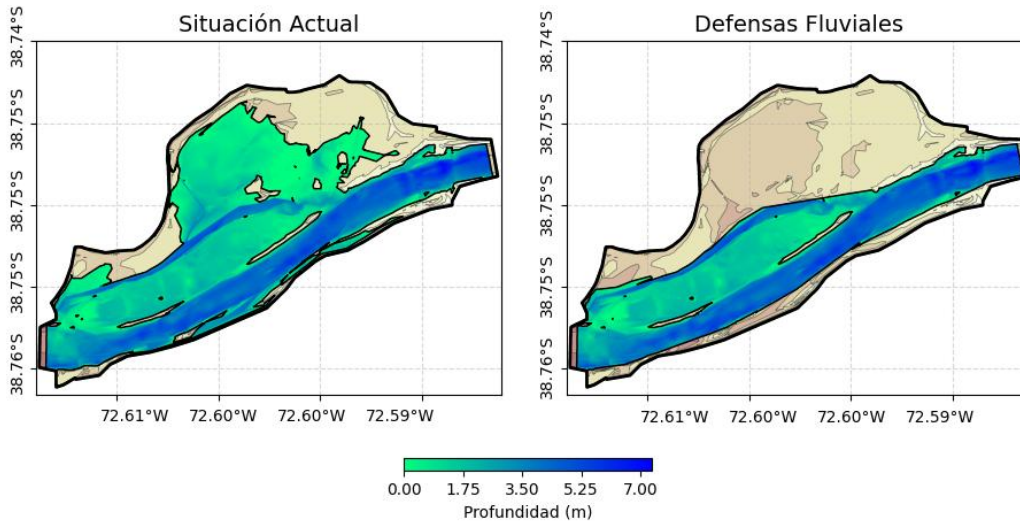


Figura 5 - Comparación de Profundidad para ecuación SWE-EM

La Tabla 2 presenta el valor de la superficie de inundación calculado para cada ecuación, comparando *Situación Actual* con *Defensas Fluviales*.

Tabla 2 – Resumen superficie de inundación

Ecuación	Superficie de Inundación (Ha)		
	Situación Actual	Defensas Fluviales	Diferencia (%)
DW	103,82	68,74	34%
LIA	103,83	68,74	34%
ELM	110,85	69,59	37%
EM	107,84	69,41	36%
Iber1	111,14	69,99	37%
Iber2	110,66	69,93	37%

4.3 Flujo a través de cepas

Para caracterizar las capacidades de modelar el flujo a través de las cepas de puentes, se presenta la vista en planta que abarca la zona de los puentes Ferroviario y Puente Viejo. En esta sección se comparan los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones de HEC-RAS y los esquemas de Iber. A partir de la Figura 6 se logra apreciar la distribución de velocidades en esta área,

evidenciando la aceleración del flujo al encontrarse con la reducción de área que genera la cepa del Puente Ferroviario, seguida de una zona de baja velocidad aguas abajo.

Para este caso, la elección del método de solución tiene un impacto directo en la capacidad del modelo para capturar estos procesos complejos. La presencia de las cepas genera una contracción de las líneas de corriente aguas arriba de la estructura, seguida de una expansión aguas abajo. Durante la contracción, el flujo acelera debido a la reducción del área de paso, concentrando las líneas de corriente y aumentando localmente la velocidad y los esfuerzos de corte. Posteriormente, al expandirse el flujo después de la obstrucción, se generan zonas de recirculación y separación caracterizadas por velocidades significativamente menores. Estos procesos son altamente dependientes de los efectos advectivos, ya que involucran el transporte de momentum en direcciones que no coinciden necesariamente con el flujo principal. Las configuraciones que ignoran o simplifican los términos advectivos (como DW y SWE-LIA) no pueden representar adecuadamente estos fenómenos, resultando en una subestimación de las zonas de recirculación y una distribución de velocidades menos realista en las proximidades de las estructuras.

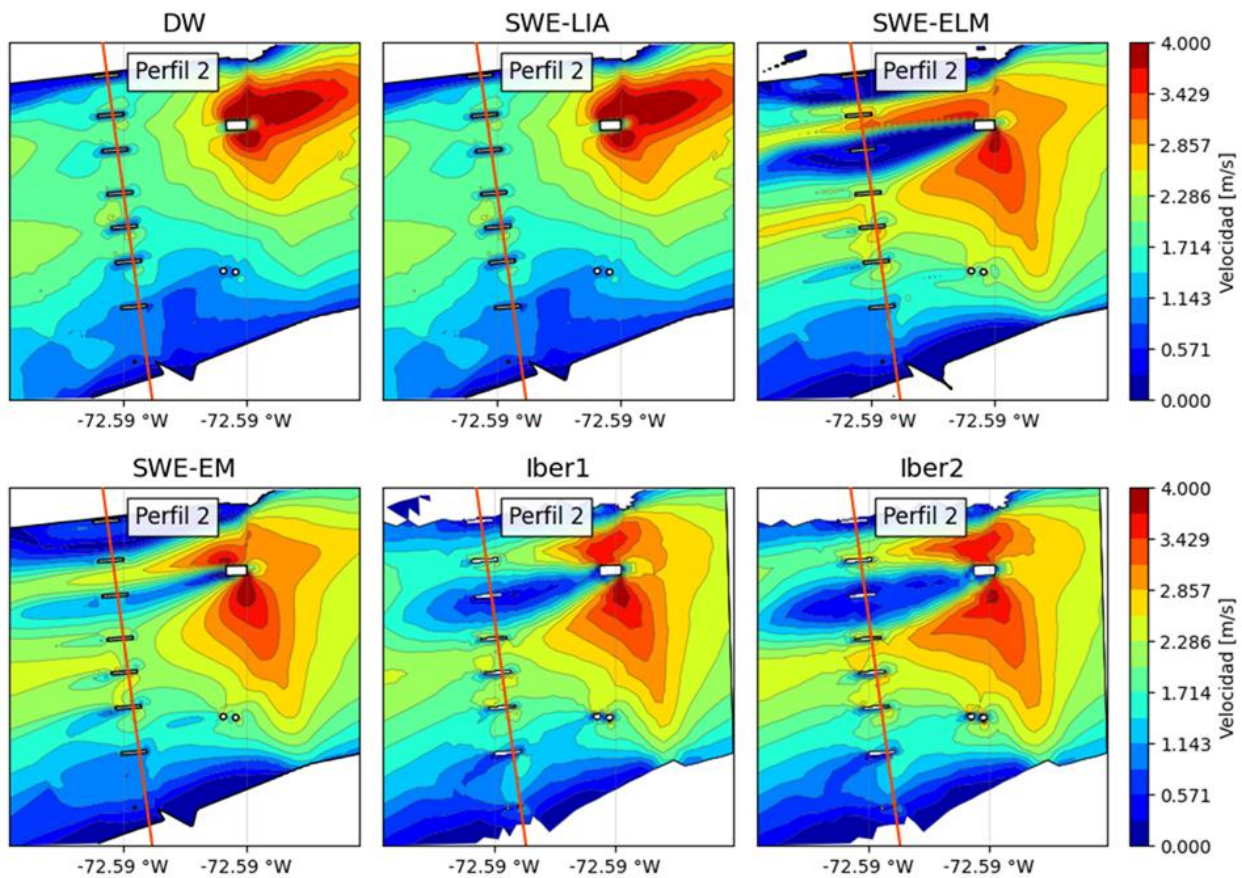


Figura 6 – Planta distribución de velocidades – Área 1

Los esquemas de Iber de primer y segundo orden muestran resultados consistentes con las configuraciones completas de HEC-RAS, aunque el esquema de segundo orden presenta una mejor resolución de los gradientes de velocidad en las zonas de transición. Esta concordancia entre los

resultados refuerza la importancia de considerar los términos advectivos completos para una representación adecuada del comportamiento hidráulico alrededor de estructuras.

La diferencia más notoria corresponde al área de influencia que tiene esta cepa sobre el flujo aguas abajo. En el caso de los métodos DW y LIA no se observa efecto aguas abajo, mientras que para los modelos ELM, Iber 1 e Iber 2 se genera un área de recirculación amplia y extensa, con velocidades notablemente bajas, en contraste con EM, donde esta área es considerablemente menor. Lo anterior se puede atribuir a la difusión numérica implícita que suaviza los gradientes de velocidad. Esto resulta en una capa de transición más amplia entre el flujo principal y la zona de recirculación. Por su parte, el método Euleriano EM mantiene una conservación más estricta del momentum en cada celda, generando gradientes de velocidad más pronunciados y, por lo tanto, una zona de recirculación más delgada y definida.

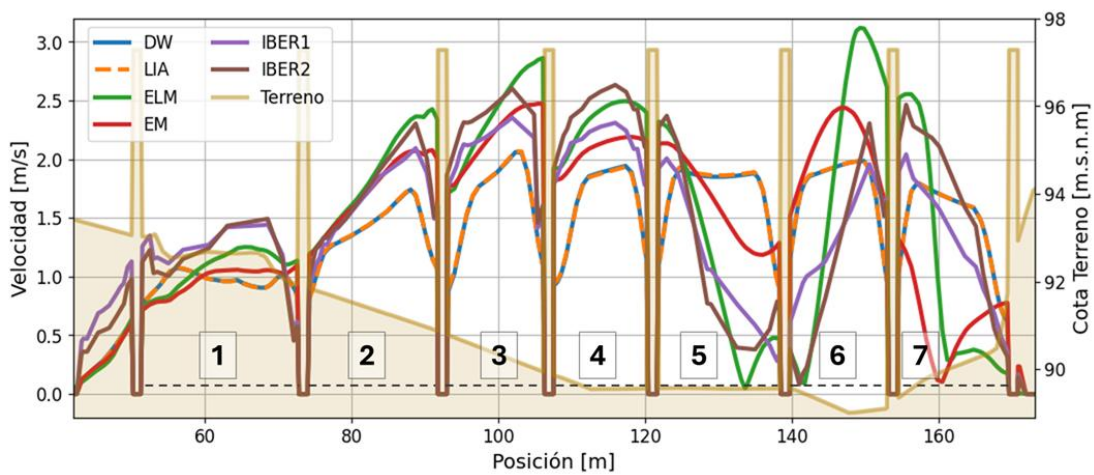


Figura 7 - Resultados distribución de velocidades – Perfil Transversal 2

La Figura 7 permite apreciar que las diferencias de velocidades entre los métodos completos (ELM, EM, Iber1 e Iber2) se mantienen alrededor del 15% para los tramos donde el flujo no es influenciado directamente por la obstrucción aguas arriba. Sin embargo, para las zonas que si reflejan este efecto (tramos 5 y 6), las variaciones aumentan significativamente. La Tabla 3 presenta un resumen de las velocidades calculadas por cada método en el perfil transversal analizado.

Tabla 3 – Velocidades por tramos – Perfil Transversal 2

Tramo	Velocidad máxima [m/s]						Tramo	Velocidad mínima [m/s]					
	DW	LIA	ELM	EM	Iber1	Iber2		DW	LIA	ELM	EM	Iber1	Iber2
1	1,07	1,08	1,25	1,09	1,45	1,49	1	0,77	0,77	0,74	0,71	0,53	0,45
2	1,74	1,75	2,43	2,08	2,09	2,3	2	0,46	0,46	1,01	0,87	0,93	1
3	2,06	2,07	2,86	2,47	2,36	2,6	3	0,06	0,06	0,11	0,11	1,41	1,46
4	1,94	1,93	2,5	2,19	2,31	2,63	4	0,92	0,94	1,92	1,83	1,78	1,92
5	1,91	1,93	2,32	2,14	2,01	2,37	5	0,91	0,89	0,05	1,19	0,28	0,38
6	1,99	1,99	3,12	2,44	1,96	2,31	6	0,96	0,96	0,09	1,52	0,61	0,08
7	1,79	1,79	2,55	1,31	2,04	2,46	7	0,62	0,62	0,18	0,1	0,37	0,32

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La comparación de los resultados de este estudio ha demostrado la capacidad de los modelos computacionales para simular dinámicas fluviales. A partir del contraste entre diferentes modelos y ecuaciones, se puede validar que, si bien existen variaciones en los resultados, los modelos son efectivos y consistentes para representar el comportamiento hidráulico estudiado, particularmente en términos de altura de escurrimiento. Las tendencias generales son claras y las diferencias se mantienen mayormente dentro de un rango razonable, lo que sugiere que estas discrepancias pueden manejarse mediante la aplicación de márgenes de seguridad en el diseño de defensas fluviales. Los resultados obtenidos sugieren que HEC-RAS e Iber siguen principios físicos y numéricos alineados, ya que al reproducir correctamente las características del caso estudiado, los resultados convergen, lo que a priori es el resultado deseado.

La inclusión completa de los términos advectivos en las configuraciones avanzadas de ambos programas es fundamental para capturar fenómenos como recirculaciones, separación de flujo y transporte de momentum, aspectos críticos al modelar el comportamiento hidráulico alrededor de estructuras como las ceapas de puentes.

Por otro lado, los métodos simplificados (DW y SWE-LIA) tienen un alto valor a la hora de desarrollar un modelo, ya que en tramos de río relativamente rectos y con cambios graduales en la geometría este enfoque entrega resultados aceptables. Gran parte de esta etapa corresponde a la prueba de diferentes configuraciones, por lo que no resulta eficiente ejecutar un modelo con gran exigencia computacional, el cual además tiene altas probabilidades de presentar inestabilidades y fallar antes de completar la simulación. En este sentido, los métodos simplificados cumplen un rol clave como etapa de transición hacia un modelo más completo y detallado.

Las mayores diferencias en los resultados de los modelos hidráulicos no se deben tanto a la elección de la ecuación o esquema de solución, sino que a la calidad de los datos de entrada. Este efecto se observó claramente durante la elaboración de los modelos, probando diferentes mallas y distribución espacial de los coeficientes de rugosidad. Si bien los resultados específicos no se presentan debido a las limitaciones de extensión del documento, el análisis realizado permitió constatar el impacto de las decisiones del ingeniero al momento de elaborar modelos hidráulicos. La elección del método adecuado dependerá de cada caso, por lo que el modelador debe tener claridad respecto a los parámetros y nivel de detalle que desea obtener.

AGRADECIMIENTOS

Dirección de Obras Hidráulicas por proporcionar los antecedentes necesarios para desarrollar este trabajo.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., . . . Coll, A. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- Dirección de Vialidad. (2021). *Manual de Carreteras Volumen N°3 Instrucciones y Crirterios de Diseño*. Santiago.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). *Cuenca del Río Imperial. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad*. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas. (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin control Fluviométrico*. Santiago.
- GrupoEFE - DOH. (2020). *Construcción Puente Ferroviario Cautín*. Temuco.
- Jaramillo Acuña, V. M. (2013). Estudio de Socavación en el Tercer Puente sobre el Río Cautín en Temuco.
- Liu, X., Mahdavi Mazdeh, A., Zevenbergen, L. W., & Kramer, C. M. (2024). Selection and Application of Manning's Roughness Values in Two-Dimensional Hydraulic Models.
- Manual de Referencia Hidráulico Iber V1.0. (2014).
- Néelz, S., & Pender, G. (2010). Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages.
- Rincón, J., Pérez, M., Delfin, G., Freitez, C., & Martínez, F. (2017). Análisis Comparativo Entre los Modelos HEC-RAS e Iber en la Evaluación Hidráulica de Puentes.
- Robinson, D., Zundel, A., Kramer, C., Nelson, R., deRosset, W., Hunt, J., . . . Lai, Y. (2019). *Two-Dimensional Hydraulic Modeling for Highways in the River Environment: Reference Document*. Federal Highway Administration (U.S.).
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., . . . & Aragón-Hernández, J. L. (2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. Scipedia. Retrieved from URL https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b
- SIGA Ingeniería y Consultoría - DOH. (2016). *Diseño Construcción Defensas Fluviales Río Cautín Ubrano*. Temuco - Padre las Casas.
- US Army Corps of Engineers. (2021). HEC-RAS 6.0 2D Hydraulic Reference Manual.