

# DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN “ALTURA-CAUDAL” (CURVA H-Q) PARA EL RÍO SANTA CRUZ A LA SALIDA DEL LAGO ARGENTINO

## Sistemas de Presas ‘Nestor Kirchner’ y ‘Jorge Cepernik’ sobre el Río Santa Cruz, Argentina

Introducción .....	2
Síntesis Metodológica .....	2
Caracterización hidráulica del Cauce .....	4
Granulometría del Material del Lecho .....	4
Resistencia al Flujo en el Cauce del Río .....	5
Modelación Hidráulica Unidimensional (1D) del Tramo de Río .....	7
Modelación Hidráulica Bidimensional (2D) de la embocadura.....	9
Evaluación y análisis de resultados (Fase 1, “natural”) .....	11
Evaluación y análisis de resultados (Fase 2, “con obra”) .....	43



**HECTOR DANIEL FARIAS**  
Ingeniero Hidráulico  
M.P. 92099 (CPIA-SdE) – 0145 (CPIC)

## Introducción

El objetivo de los estudios que se presentan en este informe fue estimar las relaciones funcionales entre niveles de la superficie libre en el Lago Argentino, la capacidad de erogación de la embocadura (identificada como sección de inicio del río) y el caudal circulante a través de varias secciones del Río Santa Cruz, ubicadas en el tramo inmediatamente aguas abajo de la salida del Lago.

## Síntesis Metodológica

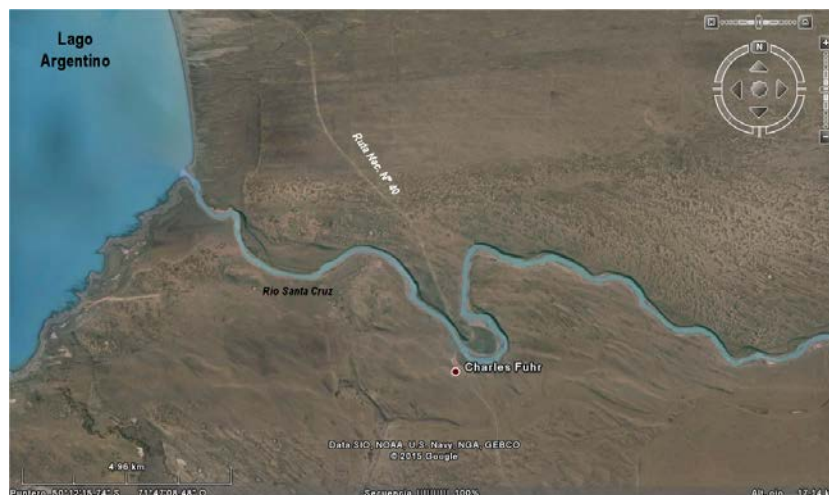
La metodología aplicada para obtener una función de descarga  $h-Q$ , o más correctamente  $Q = f(h)$  en una sección genérica del curso fluvial del Río Santa Cruz en la zona de aguas arriba de las obras fue la siguiente:

- A partir de la información topográfica y batimétrica disponible, se seleccionó un tramo de cauce de aproximadamente 20 km de longitud, sobre el que se consideró un conjunto de secciones transversales representativas de la geometría hidráulica del Río en el tramo estudiado.
- La caracterización geométrica del sistema de descarga se complementó con la realización de un modelo digital del terreno (MDT) que reproduce razonablemente bien las características propias de la embocadura, considerándose para ello, un tramo del lago en su zona cercana a la embocadura propiamente dicha y a la sección inicial del río.
- A partir de la información proveniente de los estudios de suelos (análisis granulométricos de muestras extraídas en una zona próxima al emplazamiento del tramo en estudio) e inspecciones visuales in-situ, se obtuvieron los indicadores característicos de los tamaños representativos del material del que se compone el lecho fluvial.
- Posteriormente se aplicó un conjunto de criterios disponibles en la literatura a fin de evaluar las características friccionales y de resistencia al escurrimiento, propias del río, con la finalidad de estimar el coeficiente de rugosidad representativo para una variedad de condiciones hidráulicas que puedan presentarse a lo largo de un año hidrológico típico.
- Tomando en consideración que el control del flujo podría no ser puramente friccional en la sección de la embocadura y el primer segmento del curso, se llevó a cabo un análisis detallado de las condiciones de conducción del cauce a los fines de identificar posibles secciones de control que limiten o condicionen la capacidad de descarga de la embocadura.
- Con la geometría hidráulica de las secciones transversales y los coeficientes de rugosidad estimados se procedió a realizar una modelación hidráulica conceptual del tramo para un rango idealizado de posibles condiciones

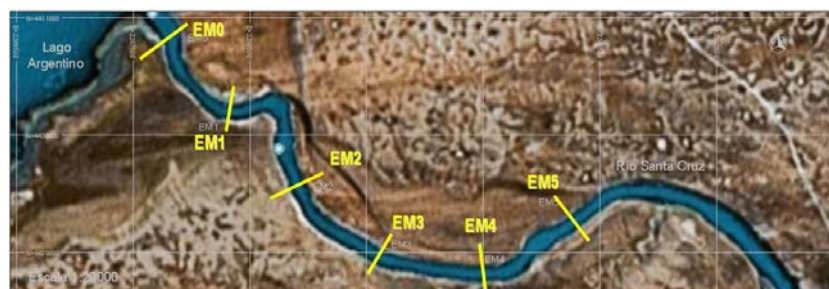
hidrológicas, usando el paquete HEC-RAS para obtener una serie de parámetros hidráulicos característicos y fundamentalmente la función de descarga “h-Q” (altura-caudal) en las secciones transversales de interés (e.g., embocadura, segmento superior, estación Charles Fuhr, etc.).

- A los fines de caracterizar el comportamiento del flujo en la sección de embocadura y en el primer tramo del río, se aplicó un modelo numérico bidimensional (2D), con capacidades tridimensionales (*DELFT-3D*). Si bien esta consideración no resulta de vital importancia, si lo fue el análisis del campo de velocidades en la zona de aproximación que actúa como una transición convergente. En este contexto, la modelación 2D permitió analizar la interacción de la embocadura con el propio lago para distintos escenarios, dando complemento a los análisis unidimensionales (1D) que se desarrollaron en el propio curso del río, como una primera aproximación para la caracterización hidráulica del tramo.

En la figura siguiente se indica el área de estudio, es decir, el tramo de inicio del curso del Río Santa Cruz a la salida del Lago Argentino.



Tramo en estudio del Río Santa Cruz



Secciones con mediciones en el tramo inicial

En la figura previa se muestra un detalle del tramo inicial del río, y en el mismo se indican 6 secciones transversales que ya han sido relevadas y cuya geometría se dispone en detalle. En estas 6 secciones transversales se realizaron aforos con ADCP a los efectos de obtener mediciones precisas de caudales y distribuciones de

velocidades. Las tareas de campo fueron llevadas a cabo por el CETA-UNC los días 08 y 09 de abril de 2015.

## Caracterización hidráulica del Cauce

Para cuantificar el caudal líquido que es capaz de conducir un cauce de sección trapecial se aplica la Fórmula de Manning, la cual se expresa para el Sistema Internacional (SI) de unidades de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

donde Q es el caudal expresado en m<sup>3</sup>/s y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

A partir de esta expresión, la velocidad media del flujo (V) se puede calcular a partir de la ecuación:

$$V = Q / A$$

donde V se expresa en m/s cuando Q se expresa en m<sup>3</sup>/s y A en m<sup>2</sup>.

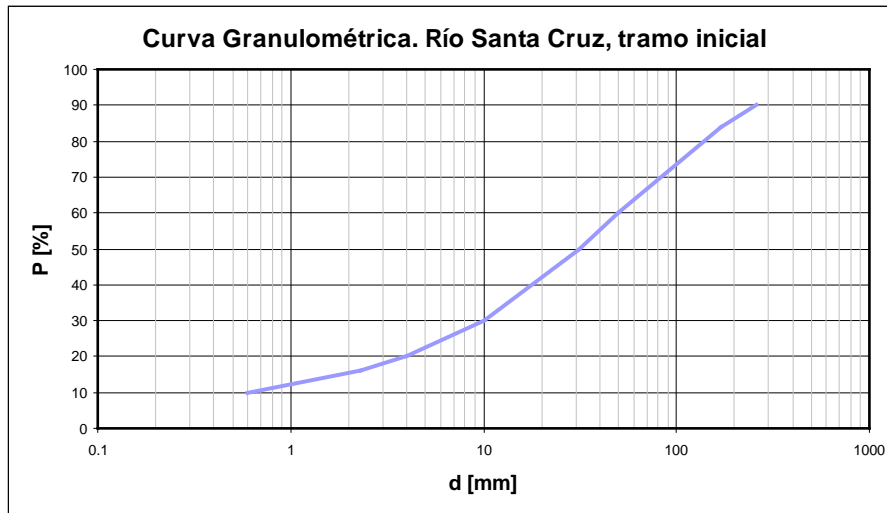
## Granulometría del Material del Lecho

Para obtener una función representativa de la granulometría del lecho fluvial en el tramo en estudio, se consideraron los tamaños representativos de granos correspondientes al lecho activo, sobre la base una serie de muestras extractadas a lo largo del río en proximidades del tramo de interés. Asimismo, se analizaron capturas fotográficas del material del lecho, tal como la que se presenta a continuación, a los efectos de estimar la forma (adimensionalizada) de una función granulométrica típica, que fuera representativa de las condiciones del lecho fluvial.



Sedimento del lecho del Río Santa Cruz en el tramo estudiado

En la figura siguiente se indica la función granulométrica establecida (en forma estimativa) para los cálculos de tamaños representativos del material.



Curva granulométrica representativa del lecho del Río Santa Cruz en el tramo estudiado

Puesto que a los efectos del cálculo de las características friccionales del cauce interesa fundamentalmente el material presente en la superficie del lecho, se procedió al trazado de una envolvente representativa de los tamaños estimados, para obtener una “curva granulométrica de diseño” que es la que se usó para calcular las propiedades de fricción y resistencia al flujo del cauce.

Los valores de tamaños típicos asociados a esta curva granulométrica se indican a continuación.

<b>Granulometría del Material</b>	
$d_{10} =$	<b>0.001 m</b>
$d_{16} =$	<b>0.002 m</b>
$d_{20} =$	<b>0.004 m</b>
$d_{30} =$	<b>0.010 m</b>
$d_{50} =$	<b>0.031 m</b>
$d_{60} =$	<b>0.050 m</b>
$d_{84} =$	<b>0.170 m</b>
$d_{90} =$	<b>0.260 m</b>
$\sigma_g =$	<b>8.60</b>

Como se observa, se trata de un material de granulometría muy extendida. Estos valores fueron usados para estimar la resistencia al flujo

## Resistencia al Flujo en el Cauce del Río

Las características friccionales de un río de montaña (como el que se estudia en este proyecto) se pueden evaluar a través del coeficiente de resistencia de Chezy

(C), el factor de fricción de Darcy-Weisbach (f) o el coeficiente de rugosidad de Manning (n).

Todos estos parámetros se relacionan entre sí a través de las ecuaciones que definen a cada uno de ellos. De este modo, calculando uno de ellos y conociendo el radio hidráulico de la sección para un nivel dado de la superficie libre del flujo, se puede calcular cualquiera de los otros dos.

En la tabla siguiente se presenta el conjunto de relaciones que vinculan entre si a las cantidades antes mencionadas.

	<b>C</b>	<b>n</b>	$\sqrt{8/f}$
<b>C</b>	—	$C = (1/n) \cdot R^{1/6}$	$C = \sqrt{g} \sqrt{8/f}$
<b>n</b>	$n = R^{1/6} / C$	—	$n = R^{1/6} \cdot (\sqrt{8/f} \cdot \sqrt{g})^{-1}$
$\sqrt{8/f}$	$\sqrt{8/f} = C / \sqrt{g}$	$\sqrt{8/f} = R^{1/6} (n \cdot \sqrt{g})^{-1}$	—

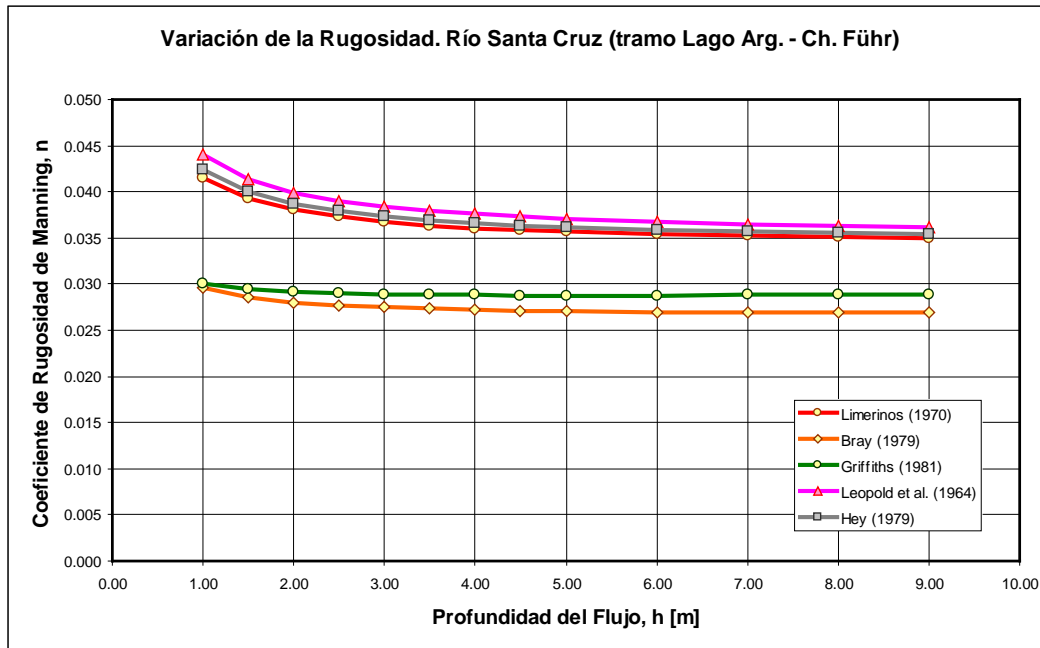
Las ecuaciones disponibles en la literatura para evaluar el factor de fricción (en el caso en que la resistencia al flujo fuera dominada únicamente por la rugosidad del material granular) son múltiples y variadas (Bathurst et al., 1987). En la tabla siguiente se resumen seis de las más validadas en ríos reales, que se consideran como apropiadas para ser aplicadas en el presente estudio.

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Ambito de calibración</b>
Leopold et al.	1964	$1/(f)^{1/2} = 2.03 \log [(3.11 h)/d_{84}]$	Brandywine Creek, PA, USA
Limerinos	1970	$1/(f)^{1/2} = 2.03 \log [(3.72 h)/d_{84}]$	Ríos de grava en California, USA
Charlton et al.	1978	$1/(f)^{1/2} = 1.94 \log [(2.27 h)/h_{90}]$	Ríos de grava en U.K.
Bray	1979	$1/(f)^{1/2} = 2.36 \log [(1.274 h)/d_{50}]$	Ríos de grava en Alberta, Canada
Griffiths	1981	$1/(f)^{1/2} = 1.98 \log [(2.42 h)/d_{50}]$	Ríos de grava en New Zealand
Hey	1979	$1/(f)^{1/2} = 2.03 \log [(a h)/(3.5 d_{84})]$	Ríos de grava en U.K.

Para sintetizar los resultados obtenidos, se calcularon para los seis métodos las curvas del coeficiente de rugosidad de Manning versus la profundidad del flujo.

Como se disponía de la información relativa a los aforos llevados a cabo con ADCP en el tramo, se pudo observar que para todas las secciones (que se usaron posteriormente para calibrar los modelos 1D y 2D aplicados) el tirante local “h” varía entre 1 m y 9 m aproximadamente. Se usó ese rango para confeccionar las relaciones “ $n = f(h)$ ”.

El resultado del análisis produce una familia de curvas, cada una de las cuales resulta representativa del método aplicado para calcular el valor del coeficiente de rugosidad. La misma se presenta a continuación.



Resistencia al flujo en el Río Santa Cruz

Como resultado de este cálculo (a partir del cual se adoptarán los valores típicos de rugosidad como tentativas iniciales para la modelación hidráulica del tramo de río bajo análisis), puede observarse que el valor del coeficiente de rugosidad de Manning varía en una franja entre 0.029 y 0.036 aproximadamente, para tirantes del orden de 4 m a 8 m (típicos de caudales por encima de los 1000 m<sup>3</sup>/s), con una tendencia a decrecer para los tirantes mayores.

Este patrón de comportamiento ha sido confirmado con las mediciones de la distribución vertical de velocidades, practicadas con ADCP y ajustadas al perfil logarítmico para flujos hidráulicamente rugosos.

En efecto, para las mediciones detalladas realizadas por el CETA de la UNC en la sección Charles Führ (Informe CETA pág. 11), para un tirante cercano a los 4 metros, se determinó un coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0.035$  y una rugosidad absoluta  $k_s = 0.43$  m. Este último valor también estaría confirmando la representatividad de la curva granulométrica usada para el análisis, ya que si se considera la función de textura se tiene:  $2.5 d_{84} = 2.5 \times 0.17$  m = 0.425 m.

## Modelación Hidráulica Unidimensional (1D) del Tramo de Río

Los cálculos hidráulicos 1D se llevaron a cabo mediante la aplicación del paquete de software HEC-RAS (River Analysis System), desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center, 1998) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (U. S. Army Corps of Engineers). El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional (1D) gradualmente variado en cauces naturales de secciones transversales de geometrías cualesquiera.

HEC-RAS es un paquete integrado de programas de análisis hidráulicos, en el cual el cálculo del perfil hidráulico se realiza de una sección a otra mediante el empleo de la ecuación de la energía a través del método iterativo conocido como el Método Estándar por Etapas.

Uno de los productos obtenidos fue la curva de descarga, o relación altura-caudal [h-Q] obtenida para la sección XSi ( $1 = 1,2,3,\dots$ ), además de los perfiles para distintos escenarios de caudales líquidos.

En este caso el modelo se implementó teniendo en cuenta la necesidad de determinar los niveles del Lago Argentino, mientras que aguas abajo se dispone de un tramo libre del río, lo cual determina la condición de borde de tirante normal para aguas abajo, para el rango de caudales de interés práctico.

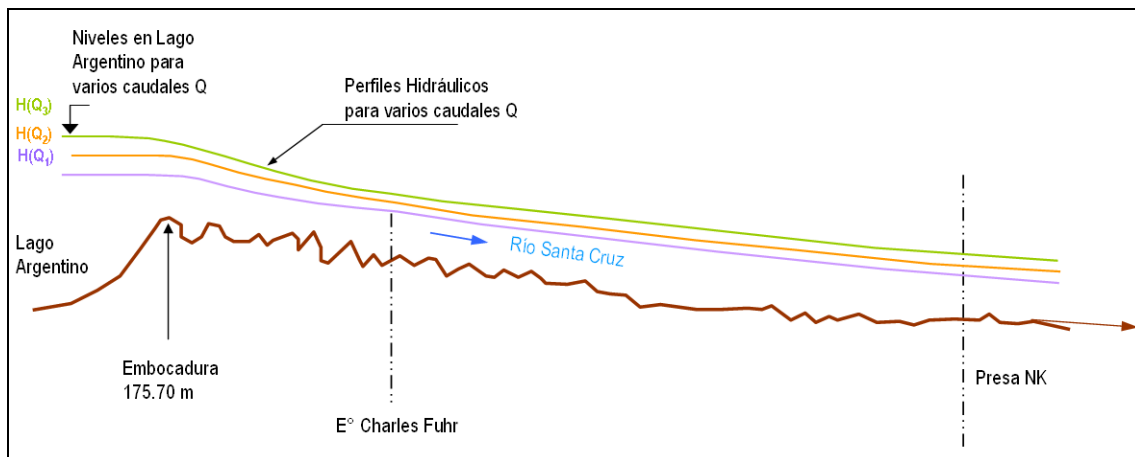
Los caudales modelados fueron: 355, 700, 1200, 2100, 3000 y 4100  $m^3/s$ .

El modelo se calibró a partir de valores observados del perfil del flujo para caudales dados. En este caso se disponía de los niveles medidos para el caudal aforado los días 8 y 9 de abril de 2015, a lo largo de una serie de secciones comprendidas desde el Lago Argentino, cubriendo una longitud total de 20,4 km y con un espaciamiento entre sí de 300 m.

Luego de la calibración se procedió a la explotación del modelo para el rango de caudales mencionados, aplicando valores razonables (en base a experiencias previas) de los parámetros del mismo. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar las relaciones altura-descarga con sus envolventes de máxima y mínima.

Las estrategias de modelación (tanto para el modelo 1D como el 2D) estuvieron orientadas a analizar el efecto de remanso generado por la obra (Presa NK) en el tramo de río y en los niveles del Lago Argentino, para un determinado rango de caudales y niveles de operación del futuro embalse.

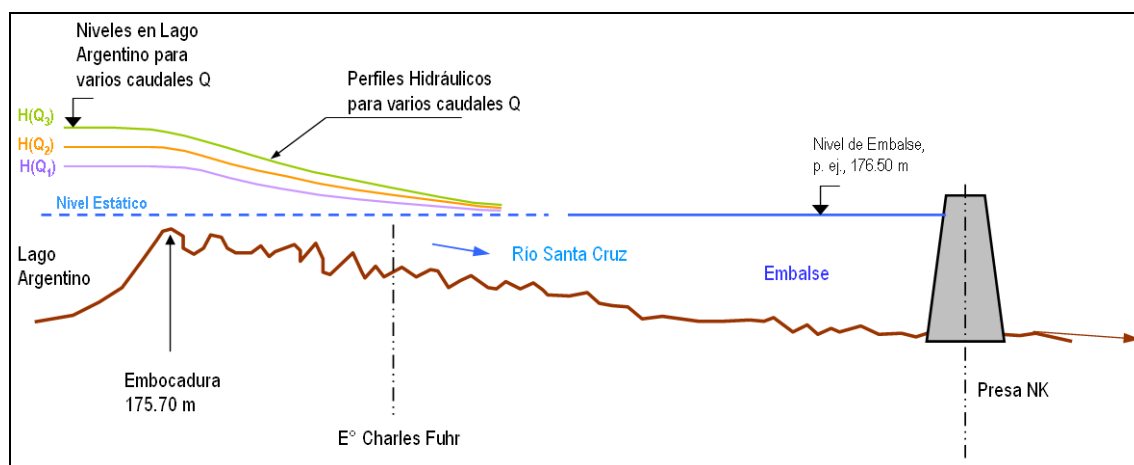
Para ello, se consideró un escenario de referencia inicial, correspondiente al río en su "condición natural", es decir, funcionando en régimen libre.



Lago Argentino y Río Santa Cruz en su Condición "Natural" (situación de referencia)



En el esquema previo se indica ese escenario de base (que se denominará de aquí en adelante “Fase 1” o escenario “natural”), en el que se consignan los niveles en la embocadura correspondientes a diferentes caudales. En este caso se consideró como condición de borde aguas abajo la ocurrencia del tirante normal en la última sección correspondiente al tramo de modelación, asignándole al segmento final la pendiente local media de los últimos 5 km de cauce (del orden de 0.35 al 0.30 o/oo).



Lago Argentino y Río Santa Cruz con Embalse NK (situación “perturbada”)

Posteriormente se modelaron los escenarios correspondientes a la condición “alterada” o “perturbada” del sistema (esquema previo, que se denominará “Fase 2” o situación “con obra”), asociada a la presencia aguas abajo de la Presa NK y su respectivo embalse. En esos casos, se consideró como condición de borde un nivel constante de embalse (NE) en la última sección del tramo de modelación. De esta manera, se produce un perfil de flujo “remansado” y se puede estimar, por comparación, si hay sobreelevaciones en la embocadura asociadas a distintas combinaciones de caudales (Q) y niveles de embalse (NE).

## Modelación Hidráulica Bidimensional (2D) de la embocadura

A los fines de caracterizar el flujo de aproximación a la embocadura, estimar el campo de velocidades y determinar el tipo de transición que se desarrolla hacia el curso del río propiamente dicho, se empleó un modelo de cálculo bidimensional (2D).

Para la simulación de la hidrodinámica se aplicó la plataforma de modelación *DELFT3D*, desarrollada por WL/DelftHydraulics en los Países Bajos, y perfeccionada a través de una serie de versiones evolutivas a lo largo de los últimos 20 años.

El modelo hidrodinámico (Módulo FLOW) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno es resuelto en una malla de

diferencias finitas utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*).

Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el  $k-l$  o el  $k-\varepsilon$  (Uittenbogaard, van Kester y Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial (horizontal) del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, entrada de ríos) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de los ríos, punto de toma de agua).

En las simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con sistema coordenado tipo sigma o “ $\sigma$ ”, donde las capas se dividen proporcionalmente y están limitadas por dos planos, de los cuales uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo.

En el problema tratado se consideró un intervalo temporal apropiado determinado estimado con el cálculo del número de Courant-Friedrichs-Lewy para no afectar a la calidad de la solución (Delft3D-Flow, 2011).

Las tensiones de Reynolds son modeladas usando el concepto de viscosidad turbulenta. El coeficiente de viscosidad vertical está definido por:  $\nu_v = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_v^{back})$ , donde  $\nu_{mol}$  se corresponde a la viscosidad cinemática del agua,  $\nu_{3D}$  es la componente de la viscosidad turbulenta en la vertical,  $\nu_v^{back}$  es la “*background eddy viscosity*” (es un mínimo valor asignado a la contribución turbulenta). El proceso de turbulencia es un proceso de sub-escala de malla por lo que se deberá elegir las ecuaciones necesarias para asegurar el cierre del modelo. En simulaciones con las ecuaciones del método RANS, la redistribución de la cantidad de movimiento debido a la variación vertical de la velocidad horizontal es denotada como dispersión.

En modelos 2D, las aceleraciones verticales son despreciadas en la ecuación de la cantidad de movimiento. Los coeficientes de viscosidad y de difusión de fondo horizontal 2D,  $\nu_H^{back}$  y  $D_H^{back}$  (es un coeficiente de difusión horizontal que debe de definir el usuario, introducido para la calibración), deben ser especificados por el usuario en el menú del programa. Adicionalmente, el modelo *DELFT3D*, contiene el modelo de turbulencia en 2D denominado HLES.

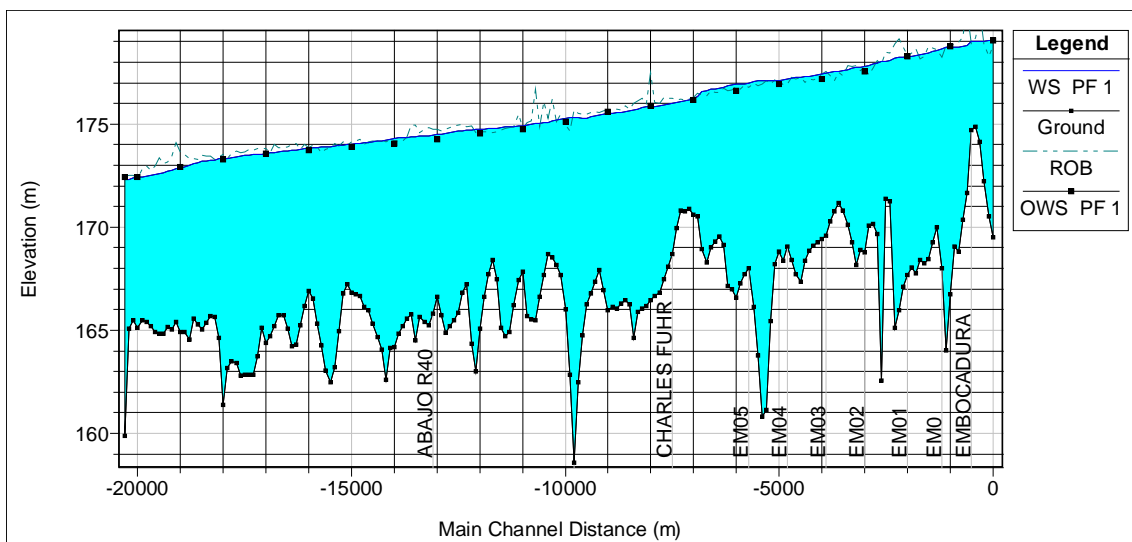
Los modelos de cierre del *DELFT3D* para determinar la viscosidad y la difusión turbulenta (Delft3D-Flow, 2011) son: (i) de coeficientes constantes; (ii) algebraico; (iii)  $k-l$ ; (iv)  $k-\varepsilon$ .

Tal como se señaló, esta modelación se aplicó para evaluar el comportamiento de la zona de aproximación, estimar el campo de velocidades bidimensional, evaluar la interacción del lago con la sección estrechada en el ingreso y obtener elementos para establecer la estabilidad de la zona de control.

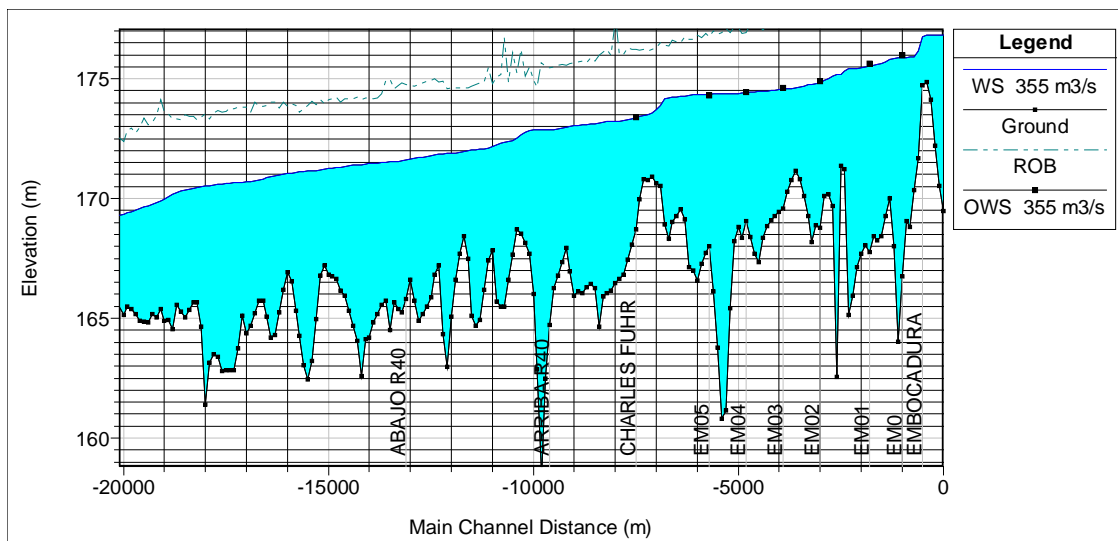
## Evaluación y análisis de resultados (Fase 1, “natural”)

### Resultados de la Modelación 1D en área de Embocadura y tramo inicial del Río Santa Cruz, inmediatamente aguas abajo del Lago Argentino

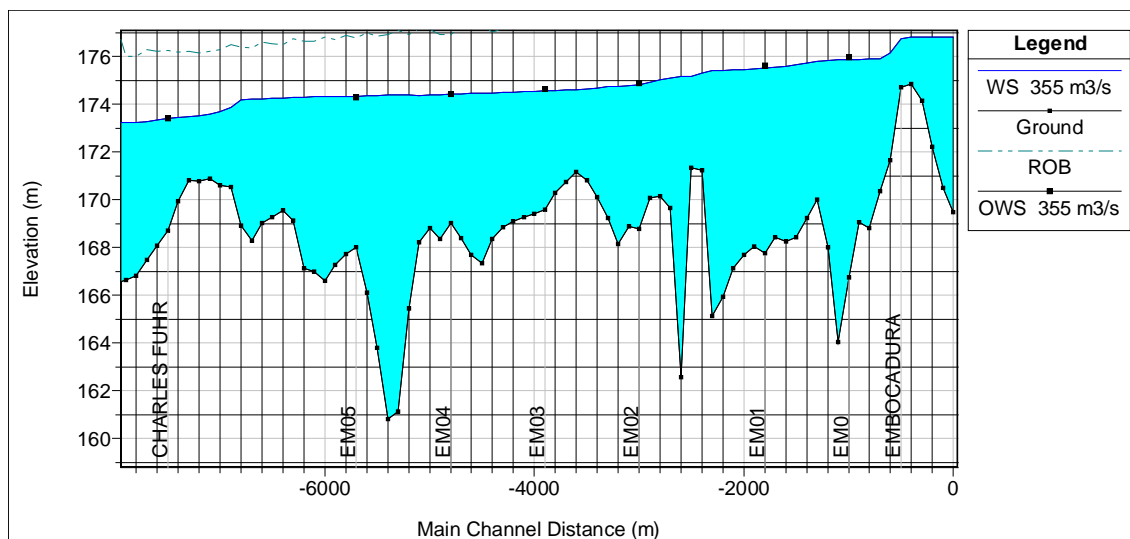
En una primera instancia se procedió a realizar una modelación con HEC-RAS del primer tramo de río, de unos 20 km de longitud. A continuación se presentan algunos resultados obtenidos, tanto para las etapas de calibración como de explotación del modelo.



Perfil Hidráulico calibrado para el caudal aforado y niveles medidos desde la embocadura hasta unos 20 km aguas abajo



Proceso de Calibración con  $Q = 355 \text{ m}^3/\text{s}$  y niveles en las 6 secciones medidas por IATASA



Detalle de la zona de perfiles medidos por IATASA

Observando la batimetría de detalle llevada a cabo en el marco del presente estudio, se ha podido verificar la presencia de un lecho altamente complejo e irregular en el primer segmento del río, desde su nacimiento en la embocadura del Lago Argentino, hasta unos 6 km aguas abajo. En este segmento, la resistencia al flujo comprende tanto una componente puramente friccional así como también de forma (secuencia de contracciones y expansiones, fundamentalmente en el sentido vertical). En tanto, aguas abajo de la Estación Charles Führ el lecho tiende a mostrar un patrón más “suave”, con predominancia de la resistencia friccional.

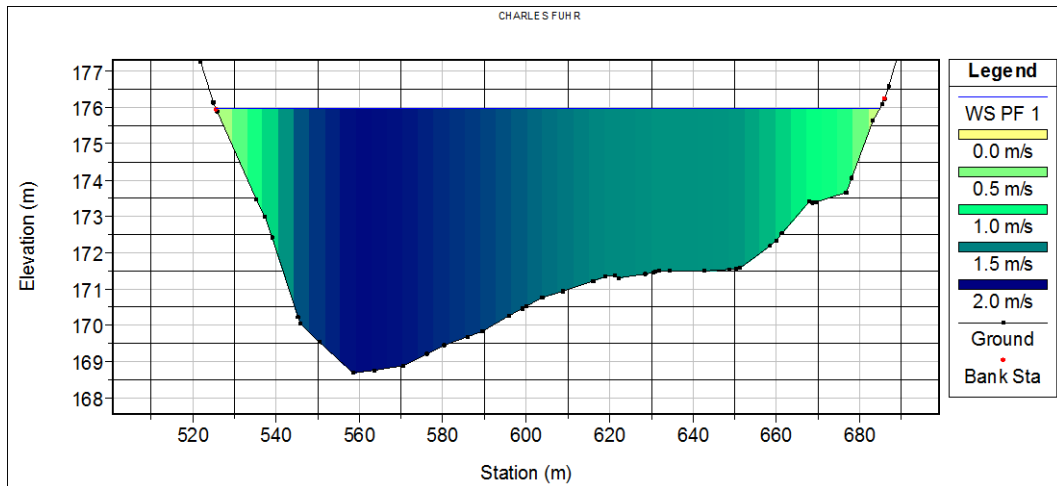
A partir de este patrón de comportamiento se decidió segmentar los intervalos para calibrar la rugosidad ( $n$  de Manning), encontrándose resultados satisfactorios, tanto para caudales “bajos” como para caudales medios a “elevados”. En la tabla siguiente se presenta un resumen de los resultados de la calibración.

		Q = 2250 m <sup>3</sup> /s	Q = 1200 m <sup>3</sup> /s	Q = 355 m <sup>3</sup> /s
Prog. Inicial	Prog. Final	$n$ Manning	$n$ Manning	$n$ Manning
0	3000	0.045	0.049	0.073
3000	20300	0.032	0.036	0.043

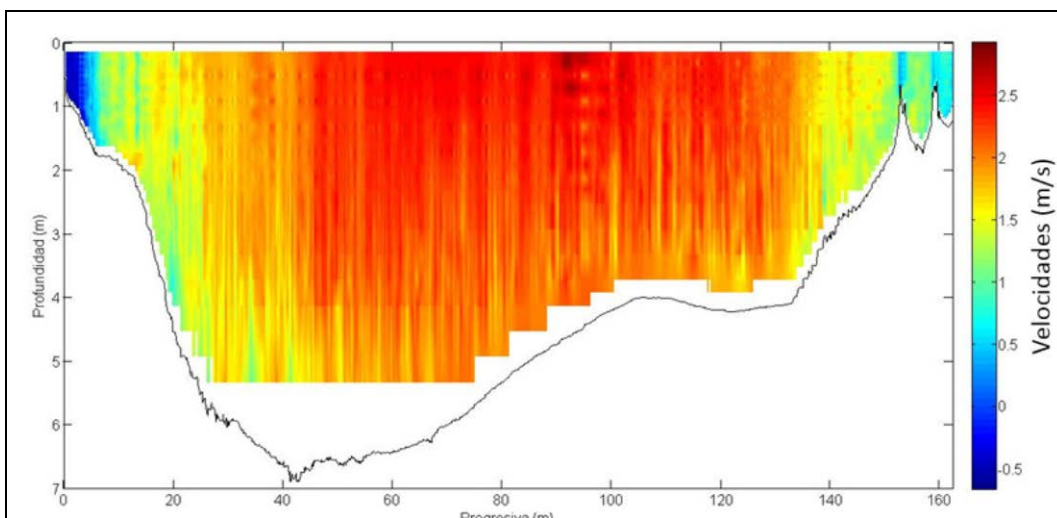
Puede observarse que para caudales bajos, el coeficiente de rugosidad se incrementa significativamente en el segmento inicial (sector de lecho muy irregular en el que la resistencia al flujo está gobernada por los efectos de forma), mientras que en el rango de caudales medios a altos, el “ $n$ ” de calibración se sitúa en los valores que se habían estimado aplicando las formulaciones teóricas de resistencia comandada por procesos friccionales puros.

Esta calibración inicial permitió explotar el modelo HEC-RAS para calcular los perfiles de flujo (en condiciones del río sin obra y con obra), y otros productos de interés, como por ejemplo las distribuciones de velocidades en las secciones que habían sido previamente aforadas.

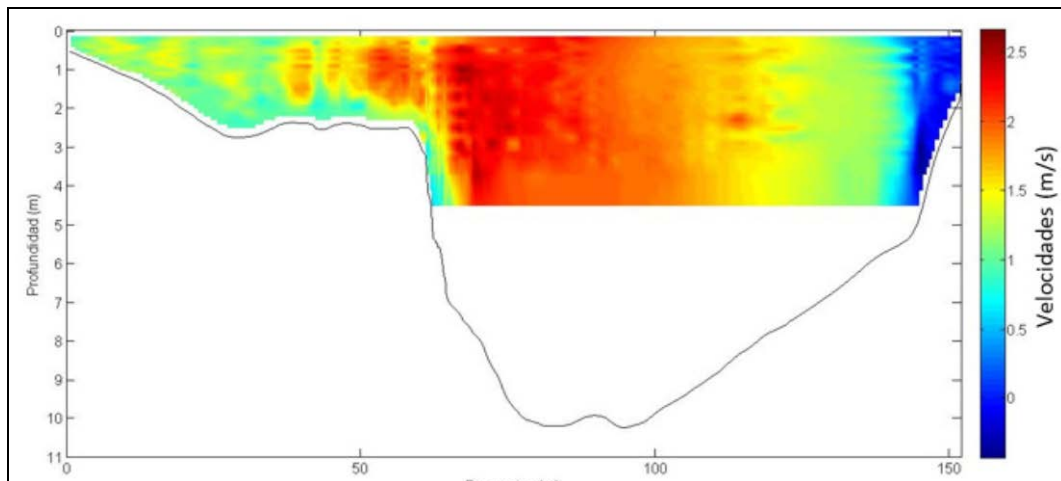
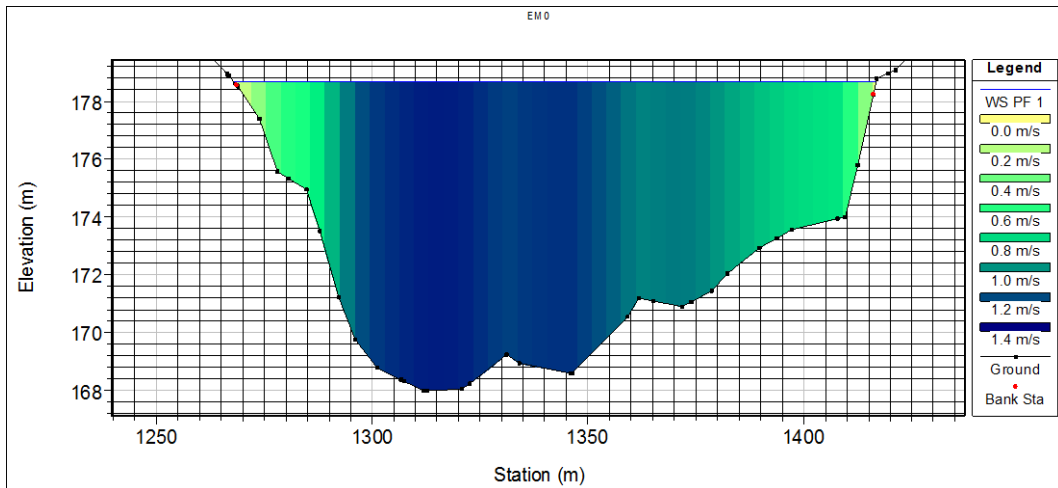
En las figuras siguientes se comparan las distribuciones laterales de velocidades medidas y simuladas en las seis secciones transversales previamente estudiadas (y medidas) por IATASA en instancias previas a este proyecto. Si bien el algoritmo LDM (usado por HEC-RAS para inferir la distribución lateral de velocidades) es semi-empírico y sólo tiene un carácter de primera aproximación, los patrones observados indican que este segmento del río (y en realidad la mayor parte del tramo) tiene un comportamiento predominantemente 1D, y puede ser modelado satisfactoriamente por una herramienta del tipo HEC-RAS.



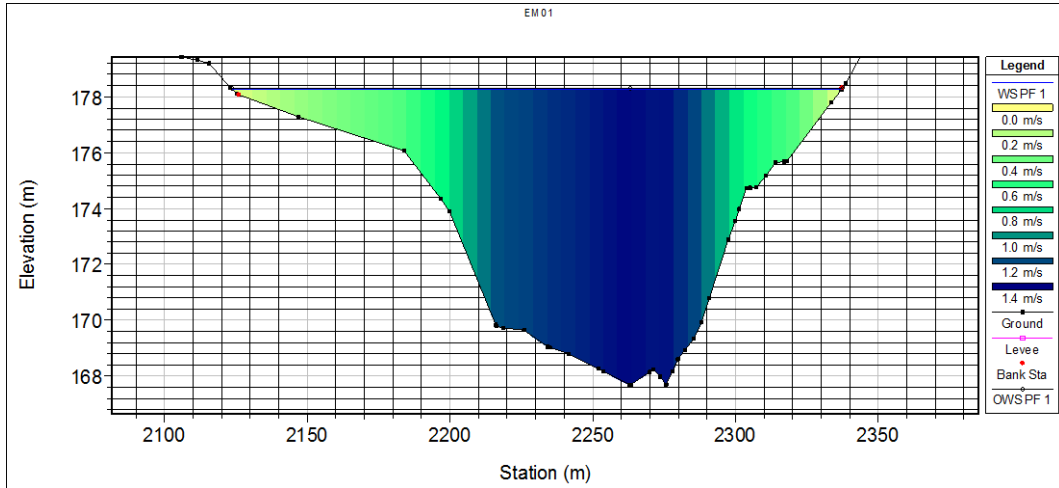
Sección Charles Führ. Distribución de velocidades calibradas y simuladas con HEC-RAS



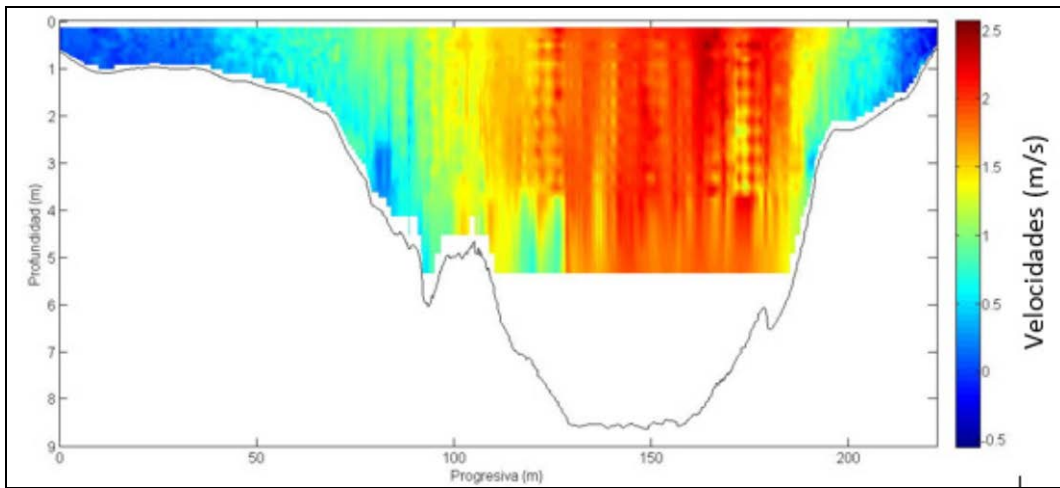
Sección Charles Führ. Distribución de velocidades medidas con ADCP para el caudal  $Q = 1182 \text{ m}^3/\text{s}$



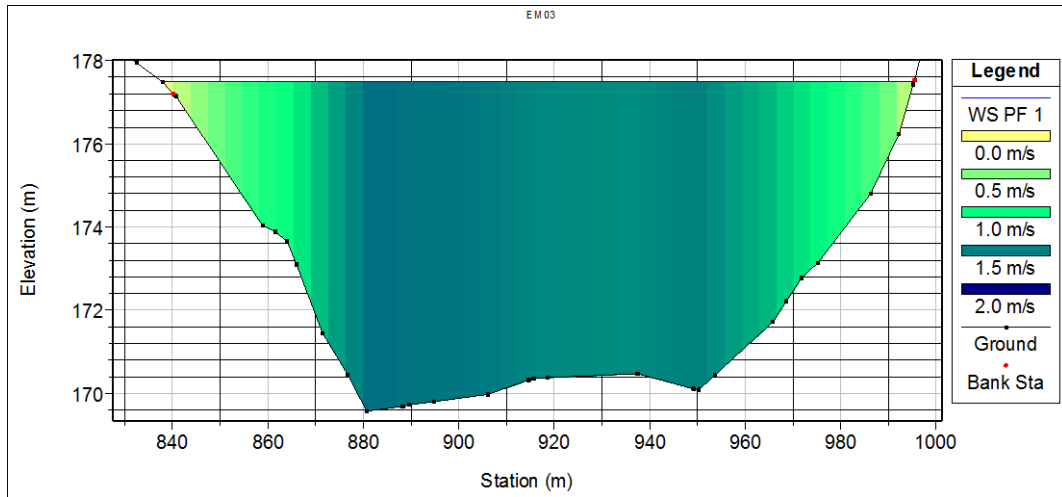
Sección EM00. Velocidades medidas con ADCP (las diferencias en la geometría se deben a las desviaciones de la normal en el derrotero de la embarcación y a la batimetría compleja del lecho. No obstante las velocidades máximas y la distribución general en sentido lateral se reproducen satisfactoriamente).



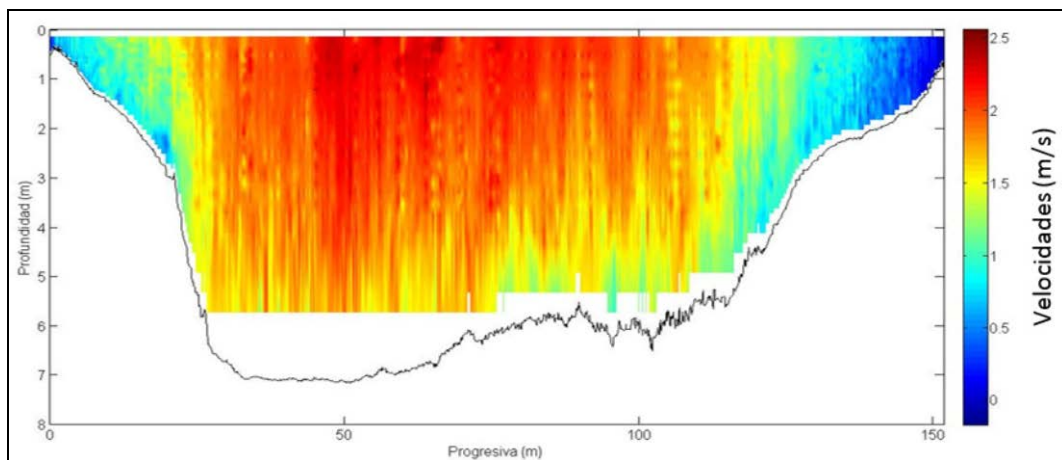
Sección EM01. Velocidades simuladas con HEC-RAS



Sección EM01. Velocidades medidas con ADCP

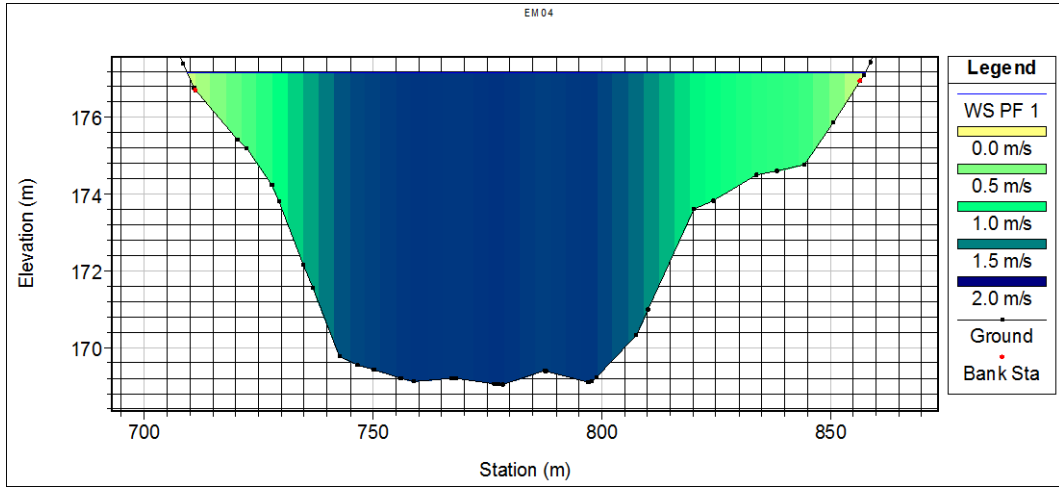


Sección EM03 – Calibración con HEC-RAS

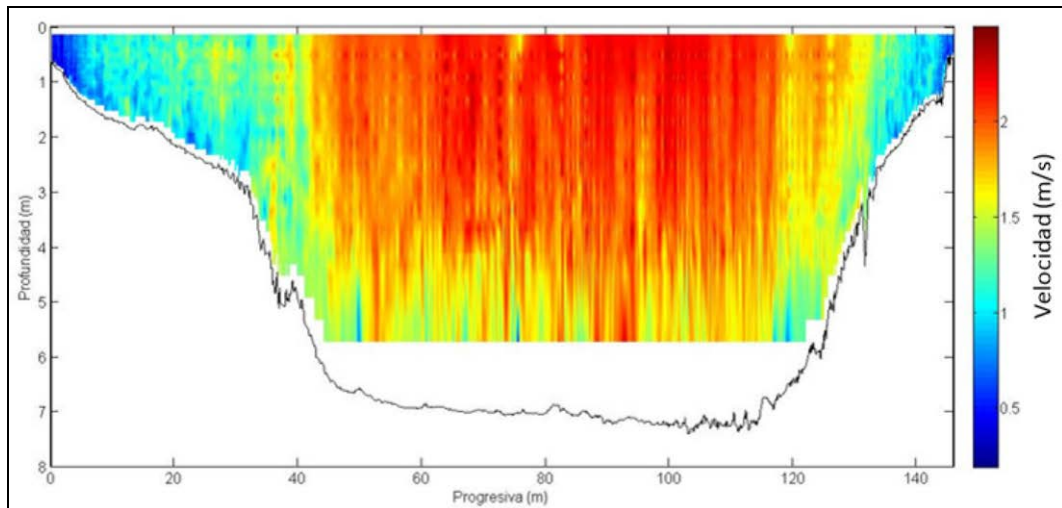


Sección EM03 – Medición con ADCP

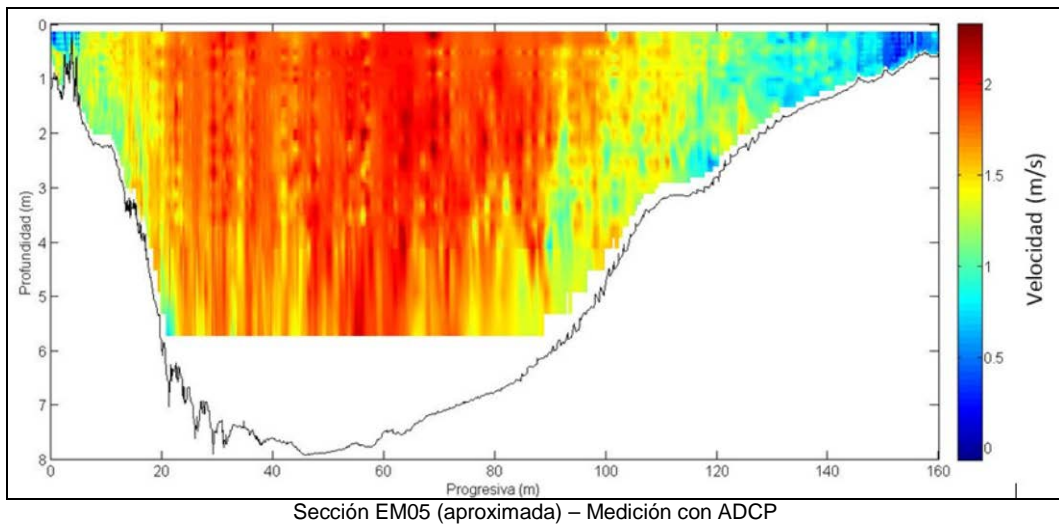
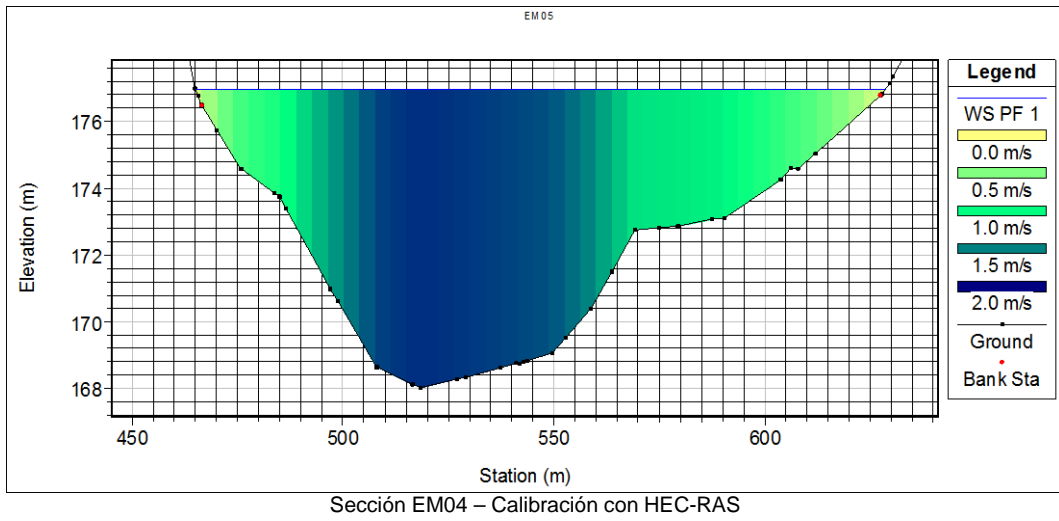


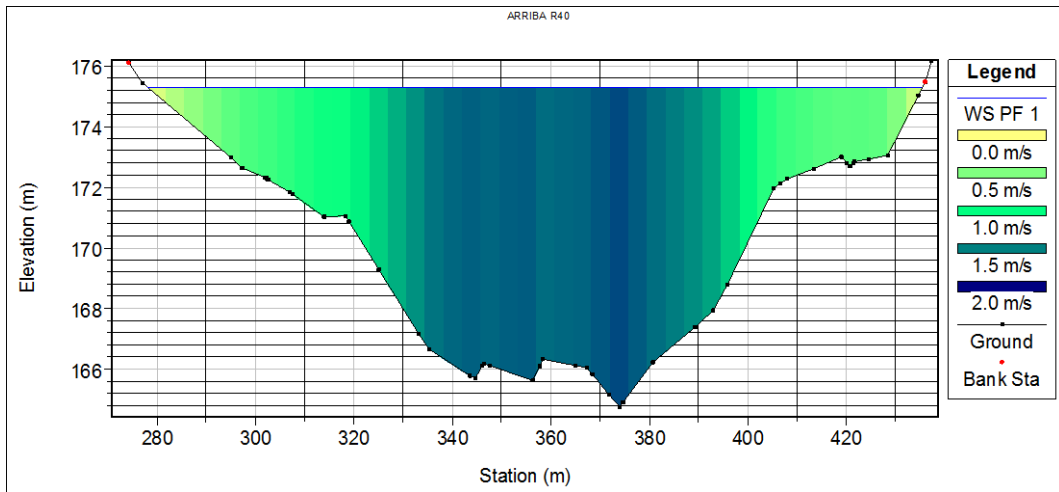


Sección EM04 – Calibración con HEC-RAS

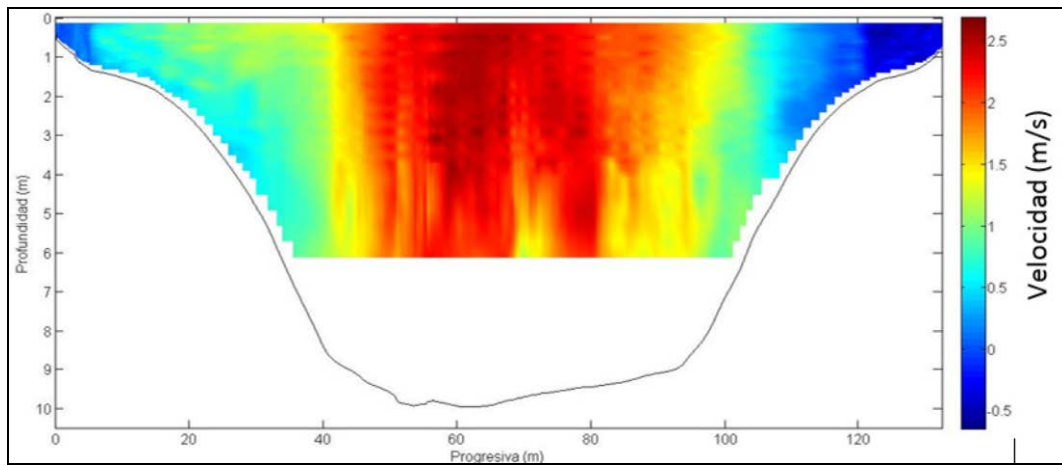


Sección EM04 (aproximada) – Medición con ADCP

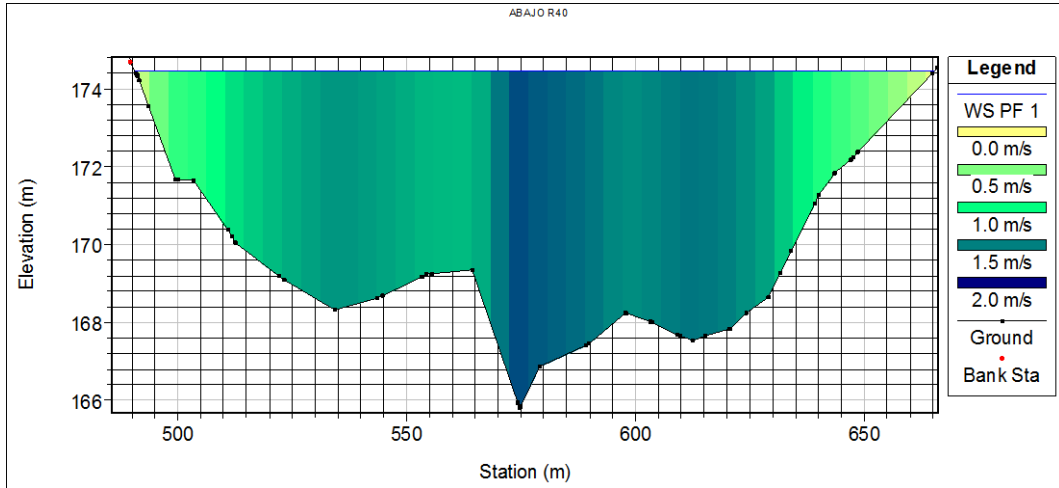




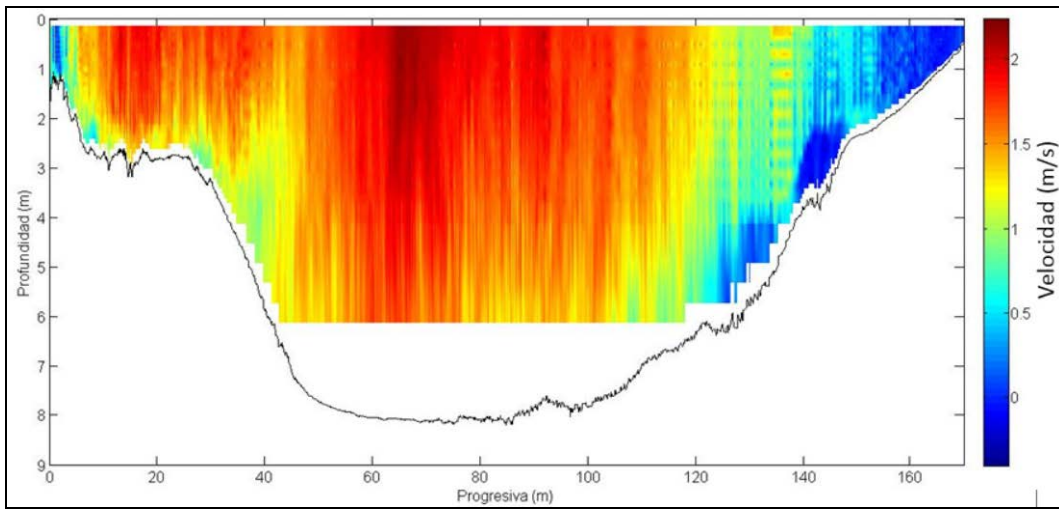
Sección Aguas Arriba puente RN40, Calibración con HEC-RAS



Sección Aguas Arriba puente RN40. Medición con ADCP



Sección Aguas Abajo puente RN40. Calibración con HEC-RAS.



Sección Aguas Abajo puente RN40. Medición con ADCP

## RESUMEN DE CALIBRACIÓN

Prog Inicio	Prog Fin	n Manning
0	3000	0.049
3000	20300	0.036

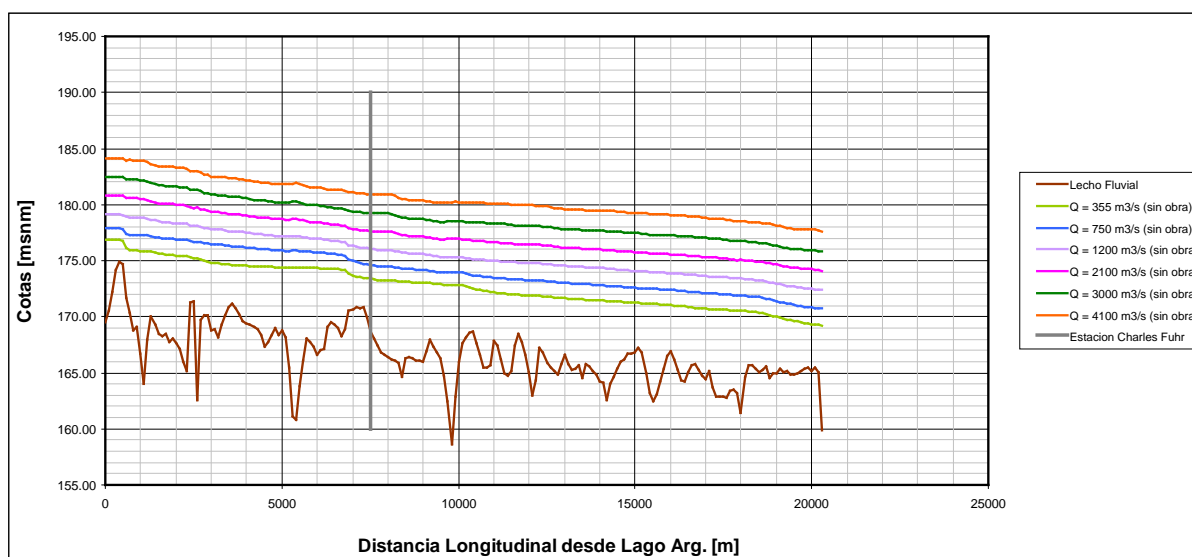
	Velocidad	Area	Caudal	Nivel
	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	m
Charles Fuhr MG	1.94	692	1339	
Charles Fuhr MG	1.80	666	1199	
Charles Fuhr MG	2.00	669	1334	
Charles Fuhr MG	1.76	660	1163	
Charles Fuhr MG	1.99	740	1473	
Charles Fuhr MG	1.72	683	1178	
<b>Promedio*</b>	<b>1.87</b>	<b>685</b>	<b>1281</b>	<b>176.19</b>
<b>HEC-RAS</b>	<b>1.60</b>	<b>745</b>	<b>1192</b>	<b>176.00</b>

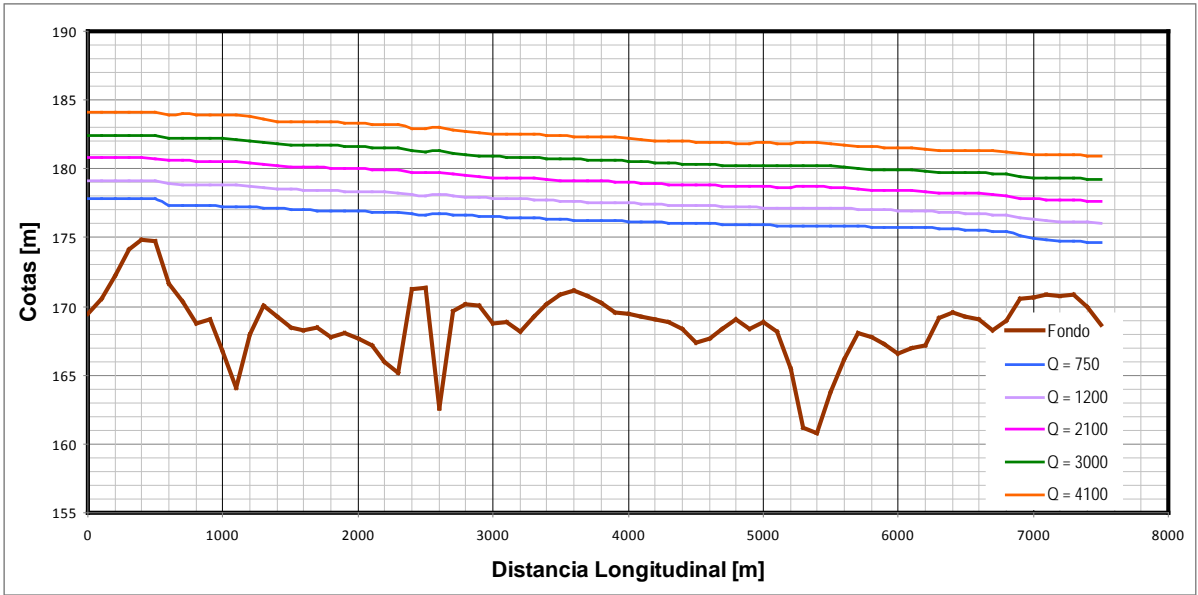
LAGO ARG.	Nivel
Medición	179.05
<b>HEC-RAS</b>	<b>179.05</b>

\* tomado de cero de escala mas nivel escala de (176.17 + 4.02)

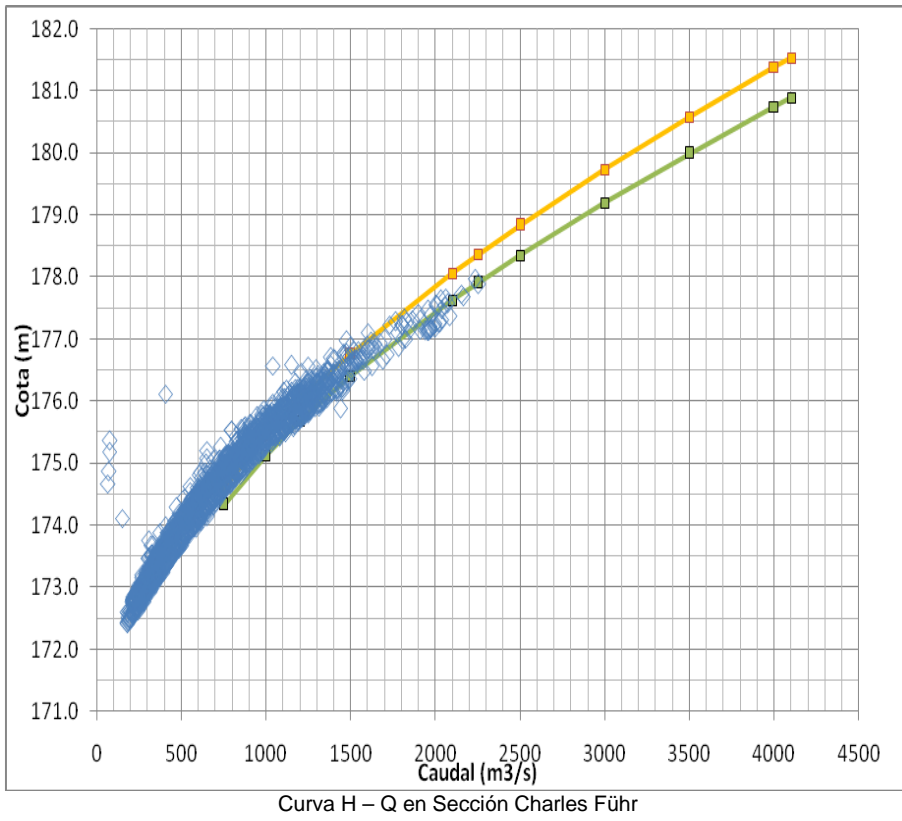
Medición topográfica: MD: 176.09 m ; MI: 176.13 m ; Centro: 175.99 m.

En la gráfica siguiente se presenta un resumen de los resultados obtenidos con la calibración y explotación del modelo HEC RAS para los escenarios analizados.

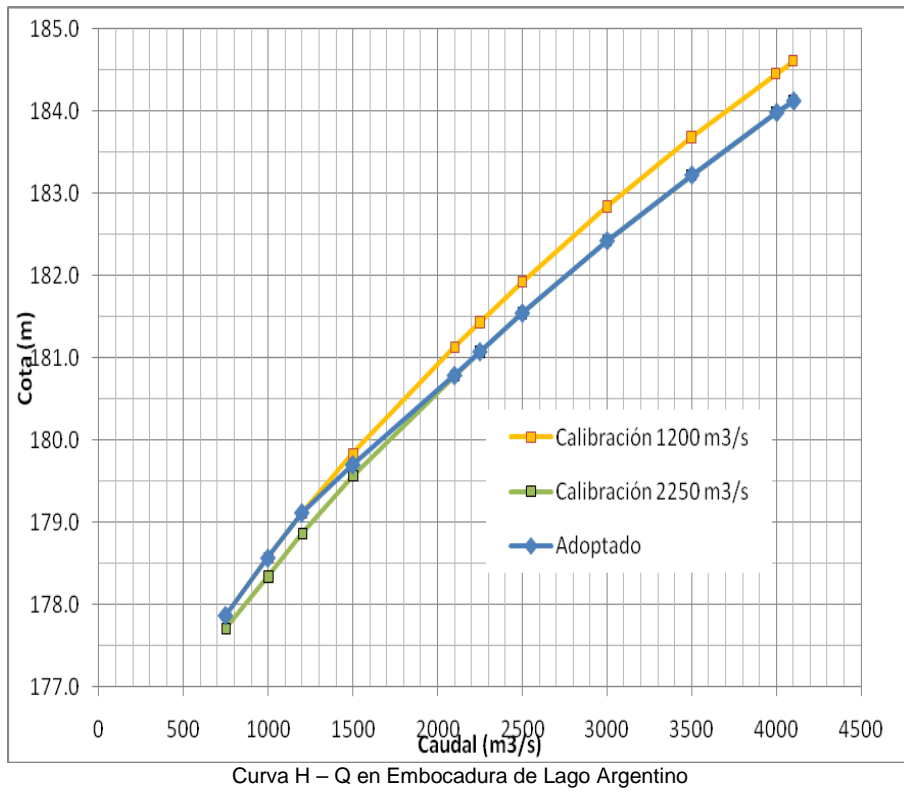




Perfiles Hidráulicos simulados con HECRAS para el tramo en estudio del Río Santa Cruz



Curva H – Q en Sección Charles Führ



## **Resultados de la Modelación 2D en área de Embocadura y tramo inicial del Río Santa Cruz**

La calibración del modelo 2D se llevó a cabo ajustando tanto el valor del coeficiente de rugosidad de Manning como del coeficiente de viscosidad turbulenta, comparando los resultados con las mediciones en campo del grupo del CETA-UNC (niveles y velocidades en diferentes estaciones de medidas).



Estaciones de medida con relevamientos de niveles y velocidades del grupo CETA-UNC.

Antes de calibrar los modelos fue necesario realizar una fase de búsqueda del tamaño óptimo de la malla, correctas condiciones iniciales (nivel de "todo mojado") y paso de tiempo. Las condiciones óptimas se obtuvieron siguiendo los siguientes criterios:

- a) Estabilidad de la solución ( $\Delta t$  adecuado y  $\Delta x$  adecuado)
- b) Equivalencia de la solución al aumentar el refinamiento de la mallas ( $\Delta x$  adecuado)
- c) Optimización de los tiempos de cálculo (Condición Inicial y velocidad de descenso de niveles óptimas compatiblemente con (a) y (b))

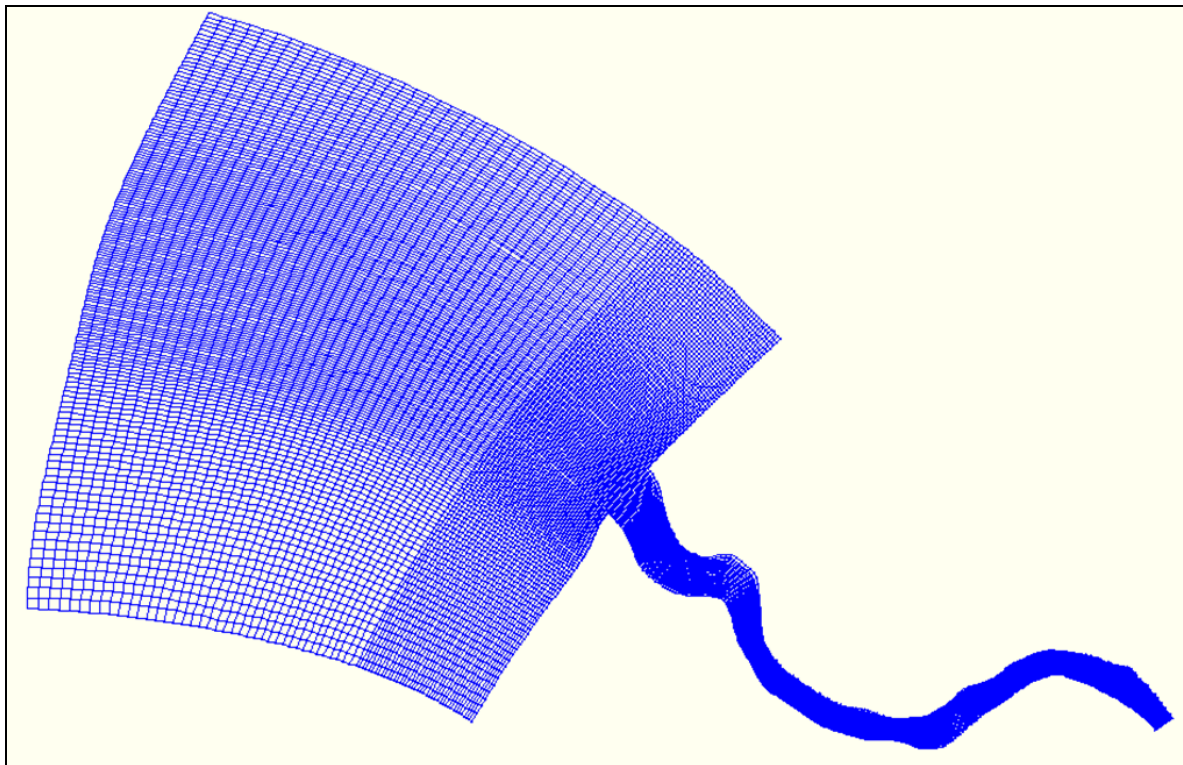
Manteniendo un valor de  $v_t=1$  se probaron coeficientes de Manning desde 0.030 a 0.050. Se compararon los niveles obtenidos en el lago con los obtenidos con el Modelo 1D.

Finalmente, a partir de las estimaciones del  $n$  de Manning medido en campo, se eligieron las combinaciones de  $n$  y viscosidad turbulenta entre los límites 1 a 10 que dieran los mismos resultados. Se calibró el modelo con las velocidades y los niveles medidos en campo.

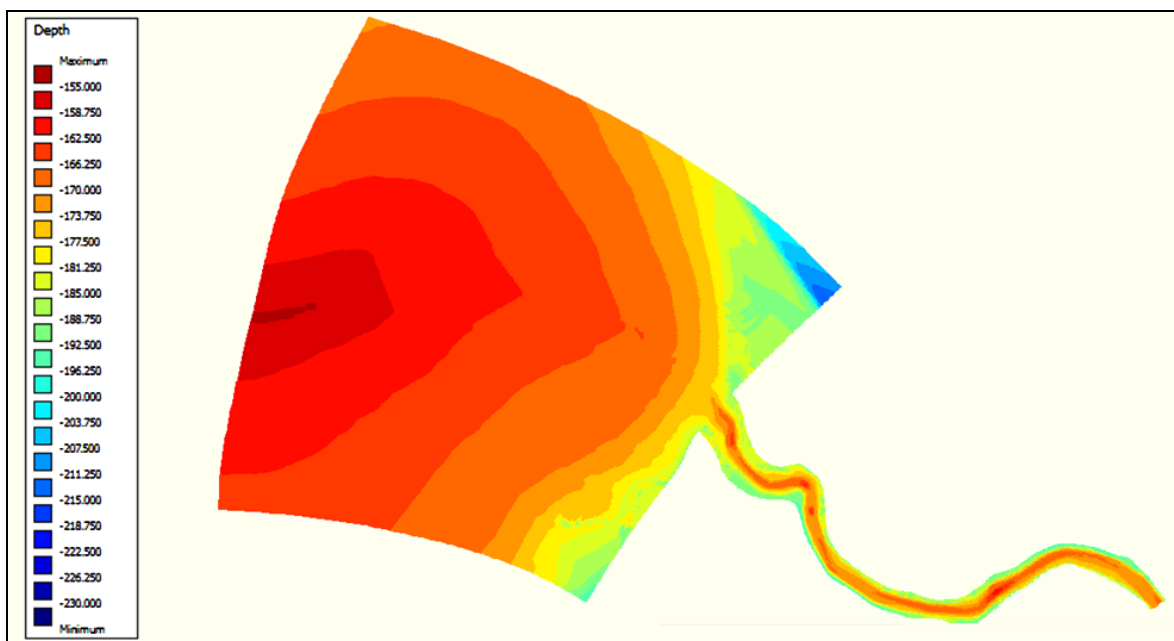




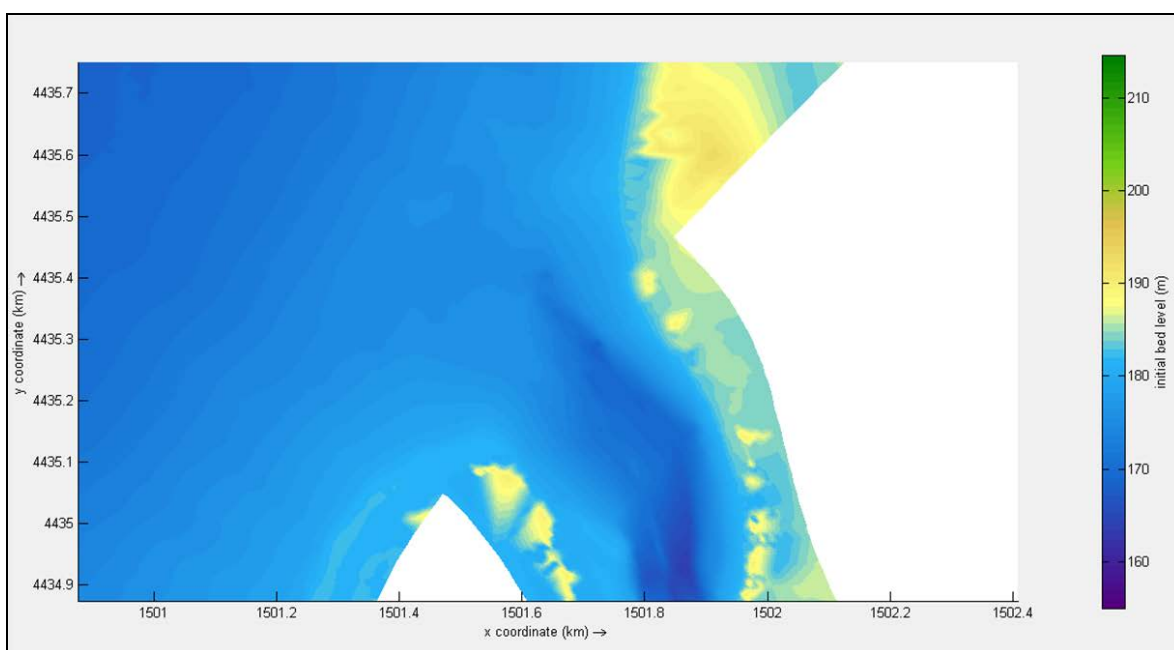
Dominio de cálculo desde el lago hasta la estación Charles Führ



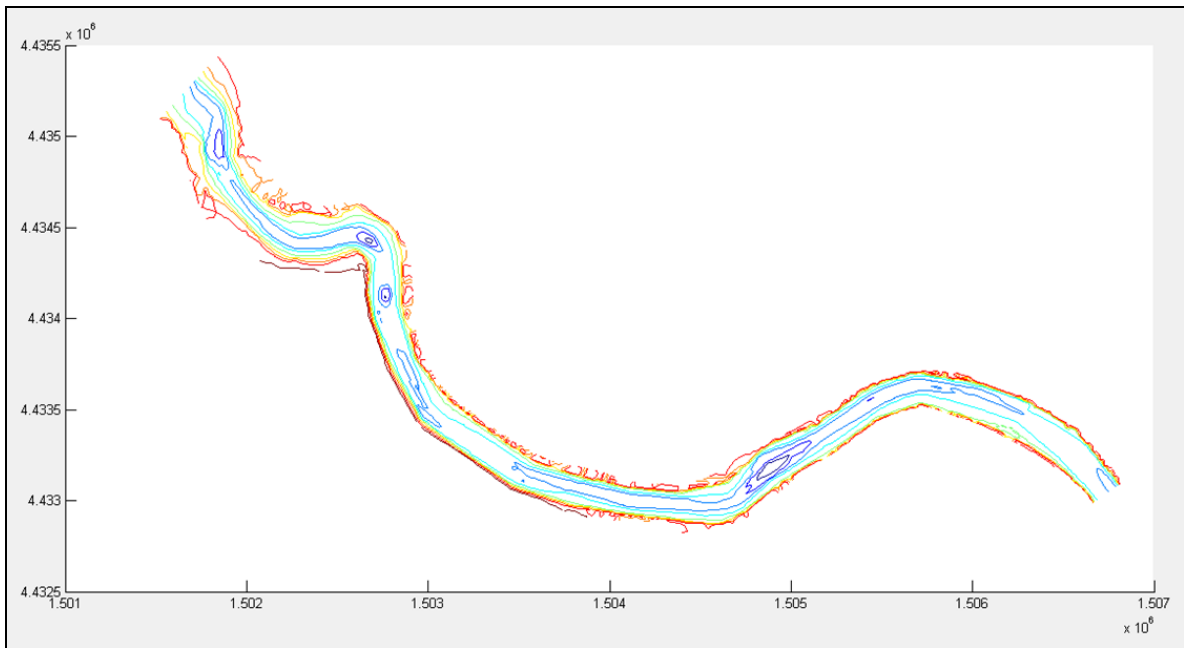
Malla de Calibración inicial (resolución máxima: Lago=20m; Río=6m) (N° Elementos= 12000 + 8400)



DEM elaborado para el área de embocadura y tramo inicial del río

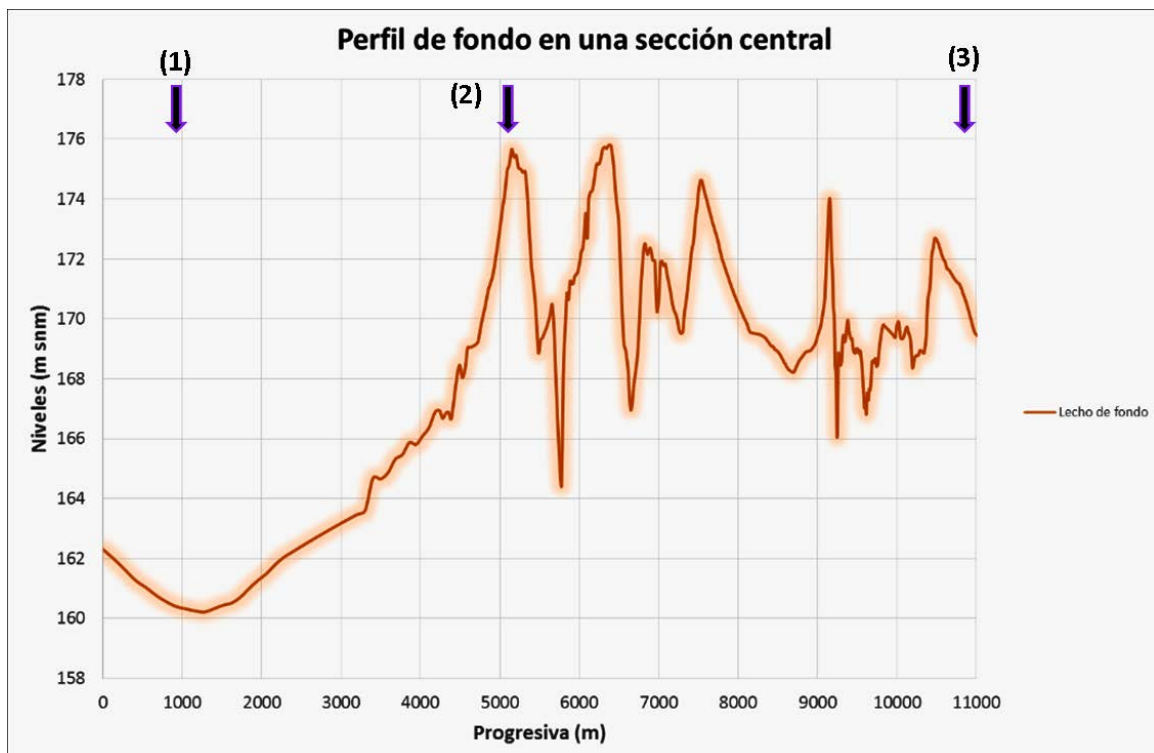
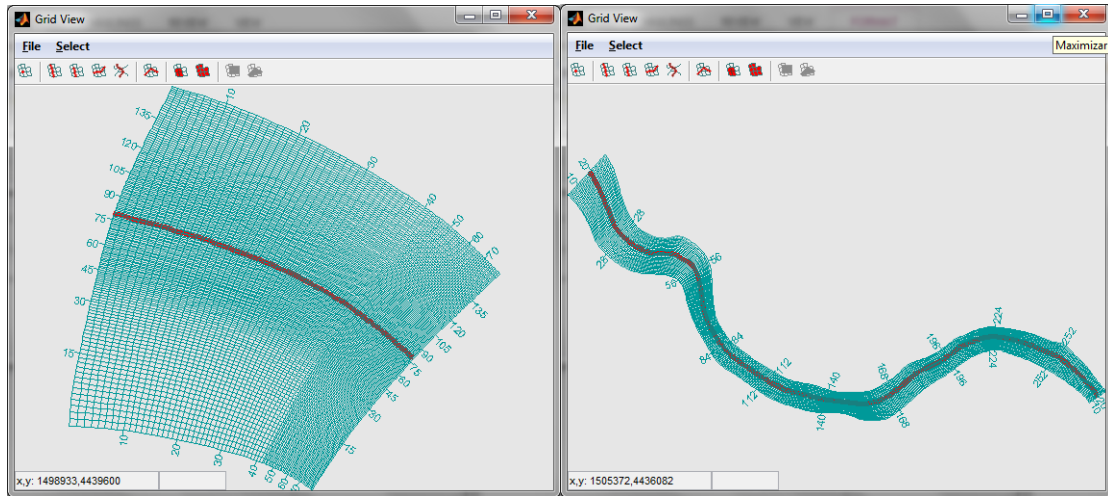


Detalle de elevaciones características en el área de la embocadura

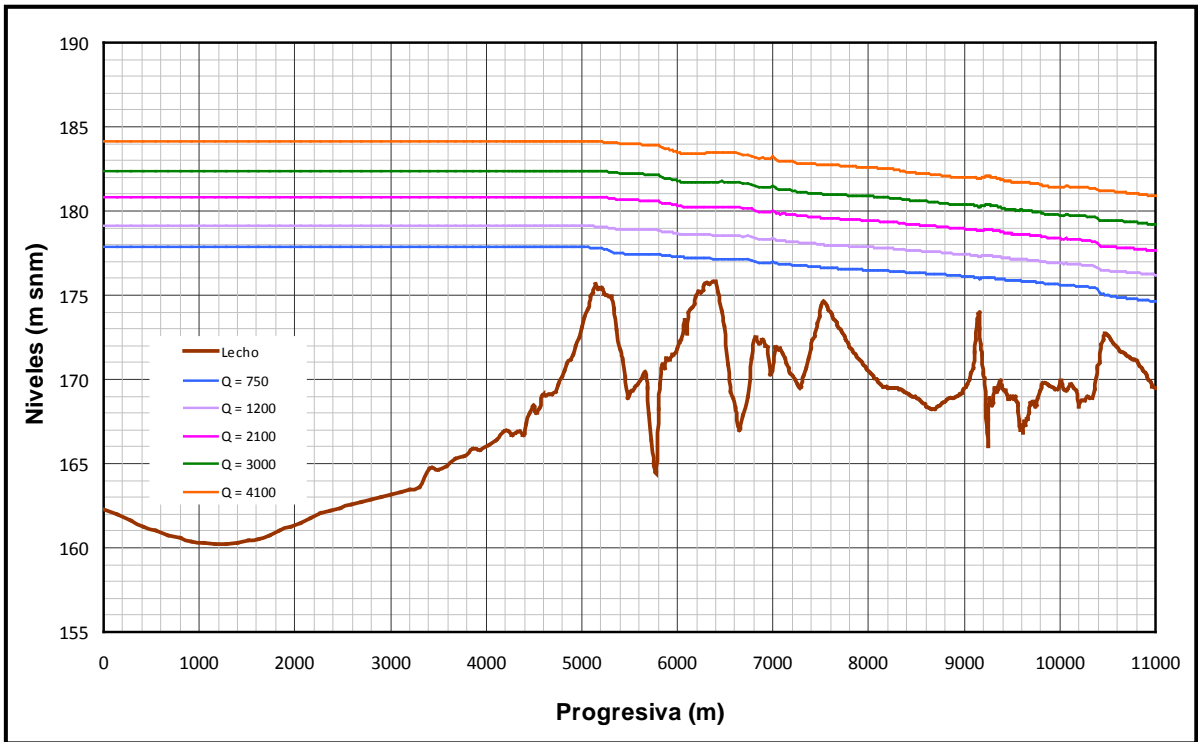


Topo-batimetría del cauce en su tramo inicial

## Resumen de Niveles asociados a Caudales

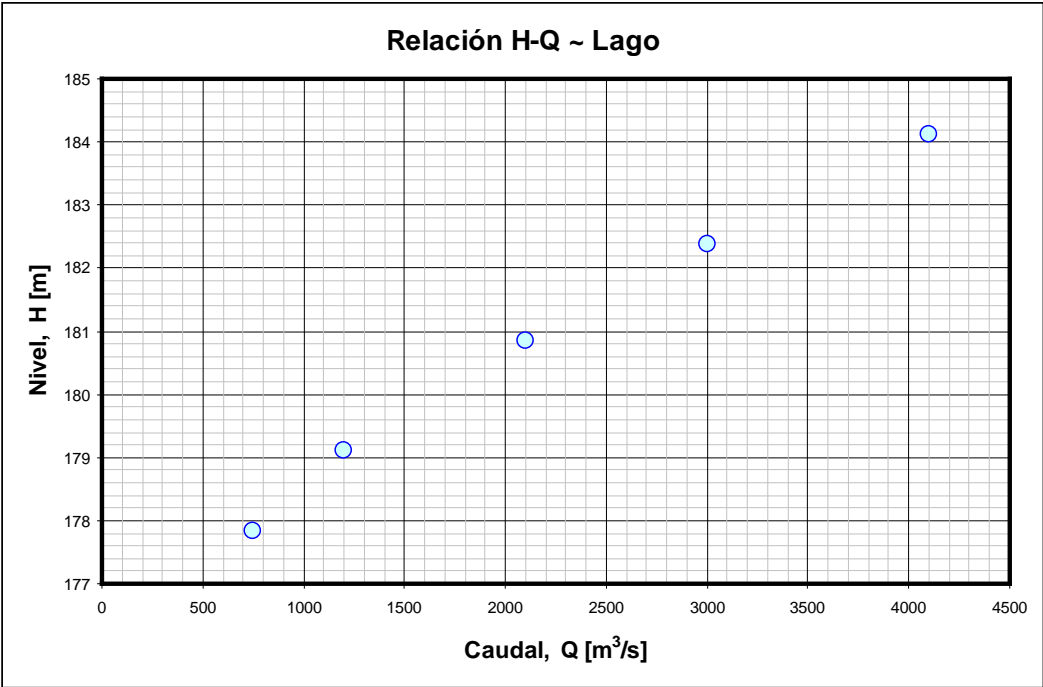


Perfil longitudinal del fondo a lo largo del thalweg de la zona de la embocadura. Se indican las secciones características para determinar puntos de las curvas H-Q: (1) Lago; (2) Embocadura; (3) Charles Führ.

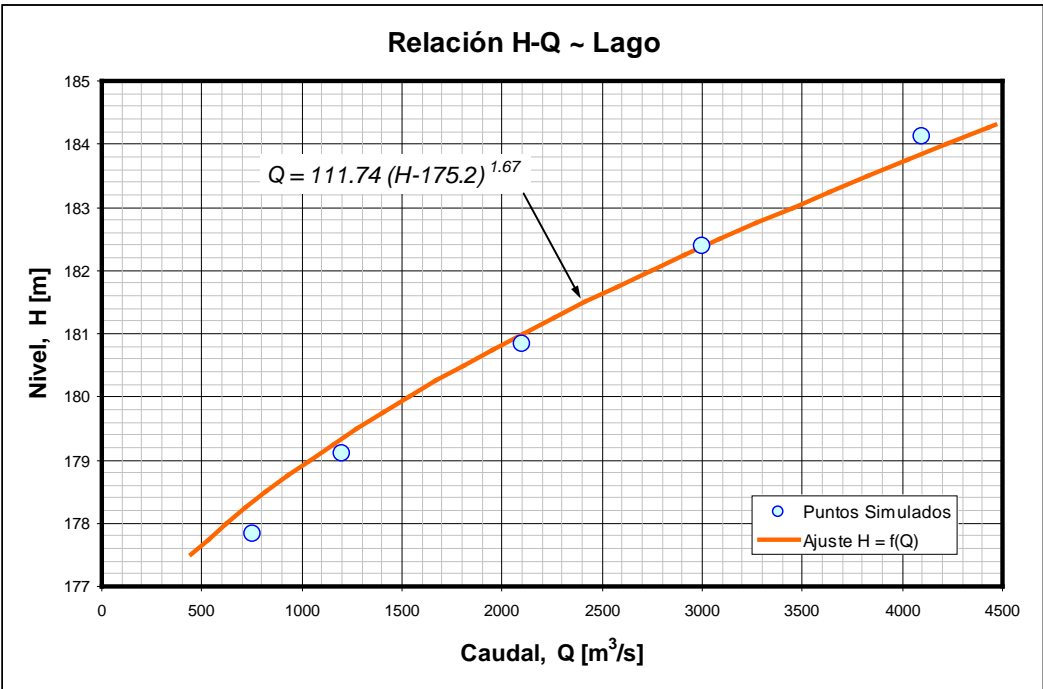


Niveles de la superficie libre a lo largo del thalweg

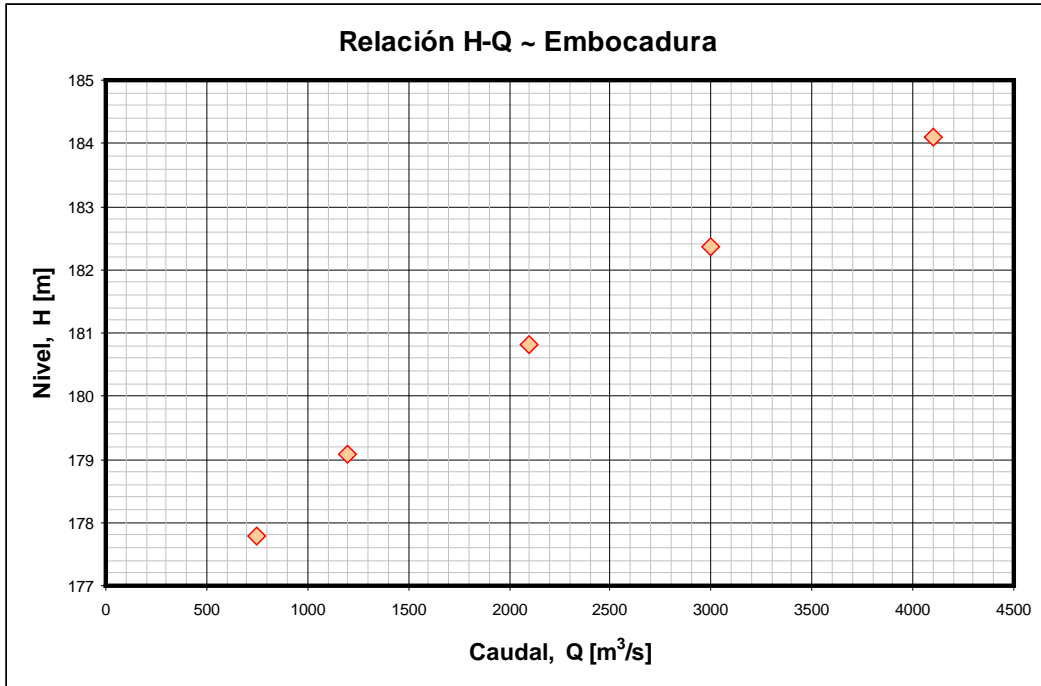
# Curvas de Descarga H-Q



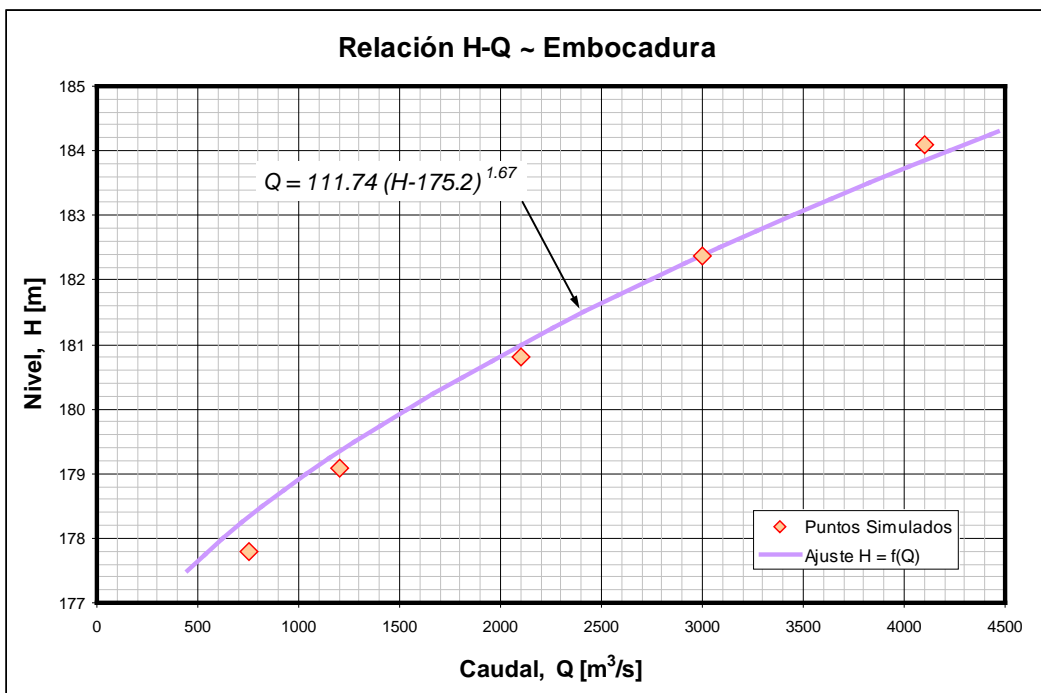
Puntos H-Q en la sección "1" (Lago)



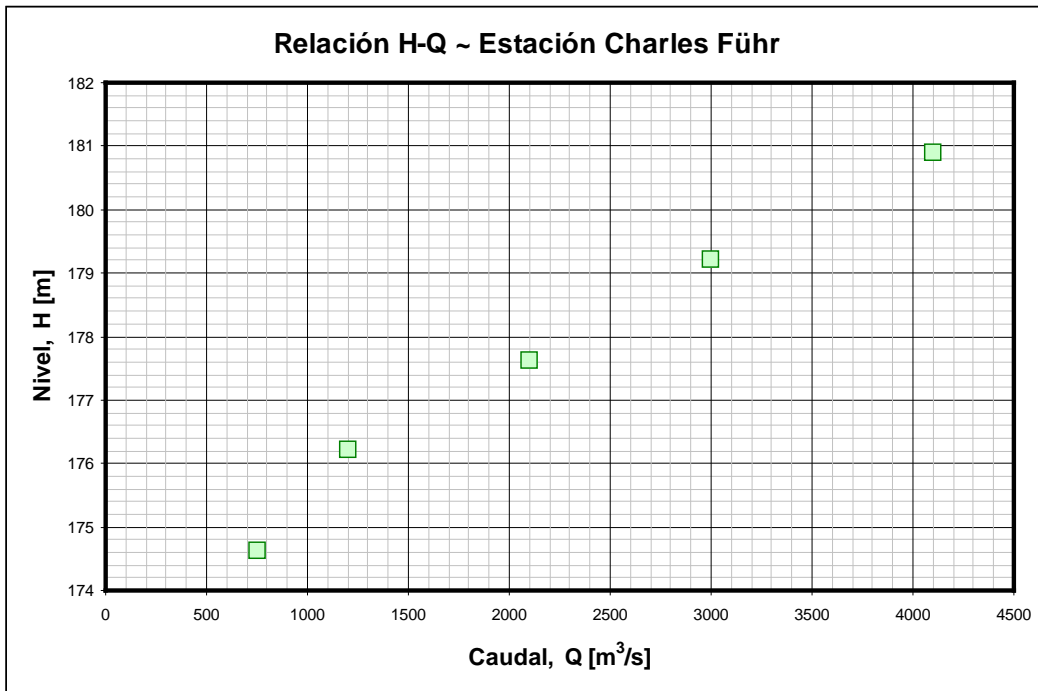
Curva H-Q ajustada para la sección "1".  $Q=111.74(H-175.2)^{1.67}$



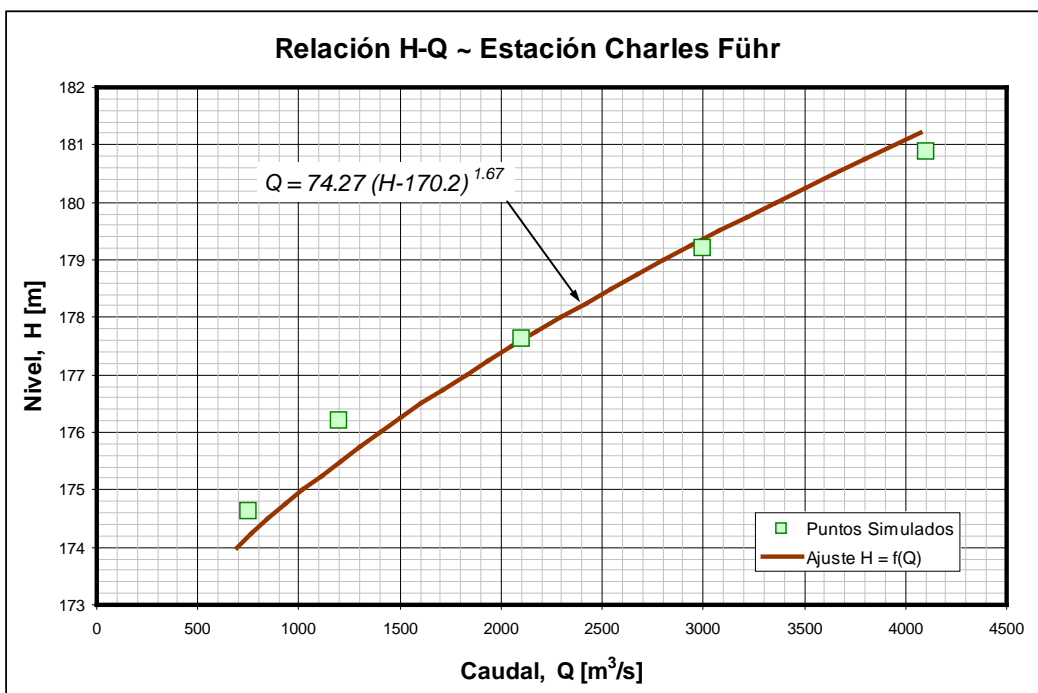
Puntos H-Q en la sección "2" (Embocadura)



Curva H-Q ajustada para la sección "2".  $Q=111.74(H-175.2)^{1.67}$



Puntos H-Q en la sección "3" (Estación Charles Führ)

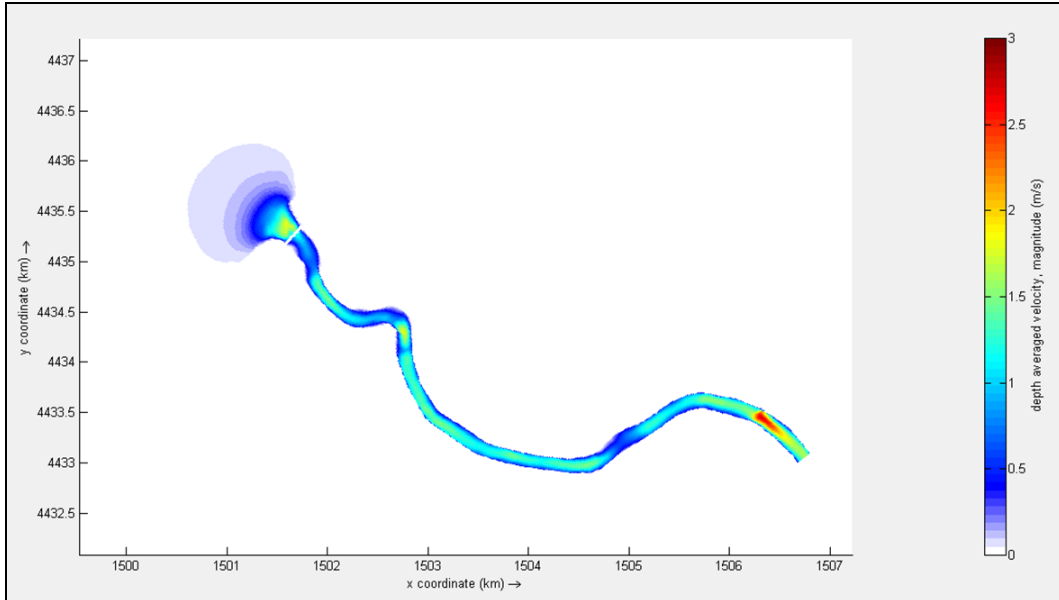


Curva H-Q ajustada para la sección "3".  $Q=74.27(H-170.2)^{1.67}$

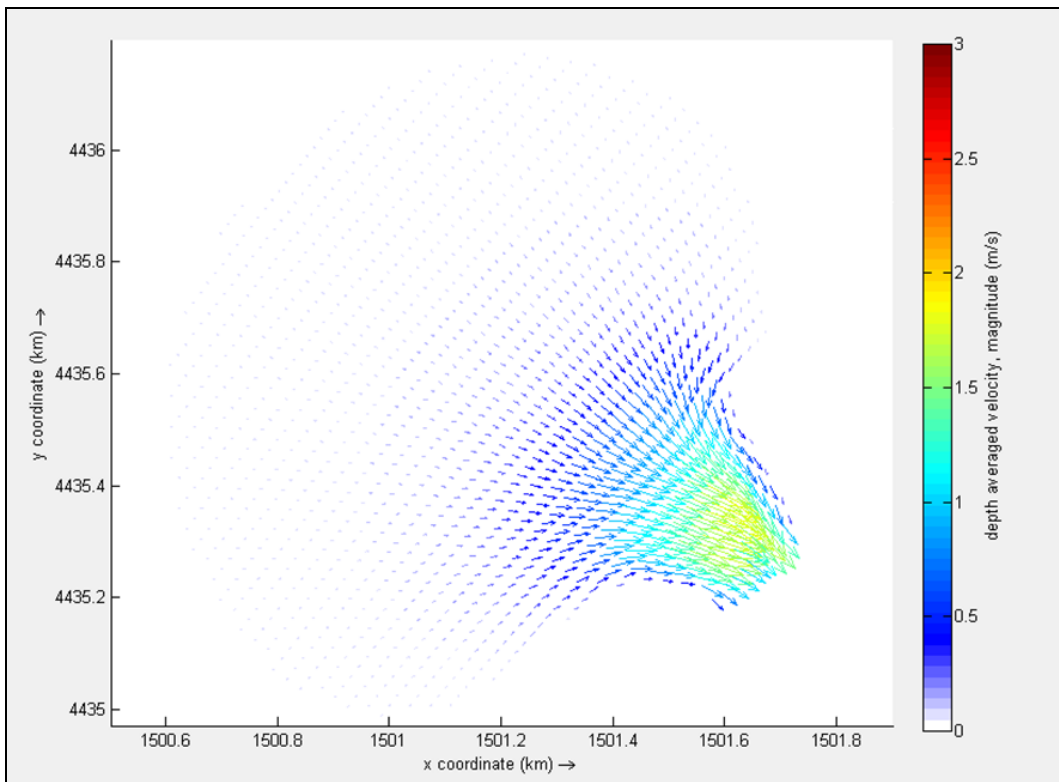


## Análisis de Sensibilidad para casos particulares (efecto de caudales, rugosidades y difusividades)

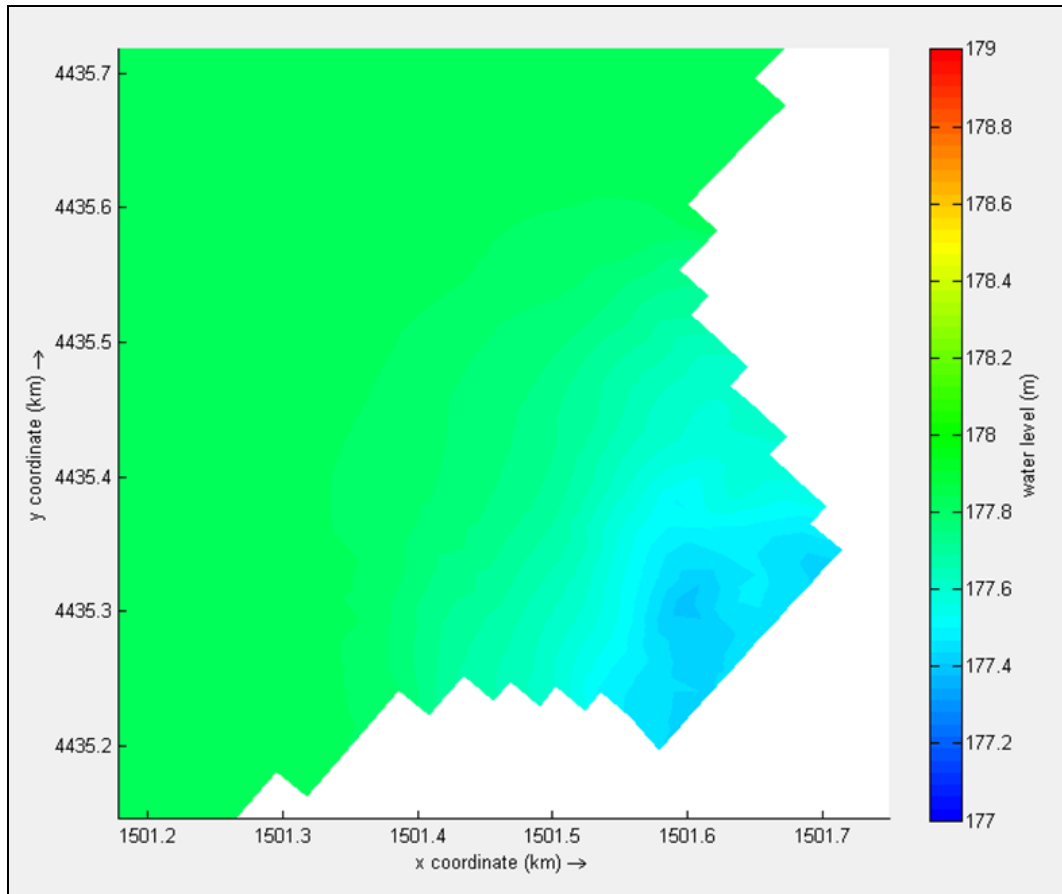
$Q=750$  -  $n=0.035$  ;  $v_{tH}=6$



Velocidades promediadas para la totalidad del tramo simulado

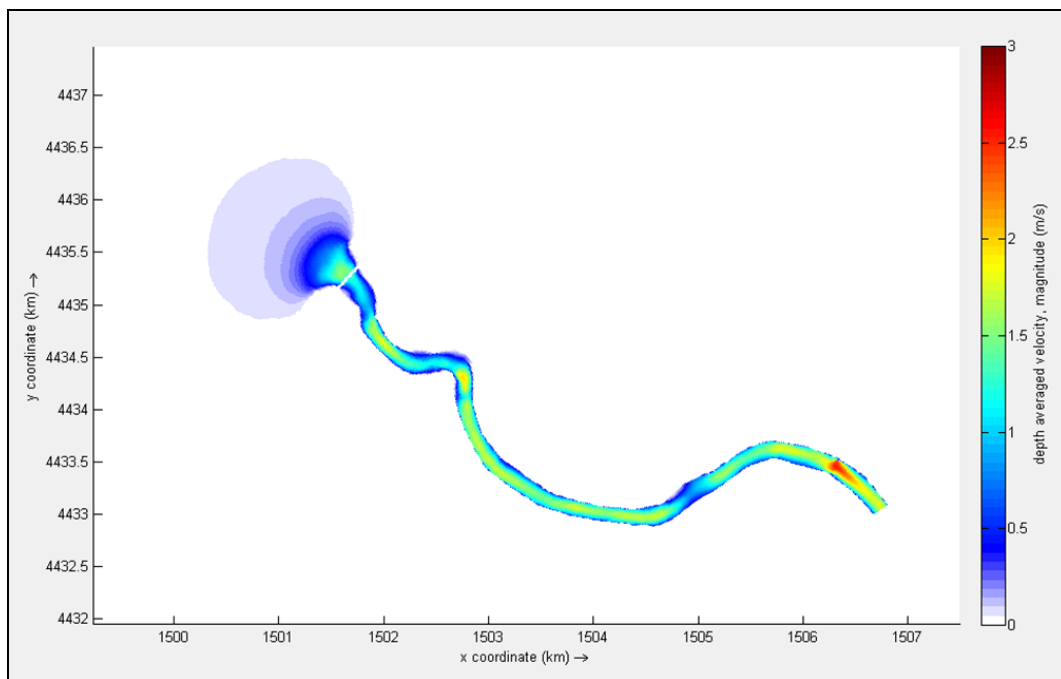


Campo vectorial de velocidades promediadas en la embocadura

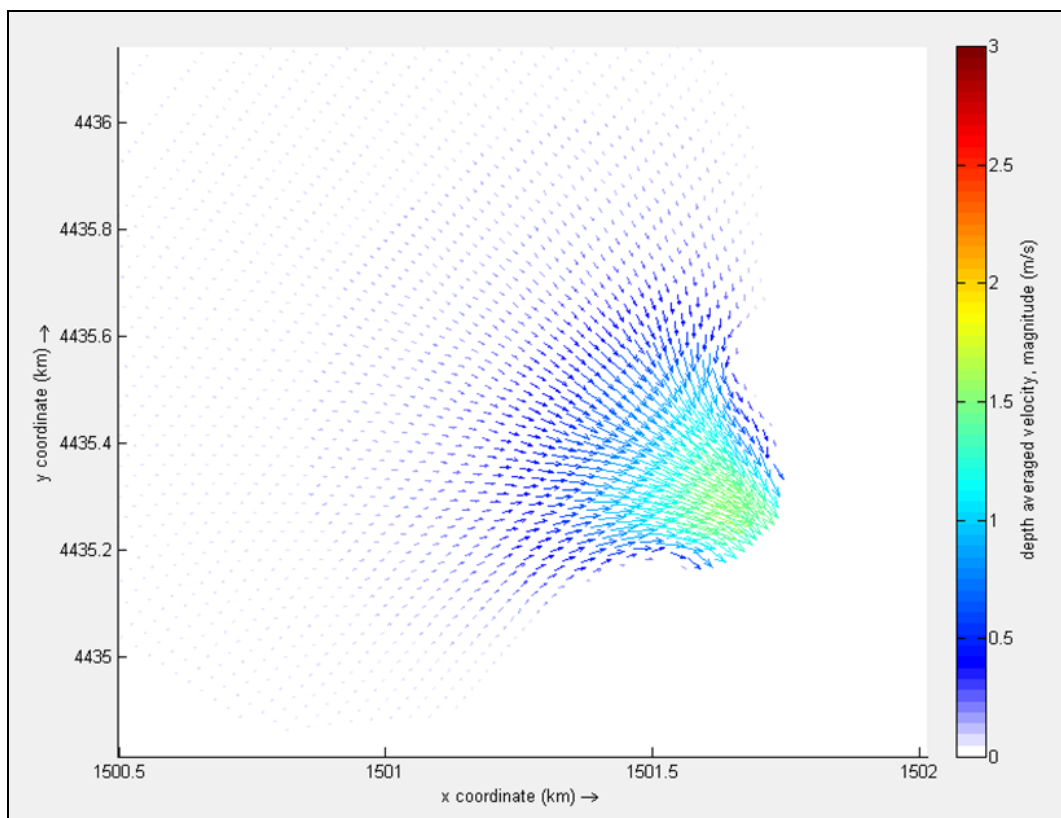


Niveles en la embocadura

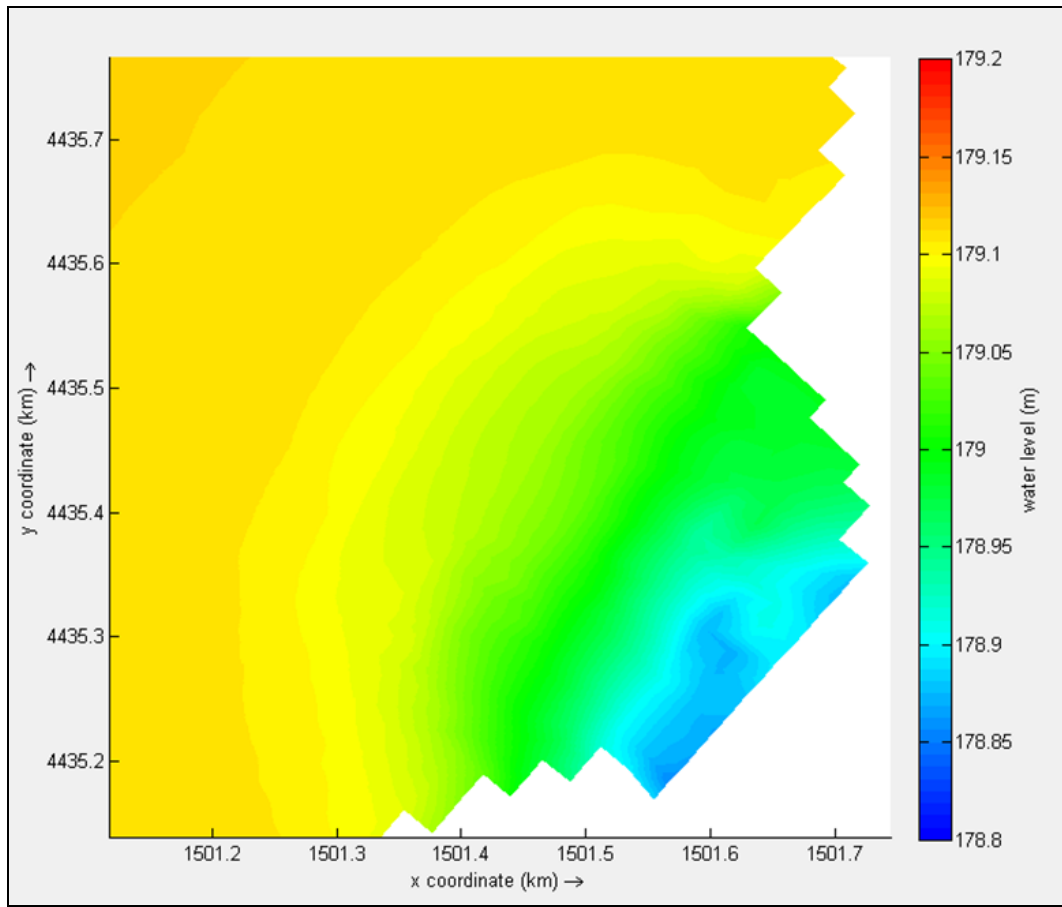
$Q = 1200 - n = 0.035 ; v_{tH} = 6$



Velocidades promediadas en la vertical a lo largo del tramo analizado

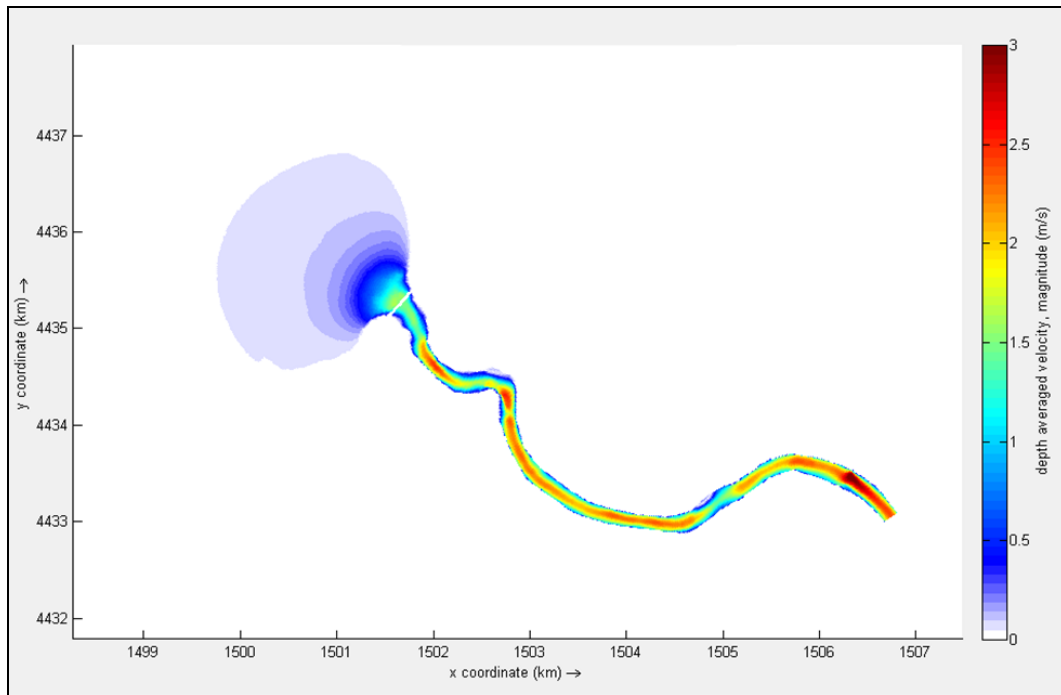


Velocidades promediadas en la embocadura: vectores

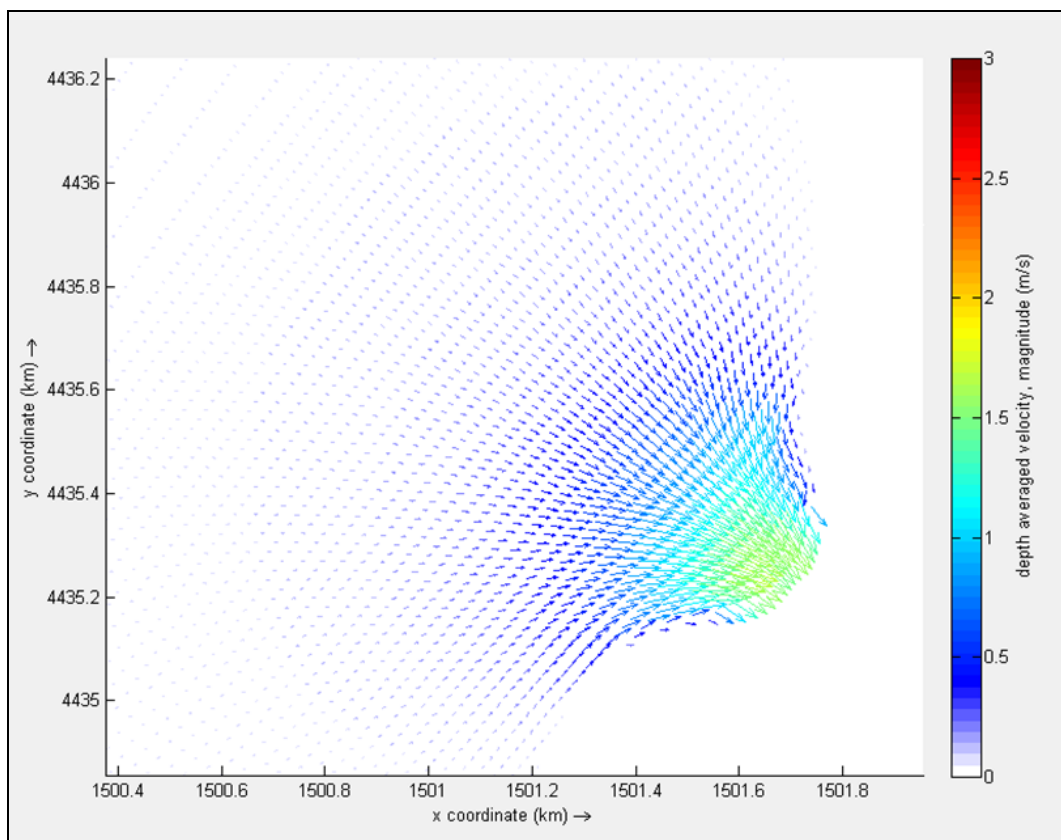


Niveles en la embocadura

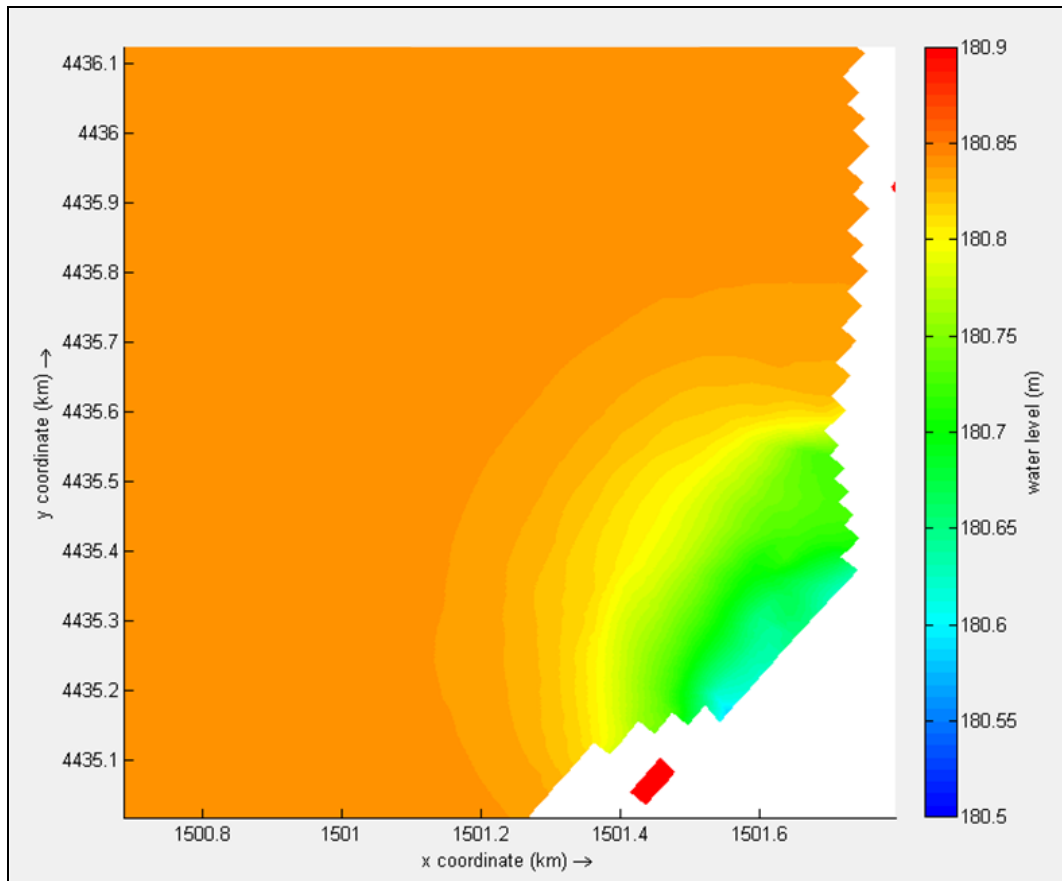
$Q = 2100 - n = 0.035$  ;  $v_{tH} = 3$



Campo vectorial de velocidades promediadas para todo el tramo

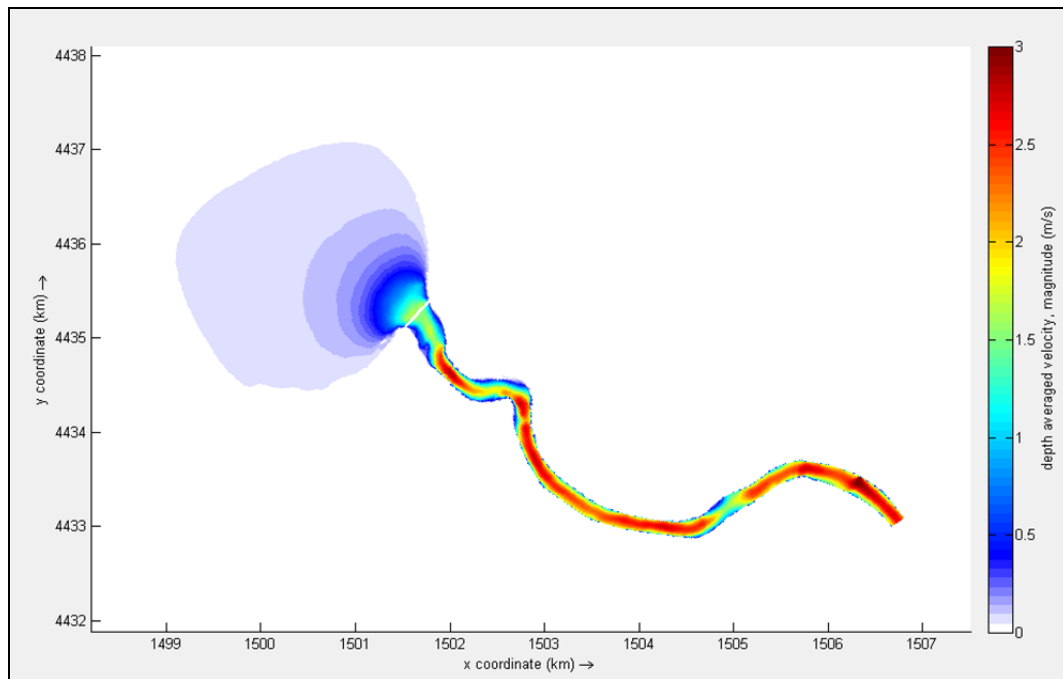


Velocidades promediadas en la embocadura: vectores

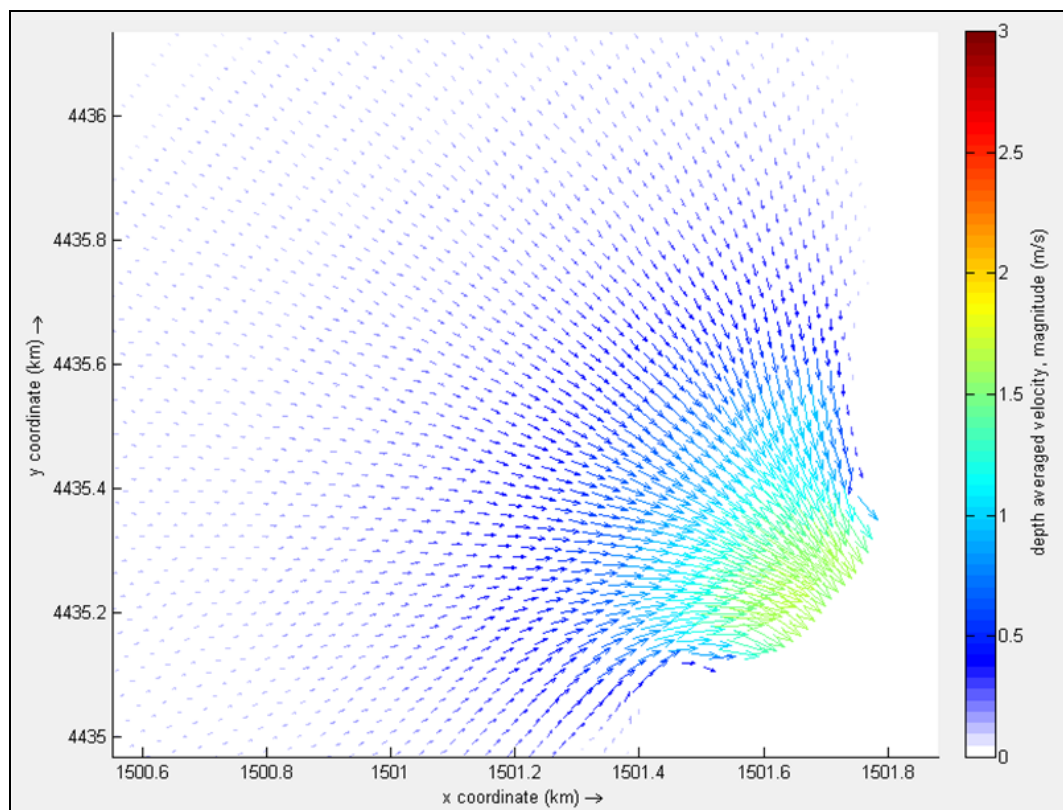


Niveles en la embocadura

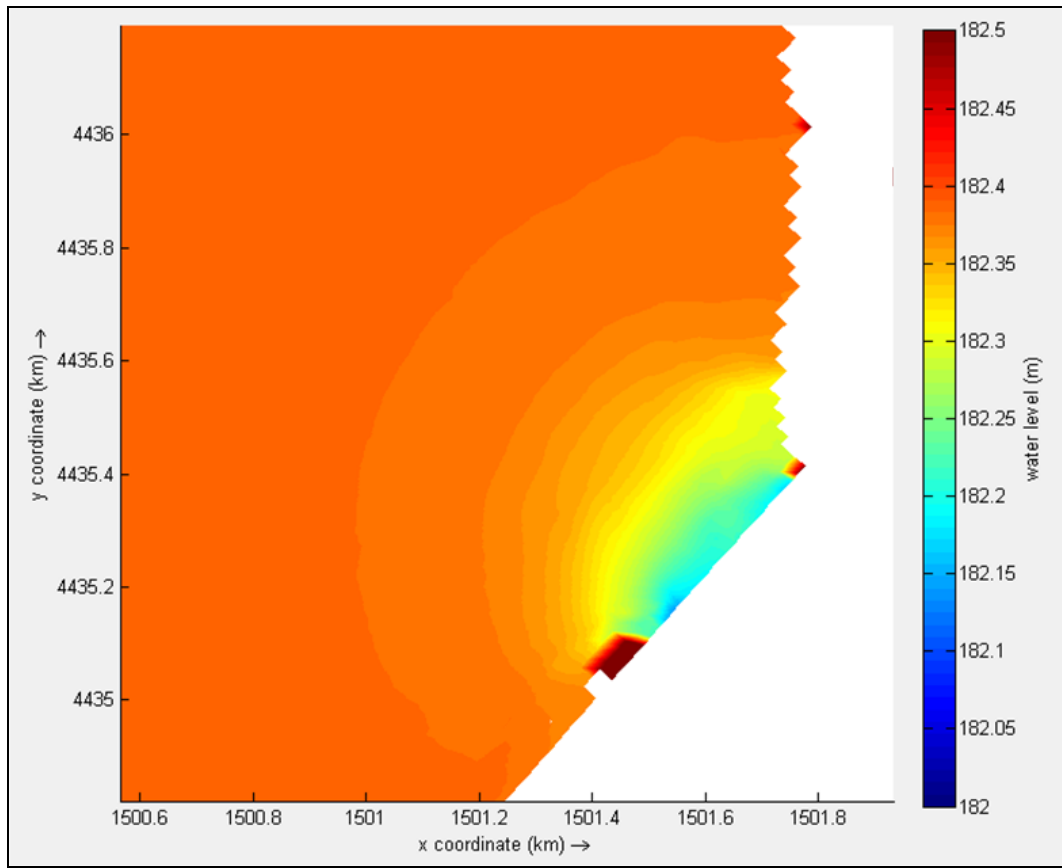
$Q = 3000 - n = 0.03 ; v_{tH} = 6$



Campo vectorial de velocidades promediadas para todo el tramo



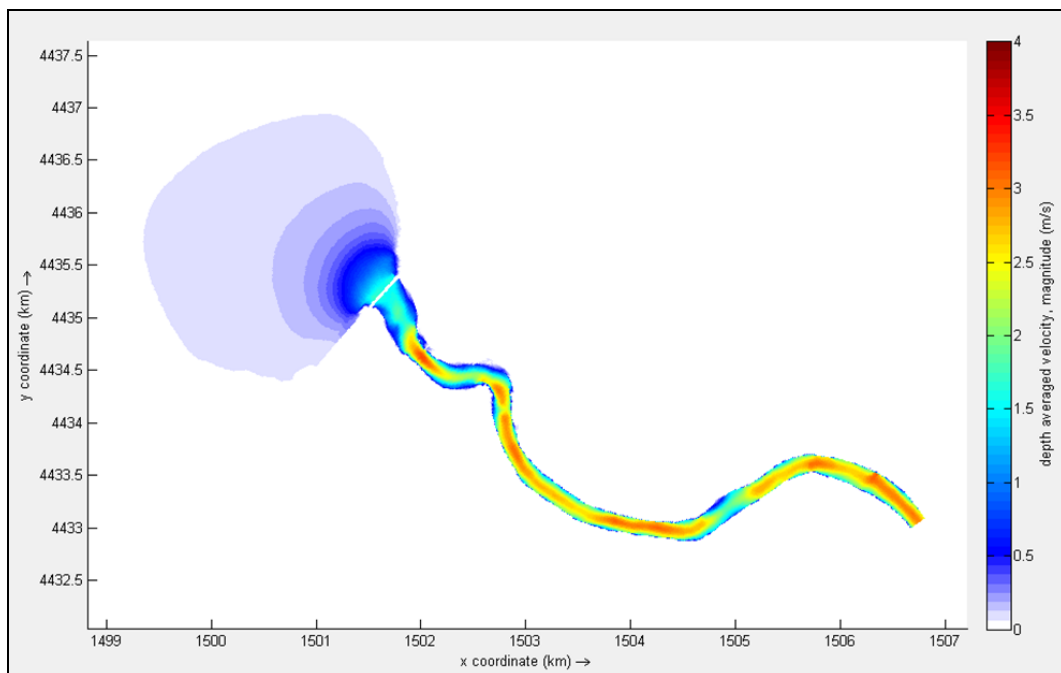
Velocidades promediadas en la embocadura: vectores



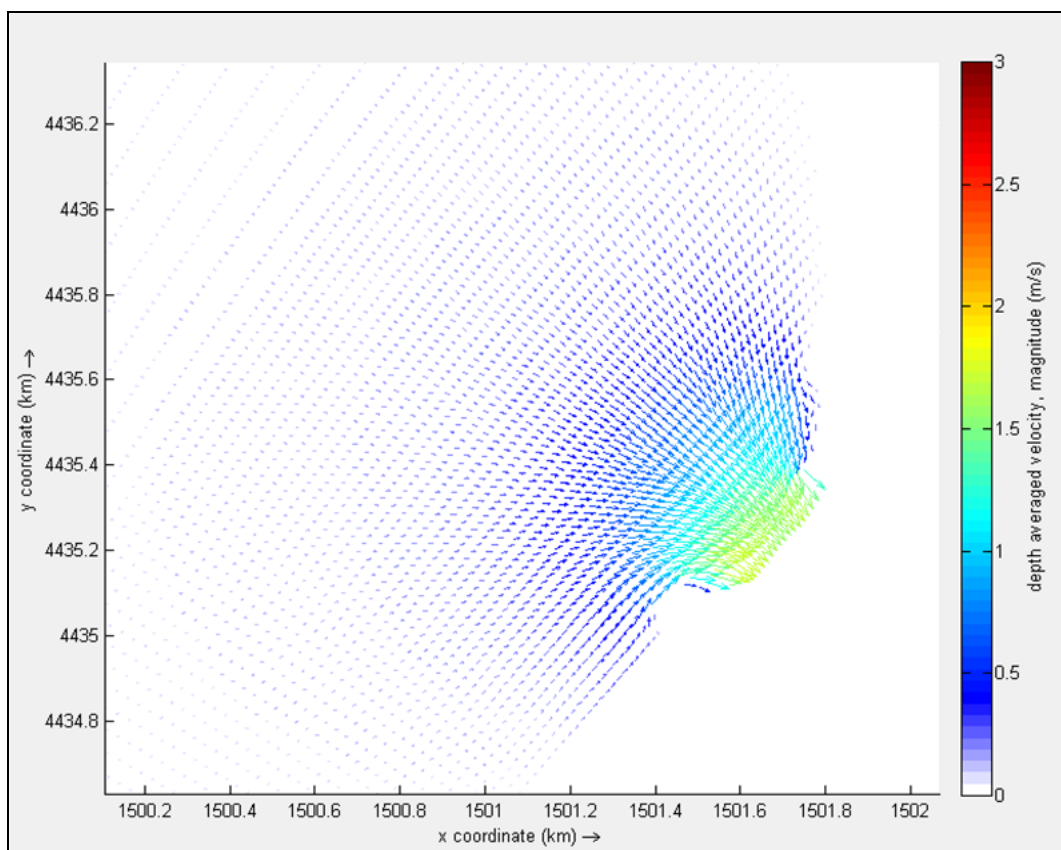
Niveles en la embocadura



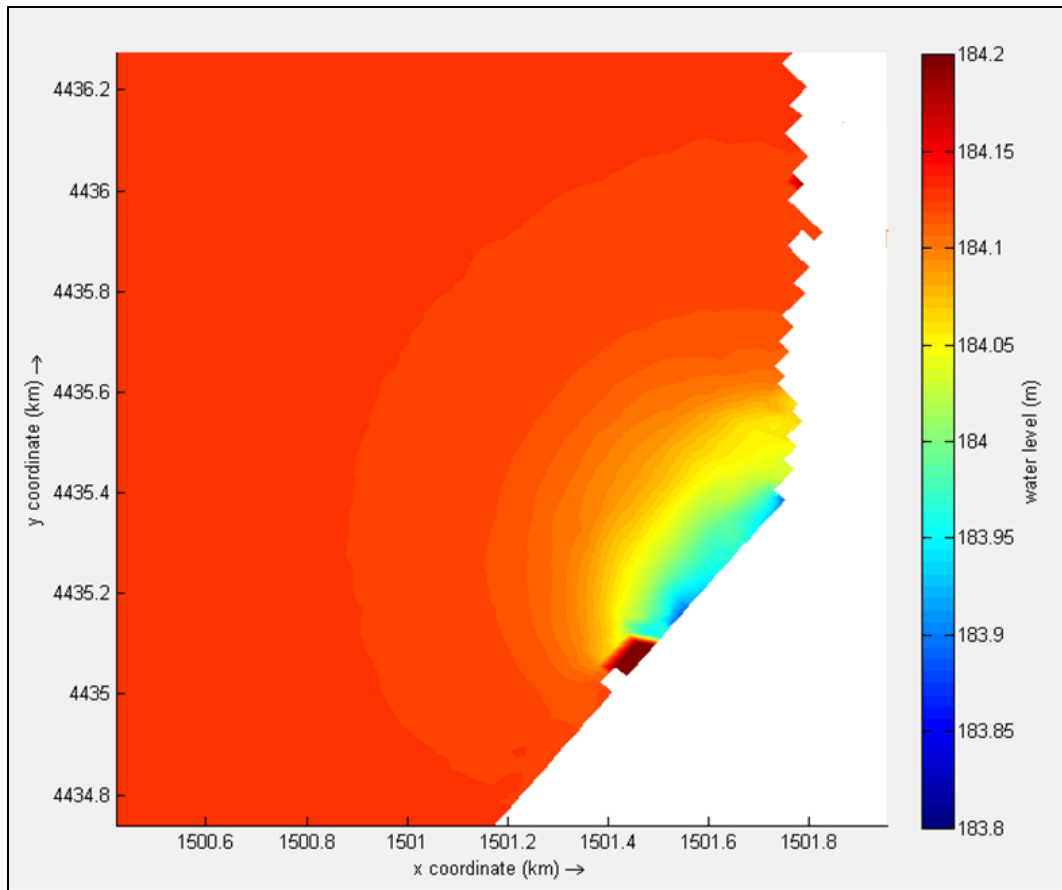
$Q = 4100 - n = 0.03 ; v_{tH} = 6$



Campo vectorial de velocidades promediadas para el tramo



Velocidades promediadas en la embocadura: vectores



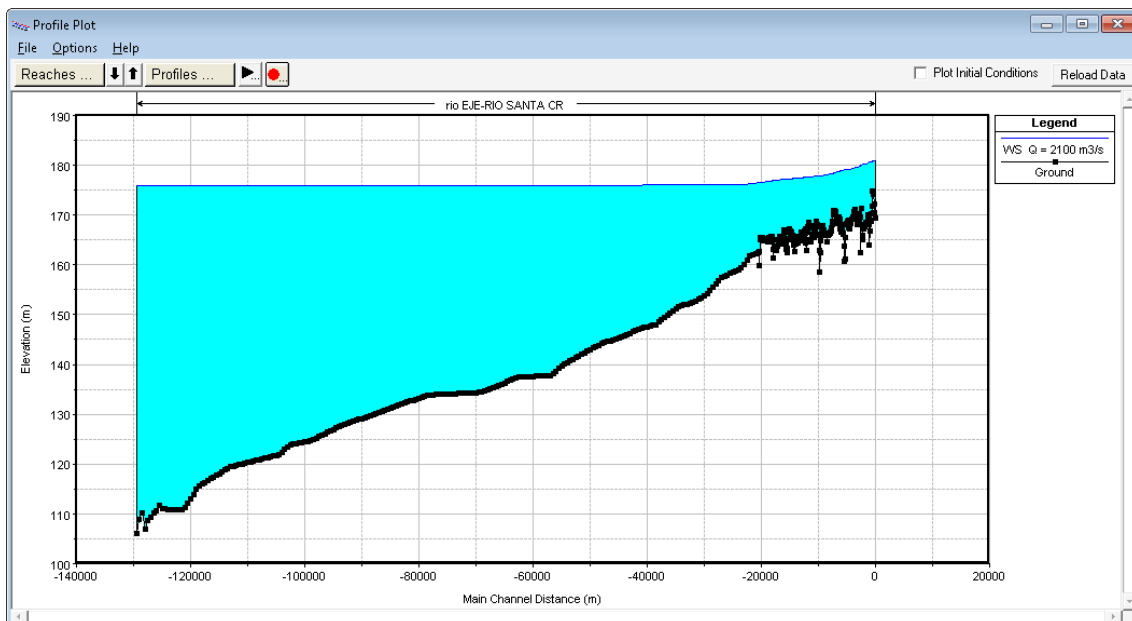
Niveles en la embocadura

## Evaluación y análisis de resultados (Fase 2, “con obra”)

### **Resultados de la Modelación 1D en área de Embocadura y tramo inicial del Río Santa Cruz, inmediatamente aguas abajo del Lago Argentino**

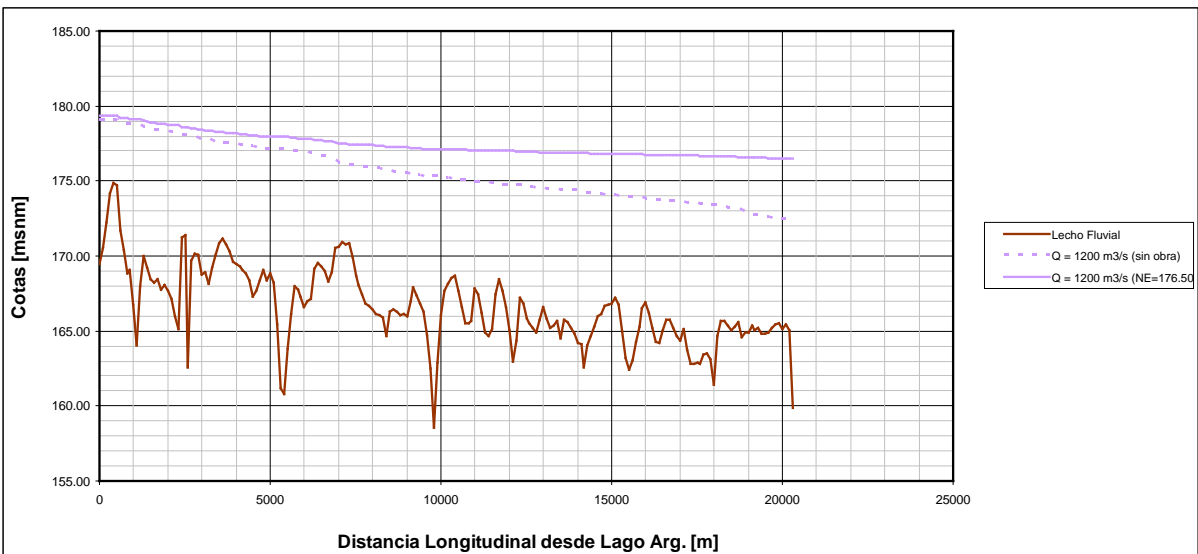
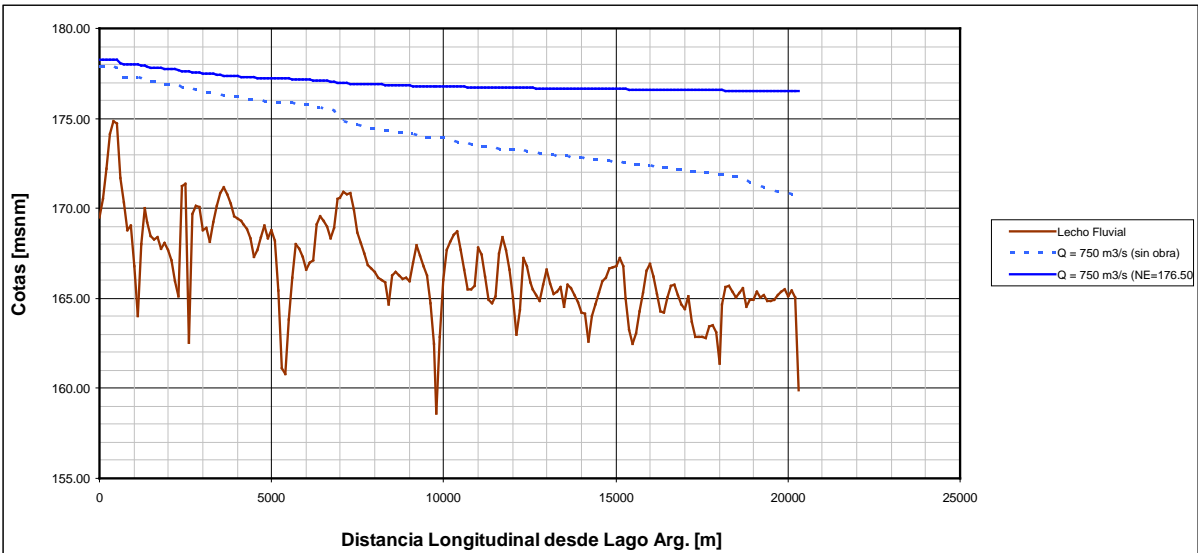
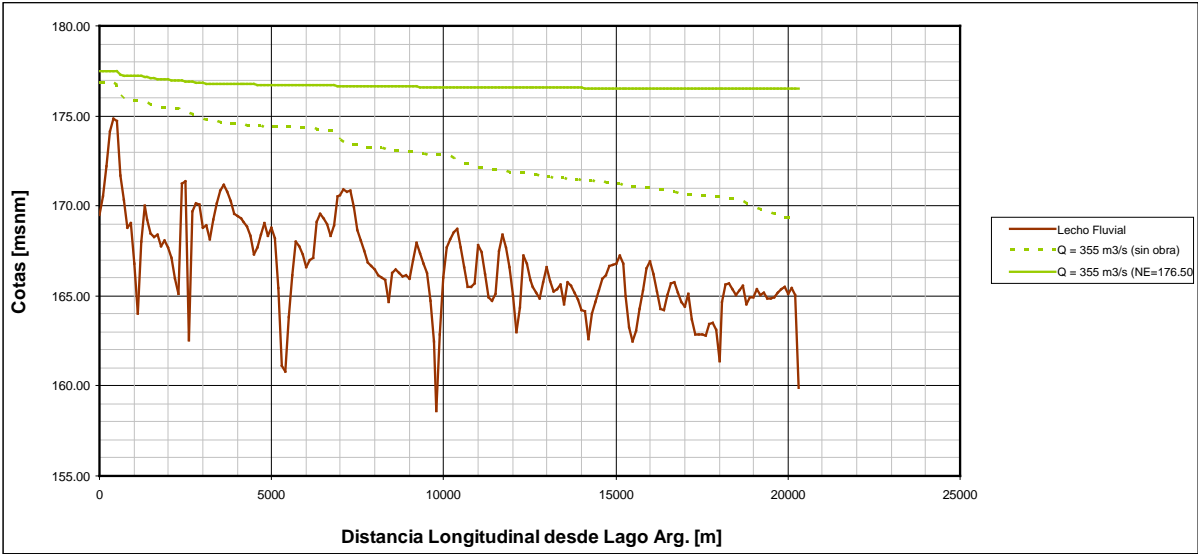
A continuación se presentan los resultados de la modelación con HECRAS para la Fase 2, usando los mismos parámetros de calibración (rugosidades) obtenidos para la Fase 1, y las condiciones de borde antes descritas. Es decir, se establece como condición de borde de aguas abajo el nivel de embalse (NE), fijado contra la Presa NK. En este caso, se analizaron los niveles 176.50 m y 176.00 m, para el rango de caudales de 355 m<sup>3</sup>/s a 4100 m<sup>3</sup>/s.

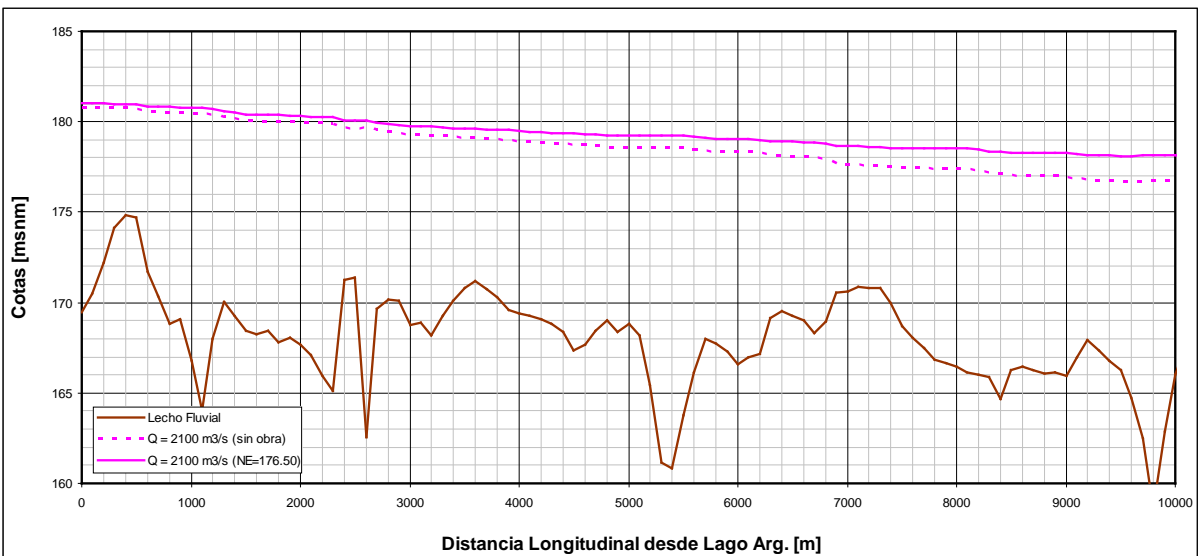
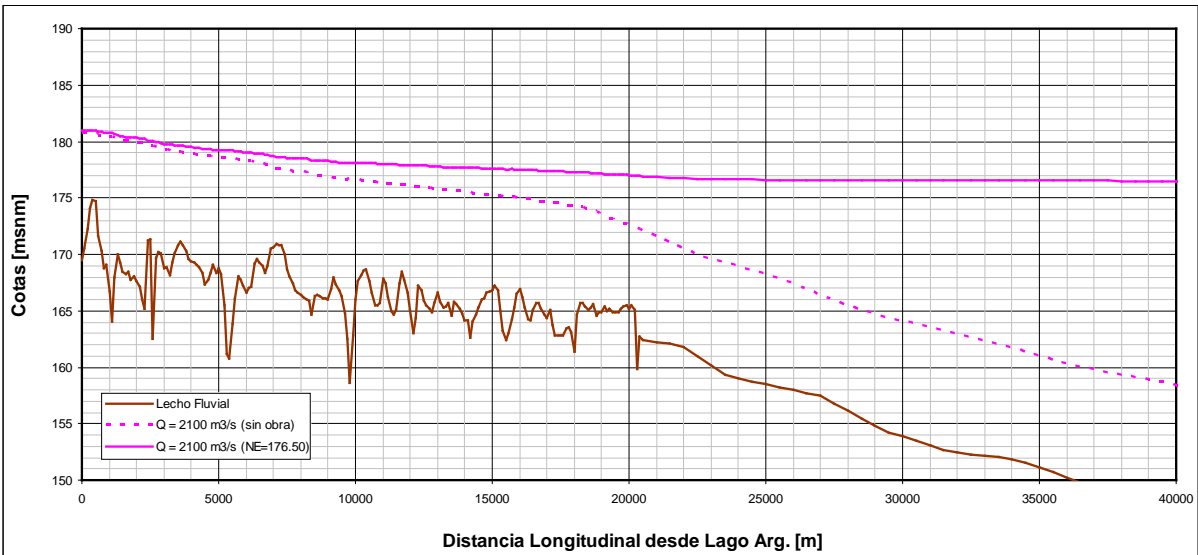
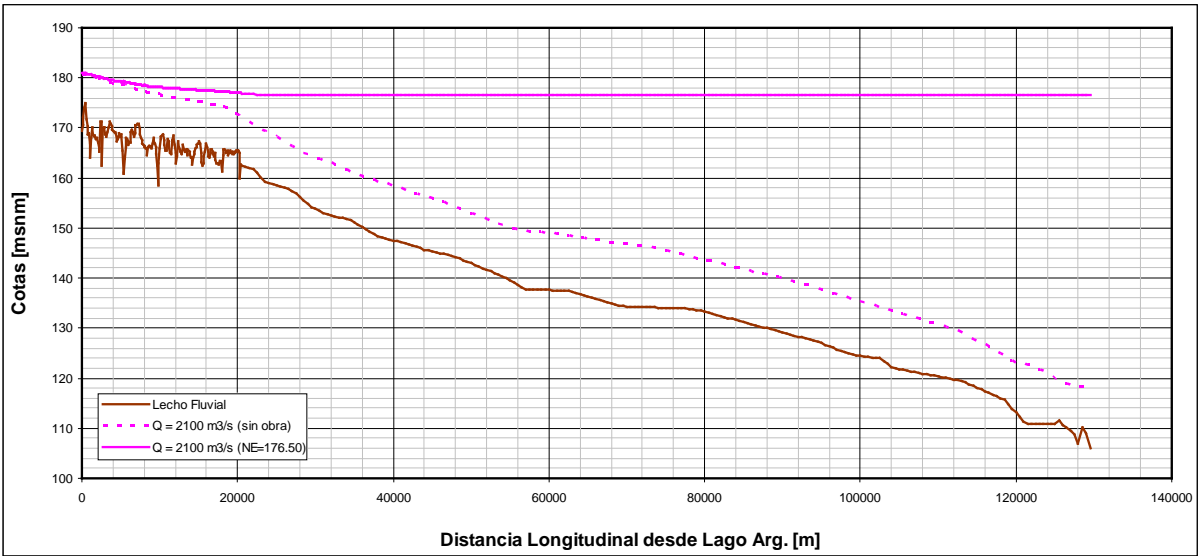
Como un ejemplo del producto obtenido con HECRAS, se presenta a continuación el perfil hidráulico obtenido para un NE = 176.00 m y un Q = 2100 m<sup>3</sup>/s.

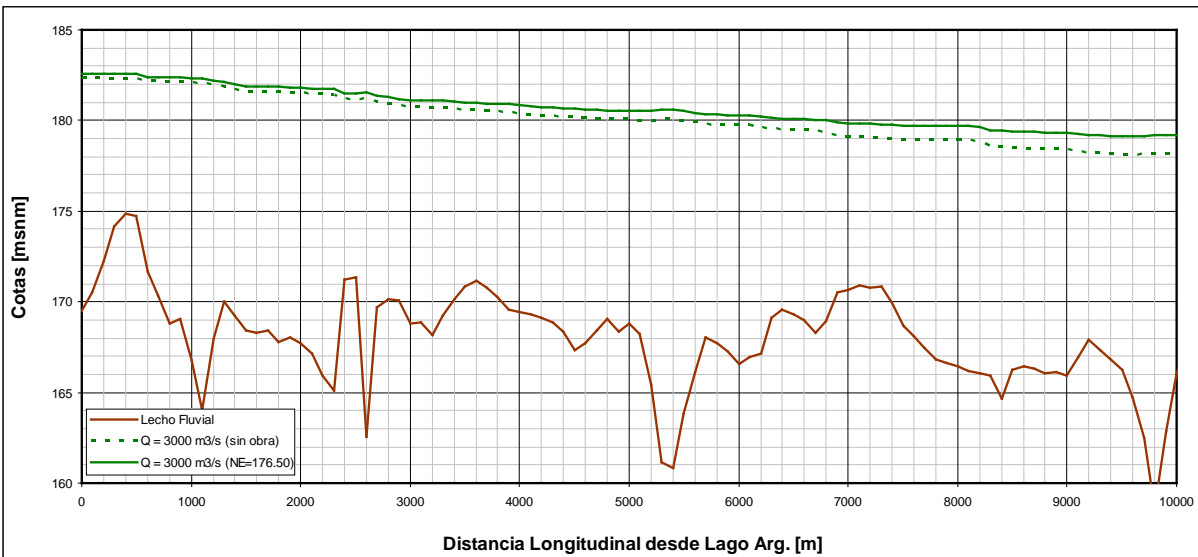
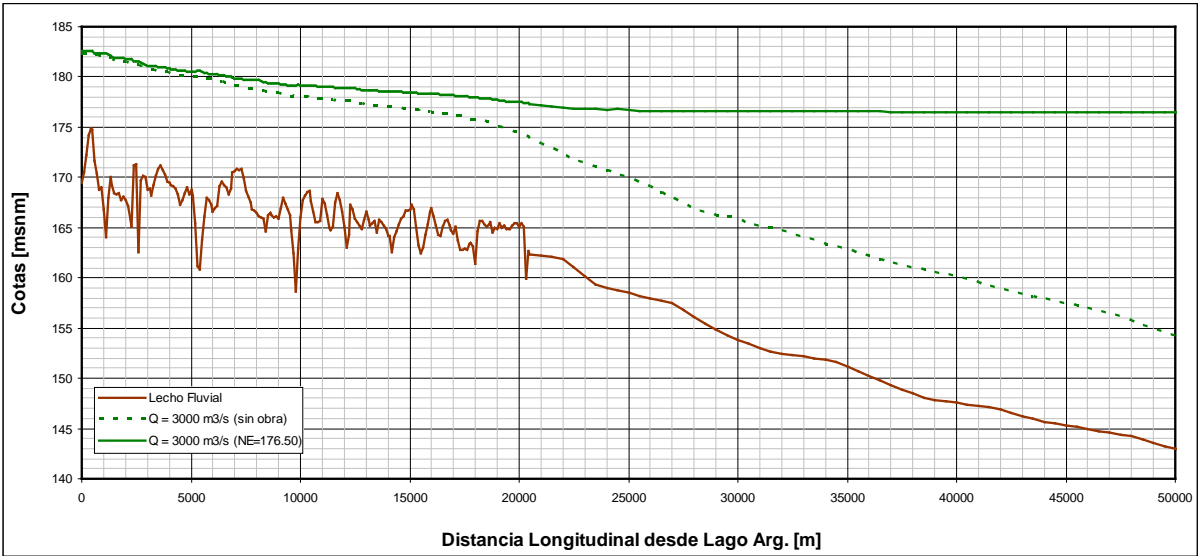
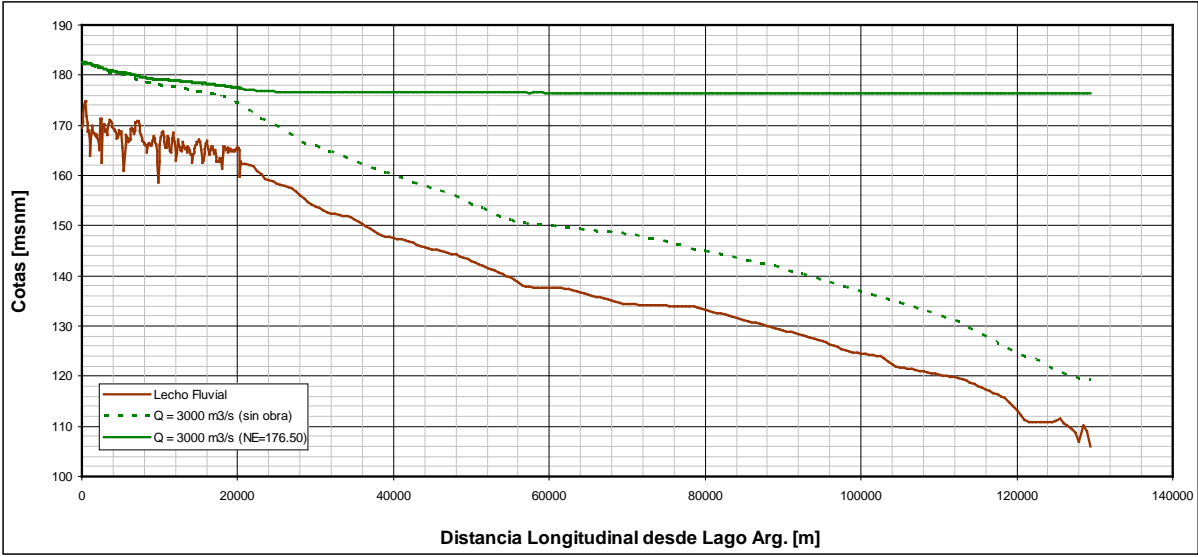


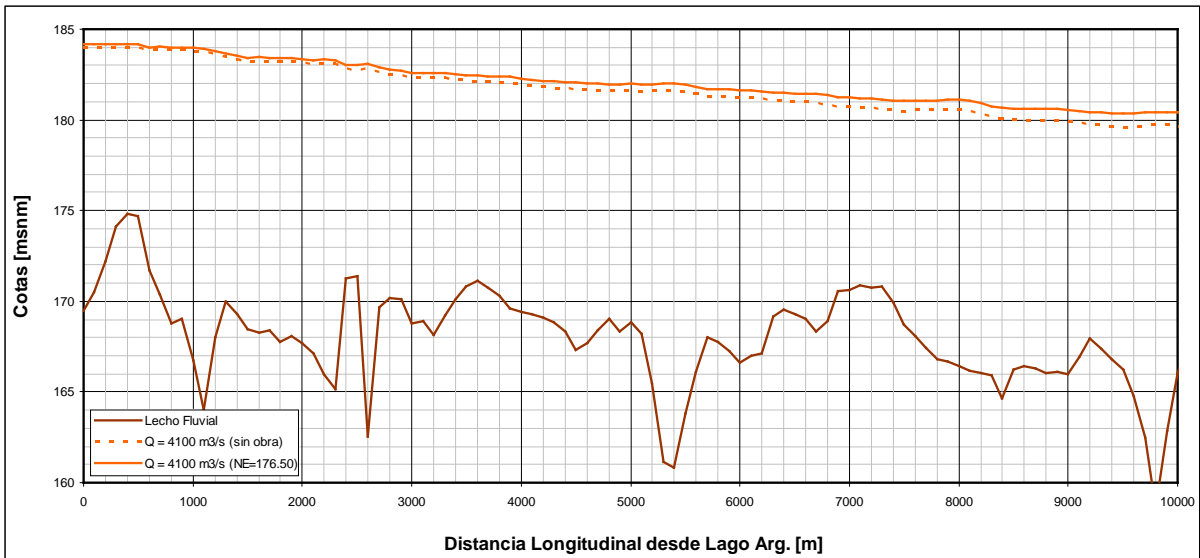
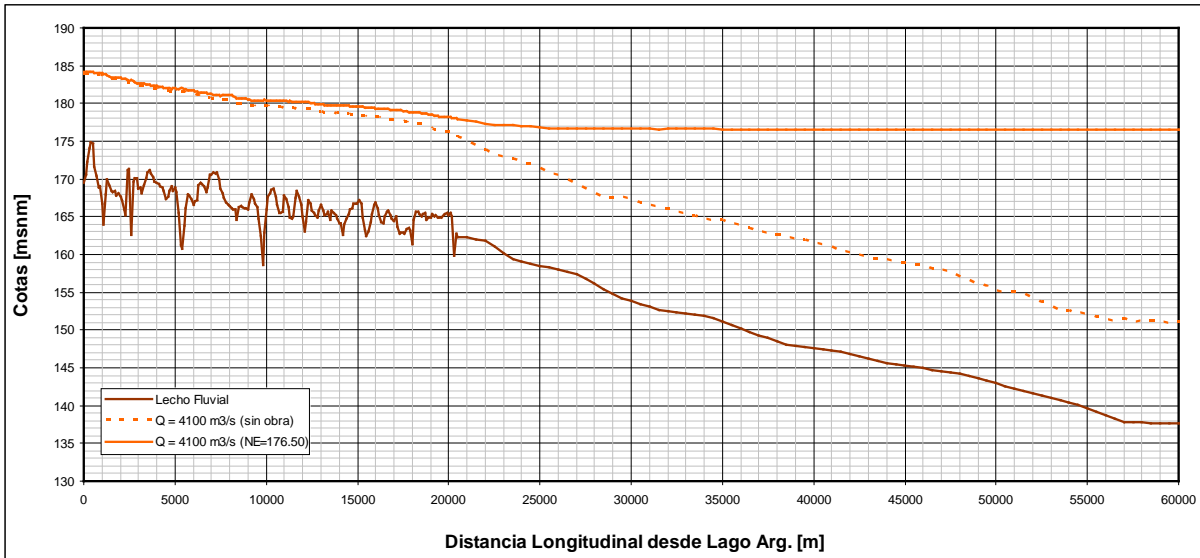
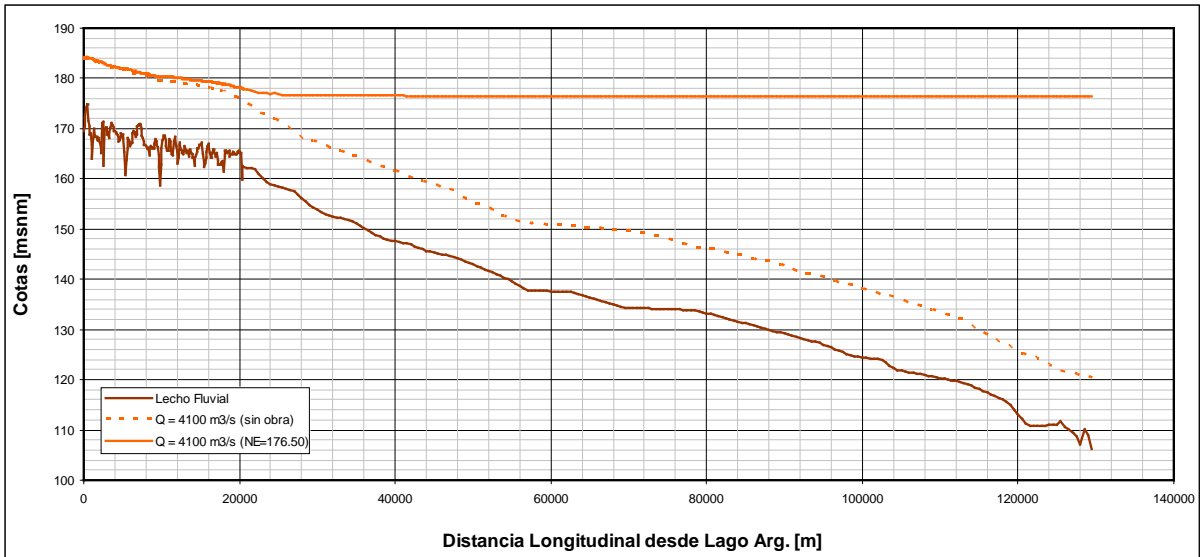
A fin de poder obtener los productos deseados para las combinaciones de escenarios adoptadas, a continuación se presentan las curvas comparativas de los perfiles de flujo en Fase 1 y Fase 2, para todos los caudales Q y NE = 176.50 ~ 176.00 m.

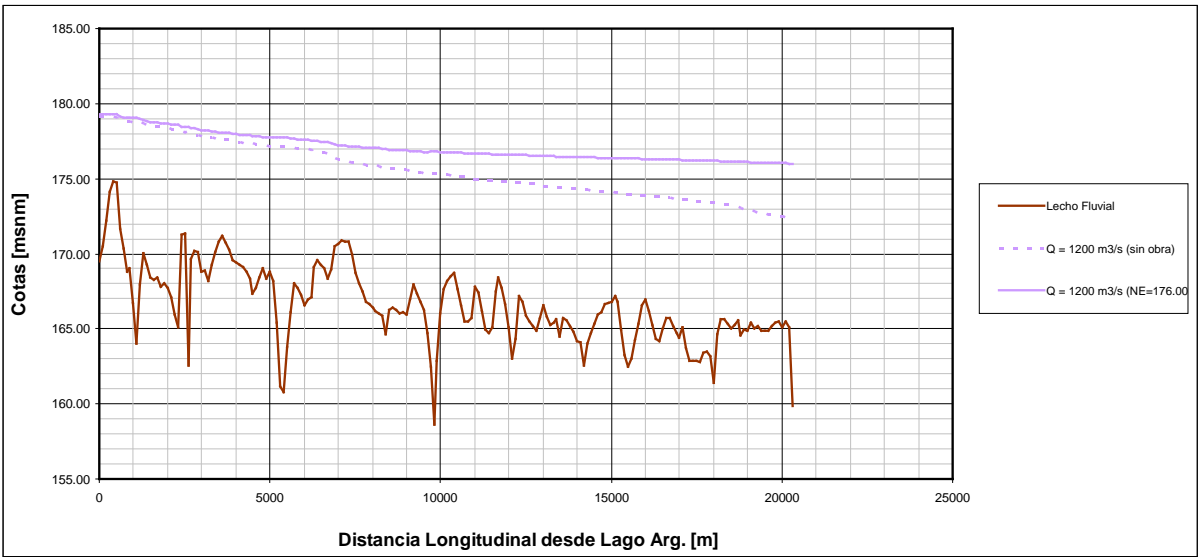
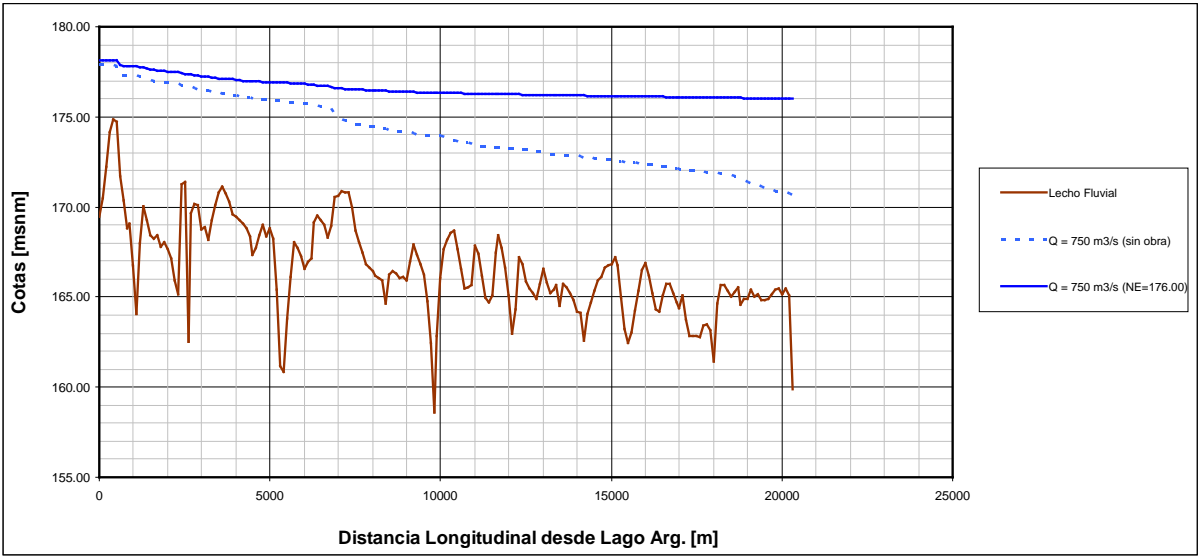
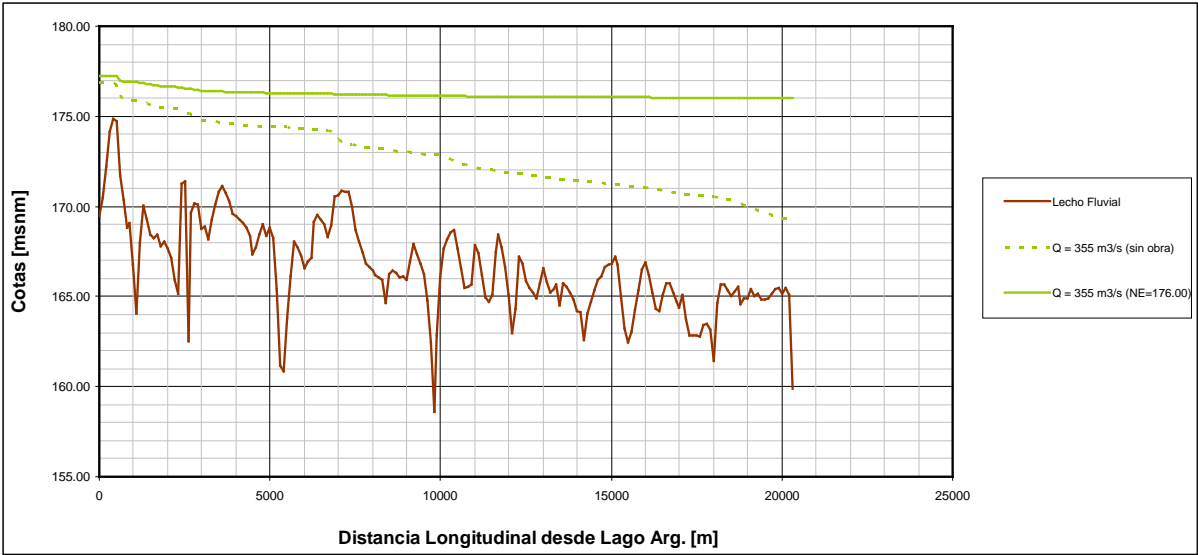
En el caso de los tres primeros caudales (355, 700 y 1200) los perfiles se presentan en un solo gráfico para cada caso, mientras que para los tres caudales mayores (2100, 3000 y 4100) se presentan tres gráficos con distintos grados de detalle para cada situación de NE.



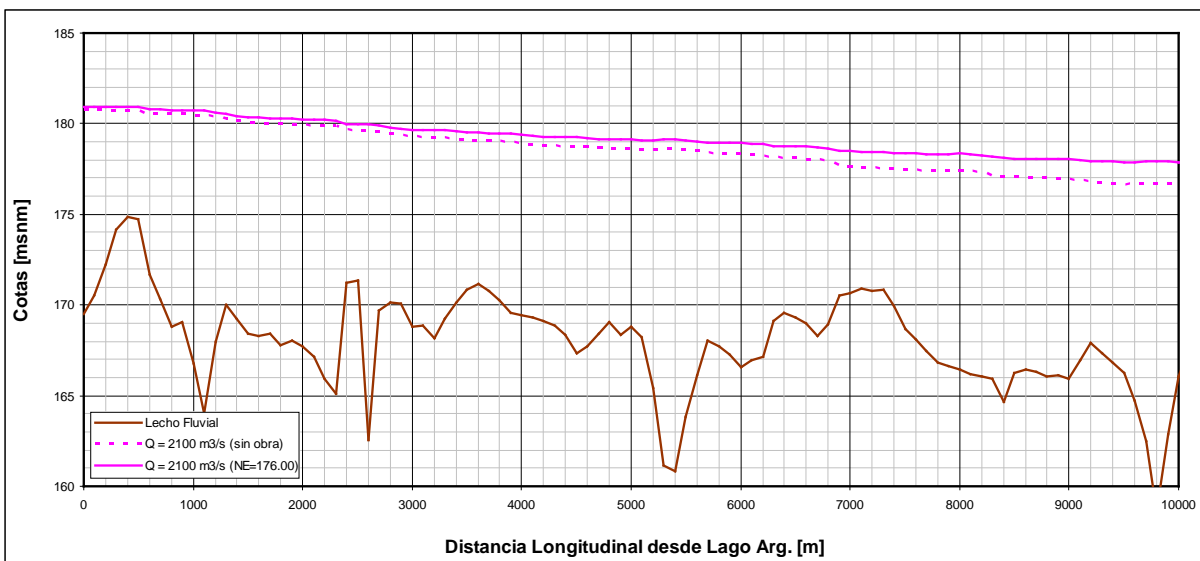
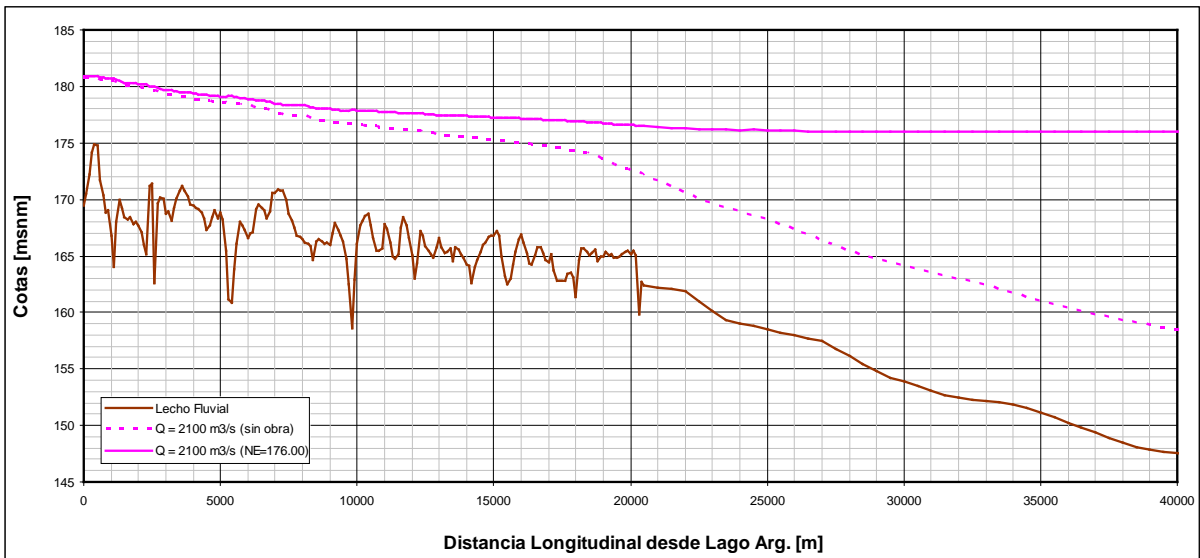
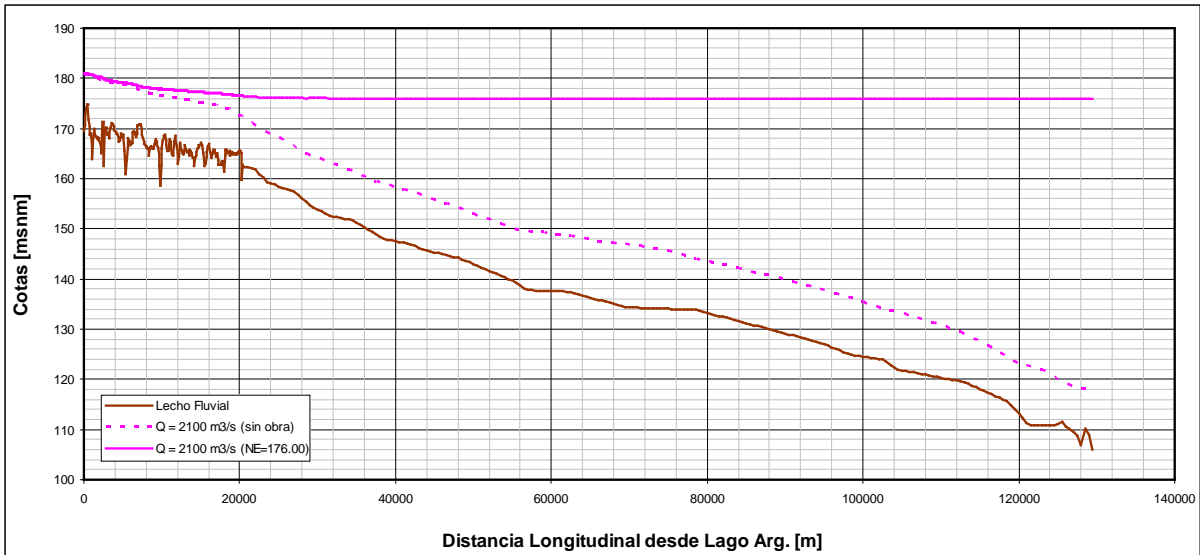


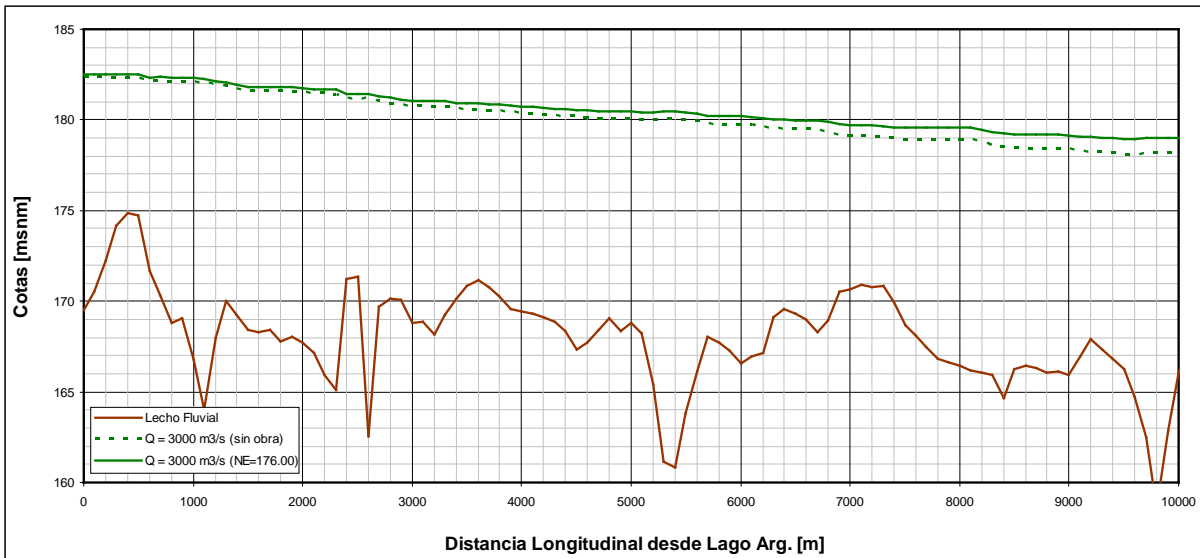
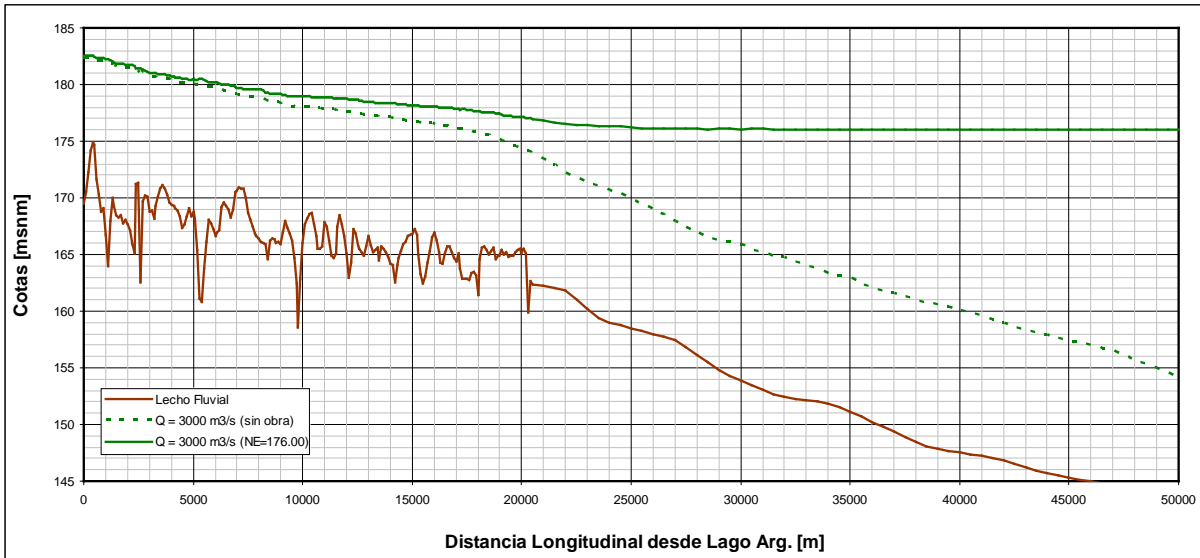
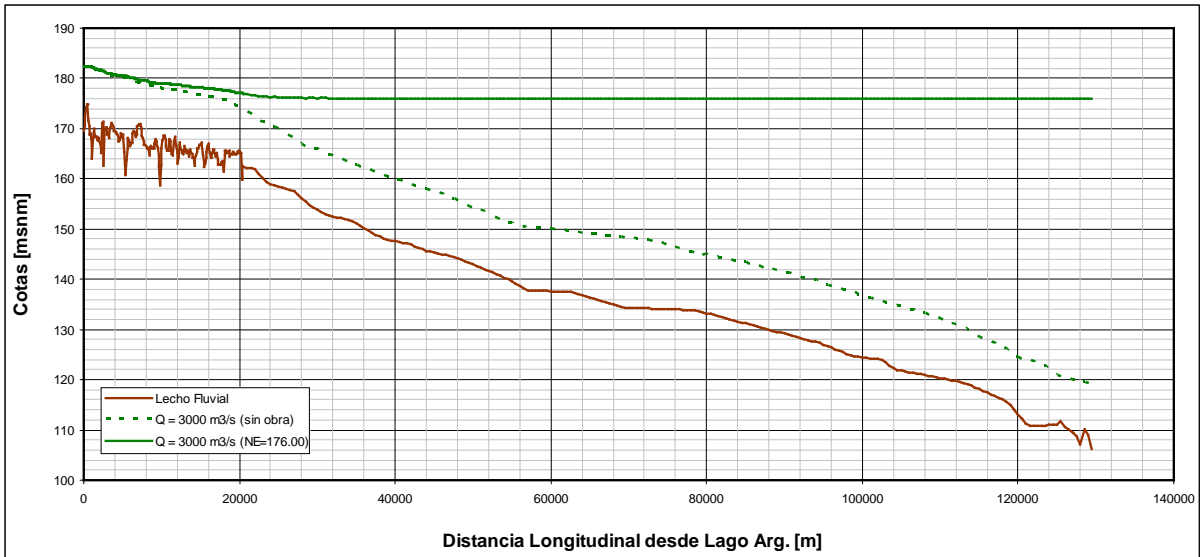


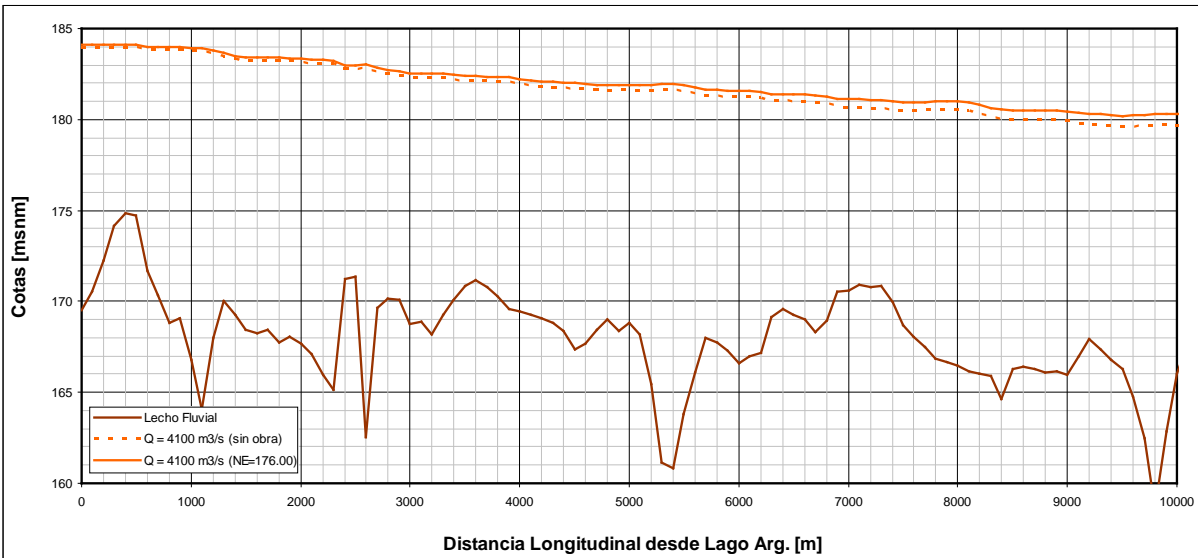
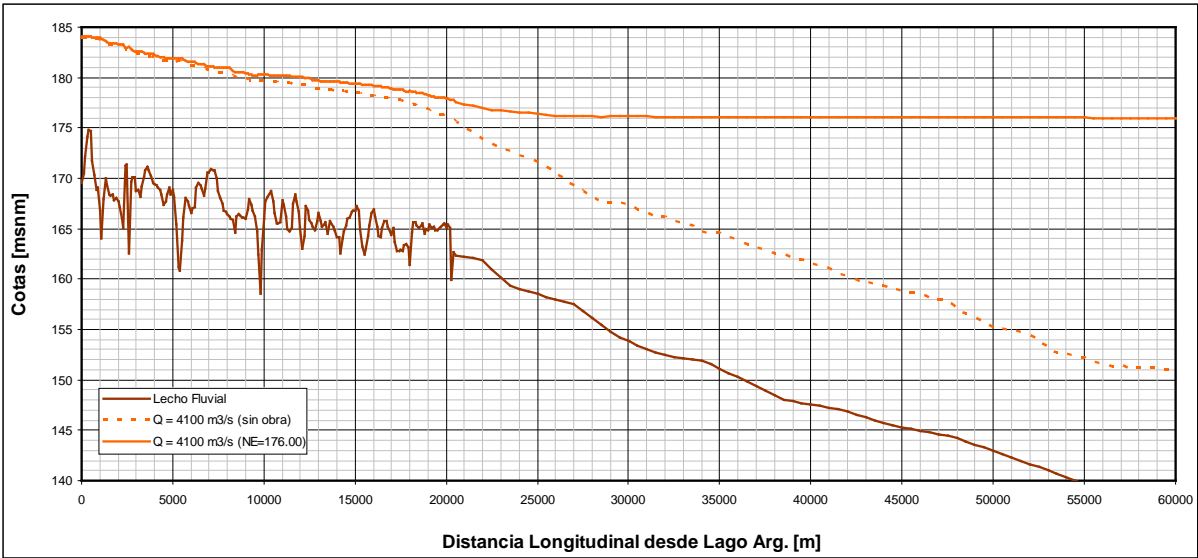
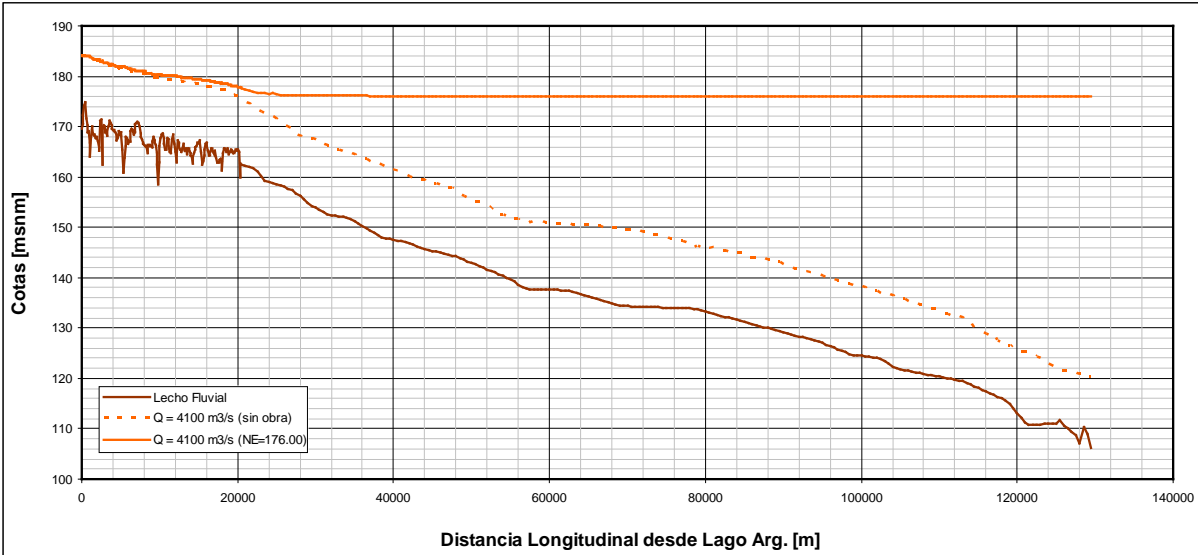




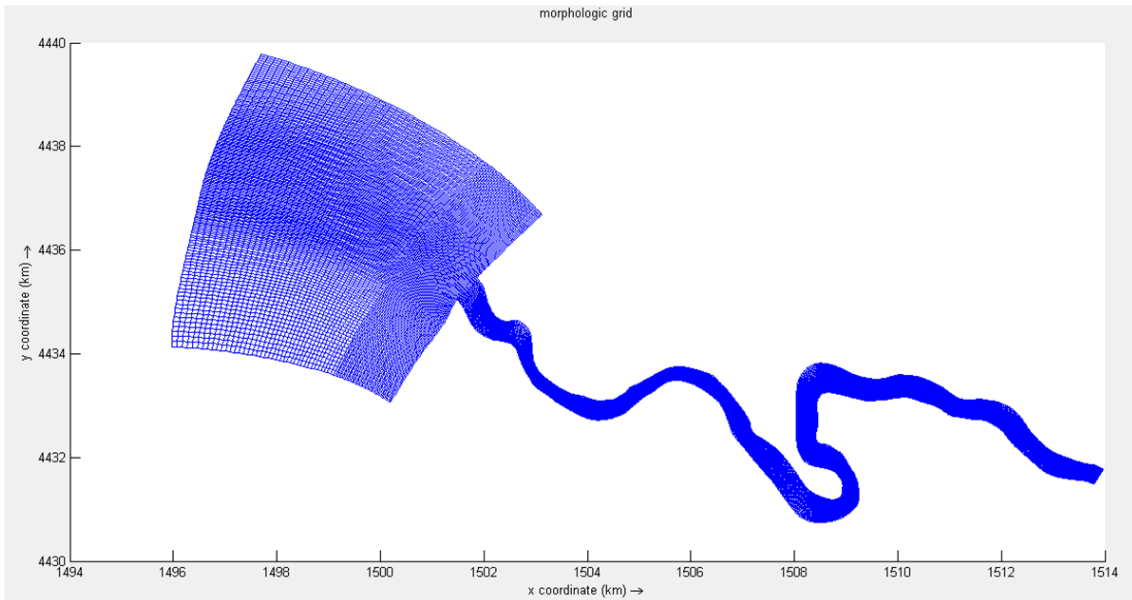




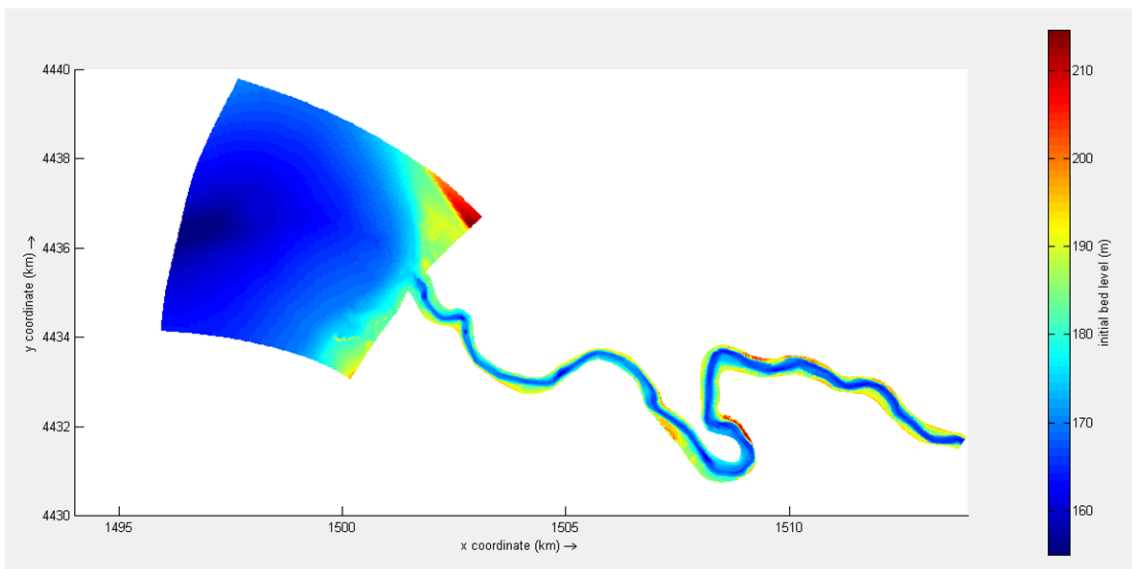




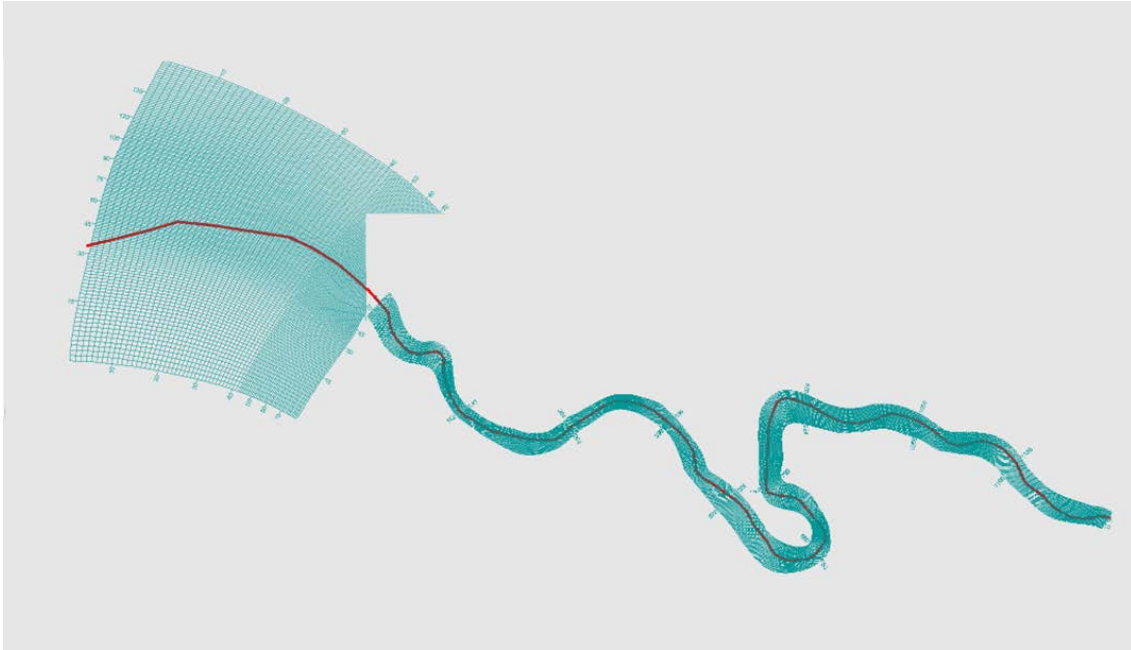
## Resultados de la Modelación 2D en área de Embocadura y tramo inicial del Río Santa Cruz



Grilla morfológica y Dominio de Modelación



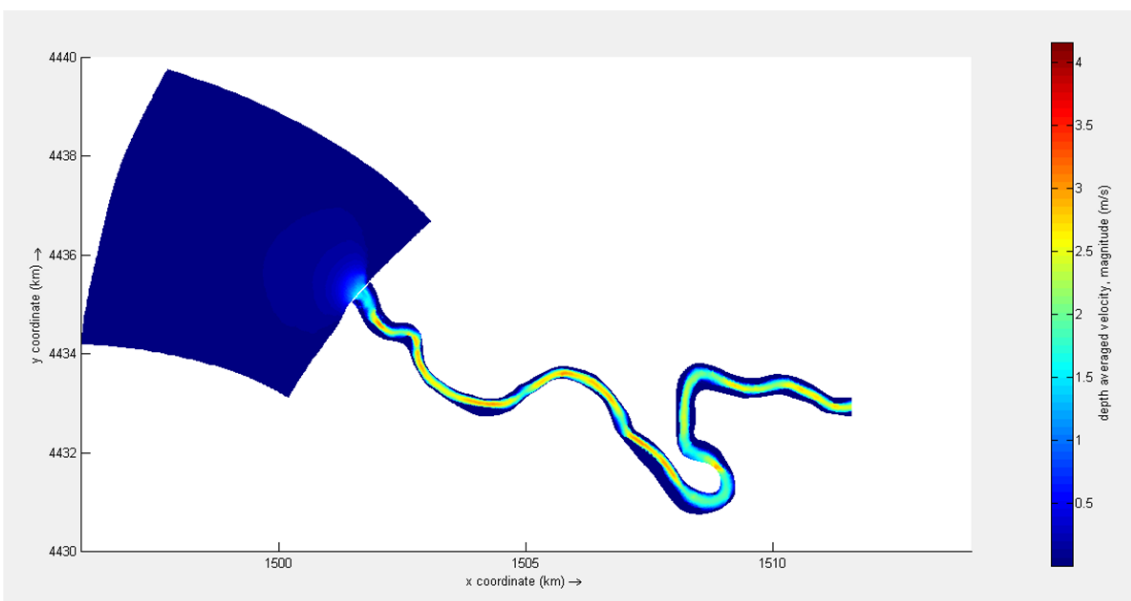
Modelo Digital del Terreno usado en las simulaciones



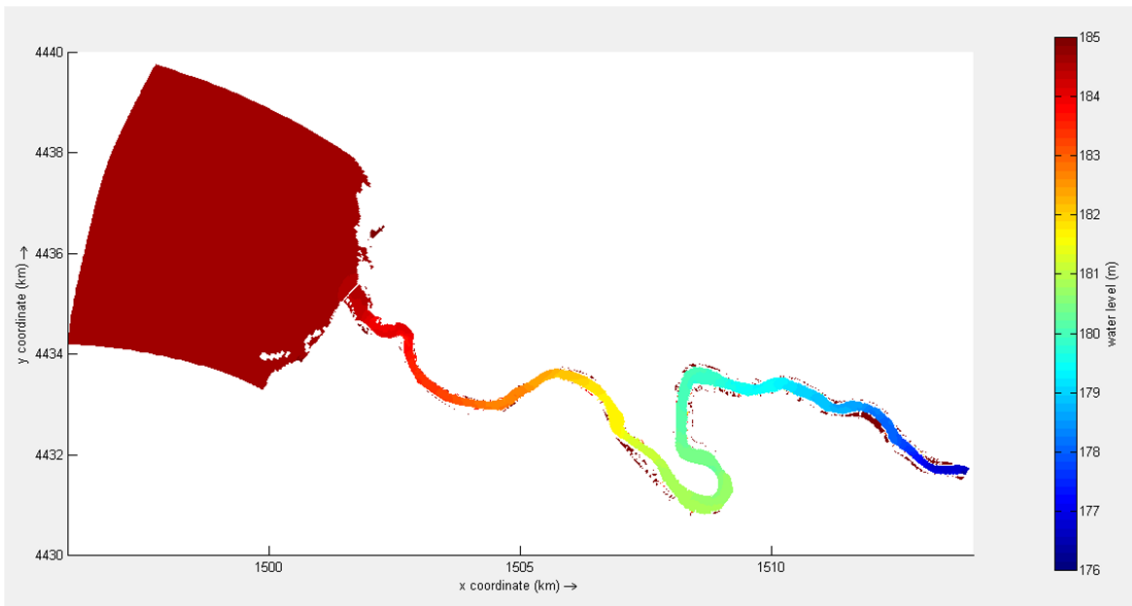
Definición del Thalweg y ubicación de secciones de calibración

Teniendo en cuenta los resultados de la aplicación del Modelo 2D en la “condición natural” del sistema, y considerando los parámetros de calibración ajustados para tal situación (Fase 1), se simularon escenarios de caudales (355, 700, 1200, 2100, 3000, 4100) para la hipotética situación de la presencia del Embalse operando con niveles constantes de 176.50 msnm y 176.00 msnm, respectivamente.

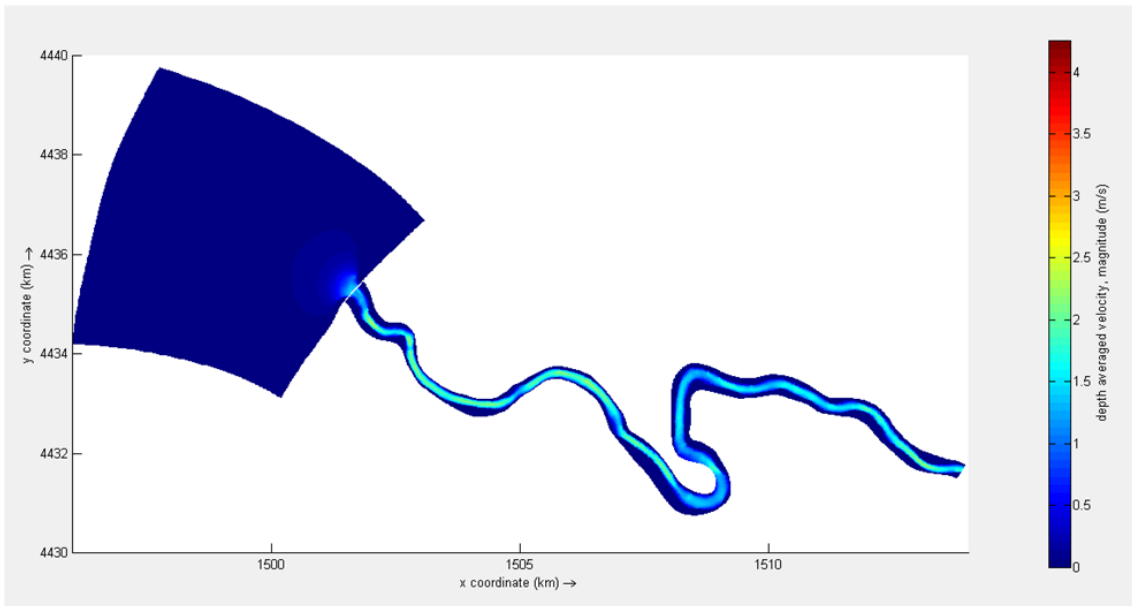
Considerando la morfología del embalse, y el hecho que los empalmes de las curvas de remanso se generan en los primeros 10 a 60 km de desarrollo del río desde la embocadura, el flujo se comporta como predominantemente 1D. Por lo tanto, los valores obtenidos con el modelo 1D resultan razonables para el análisis de la presencia del embalse.



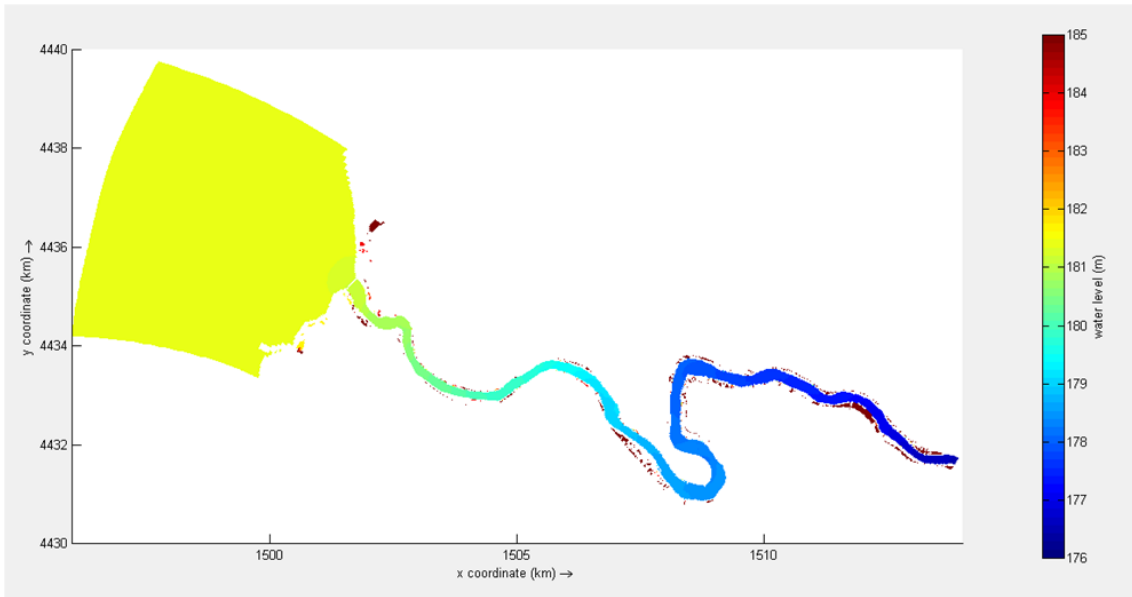
Velocidades promediadas en vertical para  $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$



Niveles para  $Q = 4100 \text{ m}^3/\text{s}$



Velocidades promediadas en vertical para  $Q = 2100 \text{ m}^3/\text{s}$

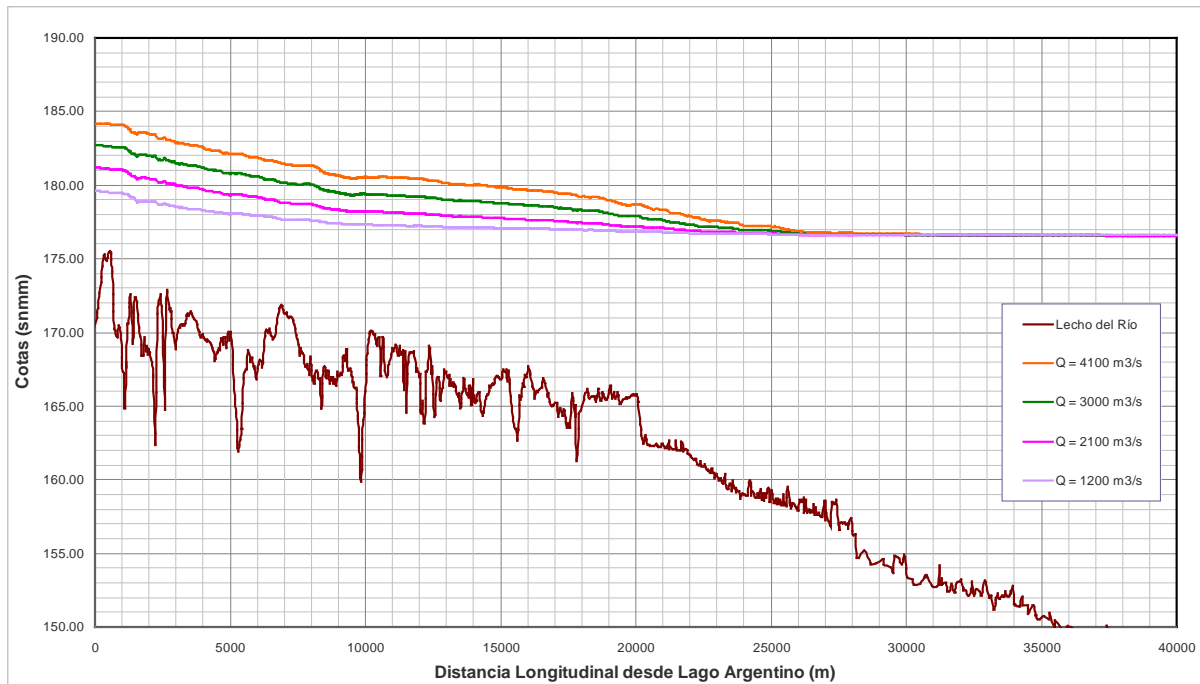


Niveles para  $Q = 2100 \text{ m}^3/\text{s}$

**HECTOR DANIEL FARIAS**  
Ingeniero Hidráulico  
M.P. 92099 (CPIA-SdE) – 0145 (CPIC)

En la figura siguiente se presenta el conjunto de perfiles hidráulicos obtenidos a través de la simulación de flujo 2D con el modelo *DELFT-3D* (en modo bidimensional), para los parámetros  $\nu_t = 1.00$  y  $n = 0.030$ , aplicado al rango de caudales desde 1200 m<sup>3</sup>/s a 4100 m<sup>3</sup>/s, y con un nivel en el embalse NE = 176.50 msnm.

Se observa un patrón de comportamiento semejante al obtenido en la simulación 1D con HEC-RAS, es decir resultan numéricamente comparables a los obtenidos con el modelo 1D.



Perfiles Hidráulicos simulados con *DELFT3D* para un nivel de embalse NE = 176.50 msnm

## Referencias Bibliográficas

Bathurst, J.C.; Graf, W.H. & Cao, H.H. (1987): "Bed load discharge equations for steep mountains rivers", en Thorne, C.R.; Bathurst, J.C. y Hey, R.D. (Ed.): *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Wiley, pp. 453-491.

Julien, P.Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.

Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press, United Kingdom.

Parker, G. (2004). *1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents*. e-Book. [[http://www.ce.umn.edu/~parker/morphodynamics\\_e-book.htm](http://www.ce.umn.edu/~parker/morphodynamics_e-book.htm)].

Rickenmann, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Mitteilung VAW* 103. Zürich.

Smart, G.M. & Jaeggi, M. (1983): Sediment transport on steep slopes. *Mitteilung VAW*. 64. Zürich.

Yang, C.T. (1996a): *Sediment Transport: Theory and Practice*. Mc Graw-Hill Book Co., NY, USA.

Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999), A third-generation wave model for coastal regions, Part II:



Verification, J. Geophys. Res. Vol. 104, C4, pp.7667-7681.

**Delft3D-Flow** (2011). *Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. User Manual, Deltares, The Netherlands. <http://oss.deltares.nl/>.

**Delft3D-Wave** (2011). *Simulation of short-crested waves with SWAN*, User Manual Part of Hydro-Morphodynamics. Deltares, The Netherlands <http://oss.deltares.nl/>.

**Deltares** (2011). WL DELFT HYDRAULICS: *DELFT3D-FLOW*, simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. The Netherlands. [<http://oss.deltares.nl/>]

**Roelvink, J. A. & van Banning, G.K.F.M.** (1994). "Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics". In: Verwey, Minns, Babovic, and Maksimovic (eds.). *Hydroinformatics' 94*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

**SSRHN** (2013). Memoria Descriptiva "Aprovechamientos Hidroeléctricos del Río Santa Cruz (Presidente Dr. Néstor Carlos Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic)". Buenos Aires, Argentina.

**Uittenbogaard, R. E.; van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S.** (1992). *Implementation of three turbulence models in 3D-TRISULA for rectangular grids*. Report Z81, Delft Hydraulics. The Netherlands.

**WL/Delft Hydraulics** (2006). *DELFT3D-FLOW*, simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Delft, The Netherlands.