



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EMBALSE CODEGUA, REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS

TOMO 1

RESUMEN EJECUTIVO



MARZO - 2025

DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (DOH) DIVISIÓN DE RIEGO

Jefe División de Riego
Juan Carmona.

Jefe Departamento de Proyectos de Riego
Iván Rojas

Inspector Fiscal del Proyecto
Victor Reyes.

Inspector Fiscal Subrogante del Proyecto
Carmen Gloria Opazo

SMI INGENIEROS SpA

Jefe de Proyecto
Marcela Quezada

Coordinador del Proyecto
Aaron Arias

Profesionales

Experto internacional en presas: Luis San Martín M

Ingeniero Civil: Carlos Garrido S

Ingeniero Civil: Felipe Orellana

Ingeniero Civil: Félix Pérez

Ingeniero Civil: Felipe Aguirre

Ingeniero Civil: Javier Vargas

Ingeniero Civil: Jorge Crempien

Ingeniero Civil: José Abell

Ingeniero Civil: Kricor Bzdigian K.

Ingeniero Ejecución Eléctrico: Alberto Bernal

Ingeniero mecánico: Sebastián Alvarez

Ingeniero Civil: Mauricio Espinoza

Geólogo MSc: Hugo Delucchi F.

Geólogo: Jaime Caviedes

Ingeniero Comercial: Fernando Cartes

Ingeniero Agrónomo: Marcela Salinas

Sociólogo: Germán Bauerle

Ingeniero Civil: Sergio Duarte

Ingeniero Civil: Darío Vargas

Ingeniero Civil: Nicolás Maluk

Ingeniero Forestal: Nicolás Sanhueza

Tasador: Pablo Mansilla

Geógrafo: Paola Hernández

Abogada: Claudia Craig

Ingeniero medio ambiente: Loreto Jofré

Arqueólogo: Camilo Valdivieso

Biólogo: Andrés Veloso
Ingeniero Agrónomo Patricio Murúa S.
Ingeniero Agrónomo: Eliana De Amesti
Ingeniero Agrónomo: Gabriel Selles
Ingeniero Agrónomo: Raúl Ferreyra
Técnico Agrícola: Víctor Díaz
Geógrafo: Rodolfo Gotschlich
Ingeniero Geomensor: Jorge Flores LI.
Ingeniero Civil: Luis Risso.
Proyectista Civil Hidráulico: Luis Eyrault.
Proyectista Civil: Carlos Ulloa

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Perfeccionamiento de los derechos de aguas	8
1.2. Cambio de punto de captación de los derechos de aguas	9
1.3. Sitio arqueológico Las Ñipas	9
1.4. Pertenencias mineras	10
1.5. Interferencia con red eléctrica existente	11
2. RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y PRINCIPALES CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN CRÍTICA DE LA PREFACTIBILIDAD	11
3. TRABAJOS DE TERRENO	12
3.1. Trabajos de topografía	12
3.2. Prospecciones y ensayos ejecutados en la presente consultoría	13
4. ESTUDIOS BÁSICOS, AGRONÓMICOS Y DE MODELACIÓN.....	15
4.1. Estudios Básicos	15
4.2. Estudio Agronómico	24
4.3. Modelo de simulación	27
5. DISEÑO PRESA, OBRAS ANEXAS Y RED DE DISTRIBUCIÓN	28
5.1. Presa	30
5.2. Obra de desvío	32
5.3. Evacuador de crecidas	32
5.4. Canal matriz	32
5.5. Mejoramiento de la red de canales existente	33
5.6. Caminos	33
5.7. Análisis del impacto hídrico del embalse hacia aguas abajo.....	33
5.8. Análisis de rotura de presa	35
6. COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROYECTO	36
7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	37

7.1. Evaluación mediante el método del presupuesto	37
7.2. Evaluación mediante el método del valor de mercado de las transacciones de derechos de aguas 40	
7.3. Método del valor incremental de la tierra	40
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEFINITIVO	41
8.1. Incertidumbres	41
8.2. Recomendaciones	42
8.3. Conclusiones.....	44

1. INTRODUCCIÓN

Por resolución DGOP N° 83 del 3 de diciembre de 2021 la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) contrató, previa licitación pública, con la firma SMI Ingenieros SpA., la ejecución de la Consultoría denominada “Estudio de Factibilidad Embalse Codegua, Región del Libertador Bernardo O’Higgins”

El proyecto del embalse Codegua se encuentra aproximadamente a unos doce kilómetros al este de la localidad del mismo nombre, provincia de Cachapoal, Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. Los límites de la comuna son: al norte la comuna de Mostazal; al sur la comuna de Machalí y Rancagua; al oeste la comuna de Graneros; y al este la Región Metropolitana. La Localización del embalse, en el estero Codegua, corresponde a una subcuenca andina del río Maipo, y está ubicada hacia el noreste de la VI región.

Figura N° 1-1: Ubicación del área del proyecto



Fuente: Elaboración propia en base a imagen mapy.cz

El área de riego del estero Codegua presenta dos grandes problemas asociados al recurso hídrico. El primero de ellos se relaciona con el deficiente estado de la infraestructura actual de conducción y reparto del agua, la cual contribuye a tener pérdidas por infiltración. El segundo problema se relaciona con la no existencia de una obra de regulación lo que se traduce en la

incapacidad de acumular agua de invierno para aprovecharla en épocas de escasez, que por ende condiciona el uso de la tierra a la estacionalidad de la oferta de agua.

En el año 2012 la CNR desarrolló un perfil del proyecto de prefactibilidad de un embalse en el estero Codegua, en el que se define el problema de la zona como “carencia de seguridad de riego y deficiencia en la disponibilidad de agua de riego para los productores silvo-agropecuarios ubicados en la cuenca del estero Codegua”. De este análisis de perfil se proponen varias soluciones de regulación, desde donde se elige como solución integral la construcción de un embalse en el estero Codegua con una capacidad estimada de 9 hm³, el que permite el incremento de la superficie de riego desde las 1.000 ha existentes en dicha fecha a un máximo de 2.600 ha con una seguridad de riego del 85%.

Sobre la base del estudio de perfil antes mencionado, entre los años 2013 y 2015, la CNR desarrolló el “Estudio de prefactibilidad mejoramiento del sistema de riego del estero Codegua, región de O'Higgins”, el que fue desarrollado por SMI Ingenieros SpA., en el que se efectuaron los estudios y trabajos que permitieron definir el mejoramiento de la zona de riego a través de la construcción de un embalse tipo CFGD de 17,5 hm³ de capacidad que permitiría el riego de 3.047 ha con una seguridad de riego del 85% y el mejoramiento de la captación, conducción y distribución de los canales matrices existentes, que permiten el transporte del agua proveniente desde del embalse.

Posteriormente, entre los años 2015 y 2017, La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) impulsó un plan nacional de embalses de riego de menor tamaño, denominados “embalses pequeños”, el que tuvo como objetivo la construcción de pequeños embalses y sus respectivas redes de distribución, para beneficiar a sectores de secano o con déficit de seguridad de riego, principalmente en zonas de desarrollo agrícola limitado. Producto de lo anterior, nace la consultoría “Estudios Técnicos, Ambientales y Económicos de Embalses Pequeños, Región del Libertador Bernardo O'Higgins”, la que fue desarrollada por SMI Ingenieros SpA. para la DOH. Producto de este estudio se generó una factibilidad avanzada del proyecto del embalse Codegua, considerando un muro de presa del tipo CFGD para un volumen de embalse de 9 hm³, de los cuales 5 hm³ son de agua para riego y 4 hm³ para volumen muerto. En este caso, este embalse otorgaba una seguridad de riego del 85% a 1.113 ha y no obtuvo indicadores de rentabilidad positivos.

En el presente estudio se desarrolló el análisis y diseño de factibilidad de las obras, enfocado en determinar el tamaño óptimo del embalse sin restricción de capacidad. El análisis abarcó tanto los aspectos técnicos, legales, sociales y económicos, de tal forma que el proyecto pudiese ser entregado a la dirección general de concesiones del MOP para su ejecución. En el caso de que el proyecto se pudiese ejecutar mediante la Ley 1.123, este estudio de factibilidad sentaría las bases para desarrollar el estudio de ingeniería de detalle, para pasar luego a la fase de construcción por parte del Estado.

En relación al proyecto se han relevado 5 aspectos importantes, que no están del todo consensuados, pues existen diferentes opiniones sobre su aplicabilidad. Por ello, esta Consultora ha recurrido a la autoridad pertinente, a través de reuniones mediante la ley de lobby, con el fin de establecer la base técnica y legal en que se encuentra el proyecto a mayo del año 2022. Estos aspectos son:

1.1. Perfeccionamiento de los derechos de aguas

De acuerdo con lo indicado por la DOH, para que el proyecto pueda ser considerado dentro del programa de la ley 1.123 y del proceso de Concesiones debe tener sus derechos de aguas perfeccionados. El perfeccionamiento tiene por objeto clarificar aquellas características esenciales de un derecho de aprovechamiento de aguas que, por algún error han resultado indeterminadas o indefinidas en el título de dominio que se inscribe en el Conservador de Bienes Raíces.

Al ser el derecho de agua un bien privado, este proceso debe ser realizado por su dueño, situación que podría ser acompañada gubernamentalmente mediante algún programa de apoyo a la regularización de derechos de aguas.

En el caso de los regantes de la Junta de Vigilancia del estero Codegua, los regantes del lado sur tienen el 100 % de sus derechos de aguas perfeccionados, y en el caso de los regantes del lado norte un porcentaje muy menor. Los canales con más agricultores son La Punta (203 regantes), El Manzano (180 regantes), El Rincón (180 regantes), La Estancilla (165 regantes) y Candelaria (142 regates), todos ellos ubicados en la zona norte del área regada por el proyecto.

Lo relativo al perfeccionamiento de los derechos de aguas no fue subsanado en el transcurso de la presente consultoría, pues requiere de un tiempo mucho mayor y por sobre de la voluntad y acceso que los regantes tengan para la realización de este trámite. Por ello, la mejor estimación que se pudo hacer sobre el caudal que ellos pueden captar y/o regular es el mismo que definió la CORA cuando subdividió el fundo La Leonera, en donde especificó: *“Los Proyectos de Distribución de Aguas aprobados por el Servicio Agrícola y Ganadero y anteriormente por CORA, indicaron que los recursos del estero Codegua para un año 85 % de probabilidad de excedencia, son de dos mil quinientos litros por segundo, (2.500 lts/seg), por tanto, si los recursos del estero se divide en dos partes iguales, 50% ribera norte y 50% ribera sur, los recursos de agua de la Asociación de Canalistas del Canal La Leonera son mil doscientos cincuenta litros por segundo”*

Con una base estadística actualizada, el caudal con 85 % de probabilidad en el estero Codegua es del orden de 1,5 m³/s. Por ello, resulta interesante la resolución que se hace el año 2017 respecto del perfeccionamiento de los derechos del Sr. Eric Prenzel a través de la sentencia del 2° Juzgado Civil de Rancagua del 25 de enero de 2017 en la que se señala: *“ Que su derecho de aprovechamiento de agua superficial y corriente del río Codegua, consuntivo, de ejercicio permanente y continuo por 10,2443 litros por segundo, cuando el río conduce 2,5 metros cúbicos por segundo, captados por medio de la Toma El Carmen de la Asociación Canal La Leonera, equivalentes a 9.313 acciones de dicho canal...”* Es decir, la sentencia no especifica una probabilidad de excedencia para referirse a un derecho permanente, sino que limita dicha equivalencia a su constitución original.

En base a lo anteriormente descrito, se estima que la mejor aproximación que se puede hacer respecto de los derechos de los regantes que captan en el estero Codegua y se dividen por partes iguales, en ribera norte y ribera sur tiene un máximo de 2,5 m³/s.

1.2. Cambio de punto de captación de los derechos de aguas

Como es habitual en este tipo de proyectos, los regantes beneficiarios del proyecto poseen sus derechos de aguas, aguas abajo de la presa. Entonces se debe aclarar si los regantes deben trasladar sus derechos a la zona del embalse aguas arriba, en la cola del embalse.

Consultada la DGA sobre este punto, en la reunión sostenida el día 2 de mayo de 2022 (y cuya minuta se incluye en el anexo de este proyecto), aclaró lo siguiente:

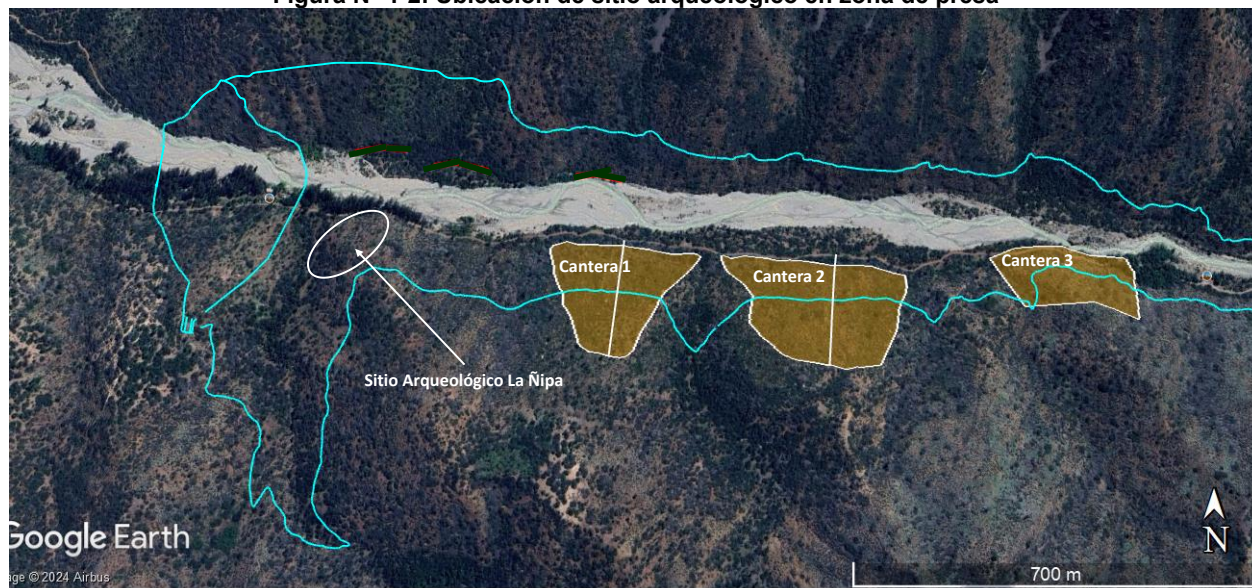
- Para este tipo de obras los derechos de agua deben estar constituidos en la cola del embalse.
- Que la DGA ha informado a la DOH, en el contexto de los proyectos de embalses, que también se puede solicitar traslado de derechos a puntos alternativos. Esto significa que los derechos de aguas que están en la primera bocatoma o donde inician los regantes, se puede solicitar a la DGA sean trasladados como puntos alternativos tanto a la cola del embalse como al muro. En definitiva, con eso se logra resguardar la zona completa en donde va a operar la obra.
- Que este traslado alternativo de puntos se puede hacer para ciertos períodos del año, pero que la recomendación de la DGA es solicitar traslados a puntos alternativos (cola y muro del embalse) para todo el año. De esta forma se logra optimizar la operación del recurso hídrico. En todo este proceso se debe tener en cuenta la existencia o no de derechos de terceros en la zona intermedia entre el actual punto de captación de los regantes y el muro y área de inundación del embalse.
- Respecto de la forma en que los derechos se ven afectados al ser captados en puntos alternativos (disminución), la DGA indicó que al momento de efectuar la solicitud se realiza un estudio de disponibilidad en el nuevo punto, se estiman los caudales permanentes y eventuales menos el caudal ecológico. Lo anterior considerando un análisis estadístico con los datos existentes.
- La DGA indica que el balance para estimar la merma del derecho se hace en el muro del embalse y que la zona entre el muro y la cola entra en el balance como aporte que se hace en el muro (no se descuenta).

1.3. Sitio arqueológico Las Ñipas

En junio del año 2023 el Consejo de Monumentos Nacionales relevó el sitio ubicado en la confluencia de la quebrada Las Ñipas con el Estero Codegua a categoría de Monumento Nacional en la subcategoría Monumento Arqueológico (MA) con el código 00004-MA-02106. Fue definido como un sitio de campamento de cazadores - recolectores arcaicos.

La figura siguiente muestra la ubicación del Monumento Arqueológico en relación al área del proyecto.

Figura N° 1-2: Ubicación de sitio arqueológico en zona de presa



Fuente: Elaboración propia en base a imagen Google Earth

Cuando se inició este proyecto, enero de 2022, para evaluar la ejecución de trabajos de terreno se hizo la consulta al CMN respecto de alguna declaración existente y la respuesta fue negativa. Cuando el CMN hizo la declaración de Monumento Nacional de este sitio (2023) los trabajos de terreno ya habían concluido. Se destaca que los trabajos de terreno ejecutados no se realizaron en el área especificada por el CMN, ladera derecha de la quebrada Las Ñipas, sino que en parte se ubicaron en la ribera izquierda de la quebrada Las Ñipas.

Se releva esta situación ya que es un aspecto que deberá ser revisado por la DOH y por los estudios ambientales a realizar en el contexto de la factibilidad del desarrollo del proyecto, tanto para realizar trabajos de terreno orientados al desarrollo de la ingeniería de detalle como para la posterior construcción de la obra.

1.4. Pertenencias mineras

Las propiedades mineras que afectan directamente al área del proyecto del sitio 3 corresponden a concesiones de explotación pertenecientes a la División El Teniente (DET) de la estatal CODELCO. Estas dos concesiones de explotación interfieren tanto en el área de inundación como en el desarrollo del camino de borde. Si bien es cierto la faena minera se encuentra en la cuenca del río Cachapoal, explotando el mineral mediante minería subterránea tipo block-caving, la extensión de sus concesiones llega hasta el área de interés del proyecto de la DOH. Así, a pesar de que la concesiones se encuentran activas, se ha verificado que no existen actualmente faenas activas de explotación en el Sitio 3. Cualquier riesgo y por ende solución para los proyectos que pudiese tener CODELCO como el que tiene la DOH actualmente, implica la negociación entre las partes involucradas.

Con motivo de la mencionada negociación, durante el mes de agosto de 2023, el Consultor gestionó una reunión con el área de exploraciones de la DET CODELCO y se entregó información relacionada con el área de ubicación de la presa y su zona de inundación, para su evaluación. Finalmente, el día miércoles 04 de octubre de 2023, se desarrolló una reunión con las partes

involucradas, incluida la Inspección Fiscal, en la cual, se especificó que la DET CODELCO había analizado los antecedentes del proyecto de factibilidad y su evaluación había permitido el avance de un estudio de pertenencias mineras, desarrollado por el área de exploraciones de la DET CODELCO, y que sólo faltaría la formalización del estudio entre la DET CODELCO y la DOH.

Actualmente, la IF DOH está a la espera del correo con el estudio mencionado y el contacto a quien se le deberá enviar el oficio de formalización respectivo.

Es importante tener presente esta situación, ya que involucrará la negociación entre partes fiscales (MOP – Codelco) que para estos casos tienen su propio protocolo.

1.5. Interferencia con red eléctrica existente

Esta interferencia tiene relación con la modificación de torres de alta tensión, las que se encuentran ubicadas en la zona de inundación del embalse, por lo que deben ser reubicadas de manera previa al primer llenado del embalse. La propiedad de esta línea es de Celeo Redes y está constituida por torres de alta tensión y 2 líneas de 220.000 volts cada una que alimenta a la División El Teniente de Codelco

El proyecto afecta a la torre T37E de la red de transmisión eléctrica. En este caso, la longitud de esta interferencia es del orden de 0,5 km. Se estima que será necesario agregar 2 postes más e inducir un nuevo trazado de unos 500 m de longitud. Con ello, es posible evitar el contacto con el área definida para el embalse con un mínimo ajuste en el trazado del tendido eléctrico.

Durante el transcurso de la consultoría se conversó con Celeo Redes, en reunión que participó el Inspector Fiscal, y la empresa manifestó su total colaboración en el proceso, a costo de la DOH.

Pero, se debe tener muy presente que el aspecto técnico puede ser abordable por las partes, pero para conectar la red al nuevo trazado será necesario cortar el suministro a El Teniente, que corresponde a la parte más delicada del proceso. Al ser dos líneas, se podría considerar la alimentación, temporal, a El Teniente por una línea que se mantenga activa, cambiar la otra y luego hacer el cambio de la primera. Esto requerirá de una alta coordinación entre las partes. Esta es una situación que también debiera ser manejada por las autoridades correspondientes en el marco de que ambas empresas son estatales.

2. RESUMEN DE LOS RESULTADOS Y PRINCIPALES CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN CRÍTICA DE LA PREFACTIBILIDAD

Con el objetivo de llevar el estudio de factibilidad, en la Etapa 1 de la consultoría se llevó a cabo un detallado y pormenorizado análisis de los antecedentes procedentes del Estudio de Prefactibilidad, los cuales esta Consultora hizo suyos mediante su revisión crítica. Dicho análisis crítico de la Prefactibilidad sirvió de base para la identificación de necesidades que serían cubiertas con el presente Estudio de Factibilidad. A continuación, se presenta un resumen de las principales conclusiones de dicho análisis crítico el cual fue llevado a cabo para los diferentes ámbitos que conformaron el Estudio de Prefactibilidad:

1) Ámbito administrativo y legal

➤ Derechos de agua para regulación del embalse

El estudio de prefactibilidad ya indicaba que los derechos de agua no se encuentran perfeccionados ante la DGA, situación que se relevó en la presente consultoría. Los derechos de agua, en un gran porcentaje, se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces, pero en acciones, sin especificar una equivalencia en volumen.

➤ Rol de Usuarios

El estero Codegua se encuentra conformado por un total de 1.105 regantes, donde la mayor concentración se encuentra en los canales La Punta, El Manzano y El Rincón

2) Ámbito Técnico

➤ Diseño muro y obras anexas

El estudio de prefactibilidad se encaminó hacia el diseño de una presa CFRD por la idoneidad geológica y geotécnica del lugar de emplazamiento del lugar de la presa, en lo se denominó sitio 1. Dichos diseños se llevaron a cabo para una presa que supone un volumen de agua embalsado de 17 hm³ y que el muro se construiría con materiales fluviales del mismo estero Codegua, de su área de inundación.

➤ Diseño red de distribución

La red de distribución corresponde a la red de canales existentes en el valle del estero Codegua y que para una mejor y más eficiente operación del sistema de riego deberían ser revestidos, principalmente, para evitar filtraciones.

➤ Evaluación económica y tamaño óptimo

En la prefactibilidad no se efectuó la estimación del tamaño óptimo del proyecto en la forma que MDFS lo requiere. El concepto utilizado en el estudio de prefactibilidad fue diseñar aquel embalse que maximizara la superficie de riego. Por ello, en la presente consultoría este aspecto se abordó de acuerdo a los lineamientos de MDFS.

3. TRABAJOS DE TERRENO

3.1. Trabajos de topografía

Los trabajos topográficos ejecutados para desarrollar el presente estudio de factibilidad fueron los siguientes:

- **Poligonal Geodésica:** Los trabajos desarrollados consistieron en la densificación de Prs en toda la zona de proyecto, es decir, áreas de riego, zona de presa, área de inundación y área poniente de influencia de ruptura.
- **Restitución aerofotogramétrica a escala 1:1.000:** Con el apoyo de las poligonales geodésicas, se llevó a cabo una restitución aerofotogramétrica a escala 1:1.000 del área del proyecto (presa, obras anexas y área de inundación). Este levantamiento cubrió 762 ha.

- **Restitución aerofotogramétrica a escala 1:5.000:** Con el apoyo de las poligonales geodésicas, se llevó a cabo una restitución aerofotogramétrica a escala 1:5.000 del área de riego y del área de rotura de presa con un total de 17.510 ha.
- **Levantamientos especiales:** Se realizaron levantamientos topográficos a escala 1:500 del área del muro de la presa (32 ha), y levantamientos a escala 1:200 de los portales de entrada y salida del túnel (1 ha) y de la estación fluviométrica de aguas arriba en escala 1:200 para 1,0 ha.
- **Perfiles topobatimétricos:** Se realizaron 27 perfiles topobatimétricos aguas arriba del área de inundación y 23 perfiles aguas abajo del muro de presa.
- **Balizado de canales:** Se balizaron 15 canales con una longitud total de 29 km.
- **Construcción de hitos troncopiramidales:** Se construyeron 4 Hitos Tronco piramidales distribuidos en la zona del embalse. Dos hitos cercanos a la zona del muro y dos hitos en la zona de la cola del embalse.
- **Replanteo de obras:** Se replantearon las obras del embalse consistentes en el muro, evacuador de crecidas, túnel, caminos, canal matriz y área de inundación a cota de parapeto.

3.2. Prospecciones y ensayos ejecutados en la presente consultoría

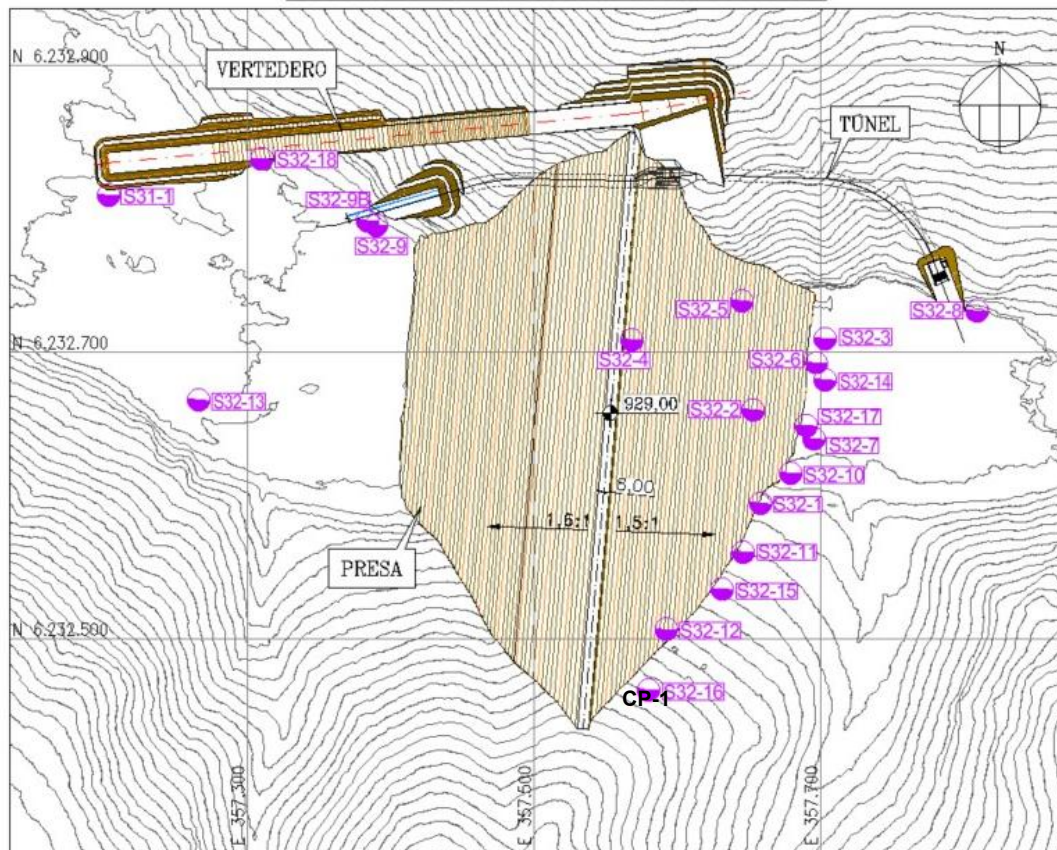
3.2.1. Prospecciones y ensayos en zona de presa y obras anexas

Se efectuaron 20 sondajes mecánicos a rotación con recuperación continua de testigo mediante muestreador HQ3 con un total de 1.075 m de perforación. En los sondajes se hicieron ensayos de pruebas Lugeon, Le Franc, corte directo en roca, densidad en rocas, compresión no confinada, descripción petrográfica y triaxial. La Figura N° 3-1 muestra la ubicación de estas prospecciones.

Se efectuó la calicata CP-1, en coordenadas N 6.232.470 y E 357.583, que corresponde al sector del tercio superior del plinto, con el fin de obtener muestras para análisis de clasificación completa, peso unitario, triaxial CIU, corte directo sin saturar y consolidación.

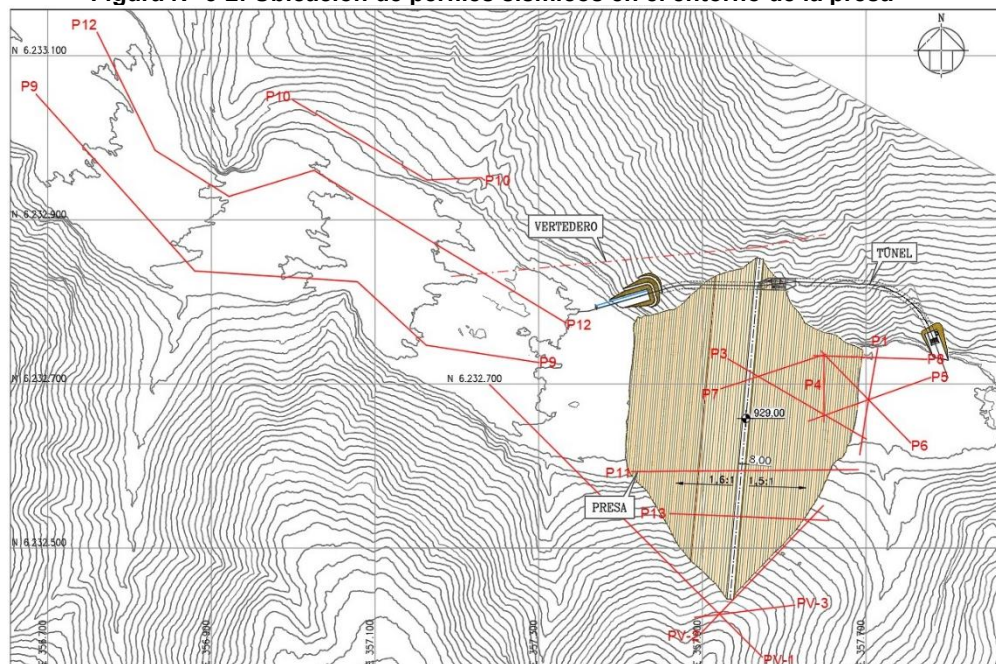
Del mismo modo, se ejecutaron 11 perfiles de refacción sísmica en el cauce del estero con una longitud total de 3.240 m y 3 perfiles de refracción sísmica en el estribo izquierdo con una longitud total de 840 m.

Figura N° 3-1: Ubicación de sondajes en el entorno de la presa



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3-2: Ubicación de perfiles sísmicos en el entorno de la presa



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Prospecciones y ensayos para el estudio de yacimientos fluviales

Consistieron en 40 calicatas ubicadas en la zona de inundación del embalse. La profundidad máxima de las mismas fue de 5,0 m. Los ensayos realizados fueron clasificación completa, densidad, macrogranulometría, contenido de sales totales, contenido de carbón y lignito, contenido de sulfatos, contenido de materia orgánica, reacción álcalis agregado, desintegración por sulfatos, Proctor y desgaste de Los Ángeles. Se debe agregar que ya se contaba con 42 calicatas realizadas en el área de inundación de la presa, realizadas en fases anteriores de este proyecto.

3.2.3. Prospecciones y ensayos para el estudio canteras en ladera sur

Se efectuaron 6 sondajes mecánicos a rotación con recuperación continua de testigo mediante muestreador HQ3 con un total de 344 m de perforación. En los sondajes se hicieron ensayos de pruebas Lugeon, Le Franc, densidad en rocas, compresión no confinada, descripción petrográfica, desgaste de Los Ángeles, peso específico y porosidad, difracción de rayos X, desintegración por sulfatos y disgregabilidad al contacto con el agua.

Del mismo modo, se ejecutaron 3.840 m perfiles de refacción sísmica ubicados en la parte alta y borde del área de canteras definida por el proyecto.

3.2.4. Prospecciones y ensayos caminos

Se ejecutaron 17 calicatas en la zona del trazado del camino, con una profundidad media de 2,0 m. Los ensayos realizados fueron clasificación completa, Proctor y CBR

3.2.5. Prospecciones y ensayos canal matriz

Se ejecutaron 13 calicatas en zona de trazado del canal matriz con una media de 2,0 m. Los ensayos realizados fueron clasificación completa, densidad, macrogranulometría, contenido de sulfatos, contenido de materia orgánica, Proctor y contenido de cloruros.

3.2.6. Prospecciones y ensayos estación de aforo de aguas arriba

Se ejecutaron 5 calicatas con una profundidad media de 0,8 m, por encontrarse a este nivel la roca basal. Los ensayos realizados fueron clasificación completa, y macrogranulometría.

3.2.7. Prospecciones y ensayos red de riego existente

Se ejecutaron 40 calicatas distribuidas en la zona de riego existente, cercano a los trazados de los canales, con profundidad media de 2,0 m. Los ensayos realizados fueron clasificación completa, densidad, contenido de sulfatos, contenido de materia orgánica, Proctor y contenido de cloruros y compresión no confinada

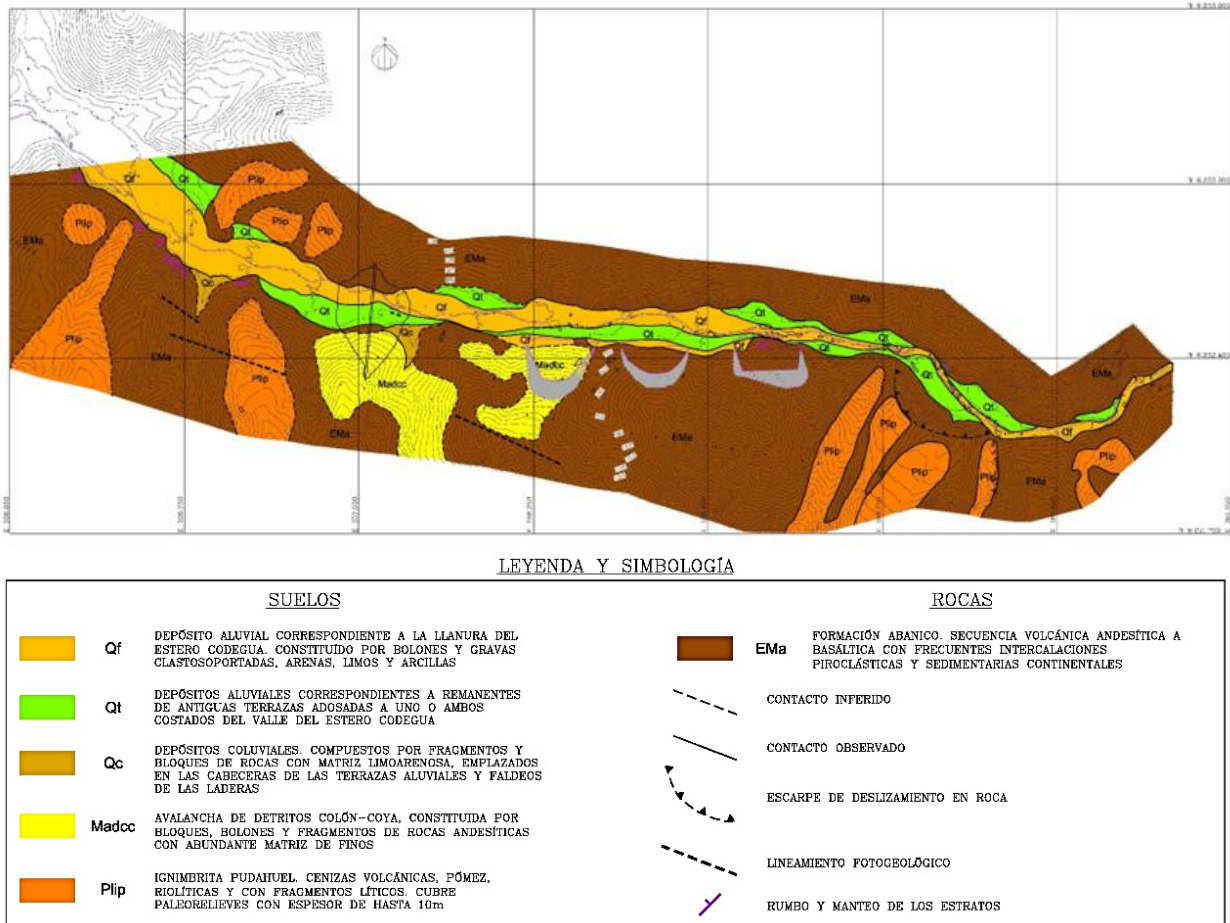
4. ESTUDIOS BÁSICOS, AGRONÓMICOS Y DE MODELACIÓN

4.1. Estudios Básicos

4.1.1. Estudio geológico – geotécnico zona de presa y área de inundación

El estudio analizó la geología del sector de presa, cubeta y área regional de la zona del proyecto. A nivel local, en la zona del proyecto, afloran suelos de las formaciones Depósito Aluvial de la llanura del estero Codegua (Qf), Depósito Aluvial de la llanura del estero Codegua (Qf), Depósitos Coluviales (Qc), Avalancha de Detritos Colón Coya – Madcc e Ignimbrita Pudahuel (Plip). Respecto de las unidades de rocas se presenta la Formación Abanico (Ema). La figura siguiente muestra una imagen del análisis de geología regional realizado.

Figura N° 4-1: Geología regional



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1. Evaluación geotécnica de la zona de la presa

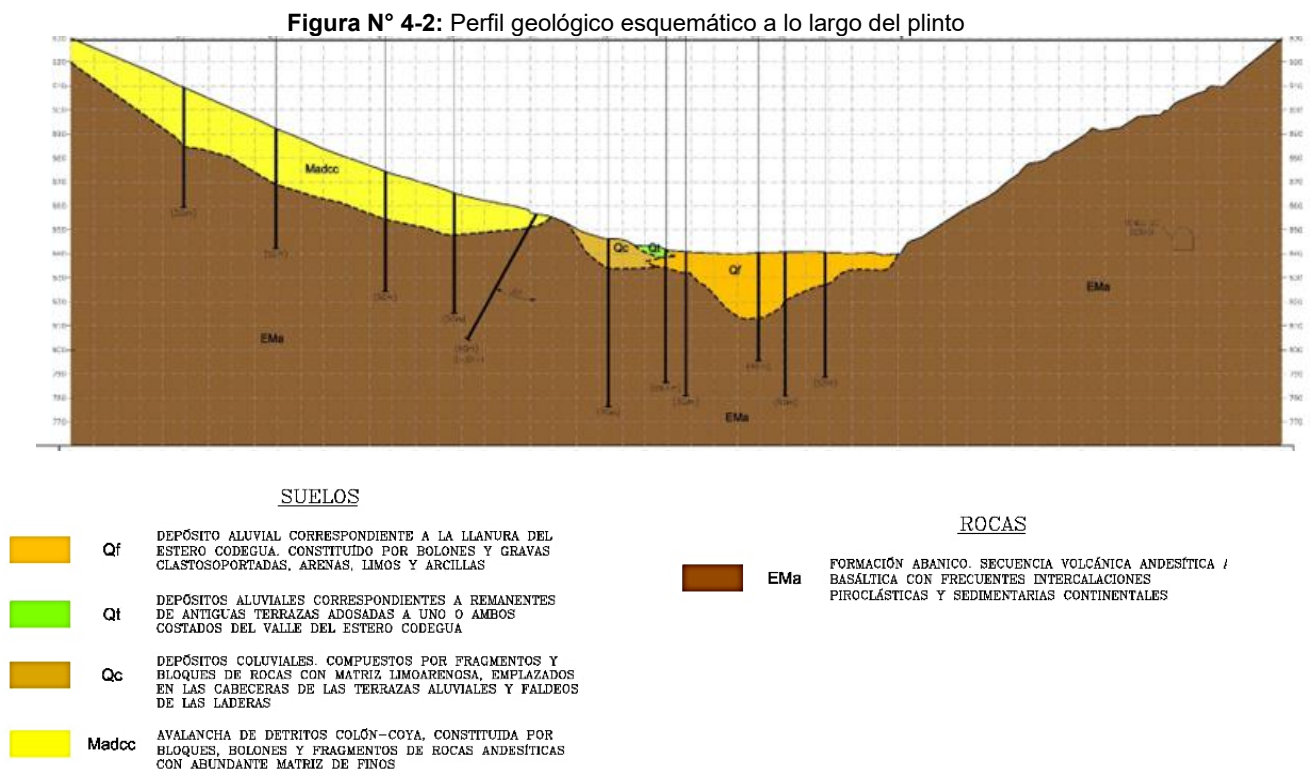
Las laderas del costado derecho (norte) muestran una condición muy homogénea en cuanto a sus taludes naturales y a los materiales que las constituyen, al estar emplazadas en rocas tipo brechas volcánicas, lavas, y tobas de la formación Abanico (Ema), en paquetes gruesos que pueden llegar a decenas de metros, las que afloran en contacto con el depósito aluvial correspondiente a llanura de inundación actual del estero Codegua. Se especifica que la homogeneidad se refiere a la condición de taludes y materiales constituyentes.

Las laderas del costado izquierdo (sur) presentan una condición algo más heterogénea, al presentar relieves más tendidos y estar constituidas por más de una unidad geológica. A partir

de la llanura aluvial hacia el sur, el perfil muestra la presencia de un segmento de una antigua terraza aluvial (Qt), coluvios (Qc), afloramientos de rocas volcanoclásticas de la formación Abanico (EMa) y más al sur y arriba, cubriendo parte de la ladera, un depósito correspondiente a un posible remanente de la antigua avalancha de detritos Colón Coya (Madcc), constituido por bloques de grandes dimensiones de pórfidos, de hasta 5 m de diámetro, bolones y fragmentos de rocas con abundante matriz de finos.

El lecho de la llanura aluvial corresponde en superficie y en sus primeros metros a una unidad fluvial con intercalaciones aluviales, compuesta por al menos tres niveles de terrazas aluviales, es decir, la primera terraza que contiene el cauce actual, la segunda terraza correspondiente a la planicie de inundación con vegetación principalmente arbustiva, y la tercera terraza que posee al menos dos metros de altura con respecto a la planicie de inundación y que contiene vegetación arbórea.

El material superficial del lecho es indicado por la estratigrafía de las calicatas de 5 a 6 metros de profundidad, y corresponde a depósitos fluviales compuestos por gravas y bolones del estero Codegua, de clasificación pobremente a bien graduadas y con algunas lenticularidades de arcillas y limos. El espesor del relleno sedimentario de acuerdo con los SEV sería de entre 12 a 26 metros en su punto más profundo, aumentando hacia aguas abajo del sitio propuesto, lo cual está indicado por los sondeos eléctricos verticales, y más precisamente por los sondeos mecánicos rotatorios ejecutados en el sitio. La figura siguiente muestra un perfil geológico por el desarrollo del plinto de la obra.



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2. Evaluación geotécnica del túnel de desvío

No fue posible realizar exploraciones de subsuperficie debido a que no es posible el acceso con maquinaria sobre el farellón rocoso y además se debe tramitar un permiso ante CONAF para hacer las huellas de acceso requeridas. La DOH está evaluando la posibilidad de efectuar un sondaje horizontal con el fin de explorar la zona en que se desarrollaría el túnel de desvío.

En la zona del portal de entrada del túnel se ejecutó el sondaje S32-8 inclinado en 30° hacia la ladera norte, con una longitud total de 70m. Este sondaje indicó la presencia de gravas y bolones en sus primeros 6 m (equivalentes aproximadamente a 5,3 m en vertical) y luego la presencia de roca basal, andesita.

En la zona del portal de salida se ejecutó el sondaje S32-9 B también inclinado hacia la ladera norte, con una longitud de 9,8m. Este sondaje comenzó su ejecución y a los pocos días se produjo una crecida importante del estero Codegua que obligó a abandonar el terreno y retirar la maquinaria. Al volver, la plataforma ya no se encontraba habilitada, por lo que se debió iniciar un nuevo sondaje que se denominó S32-9. Este sondaje mostró la presencia de roca de buena calidad desde el inicio hasta los 9,8 m ejecutados.

Luego se ejecutó el sondaje S32-9 con una longitud de 70 m e inclinado 30° hacia la ladera norte. Este sondaje indicó la presencia de roca basal desde los 0,60 m.

En estos sondajes se encuentra la roca que debería ser la aflorante dentro del túnel y que corresponde a sectores de tobas y andesitas con apreciaciones geotécnicas aceptables para este tipo de obra, lo cual permite extrapolar estas situaciones hacia el interior del macizo.

4.1.1.3. Evaluación geotécnica del eje del vertedero

Al igual que el túnel de desvío, esta obra se emplaza sobre afloramientos de rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Abanico, ubicadas en el estribo derecho o norte de la presa.

La formación abanico es una secuencia de rocas volcánicas andesíticas a basálticas con frecuentes intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales.

En la base del evacuador se ejecutó el sondaje S32-18 inclinado en 30° hacia el cerro, cuya condición geotécnica ha sido expuesta anteriormente e indica que la roca se encuentra a los 12,9 m. Ésta corresponde a un toba de ceniza lítica, matriz soportada de color gris con halos café oscuro/verdoso y piroclastos de origen volcánico. Fragmentos líticos de >5 cm de manera local. Sus fracturas son onduladas a semirugosas, con pátinas de óxidos o con relleno carbonático y/o de zeolitas. La roca presenta una mejoría inconsistente con la profundidad, con %RQD variable. Su resistencia estimada es R2 (5-25 [Mpa]) a R3 (25-50 [Mpa]).

En esta ladera no se ejecutaron otras prospecciones por su muy difícil acceso e imposibilidad de obtener permisos para desarrollar las huellas para acceder con la maquinaria requerida. Pero de acuerdo a las observaciones efectuadas por el especialista, en esta ladera se espera que las condiciones geomecánicas del macizo sean aptas para el diseño de la obra. Se debe indicar que un diseño preliminar muestra que se excavará en la parte inicial del vertedero (canal colector) hasta una profundidad de 15m aproximadamente, la cual se ejecuta mediante

banqueo del terreno. Deberá considerarse el reforzamiento de estos bancos mediante apernados y malla y shotcrete en toda su exposición.

4.1.1.4. Evaluación geotécnica del área de canteras

a. Canteras sector ladera sur

El área de canteras se ha definido principalmente en base a la exposición en superficie de roca y en sectores cercanos al muro y por la condición de encontrarse dentro del sector de cubeta, y también considerando su accesibilidad. Se compone de 3 sectores denominados Cantera 1, Cantera 2 y Cantera 3 ubicadas en la ladera sur, aguas arriba del muro de presa.

Es importante indicar las limitaciones del análisis que se presenta, pues hay aspectos que deberán quedar pendientes para un análisis especial a ser ejecutado más adelante, cuando las condiciones administrativas de los terrenos (permisos de propietarios que actualmente son privados y entidades estatales que deben entregar permisos especiales, como CONAF, por ejemplo) permitan ejecutar prospecciones directamente sobre el macizo rocoso, y no en forma lateral como se hizo en el presente estudio, debido a los inconvenientes antes señalados. La evaluación de la posibilidad de canteras en la ladera sur se efectuó dado que existe un camino que permitió la instalación y transporte de una maquinaria de sondajes.

Desde poniente a oriente (Sitio Cantera 1 a Sitio Cantera 3) se advierte la presencia de destacados afloramientos rocosos en los sitios 2 y 3, aun cuando en los mismos las rocas aflorantes muestran un alto grado de fracturamiento superficial, así como una alteración que impacta en su resistencia. Puede verse, junto a la presencia de roca, que estos afloramientos se encuentran en el camino de acceso al interior del valle y adicionalmente se señala que continúan por la ladera hacia la parte superior del macizo.

En el Sitio Cantera 1 disminuyen los afloramientos rocosos, en comparación con los sitios Cantera 2 y 3, ya que gran parte de su superficie presenta una cobertura de bloques de litología del tipo pórfidos que ha sido reconocida como una extensión de la avalancha de detritos Colón Coya (Madcc) que se advierte en el estribo izquierdo de la presa. Los resultados de los sondajes en este sector muestran que el espesor del material indicado es sobre los 20m lo que necesariamente impacta en la factibilidad del sitio para ser explotado como cantera. Como conclusión del estado del análisis geológico – geotécnico, se puede indicar que:

- El material en el sector explorado, especialmente en los sitios 2 y 3 presenta condiciones aceptables para la explotación de una cantera, probablemente en menor cantidad de la inicialmente considerada lo cual puede aumentar al redefinir la forma y alcances de las canteras.
- Se estima que los volúmenes que se consideran pueden ser ampliados dado que se podría establecer una explotación en mayor altura de los sitios cubicados, ampliando así su capacidad de extracción. Adicionalmente el sector de la ribera derecha o ladera norte presenta el mismo tipo de material por lo que se podría considerar preliminarmente que este sector sería semejante a los sectores analizados, ampliando así los volúmenes requeridos. Este sector, por razones de acceso y de permisos resulta de difícil exploración en esta etapa de los estudios, pero se recomienda, al menos a nivel de río efectuar prospecciones geofísicas y algún sondaje si fuera posible.

b. Canteras sector ladera norte

Tal como se mencionó en el acápite anterior, la extracción de material para construcción de la presa puede ser ampliado a través de la explotación del sector que se muestra como un atractivo farellón rocoso ubicado en la ladera derecha del valle, en lo que es la zona del área de inundación del embalse. En esta zona no se ha podido ejecutar prospecciones por razones de acceso y permisos, pero sí se ha planteado a la DOH la alternativa de realizar perfiles sísmicos a través del método de refracción ReMi.

La inspección en terreno mostró que fundamentalmente se encuentra representada la unidad rocosa de rocas de la Formación Abanico (Ema) al igual que en la ladera sur. En la ladera norte los afloramientos de roca se encuentran mejor expuestos. Se estima que la potencialidad para explotación de una cantera en esta ladera es alta y que la morfología y la exposición al sur hacen que las rocas se encuentren mejor expuestas.

4.1.2. Estudio hidrológico

4.1.2.1. Estudio de recursos hídricos

El estudio de recursos hídricos indicó la cantidad de recursos disponibles para la ejecución del proyecto y al mismo tiempo permitió a posterior definir la forma de operación del embalse. La determinación de dichos recursos afluentes al embalse se desarrolló a nivel mensual, en el periodo contemplado entre los años 1989/90 a 2020/21, utilizando de esta manera la estadística de los últimos 30 años.

4.1.2.2. Estudio de crecidas

El objetivo del estudio de crecidas fue determinar los caudales máximos en la cuenca aportante al estero Codegua. Esto significa que se generaron los caudales de diseño de las obras que se proyectarán para diferentes periodos de retorno. Los caudales adoptados para los diseños se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 4-1: Caudales de crecidas adoptados (m³/s) para distintos periodos de retorno, cuencas de interés embalse Codegua

T (años)	Sitio de presa 3	Quebrada El Bolsón	Quebrada Los Quebranchos
2	48	9	8
5	132	24	13
10	218	40	17
20	324	59	22
25	367	74	24
50	434	91	29
100	517	112	36
200	583	132	42
250	604	140	44
500	669	163	52
1.000	738	189	60
10.000	964	287	90
CMP	1.099	345	94

Fuente: Elaboración propia

También se efectuó un análisis de transposición de caudales a las diferentes pequeñas cuencas que son intervenidas por el trazado del canal matriz y caminos con el objetivo de definir los caudales de diseño de las distintas obras de cruce previstas.

4.1.2.3. Sensibilización frente al cambio climático

Se realizó un análisis de sensibilidad basado en estadísticas pasadas, para comparar los caudales obtenidos por hidrología sin efecto del cambio climático y nuevos caudales calculados considerando una variación de 5%, 10% y 20% de precipitaciones anuales, y un aumento de la temperatura de la cuenca, lo cual tiene un efecto directo en la línea de nieve y área aportante de la cuenca. Se buscó comparar la variación de los resultados obtenidos sin la consideración de estos efectos.

Tabla N° 4-2: Resumen de resultados de caudales máximo instantáneo cuenca Embalse Codegua afectados por el efecto del cambio climático

Periodo de Retorno (años)	Caudal Máximo Sin Cambio Climático (CC) (m3/s)	Caudal Máximo (m3/s) solo afectado por Temperatura CC	Caudal Máximo (m3/s) Temp CC y Pp 5%	Caudal Máximo (m3/s) Temp CC y Pp10%	Caudal Máximo (m3/s) Temp CC y Pp 20%
2	48	97	102	107	116
5	132	267	281	294	321
10	218	440	462	484	528
20	324	655	687	720	785
25	367	719	763	809	901
50	434	857	911	965	1.075
100	517	1.095	1.154	1.213	1.334
200	583	1.230	1.298	1.367	1.505
250	604	1.275	1.346	1.418	1.560
500	669	1.417	1.495	1.573	1.730
1.000	738	1.558	1.643	1.728	1.899
10.000	964	2.023	2.131	2.239	2.455
CMP	1.099	2.023	2.131	2.239	2.455

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran un aumento notable (el doble) en los valores de los caudales para cada período de retorno considerado. Lo anterior se debe al aumento de la temperatura en la cuenca en 1,4°C, y con eso, el aumento de la cota de la línea de nieve, pasando la cuenca a tener un comportamiento totalmente pluvial, aumentando el área aportante de precipitaciones, y así mismo, los caudales.

Con respecto al efecto de incorporar además del efecto de la temperatura el aumento de las precipitaciones en 5%, 10% y 20%, se tiene que el caudal determinado con el efecto del aumento de temperatura (Columna 2 de la tabla anterior) aumenta de manera proporcional al aumento de las precipitaciones. Lo anterior se debe a que la totalidad de la cuenca pasa a ser del tipo pluvial. De esta manera, se tiene que, en este caso, al considerar este impacto del aumento porcentual de precipitaciones, el principal factor que afecta en el aumento de los

caudales de crecida, corresponde a la elevación de la isoterma 0 más que al aumento de las precipitaciones

4.1.3. Estudio de sedimentos

La estimación del gasto sólido afluente a un embalse es un paso necesario en el diseño de una obra hidráulica de esta envergadura, pues su valor determina el volumen de sedimentos depositados en función del tiempo, y, en consecuencia, la determinación del volumen. Además, el volumen de sedimentos y la forma en que éstos se distribuyen al interior de un embalse determinan parámetros de diseño tan importantes como la cota de la obra de toma de agua.

El estudio de sedimentos se abordó comenzando con un análisis crítico de los estudios previos existentes para luego llevar a cabo un análisis de las estadísticas de sedimentos en suspensión medida en la red de estaciones fluviométricas cercanas a la cuenca del estero Codegua.

El gasto sólido de fondo fue estimado mediante fórmulas conocidas usando para ello los perfiles topobatemétricos realizados en la presente consultoría. La siguiente muestra el resumen de los resultados obtenidos

Tabla N° 4-3: Volúmenes promedio de Sedimentos Totales afluentes en la alternativa de embalse N°3 del embalse Codegua

Alternativa	Transporte (m3/50años)			
	Acarreo de fondo	Sedimentos Finos	Total	Adoptados
Sitio embalse N°3	1.500.000	1.200.000	2.700.000	3.000.000

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Estudio de hidráulica fluvial

Sobre la base del estudio hidrológico desarrollado y los perfiles topo batimétricos levantados en terreno, tanto en la parte de aguas arriba como de aguas abajo del muro de presa, se efectuó un análisis de hidráulica fluvial de dichos tramos del río.

El objetivo fue realizar el análisis en el río en los tramos de interés, tales como la ubicación de puentes, bocatomas, obras de arte y puntos de cruce con sectores urbanos. En este caso en el tramo en análisis, en la situación actual, se tiene que el sector afectado hacia aguas abajo del embalse corresponde a la bocatoma del Canal El Peumal.

La modelación hidráulica del escurrimiento se encuentra asociada a las crecidas para diferentes períodos de retorno, de 100, 200 y 250 años, esto con el fin de analizar los efectos de las crecidas en las obras ubicadas aguas abajo del embalse, en la zona de influencia del proyecto. No se considera el análisis de caudales inferiores, lo anterior debido a que el proyecto no contempla extracción de áridos desde la zona de aguas abajo del embalse, que requirieran un estudio de extracción de áridos.

En el sector ubicado aguas arriba del sitio del embalse, la única obra de importancia que se encuentra tiene relación con el camino de borde del estero, que permite el acceso hacia el sector del tranque de relaves Barahona de Codelco y el acceso a las veraneadas por parte de los arrieros. Se aprecia que debido a las fuertes pendientes imperantes en el sector, se tienen velocidades del orden de los 8 m/s para las crecidas de TR100 y TR250, las que se catalogan

como muy altas, lo que puede ocasionar problemas de erosión en caso de presencia de roca fracturada u otro tipo de material, por lo que se debe considerar obras de protección frente a este efecto, en caso de que el camino proyectado con embalse se mantenga en este tramo.

En el sector ubicado aguas abajo del muro se tienen varios elementos que deben ser analizados con respecto a la situación actual. Entre estos se tienen viviendas, vestigios arqueológicos, terrenos agrícolas, canales de riego y caminos de acceso.

En esta zona desde el punto de vista de los niveles de las aguas en crecidas se ve afectado el canal El Peumal no cumpliendo con los requerimientos de diseño de la DGA para este tipo de obras. Lo anterior es ratificado en entrevistas con los propietarios de dicho canal que dicen que en periodo de crecidas tienen problemas en la bocatoma que es arrasada por el río y tramos del canal que son inundados y deben reconstruir todos los años en dicho sector.

En el caso del camino de acceso del lado norte, es necesario indicar que no tiene problemas de inundación, pero el nivel de revancha para un periodo de retorno de 100 años es del orden de 0,50m entre el nivel de las aguas y la plataforma del camino, por lo que se recomendaría aumentarla a una altura de 1m. Es necesario destacar que, en dicho sector, la cota de energía supera el nivel del camino para un periodo de retorno de 100 años, lo que significa que el nivel de aguas si podría llegar a ese nivel, por lo que sería apropiado tomar los resguardos necesarios.

Desde el punto de vista de los terrenos agrícolas y de la vivienda del cuidador, se tiene que los niveles de las aguas se encuentran distantes de llegar a dicho sector. Lo mismo ocurre con respecto a las explanadas de vestigios arqueológicos.

4.1.5. Estudio sísmico

Para el estudio del peligro sísmico, se realizó una estimación determinística de las variables sísmicas relevantes, sobre la base al estado del arte actual y considerando métodos de investigadores nacionales y extranjeros de reconocido prestigio.

En los desarrollos y cálculos realizados se consideraron los sismos históricos de magnitudes importantes asociados a los distintos tipos de fuentes sismogénicas presentes en el área estudiada.

Los valores mínimos recomendados de PGA se muestran en la tabla siguiente:

Tabla N° 4-4: Valores recomendados de PGA

PGA	Horizontal	Vertical
SS	0.29	0.15
SD	0.34	0.18
SMC	0.38	0.20
Escenario determinístico	0.39	0.20

4.2. Estudio Agronómico

El estudio agronómico de este proyecto es muy extenso y se presenta completo en el Tomo 7 de este informe. A continuación, se presenta un resumen de las principales consideraciones tenidas en cuenta en el planteamiento de la situación agrícola para la situación con proyecto.

4.2.1. Sectorización y caracterización del área de estudio

Se consideró la sectorización del área dividida en 2 zonas de riego con la siguiente descripción:

Sector de Riego 1: Este sector comprende la ribera norte del estero Codegua. El área potencial de riego de este sector es 1.793,8 ha de las cuales 1.428,01 ha están bajo cota de canal y 365,82 ha sobre cota de canal.

Sector de Riego 2: Este sector comprende la ribera sur del estero Codegua. El área potencial de riego de este sector es 1.560,1 ha de las cuales 1.325 ha están bajo cota de canal y 235,1 ha sobre cota de canal.

Los beneficios directos del proyecto provienen por el uso de la mayor disponibilidad de agua y oportunidad en la que se puede utilizar para el riego. Por esta razón los beneficios directos provienen de la mayor producción agrícola que es posible obtener en condiciones de riego, el que se valoró a través del cambio en el excedente agrícola entre la situación sin proyecto (situación base optimizada) y la situación con proyecto (Método del Presupuesto).

La caracterización se efectuó a partir de Predios Promedio previamente seleccionados. El Predio Promedio, al igual que en situación actual y optimizada, correspondió a la unidad de análisis y de trabajo del presente proyecto. Lo anterior se realizó mediante una expansión directa a través de la aplicación porcentual de la estructura productiva de ellos sobre la superficie total de cada estrato de tamaño a expandir. Posteriormente, mediante la suma de las expansiones se obtuvo el uso del suelo para cada estrato y para el total del área.

Dentro de la situación con proyecto, se determinaron los gastos indirectos por Predio Promedio y se elaboraron las fichas o estándares productivos y económicos, con los cuales se realizará la evaluación económica, la expansión de los respectivos ingresos brutos, costos directos y márgenes brutos por predio expandido y con la suma de ellos se obtuvo el valor para el total de cada sector. Se consideró además las inversiones necesarias y el programa de asistencia técnica y capacitación requeridos para lograr las metas planteadas en la situación con proyecto.

La figura siguiente muestra el área de riego considerada para la superficie máxima a atender por el embalse que es de 3.354 ha.

Figura N° 4-3: Superficie máxima potencial de riego de 3.354 ha con seguridad de riego del 85% - Superficies sobre cota de canal de 600,92 ha



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Supuestos de desarrollo

Los supuestos de desarrollo que están presentes en la determinación de la situación futura se han basado íntegramente en experiencias locales y en las actuales perspectivas agroeconómicas. Los supuestos son los siguientes:

- Potencialidad de los suelos: Se debe señalar además que a través del estudio agrológico se determinó una superficie máxima de riego del orden de las 3.300 ha
- Potencial climático: de los parámetros agroclimáticos presentados puede concluirse que son óptimos para una gran gama de cultivos.
- Tecnificación del riego: el proyecto contempla tecnificar la totalidad de la superficie destinada a frutales, tanto nuevos como existentes, a excepción de la huerta frutal, la cual se tecnificará solo en un 50% de su superficie. De igual forma, se tecnificará la mitad del cultivo de hortalizas, chacras y praderas de mayor rentabilidad.
- Potencialidad de cultivos: el uso actual de los suelos, en cuanto a su estructura productiva, representa el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos disponibles.

4.2.3. Patrón de cultivos propuesto

El uso del suelo se obtuvo inicialmente de los resultados de la encuesta muestral, redistribuida por sub estratos y, posteriormente, presentada a nivel de Predios Promedios. Posteriormente, se efectuó la expansión a través de la multiplicación directa del número de predios que representa

cada Predio Promedio, procedimiento que es idéntico a utilizar la estructura porcentual del uso del suelo de cada Predio Promedio y aplicarla directamente a la superficie a expandir. Los suelos indirectamente productivos, en general, se encuentran ocupados por casas, bodegas, caminos y cercos, entre otros.

A modo de resumen se presenta en la siguiente tabla la distribución de cultivos estimada para la situación actual y la expansión propuesta para la situación con proyecto.

Tabla N° 4-5: Uso del suelo en situación actual – con proyecto

Rubro Productivo	Actual ha	Con Proyecto ha
Cultivos y Hortalizas		
Trigo	36	0
Maíz grano	32	0
Papa	0	21
Huerta Casera	12	0
Choclo	1	31
Lechuga	0	49
Melón	0	51
Semillero sandía	0	46
Frutales y Vides		
Almendro	293	471
Arándano	12	316
Cerezo	540	765
Ciruelo Europeo	53	222
Ciruelo Japonés	63	84
Duraznero	72	120
Duraznero Conservero	184	210
Kiwi	0	169
Manzana	25	37
Nectarín	38	52
Nogal	29	220
Pera	5	8
Uva de mesa	81	81
Huerta frutal	86	86
Vid vinífera cepa fina	222	294
TOTAL	1.784	3.333

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los márgenes brutos de cada rubro se determinaron a través de la multiplicación de cada superficie asignada por el margen bruto unitario resultante de las fichas técnico económicas.

En la situación actual se descontaron los gastos indirectos y los costos de inversión y operación de riego tecnificado. En situación optimizada, además de los descuentos señalados para la situación actual, se descontaron los costos del programa de transferencia tecnológica.

En situación futura se consideraron los costos por concepto de gastos indirectos, riego tecnificado, habilitación de terrenos, drenaje y del programa de asistencia tecnológica.

Para la situación actual, en donde la superficie actualmente regada no cuenta con una seguridad de riego adecuada, se ha procedido a afectar los rendimientos y costos de cosecha de acuerdo a la fórmula del Factor de Producción propuesta por Doorenbos y Kassan 1979 (FAO 33) y Ferreyra; Selles y otros 1985 y 1991.

4.3. Modelo de simulación

Se efectuó una modelación numérica integrada de la cuenca del estero Codegua a través de herramientas de modelación de recursos hídricos superficiales y subterráneos.

La modelación superficial se realizó mediante el programa WEAP, mientras que la modelación subterránea se desarrolló en Visual MODFLOW. Ambos programas fueron acoplados en el dominio que poseen en común en base a los flujos de interacción de ambos componentes, incluyendo como entradas al modelo subterráneo aquellos volúmenes obtenidos en base al modelo superficial. La cuenca se modeló a través de nodos y dentro de esta red se incluyeron cuencas intermedias y el embalse Codegua. Los escenarios modelados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 4-6: Escenarios simulados

Escenario	Embalse	Zona de Riego	Pérdidas Canales	Eficiencia de riego	Área (ha)	Área Total (ha)
E0 Situación Actual (SAO)	NO	Norte	50%	73%	1282	2.034
		Sur		63%	752	
E1	SI	Norte	15%	90%	1282	2.034
		Sur		90%	752	
E2	SI	Norte	15%	90%	1428	2.753
		Sur		90%	1325	
E3	SI	Norte	15%	90%	1794	3.354
		Sur		90%	1560	

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la operación del embalse, este almacena el agua del río en concordancia con el derecho de aprovechamiento de agua equivalente al traslado hecho desde las bocatomas actuales. El flujo restante se deja pasar, siempre buscando cumplir con el caudal ecológico como primera prioridad. En caso de que el embalse se encuentre lleno, se producen vertimientos, aunque sea parte del derecho. Cuando las zonas de riego demandan agua, estas son abastecidas en primer lugar con el agua proveniente de las quebradas intermedias entre el embalse y la bocatoma actual, proporcional a los derechos de aguas.

La seguridad de riego anual corresponde al porcentaje sobre el total de años simulados, en que se cumplen de manera conjunta los criterios siguientes:

- Se debe suplir al menos un 85% de la demanda hídrica a nivel mensual. En caso de no cumplir este criterio, se considera que falla el año completo.
- La oferta hídrica no debe ser menor al 90% de la demanda mensual para dos meses continuos, de no cumplir el criterio, se considera que falla el año completo.

En forma adicional la DOH solicitó estimar el volumen de embalse requerido para satisfacer la siguiente condición:

- Para los años que falla, siempre se debe entregar como mínimo el 50% de la demanda.

La modelación mostró que esta última condición impone la necesidad de definir volúmenes de embalses muy grandes para satisfacer un período de año seco, quedando el resto del tiempo sobredimensionado.

Finalmente, la seguridad de riego se obtiene mediante el porcentaje de años en que no ocurre falla para el periodo de modelación. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 4-7: Tamaños de embalse según escenarios

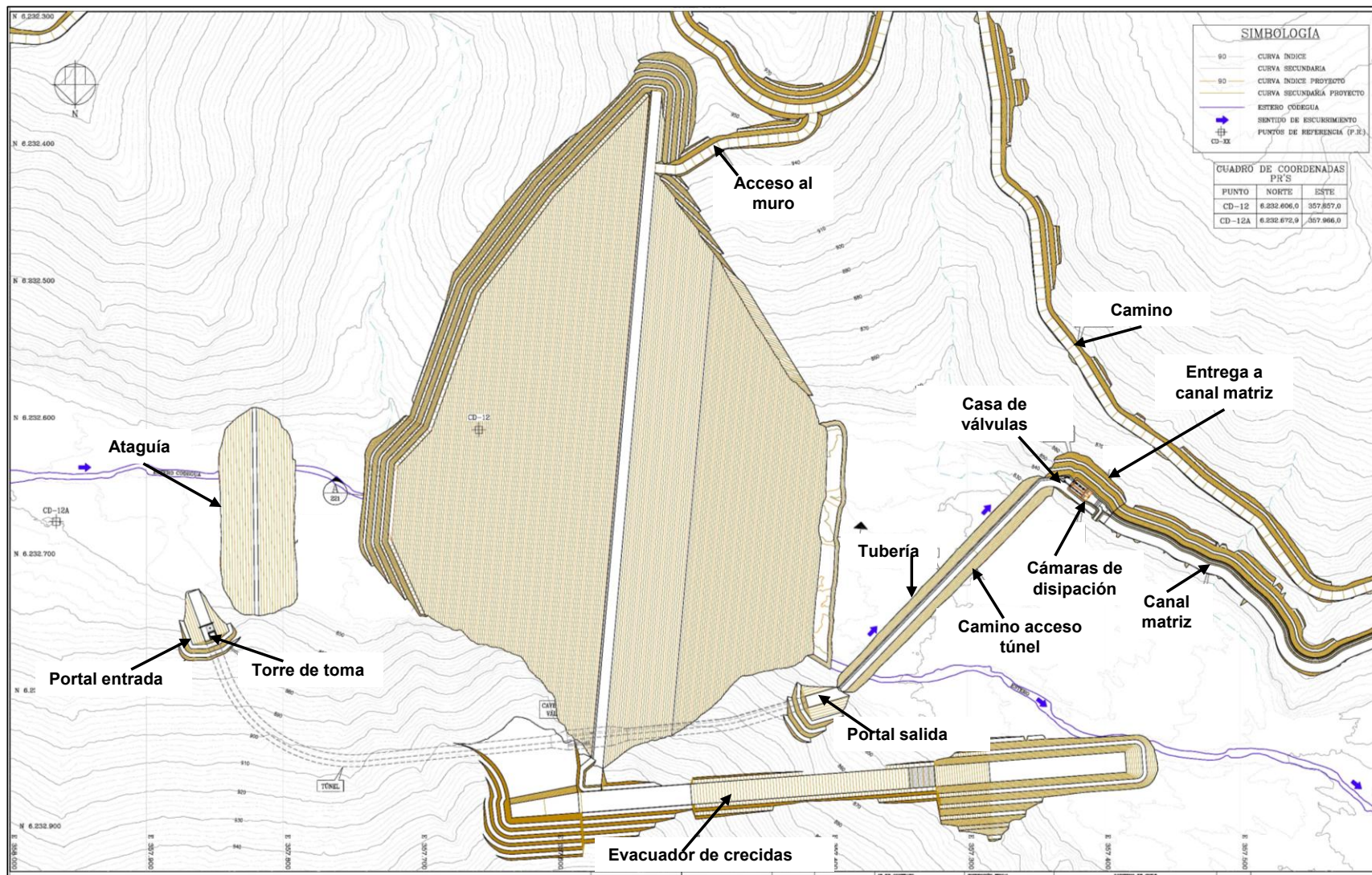
Escenario	Volumen embalse	Criterio	Seguridad Riego Zona Norte	Seguridad Riego Zona Sur
E1	14 hm ³	Seguridad de riego CNR	88%	88%
		Condición 50% DOH	41%	42%
E2	20 hm ³	Seguridad de riego CNR	88%	88%
		Condición 50% DOH	41%	42%
E3	25 hm ³	Seguridad de riego CNR	88%	88%
		Condición 50% DOH	41%	42%

Fuente: Elaboración propia.

5. DISEÑO PRESA, OBRAS ANEXAS Y RED DE DISTRIBUCIÓN

La figura siguiente muestra la disposición general de las obras que se describen posteriormente

Figura N° 5-1: Disposición general de las obras



Fuente: Elaboración propia

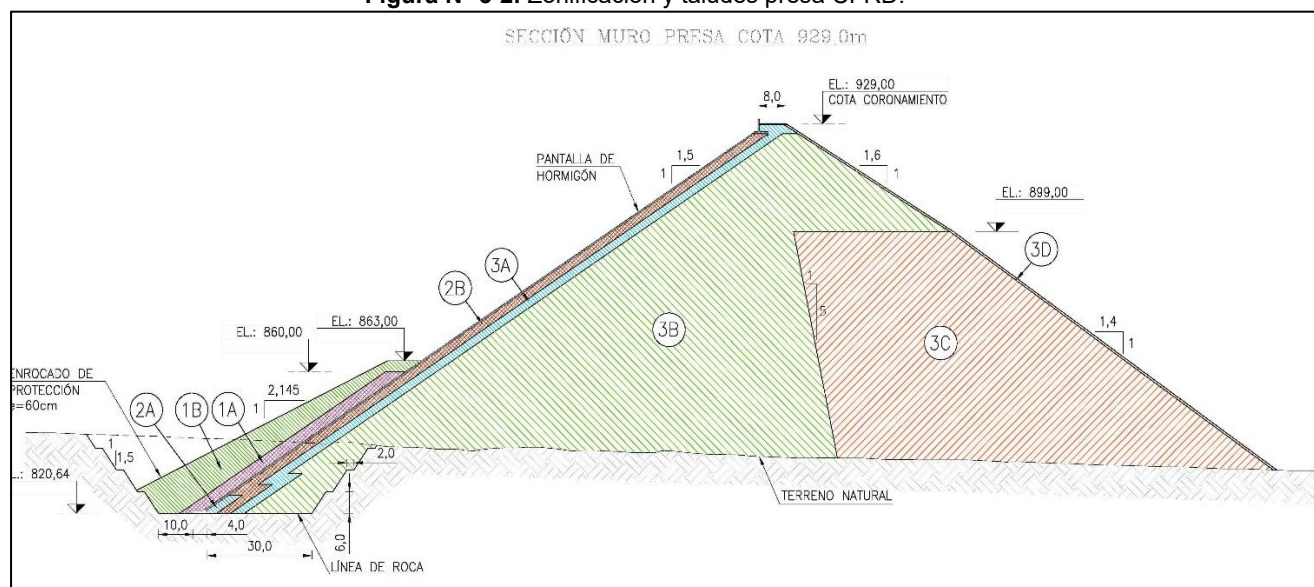
5.1. Presa

El prediseño del embalse Codegua considera una presa de enrocados con una pantalla de hormigón aguas arriba (CFRD). El muro de presa se emplaza sobre el estero Codegua al oriente de la localidad de Codegua, en una angostura ubicada aproximadamente 3,5 km aguas arriba del sector denominado La Leonera. Para la definición del eje de la presa se tomó en consideración la optimización de los materiales del relleno del muro, por medio de disminuir las cubicaciones tanto de relleno como de excavaciones teniendo en consideración el mínimo desarrollo del plinto.

La longitud de coronamiento es de 503 m y su cota 939 msnm que en su definición consideró la crecida decamilenaria cuyo hidrograma tiene un peak de 964 m³/s y la CMP un peak de 1.099 m³/s. El ancho de coronamiento es de 8,0 m.

El talud de aguas arriba es 1,5: 1 (H: V) y de aguas abajo 1,6: 1 (H: V), con la excepción en este caso, que el talud de aguas abajo es 1,6:1 (H: V) en los 30 m superiores y luego, se consideró un talud de 1,4:1 (H: V) por tratarse de material de cantera, de acuerdo con recomendaciones del Ing. Bayardo Materón. Lo anterior se muestra en la figura siguiente:

Figura N° 5-2: Zonificación y taludes presa CFRD.



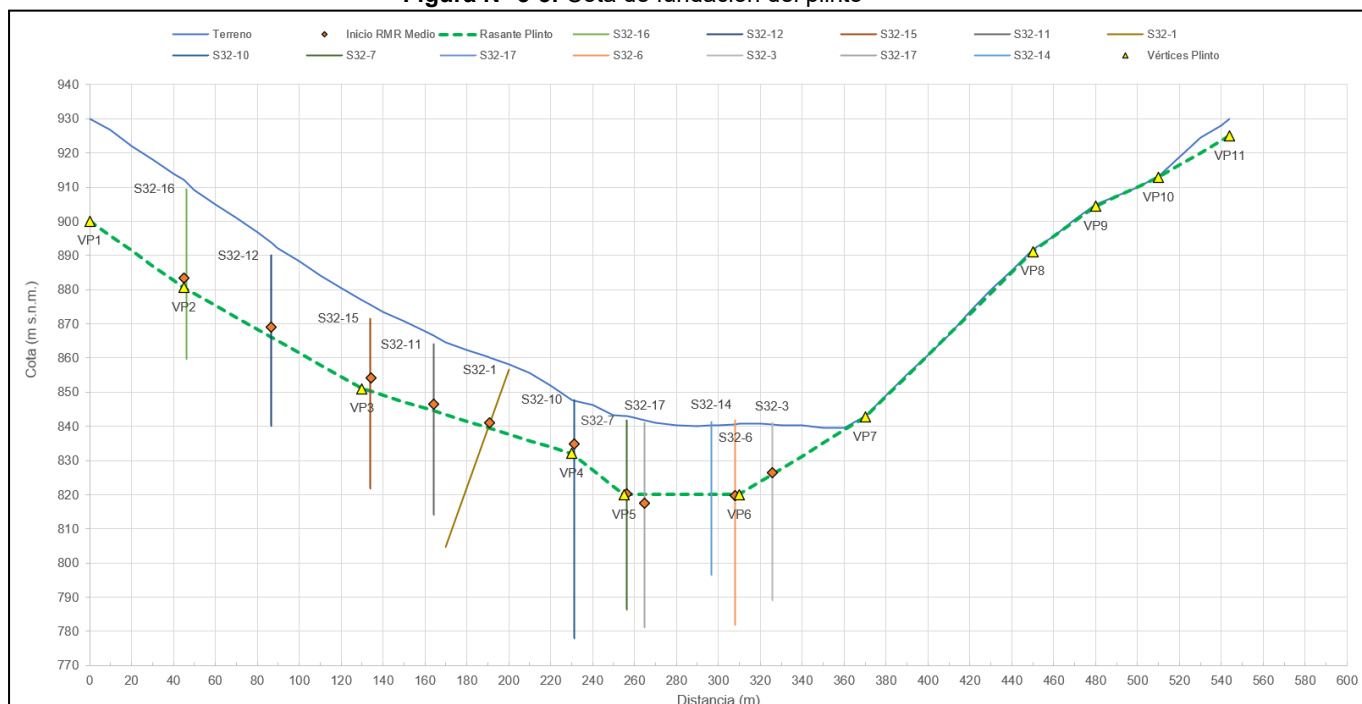
Fuente: Elaboración propia.

Para definir el espesor de la pantalla, se ha considerado el criterio propuesto en el texto “Barragens de enrocamento com fase de concreto”, de los autores Paulo T. Cruz, Bayardo Materón y Manoel Freitas del año 2014, en el que se recoge la experiencia indicada por Cooke and sherard del año 1987, en la que señalan que con la moderna tecnología de concreto y en base a la experiencia y práctica actualmente disponible, es razonable proyectar losas con un espesor constante de 25 a 30cm para presas de altura moderada (75 a 100m) y usar un incremento del espesor de 0,002*H para presas muy altas e importantes. En la parte central del cauce la excavación para la fundación llega hasta la cota 820,0 msnm y el coronamiento a la cota 929,0 msnm, con lo cual H = 109 m. Con ello, se estimó un espesor de losa variable entre 0,55 m en su parte baja hasta 0,30 m en su parte alta.

Esta losa de hormigón se ancla ala roca a través de la construcción del plinto, en que se consideró considera el uso de un plinto externo de longitud constante (4 m) que permita efectuar las inyecciones y un plinto interno de longitud variable en función del gradiente hidráulico

Para estimar la longitud del plinto, a partir de la información de los sondeos, se determinó el índice RMR (Rock Mass Rating), de acuerdo a los criterios de Beniaowski. En base a este índice, se estimó el gradiente hidráulico en torno a la cota de fundación del plinto, resultando valores de longitud de plinto entre 4,0 m y 11,5 m. la figura siguiente muestra el nivel de excavación para fundación del plinto considerada en el proyecto.

Figura N° 5-3: Cota de fundación del plinto



Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las inyecciones de consolidación, se consideró diseñar inyecciones de consolidación con el propósito de consolidar o rellenar la roca basal cercana al plinto. Se dispusieron en dos corridas paralelas de 15 m de profundidad con una separación entre ellas de 3 m y a 1 m de la cortina de impermeabilización.

Respecto de las inyecciones de impermeabilización, se definieron 3 corridas de acuerdo con la siguiente distribución:

- Primarias con una profundidad del 45 m en tramos laterales altos y de 60 m en tramos laterales bajos y cauce del estero
- Secundarias, entre las primarias, o sea a 6 metros de las anteriores, con la mitad de la profundidad definida en el punto anterior.
- Terciarias entre una primaria y una secundaria, o sea a 3 m de las anteriores, con la mitad de la profundidad definida en el punto anterior

5.2. Obra de desvío

Las obras de desvío constan de una atagüa ubicada aguas arriba de 13 m de altura y una longitud estimada de 160m, un canalón de entrada de 37 m de longitud y sección trapezoidal, un túnel de longitud 412 m y sección de medio punto de ancho basal 8,5 m. El portal de entrada se encuentra a la cota 846,08 msnm y el portal de salida a la cota 837,67 msnm.

El caudal de diseño de las obras de desvío es el correspondiente a un periodo de retorno de 20 años con un valor de 324 m³/s.

5.3. Evacuador de crecidas

La obra de evacuación de crecidas del embalse Codegua está concebida como un vertedero lateral de 55 m de longitud, ancho basal inicial de 8 m y final de 15 m. Está diseñado para la crecida decamilenaria con un caudal de 964 m³/s y comprobada para la crecida máxima probable con un caudal de 1.099 m³/s. La carga máxima para la crecida milenaria es de 4,23 m y la carga para la crecida máxima probable es de 4,59 m.

Dicho canal colector se conecta a un canal de transición rectangular de 82,5 m de longitud y ancho basal 5,0 m que culmina en la grada de control de da origen al rápido de descarga.

El rápido de descarga será de sección rectangular, con un ancho basal de 15 m, y una longitud horizontal de 160 m. La pendiente del rápido es de 0,446 finalizando en una obra tipo salto de esquí.

Como ya se mencionó, se utilizará un salto de esquí como estructura de disipación al final del rápido de descarga. La obra se ubicará anclado en roca. La diferencia, en cota, desde la zona de lanzamiento y el nivel del río es de 19,24 m. Esta alternativa de obra de disipación de energía se adopta en base a la experiencia del consultor, considerando las altas velocidades que se obtienen al final del rápido de descarga, alrededor de $V = 35,431$ m/s con $h = 1,814$ m y $F = 8,4$ para $\eta = 0,011$.

5.4. Canal matriz

El diseño de la red matriz de distribución considera su ubicación principalmente por la ribera sur del estero Codegua en una longitud aproximada de 4,16 km, además de un sector de cruce en sifón de 680 m de longitud y un tramo de 2,01 km de canal por la ribera norte del estero. El trazado comienza inmediatamente aguas abajo de la obra de disipación y entrega para riego ubicada al pie del embalse, en la ribera sur del estero, cuya cota mínima de radier se ha establecido en los 835,78 msnm, correspondiente a 0,50 m por sobre la cota de eje hidráulico determinada para la crecida de 10.000 años de período de retorno (835,28 msnm) y verificada para la CMP (835,42 msnm). Desde aquí, el canal matriz avanza en dirección norponiente y aproximadamente en el kilómetro 2,45 del recorrido se emplazará una cámara de carga del sifón y entrega a la ribera sur de caudales, dividiendo los recursos en función de los derechos de aprovechamiento de aguas correspondientes a las asociaciones de canales adscritas a la JVECA, tanto para la ribera norte como para la ribera sur del estero Codegua. Cada uno de estos caudales llegará a una cámara de entrada (emplazadas en el km 2,60), para su distribución a las riberas norte y sur a través de tuberías en presión o canales a cielo abierto.

El caudal de diseño del canal es de 2,11 m³/s y tiene una sección trapecial de 1,30 m de ancho, talud 1:1, pendiente media $i = 0,001$ y altura $H = 1,0$ m

5.5. Mejoramiento de la red de canales existente

Se considera el mejoramiento de la red de canales existentes, a nivel de canales primarios, y no se considera la construcción de nuevos canales.

Las obras consideradas consisten principalmente en el revestimiento de canales y regularización de secciones. Respecto de las obras de arte a mejorar estas consideran principalmente alcantarillas (12), cruces sobre canal (14) y marcos partidores (10).

5.6. Caminos

El anteproyecto de caminos tiene como propósito fundamental estimar el emplazamiento del eje del camino de acceso a la zona de la presa del embalse Codegua y de la zona del borde del lago del mismo embalse.

El camino considerado conta de 2 tramos. El primero denominado de acceso a la zona de la presa, inicia en el sector de La Leonera y se desarrolla por la ladera sur hasta el sitio del muro de la presa, en donde a través de bifurcaciones origina el acceso al coronamiento de la presa y al lado norte del valle. Tiene una longitud de 3,9 km. Desde allí se origina la segunda parte del camino que bordea el área de inundación de la presa, y que tiene una longitud de 5,7 km. Este último camino se empalma con la huella existente aguas arriba del embalse y que conduce hacia el sector del tranque de relaves Barahona.

Se consideró un perfil tipo para el camino conformado por una calzada simple con pistas de 3,0 m de ancho, que incluye bermas de 0,50 m. y SAP de 0,5 m. La inclinación normal de la calzada (bombeo) es de 3,0%, a dos aguas. La pendiente máxima considerada es de 10 %.

5.7. Análisis del impacto hídrico del embalse hacia aguas abajo

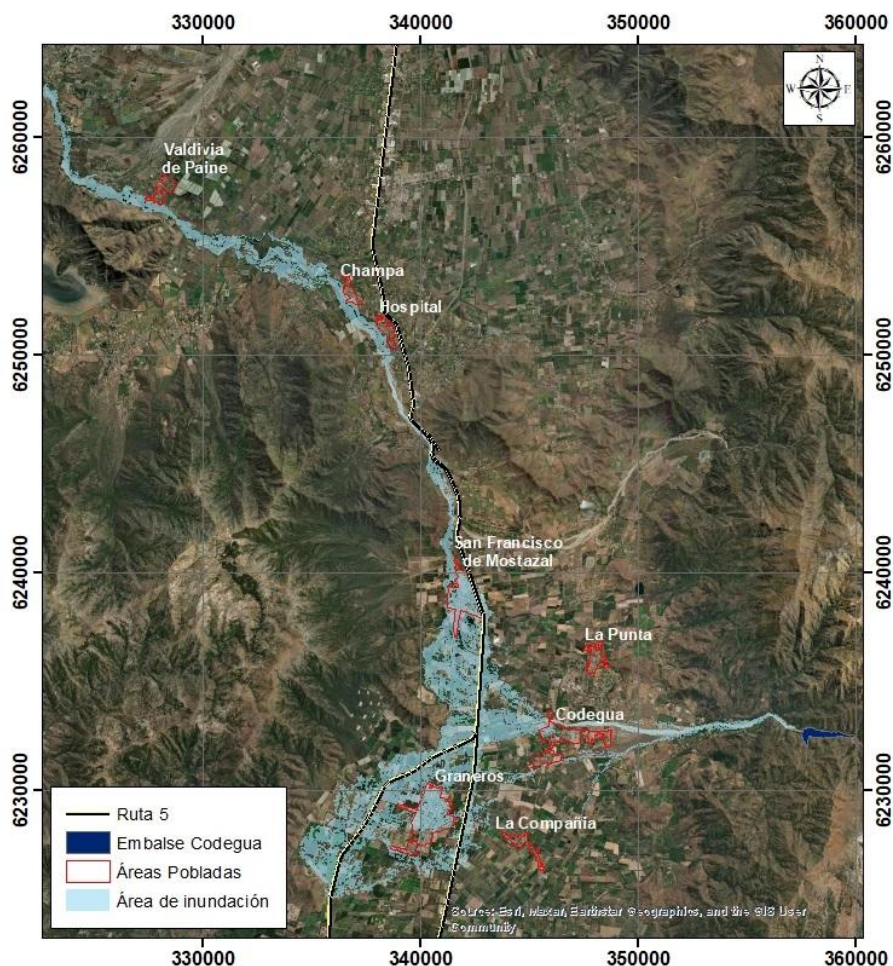
El modelo hidráulico implementado en este proyecto, considera la simulación del tránsito de hidrogramas de crecientes para eventos asociados a varios períodos de retorno mediante el software HEC-RAS 6.5 "River Analysis System", desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers. El programa cuenta con capacidad de simulación de condiciones de flujo bajo los supuestos de régimen permanente y no permanente para flujo unidimensional y bidimensional en redes de drenajes naturales y artificiales; además, presenta opciones de cálculo para la simulación de diferentes estructuras hidráulicas como puentes, alcantarillas de cajón y vertederos, las cuales, eventualmente, podrían ser utilizadas para la evaluación hidráulica de cualquiera de ellas. Las condiciones de simulación fueron:

- Como condición inicial del embalse este se encuentra lleno hasta la cota 921,5 msnm, la cual corresponde al umbral del canal evacuador, es decir, a partir de esta cota comienza a generarse flujo a través de este y por consiguiente el volumen de agua entrante al embalse fluye a través de esta obra.
- El tiempo de simulación se extenderá más allá del tiempo de tránsito del hidrograma, esto debido a que por el tamaño del parrea de interés, el flujo del hidrograma se da posterior a su entrada en el área de interés.

- Debido al tamaño del área de interés y el tiempo de simulación, se construyen varios archivos de HEC-RAS, cada uno con distintos períodos de retorno a simular. Esto se hace en gran medida debido al tamaño de los resultados de cada simulación, lo cual hace que tener todos los resultados en un solo modelo genere un archivo demasiado pesado.
- Se considerarán hidrogramas asociados a los períodos de retorno 25,50,100,200,250,500,1.00,10.000 años y CMP.

De los resultados obtenidos se aprecia que, para todos los períodos de retorno considerados, entre el 50% y el 60% de la infraestructura no se encuentra amenazada por la ocurrencia de eventos de inundación, entre un 4% y 10% se ve afectada por fenómenos de inundación, pero sin generar afectaciones estructurales o la población y entre el 8% y 20% de la infraestructura presenta afectaciones graves que pueden generar colapso de estructuras y pérdida de vidas para cualquier tipo de población. La figura siguiente muestra la ubicación de la obra y el área que se inundaría hacia aguas abajo para la CMP.

Figura N° 5-4: Zona inundada escenario CMP



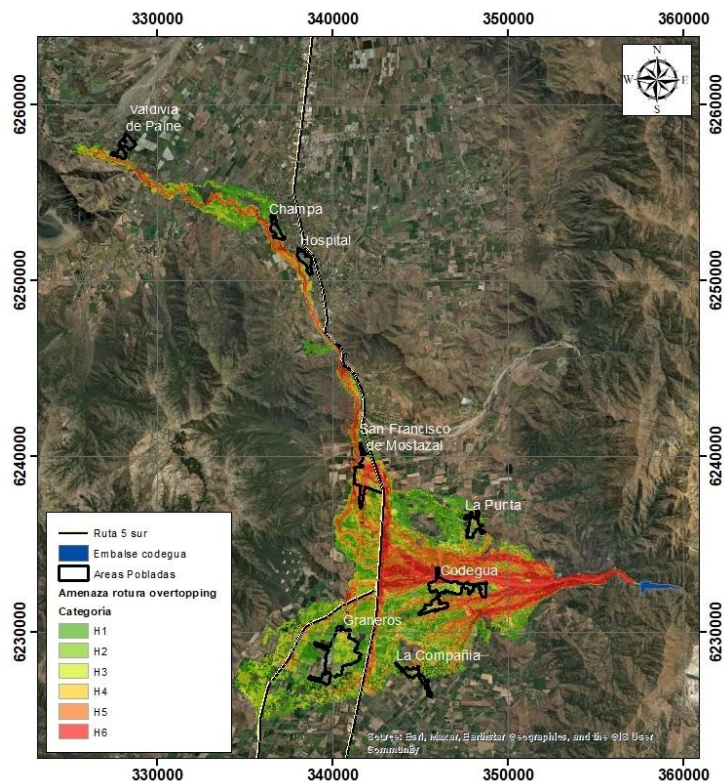
Fuente: Elaboración propia

5.8. Análisis de rotura de presa

El modelo hidráulico implementado en este proyecto, considera la simulación de eventos de rotura de presa por los fenómenos de overtoping y pipping mediante el software HEC-RAS 6.5 “River Analysis System”, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers

Para el caso de falla de una presa por overtoping el proceso de erosión comienza en la base del extremo aguas abajo del muro. En la etapa inicial del proceso, la cresta del muro actúa como un vertedero de pared gruesa, generando una erosión remontante desde aguas abajo hacia el centro del muro, aumentando su ancho en el tiempo. A medida que el proceso de erosión comienza a afectar el cuerpo de la presa, la longitud de la cresta comienza a reducirse y por consiguiente deja de funcionar como un vertedero de pared delgado. Una vez este proceso alcanza totalmente la cresta del muro, una falla masiva se genera aguas arriba y la sección de control hidráulico continuará actuando como un vertedero de pared delgada. Finalmente, el proceso erosivo continua hacia aguas arriba y en el lecho aguas abajo. La figura siguiente muestra el área inundable ante un evento de overtoping.

Figura N° 5-5: Amenaza por inundación para escenario de rotura por overtoping



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de una falla por piping el agua comienza a fluir desde el embalse hacia aguas abajo a una tasa significativa tal, que el proceso erosivo comienza a arrastrar el material de la presa hacia aguas abajo fuera del muro. A medida que este material es erodado, un agujero se forma aumentando la cantidad de agua que fluye y así mismo el material, en este punto el flujo de agua a través de la presa en este momento, funciona como el flujo a través de orificios. A medida que se da este flujo a través de la presa, comienza el proceso de erosión de su cara

aguas abajo lo cual ocasionará que el agujero aumente su tamaño haciendo que parte del material sobre el agujero colapse y sea arrastrado por el flujo.

De los resultados obtenidos se aprecia que, para ambos escenarios de rotura de presa, entre el 35% y el 38% de la infraestructura no se encuentra amenazada por la ocurrencia de falla de la presa, entre un 4% y 6% se ve afectada por el fenómeno, pero sin generar afectaciones estructurales o la población y entre el 23% y 28% de la infraestructura presenta afectaciones graves que pueden generar colapso de estructuras y pérdida de vidas para cualquier tipo de población.

6. COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROYECTO

El presupuesto estimó el costo de las obras, al mes de junio de 2023 con valor UF = \$ 36.085,87. Para el dólar se consideró el valor del dólar observado de los últimos cinco años, a los que se les descontó el 5% de los valores más altos y el 5% de los más bajos, obteniéndose un tipo de cambio de \$ 798,68 por 1 US\$.

La tabla siguiente muestra el costo de las obras del embalse a precios privados y sociales

Tabla N° 6-1: Costo construcción presa CFRD (Mill \$)

Ítem del proyecto	Precios privados Mill \$	%	Precios sociales Mill \$	%
Instalaciones de faenas	742	1%	740	1%
Habilitación de terreno	288	0%	275	0%
Muro de presa	37.845	52%	36.403	52%
Desvío, entrega y desagüe	9.269	13%	8.997	13%
Vertedero	5.296	7%	5.145	7%
Estaciones fluviométricas	442	1%	424	1%
Interferencias	317	0%	317	0%
Caminos	5.544	8%	5.328	8%
Canal matriz	3.479	5%	3.424	5%
Mejoramiento red de riego	3.278	5%	3.206	5%
Plan ambiental	621	1%	602	1%
Subtotal	67.123		64.861	
GG y U (45%)	30.205		29.188	
Expropiaciones	5.729	8%	5.729	8%
Total	103.057		99.778	

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior muestra que, claramente el costo del muro representa un 52% del costo total de la presa y sus obras anexas y que junto a la obra de evacuación, desvío, desagüe y entrega conforman el 72 % del costo total del proyecto. La relación costo social – costo privado es de 0,97.

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

7.1. Evaluación mediante el método del presupuesto

La evaluación del proyecto se centró en establecer la conveniencia para el país de construir el embalse Codegua. Para ello, se llevó a cabo un análisis costo-beneficio, a partir de la información generada en este estudio. Es importante señalar que en la estimación de los indicadores de rentabilidad social del proyecto solo se consideraron los costos y beneficios directos de éste, no obstante, este tipo de proyectos genera otros efectos de difícil estimación económica, los que se incluyeron como intangibles.

En el caso de los beneficios directos, estos fueron estimados de acuerdo al método del presupuesto, que mide la variación en el excedente agrícola producto de una mayor y mejor disponibilidad de agua para riego. Los supuestos de la evaluación económica, tanto privada como social fueron:

- Los beneficios netos corresponden a la diferencia entre los beneficios netos agrícolas de la situación con proyecto, y los beneficios netos agrícolas de la situación sin proyecto (situación actual optimizada).
- En todos los escenarios de evaluación, se consideró un 45% de gastos generales y utilidades sobre el costo directo de las obras, salvo en el caso de las expropiaciones.
- Los costos de operación y mantenimiento del embalse se estimaron con un valor equivalente al 0,5 % del costo del embalse y obras anexas y un 1,5 % en el caso de los canales.
- Tasa de descuento social de 6% y tasa privada de descuento de 12%
- Horizonte de evaluación de 30 años.
- Vida útil de las obras de 50 años, en el caso del embalse y red de canales¹.
- Dado lo anterior, en el último año del horizonte de evaluación del proyecto se incluyó el valor residual de las obras y del terreno. En el caso de las obras, se calculó restando la depreciación acumulada al valor inicial de los activos, dependiendo del año en que se invirtió; mientras que, en el caso de los terrenos, el valor residual es equivalente al valor considerado en la inversión (expropiaciones).
- Las expropiaciones se realizan en el año 0 del horizonte de evaluación.
- Valor del dólar: \$798,68²
- Valor de la UF: \$36.085,87³
- La evaluación se efectuó mediante el mecanismo de financiamiento del DFL 1.123 y mediante el financiamiento de la Ley de Concesiones.

¹ Corresponde al valor de vida útil de diseño definido por la Dirección de Obras Hidráulicas para la valorización de sus activos, para la aplicación de las Normas Internacionales de Contabilidad para el Sector Público (NICSP). En este mismo contexto, la DOH ha definido que la metodología para el cálculo de la depreciación de sus activos será lineal.

² Valor promedio del dólar junio de 2023.

³ Valor de la UF al día 27 de junio de 2023.

Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla N° 7-1: Resultados evaluación económica proyecto embalse Codegua 25 hm³ – DFL 1.123

Superficie regada con 85% seguridad (ha)	A precios privados			A precios sociales		
	VAN (MM\$)	TIR (%)	IVAN	VAN (MM\$)	TIR (%)	IVAN
3.354	-46.036	7,4%	-0,5	33.993	7,9%	0,3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 7-2: Resultados evaluación económica proyecto embalse Codegua 25 hm³ bajo marco Ley de Concesiones

Superficie regada con 85% seguridad de riego (ha)	A precios privados			A precios sociales		
	VAN (MM\$)	TIR (%)	IVAN	VAN (MM\$)	TIR (%)	IVAN
3.354	-52.292	6,3%	-0,6	14.621	6,8%	0,1

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el proyecto es socialmente rentable en ambos escenarios. Si bien en el caso de la evaluación bajo el marco de ley de concesiones, los indicadores de rentabilidad social disminuyen debido, principalmente, a los mayores costos de operación que implica el mecanismo de financiamiento mediante una asociación público-privada, respecto del DFL 1.123, la concesión tiene ventajas en términos de apalancar recursos, aspecto que pudiera ser importante en un escenario de restricción presupuestaria.

En términos de los mecanismos de asignación, el ámbito de las licitaciones surge para reducir el déficit en infraestructuras, y por tanto contar con un mecanismo de financiamiento y se enmarca en la Ley de Concesiones de Obras Públicas⁴, no existiendo un reglamento particular para el caso de obras de riego.

En términos generales, las principales fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de una concesión se refieren a:

a) Fortalezas:

- **Acceso a financiamiento privado:** El mecanismo de concesiones permite el acceso a fondos privados para la construcción del embalse, lo que reduce la carga financiera para el Estado y posiblemente acelera el proceso de construcción.
- **Transferencia de riesgos:** Bajo el esquema de concesiones, parte del riesgo financiero y operativo se transfiere al sector privado, lo que podría mitigar los riesgos financieros asociados con la construcción y operación del embalse.

⁴ Decreto Supremo N° 900 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas, modificada por la Ley N° 20.410 de 2010, y el Reglamento de la misma contenido en el Decreto Supremo N° 956 de 1997 y su última modificación por Decreto 215 de 20 de abril de 2010 del mismo Ministerio.

- **Eficiencia en la gestión:** Las concesiones suelen involucrar a empresas con experiencia en gestión de proyectos y operaciones, lo que podría mejorar la eficiencia en la construcción y operación del embalse.
- **Innovación tecnológica:** Las empresas privadas suelen tener incentivos para utilizar tecnologías innovadoras y eficientes en la construcción y gestión del embalse, lo que podría mejorar su funcionamiento a largo plazo.

b) Oportunidades:

- **Atracción de inversión extranjera:** El modelo de concesiones podría atraer inversión extranjera directa para el proyecto, lo que no solo proporcionaría financiamiento adicional, sino también experiencia y conocimientos internacionales en la construcción de infraestructura hidráulica.
- **Desarrollo de capacidades locales:** La participación de empresas locales como subcontratistas o proveedores en el proyecto de concesión podría impulsar el desarrollo de capacidades locales en la industria de la construcción y gestión de infraestructuras.

c) Debilidades:

- **Posible aumento en costos para los usuarios finales:** Las concesiones suelen implicar la recuperación de la inversión a través de tarifas o peajes, lo que podría resultar en costos más altos para los usuarios finales de agua para riego.
- **Poca flexibilidad técnica:** El Concesionario no puede apartarse de lo que se señala en las BALI y posee nula posibilidad de cambiarlas. Esto es muy perjudicial ante fenómenos, como, por ejemplo, el cambio climático que impacta los recursos disponibles. Esta situación podría atenuarse con un cambio en la regla de operación o la incorporación de nuevas fuentes, situación que no está permitida según las BALI.

d) Amenazas:

- **Riesgo regulatorio:** Cambios en las regulaciones gubernamentales o políticas podrían afectar la rentabilidad o la viabilidad del proyecto de concesión a lo largo del tiempo.
- **Riesgo financiero del sector privado:** La capacidad del sector privado para financiar el proyecto podría verse afectada por factores externos, como cambios en las tasas de interés o condiciones económicas adversas.

En Chile, la ejecución de las obras concesionadas se lleva a cabo de acuerdo con el sistema BOT, cuya sigla en inglés significa “construir, operar y transferir”. Una condición obligatoria para el funcionamiento de este sistema es que los ingresos que se pretenden deben ser mayores a los gastos en que se ha incurrido para la construcción, mantenimiento y operación de estas⁵.

⁵ Cartes, F; Berlmár, C; Contreras, H. Informe final evaluación Programa Obras de Riego Ministerio de Obras Públicas - Dirección de Obras Hidráulicas, 2018.

7.2. Evaluación mediante el método del valor de mercado de las transacciones de derechos de aguas

Este método consiste en estimar el precio del agua a partir de la información obtenida de transacciones reales de derechos de agua consuntivos, permanentes y continuos en dicha fuente. Este método presenta mayor independencia del evaluador que el método del presupuesto, pues se basa en mercados reales, pero requiere un mercado del agua funcionando adecuadamente e información confiable acerca de los precios.

Se recopiló la información existente en el Conservador de Bienes Raíces de Rancagua durante los últimos 5 años (periodo 2017 – 2024) referente a transacciones de compraventa de derechos de aprovechamiento para uso consuntivo de ejercicio permanente y continuo. Según lo reportado, solo se registraron 3 transacciones que pudieron ser validadas, dos de las cuales corresponden a recursos subterráneos, reflejando un mercado del agua poco activo en la zona de influencia del embalse y que solo permite hacer una estimación referencial sin validez estadística. De acuerdo con la información recopilada, se estimó que el valor del agua es de \$10.395.106 l/s considerando todos los valores.

Dado que la demanda bruta para el sector alcanza a 0,63 l/s/ha para el mes de máxima demanda (enero)⁶ y considerando 3.354 ha que pasan a tener una seguridad de riego mayor al 85% a través del proyecto, se obtiene una demanda bruta de 2.113 l/s lo que valorizado a \$10.395.106 l/s origina un valor presente de los beneficios brutos del proyecto de \$ 21.965 millones en moneda de junio 2023.

Considerando que para obtener dicho beneficio social es necesario realizar una inversión social de \$ 98,821 millones, el VAN social del proyecto es de -\$76.856 millones, inferior al valor estimado a través del método del presupuesto (a precios privados el VAN es -\$80.209 millones).

Dada la poca profundidad del mercado del agua en esta zona, este método no se considera adecuado para estimar la conveniencia económica del proyecto.

7.3. Método del valor incremental de la tierra

Esta metodología consiste en medir indirectamente el valor de los beneficios netos del proyecto mediante la diferencia del precio de la tierra con agua (riego) y el precio de la tierra sin agua (secano). Para su aplicación, se requiere considerar el valor de la tierra con agua y ningún otro bien, y la tierra sin ningún bien.

Para las 3.354 ha consideradas que pasan a tener una seguridad de riego de 85 % el valor presente neto del proyecto alcanza a MM \$ 37.411. Considerando que la inversión del proyecto para 25 Hm³ es de MM\$ 98.821 a precios sociales, el VAN social del proyecto es de -MM\$ 61.410. Sin embargo, se debe tener presente que este método es a valor privado y, por lo tanto, considera los beneficios del agua a precios de mercado y descuenta estos flujos a la tasa privada.

⁶ Ver Requerimientos de Agua Superficial Total Área, Estudio Agronómico.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEFINITIVO

8.1. Incertidumbres

Durante el transcurso del estudio de factibilidad se presentaron una serie de dificultades que no fue posible subsanar. Ellas impidieron el acceso a ciertos sectores para recabar toda la información de terreno que se esperaba. Esto ha generado una brecha entre la información disponible proveniente de la etapa de factibilidad y la información deseable para pasar a la etapa de ingeniería de detalle; lo que, a su vez, ha dado lugar a una serie de incertidumbres relacionadas con la caracterización geomecánica de algunos sectores y con la disponibilidad de material para los rellenos de la presa.

Las dificultades, antes indicadas, tienen su origen en las siguientes situaciones:

- Los propietarios de los terrenos no dieron las autorizaciones necesarias que permiten solicitar el permiso de CONAF de corta de árboles; requerida para la construcción de accesos. Esto, porque los propietarios pidieron que la reforestación se realizara en su mismo predio; solicitud que la DOH no puede abordar, pues no puede reforestar en terrenos privados.
- No hay terrenos fiscales susceptibles de ser reforestados en la región de O'Higgins; por cual la DOH debe contar con un convenio con alguna entidad (como Universidades u otros centros fiscales) que le permita la reforestación en otra región. Este, es otro de los requisitos para solicitar el permiso de corta a CONAF; pero, no se cuenta con él.
- La intervención de la comunidad que no está de acuerdo con el proyecto, lo que requiere de un amplio consenso con la Municipalidad y su Unidad de Medio Ambiente para construir la huella de acceso al sitio de las obras.
- La estacionalidad del estero Codegua en cuanto a sus caudales. En invierno y primavera el caudal suele subir, y dado que el cauce posee una fuerte pendiente se hace prácticamente imposible atravesarlo para llevar maquinaria a la otra orilla.
- El acceso al farellón rocoso ubicado en el estribo derecho del muro de presa (lado norte) presenta una gran dificultad debido a su poca inclinación ya que es casi vertical. Por esta razón, es indispensable obtener las autorizaciones pertinentes de acceso y corta de vegetación para ingresar a la parte superior. Sin embargo, dichas autorizaciones no pudieron ser gestionadas en la presente etapa del proyecto.

Los problemas descritos anteriormente generan las siguientes brechas técnicas y la subsecuente incertidumbre a destacar:

- En la zona sur de la presa y en la zona de cantera lado sur existe una capa de suelo denominada Avalancha de Detritos Colón. Durante el estudio, se excavó una calicata de 6 m de profundidad con el propósito de obtener información geotécnica para analizar los taludes de excavación del plinto; sin embargo, se requiere de mayores antecedentes para evaluar estabilidad de todo el depósito en condición saturada.

- Las exploraciones realizadas hasta la fecha indican que el yacimiento del lado sur tiene una disponibilidad de 1,6 veces el volumen de relleno requerido por la presa. La disponibilidad faltante para alcanzar un factor de 2,5 se encuentra en la ribera norte. Si bien la roca se encuentra a la vista y se aprecia de buena calidad, no se cuenta con información geotécnica que permita confirmar esta apreciación; lo cual, genera un grado de incertidumbre respecto a la disponibilidad de material.
- Dentro del marco de un estudio de ingeniería, es prácticamente imposible el acceso a la zona del muro ubicada en ladera norte por lo que no se cuenta con información geotécnica para el túnel. Si bien, el macizo rocoso está a la vista y se aprecia como roca de buena calidad, es conveniente contar con prospecciones que permitan verificar esto y reducir la brecha de información y la incertidumbre que ella genera.
- Si bien los estudios geológicos realizados en ambos estribos del muro permiten un análisis adecuado a nivel de factibilidad, es necesario complementarlos con mayor detalle para reducir las incertidumbres en la caracterización geotécnica y estructural, especialmente en áreas críticas del diseño y durante la etapa de ingeniería de detalle.
- Las brechas técnicas antes indicada, en buena medida se han generado por las dificultades de acceso para realizar prospecciones; ya sea, por la imposibilidad de solicitar permisos o por la oposición de propietarios, comunidad o municipalidad. Por lo tanto, la accesibilidad es en sí misma una incertidumbre que requiere de una estrategia para abordarla, de modo que en la siguiente etapa de ingeniería se puedan ejecutar las prospecciones requeridas.
- Considerando el estudio de la cantera del lado norte de la zona de inundación, se hace necesario efectuar una actualización de los precios unitarios del proyecto en lo referente a explotación de cantera y colocación de este material de rellenos.

8.2. Recomendaciones

En base a lo señalado anteriormente, en la siguiente tabla se identifica la brecha de técnica, la incertidumbre que se genera y la recomendación para mitigar o reducir el riesgo que con lleva.

Tabla N° 8-1: Recomendaciones para cierre de brechas técnicas y reducción de incertidumbre.

Brecha Técnica	Incertidumbre	Recomendaciones
Falta de información geotécnica para caracterizar en su totalidad la capa "Avalancha de Detritos Colón" y realizar un estudio de estabilidad.	Incertidumbre respecto a la estabilidad de los detritos en condición saturada.	• Ejecutar una campaña de prospecciones en la zona que quedará bajo agua, durante la siguiente fase de ingeniería. • Efectuar un estudio de estabilidad, en particular, en condición saturada; durante la siguiente fase de ingeniería.

Brecha Técnica	Incertidumbre	Recomendaciones
Falta de información respecto de la calidad de la roca del yacimiento ubicado en la ribera norte.	Incertidumbre respecto a la disponibilidad de material para la presa. Necesidad de confirmar la buena calidad de la roca del yacimiento norte, para garantizar que el proyecto cuenta con una disponibilidad mayor a 2,5 veces el volumen de rellenos.	Durante la siguiente fase de ingeniería, se sugiere efectuar una campaña de perfiles ReMi o similar que permitan tener una primera visión de la calidad de la roca.
Falta de información geotécnica que permita confirmar la calidad del macizo rocoso por donde se desarrolla el túnel.	Incertidumbre respecto de la calidad del macizo rocoso. Se aprecia una roca de buena calidad, pero es conveniente confirmarlo con prospecciones.	Durante la siguiente fase de ingeniería realizar un sondaje horizontal que se alinee con la ubicación de la caverna. Se estima que este sondaje tendría una longitud de 130 m.
Complementación del estudio geotécnico en ambos estribos del muro de presa	Incertidumbre respecto de la calidad del macizo rocoso. Se aprecia una roca de buena calidad, pero es conveniente confirmarlo con prospecciones.	- Realizar mapeos geológicos de superficie complementarios en ambos estribos para identificar con mayor precisión las características estructurales del terreno, como fracturas, plegamientos o zonas de debilidad que puedan influir en la estabilidad del muro. - Estudio de plegamientos observados en el valle que abarcan la zona de inundación y las canteras de la ribera derecha del valle.
El modelo hidrogeológico del valle requiere actualización con nueva información para reflejar las condiciones actualizadas del acuífero y su interacción con las obras del proyecto (mejoramiento en la red de canales de riego)	Limitada representación de las características actuales del acuífero y su variabilidad, lo que podría afectar la planificación y diseño de las obras complementarias en el valle.	- Actualizar y recalibrar el modelo WEAP-MODFLOW existente con datos provenientes de futuras campañas de monitoreo y ensayos de permeabilidad en el valle. - Incorporar estos ajustes en el diseño definitivo para asegurar la integración de las condiciones hidrogeológicas actuales en las obras proyectadas. - Proponer un sistema de monitoreo continuo para mantener el modelo actualizado durante la construcción y operación del embalse.
Falta de accesos para realizar prospecciones.	Incertidumbre respecto a posibilidad de construir a accesos para ejecutar las prospecciones.	- Realizar una expropiación anticipada de la zona a estudiar para resolver los problemas de permisos y accesibilidad, antes de la siguiente fase de ingeniería. - Las áreas a expropiar deberían incluir paños que pudieran ser reforestados, de modo de poder compensar la tala

Brecha Técnica	Incertidumbre	Recomendaciones
		asociada a los accesos y áreas de trabajo. • Trazar el acceso por el cauce del río en conjunto con la unidad de medio ambiente de la municipalidad. • A través del programa de participación ciudadana, informar y sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de la las prospecciones.
Actualización de los costos generales del proyecto, incluyendo materiales, transporte, y explotación de canteras, conforme a las condiciones actuales que se presenten en el desarrollo del estudio de diseño	Riesgo de desajuste presupuestario por costos subestimados o sobreestimados.	• Revisar y actualizar los precios unitarios de materiales, transporte y mano de obra, considerando datos recientes de mercado. • Completar estudios técnicos y económicos de las canteras en ambas riberas para evaluar calidad, cantidad y costos de explotación. • Incorporar análisis de sensibilidad para prever variaciones en costos y ajustar el presupuesto del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

8.3. Conclusiones

Desde el punto de vista de la evaluación social del proyecto resulta conveniente la construcción del sistema de riego que incluye el embalse y sus obras anexas, y el mejoramiento de la red de riego existente. Con ello se logra dar 85 % de seguridad de riego a 3.354 ha. El tamaño óptimo del embalse para esta superficie es de 25 hm³.

Es importante destacar que se requiere del perfeccionamiento de los derechos de aguas de los regantes pertenecientes a la JVEC, con el fin de poder definir con exactitud los valores en volumen de sus derechos y con ello facilitar el diseño de sus obras, tanto de captación como de entrega. En la ribera norte existe el mayor porcentaje de regantes, pequeños regantes, que requieren de ayuda gubernamental para realizar este perfeccionamiento de derechos, ya sea mediante charlas explicativas del proceso o directamente mediante la facilitación del proceso de perfeccionamiento.