

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO AYSÉN
MEDIANTE EL MODELO MIKE 21**

**KARLA GONZÁLEZ N.¹
LUIS ZAMORANO R.²**

RESUMEN

En este artículo se presenta parte del Estudio de Prefactibilidad Conservación Vías de Navegación Río Aysén y Aguas Muertas, encargado por la Dirección de Obras Portuarias a la empresa GHD, y se centra en la caracterización hidrodinámica del sector de la desembocadura del Río Aysén. Los procesos hidrodinámicos en estudio son complejos en el Río Aysén debido a que presenta sectores con un alto nivel de embancamiento por la acumulación histórica de sedimentos, lo cual dificulta la navegación de las embarcaciones. Debido a la importancia de la zona por el tránsito de las embarcaciones desde y hacia el Río Aysén se requirió desarrollar los estudios de prefactibilidad técnica que permitan establecer las potenciales alternativas de solución y sus costos asociados. Mediante el uso del modelo hidrodinámico bidimensional MIKE 21 se estudiaron las condiciones actuales del cauce y el efecto de incorporar mejoramientos en la zona de la desembocadura del río Aysén. La metodología utilizada en el estudio considera como una de las etapas más relevantes la de calibración del modelo hidrodinámico, que se elaboró en base a las mediciones de campo de caudal, niveles de agua y velocidad del escurrimiento. En el artículo se dan a conocer las ecuaciones básicas utilizadas por el modelo, las opciones de modelación consideradas y algunos de los resultados más relevantes para fines del estudio.

¹Ing. Civil Hidráulico, Ingeniero de Proyecto de GHD - mail: karla.gonzález@ghd.cl

²Ing. Civil Hidráulico, Ingeniero de Proyecto de GHD - mail: luis.zamorano@ghd.cl

1. INTRODUCCIÓN

El Río Aysén se encuentra ubicado en la XI región de Chile, el que desagua sus aguas al Océano Pacífico, a 6 km al Oeste de la ciudad de Puerto Aysén, provincia de Aysén. La zona de estudio de aproximadamente 13 km, esta comprendida desde su desembocadura hasta el puente Ibañez, tal como se aprecia en la figura 1. Posee un clima frío oceánico de bajas temperaturas, con abundantes precipitaciones (2.000 a 3.000 mm anuales), fuertes vientos y mucha humedad.

En la actualidad el río presenta un continuo problema de embancamiento, lo que ha limitado su navegabilidad en el tiempo a solo pequeñas embarcaciones, contrastando con su pasado donde Puerto Aysén fue la vía más importante de entrada marítima a la región, en los comienzos y mediados de siglo pasado.



Figura 1: Vista Desembocadura Río Aysén desde Puente Ibañez

El río Aysén se forma de la unión, 20 km aguas arriba de Aysén, del río Mañihuales, que es el afluente que desagua la porción norte de la hoya, y del río Simpson, que drena la porción sur. Otro afluente de importancia es el río Blanco, que descarga una cadena de varios lagos en la ribera sur del río a 7 km de Puerto Aysén. Otro tributario de considerable magnitud es el río Los Palos que viene desde el norte y confluye al Río Aysén aguas abajo de la ciudad de Puerto Aysén.

Las crecidas más intensas del Río Aysén se producen entre marzo y diciembre, lo que indica un régimen mixto.

Una vez reconocida la complejidad hidrodinámica del área, se ve con claridad que el problema debe ser abordado con una metodología que considere un modelamiento que, junto con simplificar la física, retenga los aspectos esenciales de los procesos actuantes en la zona. Ante la necesidad de un tratamiento avanzado, se optó por una modelación numérica bidimensional en la desembocadura, principalmente por la gran flexibilidad que ésta ofrece, en cuanto a probar escenarios muy diferentes, produciendo buenas aproximaciones de la realidad, en tiempos y costos razonables.

2. METODOLOGÍA

Se realizaron un conjunto de modelaciones numéricas de la hidrodinámica del río Aysén a lo largo de los trece kilómetros de interés, es decir, desde el puente Ibañez hasta la desembocadura, con el objeto de conocer el comportamiento hidráulico en la situación actual. Para abordar este estudio se dividió la extensión en dos zonas:

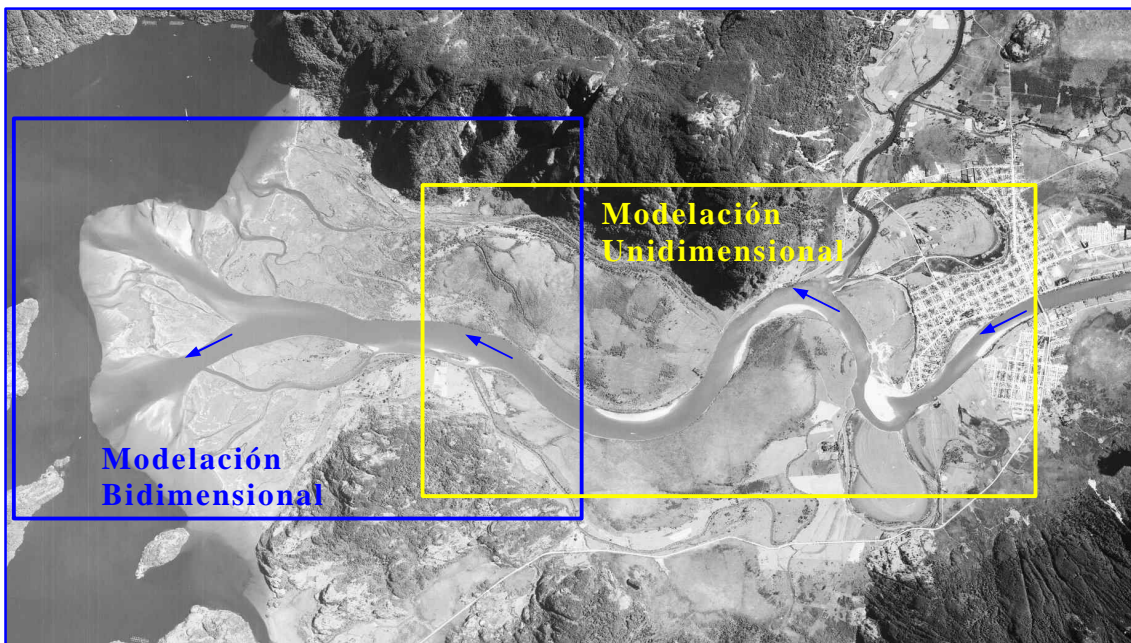


Figura 2: Zona de Modelación

La primera zona o zona uno, indicada en cuadro amarillo, abarcó desde el puente Ibañez hasta una extensión aproximada de 9 km hacia aguas abajo. En esta zona se estudió la hidrodinámica del Río Aysén con un modelo numérico de tipo unidimensional, que consideró estados impermanentes, y la incorporación de la influencia mareal, propia de los estuarios. Se utilizó para esto, el modelo matemático unidimensional MIKE11 desarrollado por el DHI.

La segunda zona o zona dos, señalada en cuadro azul, abarcó el tramo correspondiente a los últimos 7 km del río Aysén hasta la desembocadura. Para estudiar la hidrodinámica de esta zona se utilizó el modelo bidimensional MIKE21, desarrollado por el DHI, con su módulo hidrodinámico HD, el cual permite reproducir las complejas características hidrodinámicas de la desembocadura y la interacción fluvio-marítima.

Cabe señalar que el mandante del estudio solicitó que se aplicaran dos tipos de modelos numéricos del tipo unidimensional en la zona uno y bidimensional en la zona dos.

En ambas modelaciones, unidimensional y bidimensional, el dominio físico fue tal que se logró vincular adecuadamente ambas modelaciones, de modo de estudiar la zona con una visión integral desde el punto de vista de la hidrodinámica y del transporte de sedimentos.

Por esta razón se mantuvo un área común para ambos modelos de aproximadamente 2 km, que además permitió incorporar las condiciones en la frontera del modelo unidimensional MIKE11, desde el modelo bidimensional MIKE21, en un sector alejado de la frontera de este último.

Para cuantificar los efectos del oleaje en la zona marítima del área del estudio, se utilizó el modelo EMS de MIKE 21, con el cual se estudiaron las características del oleaje local a través de los resultados de la propagación del oleaje modelado con esta herramienta. Dichas condiciones del oleaje local resultaron poco relevantes respecto de las condiciones mareales imperantes en el sector de la desembocadura, por lo cual no se incorporaron tales solicitudes en el modelo hidrodinámico aplicado a los últimos kilómetros del río hasta la desembocadura.

El presente trabajo se ha focalizado en la modelación bidimensional de la zona de la desembocadura, que se llevo a cabo con el módulo HD o Flow Model de MIKE 21, de 7 km de extensión donde el río presenta un ancho aproximado de 250 m. En este sector el río presenta una bifurcación, con dos cauces, uno de los cuales es actualmente utilizado para la navegación, mientras que el brazo norte presenta condiciones muy desfavorables que lo inutilizan para estos fines, que por lo mismo ha sido denominado “salida falsa”.

2.1 Información Base

La información base para la implementación del modelo bidimensional incluyó los siguientes antecedentes: batimetría, granulometría, escenarios hidrológicos, condiciones de marea y corrientes inducidas por oleaje que en este caso no fueron de relevancia frente a otros aspectos.

A partir del trabajo topográfico y batimétrico, complementada con información de la carta IGM N°4515-7240, la carta del SHOA n° 8612 del 2002 y una aerofotogrametría de Aysén, se realizó un modelo tridimensional del terreno usando triangulación de puntos, mediante la ayuda del software Land Desktop. Este modelo de terreno tridimensional fue la base para la generación de la batimetría utilizada por MIKE21. Dicho modelo fue generado en base a una grilla de puntos cada 5 metros, en las zonas de interés- zona del río y alrededores- y cada 20 metros, zona de inundación y cerros locales.

El eje vertical de la batimetría se orientó con una diferencia de $2,50^\circ$ en el sentido del reloj, según la grilla UTM, Datum WGS-84, de modo que la condición de borde de entrada del flujo fuese perpendicular al sentido vertical de la grilla. El origen de la batimetría se fijó en el punto con coordenadas UTM E:669.310 y N:4.966.570, y el espaciamiento de la grilla en el eje X e Y fue de 5 m, con lo cual se generó una grilla de 1400 x 850 celdas (7 x 4,5 km).

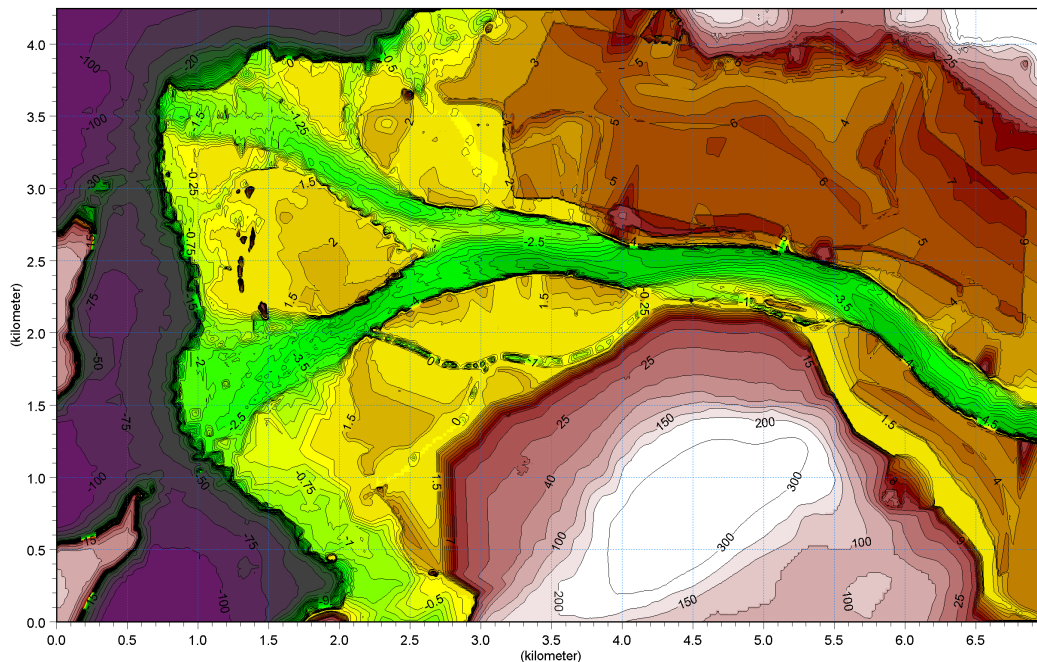


Figura 3: Grilla de Modelación

En cuanto a las características granulométricas, se utilizaron las muestras de sedimentos recogidas en terreno, para luego con la formulación de Cowan estimar el Coeficiente de Rugosidad de Manning, en el cauce principal como en las planicies de inundación.

Se revisaron 2 estudios hidrológicos y se desarrolló uno adicional más actualizado, con lo cual se llegó a los siguientes valores para las crecidas de 2, 5, 10, 50 y 100 años de período de retorno 2.800, 3.900, 4.600, 6.200 y 6.900 m^3/s .

Respecto a las condiciones mareales se estimó que los niveles principales de pleamar, bajamar y nivel medio del mar fueron 2,3, 0,45 y 1,35 m NRS, basados en los estudios previos del INH y antecedentes del SHOA de tablas de marea del sector.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

El trabajo de la modelación fluvial con el modelo numérico bidimensional MIKE 21 constó de las siguientes etapas: elaboración grilla de modelación, definición de condiciones de borde, calibración y verificación, diagnóstico situación actual y modelación alternativas mejoramiento

Las ecuaciones utilizadas por el módulo hidrodinámico (HD), de MIKE21 Flow Model para describir el flujo y las variaciones de nivel, son las ecuaciones de masa y momentum (Ecuaciones de Reynolds), para el flujo medio, verticalmente integradas y temporalmente promediadas a escala de la turbulencia. Por lo tanto, sólo es posible estudiar áreas caracterizadas por patrones de corrientes esencialmente horizontales, para las cuales el supuesto de una estructura vertical de forma constante sea aceptable.

Para el modelamiento de la turbulencia se utiliza la hipótesis de Boussinesq para la viscosidad de remolino, la que es tratada mediante un submodelo de tipo algebraico, permitiendo el uso de una viscosidad constante o bien él de una viscosidad dependiente de los gradientes del campo de velocidades de corriente.

En resumen, el principal propósito del módulo hidrodinámico HD, que se presenta a continuación, es resolver las ecuaciones de continuidad y momentum para el flujo medio (Mei, 1983). Estas quedan expresadas por:

Continuidad:

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum en dirección x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{r_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h t_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h t_{xy}) \right] - \Omega q - f(V) v_x + \frac{h}{r_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Momentum en dirección y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial x}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{r_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h t_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h t_{xy}) \right] + \Omega p - f(V) v_y + \frac{h}{r_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

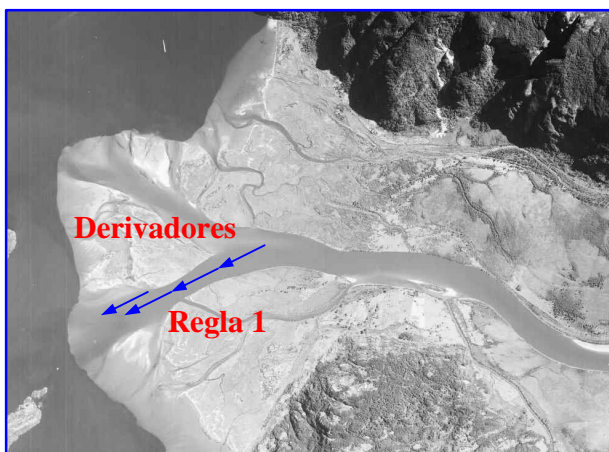
Donde $h(x,y,t)$ es la profundidad del agua (m), $\mathbf{x}(x,y,t)$ es la elevación de la superficie (m), $p,q(x,y,z)$ la densidad del flujo en las direcciones x e y ($m^3/s/m$), (u,v) la velocidad promedio en las direcciones x e y, $C(x,y)$ el coeficiente de Chezy de resistencia ($m^{1/2}/s$), g la aceleración de gravedad (m/s^2), $f(V)$ el factor de fricción de viento, $V, V_x, V_y(x,y)$ son las velocidades del viento y componentes en direcciones x e y, $W(x,y)$ es el parámetro de Coriolis, $p_a(x,y,t)$ presión atmosférica ($kg/m/s^2$), ρ_w la densidad del agua (kg/m^3), x, y son las coordenadas espaciales (m), t el tiempo y t_{xx}, t_{xy}, t_{yy} son los componentes de tensiones de corte efectivas

El módulo HD hace uso del método implícito de las direcciones alternantes (ADI), técnica que integra las ecuaciones de masa y conservación de momentum en el dominio del espacio-tiempo. Las ecuaciones matriciales que resultan para cada dirección y cada línea de la malla son resueltas por un algoritmo de doble barrido. La información requerida por HD en cada celda de la malla es: batimetría (con criterios de mojado / secado de áreas), resistencia del fondo.

Adicionalmente, para especificar la condición frontera se puede escoger, para cada tramo, entre las siguientes combinaciones: especificar niveles de agua y direcciones de flujo, o especificar flujo total (descarga) y direcciones de flujo

3.1 Calibración

Para la calibración se utilizaron mediciones del nivel de agua que se realizaron en 3 tramos del río Aysén, uno de los cuales estuvo ubicado cerca de la desembocadura. Simultáneamente se realizaron aforos del río en condición de vaciante de la marea. Además se realizaron mediciones de velocidad a través del lance de derivadores. Con esto se logró calibrar el modelo, de manera de reproducir la hidrodinámica actual del río Aysén.



El principal parámetro de calibración fue el Coeficiente de Manning. Además se realizó un análisis de sensibilidad de otros parámetros internos del modelo; viscosidad de torbellino, formulación para la viscosidad (Velocidad constante o Smagorinsky). En esta etapa se definieron otros aspectos importantes para la modelación como son; desfase de tiempo o dt , tiempo mínimo de modelación para considerar válidos los resultados, condiciones de borde, altura inicial de la grilla, etc.

Figura 4: Mediciones para la Calibración Modelo

Se utilizaron dos casos para la modelación bidimensional, los días 14 y 15 de octubre, de 3 horas de duración aproximadamente cada uno. Con estas modelaciones se compararon los resultados de las simulaciones con las mediciones realizadas, llegando a un buen ajuste con lo cual se puede afirmar que el modelo logra reproducir la hidrodinámica del río Aysén.

Todas las mediciones que se realizaron para la calibración y validación del modelo, se efectuaron como parte del estudio de “GHD (2007)” solicitado por la Dirección de Obras Portuarias (DOP).

3.2 Diagnóstico de la Situación Actual

Para caracterizar la situación actual del río Aysén desde el punto de vista de la hidrodinámica del cauce, se analizaron ciertos eventos de crecida y condiciones mareales relevantes con los cuales se obtuvo el diagnóstico de la situación actual.

En el evento de un caudal de $570 \text{ m}^3/\text{s}$, considerado como caudal de estiaje, y en condiciones de marea baja de 0,7 m NRS, se obtuvieron profundidades del cauce en algunas zonas cercanas al cono deyección del orden de 2 y 3 m, lo que se aprecia en la figura 5 con color rojo y amarillo. Esta situación es desfavorable desde el punto de vista de la navegación, pues según se estima que para las características de las embarcaciones que navegan en la zona, la profundidad mínima debería ser del orden de 3 m, considerando que el calado máximo es 2,5 m y que se debe mantener un resguardo de 50 cm.

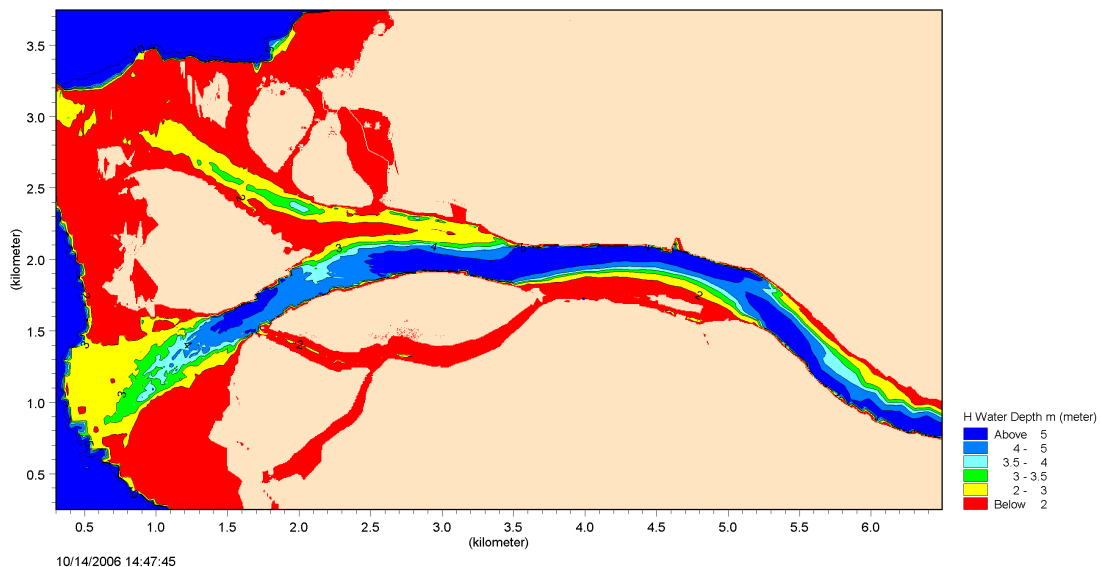


Figura 5: Profundidad del Cauce – Caudal Estiaje y Marea Baja

En la crecida de período de retorno de 5 años ($3.900 \text{ m}^3/\text{s}$) y para la condición de marea baja, no se presentaron inundaciones de importancia, y las velocidades máximas fueron del orden de $2,2 \text{ m/s}$, sin embargo para la condición de marea alta las velocidades aumentaron en un 50%, alcanzando magnitudes de $3,2 \text{ m/s}$. (Figura 6)

Se estimó que el caudal que escurre por la salida falsa en el evento de la crecida de 5 años de período de retorno, resulta ser aproximadamente un 39 % y un 32 % del caudal total, en marea alta y baja respectivamente.

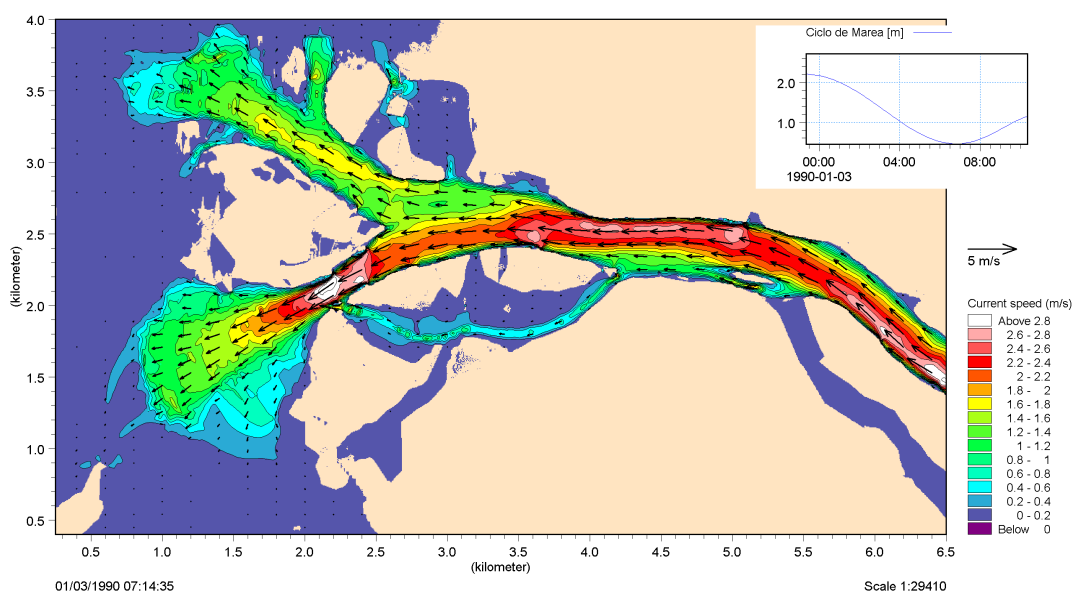


Figura 6: Velocidades del Escurimiento – Caudal $3.900 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tr:5 años) y Marea Baja

Las velocidades máximas observadas en la angostura de la desembocadura aumentan a 4.0 m/s en la crecida de 50 años de período de retorno ($6.200 \text{ m}^3/\text{s}$). Se tiene que el aumento significativo en el caudal de $2.300 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente 4 veces el caudal normal del río, no produce inundaciones adicionales de gran magnitud. Se puede afirmar que el río posee una gran capacidad de conducción en esta zona.

3.3 Alternativas

Según los análisis realizados del diagnóstico de la situación hidrodinámica actual del río Aysén, es que se propusieron tres alternativas bases a estudiar, así como combinaciones de ellas, que se modelaron en las condiciones más desfavorables, que corresponden al caudal de estiaje, para verificar su capacidad de arrastre solo por efecto mareal, y luego en el evento de la crecida centenaria para verificar que la obra no introdujera inundaciones adicionales a las producidas en la situación actual.

A continuación se presentan las alternativas:

Alternativa 1: consiste en el cierre de la denominada salida falsa, buscando de este modo, en condiciones de crecidas de bajo período de retorno, desviar la totalidad del caudal que pasa por esta entrada y conducirlo por la salida o entrada principal de modo que el aumento de caudal produzca un aumento de las velocidades del flujo. Con esto se pretende estudiar el efecto del cierre del cauce de la entrada falsa, en la hidrodinámica del río Aysén y en especial en el campo de velocidades generado en la desembocadura de la salida principal.

Alternativa 2: consiste en la instalación de dos espigones paralelos ubicados en el angostamiento de la desembocadura con una longitud aproximada de 700 m y arrancando poco antes de la desembocadura. Se pretende con esta configuración mantener el ancho del cauce y prolongar su extensión hacia mar adentro, cerca del cono deyección. Con esta alternativa se busca aumentar la velocidad del flujo, facilitando la autolimpieza del fondo y evitando la sedimentación en la zona de la desembocadura.

Alternativa 3: consiste en la colocación de espigones transversales en la salida del angostamiento. Para ello se implementan seis perfiles transversales por ambos costados del cauce cada 100 metros, con una longitud de 100 metros cada uno. Se requieren 12 espigones de este tipo, y un espaciamiento de 200 metros, o ancho del cauce, en el sentido perpendicular al flujo. Desde el punto de vista hidráulico el efecto en el cauce es similar a la alternativa 2, pero en términos de sedimentos su funcionamiento es distinto, pues permite, en un comienzo que se produzca sedimentación entre espigones. Se busca con esta alternativa permitir que a lo largo del tiempo se genere un relleno natural entre espigones.

Las alternativas se modelaron para cotas de coronamiento de las obras de 3,0 m NRS y 1,5 m NRS, para finalmente optar por la opción de cota menor, dado que el comportamiento hidráulico de las alternativas en esta última condición fue adecuado y los costos de la obra son bastante más reducidos.

Un esquema de las alternativas propuestas para resolver los problemas de navegabilidad se muestra en la figura siguiente.

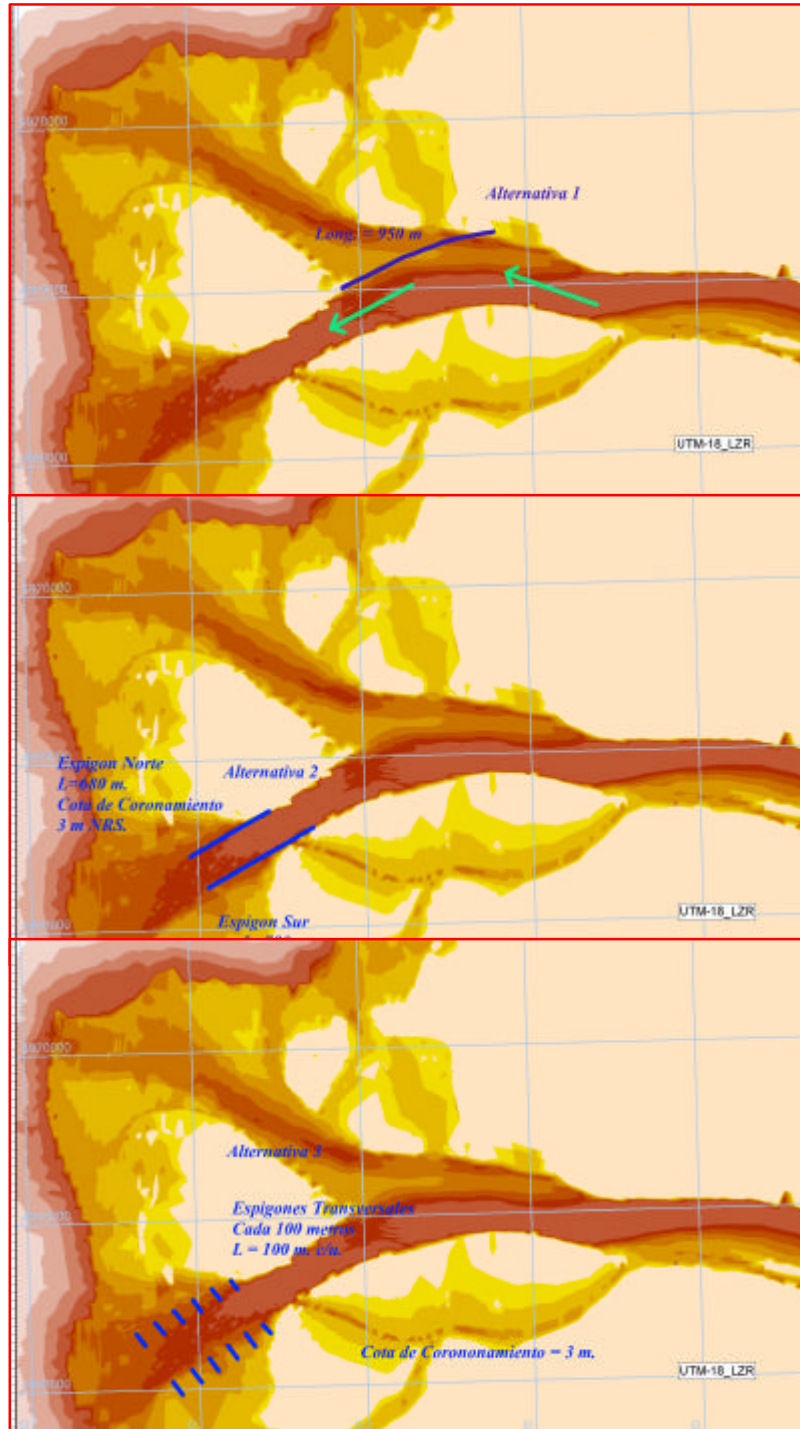


Figura 7: Alternativas de Mejoramientos en Desembocadura Río Aysén

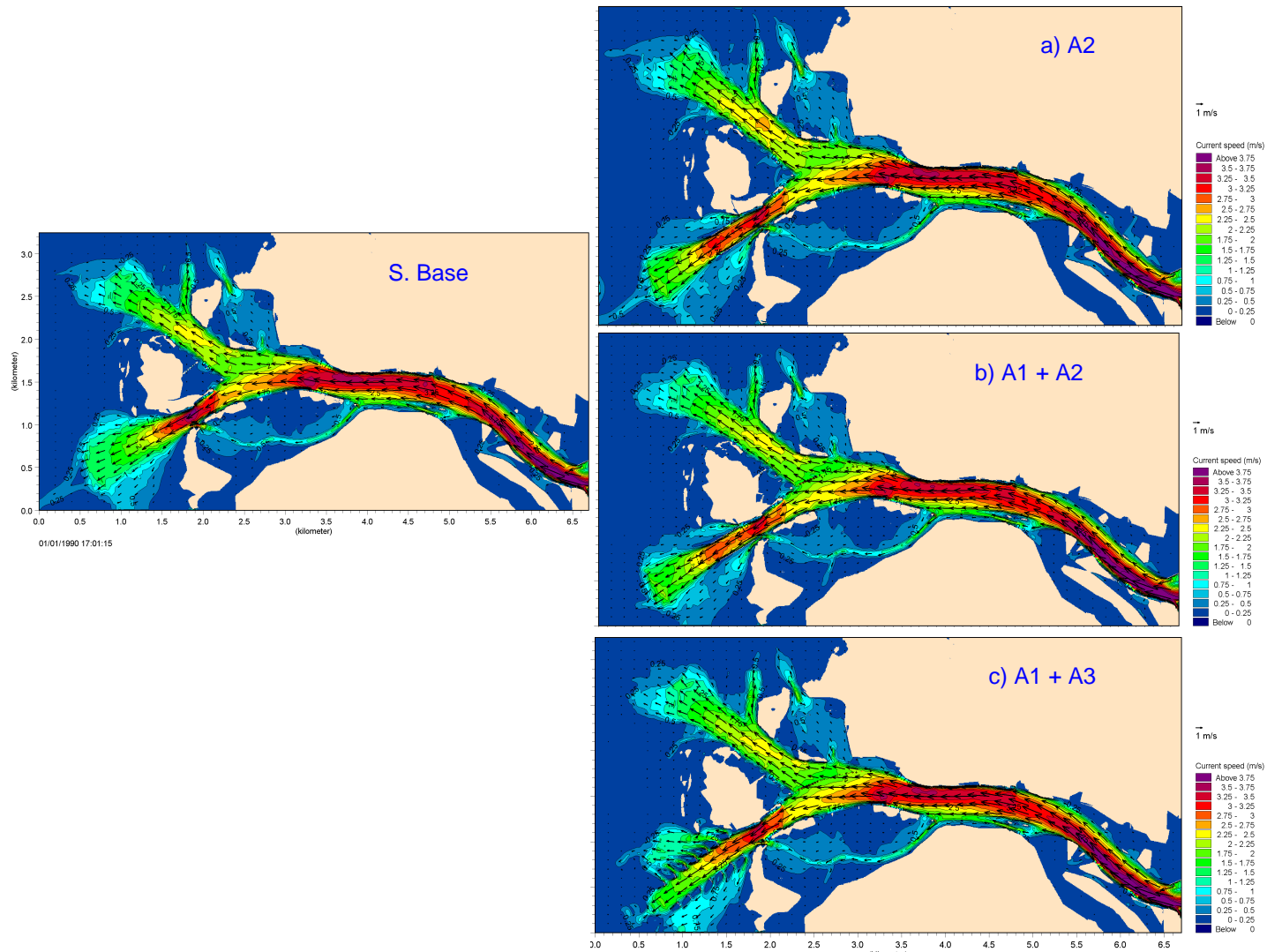


Figura 8: Alternativas de Mejoramiento – Crecida Centenaria

Se realizaron varias modelaciones para analizar la hidrodinámica de las alternativas, y sobretodo para estudiar el grado de mejoramiento incorporado por cada una de ellas, con lo cual finalmente se recomiendan, según su comportamiento hidráulico las siguientes alternativas:

- a) Alternativa 2 con cota coronamiento del muro a 1,5 m NRS
- b) Alternativa 1 y 2 ambas con cota coronamiento del muro a 1,5 m NRS
- c) Alternativa 1 y 3 cota coronamiento del muro a 1,5 m NRS

En la figura 8 se presentan los resultados del campo de velocidades para la crecida centenaria de las tres alternativas recomendadas y la situación base o situación actual. Se observa que todas estas opciones aumentan la magnitud de la velocidad y extienden la zona de altas velocidades hacia aguas abajo, logrando sobrepasar la zona con velocidades bajas que actualmente se produce en el cono deyección.

Los mejoramientos incorporados debieron funcionar adecuadamente para permitir la navegación de las embarcaciones, en un amplio rango de caudales, desde 600 a 6.900 m³/s, es decir evitar embanques en caudales bajos y evitar inundaciones adicionales a las actualmente acontecidas en crecidas. Según esto es que se escogieron las alternativas antes señaladas.

Se tiene que la alternativa b) (alternativa 1 y 2 simultánea) tiene un mejor comportamiento hidráulico en caudales bajos y altos, que las alternativas c) y a), es decir se verifica la autolimpieza en estiaje y solo por variación mareal, y no incorpora inundaciones adicionales a las acontecidas en la situación actual.

Es interesante mencionar que la alternativa c) (alternativa 1 y 3 simultánea) tiene velocidades menores que la alternativa b) en eventos de crecidas, lo cual requeriría un diseño menos robusto en ese tramo, y la zona de altas velocidades es más extensa, lo cual también es muy favorable.

En definitiva se recomiendan las tres alternativas a), b) y c), preferentemente las alternativas combinadas, y como primera opción la alternativa b).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo MIKE 21 demostró ser una herramienta de gran utilidad para estudiar la hidrodinámica imperante en la desembocadura del río Aysén.

La metodología desarrollada para abordar la problemática imperante en la zona permitió reproducir adecuadamente las condiciones actuales del río en la zona en estudio, lo cual se verificó por los resultados obtenidos de las modelaciones que se aproximaron bastante a las mediciones realizadas en la campaña de terreno.

El río Aysén en la desembocadura tiene dos salidas, una de las cuales no es actualmente utilizada pues presenta fondos insuficientes para la navegabilidad. Respecto de la salida utilizada se tiene que efectivamente en condiciones de baja marea y caudal de estiaje las profundidades del cauce en la zona del cono de deyección impiden la navegabilidad de las embarcaciones. Esta situación se reprodujo en el modelo, tal como ocurre en la actualidad.

El modelo MIKE 21 permitió analizar diferentes alternativas de mejoramiento, y dada la flexibilidad de esta herramienta se pudieron estudiar opciones con la incorporación progresiva de mejoramientos, para finalmente encontrar las alternativas que resuelven la problemática en las condiciones de navegabilidad del cauce. Dichas alternativas se modelaron en la condición más desfavorable, es decir en condición de estiaje, verificando la capacidad de arrastre solo por la influencia mareal. Además se verificó que en la crecida centenaria no se incorporaran áreas adicionales de inundación.

Se recomienda aplicar una metodología que considere el uso de una única herramienta, en zonas con extensiones de importancia, con mayor resolución en aquellas zonas que lo requieran. En la actualidad el costo de implementar un modelo de terreno para usar como base en la grilla de modelación no es tan alto como hasta hace unos años, por lo cual si está considerado aplicar un modelo bidimensional a una zona en particular, se recomienda considerar la aplicación de esta herramienta en toda el área del estudio.

Resulta interesante en este tipo de estudios previo la planificación de trabajos de terreno, elaborar un modelo hidráulico conceptual de la zona a estudiar, de modo de conocer el comportamiento hidrodinámico a nivel preliminar, y según eso elaborar la campaña de terreno y el alcance de cada trabajo, así como identificar las zonas de mayor relevancia desde el punto de vista de los objetivos del estudio. Con esto se puede enfocar y detallar de manera más apropiada el levantamiento de la información topográfica, batimétrica así como las mediciones de caudal, niveles de agua y velocidad del escurrimiento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Obras Portuarias por concedernos la autorización para mostrar el presente trabajo en este encuentro científico.

REFERENCIAS

González y Zamorano. Estudio de Factibilidad Conservación Vías de Navegación Río Aysén y Aguas Muertas. XI Región. Informe Etapa 2. GHD. 2007.

Estudio Fluvial y Marítimo Sector Puerto Aysén. XI Región. Informe Final. Agosto 1996. Instituto Nacional de Hidráulica.

Laboratorio Hidráulico de Dinamarca. Manual de Referencia MIKE-21. 2007.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Atlas Hidrográfico de Chile. 2001.