










**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS**

**ACTUALIZACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE  
RECURSOS HÍDRICOS Y DE SEGURIDAD HÍDRICA EN CONTEXTO  
DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL EMBALSE ZAPALLAR, REGIÓN  
DE ÑUBLE, SEGUNDO LLAMADO**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**ENERO 2025**



ESPECIALIDAD	NOMBRE	TÍTULO	FIRMA
<b>JEFE DE PROYECTO</b>	PAOLO ZÚÑIGA C.	INGENIERO CIVIL	
<b>COORDINADOR</b>	HUGO GLORIA V.	INGENIERO CIVIL	
<b>PROFESIONAL SENIOR EN ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS Y SEGURIDAD HÍDRICA</b>	ALFONSO UGARTE S.	INGENIERO CIVIL	
<b>PROFESIONAL EN MODELACIÓN HIDROLÓGICA</b>	PEDRO SANZANA C.	INGENIERO CIVIL	
<b>PROFESIONAL EN SIG/ DATA SCIENCE</b>	HERNÁN SCHEEL F.	INGENIERO CIVIL	
<b>PROFESIONAL EN PLANES DE DIFUSIÓN</b>	OSCAR LAZCANO V.	LICENCIADO EN COMUNICACIÓN SOCIAL	
<b>PROFESIONAL DE APOYO EN CAMBIO CLIMÁTICO</b>	XIMENA VARGAS M.	INGENIERO CIVIL	

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....	2
<b>2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	3
<b>3. ETAPAS DE LA CONSULTORÍA.....</b>	<b>4</b>
<b>4. CONTEXTO GENERAL Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRO-METEOROLÓGICA .....</b>	<b>5</b>
<b>5. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
<b>6. DETERMINACIÓN DE FORZANTES HIDROMETEOROLÓGICAS EN PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO .....</b>	<b>10</b>
6.1. FORZANTES HISTÓRICAS .....	10
6.1.1. Precipitación .....	10
6.1.2. Temperaturas extremas.....	11
6.2. GENERACIÓN DE SERIES DE FORZANTES .....	11
6.3. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	12
6.4. ANÁLISIS DE PROYECCIONES METEOROLÓGICAS .....	12
<b>7. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO .....</b>	<b>15</b>
7.1. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA ESTIMACIÓN DE OFERTA HIDRICA .....	15
7.1.1. Descripción del modelo WEAP.....	15
7.1.2. Calibración en puntos de control fluviométrico .....	16
7.2. CONSTRUCCIÓN ESCENARIOS DE SIMULACIÓN FUTURA .....	19
7.3. GENERACIÓN DE CAUDALES FUTUROS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO .....	19
<b>8. ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA .....</b>	<b>20</b>
8.1. DIAGNÓSTICO REGLA DE OPERACIÓN .....	20
8.2. INSERCIÓN DE CAUDAL DE HOYA INTERMEDIA PARA DERECHOS PERMANENTES.....	22
8.3. SEGURIDAD DE RIEGO CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO .....	24
8.3.1. Área asociada al 85% de seguridad de riego .....	26
8.4. ANÁLISIS DE CRECIDAS EXTREMAS .....	28
8.4.1. Introducción .....	28
8.4.2. Análisis PP máximas anuales .....	28
8.4.3. Análisis línea nieve.....	29
8.4.4. Metodología precipitación escorrentía (hidrograma unitario sintético) .....	29
8.4.5. Análisis crecidas máximas con cambio climático.....	30
<b>9. PLAN DE DIFUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
<b>10. CONCLUSIONES Y VISIÓN CRITICA DEL CONSULTOR .....</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DEL PROYECTO

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La DOH ha realizado los estudios de ingeniería del embalse Zapallar, así como de disponibilidad de recursos hídricos, para satisfacer las demandas de riego, pero se hace necesario contar con la **hidrología actualizada** para la revisión del comportamiento ante el efecto del **cambio climático y evaluar el comportamiento de la regla de operación**.

Los modelos de reglas operacionales, existentes del embalse, consideran principalmente sólo el uso para riego, no así un uso multipropósito, razón por la cual se requiere la actualización de la hidrología considerando además el contexto de clima cambiante para el embalse. Esta actualización definirá la forma en que las aguas acumuladas en el embalse serán distribuidas a todos los beneficiarios, y así cumplir con la satisfacción de la demanda de usos.

En consecuencia, se requieren los **respaldos en materia de recursos hídricos** para avanzar en la materialización del Embalse Zapallar, y permita gestionar eficientemente la disponibilidad hídrica a lo largo del tiempo, con la necesidad de abastecer las demandas agrícolas con una seguridad de riego de 85%, con el óptimo aprovechamiento del agua.

En atención a la necesidad antes expuesta, mediante **Resolución N° 171** del 15 de mayo de 2024, la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP adjudicó a TYP SA S.A. Agencia en Chile la Consultoría denominada “Actualización y Estimación de Disponibilidad de Recursos Hídricos y de Seguridad Hídrica en Contexto de Cambio Climático para el Embalse Zapallar, región de Ñuble, Segundo Llamado”.

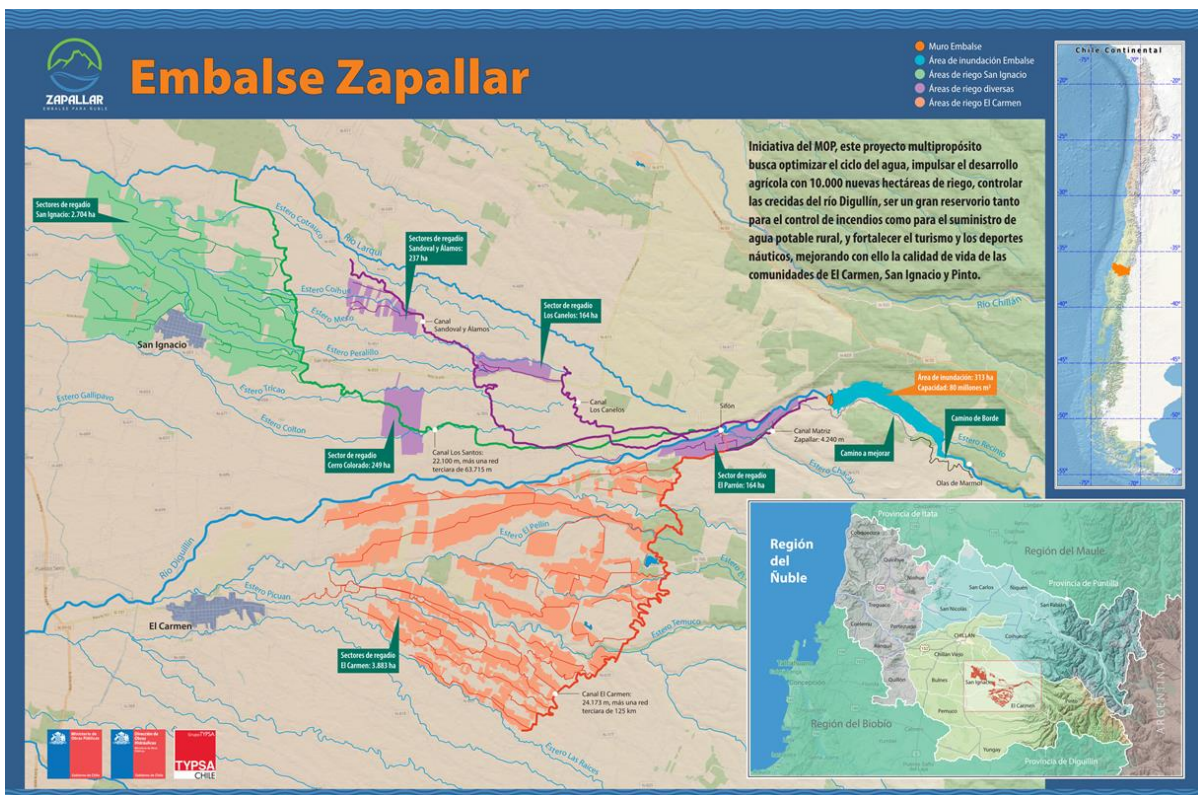
Junto con los aspectos técnicos, el **ámbito comunicacional y de difusión de la información** es fundamental para el éxito del proyecto, por lo que se llevó a cabo un **Plan de Difusión** de manera de garantizar una conexión eficiente entre los resultados que emanados del estudio de hidrología con la estrategia de comunicación y avance del proyecto.

## 1.2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El Embalse Zapallar tiene una capacidad de 80 (Hm<sup>3</sup>) para almacenamiento de derechos eventuales, que permitirá desarrollar una actividad agrícola en un área potencial de hasta 10.000 (ha) nuevas, con una seguridad de riego de 85%, y que entregará aguas para otros usos. El proyecto se ubica en las comunas del Carmen y Pinto, Provincia de Diguillín, Región del Ñuble.

La siguiente imagen muestra un mapa general del proyecto, incluyendo: i) la ubicación del embalse; ii) los canales matrices y secundarios; iii) sectores de beneficio de riego; iv) principales localidades.

Figura 1-1: Mapa General del Proyecto



## 2. OBJETIVOS Y ALCANCES

### 2.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

Los objetivos generales y específicos del estudio se indican a continuación.

#### **El Objetivo General**

El propósito central del estudio es la Actualización y estimación de disponibilidad de recursos hídricos y de seguridad hídrica en contexto de clima cambiante para el embalse Zapallar emplazado en la Región de Ñuble.

#### **Los Objetivos Específicos**

Los alcances específicos del estudio son:

- Seleccionar modelos de cambio climático global (GCM) y proyectar las variables meteorológicas en las cuencas de interés.
- Implementación de un modelo hidrológico para simular la escorrentía en el período histórico y futuro en los puntos requeridos para el análisis.
- Analizar la seguridad hídrica del embalse Zapallar bajo condiciones de cambio climático.
- Implementar un Plan de Difusión de los avances y resultados del Estudio.

### 3. ETAPAS DE LA CONSULTORÍA

El plazo total de la consultoría es de 180 días corridos y se divide en 3 Etapas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3-1 , cuyas actividades son las siguientes:

**Tabla 3-1: Etapas Y Actividades Del Estudio**

ETAPA	Actividad	Plazo Máximo Total (días)
<b>ETAPA 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES</b>		<b>35</b>
<b>1.1</b>	<b>Revisión y análisis de antecedentes</b>	
<b>ETAPA 2: MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA</b>		<b>110</b>
<b>2.1</b>	<b>Determinación de forzantes hidrometeorológicas en períodos histórico y futuro</b>	
2.1.1	Validación de información de CR2Met	
2.1.2	Selección de CGS representativos	
2.1.3	Forzantes proyectadas a nivel medio mensual	
2.1.4	Forzantes proyectadas a nivel medio diario	
<b>2.2</b>	<b>Construcción modelo hidrológico en período histórico y futuro</b>	
2.2.1	Construcción modelo hidrológico WEAP	
2.2.2	Calibración modelo hidrológico en periodo histórico	
2.2.3	Construcción escenarios de simulación futura	
2.2.4	Generación de caudales futuros bajo cambio climático	
<b>2.3</b>	<b>Análisis de seguridad hídrica</b>	
2.3.1	Aplicación hidrología actualizada sobre Regla de Operación	
2.3.2	Diagnóstico regla de operación	
2.3.3	Análisis de crecidas extremas	
<b>ETAPA 3: BORRADOR DE INFORME FINAL Y RESUMEN EJECUTIVO</b>		<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Borrador de informe final y resumen ejecutivo</b>	
<b>PLAZO TOTAL CONSULTORÍA</b>		<b>180</b>

Fuente: Elaboración propia en base a Términos de Referencia

En forma transversal al desarrollo del estudio, se implementó el Plan de Difusión del avance y resultados del estudio.

## 4. CONTEXTO GENERAL Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRO-METEOROLÓGICA

En la Figura 4-1 se muestra la relación del proyecto Embalse Zapallar con el sistema Laja-Diguillín. En reunión con DOH-DR y DOH-Región Ñuble se recopiló información de gran relevancia para el desarrollo del proyecto.

El convenio para regular la operación del Lago Laja, firmado en 1958 y modificado en 1962, no sufrió cambios hasta 2017. En los años 90, se construyó el canal Laja Diguillín en el río Laja, que inicialmente captaba agua y la descargaba al río Huepil. A 5 km aguas abajo, se captaba nuevamente para descargar al río Diguillín y luego, 200 m aguas abajo, se captaba otra vez para descargar al estero Coltón. El tramo hacia el río Larqui no fue construido por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

El canal Laja Diguillín se proyectó para regar 44.630 ha, de las cuales 20.340 ha corresponden a derechos de aprovechamiento de agua del río Diguillín, gestionados por la Junta de Vigilancia del Río Diguillín, que riegan la comuna de Bulnes. Otras 9.000 ha en la comuna del Carmen son regadas por los alimentadores del canal Laja Diguillín entre los ríos Huepil y Diguillín. Las 15.290 ha restantes corresponden a áreas adicionales (6.000 ha) y tierras sin derechos de agua (9.000 ha). La tasa de riego segura del Lago Laja es de 12.450 m<sup>3</sup>/temporada/año.

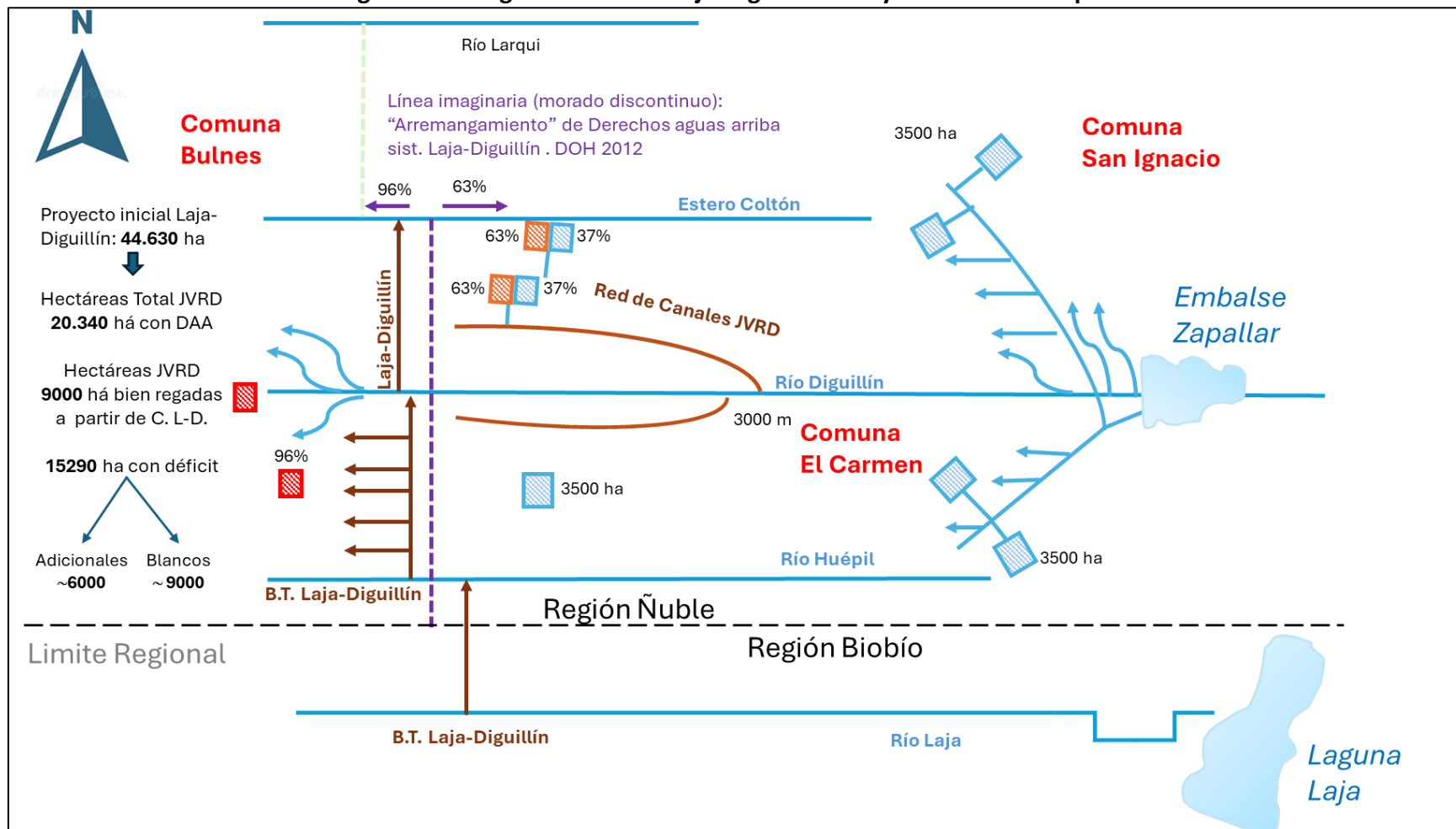
En 2012, DOH desarrolló un convenio con la Junta de Vigilancia del Río Diguillín. El canal Laja Diguillín se consideró como un límite físico: aguas abajo, el canal regaría el 96% de la superficie con agua del Lago Laja; aguas arriba, el río Diguillín abastecería el 63%, y el embalse Zapallar completaría el 37% restante. La tasa de riego es de 12.450 m<sup>3</sup>/temporada/año para el 63% y de 10.000 m<sup>3</sup>/temporada/año para el 37%.

El embalse Zapallar regará 10.000 ha adicionales, divididas en 3.500 ha en El Carmen, 3.500 ha en San Ignacio, y 3.000 ha de tierras sin derechos (37%). Actualmente, solo se han identificado los roles de las superficies a regar, sin delimitación geoespacial precisa de las hectáreas sin derechos (37%).

En la Figura 4-2 se muestra un diagrama unifilar hidrográfico de los principales ríos y esteros afluentes a la zona de estudio y las principales estaciones de control fluviométrico.

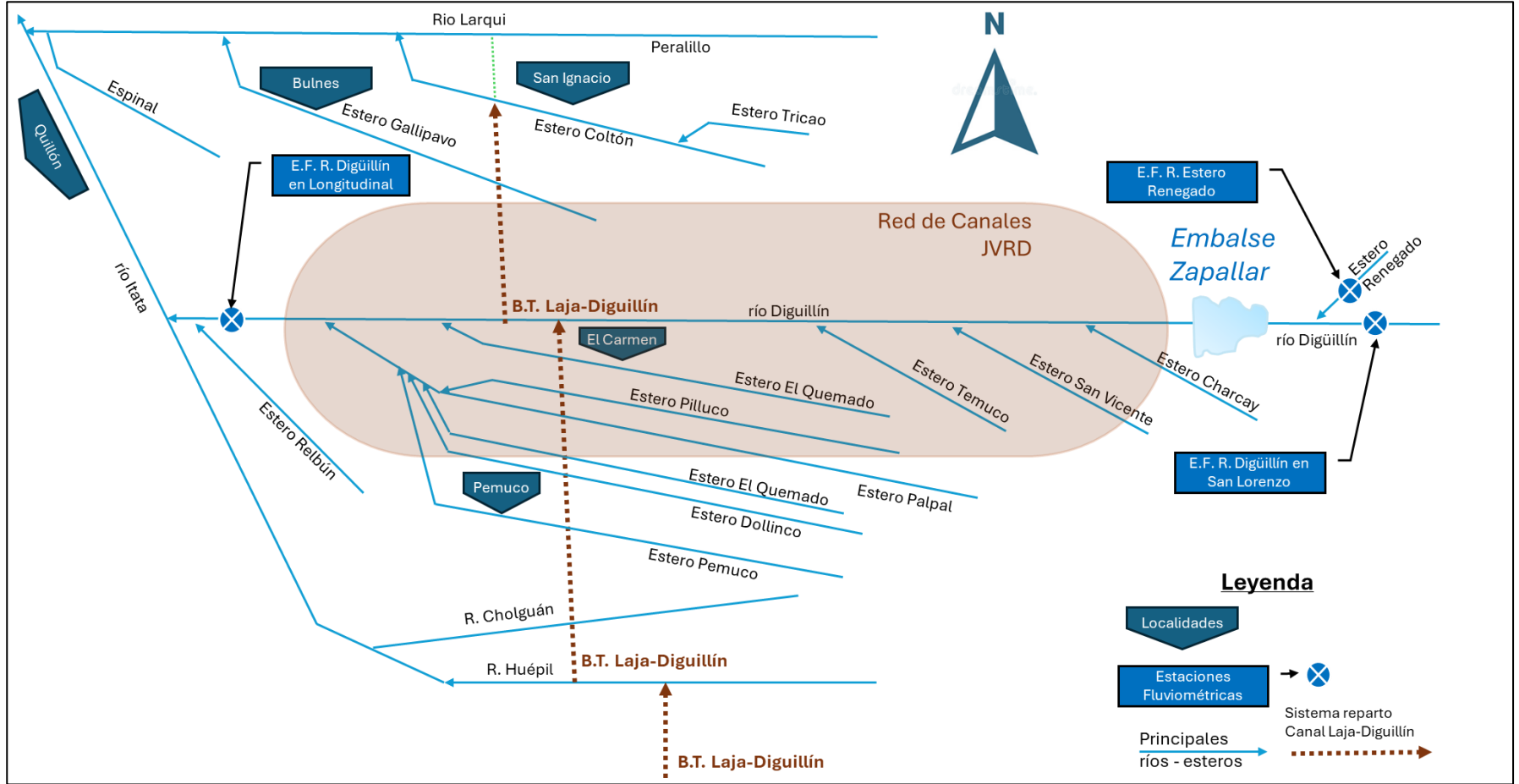
En la Figura 4-3 se muestra la ubicación de estaciones con información hidro-meteorológica de interés para la zona de estudio. La información de caudal aparece con su respectivo código BNA en azul, mientras que la información de estaciones pluviométricas y de temperatura aparecen en rojo.

**Figura 4-1: Diagrama Sistema Laja-Diguillín Y Proyecto Embalse Zapallar**



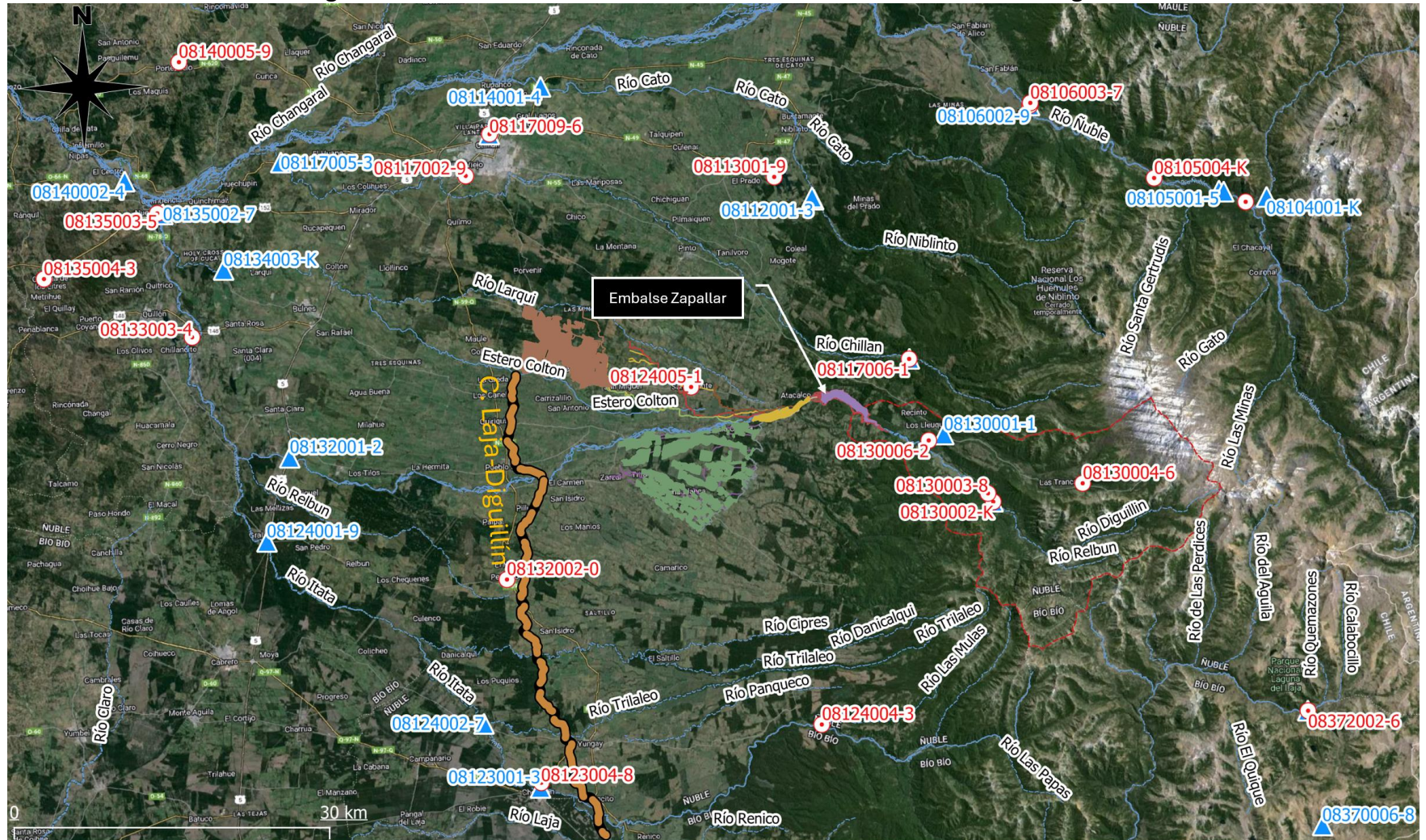
Fuente: Elaboración propia a partir de información recopilada con DOH-DR. \*Se presentan valores aproximados de hectáreas.

**Figura 4-2: Diagrama Unifilar Hidrográfico De Principales Ríos Y Esteros Afluentes A La Zona De Estudio**



Fuente: Elaboración propia a partir de información recopilada con DOH-DR

**Figura 4-3: Área De Estudio Y Ubicación De Estaciones Hidro-Meteorológicas**



Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA

## 5. REVISIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES

El presente capítulo corresponde a la recopilación y análisis crítico de antecedentes que consideró los estudios indicados en la Tabla 5-1, que de acuerdo a los Términos de Referencia corresponden a los estudios mínimos a revisar para el presente estudio, sin embargo, se complementó con información relativa a otros estudios y acuerdos vigentes de interés para la zona de estudio, presentados en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-1: Estudios Considerados En La Revisión De Antecedentes**

#	Institución/ Empresa	Estudio
1	R&Q Ingeniería	Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final (2017).
2	MN Ingenieros	Estudios Actualización y Complementación Diseño Embalse Zapallar, Región del Bío-Bío – Informe Final (2018).
3	Gestión Ambiental Estratégica Consultores	Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Embalse Zapallar (2020).
4	R&Q Ingeniería	Planillas de Resultados Modelo WEAP. “Modelación y Evaluación Agroeconómica del Embalse Zapallar, VII Región del Bío-Bío – Informe Final (2017).
5	Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	Determinación de Regla Operacional para el Embalse Zapallar Región de Ñuble (2021).

Fuente: Recopilación Informes TYP SA 2024

**Tabla 5-2: Estudios Adicionales Considerados En La Revisión De Antecedentes**

#	Institución/ Empresa	Estudio
1	Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	Homologación del Cálculo Hidrológico Para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile. SIT N°524 (2022).
2	Universidad de Católica de la Santísima Concepción/CIBAS/Universidad de Concepción	Presentación Software Para la Gestión del Sistema Río-Lago Laja Para la Seguridad Hídrica Bajo La Actual y Futura Crisis Climática (2023)
3	DGA-UC-UCSC	Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Biobío (2021)

#	Institución/ Empresa	Estudio
4	DOH-Enel	Acuerdo de Operación Y Recuperación del Lago Laja Complementa Convenio De 1958
5	SEA	Criterio de Evaluación en el SEIA: Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico
6	SEA	Guía Metodológica Para la Consideración del Cambio Climático en el SEIA

Fuente: Recopilación Informes TYP SA 2024

## 6. DETERMINACIÓN DE FORZANTES HIDROMETEOROLÓGICAS EN PERIODOS HISTÓRICO Y FUTURO

### 6.1. FORZANTES HISTÓRICAS

El producto CR2MET versión 2.5 (Boisier et al, 2018), desarrollado mediante un escalamiento estadístico del reanálisis ERA5, provee datos diarios de precipitación y temperaturas máximas y mínimas desde 1960 hasta 2023, con una resolución espacial de 0,05° x 0,05° y temporal diaria. Sus datos entregan información para todo Chile, lo que permite tener información en zonas con escasez de datos, como por ejemplo las cuencas hidrográficas de cabecera, fuentes del agua que serán reguladas por el embalse, entre otras. Estos datos se validan utilizando estaciones meteorológicas, al comparar valores observados con los estimados por CR2MET.

#### 6.1.1. PRECIPITACIÓN

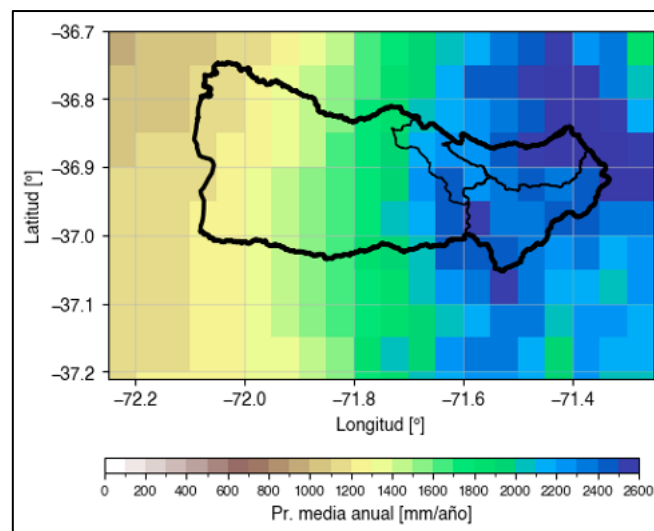
##### 6.1.1.1. VALIDACIÓN MENSUAL

La validación a nivel mensual de la precipitación estimada por CR2MET reproduce adecuadamente la precipitación tanto en las zonas bajas, como en sectores de mayor altitud. El proceso de validación se realizó mediante la comparación con registros mensuales de 12 estaciones meteorológicas de la zona, ubicadas tanto al interior como exterior de la cuenca, en función de lo cual se planteó una función de corrección, la que fue descartada debido a inconsistencias del balance hídrico de las cuencas de cabecera. Al evaluar el balance hídrico en las cuencas de cabecera con los datos CR2MET sin corrección, se obtienen valores que cumplen el balance hídrico, lo que valida que la información de CR2MET es correcta para los sectores de mayor elevación y que puede ser usada sin requerir de ninguna modificación. En la Figura 6-1 se presenta el campo de valores medios.

### 6.1.1.2. VALIDACIÓN DE EXTREMOS DIARIOS

La validación del producto CR2MET para eventos de precipitaciones máximas en periodos de 1, 2 y 3 días se realizó comparando datos de las estaciones Diguillín, Fundo Atacalco y Las Trancas durante el periodo 1985-2023. Se observó una variabilidad entre las estimaciones de CR2MET y las observaciones, con un sesgo sistemático que disminuye al aumentar el periodo de agregación. Para reducir este error, se aplicaron factores de corrección: 1,15 para 1 día, 1,10 para 2 días, y 1,05 para 3 días.

**Figura 6-1: Precipitaciones Medias Anuales Estimadas Por CR2MET Para El Periodo 1985-2023 En La Zona De Estudio**



Fuente: Elaboración Propia

### 6.1.2. TEMPERATURAS EXTREMAS

Para validar los datos CR2MET de temperaturas extremas, se usó datos de estaciones meteorológicas de la DGA, DMC e INIA: 12 para temperatura máxima y 5 para temperatura mínima. Los sesgos de la temperatura máxima media mensual muestran sobreestimación en verano y subestimación en invierno, mientras que en la temperatura mínima, los sesgos también varían por mes, pero con mayor dispersión en verano y estimaciones más homogéneas en invierno. Estos sesgos se remueven mediante correcciones mensuales calculadas en función de las diferencias entre estimación de CR2MET y el valor observado, en función de elevación. Estas correcciones son aplicadas a la información de CR2MET para cada celda según su elevación.

### 6.2. GENERACIÓN DE SERIES DE FORZANTES

La información de CR2MET se ajustó a diferentes unidades espaciales irregulares, como cuencas hidrográficas, URH y bandas de elevación, mediante procesos geoespaciales. Se ponderaron los datos de cada celda según la fracción del área involucrada en la unidad de interés. Las forzantes se calcularon para estos tres conjuntos de unidades.

### 6.3. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los modelos de circulación general (GCM), esenciales para estudios de cambio climático, proyectan variables bajo distintos escenarios del IPCC. Se seleccionaron, mediante una revisión bibliográfica, los GCM que mejor representan las condiciones históricas mediante el Past Performance Index (PPI), eligiendo los modelos MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM. En este estudio se utilizaron los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, que abarcan desde un escenario intermedio con mitigación moderada (SSP2-4.5), uno con crecimiento desigual y baja cooperación internacional (SSP3-7.0), hasta un futuro con alta dependencia de combustibles fósiles y aumento extremo de temperaturas (SSP5-8.5).

La información de los GCM, que presenta resolución espacial insuficiente y sesgos en las observaciones, se ajusta con el método Multivariate Bias Correction (MBCn) para corregir las series de precipitación y temperatura diarias, manteniendo la relación entre variables como la precipitación y las temperaturas extremas, esencial para definir el área aportante pluvial y la acumulación de nieve. Aunque el MBCn reproduce bien la variación estacional y las correlaciones entre variables, subestima las precipitaciones extremas, por lo que se utiliza el método Quantile Delta Mapping (QDM) para ajustar la distribución de los datos proyectados y corregir las discrepancias en los valores extremos, mejorando así la representación de eventos extremos.

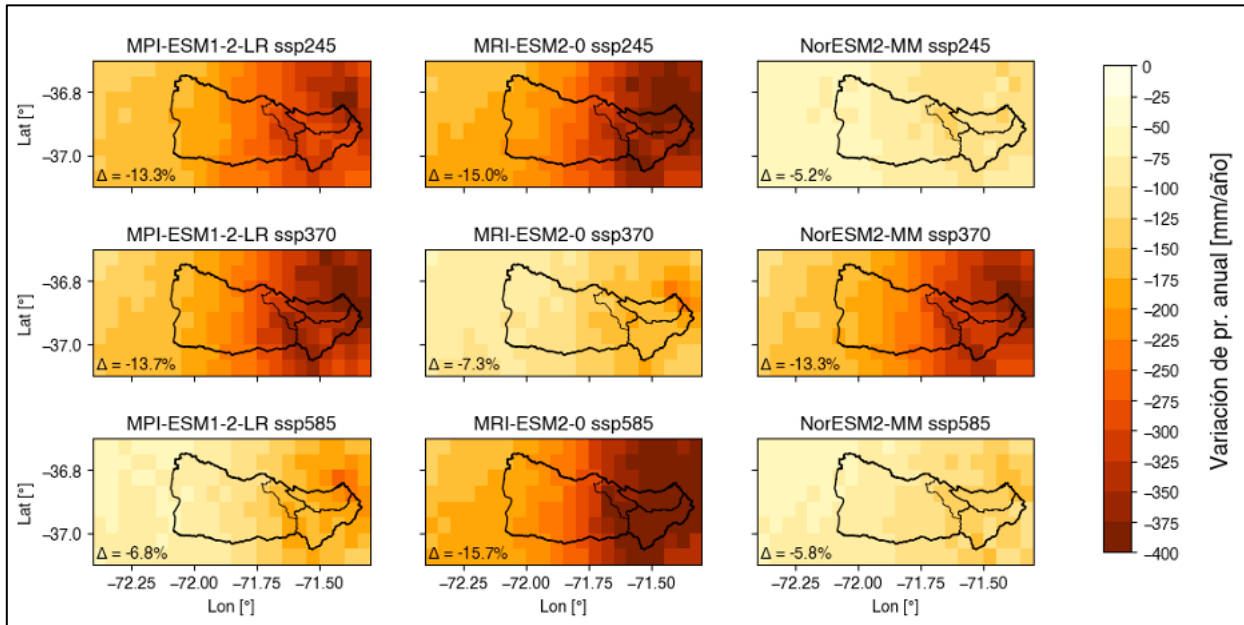
### 6.4. ANÁLISIS DE PROYECCIONES METEOROLÓGICAS

El período de evaluación 2030-2060 se establece para analizar los beneficios del embalse en la agricultura y medir sus efectos a largo plazo, considerando el tiempo de entrada en funcionamiento y los plazos de evaluación económica.

Las proyecciones de precipitación para el período 2030-2060 en la cuenca Cordillera indican una disminución general en comparación con 1985-2014, con reducciones que varían entre 100 y 400 mm, con una mayor disminución proyectada en los sectores cordilleranos. Sin embargo, no se observa una tendencia clara entre los diferentes escenarios proyectados, debido a la alta incertidumbre inherente y a las similitudes en los escenarios de proyección durante el periodo de evaluación. La distribución de los cambios espaciales proyectados se muestra en la Figura 6-2.

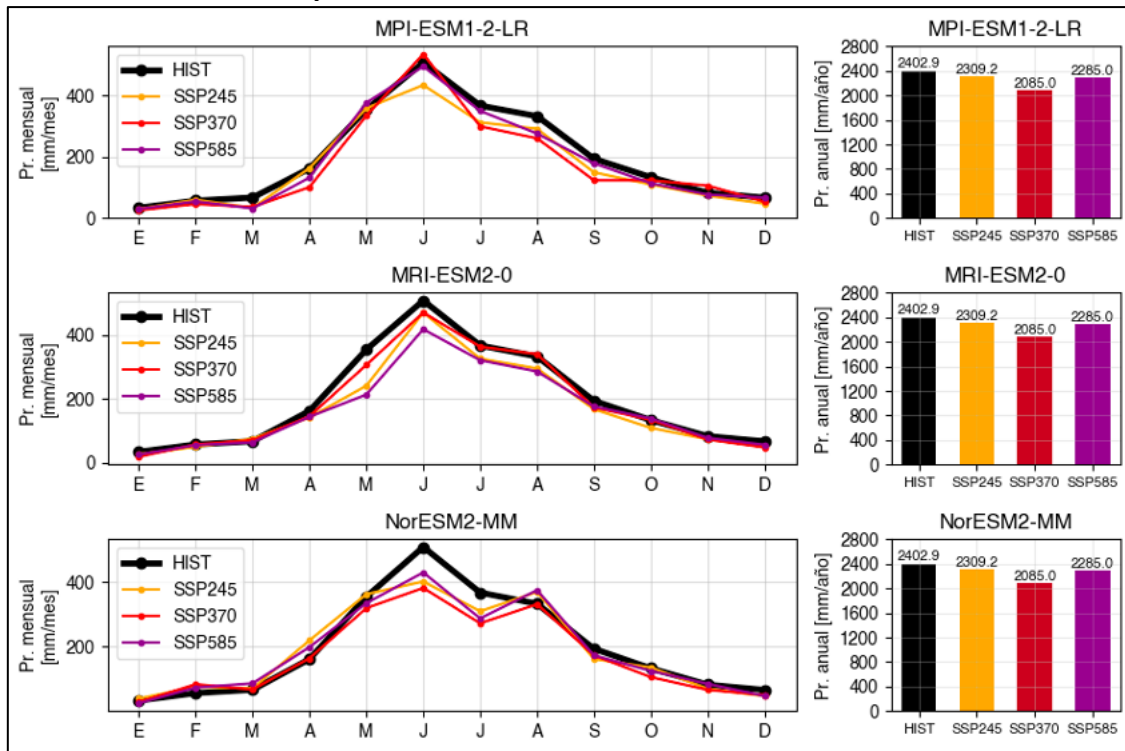
En cuanto a la variabilidad interanual, el modelo MPI-ESM1-2-LR muestra una disminución uniforme, mientras que el MRI-ESM2-0 prevé reducciones más pronunciadas en los años húmedos. A nivel estacional, se observan diferencias significativas entre modelos, con el MPI-ESM1-2-LR y el MRI-ESM2-0 proyectando disminuciones en los meses de mayor precipitación. En contraste, el modelo NorESM2-MM sugiere cambios drásticos en la forma de la curva de variación estacional, con reducciones notables en junio y julio. Los detalles de los cambios estacionales se muestran en la Figura 6-3.

**Figura 6-2: Variación De Los Campos De Precipitación Medios Del Periodo 2031-2060 Con Respecto Al Periodo 1985-2014**



Fuente: Elaboración Propia

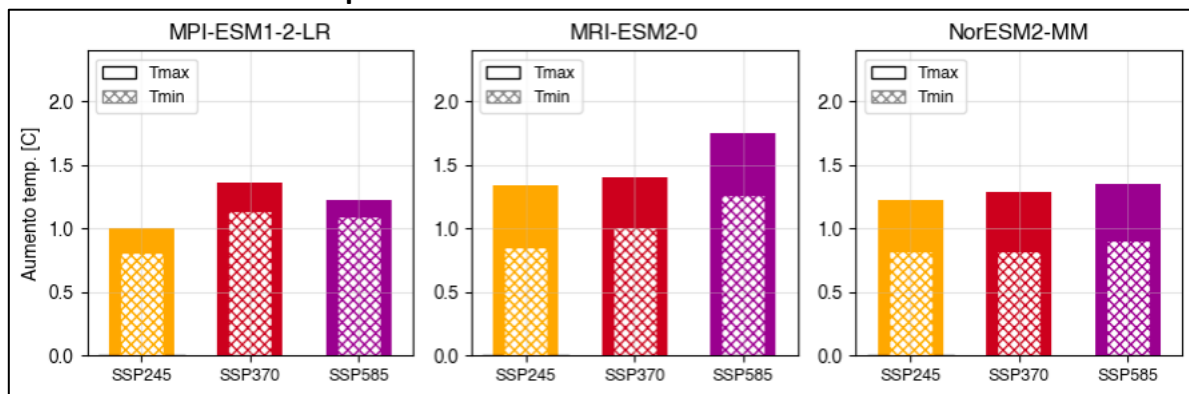
**Figura 6-3: Proyecciones De Variación De La Estacionalidad Y De Los Valores Medios Anuales De Precipitación En El Sector Cordillerano De La Cuenca**



Fuente: Elaboración Propia

Las proyecciones de temperatura máxima y mínima en la cuenca analizada muestran comportamientos distintos según el GCM. El detalle de los aumentos medios en la cuenca de ambas según GCM y escenario se muestra en la Figura 6-4. Las proyecciones de temperatura máxima en la cuenca analizada muestran variaciones significativas según el GCM y el escenario, destacando el modelo MRI-ESM2-0 bajo el escenario SSP5-8.5, que indica el mayor incremento. Aunque el MPI-ESM1-2-LR no sigue esta tendencia, sus proyecciones reflejan aumentos más pronunciados en las zonas cordilleranas, alcanzando hasta 2 °C en áreas elevadas, lo que subraya la incertidumbre inherente a estas proyecciones.

**Figura 6-4: Variaciones Proyectadas De Las Temperatura Máxima Y Mínima Media Anual Respecto Al Periodo De Referencia 1985-2014**



Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la temperatura mínima, los aumentos proyectados son menores, promediando 0,4 °C, con los modelos MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM siguiendo tendencias similares a las máximas, mientras que el MPI-ESM1-2-LR muestra disminuciones en meses específicos. Generalmente, el aumento es inferior a 1 °C, con un patrón de incremento de oeste a este, y los meses de verano presentan aumentos significativos, mientras que las temperaturas invernales se mantienen estables, excepto en el escenario SSP5-8.5.

En relación con las proyecciones obtenidas para los valores de precipitación extremas asociados a igual probabilidad de excedencia, los resultados del escalamiento muestran un aumento general en la magnitud de los eventos extremos de precipitación de 1 día, con el modelo MPI-ESM1-2-LR proyectando los incrementos más altos. Para los eventos de 2 días, el modelo MRI-ESM2-0 y el NorESM2-MM indican disminuciones, mientras que solo el MPI-ESM1-2-LR presenta aumentos bajo el escenario SSP5-8.5. En los eventos de 3 días, las proyecciones son similares a las de 2 días, destacando nuevamente las disminuciones en la mayoría de los casos, salvo en los eventos más intensos, donde algunos modelos proyectan aumentos significativos.

## 7. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO EN PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO

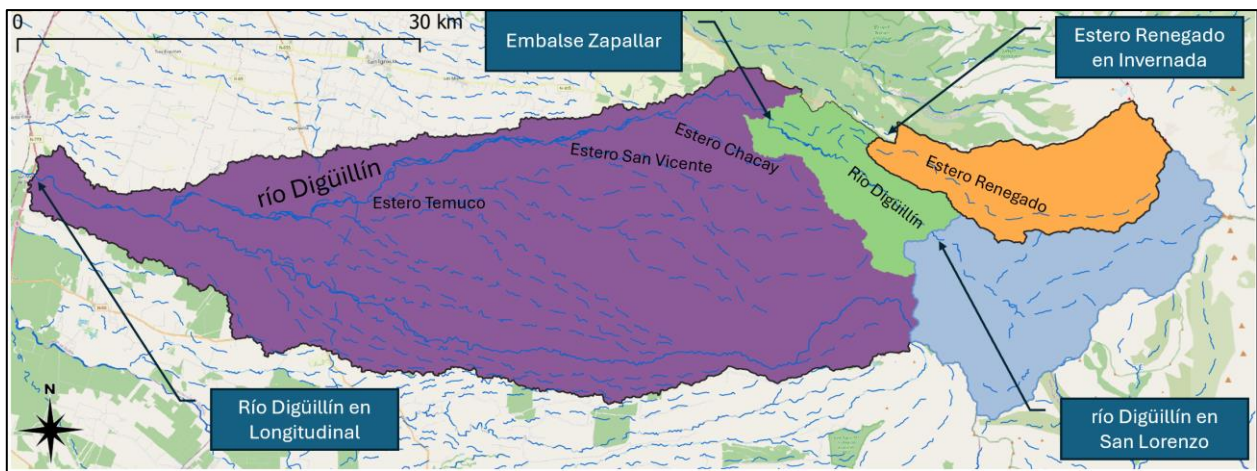
### 7.1. CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA ESTIMACIÓN DE OFERTA HIDRICA

El modelo hidrológico descrito en el presente ítem corresponde al modelo de simulación encargado de estimar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Diguillín.

En el área de estudio se pueden describir tres sub-cuencas principales que quedan definidas por los siguientes puntos:

- Estación Fluviométrica Estero Renegado en Invernada
- Estación Fluviométrica Río Diguillín en San Lorenzo
- Ubicación de Embalse Zapallar

**Figura 7-1: Principales Cuencas De Interés En La Zona De Estudio Y Sus Respectivos Cauces Principales**



Fuente: Elaboración Propia

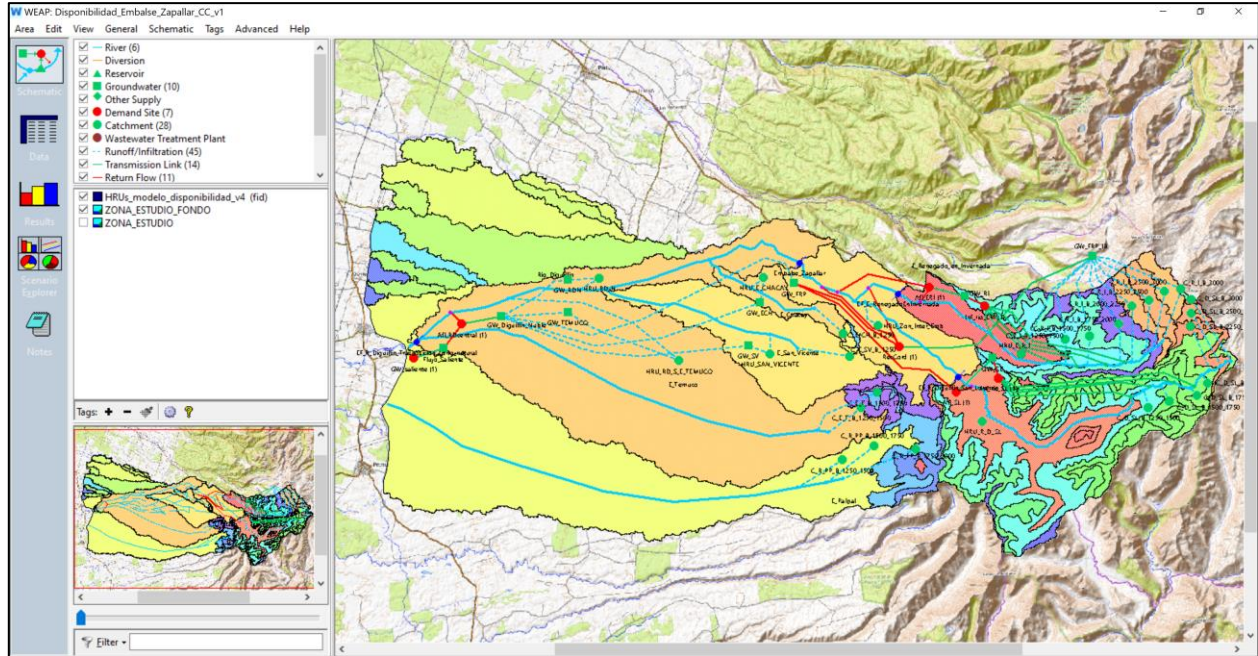
Además, aguas abajo se ubica la estación río Diguillín en Longitudinal que controla el cierre de la cuenca. Dicha cuenca se encuentra en régimen no natural por lo que se recopilieron las extracciones históricas realizadas por la Junta de Vigilancia de río Diguillín y sus afluentes. En el Anexo 4 “Registros de Extracciones Históricas JVRD” del Informe Final se adjuntan los registros históricos recopilados en la presente consultoría.

#### 7.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO WEAP

El modelo hidrológico WEAP (*Water Evaluation And Planning system*) fue desarrollado por el SEI (*Stockholm Environment Institute*) en 1989 y ha sido aplicado con bastante popularidad y buenos resultados, tanto en estudios de disponibilidad como de planificación del recurso hídrico. Este modelo posee una interfaz amigable y provee un enfoque integral, que permite su aplicación con diferentes objetivos

En la Figura 7-2 se muestra la vista esquemática del modelo implementado. En el Anexo 5 “Modelo WEAP Cambio Climático” del Informe Final se adjunta el modelo en copia digital.

**Figura 7-2: Vista Esquemática De Modelo De Simulación WEAP**

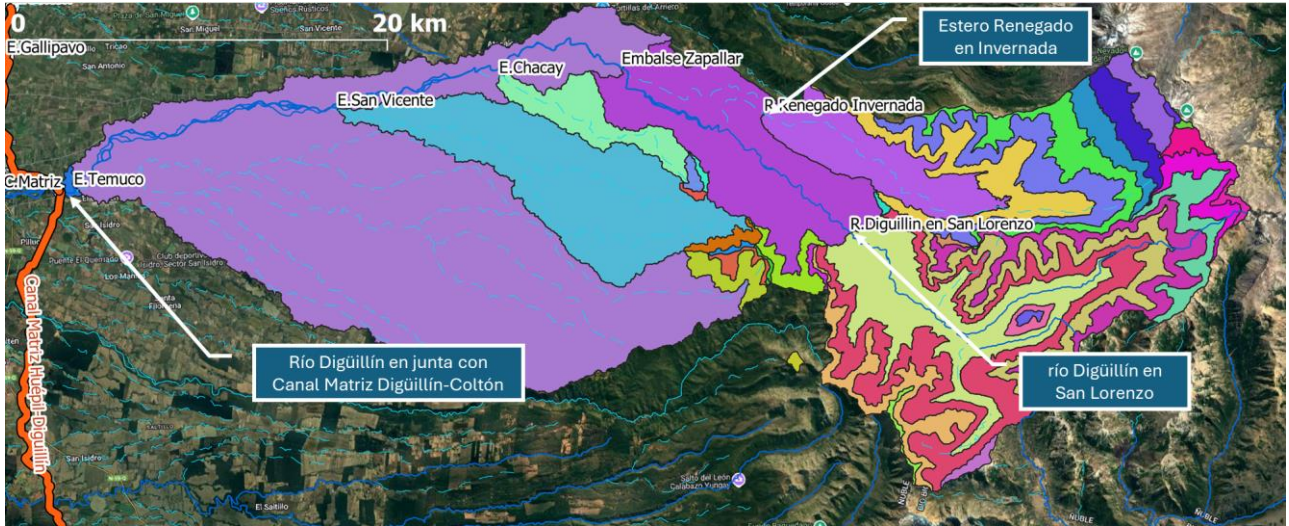


Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.2. CALIBRACIÓN EN PUNTOS DE CONTROL FLUVIOMÉTRICO

Para el proceso de calibración a nivel superficial, se consideró la información de las estaciones fluviométricas río Diguillín en San Lorenzo, río Diguillín en Longitudinal y río Renegado en Invernada. Los puntos considerados para el proceso de calibración se muestran en la Figura 7-3. En la Tabla 7-1 se muestran las coordenadas de los puntos de calibración: 2 estaciones fluviométricas DGA (Estero Renegado en Invernada y Diguillín en San Lorenzo) y 1 punto con estadística naturalizada reconstruida a partir de Estación Diguillín en Longitudinal.

**Figura 7-3: Puntos De Control Y Verificación Para Calibración**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 7-1: Coordenadas De Puntos De Calibración Y Validación De Modelo Oferta Natural Para Proyecto Embalse Zapallar**

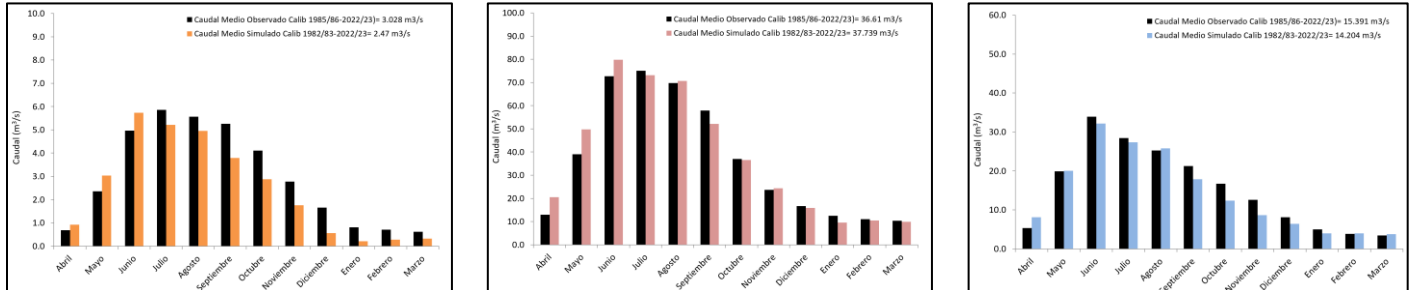
Estación	UTM Este WGS84-18S	UTM Norte WGS84-18S
Estación DGA Estero Renegado en Invernada	800820	5914604
Estación DGA Río Diguillín en San Lorenzo	805071	5907859
Punto pseudo-natural, a partir de Estación DGA río Diguillín en Longitudinal ( $0.66 * Q_{\text{pseudo-natural Diguillín En Longitudinal}}$ )	762462	5912878

Fuente: Elaboración Propia

#### 7.1.2.1. RESULTADOS DE INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE EN CAUDALES SUPERFICIALES

En la Figura 7-4 se muestra la curva de variación estacional de la estación Estero Renegado en Invernada, estación río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín-Coltón y estación río Diguillín en San Lorenzo.

**Figura 7-4: Caudal Medio Observado Calibrado En Estación Estero Renegado En Invernada, En Estación Río Diguillín En Junta Con Canal Matriz Diguillín-Coltón y En Estación Río Diguillín En San Lorenzo**



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 7-2 se muestran los indicadores de bondad de ajuste para los tres puntos de control en los que se calibró el modelo con información de registros fluviométricos (río Diguillín en San Lorenzo y Estero Renegado en Invernada), así como para el punto con estadística reconstruida en régimen natural (río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín- Coltón).

**Tabla 7-2: Indicadores de Bondad de Ajuste Nash-Sutcliffe Para Periodos De Calibración (1985/86-2014/15), Validación (2015/16-2022/23) y Completo (1985/86-2022/23)**

Estación	Nash-Sutcliffe 1985/86-2014/15	Nash-Sutcliffe 2015/16-2022/23	Nash-Sutcliffe 1985/86-2022/23
Estero Renegado en Invernada	0,516	0,809	0,516
Río Diguillín en San Lorenzo	0,852	0,834	0,843
Río Diguillín en junta con Matriz Diguillín Coltón (extrapolada a partir de río Diguillín en Longitudinal en régimen pseudo-natural)	0,841	0,946	0,830

Fuente: Elaboración Propia

Se debe tener en cuenta que las estaciones de Renegado en Invernada y Diguillín en San Lorenzo son de mucha utilidad para la estimación de caudales en la zona alta de la cuenca. Sin embargo, la tercera estación considerada, río Diguillín en Longitudinal, se extrapoló al punto de río Diguillín en junta con Canal Matriz Diguillín-Coltón con el fin de reconstruir una serie pseudo-natural en dicho punto para poder validar los caudales de la zona intermedia. De esta manera se cuenta con un modelo que reproduce de forma satisfactoria los caudales tanto en la zona alta como media del valle para el periodo histórico, por lo que se considera válido para llevar a cabo las simulaciones de caudal futuro.

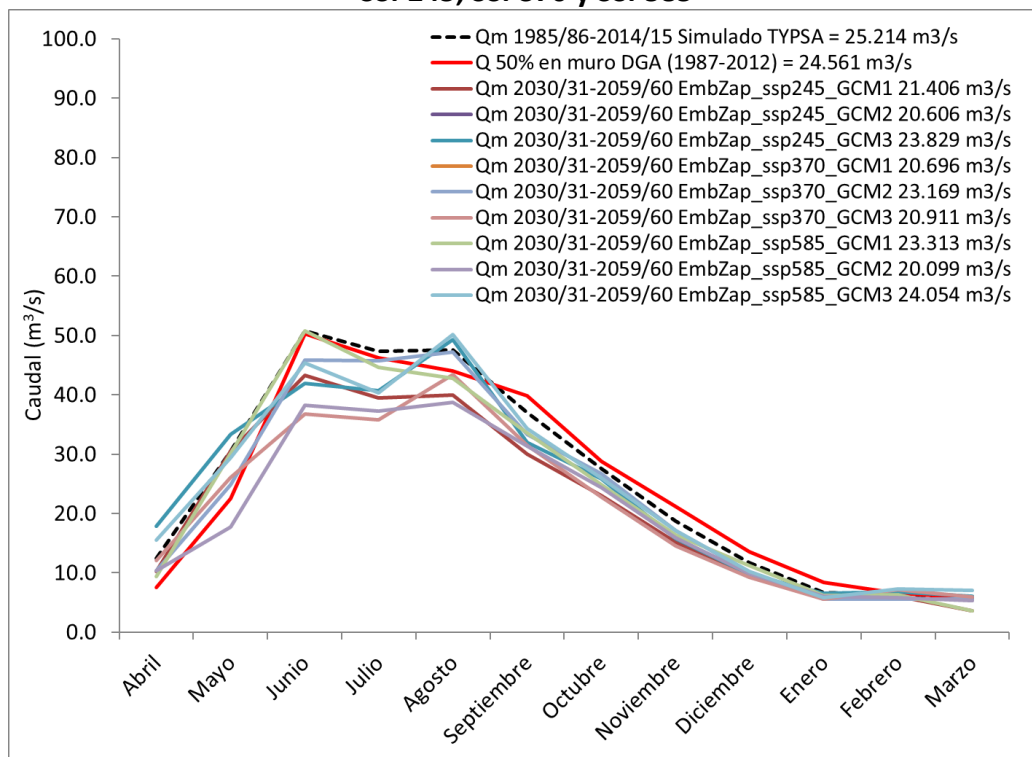
## 7.2. CONSTRUCCIÓN ESCENARIOS DE SIMULACIÓN FUTURA

Para la construcción de escenarios futuros se determinaron las forzantes climáticas y el modelo hidrológico calibrado y validado para situación histórica. Se procedió a simular los caudales futuros tanto para la ubicación de embalse Zapallar como para la hoyra intermedia afluente a la zona de estudio. Se debe tener en cuenta que el modelo se calibró en periodo histórico con información observada y también se corrió en periodo histórico con la precipitación y temperatura de los GCMs considerados en el estudio. Finalmente se estimaron para los tres escenarios con cambio climático, SSP245, SSP370 y SSP585, los caudales respectivos.

## 7.3. GENERACIÓN DE CAUDALES FUTUROS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO

En la Figura 7-5 se muestran los caudales medios mensuales con cambio climático para los tres GCMs y los tres escenarios, en total las nueve simulaciones que fueron consideradas en el análisis de forzantes climáticas.

**Figura 7-5: Caudales Medios Mensuales Para Los Tres GCMs Considerados y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585**



Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 7-3 se muestra el resumen de caudales medios mensuales para todos los GCMs y los escenarios evaluados en el presente estudio.

**Tabla 7-3: Promedio Serie de Caudales Medios Escenarios Climáticos Futuros**

Escenario climático futuro	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Annual
SSP 245 GCM1	10,28	30,52	43,34	39,47	39,92	30,02	23,04	15,19	9,58	5,86	6,08	3,56	21,41
SSP 245 GCM2	10,12	18,97	42,63	40,49	40,36	31,34	22,71	14,77	9,27	5,65	5,17	5,80	20,61
SSP 245 GCM3	17,88	33,37	41,95	40,70	49,36	31,94	25,82	15,82	9,73	6,51	6,78	6,09	23,83
SSP 370 GCM1	7,22	25,41	49,50	39,96	36,98	26,66	23,15	15,83	9,31	5,66	5,17	3,49	20,70
SSP 370 GCM2	10,30	24,84	45,92	45,69	47,17	33,39	26,67	17,14	10,13	5,58	5,60	5,58	23,17
SSP 370 GCM3	12,11	26,12	36,73	35,74	43,46	31,55	22,75	14,59	9,30	5,53	7,18	5,89	20,91
SSP 585 GCM1	9,42	30,09	50,74	44,61	42,76	33,63	24,81	16,39	11,20	6,17	6,32	3,61	23,31
SSP 585 GCM2	10,41	17,73	38,29	37,30	38,80	31,41	24,36	15,94	9,84	6,02	5,79	5,31	20,10
SSP 585 GCM3	15,55	29,43	45,33	40,34	50,22	34,27	25,95	17,10	10,24	5,83	7,29	7,11	24,05

Fuente: Elaboración Propia

## 8. ANÁLISIS DE SEGURIDAD HÍDRICA

A continuación, los siguientes acápite llevan a cabo la descripción de las componentes del Modelo Operacional del embalse Zapallar modificado y actualizado con la componente de cambio climático. En el Anexo 6 “Modelo Operacional” del Informe Final se adjuntan las simulaciones del modelo operacional bajo cambio climático.

### 8.1. DIAGNÓSTICO REGLA DE OPERACIÓN

El presente acápite se llevó a cabo una revisión exhaustiva del funcionamiento de la Regla de Operación del Embalse Zapallar con el fin de poder implementar modificaciones y mejoras en el modelo operacional multidisciplinario del embalse Zapallar, Región de Ñuble.

En el Anexo 6 “Modelo Operacional” del Informe Final se encuentran las planillas utilizadas en el presente estudio, que corresponden a una actualización y modificación del modelo desarrollado por DOH-UCH-DIC (2021). Adicionalmente se adjunta al interior del Anexo 6 un archivo explicativo de las tablas que conforman las distintas pestañas y hojas de cálculo del modelo operacional.

Los principales cambios y mejoras que se realizaron en el modelo operacional correspondieron a:

- Actualización de estadística considerando 30 años de simulación:
- Serie Caudales Histórico abr/1985-mar/2015 25.2 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP245 GCM1 21.406 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 245 GCM2 20.606 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 245 GCM3 23.829 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM1 20.696 m<sup>3</sup>/s

- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM2 23.169 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 370 GCM3 20.911 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM1 23.313 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM2 20.099 m<sup>3</sup>/s
- Serie Caudales 2030/31-2059/60 SSP 585 GCM3 24.054 m<sup>3</sup>/s
- Inclusión de aportes de hoya intermedia aguas abajo del embalse

Se consideró las siguientes áreas en el proyecto:

**Hectáreas Nuevas (HN):** Corresponden a la superficie que será beneficiada directamente por el Embalse Zapallar. Éstas se ubican entre el Embalse y el canal matriz Diguillín-Coltón.

Secano ribera derecha - San Ignacio (HN)

Secano ribera izquierda - El Carmen (HN)

**Hectáreas Blancas (HB):** Corresponden a la superficie de riego de agricultores que no cuentan con Derechos de Aprovechamiento de Aguas de tipo Consuntivo de ejercicio Permanente y Continuo sobre el río Diguillín.

En la Tabla 8-1 se presenta la superficie de cada tipo de área considerada en el proyecto Embalse Zapallar.

**Tabla 8-1: Superficie Asociada A Distintas Áreas Del Proyecto Embalse Zapallar**

Tipo de Superficie	Superficie (ha)
Áreas Blancas	2.476
Áreas Adicionales	0
Áreas Nuevas – Secano Ribera Derecha San Ignacio	2.255
Áreas Nuevas – Secano Ribera Izquierda El Carmen	5.269
<b>Total</b>	<b>10.000</b>

Fuente: DOH

Cabe señalar que de acuerdo a lo indicado por DOH en reunión del 26 de noviembre de 2024, en que entregó información actualizada en relación con las áreas del proyecto Embalse Zapallar, la superficie de áreas adicionales es cero.

Para el modelo operacional se adoptaron los volúmenes de APR e incendio de acuerdo a lo indicado en la Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26:

“Como se desprende de la explicación anterior, las mediciones de los caudales entrante y saliente al embalse comparadas con el caudal de los derechos más el ecológico permite el control del cumplimiento de las obligaciones legales asociadas al embalse Zapallar. Este control se

implementará en la norma de operación del embalse, quedando su bitácora de registro, además de la comparación que pueda efectuar la autoridad con los datos en línea.

Por otro lado, dentro de los recursos que se almacenarán, se considera destinar un volumen de 100.000 m<sup>3</sup> de emergencia de la capacidad del embalse para apoyos temporales a los sistemas de APR de las comunas de Pinto, El Carmen y San Ignacio, esto mientras se establecen soluciones a problemas asociados a sus fuentes de abastecimientos, producto de situaciones de escasez hídrica u otros motivos.

De la misma manera, se destinará un volumen de 100.000 m<sup>3</sup> de la capacidad del embalse para su uso ante situaciones de emergencia por incendios forestales.”

## 8.2. INSERCIÓN DE CAUDAL DE HOYA INTERMEDIA PARA DERECHOS PERMANENTES

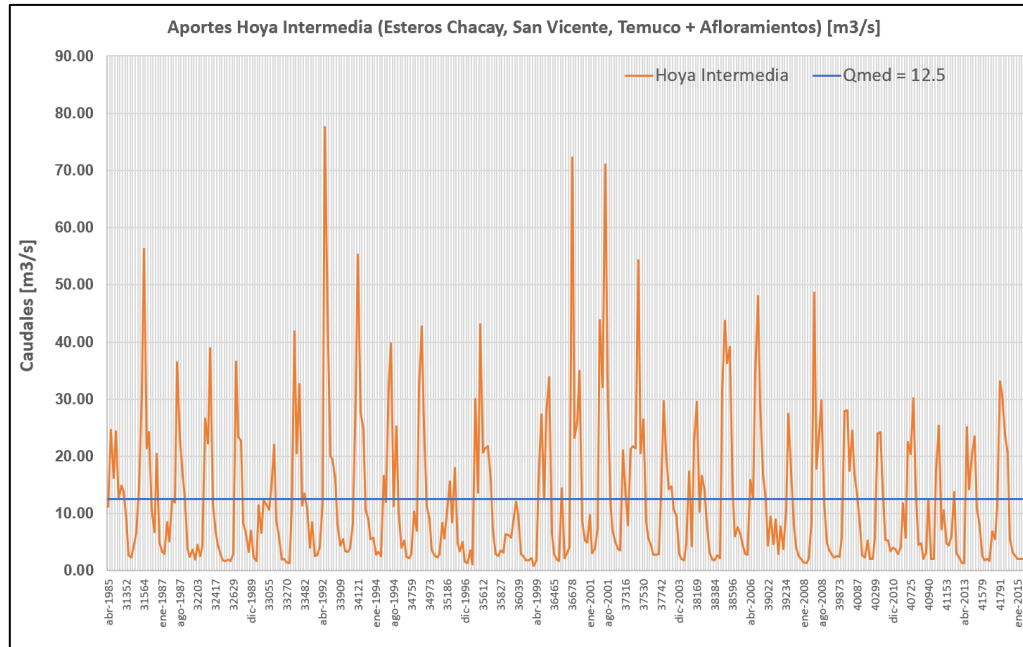
En la constitución de los derechos permanentes se consideraron todas las fuentes aportantes al punto de captación, tales como aportes del río principal, aportes de cauces afluentes y aportes de afloramientos netos (descontando las pérdidas por infiltración) que dan origen al derecho otorgado. Según la simulación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) de la hoya intermedia (cuenca ubicada entre el embalse y el río Diguillín en junta con el Canal Matriz Diguillín-Coltón) las pérdidas por infiltración son del orden de 25% para las cuencas de la zona de valle (sin embargo cabe mencionar que parte de dicha infiltración es capaz de aflorar nuevamente aguas abajo según se ha descrito la dinámica rio-acuífero de la zona, dicha información fue descrita en forma cualitativa por DGA-Aquaterra (2011)). Cabe mencionar que la producción específica de la hoya intermedia simulada por el presente estudio fue del orden de 26 l/s/km<sup>2</sup>, dicha cuenca fue validada con los valores naturalizados de la porción de cuenca definida por la estación río Diguillín en Longitudinal (dado que no existe una estación fluviométrica de control en la junta con el canal matriz Diguillín Coltón). Adicionalmente se corroboró el orden de magnitud con otra estación cercana perteneciente a la red DGA-BNA, río Larqui En Camino Yungay, que presenta valores del orden de 27 l/s/km<sup>2</sup>. Considerando ambas producciones específicas se concluye que el valor estimado a nivel superficial y subterráneo se considera verificado con la información disponible hasta la fecha del presente estudio.

Esta hoya juega un rol clave en la disponibilidad hídrica de la zona. Es por ello que para la evaluación de los recursos hídricos del proyecto Embalse Zapallar se procedió a integrar los aportes de la hoya intermedia. De esta manera se emuló la manera en la que la JVRD ha hecho gestión integrado (reparto de las aguas) de la cuenca del río Diguillín.

Considerando que la Hoya Intermedia cumple un rol en la satisfacción de los derechos permanentes se procedió a incorporar dicha estadística en el modelo de reparto. Se debe tener en cuenta que los valores de la Hoya Intermedia, compuesta por Esteros Chacay, San Vicente, Temuco y los afloramientos propios en el río corresponden a cauces sin control fluviométrico, ya

que las estaciones DGA de la zona son río Diguillín en San Lorenzo y Diguillín en Longitudinal. Se recomienda que en el futuro puedan implementarse puntos de control en cauces naturales para llevar a cabo un reparto ajustado a caudales pasantes estimados y medidos en terreno, más que a caudales estimados mediante simulaciones indirectas. Cabe mencionar la Hoya Intermedia no participa en la satisfacción de las 10.000 ha.

**Figura 8-1: Aportes Hoya Intermedia No Controlada, con Caudal Medio 12,5 m<sup>3</sup>/s**



Fuente: Elaboración Propia

### 8.3. SEGURIDAD DE RIEGO CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO

En la Tabla 8-2 se muestran los escenarios de simulación para estimar la seguridad de riego en el proyecto Embalse Zapallar. Se indican los principales documentos considerados y la manera en la que se satisfacen los derechos, así como el caudal ecológico. Además, se incluyen las consideraciones adicionales asociadas a volumen de agua disponible para Agua Potable Rural y Volumen de Incendio. Para cada Escenario de Simulación se consideró la componente de cambio climático en los escenarios SSP y GCMs respectivos.

**Tabla 8-2 Escenarios de Modelación para Estimar Seguridad de Riego en Embalse Zapallar**

Escenario de Modelación	Satisfacción de Derechos	Consideraciones adicionales	Escenario Cambio Climático a simular
<p><b>Primer escenario:</b> considerando DDPP de 21357,7 l/s (aguas arriba CM D-C: 3643,38 l/s aguas abajo CM D-C: 17714,32 l/s) Estimados a partir de Convenio Marzo 1998 DOH-JVRD y Convenio DOH-JVRD Marzo 2023) Nota 1: los cálculos se hicieron considerando 1 ha 1 acción y un factor 1,05 l/s/acción.</p>	<p>Para satisfacer los DDPP (21357,7 l/s) se consideran: los caudales de toda la cuenca que generan los DDPP del río Diguillín, es decir hoy a intermedia, afloramientos y zona afluente al embalse. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm<sup>3</sup>/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m<sup>3</sup>/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm<sup>3</sup> y un volumen para Incendio de 0,1 Hm<sup>3</sup>, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p><b>Segundo escenario:</b> Según RCA (05-02-2024) "a través de la descarga al río Diguillín el embalse deberá entregar los caudales de los DDPP de riego, aguas arriba y aguas abajo del canal matriz del Diguillín Coltón, los cuales suman un caudal máximo de 10,5 m<sup>3</sup>/s (3,7+7,0). A ello debe agregarse el caudal ecológico de 5,59 m<sup>3</sup>/s".</p>	<p>Este escenario dejaría pasar 10,5 m<sup>3</sup>/s, correspondientes a DDPP de aguas arriba y aguas abajo del canal matriz Diguillín Coltón. Se embalsan sólo derechos eventuales 100 Hm<sup>3</sup>/mes durante los meses junio-julio-agosto-septiembre. Se deja pasar caudal ecológico 5,59 m<sup>3</sup>/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm<sup>3</sup> y un volumen para Incendio de 0,1 Hm<sup>3</sup>, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>
<p><b>Tercer escenario:</b> considera actual gestión integrada de trasvase del sistema Laja-Diguillín en el que los DDPP del río Diguillín ubicados aguas abajo del CM D-C son satisfechos mediante el cumplimiento de trasvase de aguas del Lago Laja (según acuerdos vigentes a la fecha entre DOH-JVRD 16-12-2013).</p>	<p>Se deja pasar DDPP aguas arriba de CM D-C: 3,7 m<sup>3</sup>/s + caudal Ha Blancas y Adicionales entre Oct-Mar, resto del año DDPP (21,4 m<sup>3</sup>/s). Se embalsan sólo DDEE entre jun-sept. Caudal ecológico 5,59 m<sup>3</sup>/s.</p>	<p>Se considera un volumen para Agua Potable Rural de 0,1 Hm<sup>3</sup> y un volumen para Incendio de 0,1 Hm<sup>3</sup>, de acuerdo a lo indicado en Adenda 1 del EIA Zapallar, observación 1.26.</p>	<p>GCM: MPI-ESM1-2-LR MRI-ESM2-0 NorESM2-MM</p> <p>Escenarios: SSP2-4.5 SSP3-7.0 SSP5-8.5</p>

Fuente: Elaboración conjunta DOH-TYP

En las Tabla 8-3, Tabla 8-4 y Tabla 8-5 se muestran los resultados del cumplimiento de demanda para los tres escenarios climáticos evaluados y los tres Modelos de Circulación General. Se observa que para todas las simulaciones (con y sin cambio climático) se cumple la seguridad de

riego sobre el 85% debido a que la optimización de la regla de operación permite retener volumen almacenado de inicio de la temporada de riego para los meses más tardíos (marzo-abril). A lo más la seguridad de riego disminuye a un 93% en los GCM más desfavorables.

**Tabla 8-3 Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm3/temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.2	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59
Promedio Válvula 1	4.12	4.25	4.19	4.10	4.20	4.16	4.11	4.19	4.27	4.11
Máximo Válvula 1	14.29	11.79	11.73	13.49	11.75	12.36	13.93	13.26	11.85	13.07
Promedio Válvula 2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Máximo Válvula 2	1.07	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Promedio Válvula 3	2.03	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
Máximo Válvula 3	6.33	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06
<b>Caudales Entregados por Sector</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	12.57	9.78	9.39	11.47	9.51	11.23	9.93	11.51	9.32	11.54

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 8-4 Segundo Escenario DDPP RCA 10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	93%	93%	100%	93%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	2	2	0	2	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm3/temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.2	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	93.9%	94.3%	94.9%	92.8%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	92.0%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	16.08	16.03	15.97	15.99	15.97	16.09	16.01	16.09	15.99	15.83
Promedio Válvula 1	10.89	10.52	10.48	10.82	10.25	10.72	10.69	10.53	10.57	10.74
Máximo Válvula 1	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09
Promedio Válvula 2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34
Máximo Válvula 2	1.07	1.04	1.04	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Promedio Válvula 3	2.03	2.01	2.02	2.02	1.96	2.02	2.02	2.02	2.02	1.95
Máximo Válvula 3	6.33	6.27	6.27	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06
<b>Caudales Entregados por Sector</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[m3/s]</b>
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.21	1.21	1.22	1.18	1.22	1.22	1.22	1.22	1.18
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.92	3.92	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.59	0.58	0.59	0.59	0.59	0.59	0.57
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.74	1.74	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 8-5 Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Demanda máxima [Hm3/temporada]	76.77	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22	78.22
Capacidad/Demanda [%]	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Cobertura promedio demanda [%]	96.1%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.9%	94.2%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	12.138	13.826	13.137	13.268	13.619	13.083	14.566	13.086	13.242	12.950
Promedio Válvula 1	9.109	9.351	9.180	9.445	9.071	9.240	9.699	9.069	9.289	9.361
Máximo Válvula 1	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947	26.947
Promedio Válvula 2	0.351	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352	0.350
Máximo Válvula 2	1.066	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.043
Promedio Válvula 3	2.031	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.020	2.013
Máximo Válvula 3	6.335	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.270
<b>Caudales Entregados por Sector</b>	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Promedio Sector El Carmen	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.21
Máximo Sector El Carmen	3.91	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.92
Promedio Sector San Ignacio	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.79	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.74
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	8.84	7.06	6.55	8.20	6.99	7.94	6.71	8.31	6.35	7.93

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.1. ÁREA ASOCIADA AL 85% DE SEGURIDAD DE RIEGO

Para cada escenario descrito en la Tabla 8-2 se llevó a cabo una iteración del área máxima de riego que permite cubrir el sistema sin bajar el rango de 85% de Seguridad de Riego según criterio CNR. En las Tabla 8-6, Tabla 8-7 y Tabla 8-8 se muestran los resultados de las iteraciones para los distintos escenarios.

**Tabla 8-6 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Primer Escenario DDPP 21357,7 l/s (Aguas Arriba CM D-C 3643,38 l/s y Aguas Abajo CM D-C 17714,32 l/s) Considerando Aporte Hoya Intermedia para DDPP**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm3/temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59
Promedio Válvula 1	4.12	4.25	4.19	4.10	4.20	4.16	4.11	4.19	4.27	4.11
Máximo Válvula 1	14.29	11.79	11.73	13.49	11.75	12.36	13.93	13.26	11.85	13.07
Promedio Válvula 2	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
Máximo Válvula 2	1.10	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Promedio Válvula 3	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06
Máximo Válvula 3	6.45	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
<b>Caudales Entregados por Sector</b>	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Máximo Sector El Carmen	3.99	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	12.57	9.78	9.39	11.47	9.51	11.23	9.93	11.51	9.32	11.54

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 8-7 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Segundo Escenario DDPP RCA 10500 l/s a Pie de Embalse más Caudal Ecológico**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	93%	93%	100%	93%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	2	2	0	2	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm3/temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	92%	92%	93%	91%	93%	93%	93%	93%	90%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	16.08	16.03	15.97	15.99	15.97	16.09	16.01	16.09	15.99	15.83
Promedio Válvula 1	10.89	10.52	10.48	10.82	10.25	10.72	10.69	10.53	10.57	10.74
Máximo Válvula 1	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09	16.09
Promedio Válvula 2	0.36	0.36	0.36	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35
Máximo Válvula 2	1.10	1.09	1.09	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
Promedio Válvula 3	2.06	2.04	2.05	2.06	2.00	2.06	2.06	2.06	2.06	1.99
Máximo Válvula 3	6.45	6.44	6.44	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23
Caudales Entregados por Sector	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.24	1.24	1.25	1.21	1.25	1.25	1.25	1.25	1.21
Máximo Sector El Carmen	3.99	4.03	4.03	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.60	0.61	0.61	0.59	0.61	0.61	0.61	0.61	0.59
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.79	1.79	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 8-8 Áreas Asociadas a Seguridad de Riego 85% en Tercer Escenario DDPP Aguas Abajo de CM Diguillín Coltón Satisfechos Con Sistema Diguillín Coltón y DDPP 3700 l/s + Caudal Hectáreas Adicionales y Blancas**

Parámetros	Esc Base	ESC1-GCM1	ESC1-GCM2	ESC1-GCM3	ESC2-GCM1	ESC2-GCM2	ESC2-GCM3	ESC3-GCM1	ESC3-GCM2	ESC3-GCM3
Seguridad de riego [%]	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	93%
Años fallados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Superficie regada [ha]	10200	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300	10300
Demanda máxima [Hm3/temporada]	78.30	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55	80.55
Capacidad/Demanda [%]	101%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
Cobertura promedio demanda [%]	96%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	92%
Promedio Válvula 1 - Jun-Sept	12.14	13.83	13.14	13.27	13.62	13.08	14.57	13.09	13.24	12.95
Promedio Válvula 1	9.11	9.35	9.18	9.45	9.07	9.24	9.70	9.07	9.29	9.36
Máximo Válvula 1	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95	26.95
Promedio Válvula 2	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36
Máximo Válvula 2	1.10	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.09
Promedio Válvula 3	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.05
Máximo Válvula 3	6.45	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.44
Caudales Entregados por Sector	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Promedio Sector El Carmen	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.24
Máximo Sector El Carmen	3.99	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	3.89	4.03
Promedio Sector San Ignacio	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60
Máximo Sector San Ignacio	1.83	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.79
Caudal Afluente Embalse	25.21	21.41	20.61	23.83	20.70	23.17	20.91	23.31	20.10	24.05
Caudal Hoya Intermedia	8.84	7.06	6.55	8.20	6.99	7.94	6.71	8.31	6.35	7.93

Fuente: Elaboración Propia

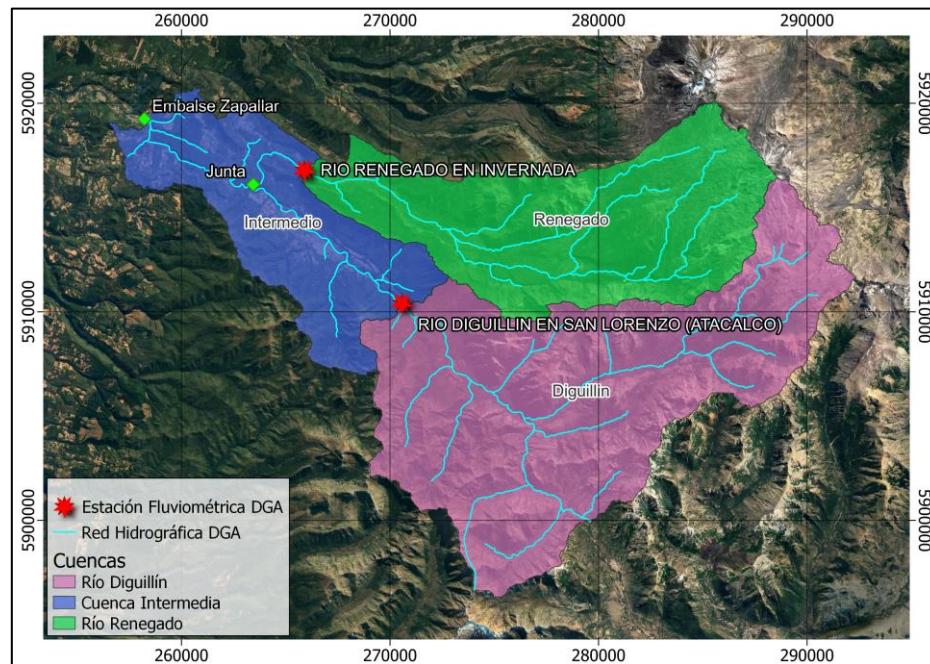
A modo general es bueno recordar que existen dos reglas de operación implementadas en las simulaciones: una para escenario base, con volumen menor a 60 Hm<sup>3</sup> entrega 100% de la demanda, mientras que, para escenarios con cambio climático, con volumen menor a 50 Hm<sup>3</sup> se entrega el 100% de la demanda. Dicha regla se implementó para lograr retener flujo en el periodo de estiaje. Esto implica que, a pesar de tener seguridad de riego 100%, las coberturas de riego son levemente menor con cambio climático (96% en escenario base versus 93% en escenarios con cambio climático).

## 8.4. ANÁLISIS DE CRECIDAS EXTREMAS

### 8.4.1. INTRODUCCIÓN

Se realizó un estudio de estimación de crecidas extremas para el muro del embalse. Se analizaron las cuencas aportantes al lugar de interés y se realizó una modelación destinada a estimar los caudales asociados a los eventos de precipitación máxima ( $T = 100, 1.000, 10.000$  y PMP). Las cuencas aportantes y estaciones fluviométricas se presentan en la Figura 8-2. Además, se elaboró una comparación con los caudales estimados por MN Ingenieros (2018) teniendo en consideración tanto la condición histórica como las proyectadas con cambio climático. Para la estimación de crecidas máximas asociadas a cada uno de estos eventos de precipitación se utilizó el Hidrograma Unitario Sintético SCS, implementado en el *software* HEC-HMS.

**Figura 8-2: Cuencas Aportantes A Embalse Zapallar**



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

### 8.4.2. ANÁLISIS PP MÁXIMAS ANUALES

Se utilizó dos ventanas temporales para la estimación de precipitaciones máximas diarias. En primer lugar, se utilizaron datos históricos u observados sintéticos para el periodo 1960-2023 provenientes del modelo CR2MET. Para el periodo futuro (2024-2074), se evaluaron los modelos de circulación global MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Para realizar la conversión a precipitaciones en 24 horas, se hace necesario utilizar un coeficiente de corrección para así obtener lluvia máxima en 24 horas. Según el Manual de Carreteras, la relación entre lluvia máxima en 24 horas y lluvia máxima diaria para la estación

meteorológica de Chillán, cercana a la zona de estudio, es de 1,04, es decir  $P_{max\ 24h} = 1,04 \cdot P_{max\ diaria}$ .

#### 8.4.2.1. ANÁLISIS DE FRECUENCIA Y PMP

Se realizó un análisis de frecuencia para las precipitaciones máximas anuales en 24 horas para las tres cuencas en estudio, tomándose como ajuste la distribución Gumbel, determinándose las precipitaciones para periodos de retorno de 100, 1000 y 10000 años.

Para la determinación de la PMP, se utilizó la metodología presentada por Stowhas en 1983. En la Tabla 8-9 se muestran las precipitaciones máximas en 24 horas para las tres cuencas en estudio para los periodos de retorno en estudio junto con la PMP.

**Tabla 8-9: Precipitación En Estudio Según Cuenca Y Periodo De Retorno (mm)**

Periodo de retorno (años)	Diguillín	Renegado	Intermedia
100	219,0	225,8	219,7
1.000	279,0	288,1	281,9
10.000	338,9	350,3	344,1
PMP	448,5	464,0	457,6

Fuente: Elaboración Propia

#### 8.4.3. ANÁLISIS LÍNEA NIEVE

Para la determinación de caudales máximos instantáneos, es necesario determinar el área aportante por evento de precipitación. Para ello se requiere determinar la línea de nieve de la cuenca aportante, la cual separa la precipitación líquida de la sólida. Se utilizó la metodología presentada por Garreaud (1992). De aquí se observa que para los periodos de retorno en estudio se tendría una línea de nieve por sobre la cota máxima de la cuenca aportante, por lo que se concluyó que para todas las crecidas máximas se tendrá toda la cuenca aportando, definiendo así que las crecidas son completamente pluviales, con escaso aporte nival.

#### 8.4.4. MÉTODOLÓGÍA PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA (HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO)

Para la estimación de caudales de crecida para los periodos de retorno de 100, 1.000, 10.000 años y para la precipitación máxima probable (PMP) se utilizó el programa HEC-HMS, mediante la implementación del HUS del SCS (*Soil Conservation Service*). Aquí se consideró un modelo de la cuenca aportante según lo definido en la Figura 8-2, con tres subcuencas aportantes.

Para las abstracciones iniciales y determinación de precipitación efectiva se utilizó la metodología de la curva número (CN), utilizando valores de 93, 70 y 87 para las subcuencas aportantes a río Diguillín en San Lorenzo, río Renegado en Invernada y cuenca Intermedia, respectivamente.

Se analizó el comportamiento de la cuenca para precipitaciones desde 0 a 24 horas, obteniendo que el caudal es maximizado en la zona del embalse para la duración de 6 horas.

Se realizan los cálculos de caudal de crecida para el periodo histórico considerando las precipitaciones para los periodos de retorno de 100, 1.000, 10.000 y PMP, según el análisis de frecuencia realizado para el periodo histórico 1960-2023. En la Tabla 8-10 se muestran los resultados para el embalse Zapallar, así como para las cuencas aportantes obtenidos desde HEC-HMS. Se muestra también la comparación con el análisis de frecuencia realizado para las estaciones fluviométricas DGA.

**Tabla 8-10: Caudales De Crecida En Periodo Histórico (1960-2023)**

Caudal - Análisis Histórico (1960-2023) (m <sup>3</sup> /s)				
Punto Control	T 100	T 1000	T 10000	PMP
Resultados MN Ingenieros (2018)	1600	2200	2750	3938
<b>Embalse Zapallar (HEC-HMS)</b>	<b>1454</b>	<b>1998</b>	<b>2556</b>	<b>3590</b>
Cuenca río Diguillín (AF DGA)	784	937	1069	-
<b>Cuenca río Diguillín (HEC-HMS)</b>	<b>892</b>	<b>1174</b>	<b>1454</b>	<b>1965</b>
Cuenca río Renegado (AF DGA)	166	234	301	-
<b>Cuenca río Renegado (HEC-HMS)</b>	<b>270</b>	<b>420</b>	<b>581</b>	<b>891</b>
Cuenca Intermedia (HEC-HMS)	310	427	545	762

Fuente: Elaboración propia

Si comparamos los resultados obtenidos en la Tabla 8-10 con los resultados de caudal máximo instantáneo obtenido en el estudio previo de MN Ingenieros (2018) se puede apreciar una buena correlación, con una disminución promedio del 9% para los caudales máximos de crecida estimados.

#### 8.4.5. ANÁLISIS CRECIDAS MÁXIMAS CON CAMBIO CLIMÁTICO

Para el análisis de las crecidas máximas instantáneas con cambio climático, se recurrió al mismo procedimiento que el usado para estimar las crecidas en el período histórico. En primer lugar, se realizó un análisis de frecuencia para los tres modelos y tres escenarios en evaluación, para cada una de las cuencas, resultando así un total de 27 análisis de frecuencia para la obtención de las precipitaciones de diseño.

Posteriormente, se hizo la estimación de caudal máximo mediante la propagación del hidrograma en HEC-HMS para el embalse Zapallar, considerando la precipitación de duración de 6 horas en cada caso, usando el mismo procedimiento ya descrito.

##### 8.4.5.1. RESULTADOS DE PRECIPITACIONES PARA GCM'S EN ANÁLISIS

Considerando que se han utilizado los modelos de circulación global MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, es posible generar una matriz de resultados para las precipitaciones máximas obtenidas desde el análisis de frecuencia para cada cuenca. Este análisis se realizó para el periodo futuro 2024-2074. De aquí se observa que en general para el escenario SSP2-4.5 las precipitaciones tienden a aumentar en torno al 4%. Por su parte, para el escenario SSP3-7.0, las precipitaciones aumentan en torno al 6% solamente en la

cuenca del río Diguillín, teniendo una leve disminución porcentual para las cuencas del río Diguillín e intermedia. Por último, el escenario SSP5-8.5 el cual es el de mayor riesgo en cuanto a emisiones de gases invernaderos presenta resultados de variación significativa a la baja para precipitaciones máximas en 24 horas.

#### 8.4.5.2. RESULTADOS CAUDALES DE CRECIDA BAJO CC

Una vez determinadas las precipitaciones máximas en 24 horas, la duración de la tormenta y el área aportante para cada cuenca, se realizó la estimación de caudales de crecida para el embalse Zapallar. Los resultados de los tres modelos y tres escenarios son contrastados con los presentados por MN Ingenieros (2018), junto con la estimación propia para el periodo histórico de 1960 a 2023. Estos resultados se presentan en la Tabla 8-11 y Figura 8-3.

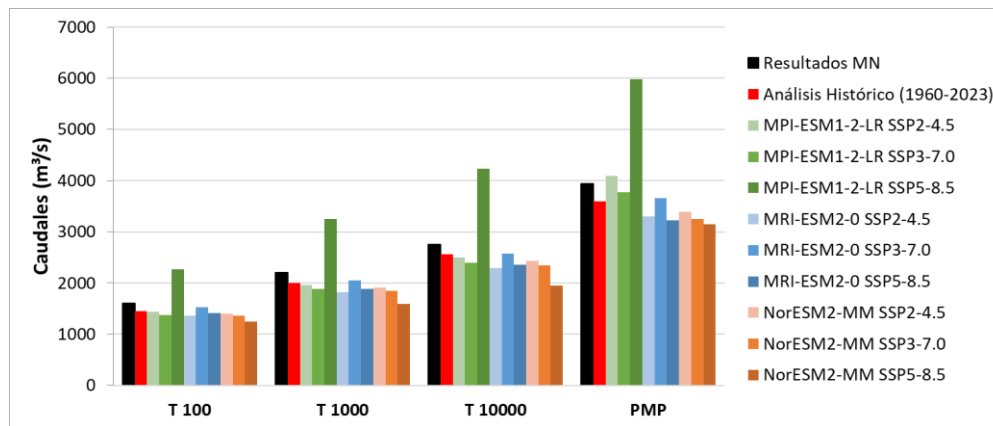
Al observar estos resultados, y al comparar con los caudales entregados por MN Ingenieros (2018) o bien con los caudales estimados del análisis histórico, se tiene que prácticamente la totalidad de los resultados presentan una disminución de los caudales máximos para todos los periodos de retorno, a excepción del modelo MPI-ESM1-2-LLR en el escenario SSP5-8.5, el cual muestra caudales considerablemente mayores para todos los periodos de retorno.

**Tabla 8-11: Caudales De Crecida (m<sup>3</sup>/s) Para Escenarios De CC (2024-2074) En Embalse Zapallar**

Modelo	Escenario	T 100	T 1000	T 10000	PMP
Resultados MN Ingenieros (2018)		1600	2200	2750	3938
Análisis histórico (1960-2023)		1454	1998	2556	3590
MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	1436	1960	2502	4094
	SSP3-7.0	1376	1880	2396	3768
	SSP5-8.5	2269	3243	4226	5984
MRI-ESM2-0	SSP2-4.5	1361	1822	2292	3305
	SSP3-7.0	1531	2047	2574	3655
	SSP5-8.5	1415	1883	2361	3226
NorESM2-MM	SSP2-4.5	1394	1908	2435	3388
	SSP3-7.0	1359	1846	2344	3247
	SSP5-8.5	1246	1597	1942	3147

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 8-3: Caudales De Crecida (m<sup>3</sup>/s) Para Escenarios de CC (2024-2074) En Embalse Zapallar**



Fuente: Elaboración Propia TYP SA 2024

Al realizar una comparación porcentual entre los caudales resultantes con los modelos de cambio climático y los resultados obtenidos del análisis histórico, se tiene que en promedio hay una disminución de un 5% de los caudales máximos, esto excluyendo el modelo MPI-ESM1-2-LLR en el escenario SSP5-8.5, que entrega valores muy discordantes con el resto de las estimaciones.

## 9. PLAN DE DIFUSIÓN

La delimitación de su objetivo principal radica en una difusión lo más amplia y constante de aquellos alcances contemplados en este estudio; estos son: la actualización y estimación de la disponibilidad de los Recursos Hídricos y de la Seguridad Hídrica en Contexto de Cambio Climático para el Proyecto Embalse Zapallar.

En este contexto, durante la primera etapa de difusión del Estudio y de acuerdo con los Términos de Referencia del contrato, se elaboró: 1) nota de prensa informativa abordando los objetivos y alcances del estudio y 2) una columna radial junto a la Inspectora Fiscal DOH Nivel Central, Karen Canales. Este primer material circulable (publicado en septiembre 2024), fue posicionado en los soportes de prensa escrita: **Diario La Tercera (nacional)** y **Diario La Discusión (regional)**.

Asimismo, se incorporó su publicación en plataformas de noticias a nivel regional (**Chillanonline.cl**) y en medios radiofónicos de alta recordación, tales como **Radio Ñuble** (89.7 FM; Chillán).

6 | Lunes 16 de septiembre de 2024

www.ladiscusion.cl

**Ciudad.**

EN EL MARCO DEL PROYECTO EMBALSE ZAPALLAR

# Nuevo estudio hidrológico en el Diguillín incluye variable de Cambio Climático

**Actualización será desarrollada por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP. Sus resultados permitirán definir la forma en que las aguas acumuladas en el embalse serán distribuidas a todos los beneficiarios**



**La Tercera**  
**HACE 5 HORAS**  
Tiempo de lectura: 3 minutos

**Embalse Zapallar desarrolla nuevo estudio de Actualización Hidrológica incorporando la componente de Cambio Climático**

La Tercera

HACE 5 HORAS

Tiempo de lectura: 3 minutos



Embalse Zapallar

hidrológico, se basa en la información disponible en el estudio de factibilidad del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar.


**La Tercera**  
**HACE 5 HORAS**  
Tiempo de lectura: 3 minutos



**Embalse Zapallar**

El estudio de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar.

**80**

El estudio de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar, que contempla la estimación de recursos hídricos y la información necesaria para la ejecución del proyecto de actualización del estudio hidrológico del embalse Zapallar.


**LATERCERA**


**NACIONAL** **Embalse Zapallar**

# Embalse Zapallar desarrolla nuevo estudio de Actualización Hidrológica incorporando la componente de Cambio Climático

La Tercera


HACE 5 HORAS


Tiempo de lectura: 3 minutos



Embalse Zapallar


**Plan de Medios Escritos: Diario La Discusión (regional) y Diario La Tercera (nacional).**






**Embalse Zapallar desarrolla nuevo estudio de Actualización Hidrológica incorporando la componente de Cambio Climático**

Embalse Zapallar está desarrollando un nuevo estudio de Actualización Hidrológica, que incorpora de forma pionera en este tipo de mediciones, la componente de Cambio Climático. En este contexto, Karen Canales, Inspectora Fiscal de la Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, explica los alcances y las etapas contempladas en este estudio, en los micrófonos de nuestro espacio radial "Proyecto Embalse Zapallar" a través de las ondas de Radio Ñuble (89.7 FM).

Ver insights 

Les gusta a rubioj40 y 23 personas más  
 25 de septiembre

Añadir comentario... 



**proembalsezapallar**  
Audio original



**proembalsezapallar** Embalse Zapallar está desarrollando un nuevo estudio de Actualización Hidrológica, que incorpora de forma pionera en este tipo de mediciones, la componente de Cambio Climático. En este contexto, Karen Canales, Inspector Fiscal de la Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, explica los alcances y las etapas contempladas en este estudio, en los micrófonos de nuestro espacio radial "Proyecto Embalse Zapallar" a través de las ondas de Radio Ñuble (89.7 FM).

6 sem



**coach\_mora\_** ❤️ ❤️  
6 sem Responder



[Ver insights](#)

[Promocionar reel](#)



Les gusta a **rubioj40** y 23 personas más  
25 de septiembre



Añade un comentario...

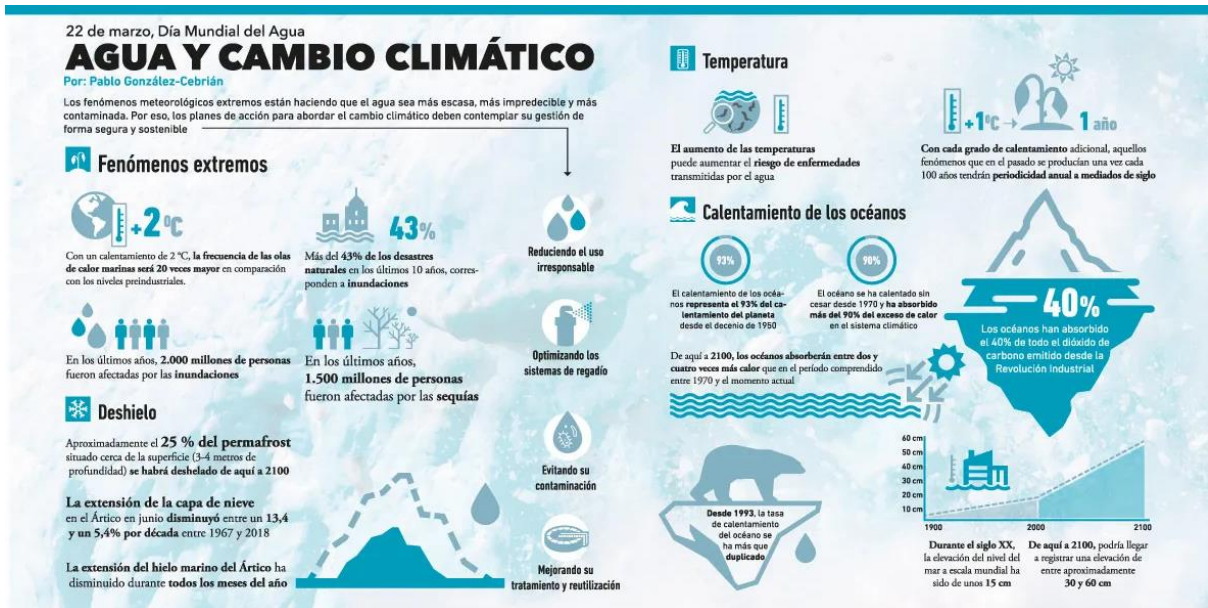
[Publicar](#)

**Plan de Medios Digitales y Radio: Portal Chillán Online y Radio Ñuble 89.7 FM (Chillán).**

### **Difusión Resultados Finales**

Para la difusión final del estudio - entrega de resultados obtenidos por el Estudio y aprobados por DOH- se consideran los siguientes entregables:

- Infografía Editorial Informativa.
- Material PPT.
- Díptico.



**Modelo Infografía Editorial Tipo (sólo referencial).**

El desarrollo de la Infografía Editorial Informativa, considera como base los resultados obtenidos por el Estudio Disponibilidad y Seguridad Hídrica Embalse Zapallar.

De la misma forma, se incorpora la producción y edición de material relevante en relación al análisis hidrológico, cambio climático y otras importantes métricas emanadas del estudio. Contenido específico a exhibir ante las distintas comunidades y/o públicos de interés mediante presentaciones tipo PPT, Díptico u otros, en contexto de las actividades de Participación Ciudadana en desarrollo por parte de DOH-MOP.

En cuanto a la difusión final del estudio, TYP SA Chile preparará los materiales (Infografía Editorial Informativa, material PPT y Díptico a cargo de su profesional periodista), para luego entregarlo a la empresa encargada de la difusión a nivel de PAC territorial (Michell Consultores).

## 10. CONCLUSIONES Y VISIÓN CRÍTICA DEL CONSULTOR

➤ En relación a la revisión y análisis crítico de antecedentes:

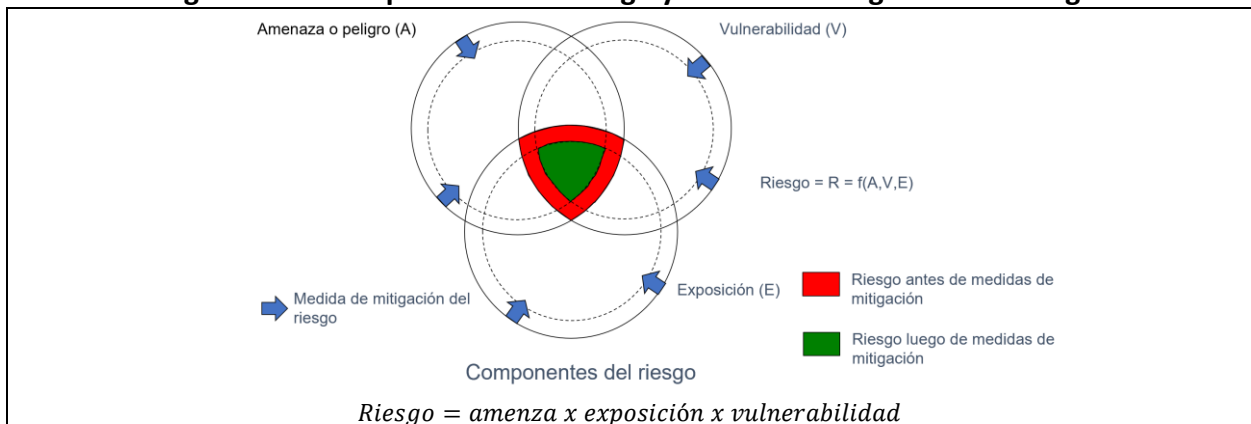
Se han revisado todos los antecedentes disponibles hasta la fecha respecto al análisis de disponibilidad de recursos hídricos desde el embalse Zapallar.

### **Comentarios Generales Componente de Cambio Climático y la Zona de Estudio Según la Visión Del Consultor:**

Es fundamental utilizar el enfoque de amenaza, riesgo y vulnerabilidad (Dewan, 2013) para la zona de estudio. Según la información revisada en estudios anteriores, se refuerza la idea de que la zona está expuesta a una amenaza climática, caracterizada por disminuciones en la precipitación y aumentos en la temperatura. Frente a esto, la seguridad hídrica de los agricultores que actualmente no reciben recursos del canal matriz Laja Diguillín presenta una alta vulnerabilidad. En este contexto, el riesgo se entiende como la probabilidad de ocurrencia o el grado de pérdida de un elemento específico esperado ante una amenaza particular (por ejemplo, pérdidas de hectáreas de cultivo por no satisfacer adecuadamente sus requerimientos hídricos). La matriz productiva asociada al área agrícola es uno de los elementos clave que permiten reforzar la idea de riesgo.

Por otro lado, existen externalidades ambientales positivas que contribuirían a disminuir la vulnerabilidad de la zona respecto a crecidas en el área de inundación y al aumento en la recarga de las aguas subterráneas en la zona de estudio (al aumentar el caudal en la red de distribución de canales). En la Figura 10-1 se muestra en forma gráfica las componentes del riesgo a partir de las diapositivas del curso ICH3222 (DIHA-UC):

**Figura 10-1: Componentes del Riesgo y Efecto de Mitigación del Riesgo**



Fuente: ICH3222, DIHA-UC

Se debe concientizar a la zona aguas abajo del Embalse Zapallar de los beneficios del proyecto para la seguridad de riego, consumo humano, incendio y eventual volumen controlador de crecida.

En síntesis, existen abundantes estudios con gran cantidad de información de los recursos hídricos que se han desarrollado en la zona de influencia del proyecto. El principal inconveniente es que no consideran información estadística relevante de los últimos años (2023 en particular) y la gran mayoría no considera análisis de forzantes climáticos. Por otro lado, preocupa la situación del sistema Laja, la cual está siendo desarrollada por la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) y la Universidad de Concepción (UdeC) en colaboración con DOH, ya que el presente estudio debiese utilizar los caudales generados por dicho software en el Tránsito del canal Laja, de lo contrario ambos estudios no serán concordantes, puesto que el presente estudio no considera modelar el Sistema Laja.

Del análisis realizado, la presente consultoría tomó como base el modelo WEAP desarrollado el 2017, actualizando toda la estadística e información de la actualización del Balance Hídrico Nacional.

➤ En relación a las forzantes hidrometeorológicas en periodos histórico y futuro lo siguiente:

A nivel de forzantes meteorológicas, se han realizado múltiples evaluaciones sobre su desarrollo y aplicabilidad. El producto CR2MET se destaca como una herramienta útil para representar la meteorología de la zona, especialmente en lo que respecta a las precipitaciones. Este producto ya considera el efecto de "under catchment", lo que lo hace apropiado para su representación en áreas de alta montaña. Sin embargo, en el contexto de precipitaciones extremas, se ha observado una leve subestimación en la región que requiere atención para mejorar su precisión. En lo que respecta a las variables de temperaturas extremas, CR2MET presenta limitaciones y necesita corrección, presentándose un sesgo en función de la elevación. El sesgo en estas variables se atribuye a la escasez de registros disponibles de estaciones meteorológicas. Estas estaciones son utilizadas como base para el desarrollo del modelo, lo que puede comprometer la precisión en zonas específicas. Por lo tanto, aunque CR2MET constituye un buen producto base, es fundamental realizar una verificación cuidadosa antes de su aplicación en regiones particulares, dado que fue desarrollado a una escala mayor a la que se desarrolla este estudio.

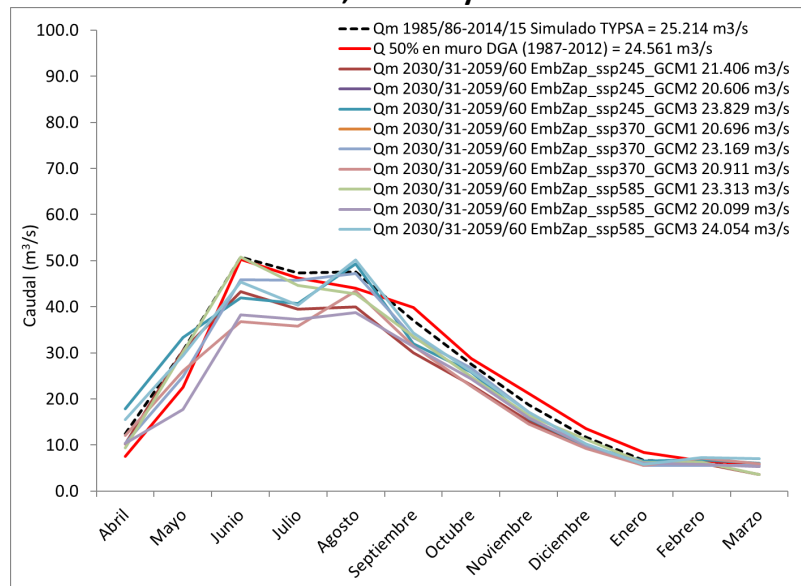
En relación con el efecto del cambio climático en la zona, el uso de múltiples modelos y escenarios permite obtener un rango más amplio de las potenciales variaciones esperadas. A medida que se analiza el mediano plazo, la similitud en los resultados de los diferentes escenarios de gases de efecto invernadero se traduce en diferencias mínimas en términos de cambios precipitación

anual entre los distintos modelos y escenarios. Sin embargo, existen particularidades que permiten diferenciar un modelo de otro, en aspectos tales como variaciones en la curva estacional y eventos extremos esperados. Esta diferenciación es crucial, ya que, dependiendo de las necesidades específicas del análisis, se pueden identificar los modelos y escenarios que representan las condiciones más desfavorables. Esta característica subraya la importancia de utilizar distintos modelos y escenarios, incluyendo aquellos intermedios, además de los que son requeridos por la autoridad, como una estrategia efectiva para estimar adecuadamente los potenciales efectos del cambio climático en el contexto de la evaluación del proyecto.

➤ En relación al modelo hidrológico WEAP y al análisis de seguridad hídrica lo siguiente:

Desde el punto de vista de caudales medios mensuales para los tres escenarios climáticos y los tres Modelos de Circulación General se observa un descenso futuro de los caudales para la zona de estudio. El caudal medio varió entre 20,1 m<sup>3</sup>/s para SSP585 GCM2 y 24,1 m<sup>3</sup>/s para SSP585 GCM3. La tendencia es a la baja al compararlo con valores medios del presente estudio para el periodo base de 30 años 1985/86-2014/15 (25,2 m<sup>3</sup>/s), estimado por TYP en el modelo de simulación implementado en el presente estudio. El valor de periodo histórico en la zona de estudio es cercano al caudal de 50% probabilidad de excedencia estimado por DGA (1987-2012) (24,5 m<sup>3</sup>/s).

**Figura 10-2: Caudales Medios Mensuales para los tres GCMs Considerados y Los Escenarios SSP245, SSP370 y SSP585**



Fuente: Elaboración Propia

Desde el punto de vista de modelo operacional se debe mencionar que:

La cuenca, según registros históricos recopilados en el presente trabajo, actualmente funciona con una visión integrada de cuenca, en la que además del caudal principal del río Diguillín también se consideran todos los aportes de afluentes y afloramiento. En ningún caso se ha llevado repartos de agua sólo considerando el caudal afluente en cabecera del río Diguillín en forma aislada, sería un sinsentido plantear que la cabecera del río Diguillín tiene que satisfacer el 100%, tanto desde el punto de vista administrativo legal como desde la gestión de recursos hídricos. La cabecera de los ríos genera parte de la oferta hídrica, mientras que las cuencas laterales y afloramientos permiten constituir los derechos permanentes asociados al 85% de probabilidad de excedencia, esto porque en la constitución de derechos y estimación de oferta prima un volumen de control en el que se consideran todas las fuentes que constituyen un derecho y no solo una parte de la cuenca. Este hecho respalda los escenarios de inclusión de Hoya Intermedia, sobre todo porque cada derecho se constituye considerando todos los aportes que ocurren aguas arriba de cada entrega.

Considerando la optimización de la regla de reparto para los tres escenarios analizados se logra una seguridad de riego sobre el 85% para todos los casos analizados. Por lo que el proyecto de Embalse Zapallar, bajo el análisis de todos los escenarios analizados, casos bases sin y con cambio climático, cumple con una seguridad de riego para los agricultores de la zona. Cabe mencionar que no se recomienda bajo ningún punto entregar siempre el 100% de la demanda de riego a pie de embalse, sino más bien hacer una optimización de reservar un porcentaje pequeño para aquellos meses de riego más tardíos (marzo-abril).

Por otro lado, cabe destacar que la evaluación considera una reserva de agua para consumo humano y volumen para incendios sin poner en riesgo la seguridad de riego, por lo que se debe reforzar como una fortaleza adicional del Proyecto Embalse Zapallar, considerando sobre todo que actualmente el consumo humano se considera un uso priorizado en la legislación vigente.

Tal como se indicó anteriormente el caso más desfavorable corresponde al de no inclusión de Hoya Intermedia para entrega de DDPP. Este escenario corresponde al más restrictivo y menos probable, ya que implica que la JVRD cambie la forma en la que hace repartos de agua que ha considerado históricamente todas las fuentes y los afloramientos. Además, implicaría que con un área muy reducida de toda la cuenca del río Diguillín se tenga que cumplir el 100% de entrega de DDPP. Se refuerza, por tanto, que se debe considerar a futuro un manejo integrado de la cuenca, tanto con las Organizaciones Usuarias, así como considerando todos los aportes de la cuenca (afluentes y afloramientos). Este enfoque se entiende que ha sido el espíritu que ha primado considerando que actualmente DOH realiza entrega de caudales de trasvase según convenios y

común acuerdo con regantes, y ese espíritu debería mantenerse para la futura gestión de los recursos hídricos y evitar escenarios desfavorables como la no inclusión de la Hoya Intermedia.

Puntos de control fluviométricos clave para la gestión integrada del Embalse Zapallar:

1. Considerar a futuro el control de caudal a pie de embalse Zapallar
2. Considerar la medición de esteros afluentes: Chacay, San Vicente y Temuco en junta con río Diguillín.
3. Considerar la medición o puntos de control fluviométrico aguas arriba de la junta con esteros afluentes Chacay, San Vicente y Temuco.
4. Por último, desde un punto de vista ecosistémico también se recomienda llevar a cabo mediciones continuas de los afloramientos de vertientes ubicadas aguas arriba del embalse, ya que a la fecha solo se cuenta con aforos puntuales.

➤ En relación al análisis de crecidas extremas lo siguiente:

- Se realizó un estudio de crecidas en la cuenca del embalse Zapallar, en el que se ha considerado dos períodos de análisis, siendo el primero el correspondiente al período histórico (1960 a 2023) y el segundo a uno que incluye los efectos esperados del cambio climático que va desde el 2024 a 2074.
- Dadas las condiciones climáticas y geomorfológicas se tiene que las crecidas máximas aportantes al embalse Zapallar son en su totalidad en periodo invernal y de carácter pluvial.
- El método de cálculo utilizado para la estimación de las crecidas corresponde a la implementación del hidrograma unitario del SCS mediante el *software* HEC-HMS, en el cual se utiliza el método de abstracción de la Curva Número, asumiendo, dado el carácter pluvial de la cuenca, que el suelo se encuentra en una condición precedente húmeda.
- Se estimaron las crecidas para los periodos de retorno de 100, 1000, 10000 años y la de precipitación máxima probable (PMP). Al comparar estos resultados con los presentados por MN Ingenieros (2018), se tiene una disminución de un 9% para las crecidas máximas.
- Se analizaron los caudales generados por los GCM MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 y NorESM2-MM en los escenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 los cuales muestran en promedio una disminución del 5% en comparación a los resultados obtenidos del análisis histórico.