



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIRECCIÓN REGIONAL L.B. O´HIGGINS**

**DISEÑO Y MEJORAS
ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA
RÍO CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO**

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 527

Santiago, Noviembre 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Arquitecto Sr. Juan Carlos García

Director General de Aguas

Ingeniero Civil en Industrias Forestales Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo

Director Regional L.B. O´ Higgins

Ingeniero Constructor Sr. Sergio Álvarez Sepúlveda

Inspector Fiscal

Ingeniero Ambiental Sr. Juan Jiménez Reyes

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto

Ingeniero Civil Dr. Felipe Espinoza Contreras

Equipo Profesional

Ingeniero Civil Sr. Alejandro Arenas Herrera

Ingeniero Civil Sra. María Teresa Peralta Pallares

Ingeniero Ejecución Geomensura Sr. Marcos Díaz Núñez

Ingeniero Civil Sr. Rodrigo Zapata Inostroza

Equipo de Apoyo

Ingeniero Civil Océanico Sr. Marco Matamala Castro

Ingeniero Civil Sr. Gustavo Romero Sepúlveda

Ingeniero Civil Sr. Ulises Sepúlveda Jilberto

Geógrafo Sr. Sebastián Bozo Villaroel

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda la siguiente manera: Dirección General de Aguas (DGA), 2022. Diseño y Mejoras Estación Fluviométrica Río Cachapoal en Puente Arqueado, SIT N° 527, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Dirección Regional L.B. O'Higgins, Rancagua, Chile. Realizado por: Con Potencial Consultores SpA.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	PRESENTACIÓN	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.2.1	<i>Objetivo general.....</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>1</i>
1.3	ZONA DE ESTUDIO.....	2
2	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	3
3	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	3
3.1	IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR DE SECCIONES DE INTERÉS.....	4
3.2	COMPARACIÓN SECCIÓN 1 Y SECCIÓN 4	4
3.3	TIPOS DE SOLUCIÓN POSIBLES DE CONSIDERAR	7
3.4	PROPUESTA DE ESTACIÓN	8
4	TRABAJOS DE TERRENO.....	9
4.1	TOPOGRAFÍA.....	9
4.2	MECÁNICA DE SUELOS	11
5	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE CRECIDAS	13
5.1	ASPECTOS GENERALES.....	13
5.2	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA CON INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA.....	14
5.3	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA EN FORMA INDIRECTA	15
5.4	CAUDALES LÍQUIDOS ADOPTADOS	16
5.5	CAUDALES SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	17
5.6	CAUDALES DE DISEÑO ADOPTADOS.....	18
5.7	CAUDALES MEDIOS MENSUALES	18
6	DISEÑO ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA.....	20
6.1	METODOLOGÍA	20
6.1.1	<i>Modelación Hidráulica</i>	<i>20</i>
6.1.2	<i>Cálculo de Enrocados.....</i>	<i>21</i>
6.1.3	<i>Socavación</i>	<i>21</i>

6.2 ESTUDIO HIDRÁULICO	22
6.2.1 Descripción Situación Actual y Obras Proyectadas.....	23
6.2.2 Modelación Hidráulica 2D	25
6.2.3 Curva de Descarga.....	29
6.2.4 Cálculo de Enrocados.....	31
6.2.5 Transporte de Sedimentos.....	32
6.2.6 Socavaciones.....	32
6.3 DISEÑO ESTACIÓN.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Modelación estratigráfica general.....	12
Tabla 5-1: Resultados Análisis de Frecuencia Estación Río Cachapoal en Puente Arqueado	14
Tabla 5-2: Caudales obtenidos con métodos indirectos	15
Tabla 5-3: Caudales instantáneos determinados	16
Tabla 5-4: Caudales adoptados.....	16
Tabla 5-5: Caudales sólidos en suspensión.....	17
Tabla 5-6: Caudales adoptados	18
Tabla 6-1: Coeficientes de Rugosidad asignados por zona.....	26
Tabla 6-2: Curva de Descarga Estación Fluviométrica proyectada	30
Tabla 6-3: Curva de Descarga Estación Fluviométrica proyectada. Caudales Bajos.....	31
Tabla 6-4: Presupuesto estación	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación Geográfica de la estación existente.....	2
Figura 3-1: Secciones posibles para la sección de aforo.....	4
Figura 3-2: Estación fluviométrica existente	5
Figura 3-3: Perfil topobatimétrico Sección 1.....	5
Figura 3-4: Sección 4-Vista desde Ribera Norte hacia aguas arriba	6
Figura 3-5: Perfil topobatimétrico Sección 4.....	7

Figura 3-6: Caracterización hidráulica río Cachapoal en Puente Arqueado	8
Figura 4-1: Sectores levantamiento topográfico. En rojo recorrido realizado	9
Figura 4-2: Nube de puntos Final Sección 4	10
Figura 4-3: Ubicación Calicatas.....	11
Figura 4-4: Análisis Granulométrico.....	13
Figura 5-1: Distribución Gumbel adoptada.....	15
Figura 5-2: Curva de variación estacional	19
Figura 5-3: Curva de variación estacional histórica	19
Figura 6-1: Metodología HEC-RAS 2D	21
Figura 6-2: Ubicación Actual Estación Fluvimétrica	24
Figura 6-3: Zona Propuesta para Nueva Estación Fluvimétrica	24
Figura 6-4: Esquema tridimensional estación propuesta	25
Figura 6-5: Aspectos variables para la configuración de la estación fluvimétrica.....	28
Figura 6-6: Modelo Digital de Terreno. Ubicación propuesta Con Proyecto.....	29
Figura 6-7: Curva de Descarga Estación Fluvimétrica.....	30
Figura 6-8: Curva de Descarga Estación Fluvimétrica. Caudales Bajos.....	31

1 PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA) requiere una asesoría para el mejoramiento de la estación denominada Río Cachapoal en Puente Arqueado, la que permite el control fluviométrico directo sobre el caudal del Río Cachapoal. La estación presenta una serie de inconvenientes hidrométricos que deben ser subsanados, por tal razón se hace imprescindible llevar a cabo el estudio para realizar las mejoras necesarias, y para ello, previa a la ejecución de las obras, es necesario contar con los diseños de ingeniería de detalles de las obras a ejecutar, bajo estándares técnicos actualizados y que contribuyan a una operación adecuada de estas estaciones y que permitan llevar a cabo una gestión temprana del riesgo climático y a la gestión integrada de recursos hídricos en esta cuenca, desde una perspectiva de protección civil, interés público y de adaptación al cambio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del Estudio es contar con la ingeniería de detalles para posterior construcción las mejoras necesarias de la Estación Fluviométrica en el Río Cachapoal, con el fin de contribuir significativamente al desarrollo y consolidación de la gestión integrada de recursos hídricos en esta cuenca, asegurando al mismo tiempo abordar con efectividad y eficiencia la robustez de la Red Hidrométrica de la Región de O'Higgins.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general antes indicado, se identifican los siguientes objetivos específicos:

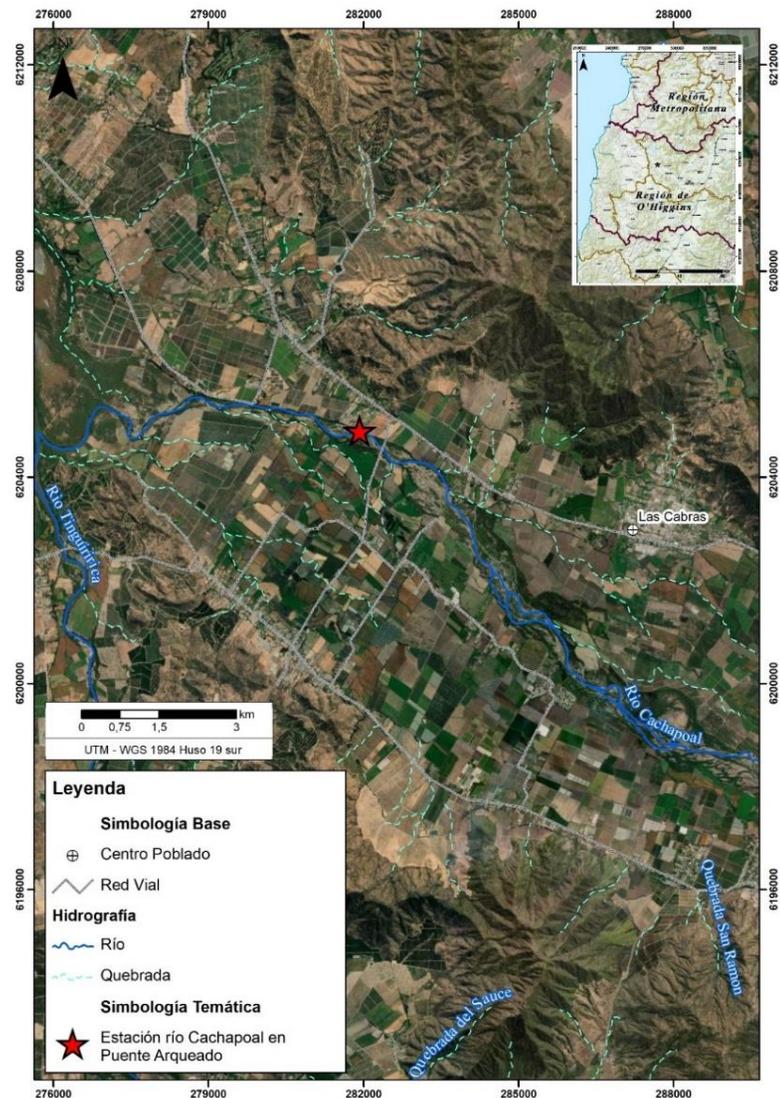
- 1.- Revisión de estudios e información básica, y análisis de antecedentes
- 2.- Caracterización hidrológica de las cuencas aportantes
- 3.- Definición de posibles soluciones a estación fluviométrica.
- 4.- Levantamiento Topográfico del área de influencia de las estaciones
- 5.- Estudio Hidráulico Con y Sin proyecto
- 6.- Estudio Mecánica de Suelos
- 7.- Estudio de socavamiento

8.- Diseño Hidráulico y Estructural de la estación

9.- Elaboración de productos anexos para posterior licitación de construcción, tales como planos generales y de detalles, especificaciones técnicas generales y especiales, cubicaciones y presupuesto detallado, etc.

1.3 Zona de Estudio

El área del estudio donde se emplaza la sección de aforo en uso en la actualidad se muestra en la Figura 1-1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-1: Ubicación Geográfica de la estación existente

2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del estudio se efectuó una completa recopilación y análisis de los antecedentes, especialmente los necesarios para el desarrollo del presente trabajo: informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas, datos puntuales, etc., que estén disponibles en instituciones: De toda la información analizada se identificaron 3 documentos como los primarios para el desarrollo de este estudio:

1. Verificación de la Extrapolación de Curvas de Descargas de Estaciones Fluviométricas. Instituto Nacional de Hidráulica, 2007.
2. Elaboración del manual de planos tipo para la red hidrométrica nacional / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Hidrología, DGA, 1992.
3. Guías metodológicas para presentación y revisión técnica de proyectos de modificación de cauces naturales y artificiales. DGA, 2016.

En el primer documento se presenta un análisis de la situación existente en la estación Río Cachapoal en Puente Arqueado, entre otras, incluyendo topografía y mecánica de suelos. Entrega información relevante para el estudio.

Por otra parte, los documentos adicionales entregan los lineamientos necesarios para el desarrollo de este tipo de proyectos.

Complementariamente, se utilizarán como referencias metodológicas los siguientes estándares MOP:

- Especificaciones Técnicas Topográficas de la DOH (ETT-DOH, 2011)
- Normas Generales para el Dibujo y Presentación de Planos de Obras Hidráulicas (2011)
- Manual de Carreteras, Volumen N° 3

Por último, la información se complementa con registros pluviométricos y fluviométricos obtenidos desde el BNA de la DGA.

3 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Con la información preliminar base recopilada y desarrollada en el transcurso del estudio, tal como: geomorfología, topografía, mecánica de suelos, y antecedentes hidráulicos, se preparó el diagnóstico de la situación actual que se presenta en lo que sigue.

3.1 Identificación preliminar de secciones de interés

En primer lugar, en base a fotos satelitales y un análisis geomorfológico preliminar, se identificaron 3 secciones adicionales de interés, además de la sección actual de aforo, las que se muestran en la Figura 3-1. En la Figura 3-1 la Sección 1 corresponde a la sección de aforo actual, la Sección 2 corresponde a una ubicación propuesta por INH (2007), la Sección 3, aguas abajo del Puente Las Cabras, se identificó con un análisis geomorfológico preliminar, al igual que la Sección 4, la que se ubica 2 km aguas debajo de la sección actual. En reunión de trabajo con la IF, el día 27/09/2022, se determinó no considerar las secciones 2 y 3, la primera, por problemas de acceso con el propietario del sector aledaño, y la 3 por estar inmediatamente aguas abajo del puente, lo que implicaría que la posible estructura de la estación podría generar problemas para el puente. Por lo anterior, el trabajo topográfico y de mecánica de suelos, presentado posteriormente en los capítulos 4 y 5, respectivamente, se desarrolló en los sectores del río asociados a la Sección 1 y Sección 4.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1: Secciones posibles para la sección de aforo

3.2 Comparación Sección 1 y Sección 4

Los trabajos de terreno realizados en el río Cachapoal incluyeron un análisis del sitio actual de ubicación de la estación o Sección 1 y el sitio propuesto o Sección 4, con el objetivo de poder proponer la mejor solución y la mejor ubicación de la estación fluviométrica. Respecto al sector donde actualmente se ubica la estación (ver Figura 3-2), es posible mencionar que se corroboró que, para caudales bajos, la estación no posee mediciones a partir del

limnógrafo, dado que en la época visitada el nivel era inferior a 1 m según la regleta e in situ se pudo comprobar que la profundidad del río era mayor a 1 m.



Vista Instrumentos

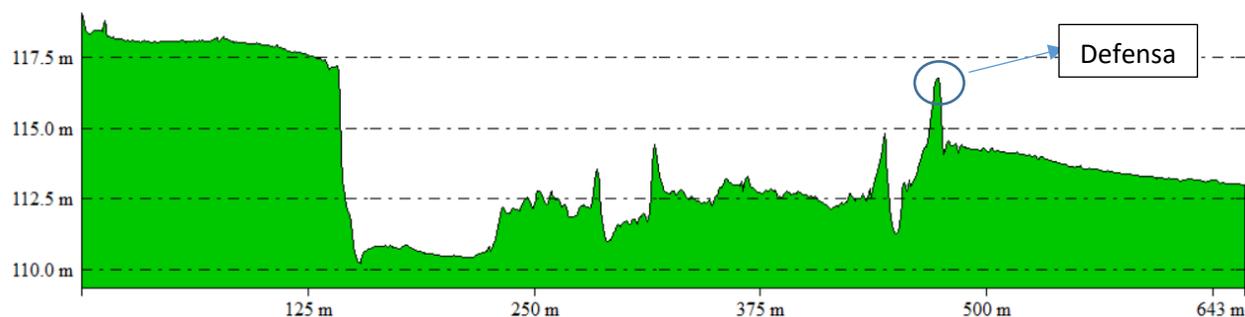


Vista Regleta

Fuente: Equipo Consultor.

Figura 3-2: Estación fluviométrica existente

Se concluye de este diagnóstico que la estación fluviométrica, de ubicarse en el mismo sitio, necesitará un rediseño de su estructura, considerando obras de protección que aseguren la estabilidad de la estación. Adicionalmente, deberá desarrollarse un método que permita medir los caudales bajos que circulan por el río. Se destaca que justo donde se ubica la estación, se produce un banco de material que trenza el río (ver perfil topobatimétrico en Figura 3-3). Este aspecto es de suma importancia, puesto que, para caudales bajos, mientras una sección posee flujo, la otra puede estar seca, esto quiere decir, que determinar la posición desde donde se medirán los caudales es esencial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3: Perfil topobatimétrico Sección 1

En la Figura 3-3 y se observa la presencia de una defensa de material natural ubicada en el límite del predio de la ribera sur, con el objetivo de proteger este predio ante posibles inundaciones.

Respecto a la Sección 4, se destaca que posee un farellón en la ribera norte mucho más pronunciado que en el sitio donde actualmente se encuentra la estación. Además, no posee bancos importantes de material que dividan el cauce principal, por lo que la medición de caudales podría ser más eficiente, así lo demuestra la Figura 3-4 y el perfil topobatimétrico mostrado en la Figura 3-5 .

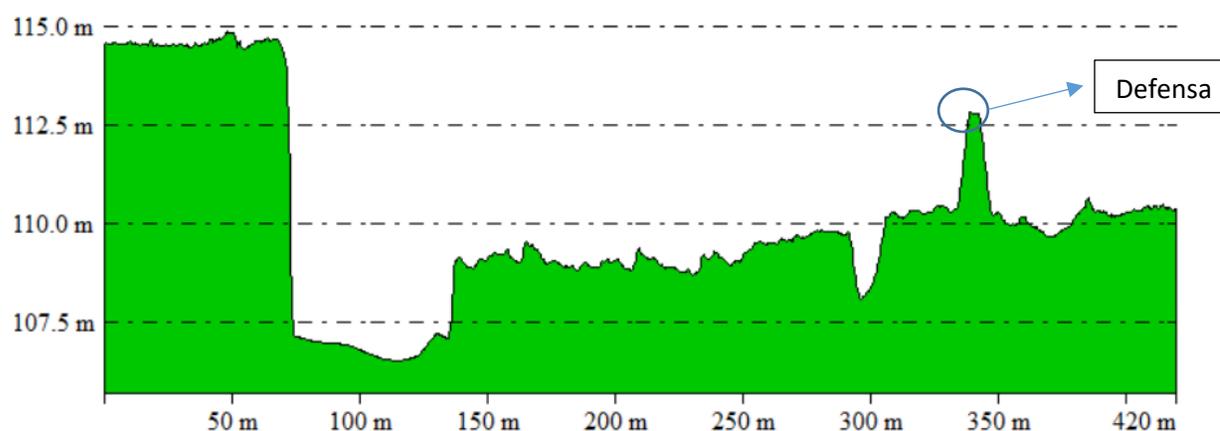


Fuente: Equipo Consultor.

Figura 3-4: Sección 4-Vista desde Ribera Norte hacia aguas arriba

De manera similar al de la Sección 1, la Figura 3-5 muestra la presencia de una barrera de material natural ubicada con el objeto de proteger el predio de la ribera sur ante posibles crecidas del río.

Respecto al acceso a este sector, por la ribera norte, la ruta H-790 permite un acceso simple y eficiente, por su parte, la ribera sur requiere del acceso a un predio para poder llegar al río. Se concluye que, de ubicarse la estación en este sector, será necesario definir la ribera de ubicación de la estación que logre resguardar los equipos y permita un fácil acceso a ella.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-5: Perfil topobatimétrico Sección 4

3.3 Tipos de solución posibles de considerar

En primer lugar, dado que a la fecha no se dispone de la topografía completamente procesada para elaborar una modelación Hec-Ras, se usan preliminarmente los resultados contenidos en el estudio del INH (2007), los que se resumen en forma gráfica en la Figura 3-6, donde se muestra la sección transversal modelada en hec-ras y la curva de descarga adoptada. Al considerar el caudal de diseño presentado posteriormente en el acápite 6.8, se tiene que para ese caudal la sección del río estaría llena, es decir, del orden de 350 m. Por otra parte, se sabe que en crecidas importantes, el río ha llegado hasta unos 900 m de ancho. Lo anteriormente expuesto se traduce en que la solución propuesta debe cumplir varias condiciones:

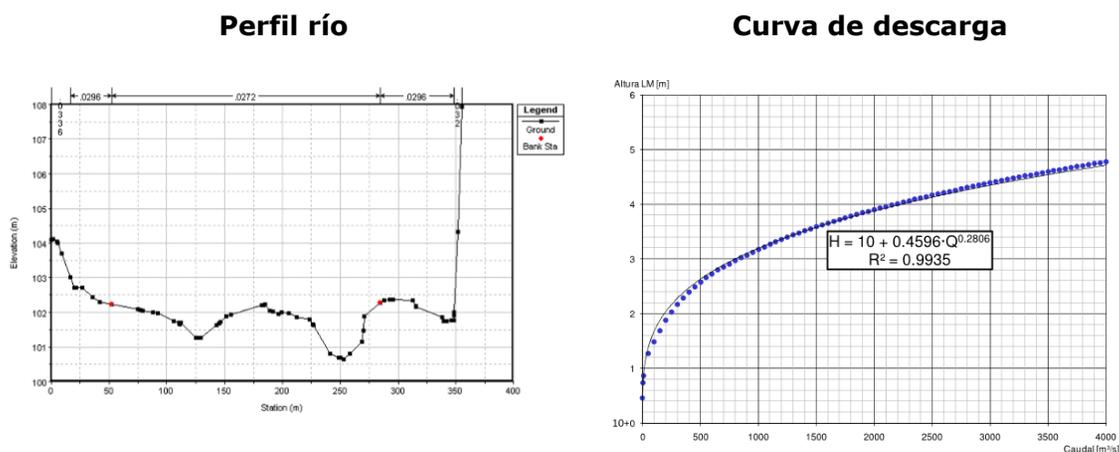
- Medir caudales bajos, ya que en la actualidad no ocurre, dado que el INH determinó que caudales menores a 150 m³/s no son medibles
- Ser resistente a eventos de alta magnitud como los identificados en el sitio

Lo anterior implica a considerar 2 posibles tipos de solución:

1. Obra capaz de medir todo el rango de caudales hasta 50 años de periodo de retorno
2. Obra diseñada para medir solo caudales bajos, dejando sección natural del río para medir caudales altos

El primer tipo de solución es constructivamente caro, tomando en cuenta que una estación de unos 40 m de ancho cuesta sobre 100 millones de pesos, lo que

proporcionalmente implica una inversión cercana a los 1.000 millones o más. Esto sin considerar que la obra va a estar sujeta a que para crecidas mayores la estación falle, siendo necesaria su posterior reposición completa. Esto ocurre ya que en condiciones de crecida mayor el agua se escaparía de la sección de aforo, produciendo socavaciones de importancia, las que implicarían una posterior falla de la obra. En forma adicional, una obra de este tipo, también requiere mantención anual, en términos de limpiezas y movimientos de tierra para encauzar el flujo a la estación. Una alternativa para proteger la estación es tener defensas fluviales de importancia, incluyendo la construcción de canales de desviación, pretiles fusible y otras obras que deben considerarse dentro de los costos de mantención y operación de la obra.



Fuente: INH (2007).

Figura 3-6: Caracterización hidráulica río Cachapoal en Puente Arqueado

Por otra parte, una estación que esté diseñada solo para medir caudales bajos, requiere una inversión muy menor a la que mide caudales en todo el rango, probablemente con un costo no mayor al 25% de la inversión del primer tipo de estación. En todo caso, este tipo de estación requiere mayores costos de mantención ya que necesita continuos mejoramientos del lecho del río y encauzamiento. Por último, se estima que los costos de reposición de las obras son bajos, ya que un adecuado encauzamiento puede evitar costos de reposición.

3.4 Propuesta de estación

Al considerar lo indicado en los acápite 3.3 y 3.5, se propone instalar la nueva sección de aforo en la Sección 4, pero diseñada solo para medir caudales bajos.

4 TRABAJOS DE TERRENO

4.1 Topografía

Entre los días 3 y 4 de octubre de 2022, se desarrollaron los trabajos de terreno en el río Cachapoal, específicamente en los 2 sectores identificados en el Capítulo 3: Sector actual y sector ubicado unos 2 km aguas abajo del actual, tal como se muestra en la Figura 4-1, donde se presentan los sectores donde se realizaron los levantamientos topográficos y batimétricos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-1: Sectores levantamiento topográfico. En rojo recorrido realizado

Los levantamientos topográficos fueron desarrollados con tecnología LIDAR, para esto, en primer lugar, se monumentaron 2 puntos de referencia por sector (PR's). Los puntos fueron creados con hormigón y un moldaje de madera, posteriormente fueron pintados e identificados. Una vez nivelados en forma estática ambos PR's, se procedió a vincular la medición GPS con el drone LIDAR. En cuanto se definieron las condiciones óptimas, se procedió a iniciar el vuelo no tripulado del drone.

El vuelo se desarrolló sobre todo el sector definido como de interés para cada uno de los sitios, esto es, al menos 300 m aguas arriba y 300 m aguas debajo de los sectores. Como resultado, se obtuvo una nube de puntos para cada uno de los sitios, no obstante, esta nube de puntos requiere un post tratamiento para definir los puntos que efectivamente

corresponden al terreno y aquellos que no debido a presencia de vegetación o agua (el LIDAR no penetra en vegetación, agua o estructuras). Finalmente, se definió una nube de puntos adecuada de alta precisión y con gran densidad de puntos, la cual será posteriormente utilizada para la modelación y análisis hidráulico del terreno.

Por otra parte, el levantamiento LIDAR debe complementarse con un levantamiento batimétrico del cauce. La forma de realizar un levantamiento batimétrico depende de factores como nivel de agua del cauce, vegetación, velocidad del flujo, entre otros. Para este caso, el levantamiento batimétrico se desarrolló con tecnología GPS RTK de manera deambulante (a pie) y con kayak cuando el sitio fuese más complejo.

Finalmente, ambos levantamientos fueron combinados para conformar la nube de puntos final del terreno, a partir de la cual será posible crear el MDT (modelo digital de terreno) para cada uno de los sitios. En la Figura 4-2 se presenta la nube de puntos obtenida a partir del filtrado de los puntos LIDAR y el levantamiento batimétrico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-2: Nube de puntos Final Sección 4

4.2 Mecánica de suelos

Adicionalmente, se desarrollaron 2 calicatas en cada uno de los sectores con maquinaria para poder obtener una muestra del material de fondo del cauce, a partir del cual será posible obtener las propiedades mecánicas, estimar la rugosidad del cauce y cuantificar las socavaciones producidas. En la Figura 4-3 se presenta la ubicación donde se realizaron dichas calicatas. Dada la presencia de un farellón en la ribera norte, que por tanto no representa el material del cauce, las calicatas fueron desarrolladas en la ribera sur del río.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-3: Ubicación Calicatas

Las calicatas realizadas tuvieron una profundidad aproximada de 2 m. Dado que se encontró la presencia de agua muy superficialmente, esta profundidad disminuyó por desprendimiento del material a cerca de 1,5 m de profundidad.

Además del estrato superficial vegetal característico, se identificó generalmente solo 1 estrato en todas las calicatas y por lo tanto se tomó solo una muestra por calicata. En general, es posible asegurar que el material es bastante homogéneo en profundidad y de manera espacial, con abundancia de bolones redondeado, probablemente debido al gran transporte que han tenido (dado a que la ubicación de la estación se encuentra cercana a la desembocadura en el lago Rapel), y una matriz de arenas muy finas.

Las calicatas realizadas tuvieron una profundidad aproximada de 2 m. Dado que se encontró la presencia de agua muy superficialmente, esta profundidad disminuyó por desprendimiento del material a cerca de 1,5 m de profundidad.

Además del estrato superficial vegetal característico, se identificó generalmente solo 1 estrato en todas las calicatas y por lo tanto se tomó solo una muestra por calicata. En general, es posible asegurar que el material es bastante homogéneo en profundidad y de manera espacial, con abundancia de bolones redondeado, probablemente debido al gran transporte que han tenido (dado a que la ubicación de la estación se encuentra cercana a la desembocadura en el lago Rapel), y una matriz de arenas muy finas. Una muestra de este material fue enviado a laboratorio para el desarrollo de los correspondientes análisis. En la Tabla 4-1, se presenta la modelación estratigráfica adoptada.

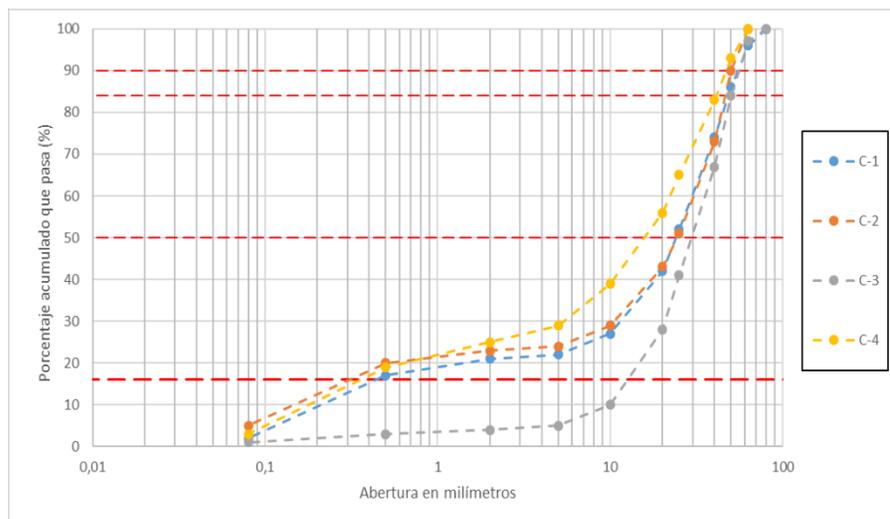
Tabla 4-1: Modelación estratigráfica general

Horizonte	Profundidad (m)	Descripción
H-1	0,00 –0,50	Suelo tipo capa vegetal en matriz arena fina algo limosa de color café a gris, humedad baja, compacidad alta, finos de baja plasticidad, raíces y raicillas.
H-2	0,50 – 2,00	Grava arenosa o arena con gravas en algunos sectores, de origen fluvial, estratificaciones horizontales de color café claro en parte superior a gris con la profundidad, humedad media, compacidad alta, tamaño máximo 3", cantos redondeados.

Nota: la napa se detectó 1,2 m

Fuente: Elaboración propia con antecedentes TECNOLAB.

Con la finalidad de obtener la distribución por tamaño de las partículas predominantes del terreno bajo 3" de tamaño máximo, además de obtener su clasificación mediante el sistema USCS, se realizó un análisis granulométrico cuyos resultados se resumen en la Figura 4-4. Del análisis se desprende que los terrenos en estudio están conformados principalmente por arenas, clasificadas como GP. Se hace notar que, al no encontrarse mayores diferencias entre las calicatas en cada sitio, el análisis posterior se desarrolló integrando las 2 calicatas del Sector 1, al igual que las 2 calicatas del Sitio 4.



Fuente: Elaboración propia con antecedentes TECNOLAB.

Figura 4-4: Análisis Granulométrico

En definitiva, se adoptaron los siguientes parámetros para el suelo:

Grava arenosa a arena con gravas (estrato H-2)

Φ	=	33°	, ángulo de fricción interna
c	=	$3,0 \text{ t/m}^2$, cohesión
γ	=	$1,9 \text{ t/m}^3$, peso unitario natural
E	=	$2000 \sqrt{z} \text{ t/m}^2$, módulo de Young, z es la profundidad en metros
E_d	=	$3 E$, módulo de Young para cargas cíclicas
μ	=	$0,3$, razón de Poisson

5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE CRECIDAS

5.1 Aspectos generales

Como parte del diagnóstico de la situación actual, se realizó una caracterización hidrológica para el área aportante de la estación en consulta y de los sectores aledaños, para lo cual se consideró información entregada por la DGA. Se hace notar que el caudal de diseño corresponde aquel determinado estadísticamente para un período de retorno mínimo de 50 años, a menos que se acuerde otro periodo de retorno con la IF. Se considerarán todas

las crecidas históricas generadas. Considerando separadamente caudal líquido y con aportes de sólidos, siendo este último el caudal de diseño de las obras.

Para dicha caracterización se requiere obtener los caudales máximos de crecidas ($Q_{m\acute{a}x}$), caudales medios mensuales (Q_{mm}) y curvas de descarga del gasto sólido en suspensión (Q_{ss}).

Para cada punto de control se obtienen los caudales de crecidas máximas de períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. También para cada punto de control se obtiene la curva de variación estacional, para probabilidades de excedencia del 1%, 5%, 10%, 50%, 60%, 80%, 90% y 95%. Con esta información se procede a la posterior caracterización hidráulica con y sin proyectos.

Los resultados obtenidos se presentan en lo que sigue.

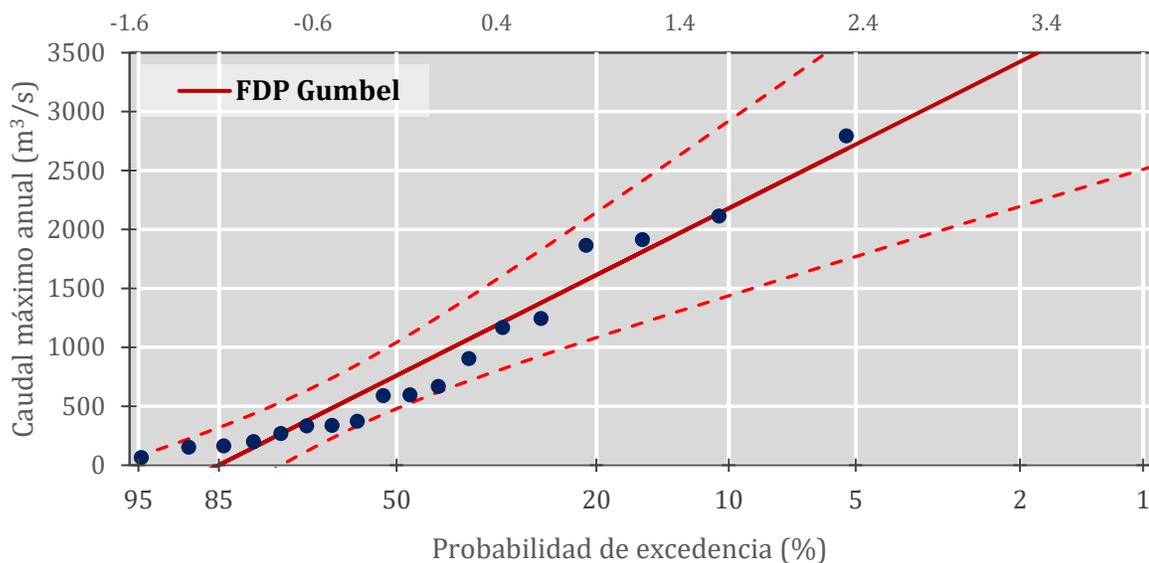
5.2 Estimación de caudales de crecida con información fluviométrica

Para la estimación directa de crecidas, se realizó un análisis de frecuencia de la serie de caudales extremos registrados en la estación Río Cachapoal en Puente Arquedo. Previamente, dicha serie fue rellenada, extendida y sometida a un análisis de consistencia. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 5-1, y en la Figura 5-1 se muestra el ajuste Gumbel adoptado como representativo de la estación.

Tabla 5-1: Resultados Análisis de Frecuencia Estación Río Cachapoal en Puente Arquedo

T (año)	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel	Exponencial
2	874	551	733	574	761	605
5	1.533	1.310	1.452	1.322	1.615	1.406
10	1.877	2.060	1.919	2.000	2.180	2.011
20	2.162	2.995	2.355	2.783	2.722	2.617
25	2.245	3.340	2.491	3.058	2.894	2.812
50	2.482	4.563	2.905	3.987	3.424	3.417
100	2.696	6.040	3.307	5.031	3.949	4.022
250	2.951	8.446	3.828	6.594	4.642	4.823
500	3.128	10.658	4.216	7.920	5.165	5.428
1000	3.294	13.258	4.600	9.372	5.687	6.034
Estado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-1: Distribución Gumbel adoptada

5.3 Estimación de caudales de crecida en forma indirecta

En forma alternativa, se determinó el caudal con métodos indirectos con el fin de confirmar lo determinado previamente. Con este fin se usó la fórmula racional, el método de Verni-King y el método DGA-AC. Al aplicar las metodologías asociadas a las técnicas indicadas, se obtuvieron los caudales mostrados en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Caudales obtenidos con métodos indirectos

T (año)	Caudal (m ³ /s)		
	DGA AC	Verni King modificado	Racional
2	894	855	799
5	1.279	1.621	1.419
10	1.541	2.290	1.935
20	1.864	3.070	2.518
25	1.957	3.351	2.724
50	2.280	4.225	3.350
100	2.588	5.530	4.287

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Caudales líquidos adoptados

Usando los resultados presentados anteriormente en la Tabla 5-1y Tabla 5-2, se preparó la Tabla 5-3 donde se resumen los caudales indirectos y el directo. Dado que los caudales son de órdenes de magnitud similar, se prefiere adoptar el valor obtenido por análisis de frecuencia en la estación Río Cachapoal en Puente Arqueado, ya que corresponde al registro directo de la cuenca.

Tabla 5-3: Caudales instantáneos determinados

T (año)	Caudal (m ³ /s)				
	DGA AC	Verni King modificado	Racional	Fluviométrico	Adoptado
2	894	855	799	761	761
5	1.279	1.621	1.419	1.615	1.615
10	1.541	2.290	1.935	2.180	2.180
20	1.864	3.070	2.518	2.722	2.722
25	1.957	3.351	2.724	2.894	2.894
50	2.280	4.225	3.350	3.424	3.424
100	2.588	5.530	4.287	3.949	3.949

Fuente: Elaboración propia.

Dado que los caudales presentados en la Tabla 5-3 corresponden a la sección actual, para transferirlos a la nueva sesión se aplicó trasposición por Verni-King, ya que los sectores están muy próximos, incrementándose el área aportante en 261,8 km², lo que equivale a un 4,2%. Los resultados se presentan en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Caudales adoptados

T (año)	Caudal (m ³ /s)	
	Sección 1	Sección 4
2	761	793
5	1.615	1.682
10	2.180	2.271
20	2.722	2.836
25	2.894	3.015
50	3.424	3.567
100	3.949	4.114

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Caudales Sólidos en suspensión

En esta sección se efectúa el cálculo de la tasa de arrastre en suspensión. Para ello se aplicarán 4 metodologías: Dendy-Bolton, USBR, las tasas de arrastre de estaciones con registro sedimentométrico de cuencas cercanas y expresiones empíricas de la Universidad Federico Santa María (USM) para la zona central de Chile, según se indica:

- **Estimación de la Producción Anual según Metodología USBR (1974):** La expresión propuesta por el USBR (1974), se obtuvo de correlacionar la producción de sedimento asociada a 28 cuencas de clima semiárido. Relaciona el aporte de sedimentos en $m^3/km^2/año$ con el área de la cuenca.
- **Expresiones empíricas de tesis USM (2016):** Expresiones que relacionan el caudal líquido con el caudal sólido para cuencas de la zona central de Chile, desarrolladas por Jiménez (2016).

En forma adicional se consideran los resultados contenidos en las tesis de Lecaros (2011), que analizó la sedimentación del Lago Rapel, usando los datos registrados en la estación Río Cachapoal en Puente Arqueado y de Campos (2022), donde también se analizó esta estación. Se hace notar que estos autores evalúan relaciones diferentes para el periodo pluvial y nival, siendo en ambos casos más importante el valor pluvial, por lo que fue adoptado para el diseño posterior.

Los resultados se presentan en la Tabla 5-5. Se adoptó por seguridad el valor más grande de lo obtenido.

Tabla 5-5: Caudales sólidos en suspensión

T (año)	Caudal (m^3/s)						
	Fleming	USBR	USM- Fleming	USM- USBR	Lecaros	Campos	Adoptado
2	0	0	0	0	1	4	4
5	0	0	0	0	5	15	15
10	0	0	0	0	9	24	24
20	0	0	0	0	14	35	35
25	0	0	0	0	16	39	39
50	0	0	0	0	23	52	52
100	0	0	0	0	32	66	66

Fuente: Elaboración propia.

5.6 Caudales de diseño adoptados

Finalmente, al considerar los caudales líquidos y sólidos, se determinó el caudal de diseño adoptado que se presentan en la Tabla 5-6, igual a la suma del caudal líquido y sólido para el Sector 1, y por trasposición para el Sector 4.

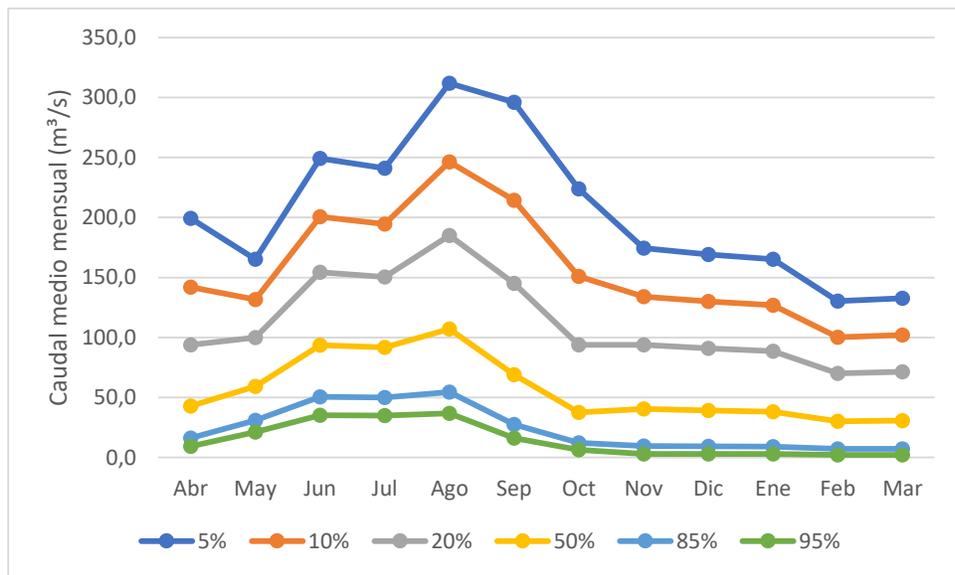
Tabla 5-6: Caudales adoptados

T (año)	Caudal (m ³ /s)	
	Sector 1	Sector 4
2	765	797
5	1.630	1.698
10	2.204	2.296
20	2.757	2.872
25	2.933	3.056
50	3.476	3.621
100	4.015	4.183

Fuente: Elaboración propia.

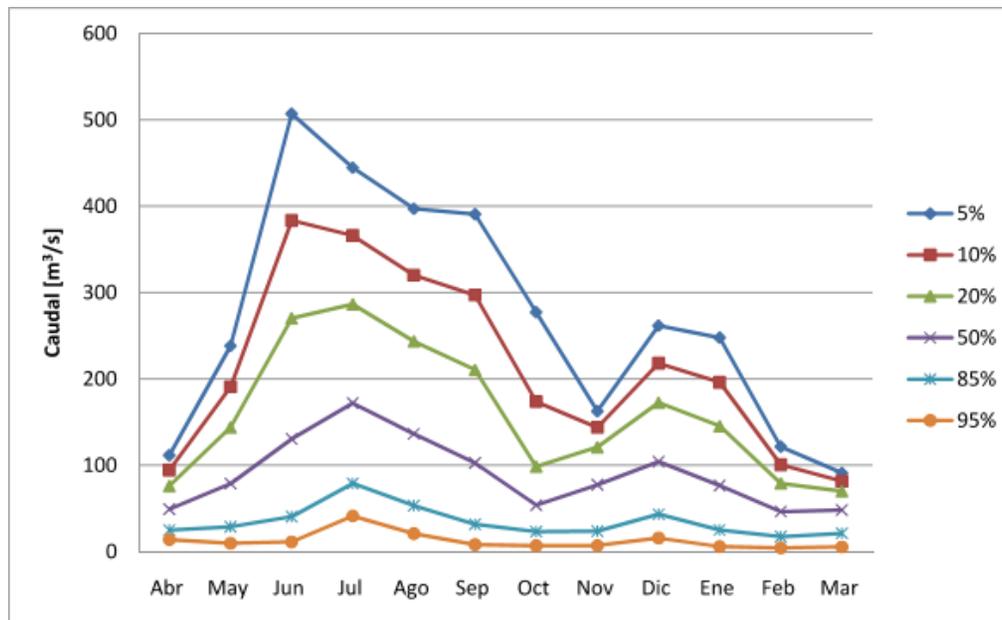
5.7 Caudales medios mensuales

Para completar el análisis hidrológico, se muestra en la Figura 5-2 la curva de variación estacional elaborada, la cual se generó con los caudales desde el año hidrológico 2002-2003. A fin de observar el efecto del cambio climático, en la Figura 5-3 se muestra la misma curva determinada con antecedentes medidos hasta el año 2000. Se observa un corrimiento en el mes de ocurrencia del caudal peak, y más importante, la disminución de su magnitud.



Fuente: Elaboración propia con antecedentes BNA y Alvarez-Garretón et al. (2017).

Figura 5-2: Curva de variación estacional



Fuente: DGA (2004).

Figura 5-3: Curva de variación estacional histórica

6 DISEÑO ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA

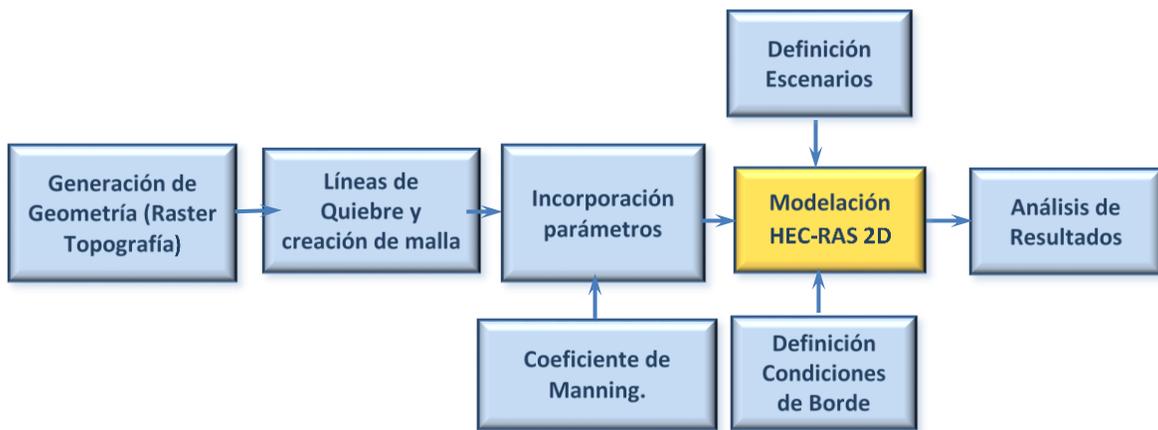
6.1 Metodología

El diseño de la estación fluviométrica, considero todas las normas DGA para este tipo de obras, en especial las siguientes:

- Tramo recto
- Pendiente uniforme, cuyo flujo presente escurrimiento sub critico
- La estructura debe poseer sección compuesta con canal para aguas mínimas y zona para caudales de crecidas.
- Canal para aguas mínimas debe proyectarse para contener el caudal máximo del estiaje con un talud de 45° en su pared hacia zona para caudales de crecidas, esto para hacer más sensible la sección en caudales mínimos y para evitar una transición muy fuerte en la curva de descarga.
- Pendiente del canal hacia aguas abajo del 0,5%
- Para ordenar el escurrimiento en la zona de medición, es necesario que obras complementarias de embudo de entrada sean proyectadas adecuadamente, para evitar contracciones laterales no deseadas.
- La zona de inundación de crecida se diseñó con una pendiente del 3% hacia el canal. Hacia aguas arriba en zona de inundación de crecida, debe generarse un embudo de entrada parabólico, de manera que permita el llenado total del canal antes que el nivel de agua llegue a la zona de crecida. Hacia aguas abajo, debe tener pendiente igual al canal de 0,5%.
- Barrera antisocavante hacia aguas arriba y hacia aguas abajo de las estructuras del canal y zona de inundación de crecidas, con zarpas transversales distribuidas a lo largo de la estructura, esto para evitar circulación de flujo bajo revestimiento.

6.1.1 Modelación Hidráulica

El análisis hidráulico se realizó utilizando el programa HEC-RAS 2D versión 5.0.6. de libre acceso, que es una herramienta validada y conocida por los revisores y quienes desarrollan este tipo de análisis. La metodología aplicada para el análisis hidráulico con HEC-RAS 2D, se puede resumir en las tareas planteadas en la Figura 6-1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-1: Metodología HEC-RAS 2D

6.1.2 Cálculo de Enrocados

Para el cálculo de los enrocados aguas abajo de las estaciones, se aplicará la fórmula de Isbach, utilizando como dato de entrada los resultados del eje hidráulico obtenidos para el escenario de modelación más desfavorable, el que corresponde al caudal que este asociado a la máxima velocidad de escurrimiento en la sección aguas abajo del canal de la estación.

6.1.3 Socavación

La socavación se define como el descenso local que experimenta un lecho móvil con respecto a su nivel natural, debido a un desbalance entre la capacidad erosiva de la corriente y el suministro de sedimentos provenientes de aguas arriba. Este descenso afecta a pilas y estribos de puentes, como asimismo, a toda estructura cuya fundación esté emplazada en un lecho móvil.

Si en el cauce de un río se emplaza alguna obra que obstruya el libre escurrimiento del flujo, el patrón de flujos en la vecindad de dicha obstrucción, será modificado, y dado que la capacidad de transporte de sedimentos en un río, es función de las características del flujo, los patrones de la capacidad de transporte en la vecindad de dicha obstrucción también serán modificados. En una zona donde no exista equilibrio entre la capacidad de transporte y la tasa de alimentación de sedimentos, necesariamente ocurrirán procesos de socavación o embanque del lecho.

La socavación total en un lecho está compuesta por distintos tipos de socavaciones que pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Degradación del lecho debido a alteraciones en el equilibrio sedimentológico de un río, como por ejemplo: la interrupción del arrastre de sedimentos, desde aguas arriba, causado por la presencia de una presa; extracción no controlada de áridos; entrega o restitución de caudales, etc.
- Socavación general en angostamientos naturales o artificiales durante el paso de una crecida. Estos angostamientos pueden producirse en la sección de emplazamiento de un puente, debido a la presencia de terraplenes de acceso y estribos, en obras de encauzamiento, o bien, en secciones naturalmente más angostas de un río. Esta contracción local implica un aumento en las velocidades del escurrimiento, y, por lo tanto, mayor capacidad de arrastre de sedimentos. Esta mayor capacidad es suplida por el material proveniente del lecho en la zona de la contracción, lo cual se traduce finalmente en una socavación de la sección.
- Socavación local al pie de obras como pilas, estribos, cabezas de espigones o muros guidores, etc., debido a la interferencia de estas obras con la corriente, se provoca un aceleramiento local del flujo, generando vórtices que remueven el material alrededor de dichas obstrucciones.
- Socavación natural localizada, debido a variaciones en las condiciones del escurrimiento, asociadas con los procesos fluviales naturales como transporte de sedimentos; migración de ondas sedimentarias (dunas, rizos, etc.); divagación de cauces, migración lateral del escurrimiento, socavación en curvas, etc.

Para estimar la socavación general en el lecho del río se utilizó el método de Lischtvan-Lebediev y el método de C.R. Neill, ambos métodos han sido ampliamente utilizados en Chile. Para el caso de la socavación al pie de la obra (aguas debajo de la estación), se utilizó la fórmula de Bormann y Julien recomendado en la literatura.

6.2 Estudio Hidráulico

En el presente capítulo se presentan los resultados de la modelación hidráulica bidimensional considerando la situación con y sin proyecto de la estación proyectada en el nuevo sitio. El análisis consiste en el cálculo del Eje Hidráulico (EH) correspondiente y la definición de la curva de descarga.

6.2.1 Descripción Situación Actual y Obras Proyectadas

Actualmente existe la estación "Río Cachapoal en Puente Arqueado" ubicada en la sección media baja de la cuenca del río Rapel a una altitud aproximada de 110 m s.n.m. El material del lecho del río se considera de sedimentación fluvial o aluvional, esto quiere decir que fueron depositados por acción del mismo y está compuesto principalmente de arenas y gravas (alta presencia de bolones redondeados). En el tramo del río Cachapoal donde se ubica actualmente la estación, el cauce tiene una pendiente media del 0,004 m/m y su ancho habitual es de aproximadamente 70 m.

Tal como se indicó en el Capítulo 3, la estación actual no logra medir los caudales bajos producto de que se encuentra ubicada en una zona donde el río para caudales bajos no escurre. Probablemente esto se deba a problemas de sedimentación y socavación, además, tal como se puede observar en la Figura 6-2, en la zona central del cauce se observa una zona sedimentada que divide el cauce del río en dos secciones, lo cual impide medir estos caudales bajos. Por este motivo, se propuso una nueva sección de medición ubicada aproximadamente 2 km hacia aguas abajo.

La sección propuesta (ver Figura 6-3) posee la ventaja de encontrarse en una zona donde no existen ramificaciones y posee en la ribera norte un farellón vertical que podría servir de apoyo para la nueva estación de medición.

Dada la envergadura de este río, los registros históricos y los testimonios de los habitantes de este sector, la nueva estación fluviométrica propuesta medirá solo los caudales bajos y tendrá el diseño tradicional de estaciones DGA.

La estación propuesta tiene un ancho total de 55 m. El muro principal estará apoyado sobre el farellón natural y tendrá una altura de 2,5 m, la canaleta de caudales bajos tendrá un ancho de 8 m y su alto proyectado es de 0,8 m, luego posee una sección de crecidas de 45 m con una pendiente de 3%. En la Figura 6-4 se presenta el esquema tridimensional de la estación propuesta. Adicionalmente, la estación cuenta con una sección de entrada y salida de enrocados para su protección, en la sección de entrada cuenta también con una apertura parabólica para que los caudales altos sean conducidos hacia la estación.

Dado que la estación posee un ancho menor al ancho del cauce principal del río (aproximadamente 70 m), se debe diseñar una sección de encauzamiento compuesta por gaviones sobre enrocados que permitan rellenar este sector.



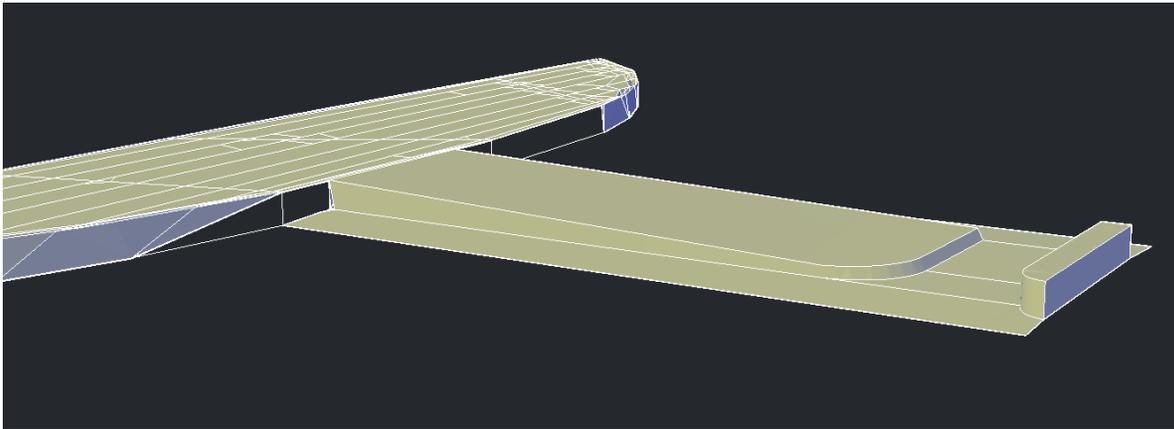
Fuente: Equipo Consultor.

Figura 6-2: Ubicación Actual Estación Fluviométrica



Fuente: Equipo Consultor.

Figura 6-3: Zona Propuesta para Nueva Estación Fluviométrica



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-4: Esquema tridimensional estación propuesta

6.2.2 Modelación Hidráulica 2D

6.2.2.1 Aspectos generales modelación

Utilizando los caudales registrados por la misma estación, se realizó un análisis de frecuencia para determinar los caudales para períodos de retorno entre 2 y 100 años los que se presentaron anteriormente en la Tabla 5-6. No obstante, dado que la estación proyectada medirá solo caudales bajos, el diseño hidráulico de esta (su capacidad de porteo y curva de descarga) fue desarrollado solo para los caudales usualmente presentes en la estación, los cuales se determinaron en base a la topobatimetría del cauce y las mediciones realizadas en terreno. De esta manera, a partir del material audiovisual registrado en terreno y la visita, se estimó una velocidad de escurrimiento del cauce, la cual junto con la sección medida (a partir de la ortofoto y topografía) permitió estimar el caudal pasante.

El caudal de diseño de la estación fluviométrica considerado fue de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal de verificación fue de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. En la visita realizada se observó un caudal aproximado de $30 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para determinar el coeficiente de rugosidad del cauce, se calculó en primer lugar un coeficiente básico denominado " n_0 " a partir de la fórmula de Strickler utilizando el valor " d_{90} " obtenido de la granulometría de las calicatas realizadas en la zona del cauce.

Una vez obtenido el coeficiente de rugosidad básico definitivo, este fue corregido por medio del método de Cowan dependiendo de las características de la zona analizada.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m$$

$$n_0 = S \cdot d_{90}^{1/6}$$

Donde:

n_0 : Valor básico del coeficiente de rugosidad para un tramo recto y uniforme.

n_1 : Incremento por irregularidades en la sección.

n_2 : Incremento por variaciones de forma y dimensiones de la sección.

n_3 : Incremento por obstrucciones.

n_4 : Incremento por vegetación.

m : Factor correctivo por curvas y meandros del río.

S : Constante empírica de Strickler, se acepta que vale 0,038.

d_{90} : Tamaño del material del lecho en que el 90% del peso de la muestra de suelo utilizada es de menor tamaño.

Los resultados finales fueron contrastados con los coeficientes de rugosidades obtenidos mediante el método fotográfico (Barnes, 1967) para corroborar la validez de estos resultados.

La Tabla 6-1 muestra los valores del coeficiente de Manning estimados para el cauce y las distintas zonas.

Tabla 6-1: Coeficientes de Rugosidad asignados por zona.

Coeficiente	Río	Vegetación	Desnudo
n1	0	0	0,005
n2	0	0	0
n3	0	0	0,01
n4	0,008	0,02	0,001
m	1	1	1
n Cowan	0,031	0,043	0,039
n Barnes	0,032	0,036	0,033
n Promedio	0,032	0,040	0,036

Fuente: Elaboración propia.

Dado que, las granulometrías de las distintas muestras en ambas zonas son muy similares, el valor de n_0 determinado fue idéntico para ambas zonas. Respecto a los coeficientes, dado que las zonas son similares (debido a su proximidad) el coeficiente de rugosidad determinado para ambas zonas fue el mismo.

La evaluación del Eje Hidráulico del río se realizó mediante el software HEC-RAS, para lo cual rigen las siguientes consideraciones:

- ✓ **Condición hidráulica de análisis:** El análisis hidráulico se efectuó para régimen de escurrimiento mixto, imponiendo altura normal aguas abajo y un hidrograma aguas arriba. Se utilizó la pendiente media del cauce aguas abajo y aguas arriba de las zonas analizadas, lo que corresponde a una pendiente de $S=0,002$ m/m y $S=0,005$ m/m, aguas abajo y arriba, respectivamente, para la zona propuesta y una pendiente de $S=0,003$ m/m y $S=0,01$ m/m, aguas abajo y arriba respectivamente, para la ubicación actual de la estación.
- ✓ **Malla:** Respecto a la malla utilizada, se consideró una malla de 2 m para las planicies de inundación con un refinamiento alrededor del cauce de 1 m.
- ✓ **Límite Seco-mojado:** Se definió como límite seco mojado una altura de agua en la celda de 5 cm.

Utilizando la información anteriormente mencionada se realizó una modelación hidráulica de la situación actual de la zona donde se encuentra hoy en día la estación y una modelación hidráulica de la situación actual de la zona proyectada. El objetivo de esta modelación es analizar las alturas de escurrimiento, velocidades y áreas de inundación que permitan justificar e iniciar el diseño de la nueva estación fluviométrica para posteriormente simular la condición con proyecto.

6.2.2.2 Situación Sin Proyecto

Para analizar las áreas de inundación y las velocidades del flujo, se analizó un flujo impermanente a través de un hidrograma. El hidrograma fue construido con el objetivo de analizar el comportamiento de una crecida para un caudal bajo usualmente transitable por la sección. Tal como se mencionó anteriormente, el caudal peak fue determinado en base a una estimación del caudal pasante a partir de la visita a terreno realizada y contrarrestado con las curvas de variación estacional de la estación actual, por ende, se modeló la condición sin proyecto para la zona donde actualmente se ubica la estación fluviométrica y la zona propuesta.

El caudal utilizado es de $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Tal como se puede observar en la Figura 5-2, este caudal corresponde a una crecida de alta probabilidad de ocurrencia para los meses de invierno y probabilidad media para los meses de enero a abril. Finalmente, todas estas condiciones

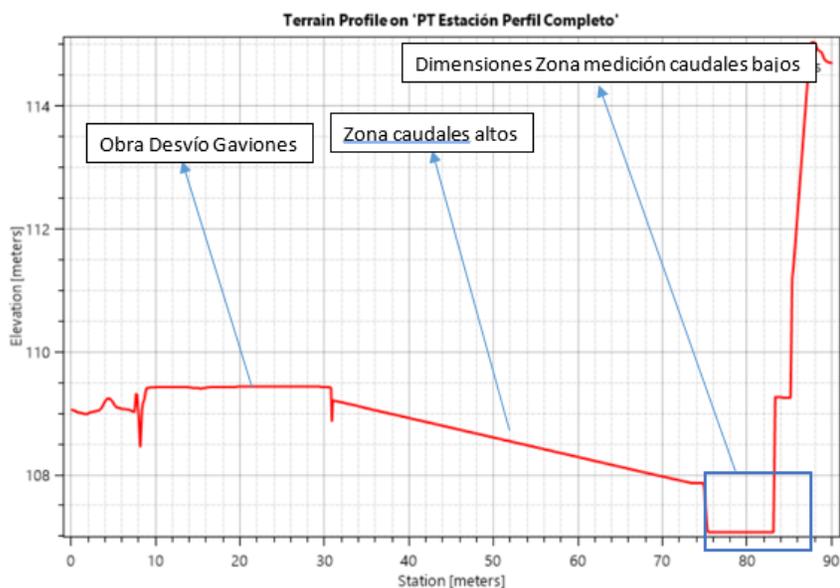
fueron ingresadas al modelo hidráulico construido con el objetivo de analizar y comparar la crecida con la ortofoto tomada en terreno.

6.2.2.3 Situación Con Proyecto

El desarrollo del modelo de la situación “con proyecto” requiere modificar ciertos aspectos en el modelo construido anteriormente. En concreto, es necesario modificar la topografía (en este caso el MDT) y el coeficiente de rugosidad de la zona específica donde se propone ubicar la estación fluviométrica.

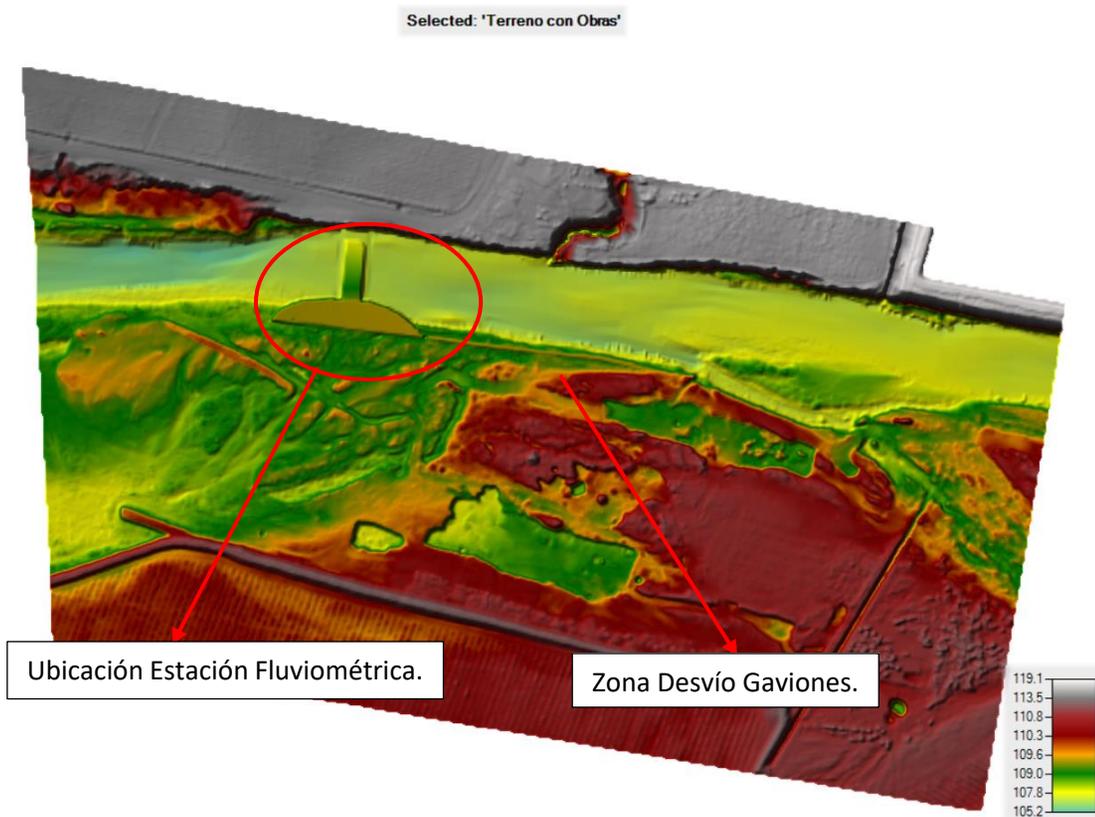
Para el caso de la topografía, se creó una estación en la sección propuesta en base a un cálculo aproximado de la capacidad de porteo de una estación clásica, de esta manera, se probaron distintas configuraciones hasta lograr definir una que maximizara los caudales de medición modificando el ancho y altura de la sección de medición de caudales bajos, la pendiente de la zona de caudales mayores y la altura de los muros.

La configuración definida (mostrada en la Figura 6-5) posee una capacidad máxima de porteo aproximada de 100 m³/s. Esta estación definida, fue implementada en el modelo digital de terreno, en la sección definida, incluyendo aspectos como zona de entrada y salida con protección de enrocados y entrada parabólica al canal de caudales bajos. El MDT incorporando la estación de medición fluviométrica se presenta en la Figura 6-6.



Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.

Figura 6-5: Aspectos variables para la configuración de la estación fluviométrica



Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.

Figura 6-6: Modelo Digital de Terreno. Ubicación propuesta Con Proyecto

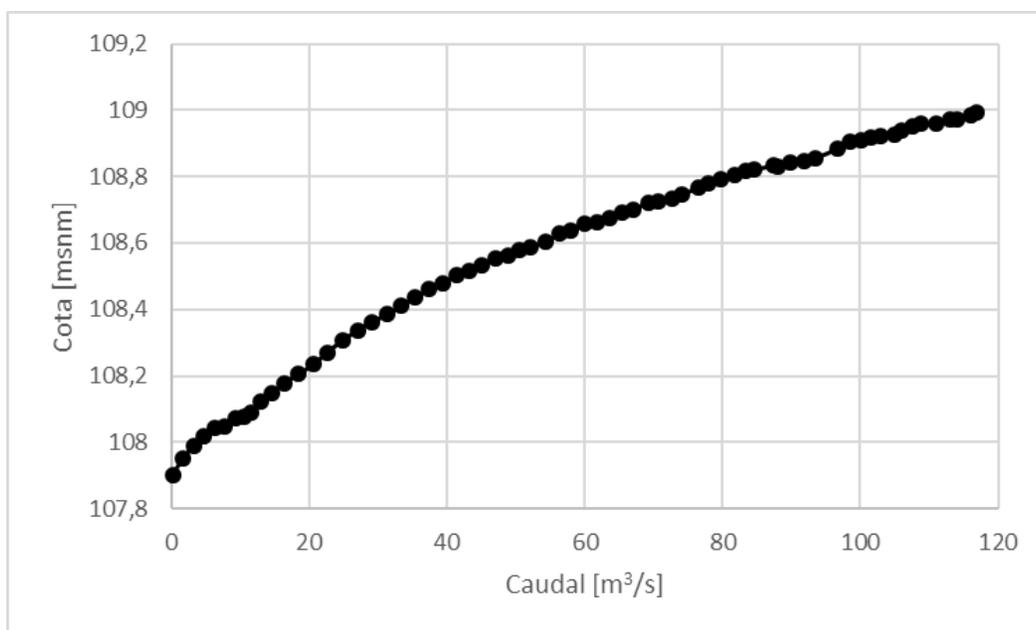
Posteriormente, se modificó la rugosidad de la zona de la estación fluviométrica ya que corresponde a hormigón (rugosidad conocida de $n=0,014$). Los demás sectores mantuvieron la rugosidad establecida en la sección anterior.

Finalmente, todas estas condiciones fueron ingresadas al modelo hidráulico para realizar el proceso de modelación bidimensional, para esto, en primer lugar, se definió un hidrograma de crecida cuyo caudal peak fuese superior a los $80 \text{ m}^3/\text{s}$ definidos para el diseño de la estación. Con esto, se pretende observar la respuesta de la estación ante una crecida de este tipo.

6.2.3 Curva de Descarga

En la Figura 6-7 y en la Tabla 6-2 se muestra la curva de descarga de la estación fluviométrica diseñada. Se observa que la estación es capaz de portear los $80 \text{ m}^3/\text{s}$ tal como se esperaba a partir de su diseño.

Adicionalmente, se presenta en la Figura 6-8, la curva de descarga de la estación fluviométrica para caudales bajos (en la canaleta) y en la Tabla 6-3.



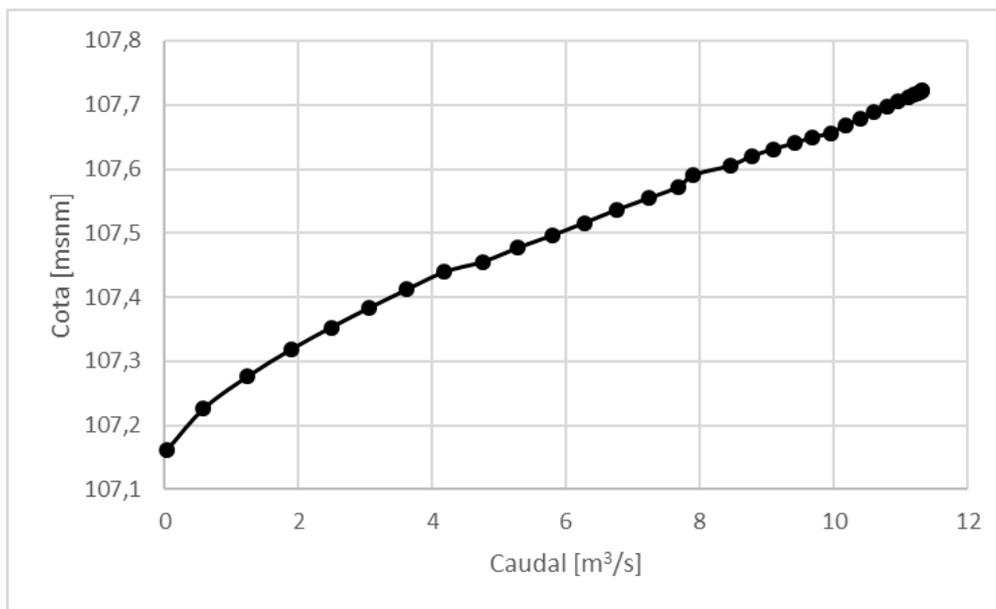
Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.

Figura 6-7: Curva de Descarga Estación Fluviométrica.

Tabla 6-2: Curva de Descarga Estación Fluviométrica proyectada

Caudal (m³/s)	Cota (m s.n.m.)						
0,2	107,9	29,2	108,4	61,8	108,7	91,8	108,8
1,7	108,0	31,4	108,4	63,6	108,7	93,5	108,9
3,2	108,0	33,4	108,4	65,4	108,7	96,7	108,9
4,8	108,0	35,4	108,4	67,1	108,7	98,5	108,9
6,3	108,0	37,4	108,5	69,2	108,7	100,2	108,9
7,9	108,0	39,4	108,5	70,8	108,7	101,4	108,9
9,3	108,1	41,4	108,5	72,7	108,7	102,9	108,9
10,6	108,1	43,3	108,5	74,1	108,7	105,0	108,9
11,6	108,1	45,1	108,5	76,5	108,8	106,1	108,9
13,0	108,1	47,1	108,6	77,9	108,8	107,5	109,0
14,6	108,1	48,8	108,6	79,7	108,8	108,7	109,0
16,4	108,2	50,5	108,6	81,8	108,8	110,9	109,0
18,5	108,2	52,2	108,6	83,3	108,8	113,1	109,0
20,6	108,2	54,2	108,6	84,6	108,8	114,1	109,0
22,7	108,3	56,4	108,6	87,4	108,8	116,0	109,0
24,9	108,3	58,0	108,6	88,0	108,8	116,9	109,0
27,1	108,3	60,0	108,7	89,9	108,8		

Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.



Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.

Figura 6-8: Curva de Descarga Estación Fluviométrica. Caudales Bajos

Tabla 6-3: Curva de Descarga Estación Fluviométrica proyectada. Caudales Bajos

Caudal (m³/s)	Cota (m s.n.m.)	Caudal (m³/s)	Cota (m s.n.m.)	Caudal (m³/s)	Cota (m s.n.m.)
0,0	107,2	6,3	107,5	10,2	107,7
0,6	107,2	6,8	107,5	10,4	107,7
1,2	107,3	7,2	107,6	10,6	107,7
1,9	107,3	7,7	107,6	10,8	107,7
2,5	107,4	7,9	107,6	11,0	107,7
3,1	107,4	8,5	107,6	11,1	107,7
3,6	107,4	8,8	107,6	11,2	107,7
4,2	107,4	9,1	107,6	11,3	107,7
4,8	107,5	9,4	107,6	11,3	107,7
5,3	107,5	9,7	107,6	11,3	107,7
5,8	107,5	9,9	107,7	11,3	107,7

Fuente: Elaboración propia desde HEC-RAS.

6.2.4 Cálculo de Enrocados

Utilizando los resultados de la modelación hidráulica para un caudal de 100 años de período de retorno, en la sección inmediatamente aguas debajo de la estación (más desfavorable), se propone como velocidad de diseño de enrocados una velocidad de 6 m/s. Luego, al resolver la expresión de Isbach para D_{50} , se obtiene que: $D_{50} = 1,5$ m

Luego, como condición de diseño, se considera una protección basal de enrocado dispuestos en dos capas, consolidado mediante inyección de hormigón con penetración de 100%, con elementos estructurales conformados por rocas competentes, cuyo diámetro mínimo (D_{50}) debe ser de 1 m.

Como medida preventiva, se recomienda mantener una inspección periódica del estado general de los enrocados en este sector.

6.2.5 Transporte de Sedimentos

Utilizando la metodología descrita en la metodología, los resultados de la modelación para un caudal de 100 años y el promedio de los D_{50} de las calicatas disponibles para esta estación, se obtienen durante la crecida de 100 años, aguas arriba de la estación, se transportan en total, 3,5 m³/s de sólidos en el fondo del lecho, lo cual corresponde para esa sección, al 0,3% del caudal líquido (1.170 m³/s). Por otra parte, aguas abajo de la estación, se transportan en total, 0,8 m³/s de sólidos en el fondo del lecho, lo cual corresponde para esa sección, al 0,06% del caudal líquido (1.270 m³/s).

En este caso, se observa que, al considerar la estación en el río, se produce un transporte de fondo de sedimentos aguas arriba mayor al transporte aguas debajo de la misma.

6.2.6 Socavaciones

Se presentan los resultados del cálculo de socavaciones mediante los dos métodos mencionados en la metodología, determinándose en promedio una socavación máxima de 2,4 m.

Finalmente, se determinó la socavación al pie de la obra, la que se determinó igual a 0,5 m. De esta forma, la socavación máxima es de **2,9 m**.

6.3 Diseño estación

Utilizando los antecedentes de diseño presentados anteriormente, se prepararon especificaciones técnicas del proyecto, memoria de cálculo estructural, planos, cubicaciones y presupuesto detallado de las obras.

Por último, en la Tabla 6-4 se presenta el presupuesto resumido de la estación.

Tabla 6-4: Presupuesto estación

DESIGNACIÓN	Costo (\$)
Obras Previas	10.360.000
Movimientos de Tierra	19.220.608
Obras de Hormigón	147.615.406
Obras de Acero	6.424.002
Obras Varias	2.521.467
Gaviones	9.993.068
Costo Directo	196.134.552
Costo Indirecto (GG UU 45%)	88.260.548
Presupuesto Total Sin IVA	284.395.100
IVA (19%)	54.035.069
Presupuesto Total Con IVA	338.430.169

Fuente: Elaboración propia.