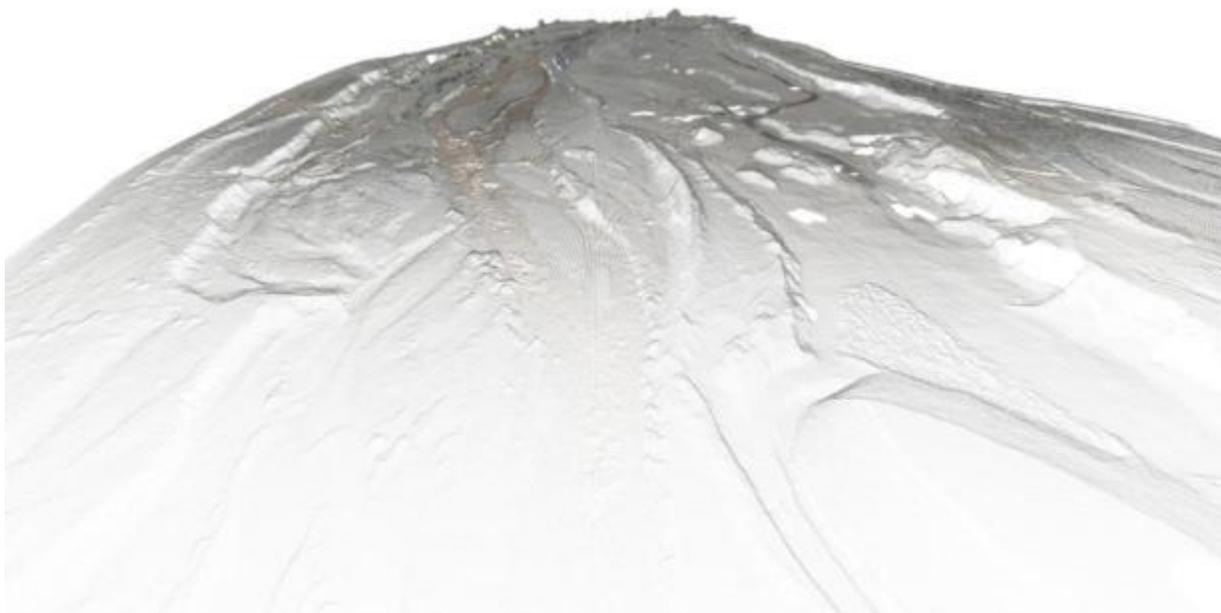


DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**“ESTUDIO EVALUACIÓN Y MODELACIÓN HIDRÁULICA-SEDIMENTOLÓGICA
FÍSICA Y MATEMÁTICA DEL RÍO MAIPO PARA EL SEGUIMIENTO DE
EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS Y OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN EL
SECTOR CONFLUENCIA RÍO CLARILLO A PUENTE NALTAHUA, REGIÓN
METROPOLITANA”**



INFORME FINAL ETAPA N°3: MODELACIÓN MATEMÁTICA

DICIEMBRE 2015

<i>Mandante:</i>					
DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS					
Estudio: “ESTUDIO EVALUACIÓN Y MODELACIÓN HIDRÁULICA-SEDIMENTOLÓGICA FÍSICA Y MATEMÁTICA DEL RÍO MAIPO PARA EL SEGUIMIENTO DE EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS Y OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN EL SECTOR CONFLUENCIA RÍO CLARILLO A PUENTE NALTAHUA, REGIÓN METROPOLITANA”				<i>Fecha:</i> Diciembre 2015	
INFORME ETAPA N°3: MODELACIÓN MATEMÁTICA					
<i>Equipo de Trabajo:</i>					
Marcos Díaz N.		Ing. Geomensor - Jefe de Proyecto			
René Jaramillo B.		Ing. Geomensor - Jefe de Proyecto (s)			
Luis Zamorano R.		Ing. Civil - Ingeniero Modelador			
Rodrigo Herrera H.		Ing. Civil - Modelador Matemático			
Fernanda Abarzúa T.		Ing. Civil - Modelador Físico			
Hector Aliaga Z.		Ing. Geomensor - Encargado Construcción Modelo			
Luis Esquivel V.		Dibujante Técnico			
<i>Aprobado por:</i>					
Karla Gonzales N.		Directora Ejecutiva			
Eduardo Santibáñez W.		Jefe División Técnica			
	Informe Final Etapa 3	RHH	MDN	LZR	Dic. 2015
<i>Rev.</i>	<i>Descripción</i>	<i>Por</i>	<i>Aprobó</i>	<i>V°B°</i>	<i>Fecha</i>
<i>Clasificación:</i> Reservado DOH					

CONTENIDO DEL VOLUMEN II

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	ZONA DE ESTUDIO.....	8
1.2	ETAPAS DEL ESTUDIO.....	8
1.3	CONTENIDO DEL INFORME DE LA ETAPA 3	9
2	OBJETIVOS.....	9
2.1	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	9
2.2	OBJETIVOS DE LA ETAPA 3.....	10
3	ALCANCES DE LA ETAPA 3.....	10
4	METODOLOGÍA ETAPA 3.....	11
5	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	12
5.1	ANTECEDENTES TOPO BATIMÉTRICOS	12
5.2	ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS	13
5.3	ANTECEDENTES RESPECTO A LA RUGOSIDAD DE FONDO.....	18
5.4	ANTECEDENTES RESPECTO DESBORDES HISTÓRICOS PRODUCIDOS EN EL RÍO MAIPO	18
6	MODELACIÓN MATEMÁTICA ZONAS PROPENSAS A PRESENTAR DESBORDES.....	19
6.1.1	Modelo de terreno y mallado del dominio de modelación	19
6.1.2	Condiciones de borde.....	22
6.1.3	Condiciones de rugosidad de fondo.....	23
6.1.4	Parámetros de estabilidad del modelo numérico	23
6.1.5	Diagnóstico de sectores con tendencia a presentar desbordes.....	24
7	MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ..	26
7.1	DEFINICIÓN PROYECTO DE ENCAUZAMIENTO.....	27
7.2	TENDENCIA DE EROSIÓN Y DEPOSITACIÓN	31
8	CONCLUSIONES RESPECTO DEL PROYECTO DE ENCAUZAMIENTO	39

9	RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS	42
11	REFERENCIAS.....	43
12	ANEXOS (SE INCLUYE COPIA EN DIGITAL COMO EN PAPEL)	45
12.1	ANEXO 1: MODELO NUMÉRICO INUNDACIÓN.....	46
12.2	ANEXO 2: CALIBRACIÓN MODELO NUMÉRICO.....	47
12.3	ANEXO 3: PLANOS SOBREPASOS RÍO MAIPO, T=50 Y T=100 AÑOS (8 LÁMINAS). ...	48
12.4	ANEXO 4: SUPERFICIE CON RASANTE MÍNIMA PARA EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS ().....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1: Caudales de crecidas asociados a distintos periodos de retorno por tramos.....	16
Tabla 5-2: Medición de alturas de escurrimiento en terreno.....	17
Tabla 5-3: Coeficientes de rugosidad “n” según sectores	18
Tabla 6-1: Parámetros de estabilidad del modelo numérico.....	23
Tabla 6-2: Cota inferior puentes, cota escurrimiento y cálculo de sobrepaso	25
Tabla 7-1: Resumen de resultados por perfil transversal, Hidrograma 1982, Condición de borde de equilibrio.....	31
Tabla 7-2: Resumen de resultados por perfil transversal, Hidrograma 1982, Condición de borde curva gasto sólido versus gasto líquido.	31
Tabla 7-3: Tendencia Sedimentológica por perfil transversal, Hidrograma 1982.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Vista en planta del sector de estudio.....	8
Figura 5-1: Topografía base para desarrollar el modelo numérico, en la figura vista 3D de sector aguas arriba Ruta 5.....	13
Figura 5-2: Caudal Medio Diario (m ³ /s) en estación El Manzano, destacando máximos anuales pluvial y nival, entre los años 1965 y 2010. Fuente: Ref [4]	14
Figura 5-3: Distribución de caudales mensiales entre los años 1947 y 1969. Fuente: Elab. Propia.....	15
Figura 5-4: Distribución de caudales mensiales entre los años 1970 y 1989. Fuente: Elab. Propia.....	15
Figura 5-5: Distribución de caudales mensiales entre los años 1990 y 2014. Fuente: Elab. Propia.....	16
Figura 5-6: Distribución de caudales diarios en año 1982. Fuente: Elab. Propia	17
Figura 6-1: Malla en zona de pilares, puente los morros y acceso sur.	20
Figura 6-2: Malla en zona de pilares, puente ferroviario, viejo y ruta 5.	20
Figura 6-3: Malla en zona de pilares, Puentes Puntilla.	21
Figura 6-4: Malla en zona de pilares, Puentes Naltahua.....	21
Figura 6-5: Condiciones de borde.	22
Figura 6-6: Rugosidad del dominio de modelación	23
Figura 7-1: Efectos de la actividad de extracción de áridos sobre el lecho del Maipo.....	26
Figura 7-2: Malla en zona de pilares, puente acceso sur.....	28
Figura 7-3: Superficie de terreno que incluye proyecto encauzamiento.	29
Figura 7-4: Canal 1, planta y corte transversal tipo.	30
Figura 7-5: Canal 2, planta y corte transversal tipo.	30

1 INTRODUCCIÓN

La explotación de áridos en Chile corresponde a una práctica usual, basada en la demanda de este material para su utilización en rubros asociados principalmente a la construcción. Una de principales fuentes de material sedimentario corresponde a los ríos situados en zonas cercanas a las ciudades, las cuales representan una de las mayores fuentes de demanda. Los principales factores que explican la explotación de áridos desde los cauces de ríos incluyen: 1) fácil acceso a la fuente, 2) alta calidad del material y 3) una graduación extendida del material, con lo que se minimiza la necesidad de implementar procesos de reducción de tamaño. Los procesos de generación del sedimento se concentran en la parte alta de los ríos (zona cordillerana), desde donde son transportados por el flujo hacia la zona media y baja. Es por esto que existe una estrecha relación entre la capacidad de transporte del sedimento y el flujo circulante por los distintos tramos del sistema (Ref [14]).

Muchos de los ríos cercanos a las grandes ciudades y que presentan caudales medios considerables, presentan extracciones de agua de gran magnitud, asociadas a derechos consuntivos y no consuntivos (riego, abastecimiento de agua potable, generación eléctrica, entre otros). Debido a lo anterior, muchos de estos sistemas no se encuentran en un equilibrio estable en el tiempo, en cuanto a los procesos de transporte de sedimentos y a la degradación - agradación del lecho del cauce. Otros autores han evidenciado y descrito problemas asociados a la sobreexplotación de áridos en ríos, los cuales se asocian principalmente a modificaciones en la morfología del lecho y a variaciones del ancho del canal con el tiempo. Estas modificaciones y sus efectos sobre el comportamiento del flujo están lejos de ser fenómenos locales, existiendo en la literatura reportes de impactos que alcanzan varios kilómetros, afectando las zonas tanto hacia aguas arriba como aguas abajo (Ref [14]).

La problemática descrita describe de manera fidedigna la situación que hace años afecta al río Maipo, especialmente en el tramo entre Confluencia Río Clarillo y Puente Naltahua. En este contexto la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) solicita al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) la ejecución de un estudio que permita establecer una línea base topobatimétrica, y además generar una herramienta para evaluar técnicamente las solicitudes de extracción de áridos. En la última etapa se requiere estimar la estabilidad de la obra de muro guardarradier emplazado aguas abajo del puente Ruta 5, y por otro lado cuantificar fosa de socavación generada al pie de este muro.

El presente informe de la Etapa 3 del estudio denominado, "Estudio Evaluación y Modelación Hidráulica-Sedimentológica Física y Matemática del Río Maipo para el seguimiento de Explotaciones de Áridos y Obras de Protección existentes en el sector Confluencia Río Clarillo a Puente Naltahua", tiene como fundamento presentar los resultados en cuanto la estimación de sectores propensos a sufrir desbordes para los caudales asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años, además de estimar la tendencia sedimentológica a nivel cualitativo del tramo de estudio. Se evalúa la factibilidad de definir secciones de encauzamiento en el cauce como herramienta de gestión de la actividad de

extracción de áridos, en función del grado de cumplimiento de ciertos objetivos específicos y de sus posibles externalidades.

1.1 Zona de Estudio

La zona de estudio, de acuerdo a lo establecido en el convenio 1150-101-SE14, comprende un tramo del río Maipo de extensión aproximada de 37.5 km, que se ubica 500 metros aguas arriba del Puente San Ramón, en la comuna de puente Alto, hasta 150 metros aguas abajo del Puente Naltahua, en comuna Isla de Maipo. En la Figura 1-1 se esquematiza la ubicación de la zona de estudio, indicando además el sector del Maipo donde recibe el aporte del río Angostura.

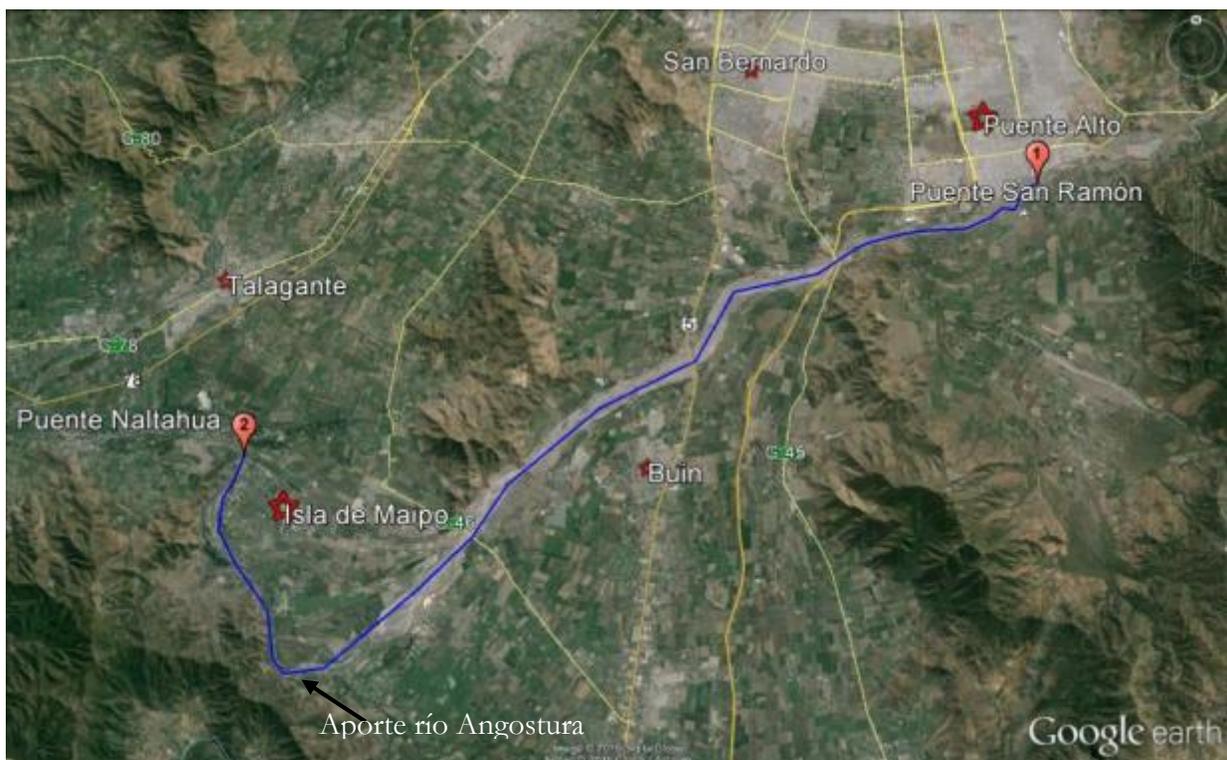


Figura 1-1: Vista en planta del sector de estudio.

1.2 Etapas del Estudio

El estudio se aborda en cinco etapas:

- Etapa 1: Construcción y medición Red Geodésica.
- Etapa 2: Levantamiento topo batimétrico.

- Etapa 3: Modelación Matemática.
- Etapa 4: Construcción Modelo Físico.
- Etapa 5: Explotación de Modelo Físico.

1.3 Contenido del Informe de la Etapa 3

El presente informe corresponde a la entrega final de la Etapa 3: Modelación matemática, y hace mención a las actividades y análisis desarrollados, específicamente en lo que se refiere a los siguientes aspectos:

- Revisión de antecedentes y bibliografía.
- Modelo numérico bidimensional de la situación actual, para diagnóstico de los sitios que podrían verse afectados por desbordes del río, ante los eventos de crecida asociado periodos de retorno de 50 y 100 años.
- Modelo numérico unidimensional de la situación actual y situación con proyecto de encauzamiento, para estimar la tendencia sedimentológica a lo largo del tramo estudiado, ante un evento de crecida importante (hidrograma).
- Análisis de resultados y conclusiones.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos del estudio

El objetivo general de este estudio es definir, en base a la condición topográfica y topo batimétrica actual del cauce, una geometría y rasante de fondo de explotación de áridos, en 37.5 km a definir entre el tramo del río Maipo que se ubica desde 500 metros aguas arriba del Puente San Ramón, en comuna de Puente Alto, hasta 150 metros aguas abajo del Puente Naltahua, en comuna Isla de Maipo.

Los objetivos específicos particulares de este estudio son los siguientes:

- Obtener una topo batimetría actualizada del río Maipo, en el tramo que se defina.
- Obtener un catastro con las obras existentes en el tramo a estudiar.
- Definir el comportamiento hidráulico del río Maipo en la situación actual.
- Definir una rasante y sección de proyecto en el tramo del río Maipo, que permitirá evaluar futuras nuevas solicitudes de extracciones de áridos.
- Modelar físicamente un tramo representativo del muro guardarradier, con el objeto de proponer mejoras a la estructura existente a fin de evitar su colapso considerando alguna propuesta de solución para evitar socavación al pie.

2.2 Objetivos de la Etapa 3

El objetivo general de este estudio es identificar las zonas propensas a inundación y la tendencia sedimentológica del tramo de estudio del río Maipo, definido desde 500 metros aguas arriba del Puente San Ramón, comuna de Puente Alto, hasta 150 metros aguas abajo del Puente Naltahua, comuna Isla de Maipo. Para tal efecto se considera la aplicación de modelación numérica unidimensional y bidimensional, en base a la condición topo batimétrica actual del cauce.

En segunda instancia, se considera aplicar la modelación numérica unidimensional al caso con proyecto de encauzamiento, a fin de comparar los resultados respecto de la tendencia sedimentológica diagnosticada para la situación actual.

3 ALCANCES DE LA ETAPA 3

Los alcances de este proyecto están determinados principalmente por el objetivo específico que motiva la definición de un proyecto de encauzamiento en el tramo de estudio, y además por las restricciones usuales de los programas informáticos de tipo unidimensional y bidimensional, que emplean aproximaciones numéricas de las ecuaciones que rigen la física del comportamiento hidráulico y sedimentológico de los cauces naturales.

- El proyecto de encauzamiento es definido en base al valor del volumen mínimo de extracción por kilómetro lineal, establecido por la DOH, a las franjas de protección definidas para preservar los caminos perimetrales, profundidad máxima en sitios aledaños a las defensas de las riberas. Estos parámetros no aseguran que el proyecto sea factible y que cumpla con otros objetivos transversales esperados por el mandante como son el asegurar la estabilidad de las pilas de los puentes otras obras civiles emplazadas sobre el lecho.
- El modelo numérico bidimensional desarrollado en Mike 21 permite determinar en qué lugares, dentro de la zona de estudio, existe tendencia a la ocurrencia de desbordes ante eventos de crecidas asociadas a 50 y 100 años de periodo de retorno, para la situación actual. No obstante, dados los límites del modelo de terreno, definidos por contrato, no es posible cuantificar las superficies mojadas fuera del área de modelación representado por los caminos perimetrales.
- Otra limitación de la modelación bidimensional empleada es que funciona con lecho fijo, es decir durante el transcurso de la simulación de las crecidas para periodos de retorno de 50 y 100 años, el fondo del cauce no sufre ninguna variación en cota. Entonces, al analizar los resultados hay que considerar que en las zonas con alto potencial erosivo, se debieran presentar menores alturas de escurrimiento que las obtenidas de la simulación con lecho fijo, mientras que en las zonas que presentan condiciones favorables para la formación de depósitos de sedimentos se debieran alcanzar cotas de escurrimiento mayores a las obtenidas.

- El modelo numérico unidimensional desarrollado en HEC RAS, permite estimar de manera aproximada la tendencia sedimentológica de la zona de estudio, en base a la aplicación de formulaciones empíricas que permiten calcular el gasto sólido de fondo en distintos perfiles transversales del río. Este resultado, de tipo más bien cualitativo, esquematiza los sectores más propensos a la erosión o depositación de sedimentos. Cabe destacar que existe alta incertidumbre asociada a la predicción de la magnitud del transporte de sedimento de fondo, debido a que por una parte no se tiene información de la carga de sólidos efectiva disponible en la cabecera del tramo estudiado ni de su composición granulométrica, y por otra parte, existe una alta dispersión entre los resultados obtenidos del gasto sólido de fondo movilizado, dependiendo de la fórmula empírica aplicada. Por su concepción unidimensional HEC RAS no permite identificar la tendencia sedimentológica en los tramos con curvas, donde el sedimento tiende a depositarse en la zona interior de las curvas y a erosionar la zona exterior.

4 METODOLOGÍA ETAPA 3

La metodología aplicada para la consecución de los objetivos planteados en la Etapa 3 del estudio se explica a continuación:

- En primer término se realiza una revisión de los antecedentes disponibles en el sector de estudio, que son necesarios para generar los modelos numéricos tanto unidimensionales como bidimensionales. Otros antecedentes analizados corresponden a documentos técnicos cuyo contenido se enfoca en geomorfología fluvial y principalmente en los impactos de casos de estudio reales generados por la actividad de extracción de áridos en lechos de cauces fluviales, entre otros.
- Mediante un postproceso riguroso de la información topobatimétrica levantada en terreno, ejecutada en las etapas 1 y 2 del presente estudio, se desarrolla un modelo digital de terreno de alta resolución a partir del cual se obtienen por una parte los perfiles transversales requeridos para modelar en HEC-RAS así como también la base para interpolar la malla no estructurada utilizada para modelar en MIKE 21.
- Se desarrolla un modelo bidimensional en MIKE 21 con malla no estructurada, de todo el tramo de estudio, que simula el comportamiento del flujo ante los escenarios de caudales asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años, con el fin de determinar los sectores propensos a ser afectados por desbordes del cauce principal, los cuales se presentan gráficamente mediante planos.
- Se desarrolla un modelo unidimensional en HEC-RAS mediante simulación de transporte de sedimentos en régimen cuasi estacionario con el fin de simular la tendencia sedimentológica de todo el tramo de estudio. Originalmente se establece en el contrato que esta tendencia

sedimentológica debía representarse para los escenarios de caudales asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años, sin embargo en el transcurso del proyecto se optó por simular una crecida (con datos disponibles) a fin de identificar los tramos que presentan tendencia a la socavación o a la erosión. Específicamente se optó por modelar el transporte de sedimentos ante el evento de crecida del año 1982, la mayor de los registros disponibles ascendiendo hasta un caudal máximo o peak cercano a los 800 m³/s. Esta redefinición metodológica se fundamenta en que a criterio de INH la forzante más significativa sobre las modificaciones topobatimétricas del lecho, en el caso de imponer condiciones de caudal constante y de gran magnitud (como es el caso de los caudales asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años), es la presencia de curvas ya que determinan en mayor medida la formación y evolución morfológica de barras o bancos de material en su parte interna, y de fosas de socavación en la parte externa de la curva. HEC-RAS al ser un modelo unidimensional no permite cuantificar el efecto que producen las curvas sobre la movilidad del material granular del lecho, y por lo tanto se opta por identificar las zonas con tendencia a la erosión o sedimentación imponiendo como condición de borde un hidrograma anual que incluya la mayor crecida obtenida en los registros disponibles (año 1982). Esta modificación responde la necesidad de contar con una herramienta que sirva para generar una aproximación cualitativa de la evolución temporal de la morfología del cauce en respuesta a una serie anual de caudales variables.

- De manera adicional a la metodología inicial estipulada en el contrato y por necesidades del estudio, en última instancia se requiere diseñar un proyecto de encauzamiento en base a criterios definidos durante el desarrollo del estudio en conjunto con la DOH. A modo de evaluar la factibilidad del encauzamiento, se realiza una modelación unidimensional en HEC-RAS incluyendo la geometría del proyecto de encauzamiento en la topobatimetría de la situación actual, que simula la tendencia sedimentológica del cauce ante la serie anual de caudales que representan la crecida de 1982, con el fin estimar la factibilidad y los posibles impactos del proyecto en relación al comportamiento sedimentológico de la situación actual.

5 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

5.1 Antecedentes topo batimétricos

La base topográfica obtenida por el INH en la Etapa 1 y 2 del presente estudio, mediante el empleo de un dron para sobrevolar la zona de estudio, posee una resolución espacial de 0.5 x 0.5 metros (ver detalles en los informes de cada etapa). Por otro lado fue necesario obtener información en terreno de la batimetría del cauce principal del río Maipo (que no pudo ser obtenida por el dron), mediante GPS RTK (tiempo real). La información recolectada en los terrenos, contenida en una serie de puntos georeferenciados que representan las cotas de elevación dentro de la zona de estudio (en formato *.las y *.xyz), fue sometida a un pre proceso de filtrado y edición para eliminar los puntos

del levantamiento en los sitios con vegetación, edificaciones y otras estructuras, para la posterior construcción de un modelo de terreno idealizado para fines de modelación numérica.

La longitud del levantamiento de terreno es de aproximadamente 41 km de extensión, entre las coordenadas E348386.713 N6276144.698 y E321989.940 N6266805.009.



Figura 5-1: Topografía base para desarrollar el modelo numérico, en la figura vista 3D de sector aguas arriba Ruta 5

5.2 Antecedentes hidrológicos

En relación a los registros de caudales en el río Maipo, la Figura 5-2 presenta para la estación fluviométrica Maipo en El Manzano (estación más cercana hacia aguas arriba de la zona de estudio), los máximos anuales de los caudales medios diarios, para el periodo completo comprendido entre 1965 a 2009. Los valores máximos que igualan o superan los $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ocurren en los años 1973, 1978, 1982, 1983, 1987, 1988, 1993, 1998, 2001, 2005 y 2006, para los caudales de origen nival. En los años 1973, 1982, 1983 y 2005 se superan los $600 \text{ m}^3/\text{s}$ para estos caudales nivales. Por otro lado, en el caso de los máximos de origen pluvial se observa que éstos ocurren en los años 1982 y 1986, siendo además los años 1986 y 2008 los únicos en que este tipo de caudal supera a los de origen nival (ref [2]).

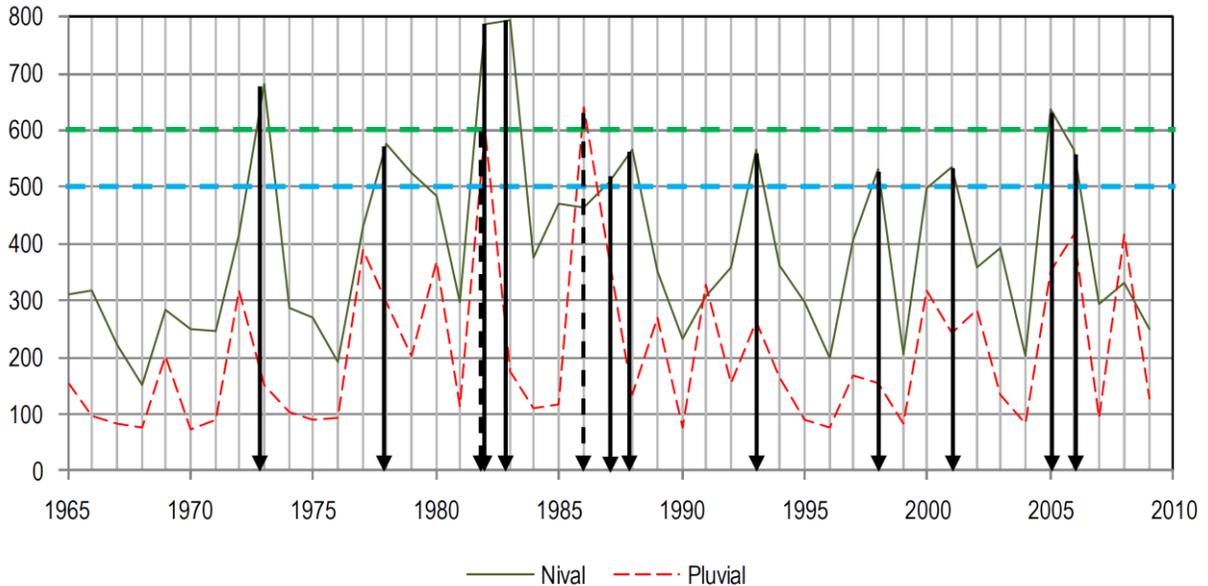


Figura 5-2: Caudal Medio Diario (m³/s) en estación El Manzano, destacando máximos anuales pluvial y nival, entre los años 1965 y 2010. Fuente: Ref [4]

En las Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5 la información de caudales mensuales históricos disponibles se representa en forma cíclica en función de los meses del año, para cada uno de los años. De esta manera se puede observar la importante variabilidad de la distribución de los caudales para cada mes dentro de cada año hidrológico, así como también la variación anual de esta distribución. A priori no es posible inferir algún patrón de comportamiento.

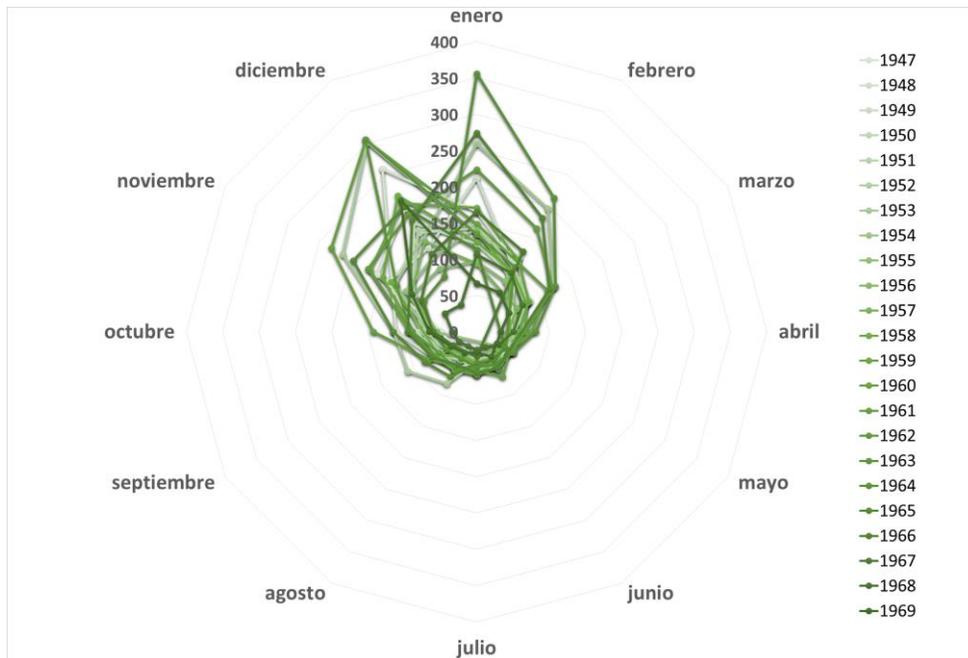


Figura 5-3: Distribución de caudales mensuales entre los años 1947 y 1969. Fuente: Elab. Propia

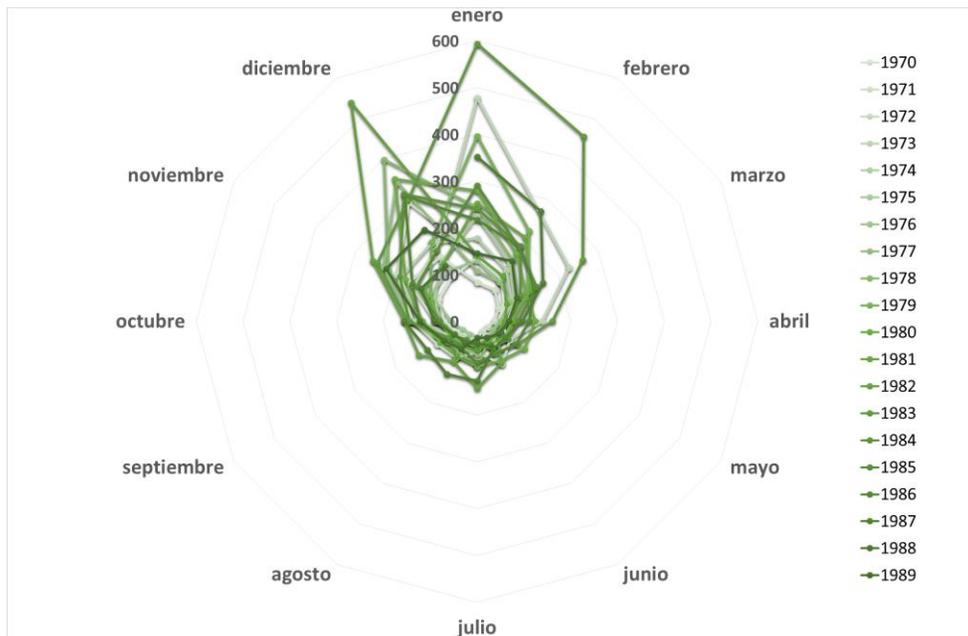


Figura 5-4: Distribución de caudales mensuales entre los años 1970 y 1989. Fuente: Elab. Propia

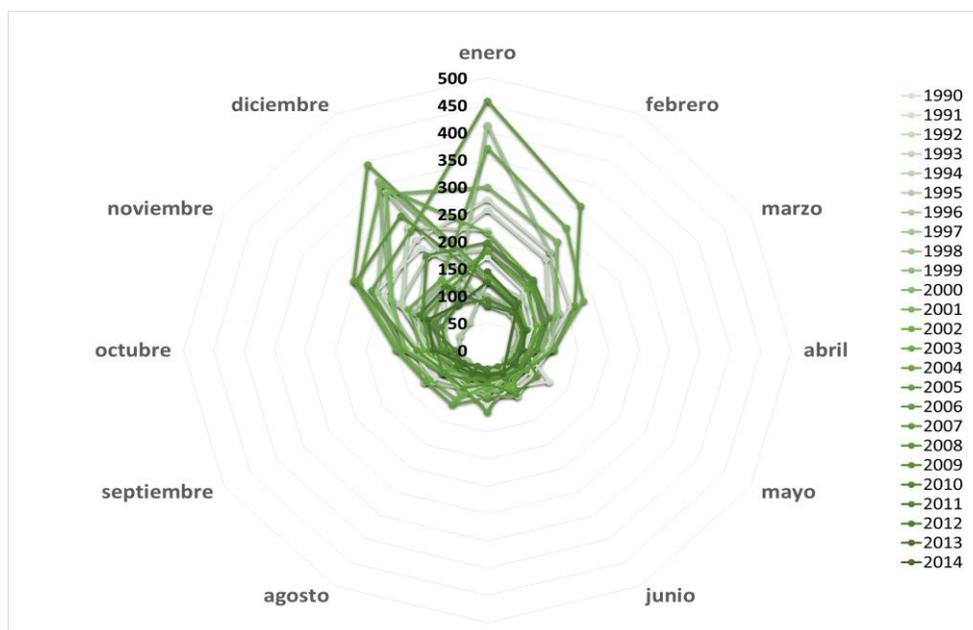


Figura 5-5: Distribución de caudales mensuales entre los años 1990 y 2014. Fuente: Elab. Propia

En el año 2009 la empresa AC Ingenieros elaboró el estudio “Análisis de Factibilidad de Encauzamiento del Río Maipo entre Puente San Ramón y Puente Naltahua”, para la DOH del MOP. En este estudio se presenta un análisis hidrológico del río Maipo desde el puente San Ramón hasta el Puente Naltahua, que se divide en tres tramos. Los caudales asociados a crecidas con diferentes periodos de retorno se presentan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Caudales de crecidas asociados a distintos periodos de retorno por tramos.

Tramo	Sector hidrológico	Caudales máximos instantáneos (m ³ /s)				
		T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años
1	Puente San Ramón – Río Clarillo	933	1317	1641	1998	2394
2	Río Clarillo – Río Angostura	1054	1485	1851	2255	2684
3	Río Angostura a Puente Naltahua	1648	2414	3055	3756	4526

A partir de esta información hidrológica, se estima que los caudales aportados por el río Angostura al Maipo, con probabilidades de ocurrencia asociados a 50 y 100 años de periodo de retorno, corresponden a 1204 m³/s y 1501 m³/s, respectivamente.

Por otra parte, con la finalidad de obtener un escenario para calibrar los parámetros implementados en el modelo numérico, se realizó para el presente estudio por parte del INH, un levantamiento de

información en terreno correspondiente a un aforo con medición simultánea de alturas de escurrimiento en 8 puntos a lo largo del Río Maipo. El aforo se realizó utilizando un molinete configurado a una tasa de muestreo de 10 segundos, de donde se obtuvo una estimación de caudal de 17 m³/s. Las mediciones de la cota del pelo de agua o nivel de escurrimiento se realizaron utilizando GPS RTK (tiempo real), referenciado al vértice IGM SB02, ubicado en el puente Maipo y que forma parte de la red geodésica generada en la etapa 1 del estudio. La información georeferenciada de las cotas de escurrimiento medidas en terreno se resumen en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Medición de alturas de escurrimiento en terreno

ID	X	Y	Z _{aforo}
P1	340582.44	6271272.90	505.99
P2	340594.48	6271261.70	506.06
P3	339739.38	6270576.89	493.69
P4	346043.94	6275017.47	572.85
P5	346034.94	6274992.56	572.79
P6	345180.39	6274426.89	558.50
P7	331420.82	6263623.15	397.69
P8	322227.91	6266530.28	300.06

En el caso de la modelación en HEC-RAS se cuenta con datos de la serie de caudales diarios durante el evento de crecida ocurrido en el año 1982, que constituyen la forzante de entrada al modelo unidimensional.

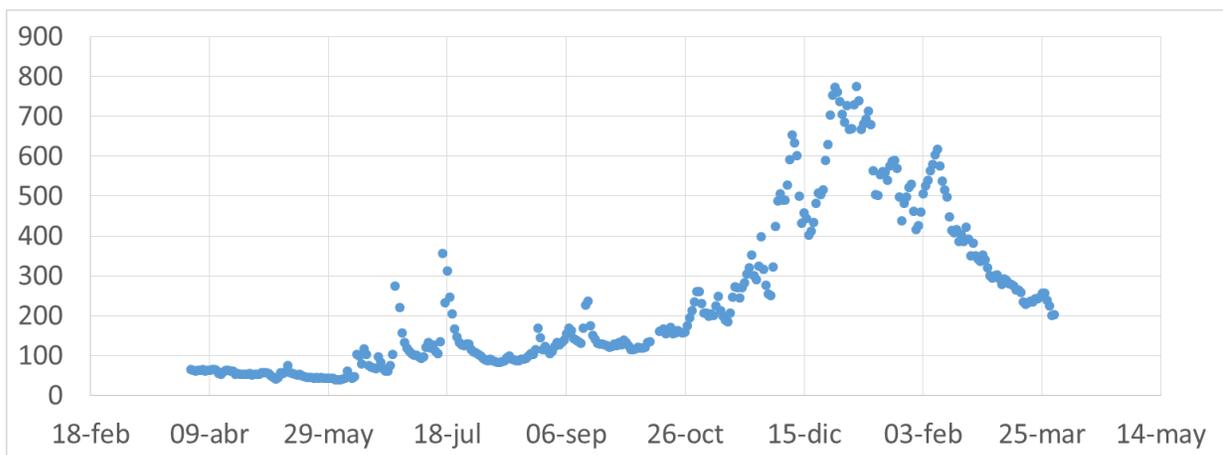


Figura 5-6: Distribución de caudales diarios en año 1982. Fuente: Elab. Propia

5.3 Antecedentes respecto a la rugosidad de fondo

A petición del mandante se utilizaron referencialmente los valores de rugosidad determinados en el estudio “Análisis de Factibilidad de Encauzamiento del Río Maipo entre Puente San Ramón y Puente Naltahua”. En la Tabla 5-3 del informe mencionado se consignan los valores del coeficiente de Manning, los cuales corresponden a los mismos empleados en el estudio “Diagnóstico del Plan Maestro del río Maipo y Afluentes, Región Metropolitana”.

Tabla 5-3: Coeficientes de rugosidad “n” según sectores

Sector	n planicies	n cauce
Puente San Ramón – Bocatoma Canal Huidobro	0,060	0,035
Bocatoma Canal Huidobro – 1 km aguas abajo Puente Lonquén	0,060	0,039
1 km aguas abajo Puente Lonquén – 2,7 km aguas arriba río Angostura	0,055	0,036
2,7 km aguas arriba río Angostura - 2,7 km aguas abajo río Angostura	0,070	0,042
2,7 km aguas abajo río Angostura – Puente Naltahua	0,060	0,037

5.4 Antecedentes respecto desbordes históricos producidos en el río Maipo

Espinoza (1990) especifica que entre las regiones Metropolitana y IX (33° y 39° de latitud Sur) se concentra el área con mayor frecuencia de inundaciones y los mayores daños a la vivienda, la infraestructura y números de damnificados.

Específicamente, el punto de confluencia entre los Ríos Maipo y Angostura dentro de la Región Metropolitana, fue catalogado por el M.O.P. (1994) como uno de los 35 sectores inundables “críticos” ubicados en la sección media e inferior del Río Maipo. Precisamente, el pueblo de Valdivia de Paine se localiza en el interfluvio de ambos ríos, a una distancia de 2 kms hacia el oriente de la confluencia. El registro más antiguo sobre daños ocasionados por el Río Maipo en esta área, corresponde al 23 de Agosto de 1953. Ese día, el Maipo destruyó totalmente las defensas fluviales próximas a la localidad de Valdivia de Paine (EL MERCURIO DE SANTIAGO, 1953).

Para la D.G.A. (op. cit. B) Valdivia de Paine y sus alrededores constituyen un área crítica frecuentemente inundada por el Río Maipo y en ocasiones por el Río Angostura. Sólo en los años ochenta (Foto N° 1), las inundaciones por desborde llegaron a afectar a 6.000 lugareños (B.F. INGENIEROS CIVILES, 1987).

6 MODELACIÓN MATEMÁTICA ZONAS PROPENSAS A PRESENTAR DESBORDES

En este apartado se explica la configuración del modelo 2D que resuelve las ecuaciones de aguas someras (MIKE 21 HD) en base a una malla no estructurada, detallando respecto de la definición del dominio y de la malla, las condiciones de borde empleadas, parámetros de estabilidad y los resultados obtenidos en cuanto a identificar en que sectores hay posibilidad de ocurrencia de desbordes.

6.1.1 Modelo de terreno y mallado del dominio de modelación

Se definió un modelo matemático de aproximadamente 41 km de extensión desde las coordenadas E348386.713 m N6276144.698 m, y E321989.940 m N6266805.009 m.

La base topográfica obtenida en la Etapa 1 del presente estudio, requiere de un importante trabajo de pre proceso para lo cual se utilizan los programas Global Mapper y Autocad, principalmente en la edición mediante algoritmos de filtrado, automáticos y manuales, de la nube de puntos obtenida con el dron, a modo de eliminar los puntos que definen los puentes, las zonas de vegetación alta y media, infraestructura de las faenas de áridos, puntos escapados producto del reflejo de las zonas con espejos de agua, entre otros. Luego de obtener un modelo de terreno filtrado, con puntos espaciados a un mínimo de 0.5 m, se incluyó además la información topo batimétrica del cauce principal de escurrimiento levantada con topografía tradicional. Estos datos son exportados luego a una grilla de puntos equi-espaciada a 5 m, con la cual se genera finalmente la interpolación de la triangulación que representa la malla de modelación generada en Mike 21.

La malla de modelación numérica, que permite la representación del modelo de terreno, es de tipo no estructurada con un total de 660637 elementos, cuyos catetos tienen un tamaño entre 0.21 m como mínimo (en sector de pilares), y de 16 m como máximo, generando elementos de 5 m² en la zona de los puentes hasta 70 m² en las zonas donde no existen puentes. En relación a los ángulos internos, para evitar inestabilidades en el modelo numérico, todos los elementos tienen ángulos interiores mayores a 21°.

Para representar el efecto de los pilares de los puentes en el comportamiento hidráulico del flujo, se crean áreas especiales de mallado entorno a estas estructuras, obligando al flujo a rodearlas. Lo anterior se realiza en tres zonas con presencia puentes a lo largo de la zona de estudio, tal como se muestra en la Figura 6-1, Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4 desde aguas arriba hacia aguas abajo.



Figura 6-1: Malla en zona de pilares, puente los morros y acceso sur.

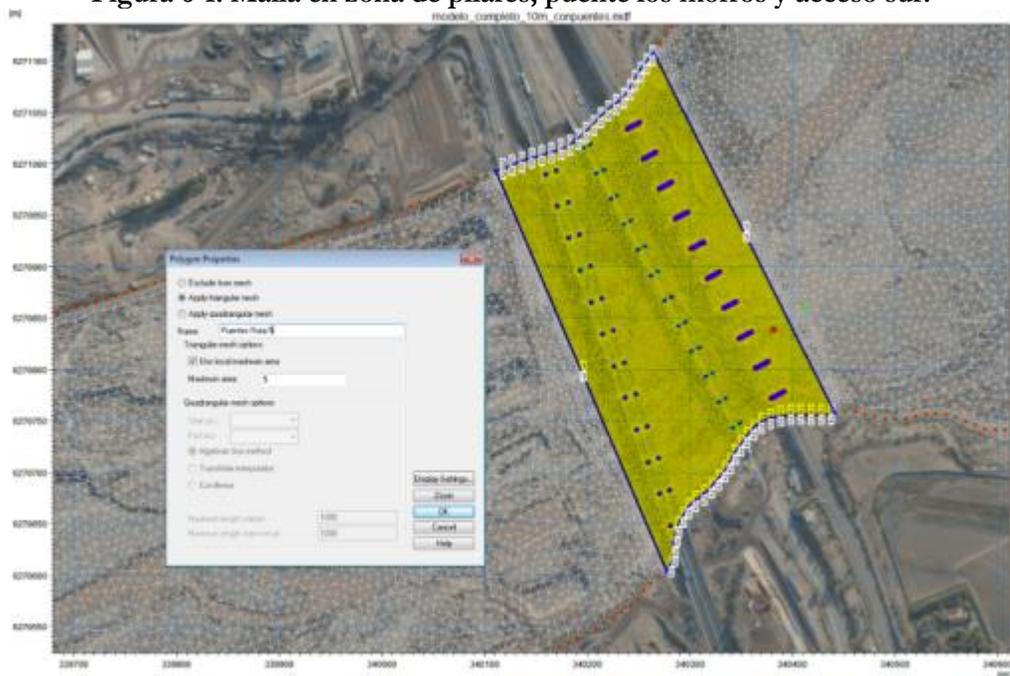


Figura 6-2: Malla en zona de pilares, puente ferroviario, viejo y ruta 5.



Figura 6-3: Malla en zona de pilares, Puentes Puntilla.

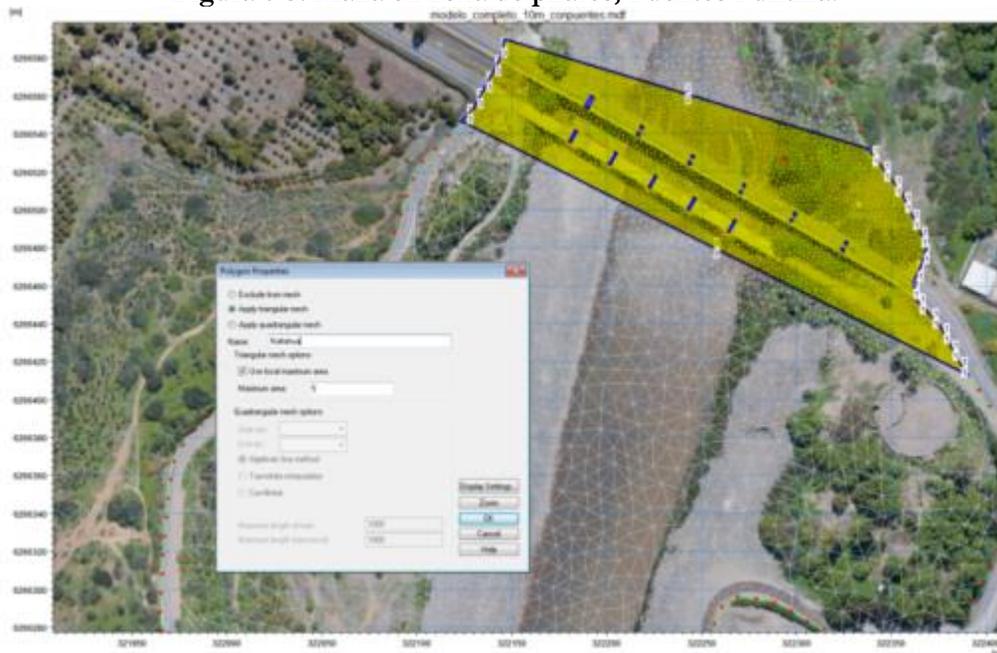


Figura 6-4: Malla en zona de pilares, Puentes Naltahua.

6.1.2 Condiciones de borde

En la Figura 6-5 se aprecian las condiciones de borde definidas en el modelo numérico, resaltando para mayor claridad las condiciones de entrada, de aporte del río Angostura, de salida, y la resolución de los contornos de las pilas de los puentes en Naltahua. En la condición de borde de entrada (color rojo) se considera una condición de descarga de caudal variable, en principio, hasta alcanzar condiciones de flujo en régimen permanente para los caudales de $1851 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2225 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a los periodos de retorno 50 y 100 años, respectivamente. En la condición de borde donde se incluye el aporte del río Angostura (indicado con un vector rojo), se establecen caudales de $1204 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1501 \text{ m}^3/\text{s}$, asociados a los periodos de retorno 50 y 100 años, respectivamente.

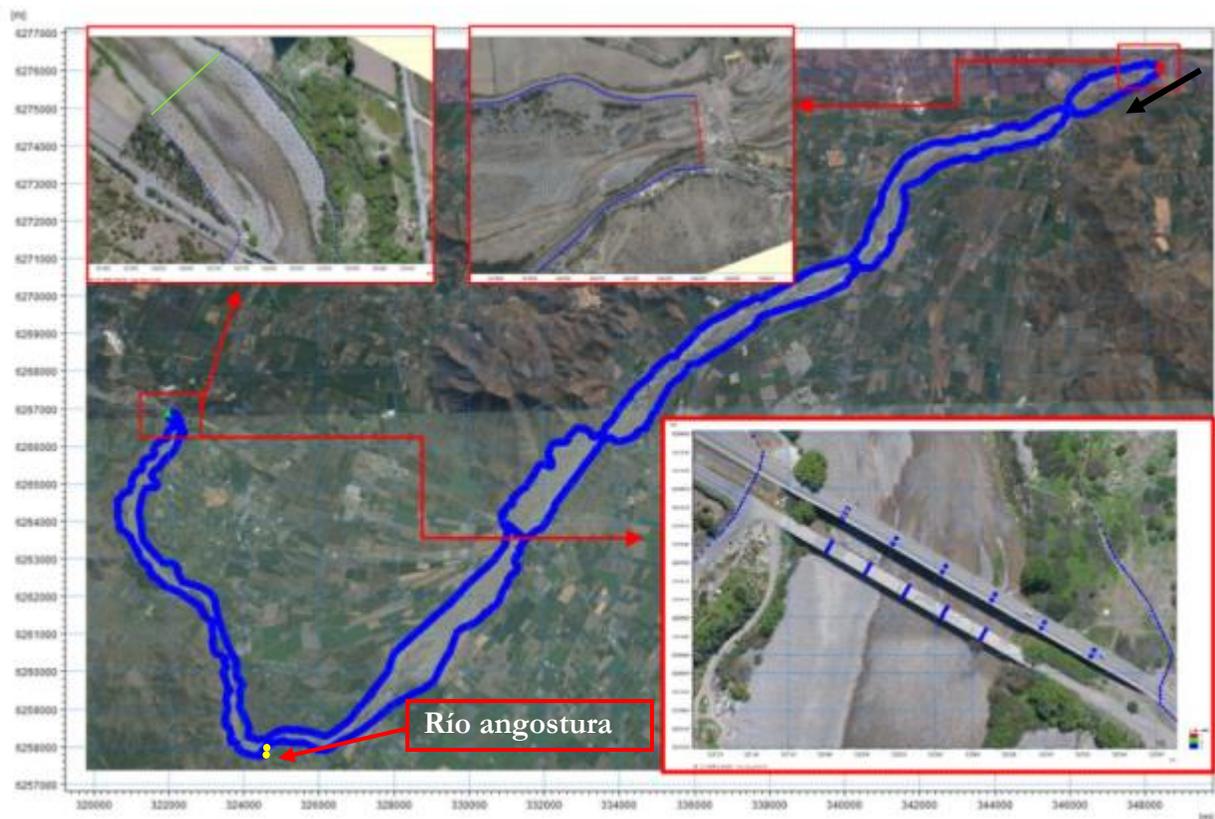


Figura 6-5: Condiciones de borde.

Por otro lado, en la condición de borde de salida del flujo (color verde), se establece una altura de escurrimiento igual a 303 metros, en base a cálculos aproximados partiendo de altura normal y luego de un proceso iterativo de prueba y error. Finalmente, en la condición de borde cerrado (color azul), que representa tanto los límites laterales del modelo como las pilas de puentes que actúan como

obstrucciones al flujo, se impuso una condición de frontera que no permite el paso de flujo a través de este borde (denominada "Land - Zero normal velocity" en Mike21).

6.1.3 Condiciones de rugosidad de fondo

El valor final para asignar una rugosidad de fondo al dominio de modelación fue obtenido a partir de la calibración de este parámetro, lo cual se detalla en el Anexo 2 del presente informe. Finalmente se utiliza el valor del coeficiente de Manning de 0.039 para todo el dominio de modelación, (cuyo coeficiente equivalente en Mike 21 corresponde a la inversa igual a $25.64 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$).

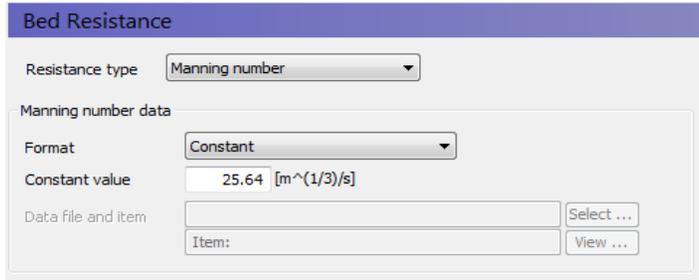


Figura 6-6: Rugosidad del dominio de modelación

6.1.4 Parámetros de estabilidad del modelo numérico

A continuación se exponen los parámetros más importantes de la configuración del modelo, que determinan su estabilidad numérica. Inicialmente se consideraron los valores obtenidos en la etapa de calibración, en cuanto a conservar un coeficiente de Courant igual a 0.5 y un paso de tiempo máximo de 0.2 segundos, sin embargo, luego de algunas iteraciones, se ajustaron otros parámetros. Se reduce el paso de tiempo mínimo desde 0.01 segundos a 0.006 segundos, y por otro lado, respecto a los algoritmos de mojado y secado, en este caso se modifica la profundidad de mojado a 0.2 m y la de secado a 0.005 m, mientras que los demás valores se mantienen por defecto.

Tabla 6-1: Parámetros de estabilidad del modelo numérico

Intervalo del <i>Time Step</i>	:	1 seg
Integración de tiempo y discretización del espacio	:	Alto orden
Mínimo paso del tiempo	:	0.006 seg
Máximo paso del tiempo	:	0.2 seg
CFL	:	0.5
Profundidad de secado	:	0.005 m (valor por defecto)
Profundidad de inundación	:	0.05 m (valor por defecto)
Profundidad de mojado	:	0.2 m
Viscosidad Turbulenta	:	Smagorinsky 0.28 (valor por defecto)

6.1.5 Diagnóstico de sectores con tendencia a presentar desbordes

Como se menciona dentro de las limitaciones del modelo numérico en MIKE 21, el hecho de definir los límites de la zona de estudio y por ende el dominio de modelación en los caminos perimetrales, tal como fue establecido por contrato, determina que no es posible cuantificar las áreas de inundación. Sin embargo, se obtienen todos los puntos sobre los bordes laterales del modelo donde el valor del escurrimiento en superficie libre supera a la cota de terreno en ese punto, para cada escenario modelado. Posteriormente, en función del cálculo de dichos sobrepasos, se analizan imágenes aéreas para determinar la existencia o no de terrenos más altos fuera de los bordes del dominio que pudieran contener los sobrepasos. Con el fin de ordenar y explicar los resultados obtenidos, el análisis de sobrepasos se realiza en 5 tramos, que son: tramo 1 entre los puentes Los Morros y Ruta 5, tramo 2 entre puente Ruta 5 y puntilla de Lonquén, tramo 3 entre puntilla de Lonquén y puente Lonquén, tramo 4 entre puente Lonquén y río Angostura, y tramo 5 entre río Angostura y puente Naltahua.

En el tramo 1 comprendido entre puente Los Morros y el puente Ruta 5, se observan sobrepasos de las riberas izquierda y derecha modeladas, en los sectores en que el cauce tiene un ancho menor, precisamente donde están emplazados los puentes. En general se puede ver que la ribera que presenta desbordes coincide con los puntos exteriores de la curva del cauce en este tramo. Observando las ortofotos tomadas con el dron, es posible inferir que en puntos que presentan sobrepasos existen sectores aledaños de mayor cota capaces de contenerlos.

En el tramo 2 comprendido entre puente Ruta 5 y puntilla de Lonquén, se observan sobrepasos de las riberas izquierda y derecha modeladas en el sector aledaño al estrechamiento del cauce producido en la puntilla de Lonquén. Es posible observar que los sobrepasos en la ribera derecha son contenidos por el cerro, mientras que por la ribera izquierda los desbordes se encauzarían hasta los sectores de siembra. Otros sobrepasos menores (aprox. Hasta 0.9 metros), se obtienen aguas arriba de la puntilla, por la ribera derecha, los cuales podrían producir algún tipo de desborde hacia las siembras emplazadas al costado.

En el tramo 3 entre la puntilla de Lonquén y el puente Lonquén, se identifican algunos sobrepasos puntuales por la ribera derecha, sin embargo, estos son contenidos por el cerro.

En el tramo 4 entre el puente Lonquén y el puente Naltahua, tanto por la ribera derecha como la izquierda, se identifican algunos puntos, generalmente aledaños a sectores de siembra, con sobrepaso de la cota de escurrimiento por sobre la cota de coronamiento de las defensas fluviales, alcanzando valores que varían desde los centímetros, en los tramos más anchos del cauce, hasta el orden de 3 metros, en el sector donde confluye el río Angostura que presenta un ancho efectivo de escurrimiento del orden de 150 metros.

En el tramo 5 entre río Angostura y el puente Naltahua, se detectan una serie de sobrepasos por ambas riberas de magnitud importante del orden de metros. En varios sectores, en particular ubicados por la ribera izquierda, los desbordes podrían ser controlados por la presencia de cerros naturales, así como por las zonas de siembra, mientras que, por la ribera derecha estos desbordes alcanzarían terrenos en que actualmente se observan emplazamientos residenciales.

Al observar más en detalle este tramo, es posible detectar que estos emplazamientos se ubican precisamente sobre terreno fluvial antiguo, depositado en eventos históricos de largo y mediano plazo, de donde se infiere que el río claramente transitó por dichos terrenos. En vista del análisis efectuado se concluye entonces que el río, ante eventos de crecida importantes en que las secciones transversales no alcanzan a contener el caudal, presenta una tendencia clara a generar desbordes hacia la ribera derecha.

En síntesis, los detalles respecto de los puntos con probabilidad de presentar desbordes se expone mediante planos adjuntos en el Anexo 3.

Finalmente, se entrega información sobre los posibles sobrepasos esperados en los puentes emplazados en el sector de estudio, resaltando cotas mínima de las vigas de puentes y las cotas para los escurrimientos asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años.

Tabla 6-2: Cota inferior puentes, cota escurrimiento y cálculo de sobrepaso

Puente	Cota Puente	Cota Escurrimiento		Sobrepaso	
		T50	T100	T50	T100
Los Morros	583.02	577.106	577.856		
Acceso Sur 01	576.35	575.817	576.204		
Acceso Sur 02	576.02	575.631	575.931		
Maipo Ferroviario	515.95	507.226	507.551		
Maipo Viejo	510.59	506.752	507.055		
Maipo Ruta 5	511.1	506.332	506.781		
Puntilla Carretero	401.943	401.913	402.176		0.233
Puntilla Ferroviario	402.575	401.66	401.952		
Naltahua Viejo	304.567	307.078	307.626	2.511	3.059
Naltahua Nuevo	307.52	306.918	307.447		

7 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

En este apartado se entregan los resultados obtenidos mediante las simulaciones efectuadas en HEC RAS de manera de indicar las tendencias sedimentológicas en el tramo del río Maipo estudiado. Se empleó el módulo de transporte de sedimento (Sediment transport simulation) en régimen cuasi estacionario para simular el hidrograma de crecida del año 1982, de modo de calcular para cada perfil su evolución topobatimétrica y así finalmente estimar cualitativamente si hay una tendencia a la erosión o la depositación entre perfiles, es decir, en tramos de 250 metros. Lo anterior se obtiene para el caso con geometría Actual y el caso que incluye proyecto de encauzamiento.

Los resultados del arrastre de fondo calculados para cada perfil de terreno están sujetos a una alta variabilidad, dependiendo de los parámetros utilizados en la configuración del modelo en HEC-RAS. La forzante que más determina esta variabilidad se refiere a la condición de borde de cabecera del modelo, donde se establece cual es la cantidad de sedimentos que están disponibles para ser movilizables. Este valor está influenciado tanto por fenómenos naturales como son las condiciones hidrológicas y la movilidad de sedimentos; así como por la intervención humana de extracción de áridos que modifica la geomorfología del cauce drásticamente (ver Figura 7-1); la presencia de la presa EMOS ubicada justamente aguas arriba del dominio de modelación que obstaculiza el tránsito del material granular, además de otras obras de infraestructura construidas en el cauce como son las pilas de puentes y muros guardarradier. Dados los argumentos anteriores se deben entender las limitaciones implícitas asociadas a establecer un valor que represente la disponibilidad de sedimentos en la cabecera, que pudieran ser movilizables por el flujo.



Figura 7-1: Efectos de la actividad de extracción de áridos sobre el lecho del Maipo.

Otros factores o variables que repercuten de manera sensible en los resultados de arrastre de sedimentos obtenidos son, la formulación teórica aplicada para el cálculo del caudal sólido que es capaz de transportar una sección, y el parámetro de esfuerzo de corte referencial (válido en algunos métodos) que representa el límite del esfuerzo a partir del cual se produce la movilidad de sedimentos. También cabe resaltar la variabilidad inherente al tipo de simulación configurada, específicamente en cuanto al régimen de escurrimiento impuesto que puede ser estacionario, cuasi estacionario o bien impermanente. En este caso se simula el transporte de sedimentos para régimen cuasi estacionario.

En vista de lo expuesto anteriormente se analiza, mediante simulación numérica en HEC RAS, la sensibilidad de los resultados en función de las variables: formulación utilizada, esfuerzo de corte referencial y condición de borde de sedimentos en la cabecera. Las formulaciones empleadas para efectuar las estimaciones del gasto sólido por sección transversal son las de Meyer Peter & Müller (MPM) y Wilcock & Crowe (W&C). Al aplicar la formulación de W&C se analizó además la sensibilidad de los resultados ante distintos esfuerzos de corte referenciales (τ_{*m}^*), considerando un τ_{*m}^* de 0.02, 0.03 y 0.04, el cual depende fuertemente del porcentaje de arena contenido en la capa activa, concluyendo que en términos generales y cualitativos este parámetro no incide en gran medida en la tendencia sedimentológica del cauce. Finalmente se opta por calcular las cargas de arrastre de fondo mediante las formulaciones clásicas de MPM y W&C con los factores recomendados por defecto, para de esta manera comparar los resultados de una fórmula desarrollada para un tamaño uniforme como MPM, y otra que considera no sólo una granulometría extendida sino que también los efectos de sobreexposición y escondimiento en la coraza del río que corresponde a W&C. En cuanto a la condición de arrastre de sedimentos impuesta aguas arriba del dominio, se opta por simular tanto considerando que el aporte de sedimentos de la sección de cabecera es igual al potencial de arrastre (condición de equilibrio), y por otro lado se ingresa una curva de ajuste entre el gasto sólido y el gasto líquido además de las fracciones de sedimentos por tamaño de grano, obtenidos de la explotación del modelo a escala reducida del muro guardarradier (ver Informe Etapa 4).

7.1 Definición Proyecto de encauzamiento

En este punto se detallan antecedentes sobre el proyecto de encauzamiento definido en conjunto con la DOH, el cual posteriormente es incluido en la topografía de la situación actual, generando la geometría base para la modelación de la tendencia sedimentológica del escenario con Proyecto de Encauzamiento.

La definición del proyecto de encauzamiento a ser evaluado se diseñó en conjunto con la DOH. La idea base de este proyecto se obtuvo del estudio del año 2009 denominado “Análisis de Factibilidad de Encauzamiento del Río Maipo”, entregado por la DOH, elaborado por AC Ingenieros, en el cual se generó un proyecto de encauzamiento del río Maipo preliminar, que incluye la zona de interés del presente estudio. Producto de la baja resolución de la topografía obtenida en dicho estudio, y de la

escasa precisión en cuanto a la georreferenciación del mismo, es que esta información sólo es utilizada referencialmente.

El Proyecto de encauzamiento entre puente Los Morros y Ruta 5 es un antecedente de este estudio, elaborado por Baltazar (entregado por la DOH) en la zona alta del área de estudio, consistente en una sección de encauzamiento con fines de asegurar un volumen de extracción de áridos. Es importante notar que este proyecto requiere de un análisis de detalle, ya que por ejemplo elimina la plataforma que soporta la torre de alta tensión (341809.016, 6273493.386) ubicada en el centro de la caja del río; por otro lado, la canalización es de ancho tal que en algunos tramos corta los caminos definidos por contrato como fronteras de la zona de estudio; además en las transiciones de la canalización al terreno natural se observan cambios abruptos de pendiente, ya que se deja inalterada la topografía en la zona de emplazamiento de los puentes Los Morros y Ruta 5; y el proyecto fue definido de puente a puente no respetando mínima franja de seguridad en torno a las pilas. Por todo lo anterior este encauzamiento no se incluye en la geometría con proyecto.

Para el resto del tramo del río Maipo, la DOH ha dispuesto los siguientes criterios para poder definir el trazado del encauzamiento. En primer lugar, el proyecto debe tener sección y pendiente tal que permita obtener un volumen de extracción aproximado de 250000 m³ por kilómetro de avance. Por otro lado, el proyecto debe respetar una franja de protección en las pilas de los puentes de 1 kilómetro hacia aguas arriba y hacia aguas abajo. Otro criterio aplicado fue el de dejar una faja de protección de 75 metros (o 50 metros en situaciones particulares) desde los caminos que definen los bordes de la zona de estudio hasta el proyecto de encauzamiento.

En este contexto, se proyectó en conjunto con la DOH una sección triangular con taludes de pendiente 1%, y ancho basal de 400 metros, excepto en las zonas donde no se respetaba el criterio de la distancia mínima hasta los caminos, en las cuales el ancho basal es menor a 400 metros situación observada principalmente aguas debajo de la confluencia del río Angostura. Se proyectó esta sección en 2 tramos dentro del área de estudio, variando de manera iterativa la cota de fondo de inicio y fin de encauzamiento, hasta alcanzar un volumen de corte neto igual a 250000 m³/km.

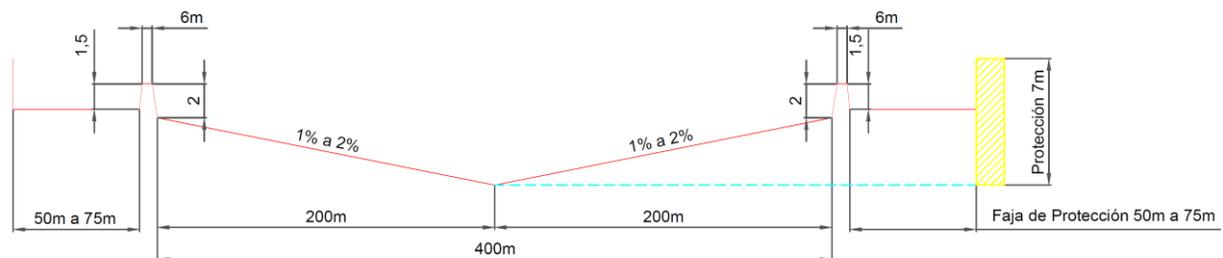


Figura 7-2: Malla en zona de pilares, puente acceso sur.

Se construye entonces un modelo digital de terreno que incluye la geometría del encauzamiento proyectado dentro de la topobatemetría actual. (Ver Figura 7-3,

Figura 7-4 y

Figura 7-5)

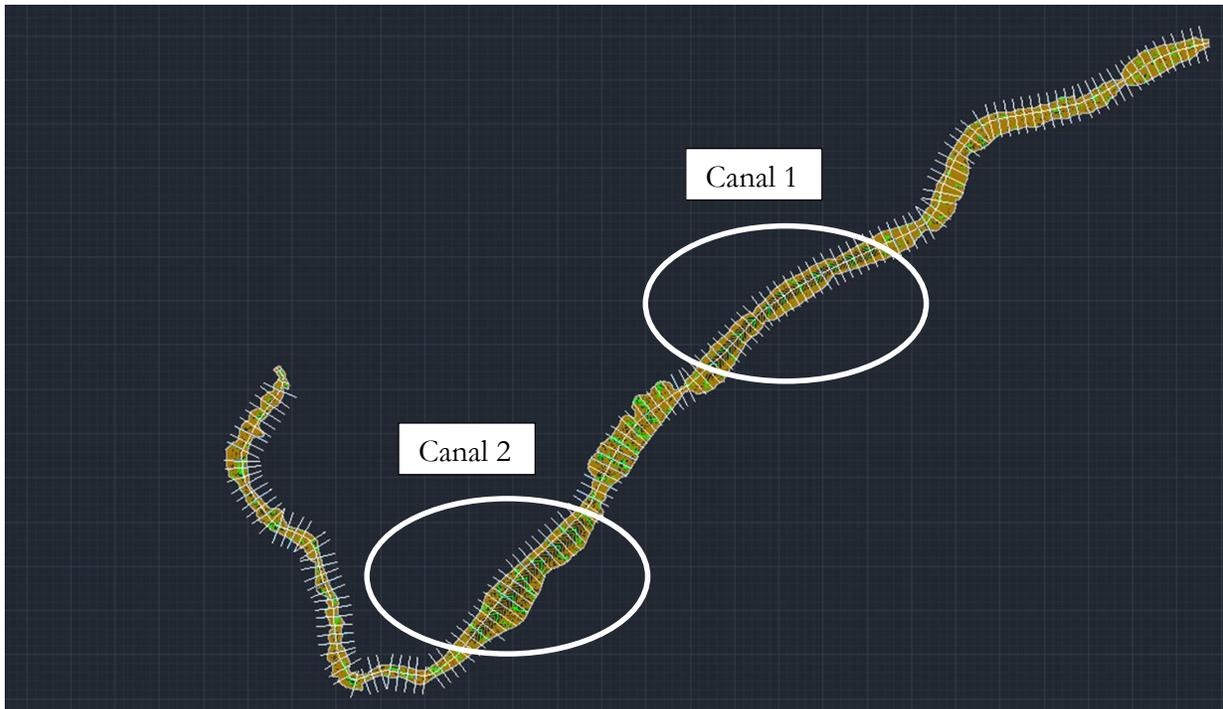


Figura 7-3: Superficie de terreno que incluye proyecto encauzamiento.

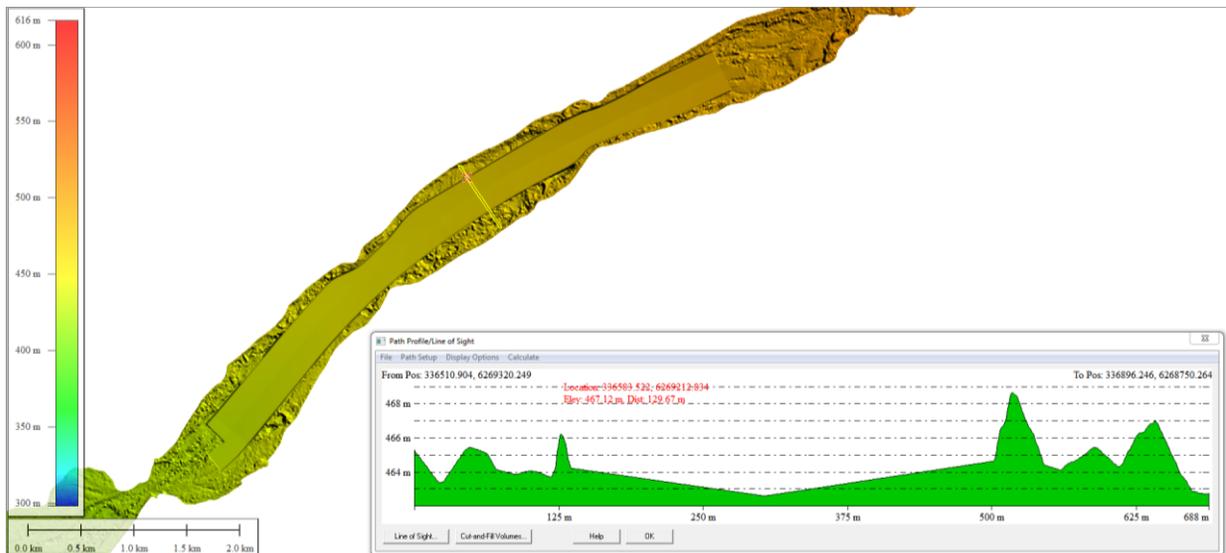


Figura 7-4: Canal 1, planta y corte transversal tipo.

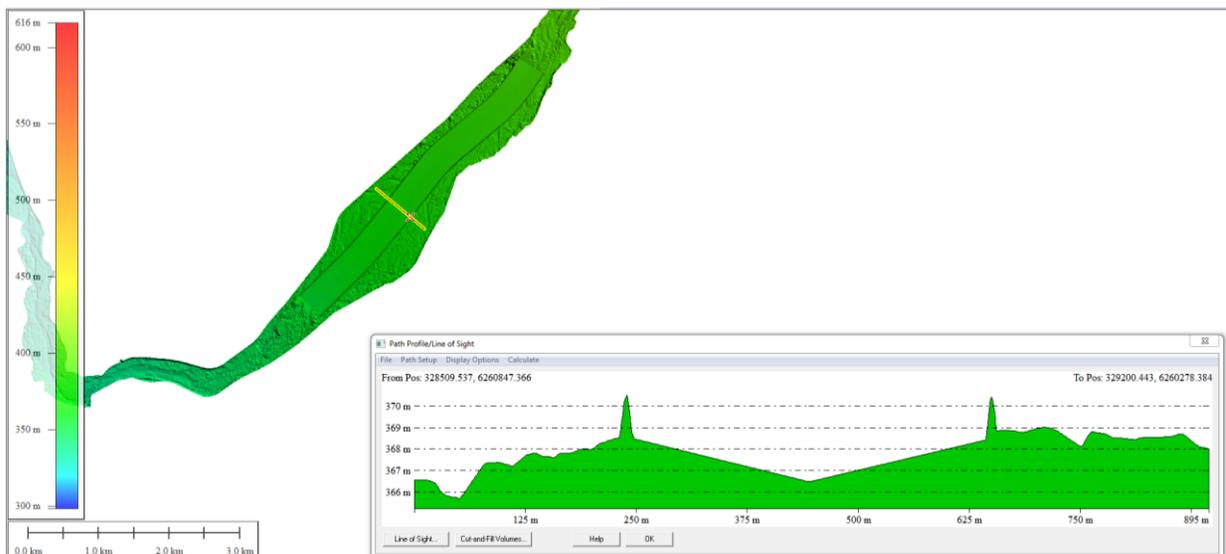


Figura 7-5: Canal 2, planta y corte transversal tipo.

7.2 Tendencia de erosión y depositación

A continuación para las situaciones actual y con proyecto de encauzamiento, se presenta un resumen en cuanto al número y porcentaje de perfiles dentro del tramo que presentan erosión o bien sedimentación, considerando las fórmulas de MPM y W&C, distinguiendo además el tipo de condición de borde asignado en la cabecera del modelo, que en este caso consiste en una condición de borde de equilibrio (denominado EQUILIBRIO en la Tabla 7-1) o bien en las relaciones de gasto sólido versus gasto líquido obtenidas de los ensayos en modelación física (denominado SEDIMENTOS en la Tabla 7-2).

Notación:

Color azul: indica tendencia a la sedimentación, es decir representa un ascenso del lecho

Color rojo: indica tendencia a la erosión, es decir representa un descenso del lecho

Tabla 7-1: Resumen de resultados por perfil transversal, Hidrograma 1982, Condición de borde de equilibrio.

	CONDICIÓN DE BORDE: EQUILIBRIO			
	MPM		W&C	
	ACTUAL	PROYECTO	ACTUAL	PROYECTO
N° perfiles con erosión	67	67	57	46
N° perfiles con sedimentación	100	100	110	121
Masa total acumulada (ton)	8321235	9909336	18780270	23741990
% perfiles con erosión	40%	40%	34%	28%
% perfiles con sedimentación	60%	60%	66%	72%

Tabla 7-2: Resumen de resultados por perfil transversal, Hidrograma 1982, Condición de borde curva gasto sólido versus gasto líquido.

	CONDICIÓN DE BORDE: SEDIMENTOS, CURVA Q_s v/s Q_L			
	MPM		W&C	
	ACTUAL	PROYECTO	ACTUAL	PROYECTO
N° perfiles con erosión	81	82	87	79
N° perfiles con sedimentación	87	86	81	89
Masa total acumulada (ton)	3611571	3826886	502445.9	787408.6
% perfiles con erosión	48%	49%	52%	47%
% perfiles con sedimentación	52%	51%	48%	53%

En la

Tabla 7-3, para los casos modelados con condición de borde de equilibrio, y con curva de gasto sólido versus gasto líquido, se presenta el valor esperado del cambio en la cota de elevación por perfil al término de la simulación de la crecida del año 1982, además de representar en color rojo los perfiles con tendencia a la socavación y en color azul los que tienen tendencia a la sedimentación. Se diferencian los resultados obtenidos para la situación actual y con proyecto de encauzamiento.

Tabla 7-3: Tendencia Sedimentológica por perfil transversal, Hidrograma 1982

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE				
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	
41724	-0.1	-0.1	-0.6	-2.7	-0.5	-0.4	-1.6	-3.5	
41474	-2.2	-2.1	-2.5	-3.6	-3.2	-3.0	-4.5	-6.2	
41224	-1.9	-1.5	-3.2	-3.0	-3.0	-2.7	-4.3	-5.4	
40974	-1.2	-1.2	-3.1	-2.8	-2.6	-2.5	-3.7	-4.7	
40724	-0.5	-0.5	-2.2	-2.3	-1.2	-1.3	-2.6	-3.9	
40474	-1.1	-1.8	-2.6	-3.4	-2.0	-2.7	-3.8	-5.4	
40224	-0.6	-2.3	-3.0	-4.5	-2.7	-2.8	-4.6	-4.9	
39974	-0.1	-1.2	-3.5	-4.2	-2.8	-1.6	-4.5	-4.0	
39724	0.3	-0.1	-3.2	-4.2	-2.1	-0.7	-3.4	-2.8	
39474	2.1	2.2	-0.6	-1.3	0.6	1.9	-0.6	-0.4	LOS MORROS Y ACCESO SUR
39224	2.8	2.7	0.3	-0.2	1.4	2.1	0.0	-0.1	
38974	2.1	3.1	-0.1	0.8	2.3	2.7	0.6	0.6	
38724	3.1	4.9	1.3	2.8	4.1	4.1	2.5	2.3	
38474	2.9	4.5	1.8	3.3	4.1	4.2	2.7	2.6	
38224	1.0	3.4	1.3	2.6	2.8	2.6	1.1	0.7	
37974	-0.4	1.7	-3.4	-4.0	1.4	0.8	-0.3	-1.3	
37724	0.9	2.2	-1.5	-1.2	2.7	2.3	1.0	0.1	
37474	-0.3	0.3	-1.6	-2.7	0.6	0.6	-1.2	-1.9	
37224	-0.3	0.3	-2.0	-2.7	-0.4	-0.1	-2.5	-3.0	
36974	0.0	0.6	-1.5	-2.7	-0.5	0.1	-2.8	-3.1	
36724	0.8	1.0	-0.8	-2.3	0.1	0.9	-2.3	-1.9	
36474	1.1	1.8	-0.4	-0.9	-0.3	0.8	-2.4	-1.7	
36224	1.7	2.2	0.4	-0.1	0.2	1.3	-1.2	-0.7	

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE				
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	
35974	4.8	5.3	3.6	4.3	4.1	5.1	3.2	3.8	
35724	2.4	1.7	1.2	1.2	2.5	3.1	1.9	1.8	
35475	0.5	-0.3	-1.1	-1.1	0.4	0.7	-0.7	-1.1	
35225	0.3	-0.1	-1.4	-0.9	-0.5	0.4	-2.0	-2.0	
34957	2.8	1.8	1.5	1.0	2.3	2.9	0.7	0.5	
34724	-0.7	-0.8	-1.2	-1.5	-1.1	0.1	-2.6	-2.2	
34474	0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0.8	-1.3	-1.2	
34224	0.7	0.0	0.8	0.1	0.0	0.9	-1.0	-0.9	
33974	1.1	0.6	1.1	0.8	1.1	1.9	0.1	0.2	
33728	0.9	0.4	0.5	1.0	1.3	2.0	0.7	0.5	
33468	0.6	0.6	0.3	1.4	1.2	2.4	1.4	1.4	
33226	0.0	-0.3	0.2	-0.8	-0.1	1.3	1.1	0.8	
32965	-0.9	-1.1	-0.8	-1.3	-2.1	0.1	-0.1	-0.4	
32724	-2.1	-1.9	-2.2	-2.2	-4.0	-0.6	-2.1	-1.3	
32474	-2.4	-2.7	-2.6	-3.0	-4.6	-1.6	-3.5	-2.6	
32224	-2.6	-2.4	-2.8	-2.9	-4.6	-1.5	-3.8	-2.7	
31974	-2.9	-1.9	-3.2	-2.5	-5.4	-1.8	-4.9	-3.9	VIEJO, FERROVIARIO Y RUTA 5
31724	-3.4	-2.4	-3.9	-3.1	-6.4	-3.0	-6.0	-6.3	
31474	0.0	2.1	-0.2	1.4	-2.5	0.8	-1.7	-1.9	
31224	-1.5	1.5	-0.8	0.7	-1.5	2.5	-0.4	0.4	
30974	-0.9	0.6	-0.5	0.1	-0.5	3.1	0.8	1.0	
30724	-0.6	0.6	0.1	0.6	-0.7	3.4	0.8	1.0	
30474	-1.5	-0.5	-1.0	-0.5	-2.1	2.9	-0.5	0.6	
30224	-1.7	-0.7	-1.0	-0.7	-2.1	2.7	-0.8	0.7	CANAL N°1
29974	-1.4	-0.8	-0.9	-1.3	-1.9	1.6	-0.9	0.2	
29724	-1.5	-0.9	-1.7	-1.3	-2.4	1.0	-2.4	0.1	
29474	-2.6	-1.2	-3.4	-1.3	-3.4	0.9	-3.8	0.1	
29224	-2.2	-1.5	-3.5	-1.7	-2.3	0.6	-2.4	-0.1	
28974	-1.8	-1.5	-2.8	-1.9	-2.9	0.6	-3.1	-0.3	
28724	0.4	-1.3	-0.1	-2.8	-0.6	0.2	-0.8	-1.2	
28474	2.3	1.8	1.4	-0.1	2.8	3.0	1.7	1.7	

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE			
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS	
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY
28224	-0.9	0.1	-1.6	-2.0	-0.2	1.2	-2.1	-0.7
27974	-1.0	0.5	-2.0	-0.4	-0.7	2.2	-3.2	0.3
27724	-0.4	1.2	-1.6	0.3	-0.8	1.9	-2.0	0.3
27474	0.8	-1.5	-0.9	-0.1	1.7	1.6	0.2	0.4
27224	3.1	-0.9	1.4	-0.6	4.2	1.1	3.1	0.0
26974	-0.3	-0.8	-0.6	-0.5	2.4	1.2	0.8	-0.1
26724	-1.0	-0.7	0.2	-0.8	0.7	1.2	-1.6	0.2
26474	-1.9	-0.4	-1.1	-1.3	-0.2	1.2	-3.0	0.7
26224	0.4	0.2	0.4	-0.5	1.6	1.0	-1.4	0.9
25974	0.8	0.1	0.7	-0.4	1.7	0.8	-1.4	0.8
25724	0.9	-0.3	0.3	-0.7	1.1	-1.3	-2.2	-1.6
25474	3.7	4.3	3.2	3.7	4.2	3.0	0.8	2.3
25224	8.7	1.4	7.7	1.0	9.6	0.4	6.8	0.2
24974	3.7	0.8	2.5	0.1	4.7	0.1	2.7	0.0
24726	2.9	0.5	2.2	0.1	4.6	0.1	3.1	0.1
24472	3.5	0.2	2.2	0.1	4.5	-0.7	3.4	-0.2
24221	1.9	1.4	1.1	1.2	3.1	0.3	2.2	1.0
23974	-0.6	-0.2	-1.1	-0.5	1.1	-1.0	0.3	-0.3
23724	-2.5	-1.8	-2.7	-2.1	-0.9	-2.6	-2.0	-1.9
23474	-2.0	-1.7	-2.0	-1.8	-0.5	-2.5	-1.8	-1.9
23224	-0.3	0.5	0.4	0.3	1.4	-0.6	-0.4	-0.6
22974	-0.1	1.1	0.4	0.7	2.0	0.2	0.2	-0.1
22724	-1.0	0.9	-0.7	0.1	1.5	0.2	-0.2	-0.1
22475	-0.2	1.4	-0.1	0.4	2.5	1.1	1.3	1.1
22224	-1.4	0.0	-1.4	-1.1	1.1	-0.4	0.5	0.1
21961	-1.0	-0.3	-0.9	-1.4	0.3	-0.7	0.3	0.0
21727	-1.6	-0.6	-1.2	-1.7	-0.2	-0.6	-0.4	-0.3
21470	-1.3	-0.5	-0.9	-1.5	-0.1	-0.3	-0.7	-0.5
21211	-0.2	-0.3	0.3	-1.1	0.8	0.2	0.0	0.1
20969	0.0	-0.5	0.3	-0.3	0.6	-0.2	0.2	-0.1
20720	-0.4	-0.7	-0.2	-0.4	-0.5	-0.1	0.0	0.0

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE				
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	
20471	-0.9	-0.6	-0.6	-0.7	-1.5	-0.4	-1.6	-1.3	PUNTILLA LONQUEN
20228	-1.0	-0.1	-0.8	-0.2	-1.1	0.2	-1.4	-1.1	
19974	0.2	0.2	0.1	0.1	-0.2	1.2	-0.2	-0.1	
19724	0.4	-0.5	-0.9	-0.7	0.0	1.6	-0.3	0.3	
19474	-0.8	-1.5	-1.6	-0.6	-0.1	1.1	-0.8	-0.1	
19224	-0.6	-0.7	-0.9	0.4	1.3	1.7	0.5	0.1	
18974	-0.2	-0.3	0.0	0.0	1.4	1.7	0.1	-0.3	
18732	-0.4	0.8	-0.1	0.0	1.5	2.7	0.1	0.7	
18466	0.0	0.9	0.3	-0.5	1.7	1.9	0.3	0.4	
18223	-0.2	0.8	-0.6	-0.5	1.3	1.4	0.3	0.1	
17970	-0.2	0.3	-0.9	-0.5	0.8	1.1	0.0	0.1	
17726	0.3	0.3	-0.8	-0.2	0.7	0.9	0.1	0.2	
17477	0.0	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	0.5	0.1	0.1	
17223	-0.6	0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.5	0.0	0.0	
16964	-0.4	0.3	0.3	0.1	-0.2	0.4	0.0	0.1	
16728	-0.4	0.1	0.0	0.2	-0.4	0.3	0.0	0.2	
16471	-0.2	-0.1	0.1	0.5	-0.1	0.1	-0.1	-0.3	
16229	0.4	0.1	0.6	0.0	0.5	0.3	-0.3	-1.2	
15981	1.1	1.2	1.0	-0.3	1.1	1.6	-0.2	0.1	
15722	1.2	0.1	0.8	-0.3	1.6	1.6	0.1	0.1	
15473	0.6	-0.5	0.6	0.0	1.7	1.5	0.3	0.2	
15220	-0.1	-0.3	0.0	-0.5	1.6	1.5	0.5	0.2	
14975	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	1.4	1.3	0.6	0.1	
14725	-0.1	0.1	-0.1	0.0	1.1	1.4	0.7	0.3	
14474	-0.3	0.1	-0.2	0.2	0.8	1.2	0.5	0.2	
14224	-1.1	0.2	-1.2	0.3	0.3	1.2	-0.9	-0.4	
13974	-0.1	-0.1	-0.6	0.1	1.0	0.4	-1.6	-2.0	
13724	1.0	1.2	0.7	1.2	1.7	1.6	-1.4	-1.2	
13474	3.3	3.6	2.9	3.3	5.2	5.1	2.4	2.4	
13224	0.7	1.0	0.2	0.7	3.3	3.4	0.4	0.4	
12974	-0.2	1.0	-0.3	0.7	2.8	3.8	-0.2	0.1	

CANAL N°2

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE				RIO ANGOSTURA
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	
12724	0.0	-0.7	-0.3	-0.9	2.9	1.5	-0.4	-0.6	
12474	5.5	5.5	5.0	5.3	8.7	8.4	5.3	5.4	
12224	3.5	3.6	3.1	3.3	6.7	6.4	3.6	3.7	
11974	1.4	1.5	1.1	1.2	4.5	4.3	1.7	1.8	
11724	0.1	0.1	-0.5	-0.1	3.0	2.9	0.8	0.7	
11474	0.0	0.2	-0.5	0.0	2.6	2.6	0.5	0.6	
11224	-0.1	0.4	-0.1	0.3	2.5	2.6	0.5	0.7	
10974	0.8	0.4	0.4	0.4	2.3	2.1	0.6	0.5	
10724	0.6	0.6	0.7	0.6	2.2	2.2	0.5	0.5	
10474	0.5	0.2	0.7	0.2	2.0	1.6	0.4	0.0	
10224	0.5	1.8	0.6	1.9	2.2	3.1	0.6	1.7	
9974	0.8	1.0	0.8	1.0	2.6	2.8	1.3	1.5	
9724	0.5	0.3	0.5	0.4	2.4	2.3	1.0	1.0	
9474	0.0	0.1	-0.1	0.1	2.0	1.9	0.8	0.6	
9224	0.1	0.5	0.1	0.6	1.7	2.2	0.7	1.1	
8974	-0.1	1.1	0.1	1.1	1.4	1.9	0.5	0.8	
8724	0.7	0.3	0.7	0.3	1.9	1.3	1.0	0.7	
8474	2.0	1.7	2.0	1.7	3.1	3.3	2.4	2.8	
8224	0.6	0.5	0.6	0.5	1.8	1.8	1.1	1.3	
7974	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	0.8	0.8	0.3	0.4	
7724	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.7	0.5	0.4	0.4	
7474	-0.9	-0.4	-0.9	-0.4	-0.3	-0.1	-0.5	0.0	
7224	0.5	0.3	0.5	0.3	0.7	0.2	0.6	0.3	
6974	-1.2	-1.1	-1.2	-1.1	-0.7	-0.9	-0.6	-0.5	
6724	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	
6474	-0.8	-1.0	-0.8	-1.0	-0.3	-0.6	-0.2	-0.4	
6224	-0.7	-1.4	-0.7	-1.4	-0.2	-0.7	-0.1	-0.6	
5956	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-0.5	-0.6	-0.5	-0.8	
5724	-0.4	-1.0	-0.4	-1.0	0.1	0.0	-0.3	-0.5	
5474	-0.7	-1.1	-0.6	-1.1	0.2	0.2	-0.3	-0.2	
5224	-0.6	0.1	-0.6	0.1	0.9	1.5	0.5	1.2	
4974	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.1	1.2	0.3	1.5	

RS	MEYER PETER & MULLER				WILCOCK & CROWE			
	EQUILIBRIO		SEDIMENTOS		EQUILIBRIO		SEDIMENTOS	
	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY	ACT	PROY
4724	-0.2	-2.0	-0.2	-2.0	-0.1	-0.8	0.5	-0.1
4474	-2.0	-1.9	-2.0	-2.0	-1.0	-1.2	-0.6	-0.7
4224	-1.0	-0.7	-1.0	-0.8	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5
3974	0.0	0.4	0.1	0.3	0.5	0.3	0.0	-0.3
3724	0.4	0.5	0.4	0.4	0.7	0.2	-0.1	-0.8
3474	1.1	4.6	1.1	4.5	1.1	1.9	0.5	0.9
3224	0.6	0.3	0.6	0.4	1.0	1.5	0.6	0.8
3042	0.2	0.0	0.4	0.0	0.7	1.0	0.4	0.5
2724	-0.1	0.3	0.3	0.3	0.6	0.9	0.5	0.6
2474	-0.2	-0.6	-0.2	-0.6	0.3	0.4	0.3	0.3
2224	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1
1974	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
1724	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.1	0.0	-0.1	-0.2
1474	0.5	0.6	0.6	0.6	0.3	0.4	0.6	0.4
1224	-0.9	-0.8	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.4	-0.2
974	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.0	0.1	0.0	0.0
724	-1.4	-1.3	-1.4	-1.3	-1.0	-0.7	-1.2	-0.9
474	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5	-0.9	-1.0	-1.4	-1.4
116	-0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

NALTAHUA

La primera observación que se puede informar, corresponde a la elevada variabilidad en cuanto al aumento o descenso esperado de las cotas en cada perfil en respuesta a la modificación de parámetros como: 1) la cantidad de sedimentos disponible en la cabecera del modelo para ser transportado por el hidrograma de crecida, lo cual es ratificado dado el notable incremento de la capacidad erosiva del flujo en respuesta a una menor disponibilidad de sedimentos en la cabecera del modelo; 2) la ecuación empleada para el cálculo del arrastre de sedimento de fondo; y 3) modificaciones de la morfología base al incluir un proyecto de encauzamiento, visualizado en los cambios en magnitud de las socavaciones o incluso cambios en la tendencia sedimentológica tanto en los perfiles modificados por el proyecto, como en las zonas que conservaron la misma topobatimetría.

Al analizar más en detalle la tendencia sedimentológica de los perfiles transversales por sectores es posible efectuar las siguientes observaciones: 1) en general en la zona se aprecia una propensión a la depositación (promedio de 65% de los perfiles con inclinación a la depositación para condición de

equilibrio), sin embargo como se mencionó anteriormente a menor disponibilidad de sedimentos en el borde aguas arriba del dominio de modelación es notorio el incremento en la capacidad erosiva del lecho (promedio de 51% de los perfiles con inclinación a la depositación para condición de borde de gasto sólido versus gasto líquido). 2) En las zonas con presencia de puentes en general se distingue una clara propensión a la socavación, la cual alcanza valores máximos esperados en el sector de emplazamiento de la Ruta 5 del orden de magnitud de metros. En puente Los Morros en cambio se identifica una tendencia hacia la depositación para el caso en que se tiene condición de equilibrio en el borde aguas arriba del modelo, y hacia la erosión cuando la disponibilidad de sedimentos está limitada a una curva de gasto sólido versus gasto líquido. 3) En el sitio donde se definen secciones de encauzamiento, es decir, en canal 1 y canal 2, las ecuaciones que resuelven el gasto sólido indican una modificación del patrón de comportamiento sedimentológico especialmente si se analizan los resultados obtenidos con la expresión de Wilcock & Crowe, que pronostican para estos sitios una notoria disminución de la capacidad de arrastre y por ende se favorece el proceso de sedimentación dentro de estos canales. Si bien Meyer Peter Muller predice también una disminución de la capacidad de arrastre de partículas, se mantiene una tendencia marcada a la erosión en estos sitios. 4) En la zona hacia aguas abajo, tramo entre confluencia del río Angostura y Naltahua, se aprecia una tendencia por tramos alternados, depositación-erosión- depositación-erosión desde aguas arriba hacia aguas abajo (RS 724 a 10224), donde además se distingue una disminución de la magnitud de estas socavaciones y depositaciones en el sentido de escurrimiento.

Ante las deducciones planteadas se torna entonces evidente la complejidad que involucra el determinar un patrón de comportamiento para el transporte de sedimentos. No obstante se puede constatar que los resultados entregan tendencias base a modo de tener un punto de referencia, que se acercan bastante al comportamiento esperado descrito en la literatura (Ver Ref [1]).

8 CONCLUSIONES RESPECTO DEL PROYECTO DE ENCAUZAMIENTO

Para evaluar el proyecto de generar una sección de encauzamiento en el tramo del río estudiado se debe establecer claramente cuál es su objetivo principal. En este sentido se entiende que se busca lograr un ordenamiento de la extracción, hoy por hoy, no regulada, mediante la aprobación de permisos de extracción locales que al ser ejecutados vayan definiendo el proyecto general de encauzamiento. Dentro de los objetivos específicos se requiere que el proyecto logre por una parte otorgar un volumen de extracción base de 250000 m³ por kilómetro lineal del eje del río (valor definido por DOH), contener la crecida de periodo de retorno de 100 años, y por otro lado no generar la erosión local sobre las pilas de los puentes presentes en la zona, ni sobre las defensas de las riberas. Con este marco entonces resta evaluar el logro del proyecto en base a estos objetivos.

Para el caso del presente estudio se analizan los siguientes aspectos del proyecto: 1) el alcance temporal del proyecto o su sostenibilidad; 2) impactos esperados sobre el lecho del cauce. En cuanto a evaluar cada uno de ellos se recurre a los resultados de las modelaciones numéricas 1D y 2D realizadas en este estudio, así como también a la experiencia del INH en modelos a escala reducida de lecho móvil, y a fuentes bibliográficas que documentan los efectos de la extracción de áridos en lechos de ríos en base al monitoreo topobatimétrico de casos reales.

1) Respecto de la sostenibilidad (vida útil) del proyecto, de la experiencia INH es posible extrapolar hacia el presente estudio, el hecho que el concepto de encauzamiento del río definido por secciones transversales y transiciones regulares en su batimetría, no es sustentable en el tiempo, ya que su morfología irá variando constantemente en función de las crecidas y el continuo paso de los caudales formativos.

Para visualizar lo anterior se detalla el proceso físico de transporte de sedimentos observado en otros modelos a escala reducida realizados por el estudio INH, en el cual se simula una condición de escurrimiento a caudal constante, a partir de una estado inicial de lecho móvil con superficie regular en toda la extensión del cauce, teniendo pendientes de fondo en el tramo similares a las de la zona del presente estudio. De las experiencias se pudo observar con precisión que ya en los primeros instantes de comenzada la experiencia en laboratorio surgían patrones de escurrimiento o líneas de corriente además de ondas transversales claramente apreciables en la superficie libre en respuesta a factores como los cambios de dirección en las curvas, variaciones en el ancho de escurrimiento, cambios geométricos generales y locales en la superficie de los taludes así como las irregularidades propias de la capa activa del lecho.

El caudal constante del flujo ensayado generaba la movilización del material granular presente en la capa activa del lecho en un amplio rango de tamaño de partículas, en donde se lograba observar claramente como éstas eran removidas desde el lecho y transportadas por acción del arrastre del flujo mediante todos los mecanismos descritos en la literatura. Al avanzar la experiencia era notable la

modificación en la superficie del lecho, fácilmente apreciable por la formación de barras o bancos de material y socavaciones generalizadas, principalmente en la parte interior y exterior de las curvas, respectivamente.

Asimismo, los resultados de las modelaciones en 1D obtenidos en este estudio, también avalan la dificultad para que este proyecto defina una sección regular de ordenamiento que sea sostenible en el tiempo, ya que permitieron identificar alta variabilidad de la tendencia sedimentológica del río en su eje longitudinal, intercalando consecutivamente tramos con balance de masa tendientes a la erosión o a la sedimentación tanto para el escenario situación actual y con proyecto de encauzamiento.

A partir de las modelaciones también es posible inferir que en el caso hipotético de llegar a formar una sección uniforme de encauzamiento, posteriormente por efecto del continuo y aleatorio escurrimiento de distintos caudales, el lecho del cauce será modificado desde un estado inicial de pendiente uniforme hacia estados posteriores en que teóricamente se pueden alcanzar condiciones pseudo permanentes. Los resultados de la variabilidad de los patrones de transporte de sedimento en el cauce, se analizaron tramos en el eje del río de 250 metros de extensión.

Por otro último, las modelaciones numéricas tampoco permiten calcular de manera determinística la magnitud del grado de afectación sobre las cotas actuales del lecho del río que podría inducir el proyecto respecto de la situación actual levantada en terreno.

2) Para referirse a las potenciales externalidades que podría generar la ejecución de un proyecto de encauzamiento se debe incluir, además del análisis presentado en el punto 1), la experiencia internacional documentada en la literatura que expone los impactos medidos en la morfología de los cauces producto de la actividad de extracción de áridos. En base al monitoreo de largo plazo sobre la evolución topobatimétrica del lecho de ríos que han sido sometidos a una extracción intensiva de áridos llevada a cabo mediante la construcción de pits o canteras de explotación, se ha evidenciado una alteración en la morfología del cauce y un efecto de déficit local de sedimentos que potencialmente podrían inducir incisión del lecho, acorazamiento de fondo e inestabilidades de los taludes. La excavación de pits en el lecho alteran el perfil de equilibrio de fondo, aumentando el gradiente en la entrada del pit y por ende la capacidad erosiva del flujo que avanza comúnmente hacia aguas arriba, proceso conocido como erosión retrograda. Existen registros de pits de explotación de áridos que se han propagado por kilómetros hacia aguas arriba del canal principal e inclusive de los canales tributarios. Por otro lado, como generalmente el sedimento arrastrado por el flujo es retenido en el pit, se genera hacia aguas abajo un fenómeno conocido como “hungry water” en el cual el agua que pasa comienza a erosionar el lecho y los taludes para recuperar al menos parte de su carga de sedimento. Un efecto directo de la incisión en el lecho es la afectación sobre pilas de puentes y otras estructuras rígidas, las cuales deben ser reforzadas estructuralmente con gaviones o por elementos fabricados o bien por extensión de las pilas. A modo de ejemplo, se expone el caso

de Stony Creek, California, donde la socavación producida por la represa Black Butte puede ser claramente distinguida de los efectos de la explotación de áridos sobre las pilas del puente Highway 32, en virtud de sus distintivos patrones temporales y espaciales de socavación. La socavación inducida por la represa fue notable aguas debajo de esta al poco tiempo de ser construida en 1963. En contraste, la extracción de áridos produjo una socavación mayor a 7 metros en sitios cercanos al puente Highway 32, justo luego de la intensificación de la explotación de áridos en los años 70's. La extracción de áridos en lechos de cauces fluviales ha sido prohibida en el Reino Unido, Alemania, Francia, Holanda y Suiza, y ha sido reducida en ríos con impactos evidentes en Italia, Portugal y Nueva Zelanda. (Ref [1]).

Para el caso del presente estudio donde se analiza un tramo del río Maipo de aproximadamente 40 kilómetros de extensión, se puede inferir que la intensiva actividad de extracción de áridos ha influido en la reducción de las cotas de fondo del lecho principal, fácilmente apreciable en la socavación de las pilas de los puentes ruta 5, Acceso Sur y los Morros, fenómeno que ha motivado la ejecución de muros guardarradier aguas debajo de dichos puentes a modo de inducir artificialmente mayor retención de sedimentos y por ende un aumento en las cotas de terreno que soportan las pilas de ambos puentes. En contraste a lo anterior se puede también inferir que en el margen aldeaño a las defensas fluviales, ubicadas en la parte baja de la zona de estudio se ha producido un aumento en las cotas de fondo del lecho observables en la disminución de la altura efectiva de los enrocados, limitando su efecto de contención de inundaciones hacia los sectores actualmente utilizados para la actividad agrícola. Es claro que estos sitios fueron formados originalmente por el desborde del río ante eventos de crecida importantes y que por lo tanto constituyen una zona natural de regulación del río caracterizado por la disminución de la pendiente de fondo, disminución de la velocidad del flujo, incremento de la tendencia a la sedimentación de partículas, aumento en las alturas de escurrimiento y desborde hacia las planicies de inundación.

9 RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS

En general, la estrategia utilizada por distintos países para regular la explotación de áridos en cauces fluviales varía ampliamente, y en muchos casos sin conseguir un manejo efectivo de la actividad. Una estrategia es la definición de una rasante de extracción dada generalmente por el thalweg o punto de mayor profundidad en una sección transversal, que define la cota mínima hasta donde la extracción de áridos es permitida (medida en campañas topográficas anuales). Este sistema tiene la dificultad de no generar un datum permanente para establecer un mínimo de extracción y más bien migra verticalmente hacia una menor cota a medida que el cauce principal se profundiza (Ref [1]).

Otro método se basa en la estimación de la carga anual de sedimentos desde aguas arriba, y en limitar la tasa de extracción de sedimentos a este valor (considerando algún factor de seguridad). El gran inconveniente del método es justamente la alta incertidumbre asociada a calcular la carga de sedimentos del río, variable de año a año. Pero más fundamental aún es que asumir que se puede extraer áridos de acuerdo a la tasa de reposición del río sin afectar al cauce, ignora totalmente el aumento en el potencial efecto erosivo del flujo aguas debajo de la zona de extracción (Ref [1]). El problema se torna más complejo aún al incluir el efecto de discontinuidad sobre las tasas de reposición de sedimentos producto de la ubicación de la represa de Aguas Andinas (ex EMOS) justo aguas arriba de la zona de estudio en sector La Obra.

De acuerdo a los resultados obtenidos por este estudio, además de la experiencia recopilada en ríos de diversos países que ya han experimentado los efectos de la extracción de áridos, la recomendación del INH es detener la extracción de áridos en la zona. Lo anterior se fundamenta en que no existe actualmente ninguna formulación teórica o cálculo numérico que permita identificar si un proyecto de encauzamiento como el analizado o bien el establecimiento de una rasante de mínima extracción puede o no asegurar la estabilidad de las obras fluviales emplazadas dentro del sector de estudio, como son pilas de puentes, defensas de riberas y obras de toma; y al mismo tiempo detener las inundaciones en los sitios aledaños.

Pese a esta recomendación, el INH propone como medida transitoria hasta la detención de la actividad de extracción de áridos en el lecho del cauce, que el organismo regulador aplique estrategia de asignación de permisos hasta una rasante mínima de extracción. El presente estudio genera la definición de una rasante mínima que corresponde a la suma entre la cota del thalweg obtenido en las campañas de terreno efectuadas, y una altura de sobre protección igual a 1.5 metros, que se fundamenta en que el lecho descubierto tiende a profundizarse hasta un estado acorazado (Anexo

10 REFERENCIAS

- [1] Kondolf, G.M. 1997. Hungry Water: Effects of dams and gravel mining on river channels. Environmental Management. (vol.21.nº4) University de California. Berkeley, California 94720, USA: USADLAE, pp.533 – 551.
- [2] AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA., AC ingenieros consultores Ltda. 1996, julio. Estudio de niveles de socavación Maipo en la calchona zona de cruce de gasoducto. (v2.cap.1). Ingeniería y construcción argan S.A. Santiago, Chile ARGAN S.A.21p.
- [3] ALVARADO, L. A. 2009. Diagnóstico de la situación del río colino y análisis de su estabilidad frente a crecidas pluviales. Memoria Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 207p.
- [4] AES GENER. 2011. Evaluación de impactos acumulativos Proyecto Hidroeléctrico alto Maipo.revB.Nº103.INF.1.58p.
- [5] BERTINI, P.H.E.2008. Comportamiento Hidráulico y sedimentológico de la Bocatoma independiente de aguas andinas en el río Maipo. Memoria Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.55p.
- [6] INTERNATIONAL GEOGRAPHY SYMPOSIUM – GEOMED (3.era version, 2013) Actual in – Stream mining in alluvial rivers: Geomorphological impact and European legislation. Editors: Efe Recep; A. Ibrahim y I. Cürebal.10.p
- [7] INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA. Mayo (1989). Estudio “Mejoramiento Bocatoma independiente en el río Maipo”. Chile.
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA. Julio (1984). Toma independiente en el río Maipo Estudio en modelo reducido. Chile.
- [9] ISSUED. 2007, august. Technical supplement Scaur calculations (supl) vol.VI: p: 44. National Engineering Handbook. Part. 654.
- [10] JULIEN, P. Y.2002. River Mechanics. New York, USA. Cambridge University Press. 4354p.
- [11] ORDENES, V, Á.M.2006. Amenaza fluvial y viabilidad Geográfica de un sistema de explotación de áridos para el manejo estructural de los Cauces Fluviales en el área de Valdivia de

Paine, Comuna de Buin. Memoria de Geógrafo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.135p.

[12] PARKER 'S. Transport of Gravel and Sediment Mixtures. Fluvial Phenomena Associated With Sediment Mixtures. CHARPER 3 FOR ASCE MANUAL N°54.

LUC ORTLIEB. (1994). Las mayores precipitaciones Históricas en Chile central y la cronología de eventos Enos en los siglos XVI – XIX. REVISTA CHILENA DE HISTORIA NATURAL 67:463 – 485p.

[13] MINISTERIO DE MINERIA, Gobierno de Chile .Sernageomin. (Junio de 2015). Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados desde 1980. Unidad de peligros Geológicos y ordenamiento territorial y ordenamiento territorial. Y el geólogo Aníbal Gajardo.

[14] GODOY, C, 2009. Manejo y regulación de la extracción de áridos en zonas urbanas de Santiago, Chile: Modelación y Análisis de la dinámica del sedimento en el Río Maipo. XIX Congreso de ingeniería Hidráulica.



11 ANEXOS (SE INCLUYE COPIA EN DIGITAL COMO EN PAPEL)



11.1 Anexo 1: Modelo Numérico Inundación.



11.2 Anexo 2: Calibración Modelo Numérico.

11.3 Anexo 3: Planos Sobrepasos Río Maipo, T=50 y T=100 años (8 láminas).

11.4 Anexo 4: Superficie con rasante mínima para extracción de áridos.

