



Mejor Riego  
para Chile



# Análisis oferta hídrica y su impacto en la agricultura zona centro



RESUMEN EJECUTIVO

Junio, 2022



# ANÁLISIS OFERTA HÍDRICA Y SU IMPACTO EN LA AGRICULTURA ZONA CENTRO



INFORME FINAL  
RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR



JUNIO 2022



**Dirigido por:**  
**COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**

**Equipo participante:**

**Gastón Valenzuela Lillo**  
Coordinador de la Unidad de Estudios

**Norberto Werner Sánchez**  
**Evelyn Paz Falcón**  
Equipo Coordinador del Estudio

**Javiera Herrera Pérez**  
Encargada de Participación Ciudadana

**Patricio Espinoza Caniullán**  
Especialista Área Geomensura

**Leonardo Machuca Silva**  
**Cristian Navarrete González**  
Equipo Especialista Área Agronómica



**Elaborado por:**  
**CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES**

**Equipo participante:**

**Horacio Merlet Badilla**  
Jefe de Estudio

**Felipe Arróspide Alarcón**  
Especialista en Modelación (Especialista Hidráulico)

**Ana María Bustamante Valdés**  
Especialista en Hidrología

**Carlos Calvo Cortés-Monroy**  
Especialista en Hidrogeología

**Marión Espinosa Toro**  
Especialista en Agronomía

**Balfredo Toledo Hernández**  
Especialista SIG

**Paola Becerra Canio**  
Especialista en Participación Ciudadana

**Carlos Flores Arenas**  
Especialista en Modelación Hidrogeológica

**Manuel Luna Abarza**  
Especialista Jurídico

**Paula Villa Lagos**  
Profesional de apoyo

**Gabriel Ortiz Flores**  
Especialista en teledetección y SIG

**Fernando Neira Román**  
Especialista en Modelación Climática

**Vanessa Aros Espinoza**  
Especialista en teledetección

**Tomás Díaz Van Schouwen**  
Especialista en Agronomía



**Omar Gutiérrez Barz**

Especialista en SIG

**María de los Ángeles Vargas González**

Especialista en Geomensura y Cartografía

**Michelle Favreau Negront**

Gestión administrativa

**Elizabeth Godoy Pincheira**

Secretaría



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1.	Objetivos .....	5
1.1.1.	Objetivo general.....	5
1.1.2.	Objetivos específicos.....	6
2.	REVISIÓN DE ANTECEDENTES GENERALES .....	7
3.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS .....	9
3.1.	Topografía .....	9
3.2.	Hidrología.....	9
3.3.	Clima.....	9
3.4.	Suelos .....	10
3.5.	Hidrogeología .....	11
3.6.	Áreas de riego e infraestructura de riego .....	12
4.	EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE EFECTIVAMENTE REGADA.....	17
5.	DEMANDA AGRÍCOLA .....	18
6.	DEMANDA DE OTROS USOS.....	20
7.	OFERTA Y BALANCE OFERTA-DEMANDA .....	25
8.	MODELO DE PRONÓSTICO DE CAUDALES .....	28
8.1.	Resultados del modelo hidrológico.....	28
9.	PLATAFORMA SIG.....	30
9.1.	Archivos vectoriales .....	30
9.2.	Archivos ráster .....	30
9.3.	Archivos NetCDF.....	31
9.4.	Archivos CSV.....	31
10.	RESUMEN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	32
10.1.	Principales conclusiones del estudio.....	32
10.2.	Principales recomendaciones .....	40
11.	Presentación inicial del estudio, seminarios y talleres de difusión .....	41

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 3-1: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Maipo .....	10
Tabla 3-2: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Rapel.....	10
Tabla 3-3: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Mataquito.....	11
Tabla 3-4: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Maule .....	11
Tabla 3-5: Interacción río-acuífero para las cuencas en estudio.....	12
Tabla 5-1: Porcentaje de pérdidas por infiltración en canales de riego.....	18
Tabla 5-2: Demanda Bruta de Riego que son captadas de acuíferos. ....	19
Tabla 6-1: Nomenclatura de las demandas de otros usos utilizada. ....	20
Tabla 6-2: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Maipo. ....	21
Tabla 6-3: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Rapel.....	22
Tabla 6-4: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Mataquito.....	23
Tabla 6-5: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Maule.....	24
Tabla 8-1: Síntesis de estadígrafos de evaluación de la eficiencia del modelo.....	29
Tabla 9-1: Archivos ráster. Proyecto SIG. ....	30
Tabla 9-2: Archivos NetCDF. Proyecto SIG.....	31
Tabla 9-3: Archivos CSV. Proyecto SIG.....	31
Tabla 10-1: Resumen de la relación de la oferta-demanda mensual para las cuatro cuencas en estudio. ....	37
Tabla 10-2: Relación oferta-demanda (acumulada mensual) de la cuenca del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule.....	38
Tabla 11-1: Cuadro resumen de actividades desarrolladas durante el proyecto.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Localización del área de estudio del río Maipo, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica. ....	2
Figura 1-2: Localización del área de estudio de la cuenca del río Rapel, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica. ....	3
Figura 1-3: Localización del área de estudio de la cuenca del río Mataquito, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica. ....	4
Figura 1-4: Localización del área de estudio de la cuenca del río Maule, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica. ....	5
Figura 3-1: Áreas de riego cuenca del río Maipo. ....	12
Figura 3-2: Áreas de riego cuenca del río Rapel. ....	13
Figura 3-3: Áreas de riego cuenca del río Mataquito. ....	13
Figura 3-4: Áreas de riego cuenca del río Maule. ....	14
Figura 3-5: Red de canales en la cuenca del río Maipo. ....	14
Figura 3-6: Red de canales en la cuenca del río Rapel. ....	15
Figura 3-7: Red de Canales en la cuenca del río Mataquito. ....	15
Figura 3-8: Red de canales en la cuenca del río Maule. ....	16
Figura 6-1: Hidrograma de demanda volumétrica de otros usos. Cuenca río Maipo. ....	20
Figura 6-2: Hidrograma de demanda volumétrica de otros usos. Cuenca río Rapel. ....	21
Figura 6-3: Hidrograma de demanda volumétrica otros usos. Cuenca río Mataquito. ....	22
Figura 6-4: Hidrograma de demanda volumétrica otros usos. Cuenca río Maule. ....	23
Figura 7-1: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Maipo. ....	25
Figura 7-2: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Rapel. ....	26
Figura 7-3: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Mataquito. ....	26
Figura 7-4: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Maule. ....	27

**GLOSARIO**

<b>Sigla o Acrónimo</b>	<b>Nombre/Descripción</b>
AGROMET	Red Agroclimática Nacional
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
APR	Agua Potable Rural
APU	Agua Potable Urbana
CDEC SIC	Centro de Despacho Económico de Carga – Sistema Interconectado Central
CDEC SING	Centro de Despacho Económico de Carga – Sistema Interconectado Norte Grande
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
CNE	Comisión Nacional de Energía
CNR	Comisión Nacional de Riego
COCHILCO	Comisión Chilena del Cobre
CSV	Comma Separated Values
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
DEM	Digital Elevation Model
DGA	Dirección General de Aguas
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
DVA	Diferencia Volumétrica Anual
DVR	Diferencia Volumétrica en Temporada de Riego
ELE	Eléctrica
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FENAPRU	Federación Nacional de Agua Potable Rural
FOR	Forestal
Hm <sup>3</sup>	Hectómetros cúbicos = 1e <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
IND	Industrial
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
KGE	Kling-Gupta Efficiency
MIN	Minera
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOP	Ministerio de Obras Públicas
N-SE	Coficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe
NetCDF	Network Common Data Form
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agropecuarias
OUA	Organizaciones de Usuarios de Agua
PALSAR	Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar
PEC	Pecuario
QGIS	Quantum GIS
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SERNATUR	Servicio Nacional de Turismo
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente

<b>Sigla o Acrónimo</b>	<b>Nombre/Descripción</b>
SOFOFA	Sociedad de Fomento Fabril
SRM	Snowmelt Runoff Model
USDA	United States Department of Agriculture
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System



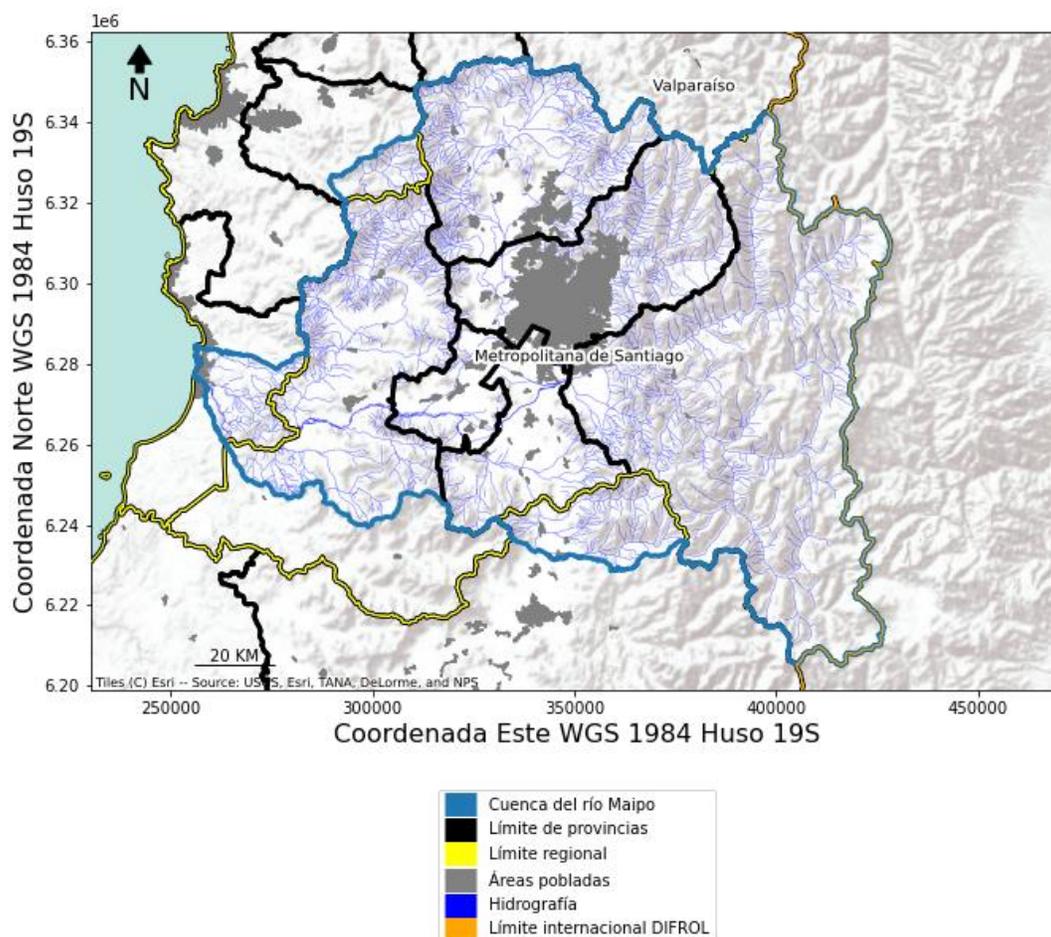
## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente documento corresponde a un resumen ejecutivo, el cual presenta una síntesis del estudio “Análisis Oferta Hídrica y su Impacto en la Agricultura Zona Centro”. Este informe comprende una breve caracterización de las cuencas de los ríos Maipo, Rapel, Mataquito y Maule, junto con la determinación de la superficie efectivamente regada, la demanda hídrica agrícola, demanda de otros usos, oferta hídrica, balance entre oferta y demanda y un modelo de pronóstico de caudales, mientras que la información completa se presenta en cuatro tomos correspondientes a las cuatro cuencas mencionadas anteriormente.

Este estudio busca establecer un modelo predictivo para cuatro cuencas de la zona centro-sur del país, a partir de información obtenida de un modelo nival, lo que permitirá evaluar la relación oferta-demanda con escenarios de oferta hídrica para distintos períodos de tiempo y además, estimar el impacto de la disponibilidad hídrica sobre la actividad agrícola de las regiones mencionadas, expresada en la variación de la superficie regada.

Se planteó enfocar este análisis en las principales cuencas de la zona centro del país, enmarcado en las Regiones Metropolitana, Región del Libertador Bernardo O’Higgins y la Región del Maule, abordando la cuenca del río Maipo, cuenca del río Rapel, cuenca del río Mataquito y cuenca del río Maule.

Estas cuatro cuencas concentran cerca del 60% del área regada del país de producción hortofrutícola donde la escasez hídrica tiene un impacto en la economía regional y nacional. En cuanto a su ubicación, la cuenca del río Maipo abarca un 91% del territorio de la Región Metropolitana (salvo las comunas de San Pedro y Alhué), una pequeña parte (4%) de la región de Valparaíso (comuna de San Antonio y parte de Quilpué) y hacia el sur, una fracción (5%) de la región del Libertador General Bernardo O’Higgins (comuna de Mostazal y parte de Codegua). La cuenca se encuentra al oeste del límite territorial entre Chile y Argentina (Figura 1-1). El río Maipo es el principal curso natural que recorre esta cuenca, con una longitud de 250 km, extendiéndose entre los paralelos 32°55’-34°15’ latitud sur y meridianos 69°55’-71°33’ longitud oeste.

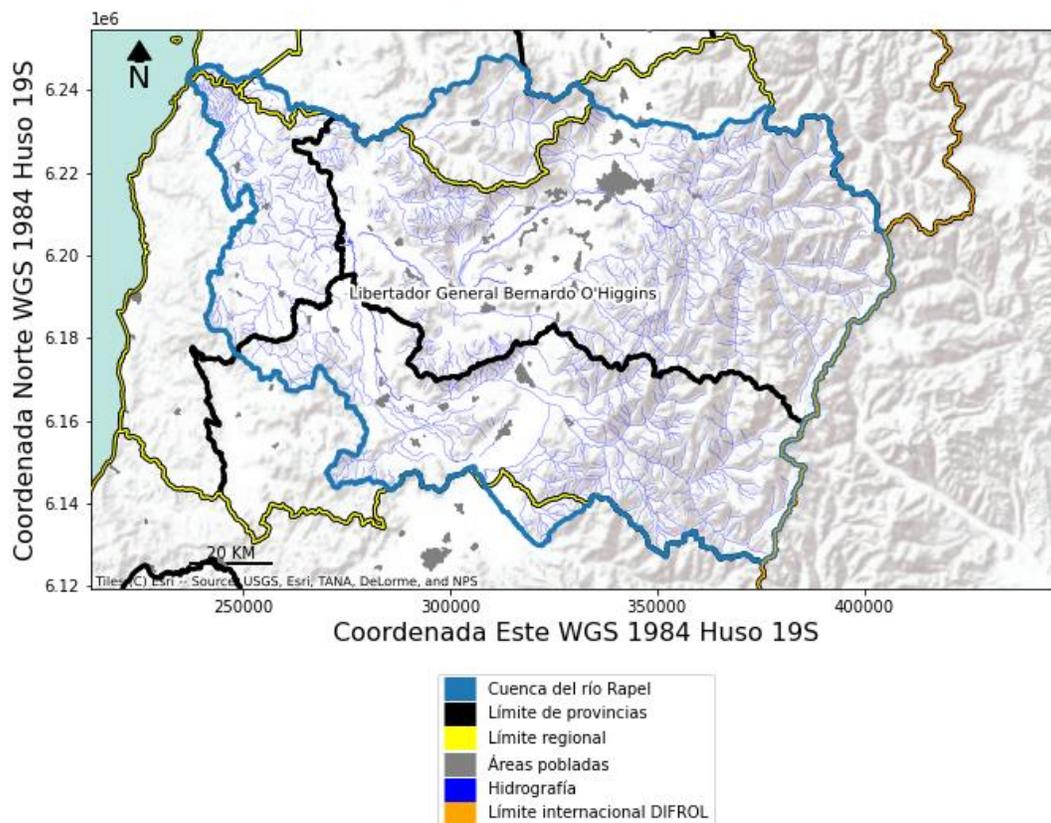


**Figura 1-1: Localización del área de estudio del río Maipo, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica.**

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la cuenca hidrográfica del río Rapel se sitúa en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, específicamente en los paralelos 33°53' y 35°01' de latitud Sur. La cuenca abarca desde la desembocadura en el Océano Pacífico hasta la Cordillera de Los Andes, con un rango de elevaciones desde los 0 msnm hasta por sobre los 5.000 msnm. La cuenca se encuentra al oeste del límite territorial entre Chile y Argentina (Figura 1-2).

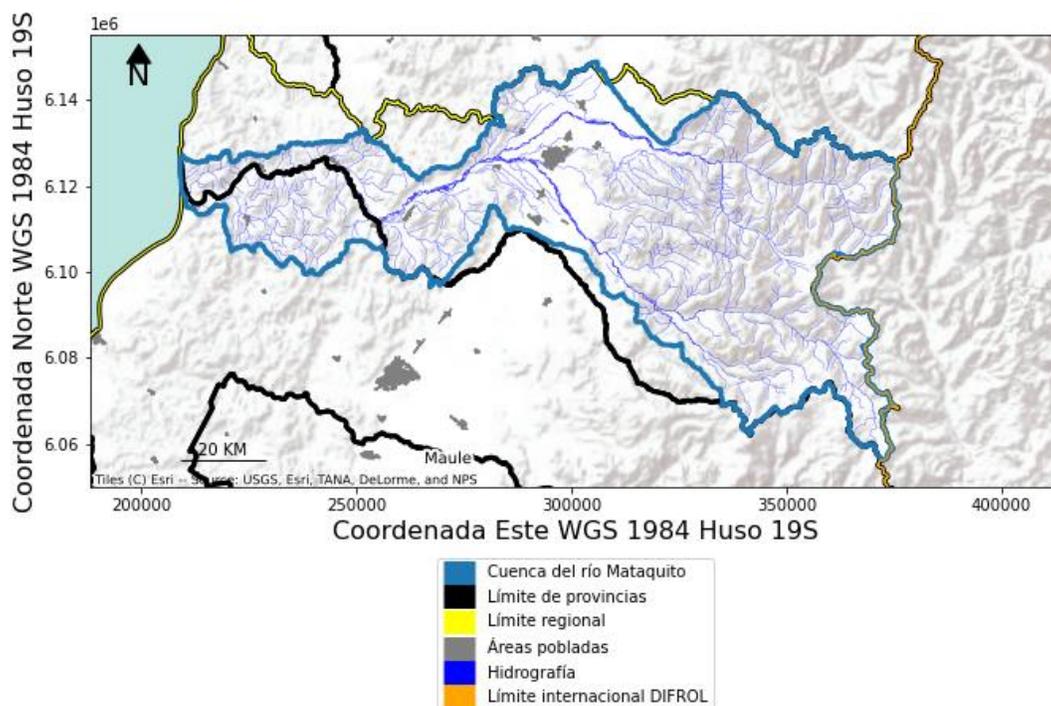
El río Rapel, es el principal curso natural que recorre el área de estudio. Se forma de la unión de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, en el lugar denominado La Junta, a unos 6 km al oeste de la localidad de Las Cabras. La confluencia tiene lugar en el interior de la Cordillera de la Costa y se encuentra hoy inundada por las aguas del embalse Rapel, con una capacidad de 680 millones de m<sup>3</sup> (DGA, 2004b).



**Figura 1-2: Localización del área de estudio de la cuenca del río Rapel, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica.**

Fuente: Elaboración propia.

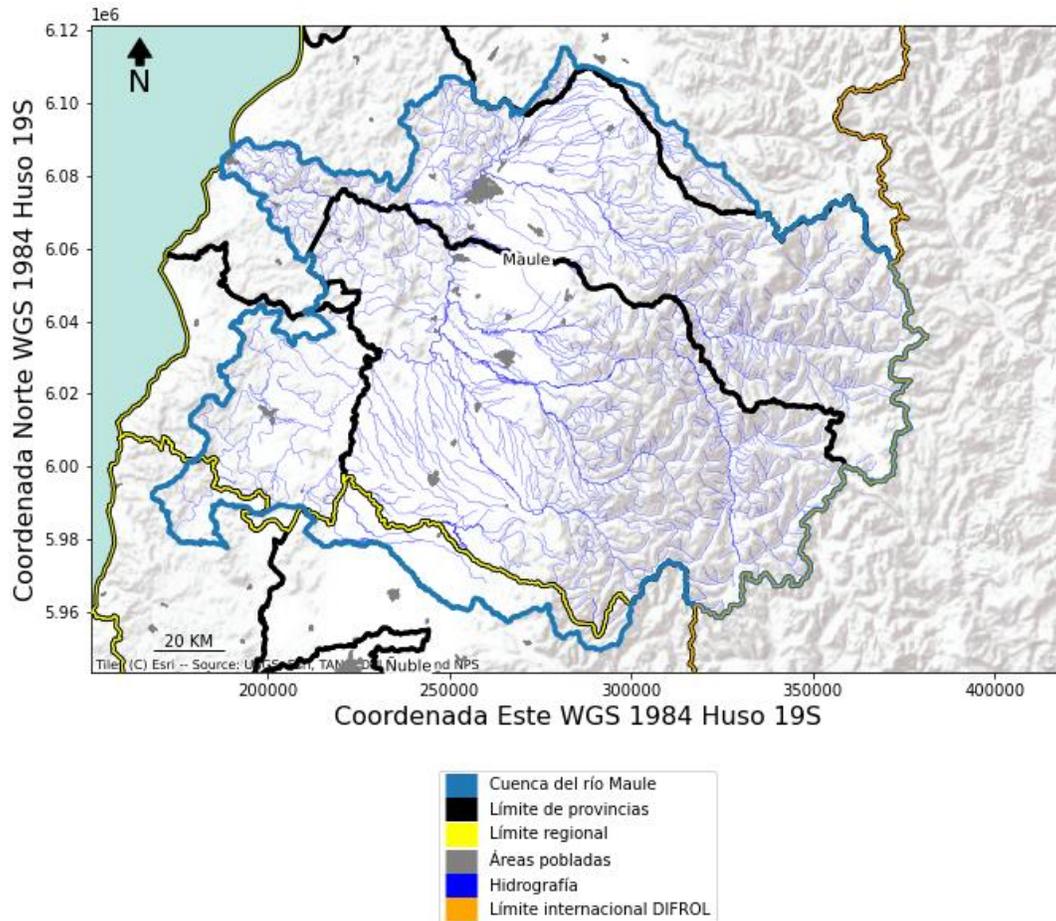
La cuenca del río Mataquito, a su vez, se sitúa en la Región del Maule, específicamente en los paralelos 34°50' y 35°30' de latitud Sur. La cuenca se forma de la confluencia de los ríos Teno, que viene del Norte y Lontué, que proviene del Sur. A partir de la junta, al poniente de la ciudad de Curicó, escurre con dirección al oeste por 95 Km, hasta desembocar en el mar (DGA, 2004a). La cuenca se encuentra al oeste del límite territorial entre Chile y Argentina (Figura 1-3).



**Figura 1-3: Localización del área de estudio de la cuenca del río Mataquito, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica.**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la cuenca del río Maule se ubica en la Región del Maule, específicamente en los paralelos 35°05' y 36°30' de latitud Sur. El río Maule se origina en el norponiente de la laguna del Maule, ubicada en la cabecera de la cuenca, y se extiende aproximadamente 240 km hasta su desembocadura en el mar (DGA, 2004a). Uno de sus principales tributarios corresponde al río Claro. El río Maule recibe afluentes de menor tamaño, siendo el principal el estero Los Puercos, y efluentes de gran tamaño, tales como el río Puelche y el río Cipreses. La cuenca se encuentra al oeste del límite territorial entre Chile y Argentina (Figura 1-4).



**Figura 1-4: Localización del área de estudio de la cuenca del río Maule, división político-administrativa, áreas pobladas y red hidrográfica.**

Fuente: Elaboración propia.

## 1.1. Objetivos

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

### 1.1.1. Objetivo general

El objetivo general del estudio consistió en estimar la evolución de la oferta y la demanda de agua de riego, con el fin de contribuir a una mejor gestión del recurso en situación de escasez hídrica en las Regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule, con una evaluación de herramientas geomáticas para estimar la superficie regada y los caudales medios de cada cuenca, basándose en el seguimiento multitemporal de la cobertura nival durante la temporada de riego.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del estudio corresponden a los siguientes.

- Determinar la oferta de agua superficial, con distintas probabilidades de excedencia, expresada en caudales mensuales para la temporada de riego, en las principales cuencas de las Regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule.
- Realizar pronósticos de caudales en la cabecera de las cuencas, mediante la aplicación de un modelo predictivo de escorrentía. Esto se realiza a escala anual y a una escala menor para utilizarla como herramienta predictiva.
- Estimar la superficie agrícola efectivamente regada entre las temporadas 2005-2006 y 2020-2021, asociadas a las zonas de riego, entendida como aquella superficie bajo riego en que se tiene identificada la fuente de agua y los registros de usuarios de agua existentes.
- Determinar la demanda neta de agua de riego para el uso actual, en todas las áreas agrícolas de las Regiones Metropolitana, O'Higgins y Maule, mediante un balance de agua en el suelo, a nivel mensual y por zona de riego, y también la demanda de otros usos.
- Transferir los resultados y conocimientos técnicos adquiridos, para contribuir a elaborar una estrategia de adaptación productiva a las condiciones de déficit hídrico a todos los participantes del sector agrícola, en especial a la pequeña agricultura.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES GENERALES

Esta actividad comenzó con la recopilación de la información climática, de suelos y cultivos existentes, además de la implementación de aspectos operativos, tales como la actualización y/o mantención de licencias de software fundamentales para la ejecución del estudio, como son Erdas Imagine, orientado al procesamiento de imágenes satelitales y del software ArcGis, para la elaboración de la cartografía digital (variables climáticas en formato raster, áreas agrícolas efectivamente regadas por temporada, mapas vectoriales de suelo, uso del suelo, entre otras) y cruces de capas para el análisis y obtención de resultados.

Se recopiló información de precipitaciones, temperaturas extremas, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, desde las distintas instituciones y redes de estaciones meteorológicas existentes (DMC, DGA, Agromet) con el objetivo de tener un período común de 30 años, a los que se les realizó los análisis estadísticos correspondientes para verificar su consistencia, extender y rellenar los datos faltantes en las series históricas. Se consultaron publicaciones científicas y tesis de grado realizadas para el área de estudio para estimar valores de evapotranspiración potencial, Kc de cultivos y sistemas de riego, entre otros. Además, se consideraron las publicaciones relacionadas con las características climáticas y agroclimáticas del área de estudio, tales como: “Atlas agroclimático de Chile”, INIA, 1989; “Atlas agroclimático de Chile”, U. de Chile, 1993; “Atlas agroclimático de Chile Estado actual y tendencias del clima, Tomo III, Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O’Higgins y Maule”, U. de Chile-Agrimed, 2017.

La información de suelos, específicamente las variables que incidieron en las necesidades netas de agua de riego, como son la profundidad y la capacidad de retención de agua aprovechable por cada horizonte y fases de las series de suelo existentes en el área de estudio, se obtuvieron de las bases de datos que posee CIREN, junto con su cartografía asociada.

Asimismo, se recopilaron y revisaron estudios relevantes en la temática de las demandas de agua para otros usos. De especial interés fue el estudio DGA, 2017b: “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile”, 2017. S.I.T. N° 419, que contiene información útil para determinar las demandas de agua de los diferentes sectores económicos, tales como: agua potable, agrícola, minero, industrial, hidroeléctrico, forestal, turístico y acuícola. Este estudio DGA abarcó dos tópicos principales: uno metodológico, referente a las demandas actuales de agua y sus proyecciones futuras; y otro asociado a los aspectos de calidad de agua de fuentes superficiales y subterráneas, en función de la información disponible.

Los resultados que entrega el estudio DGA antes indicado (S.I.T. N° 419) fueron de alcance nacional y consideró la escala regional y de cuencas y/o subcuencas en el análisis. La demanda hídrica se entrega ordenada según los principales usos del país, productivos y no productivos:

- Uso en agua potable urbana.
- Uso en agua potable rural.
- Uso agrícola.
- Uso pecuario.
- Uso forestal.
- Uso acuícola.
- Uso minero.
- Uso industrial.
- Uso en generación eléctrica.
- Uso turístico y protección ambiental.

La metodología que aplicó este estudio de la DGA en cada uso considera tanto la estimación de la demanda para el año base 2015, como proyecciones de demanda para los años 2020 y 2021. Respecto de la calidad de agua, la metodología aplicada se basa en la caracterización hidroquímica de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Estos antecedentes se analizaron con el objeto de evaluar e identificar aquellos antecedentes que fueron necesarios de actualizar, complementar y en algunos casos generar, en función de la disponibilidad de información actual para los años 2020 y 2021. Cabe mencionar que, para contar con información actualizada respecto de los antecedentes de demanda hídrica para otros usos, se solicitó información a los siguientes organismos pertinentes:

- Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Central (CDEC SIC).
- Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Norte Grande (CDEC SING).
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).
- Comisión Nacional de Energía (CNE).
- Comisión Nacional de Riego (CNR).
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).
- Dirección General de Aguas (DGA).
- Federación Nacional de Agua Potable Rural (FENAPRU).
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA).
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR).
- Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA).
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).
- Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

En el presente capítulo se resumen las principales características topográficas, hidrológicas, climáticas, de uso de suelos, hidrogeológicas y relativas a infraestructura y áreas de riego.

#### 3.1. Topografía

La cuenca del río Maipo posee una superficie de drenaje de 15.304 km<sup>2</sup> y su morfología de elevación que supera los 5.000 m s.n.m.

Por su parte, la cuenca del río Rapel drena una superficie aproximada de 13.695 km<sup>2</sup> con un rango de elevaciones entre los 0 y 5.000 m s.n.m.

La cuenca del río Mataquito se ubica en la región del Maule, incluye los ríos Teno y Lontué, drena una superficie de 6.324 km<sup>2</sup> y su morfología alcanza los 4.000 m s.n.m. en la Cordillera de los Andes.

Finalmente, la cuenca del río Maule se encuentra casi en su totalidad dentro de la Región del Maule, drenando 20.865 km<sup>2</sup> desde la Cordillera de Los Andes hasta el Océano Pacífico con un rango de elevación que llega hasta los 4.000 m s.n.m. aproximadamente.

#### 3.2. Hidrología

Las precipitaciones anuales promedio de la zona de estudio abarcan el rango entre 300 a 3.000 mm en las zonas altas cordilleranas. La macrocuenca del río Maule es aquella con la mayor precipitación, seguida de Mataquito, Rapel y finalmente Maipo. La caracterización del régimen hidrológico de cada macrocuenca se presenta en detalle en cuatro tomos correspondientes a cada cuenca.

#### 3.3. Clima

La cuenca del río Maipo posee clima templado mediterráneo con estación seca prolongada, al igual que la cuenca del río Rapel, la cual posee la misma característica más un invierno marcado. La cuenca del río Mataquito es similar en cuanto a lo mediterráneo del clima, sin embargo, se destacan dos subclimas, uno oceánico y uno continental. La Cuenca del río Maule es similar a la del río Mataquito, con mediterraneidad y sus subclases oceánicas y continental.

### 3.4. Suelos

El presente estudio contempló un análisis del uso de suelo para las cuencas del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule. A través de la campaña de terreno, clasificación de imágenes satelitales y procesamiento de cartografía se pudo distinguir las categorías que se presentan en la Tabla 3-1 a la Tabla 3-4.

**Tabla 3-1: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Maipo**

<b>Río Maipo</b>		
<b>CLASES</b>	<b>SUPERFICIE (ha)</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>
<b>PRADERAS Y MATORRALES</b>	495.605	32,6
<b>BOSQUES</b>	335.910	22,1
<b>AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION</b>	220.206	14,5
<b>TERRENOS AGRICOLAS</b>	215.238	14,1
<b>AREAS ARTIFICIALES</b>	115.481	7,6
<b>NIEVES Y GLACIARES</b>	100.149	6,6
<b>HUMEDALES</b>	15.533	1,0
<b>PLANTACION FORESTAL</b>	11.759	0,8
<b>CUERPOS DE AGUA</b>	11.459	0,8
<b>TOTAL</b>	<b>1.521.340</b>	<b>100,0</b>

**Tabla 3-2: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Rapel**

<b>Río Rapel</b>		
<b>CLASES</b>	<b>SUPERFICIE (ha)</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>
<b>AREAS ARTIFICIALES</b>	47.001	3,4
<b>AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION</b>	37.801	2,7
<b>BOSQUES</b>	409.194	29,7
<b>CUERPOS DE AGUA</b>	25.816	1,9
<b>HUMEDALES</b>	5.508	0,4
<b>NIEVES Y GLACIARES</b>	198.352	14,4
<b>PLANTACION FORESTAL</b>	34.042	2,5
<b>PRADERAS Y MATORRALES</b>	350.723	25,5
<b>TERRENO AGRICOLA</b>	268.724	19,5
<b>TOTAL</b>	<b>1.377.161</b>	<b>100,0</b>

**Tabla 3-3: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Mataquito**

<b>Río Mataquito</b>		
<b>CLASES</b>	<b>SUPERFICIE (ha)</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>
<b>PRADERAS Y MATORRALES</b>	183.857	29,0
<b>AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION</b>	151.521	23,9
<b>TERRENOS AGRICOLAS</b>	94.178	14,8
<b>BOSQUES</b>	91.244	14,4
<b>PLANTACIONES FORESTALES</b>	67.507	10,6
<b>NIEVES Y GLACIARES</b>	19.455	3,1
<b>AREAS ARTIFICIALES</b>	13.036	2,1
<b>CUERPOS DE AGUA</b>	12.387	2,0
<b>HUMEDALES</b>	1.848	0,3
<b>TOTAL</b>	<b>635.033</b>	<b>100,0</b>

**Tabla 3-4: Clases de usos de la tierra. Cuenca del río Maule**

<b>Río Maule</b>		
<b>CLASES</b>	<b>SUPERFICIE (ha)</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>
<b>PRADERAS Y MATORRALES</b>	594.970	28,1
<b>TERRENOS AGRICOLAS</b>	430.560	20,3
<b>PLANTACION FORESTAL</b>	363.773	17,2
<b>AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION</b>	321.549	15,2
<b>BOSQUE</b>	293.300	13,9
<b>NIEVES Y GLACIARES</b>	48.647	2,3
<b>CUERPOS DE AGUA</b>	32.642	1,5
<b>AREAS ARTIFICIALES</b>	26.746	1,3
<b>HUMEDALES</b>	4.815	0,2
<b>TOTAL</b>	<b>2.117.002</b>	<b>100,0</b>

### 3.5. Hidrogeología

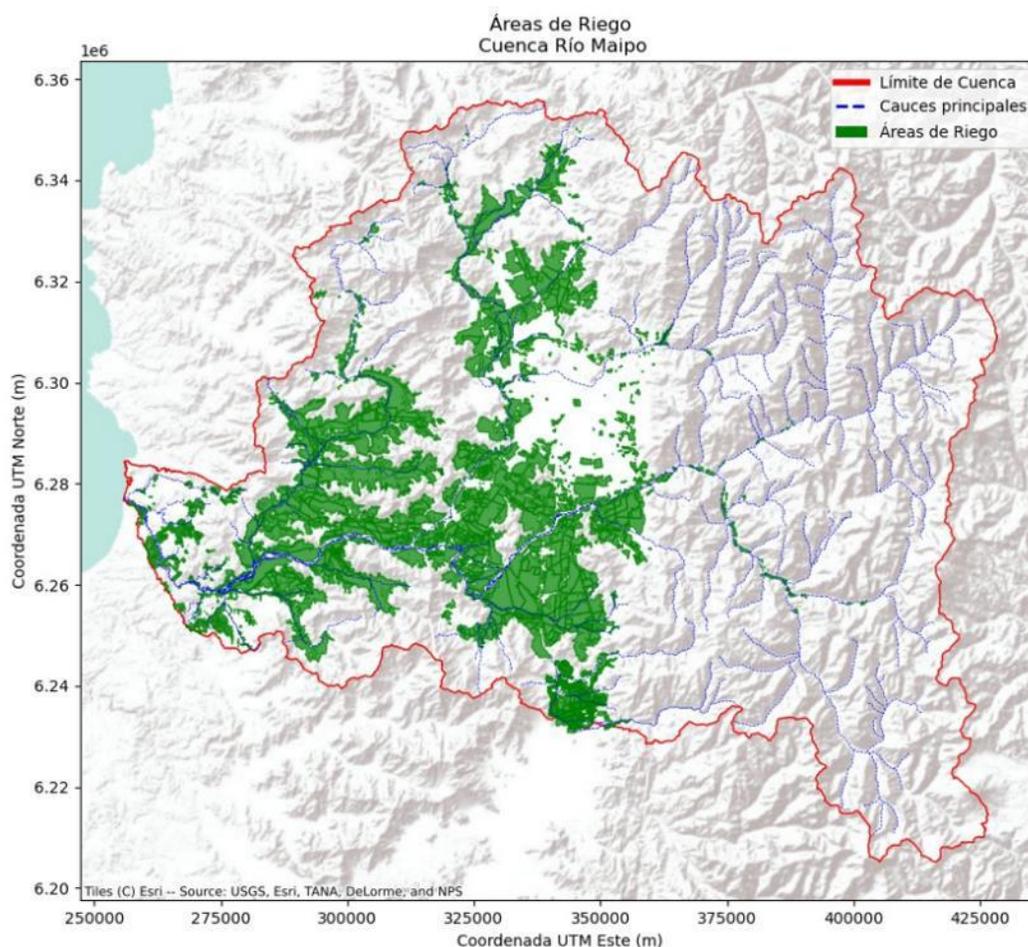
Para caracterizar la hidrogeología de las cuencas en estudio se estudiaron las estructuras geológicas, propiedades hidráulicas de los acuíferos, niveles de agua subterránea, etc., para determinar la interacción río-acuífero de cada cuenca en análisis. Para ello se realizaron simulaciones mediante modelamiento matemático. El resultado de las simulaciones efectuadas arroja la interacción río-acuífero que se muestra en la Tabla 3-5 para las cuatro cuencas en estudio.

**Tabla 3-5: Interacción río-acuífero para las cuencas en estudio**

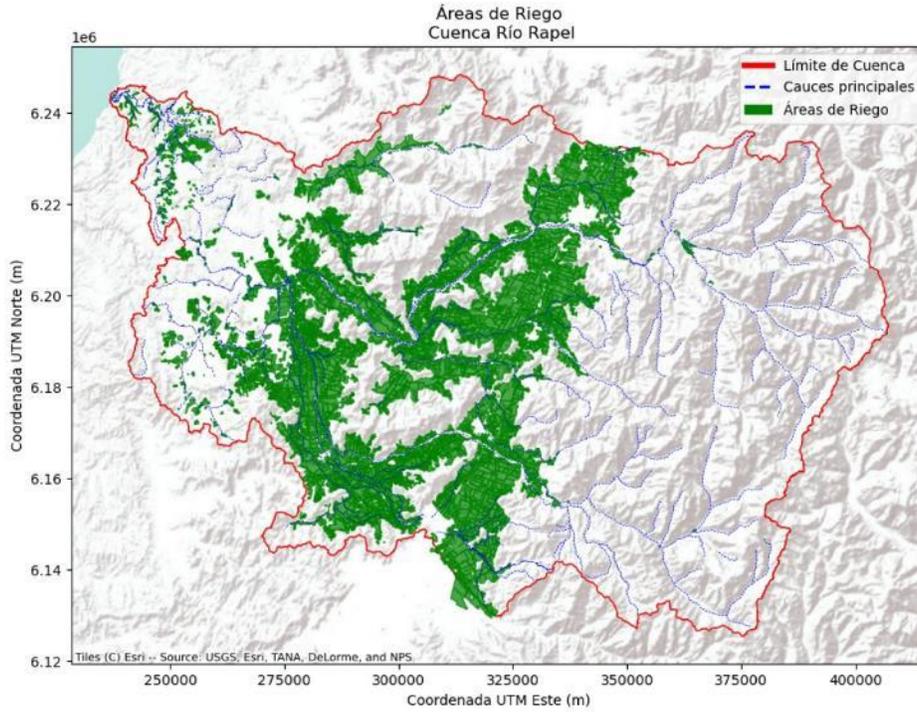
Flujos río-acuífero (m <sup>3</sup> /s)	Maipo	Rapel	Mataquito	Maule
Afloramientos desde acuífero al río	36,73	42,83	6,88	55,84
Recarga desde río a acuífero	18,85	21,98	3,59	28,73
Flujo neto río-acuífero	-17,88	-20,86	-3,29	-27,08

### 3.6. Áreas de riego e infraestructura de riego

Para poder efectuar un correcto balance oferta-demanda, se identificó la infraestructura y zonas de riego para cada una de las cuencas. La infraestructura fue empleada para calcular la demanda agrícola al considerarse la eficiencia de conducción por canales, mientras que las áreas de riego cumplieron un rol fundamental para el cálculo en volumen de la demanda agrícola. Desde la Figura 3-1 a la Figura 3-8 se muestra la infraestructura y áreas de riego para cada una de las cuencas en estudio.

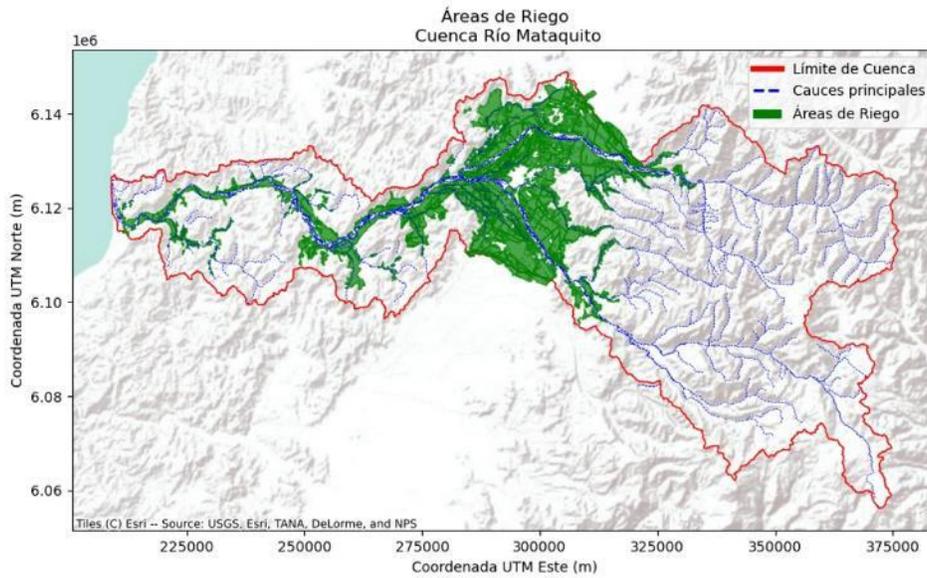
**Figura 3-1: Áreas de riego cuenca del río Maipo.**

Fuente: Elaboración propia.



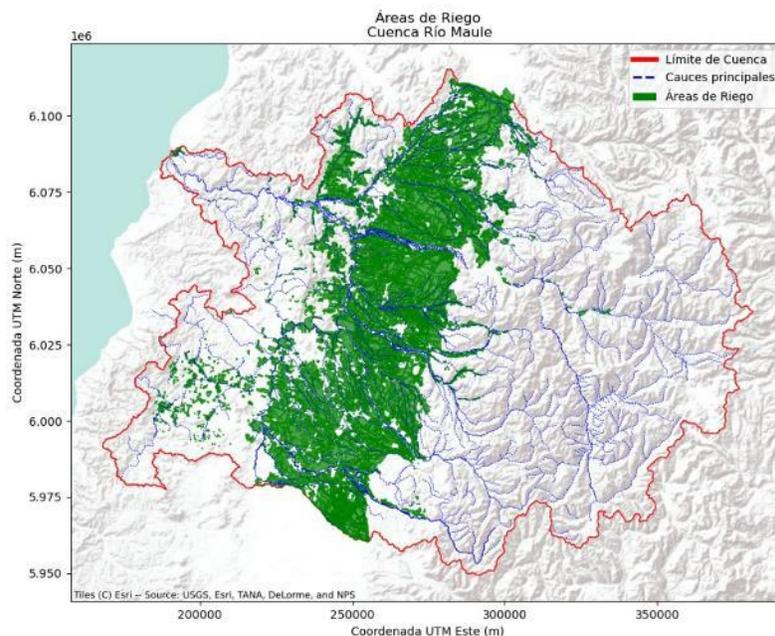
**Figura 3-2: Áreas de riego cuenca del río Rapel.**

Fuente: Elaboración propia.

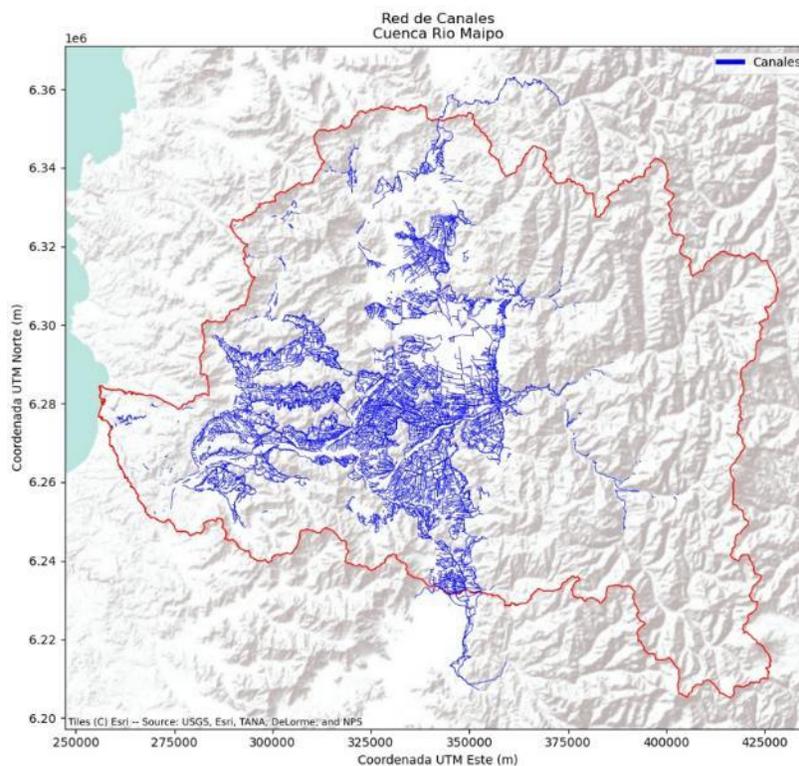


**Figura 3-3: Áreas de riego cuenca del río Mataquito.**

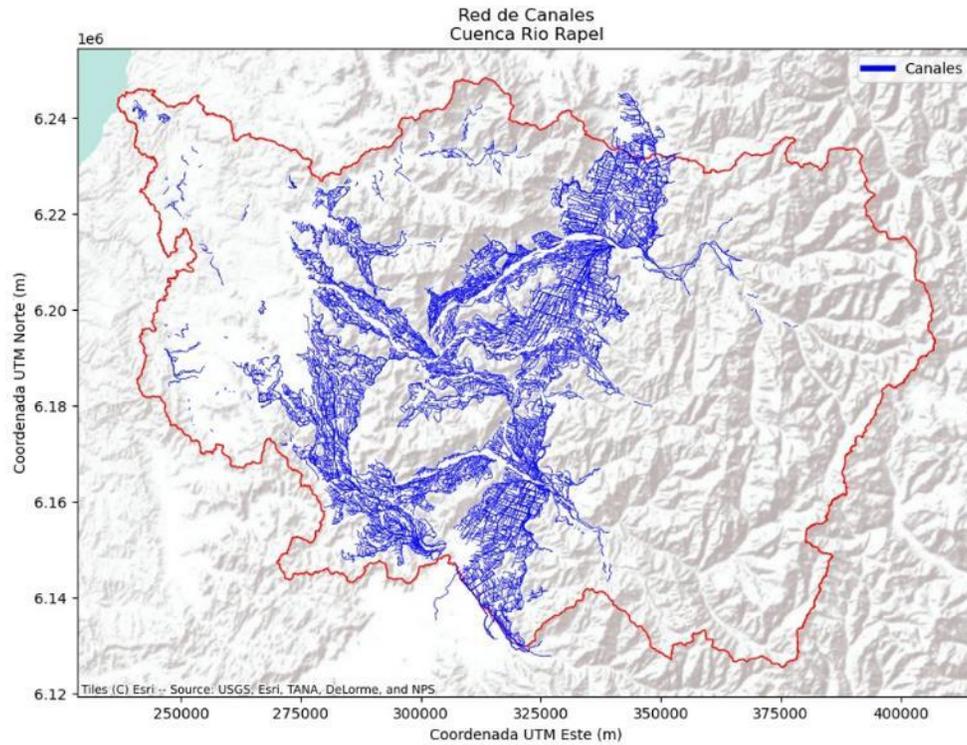
Fuente: Elaboración propia.



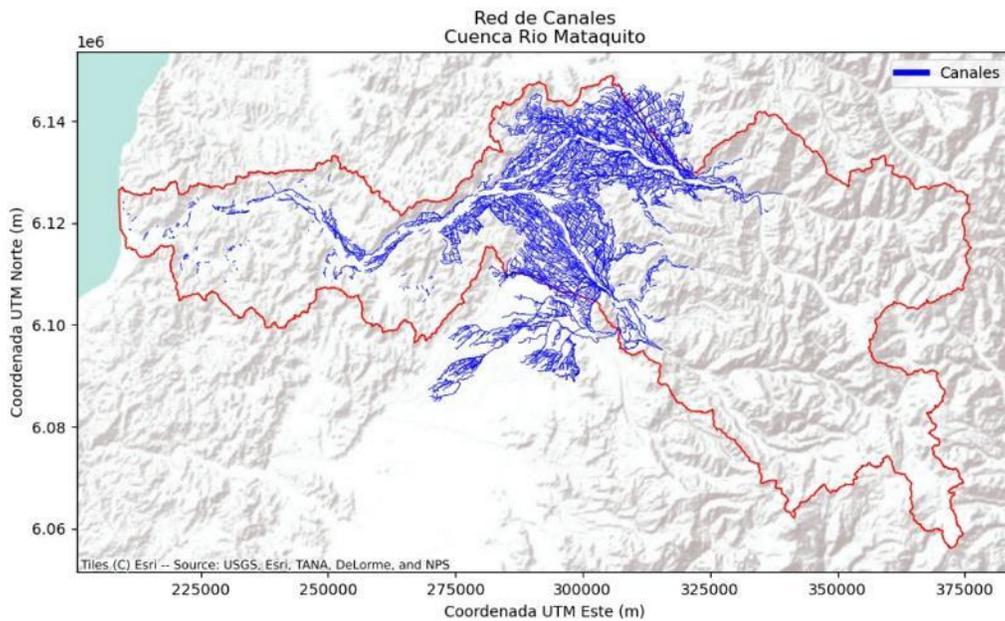
**Figura 3-4: Áreas de riego cuenca del río Maule.**  
Fuente: Elaboración propia.



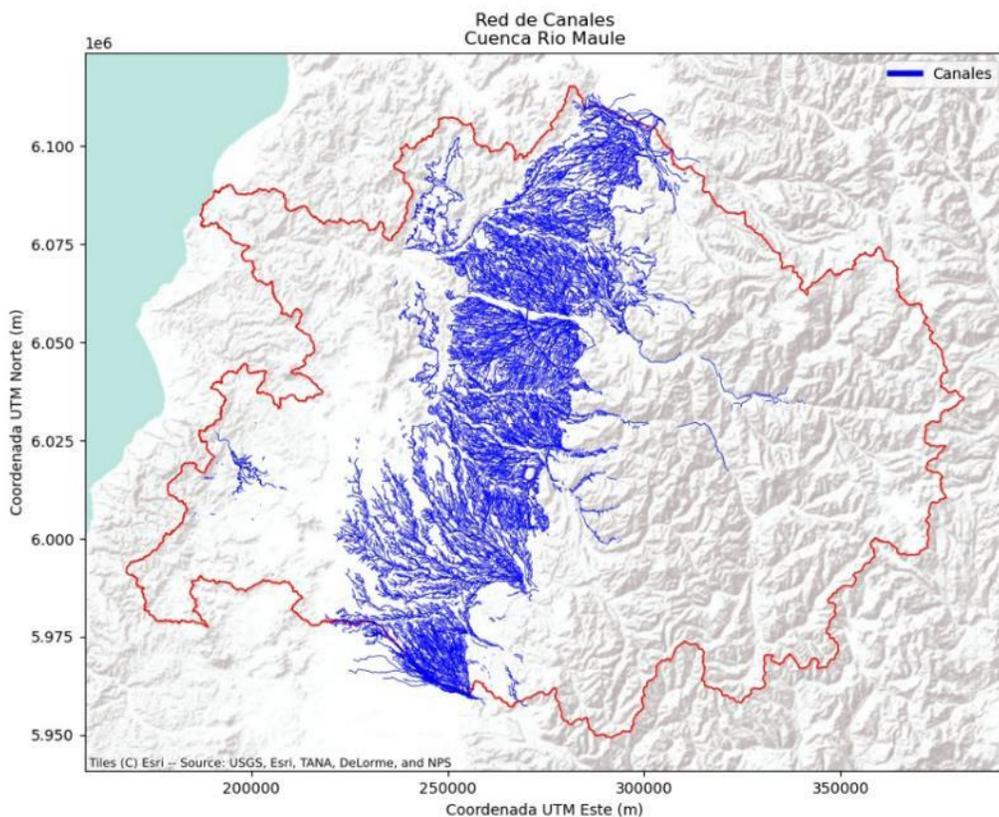
**Figura 3-5: Red de canales en la cuenca del río Maipo.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3-6: Red de canales en la cuenca del río Rapel.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3-7: Red de Canales en la cuenca del río Mataquito.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3-8: Red de canales en la cuenca del río Maule.**  
Fuente: Elaboración propia

#### 4. EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE EFECTIVAMENTE REGADA

La evolución de la superficie efectivamente regada se determinó utilizando imágenes satelitales del sensor Landsat 5 Thematic Mapper (TM) y Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). Se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (normalized difference vegetation index, NDVI), en un período de 14 años, para estimar la superficie agrícola efectivamente regada en las Cuencas del Río Maipo, Río Rapel, Río Mataquito y Río Maule. Se aplicó el método Análisis de Imagen Basada en Objetos (Object-Based Image Analysis, OBIA) a las imágenes de referencia de NDVI, para definir las áreas bajo riego en cada temporada de análisis, aplicando como criterio de clasificación el valor umbral mínimo a la clase regada entre 0,4 y 0,5, dependiendo de la fecha observada.

La estimación de la superficie efectivamente regada en las cuencas del Río Maipo, Río Rapel, Río Mataquito y Río Maule permitió conocer la variabilidad temporal en las áreas de riego. Mayormente, la superficie regada superó el 70% del área potencialmente bajo riego en un período de 14 años. Éstas se concentran en sectores donde la pendiente es inferior al 15% en toda el área de estudio.

La variabilidad temporal de la superficie efectivamente regada ha tenido un comportamiento similar en las cuatro cuencas analizadas durante los períodos 2007-2008 y 2015-2016, 2018-2019. En estos, se observa una disminución en la estimación de la superficie regada, respecto al todo el período analizado. Por el contrario, los períodos donde se registran un aumento en la superficie efectivamente regada, para las cuatro cuencas, son 2006-2007, 2010-2011 y 2019-2020. En el último período analizado 2020-2021 la superficie efectivamente regada registra una disminución las cuencas del Río Rapel y Río Mataquito y un aumento en las cuencas del Río Maipo y Río Maule.

## 5. DEMANDA AGRÍCOLA

La demanda de agua de los cultivos agrícolas en el área de estudio se determinó en base a la metodología de la FAO, la cual utiliza un coeficiente que relaciona la evapotranspiración potencial o de referencia con la evapotranspiración del cultivo, denominado Coeficiente de cultivo (Kc). Para determinar la evapotranspiración potencial a partir de datos de una estación meteorológica se aplicó la ecuación de Penman-Monteith. Luego, mediante un balance hídrico a nivel del suelo se evaluaron los flujos de entradas y salidas de agua, para determinar la demanda de agua de riego de cada cultivo analizado. El balance de entradas y salidas considera las siguientes variables.

1. Precipitación efectiva (mm).
2. Coeficientes de cultivo (Kc).
3. Profundidades de raíz (cm).
4. Humedad aprovechable (mm).
5. % de eficiencia del método de riego.

Lo anterior permitió obtener la demanda agrícola bruta en predio, utilizando tanto eficiencias de riego máximas como mínimas. Luego, la demanda agrícola bruta en bocatoma se calculó a partir de la fórmula de Moritz, la cual considera el caudal inicial del tramo de canal considerado ( $m^3/s$ ), el coeficiente relacionado al tipo de suelo del canal, la longitud del canal (km), la velocidad del flujo ( $m/s$ ) para determinar la pérdida por infiltración ( $m^3/s$ ) y finalmente el porcentaje de infiltración (%). La Tabla 5-1 muestra las demandas agrícolas brutas en predio de los cultivos que se abastecen con fuentes hídricas de las cuencas del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule, junto con la demanda bruta en bocatoma que considera la pérdida por infiltración debido a la conducción en canales y por último la pérdida promedio de los canales por cuenca.

**Tabla 5-1: Porcentaje de pérdidas por infiltración en canales de riego.**

Cuenca	DEMANDA AGRÍCOLA Temporada 2020/2021 ( $Hm^3$ )		Pérdida en Canales
	Bruta en Predio	Bruta en Bocatoma	(%)
<b>Maipo</b>	1.451	1.701	15
<b>Rapel</b>	1.753	1.988	12
<b>Mataquito</b>	926	1.070	13
<b>Maule</b>	3.365	3.867	13

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la información de DAA, obtenida de DGA y geolocalizada, se separó la demanda de agua que correspondería a acuíferos, basado en un análisis visual de las zonas de riego, en base a imágenes satelitales, que no cuentan con infraestructura de conducción de aguas superficiales y presentan derechos subterráneos otorgados. Las zonas de riego cuyas demandas no fue posible asociar a una fuente de abastecimiento, por estar sobre cota de canal y/o no contar con información de planos de catastro de usuarios de aguas DGA, quedaron como “Sin Información” de fuente hídrica y canal, y asociada a recursos superficiales para efecto del Balance. Las demandas agrícolas sin asociar en la cuenca del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule corresponden a un 0,6%, 1,9%, 2% y 0,8%, respectivamente.

Las demandas de las zonas captadas de acuíferos en la cuenca del río Maipo se entregan en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-2: Demanda Bruta de Riego que son captadas de acuíferos.**

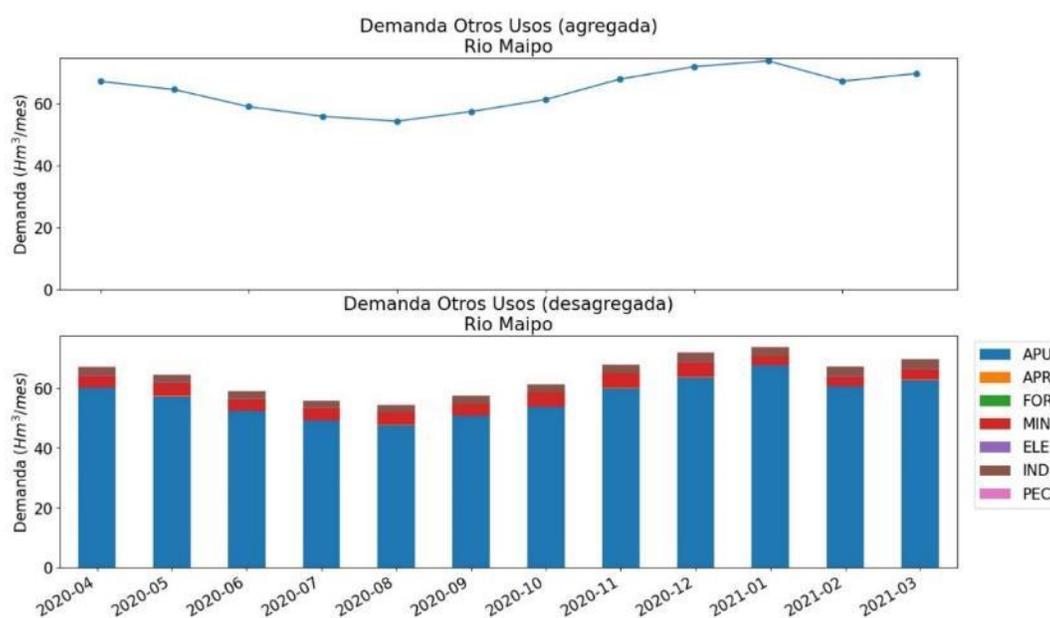
<b>Demanda bruta de riego temporada 2020/2021 (Hm<sup>3</sup>)</b>				
<b>MES</b>	<b>Cuenca del río Maipo</b>	<b>Cuenca del río Rapel</b>	<b>Cuenca del río Mataquito</b>	<b>Cuenca del río Maule</b>
<b>ABR</b>	6,1	4,4	0,9	4,8
<b>MAY</b>	2,1	0,0	0,0	0,0
<b>JUN</b>	0,9	0,0	0,0	0,0
<b>JUL</b>	1,0	0,0	0,0	0,0
<b>AGO</b>	1,8	0,0	0,0	0,0
<b>SEP</b>	4,0	0,1	0,0	0,0
<b>OCT</b>	8,9	1,6	0,4	0,8
<b>NOV</b>	15,4	8,1	2,1	9,4
<b>DIC</b>	19,9	15,7	3,8	22,4
<b>ENE</b>	18,8	16,8	4,0	25,8
<b>FEB</b>	13,2	12,5	2,9	19,2
<b>MAR</b>	9,9	9,5	2,2	13,5
<b>ANUAL</b>	102,0	68,6	16,3	95,8

Fuente: Elaboración propia

## 6. DEMANDA DE OTROS USOS

La demanda de otros usos se determinó para la cuenca del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule de acuerdo con la metodología del estudio “Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile”, (DGA, 2017b) S.I.T. N° 419 .

El resumen de los resultados de la demanda de Otros Usos para la temporada de 2020/2021 de las cuencas del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule se ilustra en la Figura 6-1, Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4, respectivamente. Los valores de estas demandas asociados a cada cuenca se presentan en la Tabla 6-2, Tabla 6-3, Tabla 6-4 y Tabla 6-5. La nomenclatura de cada demanda se presenta en la Tabla 6-1.



**Figura 6-1: Hidrograma de demanda volumétrica de otros usos. Cuenca río Maipo.**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-1: Nomenclatura de las demandas de otros usos utilizada.**

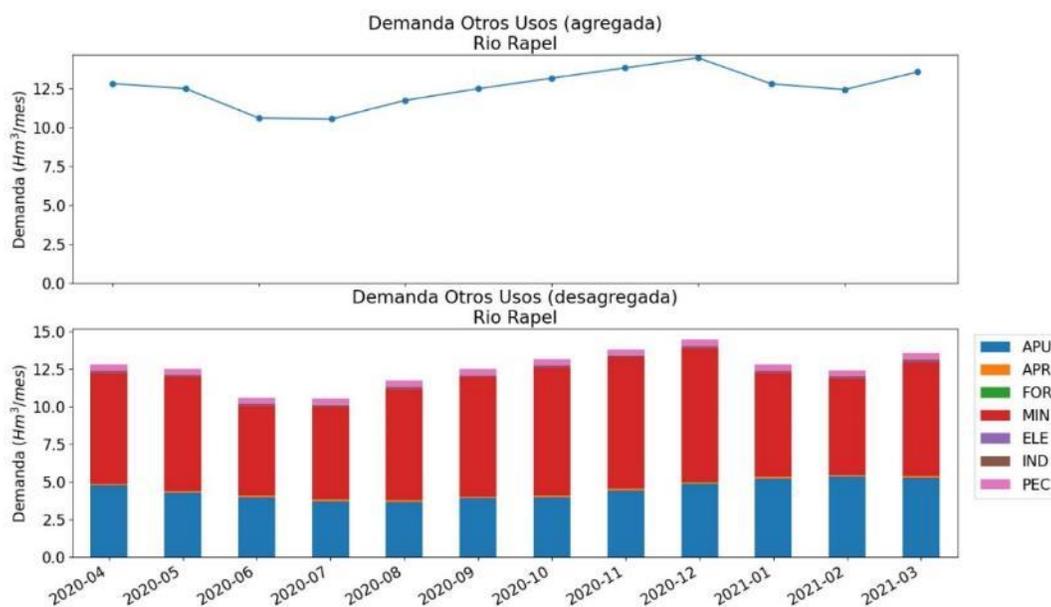
<b>APU</b>	Agua Potable Urbana	<b>ELE</b>	Uso de Agua de Generación Eléctrica
<b>APR</b>	Agua Potable Rural	<b>IND</b>	Uso de Agua Industrial
<b>FOR</b>	Uso de Agua Forestal	<b>PEC</b>	Uso de Agua Pecuario
<b>MIN</b>	Uso de Agua en Minería		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-2: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Maipo.**

Mes	APU	APR	FOR	MIN	ELE	IND	PEC	Total Mes (Hm <sup>3</sup> )
2020-04	60,11	0,07	0,01	3,81	0,13	2,95	0,12	67,20
2020-05	57,26	0,07	0,01	4,46	0,14	2,49	0,11	64,54
2020-06	52,31	0,07	0,01	3,96	0,11	2,45	0,12	59,03
2020-07	49,17	0,07	0,01	4,10	0,10	2,32	0,13	55,89
2020-08	47,67	0,07	0,01	4,12	0,06	2,32	0,12	54,36
2020-09	50,77	0,07	0,01	3,89	0,02	2,60	0,11	57,47
2020-10	53,75	0,07	0,01	4,77	0,03	2,61	0,12	61,35
2020-11	60,00	0,07	0,01	4,85	0,02	2,86	0,11	67,91
2020-12	63,65	0,07	0,01	4,96	0,04	3,10	0,12	71,95
2021-01	67,61	0,07	0,00	2,89	0,10	3,01	0,11	73,79
2021-02	60,60	0,06	0,00	3,13	0,11	3,24	0,10	67,25
2021-03	62,76	0,07	0,00	3,57	0,07	3,16	0,12	69,74
<b>Total año</b>	<b>685,66</b>	<b>0,82</b>	<b>0,08</b>	<b>48,50</b>	<b>0,93</b>	<b>33,10</b>	<b>1,39</b>	<b>770,48</b>

Fuente: Elaboración propia.



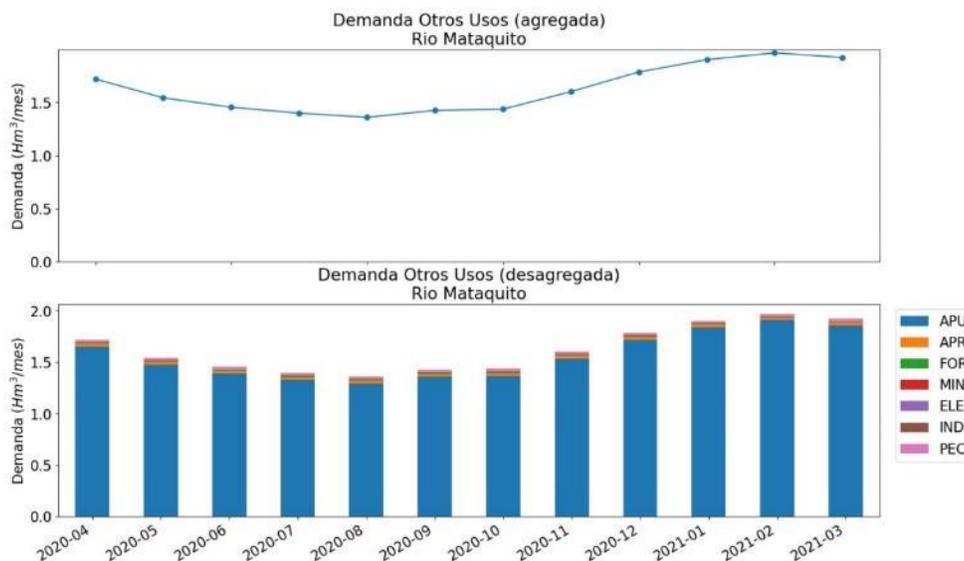
**Figura 6-2: Hidrograma de demanda volumétrica de otros usos. Cuenca río Rapel.**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-3: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Rapel.**

Mes	APU	APR	FOR	MIN	ELE	IND	PEC	Total Mes (Hm <sup>3</sup> )
2020-04	4,76	0,11	0,01	7,34	0,03	0,12	0,43	12,79
2020-05	4,26	0,11	0,01	7,56	0,02	0,10	0,41	12,47
2020-06	3,98	0,11	0,01	5,94	0,03	0,09	0,44	10,58
2020-07	3,71	0,11	0,01	6,12	0,02	0,10	0,47	10,53
2020-08	3,66	0,11	0,01	7,38	0,04	0,09	0,44	11,72
2020-09	3,91	0,11	0,01	7,92	0,02	0,09	0,41	12,47
2020-10	3,97	0,11	0,01	8,51	0,01	0,10	0,44	13,14
2020-11	4,43	0,11	0,01	8,71	0,01	0,10	0,44	13,80
2020-12	4,86	0,11	0,01	8,91	0,02	0,10	0,44	14,44
2021-01	5,22	0,12	0,00	6,88	0,03	0,10	0,43	12,78
2021-02	5,33	0,11	0,00	6,44	0,03	0,10	0,40	12,41
2021-03	5,26	0,12	0,00	7,56	0,04	0,11	0,45	13,54
<b>Total año</b>	<b>53,33</b>	<b>1,34</b>	<b>0,06</b>	<b>89,27</b>	<b>0,30</b>	<b>1,20</b>	<b>5,19</b>	<b>150,67</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6-3: Hidrograma de demanda volumétrica otros usos. Cuenca río Mataquito.**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-4: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Mataquito.

Mes	APU (Hm <sup>3</sup> )	APR (Hm <sup>3</sup> )	FOR (Hm <sup>3</sup> )	MIN (Hm <sup>3</sup> )	ELE (Hm <sup>3</sup> )	IND (Hm <sup>3</sup> )	PEC (Hm <sup>3</sup> )	Total Mes (Hm <sup>3</sup> )
2020-04	1,65	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,72
2020-05	1,47	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,54
2020-06	1,39	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,45
2020-07	1,33	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,40
2020-08	1,29	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,36
2020-09	1,36	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,42
2020-10	1,36	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,43
2020-11	1,54	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,60
2020-12	1,72	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,78
2021-01	1,84	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,90
2021-02	1,91	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	1,96
2021-03	1,86	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	1,92
<b>Total año</b>	<b>18,71</b>	<b>0,32</b>	<b>0,11</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,30</b>	<b>19,50</b>

Fuente: Elaboración propia.

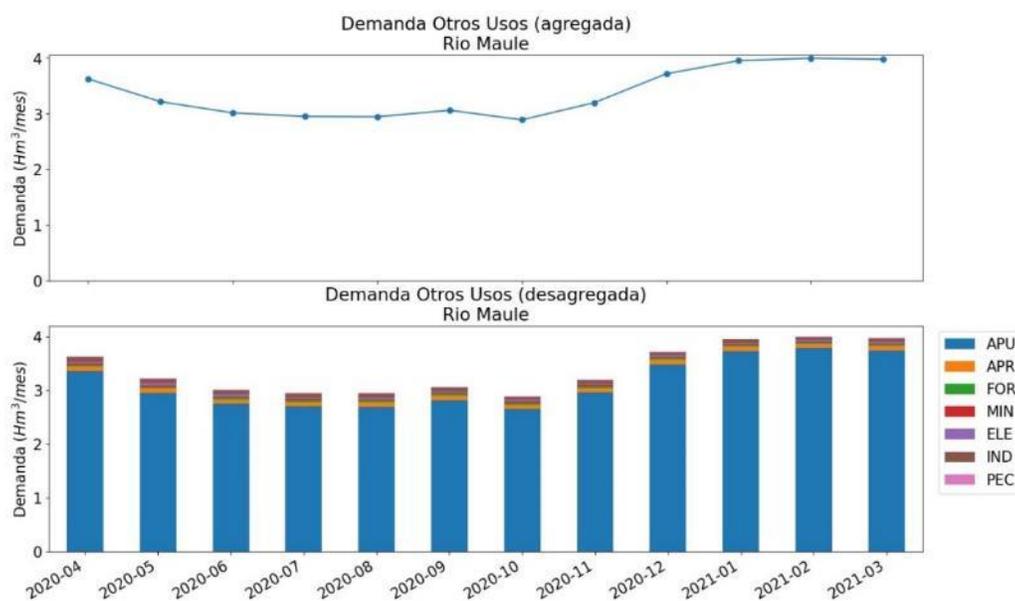


Figura 6-4: Hidrograma de demanda volumétrica otros usos. Cuenca río Maule.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-5: Demanda volumétrica de otros usos de tipo consuntiva. Cuenca río Maule.**

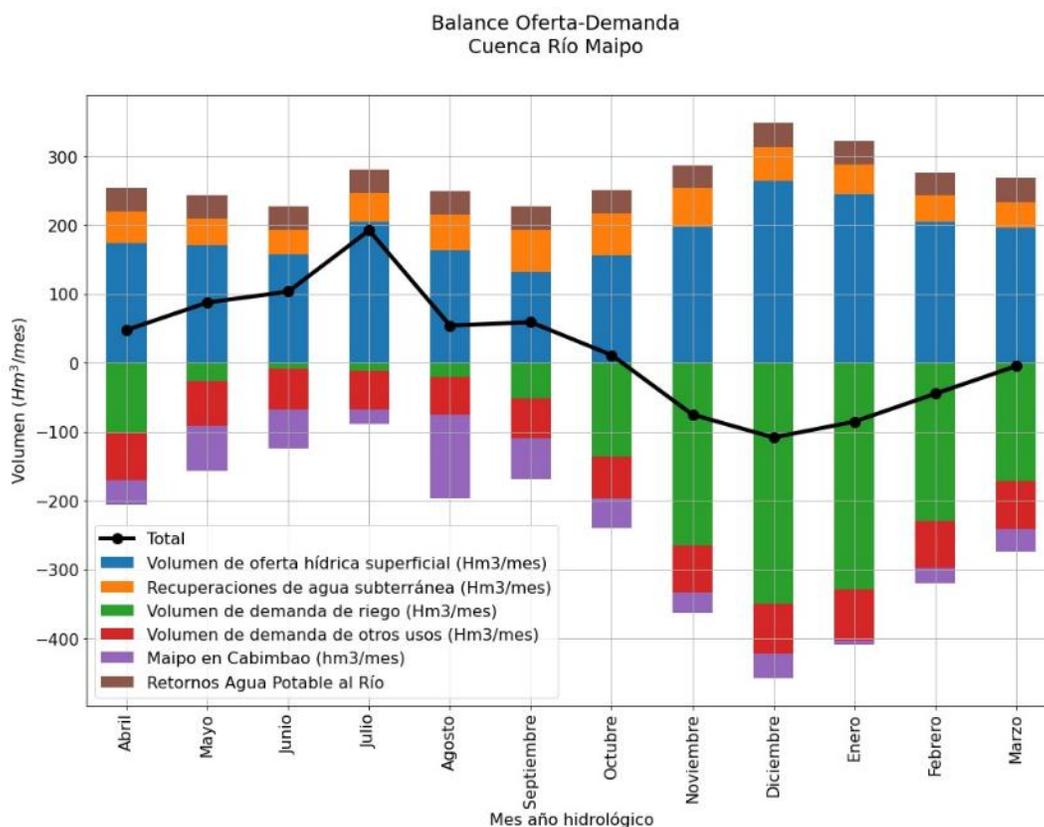
Mes	APU (Hm <sup>3</sup> )	APR (Hm <sup>3</sup> )	FOR (Hm <sup>3</sup> )	MIN (Hm <sup>3</sup> )	ELE (Hm <sup>3</sup> )	IND (Hm <sup>3</sup> )	PEC (Hm <sup>3</sup> )	Total mes (Hm <sup>3</sup> )
<b>2020-04</b>	3,36	0,08	0,03	0,02	0,04	0,08	0,01	3,62
<b>2020-05</b>	2,95	0,08	0,04	0,02	0,04	0,08	0,01	3,21
<b>2020-06</b>	2,75	0,08	0,03	0,02	0,04	0,08	0,01	3,01
<b>2020-07</b>	2,70	0,08	0,04	0,02	0,03	0,07	0,01	2,95
<b>2020-08</b>	2,69	0,08	0,04	0,02	0,03	0,08	0,01	2,94
<b>2020-09</b>	2,81	0,08	0,03	0,02	0,03	0,07	0,01	3,06
<b>2020-10</b>	2,65	0,08	0,04	0,02	0,03	0,06	0,01	2,89
<b>2020-11</b>	2,96	0,08	0,03	0,02	0,03	0,06	0,01	3,20
<b>2020-12</b>	3,48	0,08	0,04	0,02	0,03	0,06	0,01	3,72
<b>2021-01</b>	3,72	0,08	0,03	0,01	0,04	0,06	0,01	3,95
<b>2021-02</b>	3,79	0,08	0,03	0,01	0,03	0,06	0,01	4,00
<b>2021-03</b>	3,74	0,08	0,03	0,01	0,04	0,06	0,01	3,97
<b>Total año</b>	37,58	0,98	0,40	0,20	0,41	0,83	0,12	40,52

Fuente: Elaboración propia.

## 7. OFERTA Y BALANCE OFERTA-DEMANDA

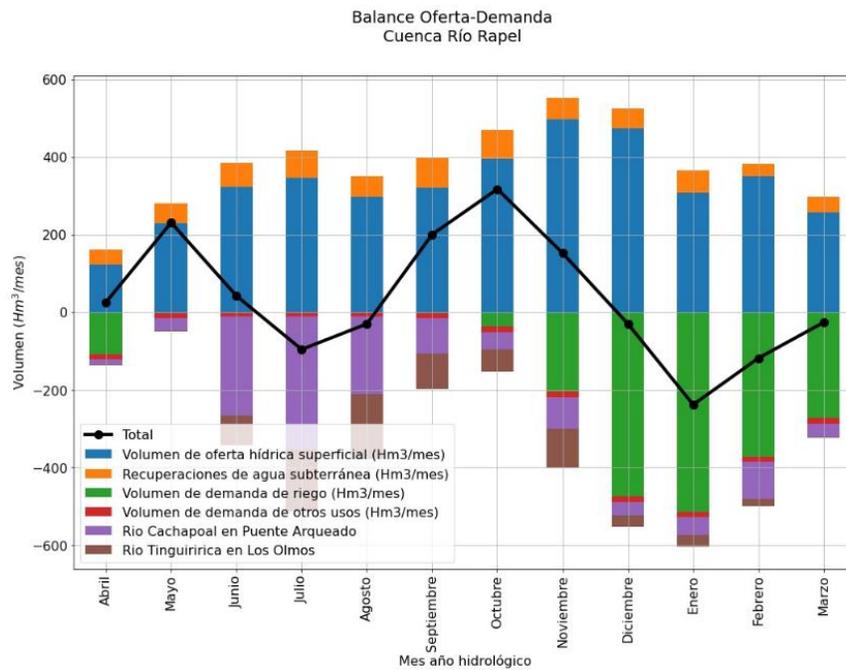
Las variables analizadas corresponden a la oferta de agua, superficial y subterránea, junto con la demanda de agua para cada cuenca. El balance o relación oferta-demanda de agua se determinó comparando la oferta hídrica superficial disponible en las cabeceras de las cuencas, las recuperaciones en cauces y la demanda correspondiente al riego en bocatoma y los otros usos consuntivos. La cuantificación de la demanda en bocatoma consideró las ineficiencias en la conducción dentro de los canales de riego presentes en las distintas zonas como un porcentaje adicional en la demanda.

Cabe mencionar que este balance se realizó en base a las fuentes hídricas correspondientes a cada cuenca y las demandas que se abastecen por dichas fuentes hídricas, lo que considera los trasvases de agua entre cuencas. Los resultados del balance a escala mensual para cada cuenca en estudio se presentan en la Figura 7-1, Figura 7-2, Figura 7-3 y Figura 7-4.



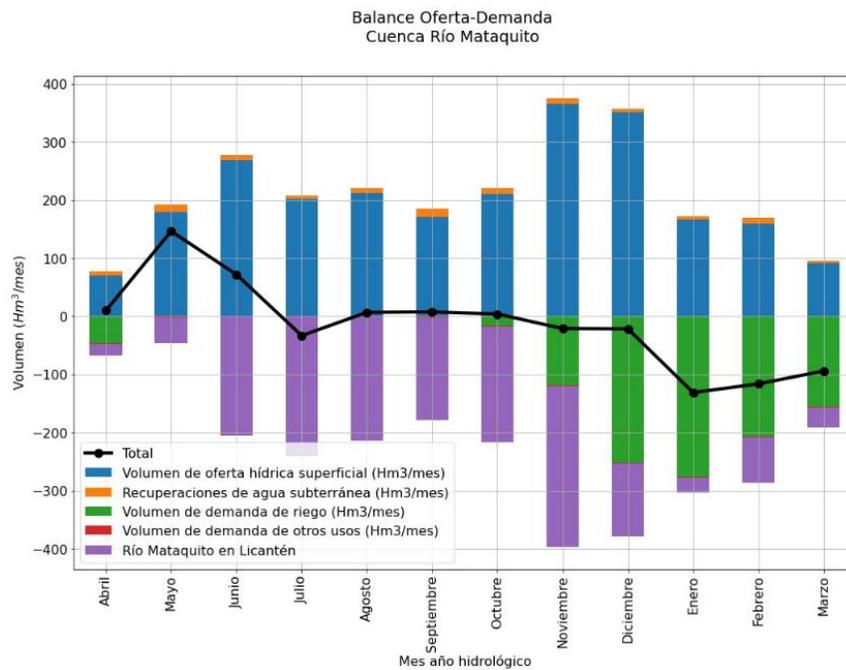
**Figura 7-1: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Maipo.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7-2: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Rapel.**

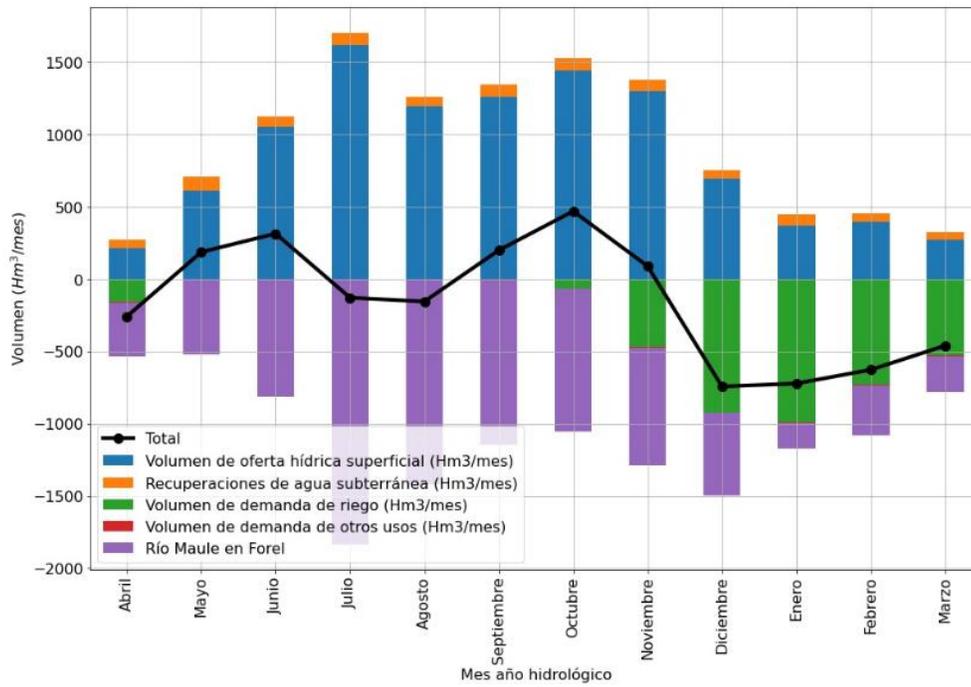
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7-3: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Mataquito.**

Fuente: Elaboración propia.

Balance Oferta-Demanda  
Cuenca Río Maule



**Figura 7-4: Hidrograma de volúmenes agregados y desagregados en Balance Oferta-Demanda. Cuenca Río Maule.**  
Fuente: Elaboración propia.

## 8. MODELO DE PRONÓSTICO DE CAUDALES

La determinación de la oferta hídrica en subcuencas de cabecera, así como los pronósticos de caudales para la temporada de riego se realizaron empleado el modelo hidrológico de precipitación-escorrentía y derretimiento de nieves Snowmelt Runoff Model (SRM), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) (Martinec et al., 2008). Este modelo fue desarrollado originalmente para simular y pronosticar la escorrentía a escala diaria en régimen natural junto con el equivalente en agua de nieve en cuencas de alta montaña, y luego fue mejorado por su desarrollador original, incorporando un módulo glaciar para representar los aportes glaciares a la escorrentía total (Schaper et al., 1999).

### 8.1. Resultados del modelo hidrológico

El modelo SRM calcula los caudales medios diarios de una subcuenca mediante parámetros asociados a escorrentía, nieve y glaciares en base al clima, nieve registrada y morfología. Estos parámetros se ajustaron con el objetivo representar observaciones históricas de caudales medios diarios y equivalente en agua de nieve. Para esto, el modelo fue calibrado entre los años 2000 a 2012 y validado dentro del período de 2013-2021. La calibración del modelo hidrológico SRM se realizó utilizando 3 algoritmos de optimización, incluyendo el esquema empleado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), minimizando las diferencias entre las simulaciones de caudal y equivalente en agua de nieve.

Los estadígrafos asociados al proceso de calibración y validación corresponden al Coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta KGE, Coeficiente de determinación  $R^2$ , Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe N-SE, Diferencia volumétrica en temporada de riego Dvr y Diferencia volumétrica anual Dva. Los resultados obtenidos para estos indicadores se sintetizan en la Tabla 8-1.

Los resultados del modelo pronosticaron caudales de deshielo bajo el caudal de probabilidad de excedencia de 85% (Q85%) para la temporada 2021/2022. La herramienta predictiva de caudales junto con los resultados del pronóstico en detalle se presentó en 4 tomos separados por cada cuenca en estudio.

**Tabla 8-1: Síntesis de estadígrafos de evaluación de la eficiencia del modelo.**

Cuenca	Subcuenca	Periodo	KGE	R <sup>2</sup>	N-SE	Dva	Dvr
<b>Río Maipo</b>	Río Mapocho en Los Almendros	Calibración	0,7	0,64	0,64	-2%	-11%
	Río Mapocho en Los Almendros	Validación	0,61	0,46	0,45	1%	-7%
	Río Maipo en el Manzano	Calibración	0,70	0,87	0,87	1%	-4%
	Río Maipo en el Manzano	Validación	0,69	0,62	0,58	-10%	-17%
<b>Río Rapel</b>	Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes	Calibración	0,74	0,82	0,80	2%	-7%
	Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes	Validación	0,78	0,73	0,73	-7%	-2%
	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	Calibración	0,79	0,75	0,75	-0,9%	-8%
	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	Validación	0,70	0,65	0,65	-0,7%	-11%
	Río Claro en Hacienda Las Nieves	Calibración	0,46	0,39	0,39	-4%	-11%
	Río Claro en Hacienda Las Nieves	Validación	0,48	0,42	0,39	-17%	-1%
<b>Río Mataquito</b>	Río Teno Después de Junta con Claro	Calibración	0,71	0,65	0,65	1%	-1%
	Río Teno Después de Junta con Claro	Validación	0,64	0,69	0,67	10%	-2%
	Río Colorado en Junta con Palos	Calibración	0,81	0,69	0,69	-3%	0%
	Río Colorado en Junta con Palos	Validación	0,73	0,66	0,63	12%	4%
	Río Palos en Junta con Colorado	Calibración	0,78	0,70	0,70	0%	-3%
	Río Palos en Junta con Colorado	Validación	0,73	0,55	0,48	9%	-14%
<b>Río Maule</b>	Río Maule en Armerillo	Calibración	0,81	0,74	0,74	-4%	-4%
	Río Maule en Armerillo	Validación	0,80	0,66	0,67	11%	-7%

Fuente: Elaboración propia.

## 9. PLATAFORMA SIG

Las coberturas y archivos presentados en este capítulo son de tipo vectorial, ráster, NetCDF y de texto. Los archivos vectoriales y ráster están en datum WGS84, sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), en huso 19 sur (EPSG:32719), mientras que los archivos NetCDF se encuentran en coordenadas geográficas (EPSG: 4326).

### 9.1. Archivos vectoriales

Los archivos vectoriales se encuentran en formato shapefile (.shp), los que pueden ser visualizadas en programas GIS, pero se entregaron en un archivo de proyecto, empaquetado, para ser visualizado en QGIS 2.18.3. Esto fue respaldado en una “Máquina Virtual”.

La información vectorial está dispuesta por cuencas de estudio y dentro de esta, está categorizada por: información base, demanda de agua, oferta de agua, relación oferta-demanda, infraestructura de riego y organizaciones de usuarios de aguas; generando una estructura que tiene relación con cada actividad del estudio. Se generó una estructura de la lista de coberturas, junto con la descripción de los archivos del proyecto SIG para cada cuenca.

### 9.2. Archivos ráster

Los archivos ráster consisten en datos satelitales MODIS en formato TIFF, DEM ALOS PALSAR en formato jp2 y la cobertura nival en formato GeoTIFF, generada en base a los archivos MODIS. Los archivos fueron reproyectados y procesados para generar los productos. La lista de coberturas se muestra en la Tabla 9-1.

**Tabla 9-1: Archivos ráster. Proyecto SIG.**

Cobertura Temática	Fuente	Año
DEM	CIREN	2020
Productos MODIS	CIREN	2021
Nieve	CIREN	2021

Fuente: Elaboración propia.

El modelo digital de elevación o DEM utilizado, fue obtenido a partir de los datos capturados del satélite ALOS y el sensor PALSAR (Rosenqvist et al., 2007). Los archivos MODIS, corresponden a los datos MOD10A capturados por el satélite del mismo nombre (Hall et al., 2016). Las coberturas nivales corresponden a productos diarios MODIS versión 6 para las subcuencas de cabecera.

### 9.3. Archivos NetCDF

El formato NetCDF o formulario de datos comunes en red, es un formato que permite almacenar datos científicos multidimensionales, como las precipitaciones y la temperatura. Para poder visualizar este tipo de archivos se pueden utilizar un software gratuito llamado Panoply, el cual se puede descargar en el link <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>. La lista de archivos NetCDF se muestra en la Tabla 9-2.

**Tabla 9-2: Archivos NetCDF. Proyecto SIG.**

Cobertura Temática	Fuente	Año
Precipitaciones	DGA,DMC, CEN	2021
Temperaturas	DGA,DMC, CEN	2021

Fuente: Elaboración propia.

Los archivos de precipitación y temperatura muestran la distribución de estos en la zona de estudio, de forma diaria. Las coberturas glaciares y nivales muestran el porcentaje de cubierta de glaciares y nieve en las subcuencas de cabecera.

### 9.4. Archivos CSV

El archivo de curvas hipsométricas fue generado en base al DEM ALOS PALSAR y se encuentra en formato CSV y puede ser visualizado en una gran variedad de programas, como Bloc de notas de Microsoft, LibreOffice, Microsoft Excel, etc. La lista de coberturas se muestra en la Tabla 9-3.

**Tabla 9-3: Archivos CSV. Proyecto SIG.**

Cobertura Temática	Fuente	Año
Curvas Hipsométricas	CIREN	2021
Fracción cubierta de nieve diaria por banda. 2000 a 2020	CIREN	2021
Fracción cubierta de nieve diaria de los glaciares por banda. 2000 a 2020	CIREN	2021

Fuente: Elaboración propia.

## **10. RESUMEN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **10.1. Principales conclusiones del estudio**

El trabajo desarrollado durante el presente estudio logró actualizar el uso del suelo de la temporada agrícola 2020-2021, para la cuenca del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule, logrando identificar en muchos casos, hasta el nivel de especie y en otros hasta el nivel de Tipo de uso, todos dentro de la clase terrenos agrícola.

La cuenca del río Maipo ocupa una superficie total de 1.521.340 ha. El 55,4% de la superficie de la cuenca, correspondiente a 843.274 ha, son praderas, matorrales, bosques y plantaciones forestales. Sigue en importancia, la superficie ocupada por terrenos de uso agrícola correspondiente a 215.238 ha que representan un 14,1% de la superficie total de la cuenca. Es importante señalar en esta cuenca, las parcelaciones que ocupan gran parte de la superficie de terrenos agrícolas como también superficie de bosques, matorrales o praderas correspondiente a 30.953 ha que representa el 3,7 % de estas clases. El mayor énfasis en parcelas de agrado ocurre en suelos cercanos a las áreas urbanas de las distintas comunas de la cuenca, donde se han ido extendiendo las áreas artificiales y las parcelas de agrado.

La Cuenca del río Rapel ocupa una superficie total de 1.377.161 ha. El 57,7% de la superficie de la cuenca, correspondiente a 793.959 ha son praderas, matorrales, bosques y plantaciones forestales. Sigue en importancia, la superficie ocupada por la clase Terrenos Agrícolas correspondiente a 268.724 ha que representan un 19,5% de la superficie de la cuenca.

La Cuenca del río Mataquito ocupa una superficie total de 635.032,8 ha. El 54% de la superficie de la cuenca corresponde a praderas y matorrales, bosques y plantaciones forestales correspondientes a 342.608 ha. Sigue en importancia, la superficie ocupada por la clase Terrenos Agrícolas correspondiente a 94.178 ha que representa un 14,8 % de la superficie de la cuenca.

La Cuenca del río Maule ocupa una superficie total de 2.117.001,8 ha. El 59,1% de la superficie de la cuenca correspondiente a 1.252.043 ha son praderas y matorrales, bosques y plantaciones forestales. La clase Terrenos Agrícolas que ocupa una superficie de 430.560 ha y que representa un 20,3% de la superficie de la cuenca, es importante principalmente por la gran superficie destinada a praderas artificiales (94.050,3 ha).

Con información del uso actual del suelo, evapotranspiración potencial, precipitaciones y tipo de suelo, se logró determinar las necesidades netas de agua de riego a nivel mensual y agregadas por zona de riego, estimando también las necesidades brutas de riego considerando las eficiencias de aplicación de agua según los métodos de riego comúnmente utilizados, obtenidos de la información del censo agropecuario y del catastro frutícola que ODEPA y CIREN levanta periódicamente.

La demanda agrícola bruta en predio de la temporada 2020/2021 para la cuenca del río Maipo corresponde a 1.451 Hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda agrícola bruta en bocatoma para la misma temporada corresponde a 1.701 Hm<sup>3</sup> para la misma cuenca, determinando una pérdida por conducción en canales de un promedio de 15% para las áreas agrícolas que se abastecen con aguas de la cuenca del río Maipo.

La demanda agrícola bruta en predio de la temporada 2020/2021 para la cuenca del río Rapel corresponde a 1.753 Hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda agrícola bruta en bocatoma para la misma temporada corresponde a 1.988 Hm<sup>3</sup>, determinando una pérdida por conducción en canales de un promedio de 12% para las áreas agrícolas que se abastecen con aguas de la cuenca del río Rapel.

La demanda agrícola bruta en predio de la temporada 2020/2021 para la cuenca del río Mataquito corresponde a 926 Hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda agrícola bruta en bocatoma para la misma temporada corresponde a 1.070 Hm<sup>3</sup>, determinando una pérdida por conducción en canales de un promedio de 13% para las áreas agrícolas que se abastecen con aguas de la cuenca del río Mataquito.

La demanda agrícola bruta en predio de la temporada 2020/2021 para la cuenca del río Maule corresponde a 3.365 Hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda agrícola bruta en bocatoma para la misma temporada corresponde a 3.867 Hm<sup>3</sup>, determinando una pérdida por conducción en canales de un promedio de 13% para las áreas agrícolas que se abastecen con aguas de la cuenca del río Maule.

Cabe mencionar que los resultados corresponden a la situación del año 2020/2021, por lo que son esperables cambios en dicha demanda en el tiempo. Los valores obtenidos de volúmenes de demanda agrícola corresponden a un rango de referencia, debido a que los cultivos anuales varían anualmente.

Respecto al resto de las demandas hídricas, a partir de diversas fuentes de información, se logró determinar la demanda hídrica de otros usos tales como: demanda de agua potable urbana y rural, demanda para uso pecuario, uso forestal, acuícola, minero e industrial, así como también se completó la determinación de la demanda de los usos de tipo no consuntivo como demanda para generación eléctrica, caudal de reserva de uso turístico y caudal de reserva de protección ambiental.

Las demandas de Uso de Agua Potable Urbana y de Uso Minero de la cuenca del río Maipo corresponden a 19.589,7 l/s y 1.536,6 l/s para la temporada del año 2020/2021, las que representan la mayor parte de las demanda de otros usos. En el caso de la cuenca del río Rapel, las mayores demandas de otros usos corresponden a Agua Potable Urbana y Uso Minero, con 1.525,2 l/s y 2.830 l/s para la temporada del año 2020/2021, respectivamente. Las principales

demandas de otros usos de la cuenca del río Mataquito corresponden a Agua Potable Urbana y Uso Forestal, con 535,3 l/s y 47,6 l/s para la temporada del año 2020/2021, respectivamente. Por último, las principales demandas de otros usos de la cuenca del río Maule corresponden a Uso de Agua Potable Urbana y Uso Acuícola, con 1.074,7 y 1.120 l/s, respectivamente.

Respecto al estudio hidrológico, se recopilaron, revisaron y analizaron más de 30 estudios hidrológicos realizados por distintas instituciones para la cuenca en estudio, donde destaca la DGA del Ministerio de Obras Públicas, obteniendo unas fichas bibliográficas y un repositorio interactivo, junto con una completa caracterización hidrológica de las cuencas y sus afluentes, tanto para los recursos superficiales como subterráneos. Se incluyó un análisis de precipitaciones, temperaturas, escorrentía, niveles de pozos y piezometría de acuíferos, junto con la determinación de la componente del flujo base de la escorrentía. Los resultados de oferta hídrica fueron validados con estudios de la DGA (MOP).

Se realizó un análisis de la calidad del agua y una completa caracterización hidrogeológica de la cuenca en estudio, la cual incluyó geología, geomorfología, análisis de niveles y la actualización de la piezometría en planta de las cuencas. Se determinaron las interacciones entre los sistemas superficiales y subterráneos a lo largo de los distintos cauces y canales determinando sus pérdidas y/o recuperaciones. Se concluyó que las 4 cuencas en estudio presentan, en promedio, un flujo neto desde el sistema subterráneo al superficial, siendo la cuenca del río Maule la que presenta un mayor aporte. Lo anterior se debe a la extensión de la cuenca del río Maule y sus sistemas de acuíferos.

Dentro del mismo ámbito, se logró recopilar, sistematizar y analizar todos los antecedentes disponibles en CIREN, CNR y DGA, sobre la información de la infraestructura de riego existente (canales, embalses, tranques, pozos de extracción de agua subterránea, etc.) en la cuenca, logando una cartografía digital, georreferenciada y asociada a sus respectivas bases de datos. Se logró validar la información de red de canales y se pudo identificar y delimitar las zonas de riego de cada cuenca. Además, se recopiló, sistematizó y analizó el catastro georreferenciado de otorgamiento de derechos de agua y de Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs), georreferenciando sus canales asociados, para la cuenca. Se identificó un total de 9.928 km, 12.731 km, 4.742 km y 18.573 km de canales para las cuencas del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule, respectivamente.

Respecto a los objetivos presentados en la modelación, se cumplió con el alcance de calibrar y validar el modelo SRM, encontrando parámetros que son capaces de reproducir los caudales medidos en las cuencas de cabecera, garantizando la mínima varianza del error entre estos caudales simulados y medidos. La implementación del Modelo SRM en las cuencas estudiadas, entregó valores simulados que tienen una adecuada correlación con los valores medidos en las estaciones fluviométricas de la DGA, en régimen natural, tal como se aprecia en los resultados del coeficiente de determinación  $R^2$ , el coeficiente de Kling-Gupta KGE, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE, la diferencia volumétrica en temporada de riego Dvr y la

diferencia volumétrica anual Dva.

Adicionalmente se incorporó un análisis de incertidumbre al pronóstico de caudales en las subcuencas de cabecera del río Maipo, debido a que los modelos hidrológicos tienen asociado un grado de incertidumbre ya que simulan variables estocásticas continuas a través de una simplificación de los procesos físicos que ocurren en la realidad, se entrenan a partir de observaciones que contienen incertezas y debido a que el set de parámetros que reproduce las observaciones históricas minimizando la varianza entre las observaciones y las simulaciones no siempre es único (Doherty, 2015). Se concluye que la incertidumbre del modelo predictivo con un intervalo de confianza 95% aumenta en el período de deshielos y a medida que se pronostican caudales más lejanos en el tiempo. Lo anterior se debe a que la contribución de los parámetros de deshielo, como el factor grado día, es mayor en los meses de deshielo, mientras que lo segundo se explica porque las predicciones son menos certeras a medida que se alejan de los datos climáticos y nivales actuales. Asimismo, los pronósticos climáticos realizados para la temporada de riego tienden al promedio de los registros de precipitación y temperatura de 2021, por lo que las simulaciones muestran un menor aumento de la escorrentía a finales del mes de enero, tal como se observó en el año. En este sentido, a medida que se disponga de nuevas observaciones climáticas, el modelo predictivo ajusta el pronóstico.

En consecuencia, se puede señalar que el uso del Modelo SRM logró simular el caudal medio diario en las cuencas de cabecera que tienen la característica de ser nival o nivopluvial, tal como lo define el uso de este modelo. Asimismo, el uso de imágenes satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), para determinar la cobertura nival diaria, fue un importante aporte a este tipo de análisis, lo que reafirma que es posible utilizar la teledetección como un complemento a la información proporcionada por las rutas de nieve para pronosticar caudales de deshielo.

Se concluye que el modelo de escorrentía y derretimiento de nieves SRM subestimó los volúmenes de escorrentía acumulados, lo cual corresponde a un caso conservador en cuanto a estimar oferta hídrica en régimen natural.

En el caso de las cuencas de cabecera del río Maipo, la diferencia volumétrica se acentuó con un máximo de 589,2 Hm<sup>3</sup>/año (17,7%) a partir del año 2016, período marcado por un descenso en la cobertura nival, lo que dificulta la representatividad de la realidad por el modelo de derretimiento de nieve SRM, debido al régimen netamente nival de dichas subcuencas que se determinó en el presente estudio. Al contrario, se observó un contraste de lo anterior durante el período comprendido entre las temporadas entre el año 2000 y 2015, el cual presenta una mayor cobertura nival y, por consiguiente, una escorrentía mayor en el período de deshielos.

La oferta hídrica en régimen natural de los principales ríos, esteros y quebradas de la cuenca del río Maipo durante la temporada 2020/2021 fue de 2.266 Hm<sup>3</sup>/año, con un máximo de 265,051 Hm<sup>3</sup>/mes en el mes de diciembre, que se ubica dentro del período de deshielos. Los volúmenes

de oferta hídrica de la temporada 2020/2021 de la subcuenca del río Mapocho en Los Almendros y río Maipo en el Manzano correspondieron a 83,1 Hm<sup>3</sup>/año y 1.826,4 Hm<sup>3</sup>/año, respectivamente, bajo la disponibilidad hídrica con probabilidad de excedencia del 85% en dichos ríos.

Al respecto de las subcuencas de cabecera del río Rapel se observa que la suma de la diferencia entre el hidrograma de volúmenes observados y simulados es positiva en todos los modelos, salvo en el del Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes, cuya suma es negativa. Se concluye que el modelo de escorrentía y derretimiento de nieves SRM subestima los volúmenes de escorrentía acumulados, lo cual corresponde a un caso conservador en cuanto a estimar oferta hídrica en régimen natural. La excepción al comportamiento anterior en la subcuenca del Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes se debe a la escasez de información referente al caudal en Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes, así como también del aforo en el Canal Sauzal en Puente Termas, a diferencia del caudal de generación hidroeléctrica en la Central Sauzal obtenida de CEN, 2020. En este sentido, se logra reducir la desviación volumétrica con respecto a los volúmenes observados a partir del año 2006, con un máximo de -376,9 Hm<sup>3</sup>/año (-11,24%), a medida que se obtuvo más información. Sin embargo, pese a esta falta de información, se logró un buen ajuste respecto a los volúmenes disponibles y observados para dicha subcuenca durante las temporadas posteriores a dicho año.

La oferta hídrica en régimen natural de los principales ríos, esteros y quebradas de la cuenca del río Rapel durante la temporada 2020/2021 fue de 3.919,9 Hm<sup>3</sup>/año, con un máximo de 496,004 Hm<sup>3</sup>/mes en el mes de noviembre, que se ubica dentro del periodo de deshielos. Los volúmenes de oferta hídrica de la temporada 2020/2021 de la subcuenca río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes, río Claro en Hacienda Las Nieves y río Tinguiririca Bajo Los Briones correspondieron a 1.783,6 Hm<sup>3</sup>/año, 118 Hm<sup>3</sup>/año y 936,8 Hm<sup>3</sup>/año, respectivamente, bajo la disponibilidad hídrica con probabilidad de excedencia del 85% en los dos ríos ubicados en la zona norte de la cuenca.

Sobre las subcuencas de cabecera del río Mataquito, se observa que la suma de la diferencia entre el hidrograma de volúmenes observados y simulados es positiva, con un RMSE de 147,3 Hm<sup>3</sup>/año, 172,51 Hm<sup>3</sup>/año y 78,05 Hm<sup>3</sup>/año para las subcuencas del río Teno Después de Junta con Claro, río Colorado en Junta con Palos y río Palos en Junta con Claro, respectivamente. Se concluye que el modelo de escorrentía y derretimiento de nieves SRM subestima los volúmenes de escorrentía acumulados, lo cual corresponde a un caso conservador en cuanto a estimar oferta hídrica en régimen natural. Se logró un buen ajuste respecto a los volúmenes disponibles y observados para las subcuencas simuladas.

La oferta hídrica en régimen natural de los principales ríos, esteros y quebradas de la cuenca del río Mataquito durante la temporada 2020/2021 fue de 2.447,4 Hm<sup>3</sup>/año, con un máximo de 364 Hm<sup>3</sup>/mes en el mes de noviembre, que se ubica dentro del periodo de deshielos. Los volúmenes de deshielo de la subcuenca del río Teno Después de Junta con Claro, río Colorado en Junta con

Palos y río Palos en Junta con Colorado correspondieron a 971,8 Hm<sup>3</sup>/año, 864,7 Hm<sup>3</sup>/año y 540,3 Hm<sup>3</sup>/año, respectivamente, cerca de la disponibilidad hídrica con probabilidad de excedencia del 85% en dichos ríos.

En relación con los volúmenes de escorrentía simulados en la cuenca del Río Maule en Armerillo, se observa que la suma de la diferencia entre el hidrograma de volúmenes observados y simulados es positiva, con un RMSE de 1.520 Hm<sup>3</sup>/año. Se concluye que el modelo de escorrentía y derretimiento de nieves SRM subestima los volúmenes de escorrentía acumulados, lo cual corresponde a un caso conservador en cuanto a estimar oferta hídrica en régimen natural. Se logró un buen ajuste respecto a los volúmenes disponibles y observados para las subcuencas simuladas.

La oferta hídrica en régimen natural de los principales ríos, esteros y quebradas de la cuenca del río Maule durante la temporada 2020/2021 fue de 10.444,3 Hm<sup>3</sup>/año, con máximos de 1.618,218 Hm<sup>3</sup>/mes y 1.443,720 Hm<sup>3</sup>/mes durante los meses de julio y octubre, respectivamente, característico del régimen de escorrentía mixto de la cuenca (DGA, 2004b), sobre la oferta hídrica en régimen natural con 85% de probabilidad de excedencia.

El resumen de la relación oferta-demanda para mensual cada cuenca en estudio se presenta en la Tabla 10-1, mientras que el resumen de la relación oferta-demanda acumulada mensual, es decir, el resultado de la oferta-demanda sumado mes a mes, de las cuatro cuencas estudiadas, considerando la eficiencia adoptada se presenta en la Tabla 10-1. A partir de estos resultados, se concluye que la eficiencia de riego es un factor sensible en la determinación de la demanda para cada cuenca. Por otro lado, se observa que las cuencas con un mayor déficit hídrico en la temporada de riego 2020/2021 corresponden a las cuencas del río Maule, río Mataquito, río Maipo y por último la cuenca del río Rapel.

**Tabla 10-1: Resumen de la relación de la oferta-demanda mensual para las cuatro cuencas en estudio.**

Cuenca	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
	(Hm <sup>3</sup> )											
Río Maipo	48	88	104	193	54	59	11	-75	-108	-85	-45	-4
Río Rapel	26	231	42	-96	-30	200	317	152	-30	-238	-118	-26
Río Mataquito	10	147	72	-33	7	8	4	-21	-21	-131	-116	-94
Río Maule	-258	187	315	-128	-155	200	470	90	-742	-722	-627	-460

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10-2: Relación oferta-demanda (acumulada mensual) de la cuenca del río Maipo, río Rapel, río Mataquito y río Maule.**

Cuenca	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
	(Hm <sup>3</sup> )											
Río Maipo	48	136	239	432	486	546	557	482	374	289	244	240
Río Rapel	26	256	299	203	173	373	690	843	813	575	456	430
Río Mataquito	10	156	228	195	202	210	214	193	172	41	-75	-169
Río Maule	-258	-70	245	116	-38	162	632	722	-21	-742	-1.369	-1.829

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la relación oferta-demanda (Tabla 10-1), al realizar el balance hídrico superficial en la cuenca del río Maipo, considerando la demanda bruta de riego en bocatoma y de los otros usos consuntivos, se obtuvo un déficit en la temporada de riego 2020/2021. Cabe recalcar que un balance hídrico de una cuenca exorreica debe considerar tanto las salidas del caudal superficial al mar, como las entradas por retornos de agua potable al río y recuperaciones por riego proveniente de aguas subterráneas. Al considerar en este balance los caudales en la desembocadura del río Maipo medidos en la estación fluviométrica Río Maipo en Cabimbao (05748001-7), junto con un reúso de aguas residuales de 13 m<sup>3</sup>/s (DGA, 2021b), se obtuvo un superávit anual de 87 Hm<sup>3</sup>/año y un superávit promedio de 7 Hm<sup>3</sup>/año.

De manera estacional, la Cuenca del río Maipo presentó un déficit de -317 Hm<sup>3</sup> en los meses de noviembre a marzo de la temporada 2020/2021, lo que representa un 19% de demanda total de la temporada. Este déficit se pudo abastecer a partir del uso de aguas subterráneas para riego, junto con la capacidad de regulación y redistribución del agua mediante la infraestructura en las zonas de riego de la cuenca. Asimismo, existieron áreas de riego que se abastecen de derrames y retornos de aguas de riego que vuelven a los cauces, los cuales abastecen áreas de riego ubicadas aguas debajo de los puntos de restitución. Existió un superávit el resto del año.

Respecto a los embalses, la capacidad de almacenamiento de agua para riego de tranques y pequeños embalses instalados en la cuenca del río Maipo se estimó en 8,44 Hm<sup>3</sup>, mientras que los máximos volúmenes de almacenamiento para agua potable de Santiago se ubicaron en el embalse El Yeso (capacidad máxima de 220 Hm<sup>3</sup>), Laguna Negra (capacidad máxima de 600 Hm<sup>3</sup>) y Laguna Lo Encañado (capacidad máxima de 50 Hm<sup>3</sup>). El volumen embalsado en El Yeso en el mes de agosto de 2020 fue de 172 Hm<sup>3</sup> (DGA, 2021b).

Al considerar en el balance hídrico de la cuenca del río Rapel los caudales de salida medidos en las estaciones Río Cachapoal en Puente Arqueado CA (06019003-8) y Río Tinguiririca en Los Olmos CA (06035001-9), se obtiene un superávit anual de 340 Hm<sup>3</sup>/año y un superávit promedio

de 14 Hm<sup>3</sup>/año, lo que corresponde a un caudal medio anual de 1,9 m<sup>3</sup>/s, el cual se puede redistribuir y regular mediante la infraestructura en las zonas de riego de la cuenca. En este sentido, la cuenca río Rapel cuenta con el Embalse Convento Viejo (237 Hm<sup>3</sup>), el cual regula las aguas del Estero Chimbarongo, lo que permite suplir parte de las necesidades de riego de zonas que están aguas abajo del embalse. También en esta cuenca está el embalse Los Cristales (8,7 Hm<sup>3</sup>), que aporta seguridad de riego a zonas agrícolas del río Claro de Rengo. No se considera el volumen de generación hidroeléctrica de los embalses en la cuenca del río Rapel en el cálculo anterior.

Al realizar el balance hídrico superficial en la cuenca del río Mataquito, considerando la demanda bruta de riego en bocatoma y de los otros usos consuntivos, se obtuvo un déficit de -341 Hm<sup>3</sup> en los meses de enero, febrero y marzo, representando un 32% de la demanda de la temporada analizada. Este volumen se puede abastecer a partir del uso de aguas subterráneas para riego, junto con la capacidad de regulación y redistribución del agua mediante la infraestructura en las zonas de riego de la cuenca. El resto del año presenta superávit.

Al realizar el balance hídrico superficial en la cuenca del río Maule, considerando la demanda bruta de riego en bocatoma y de los otros usos consuntivos, se concluye que la cuenca río Maule presentó un déficit hídrico en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, totalizando 2.551 Hm<sup>3</sup>, que representa un 66% del total de la demanda en la temporada 2020/2021. Al considerar en el balance hídrico de la cuenca del río Maule los caudales de salida medidos en las estaciones Río Maule en Forel (07383001-K), se obtiene un déficit anual de -1.829 Hm<sup>3</sup>/año y un déficit promedio de -152 Hm<sup>3</sup>/año, lo que corresponde a un caudal medio anual de -4,8 m<sup>3</sup>/s, el cual se puede abastecer a partir del uso de aguas subterráneas para riego, junto con la capacidad de regulación y redistribución del agua mediante la infraestructura en las zonas de riego de la cuenca. En este sentido, la cuenca río Maule cuenta con una capacidad de almacenamiento de 3.743 Hm<sup>3</sup>, de los cuales 1.837 Hm<sup>3</sup> están destinados a riego y 1.906 Hm<sup>3</sup> a generación (DGA, 2020a), permitiendo regular el agua de la cuenca y entregarla en los meses de mayor demanda de riego. Dentro de este volumen se considera el embalse Laguna del Maule, el cual almacenó un volumen promedio de 933 Hm<sup>3</sup> en agosto de 2020.

Por último, existieron áreas de riego que se abastecen de derrames y retornos de aguas de riego que vuelven a los cauces, los cuales abastecen áreas de riego ubicadas aguas debajo de los puntos de restitución.

## 10.2. Principales recomendaciones

Fomentar la realización de estudios básicos que permitan estimar con mayor certeza algunos parámetros que intervienen en la demanda de riego, tales como, la eficiencia de aplicación de agua de riego de los distintos métodos y la eficiencia de conducción de los canales. En efecto, para estimar la demanda de agua de riego de los diferentes tipos de uso de la tierra (cultivos), en cada tipo de suelo y en cada zona de riego, se ha extremado el uso de imágenes de satélite con su correspondiente validación en terreno, el uso de la información de los estudios agrológicos y el uso de la información climática, tratando de estimar lo más fidedignamente posible el valor de demanda neta de riego, para finalmente, tener que suponer las eficiencias de riego y calcular las eficiencias de conducción, que pueden distorsionar en forma importante el valor final.

Con respecto a la determinación de la oferta hídrica, los datos utilizados en hidrología tienen asociado distintos grados de incertidumbre (McMillan et al., 2018), la cual se ve reducida al obtener mayor información, corroborar y validar datos existentes y nuevos. Este estudio contempló dicho proceso en base a información de la Dirección General de Aguas y de algunas Juntas de Vigilancia. Si bien este estudio contempló la reducción en la incertidumbre de la determinación de la oferta hídrica tanto a través de metodologías estadísticas establecidas, como la validación de información recopilada y generada, se recomienda que el proceso de corroboración de datos se realice de manera conjunta con todas las Organizaciones de Usuarios de Aguas pertinentes. En este sentido, se recomienda que esta verificación de datos, específicamente de caudales y de extracciones efectivas, se realice en virtud de perfeccionar los resultados.

Por otro lado, si bien el proceso de ajuste de las herramientas utilizadas para determinar oferta hídrica se realizó en conformidad con las recomendaciones y lineamientos internacionales del USGS (Welter et al, 2015), la restricción en la disponibilidad de información como el equivalente en agua de nieve, precipitaciones y temperatura, tanto en su disponibilidad temporal como su resolución espacial, introduce un sesgo e incertidumbre a los resultados. Debido a esto, se recomienda que los algoritmos de identificabilidad, estimación de parámetros, cuantificación y reducción de incertidumbre utilizados se apliquen en toda modelación hidrológica. Asimismo, el uso de un modelo hidrológico semi-distribuido, cuyo modelo conceptual es aplicable en subcuencas con ciertos regímenes de escorrentía, limita su uso en otras subcuencas. Esto último fue una de las sugerencias de las OUAs durante el proceso de difusión y transferencia del estudio. En vista y consideración de esto, se recomienda que la selección de la herramienta se realice incorporando las necesidades de las OUAs.

Acerca de la herramienta de pronóstico de caudales, si bien la cobertura nival se actualiza automáticamente al ejecutar el modelo, se recomienda actualizar regularmente las variables meteorológicas tales como precipitación y temperatura.

## 11. Presentación inicial del estudio, seminarios y talleres de difusión

Durante el desarrollo del estudio se realizaron diversas actividades, cuyo objetivo fue presentar los objetivos de la iniciativa, sus avances y resultados, junto con transferir las herramientas elaboradas (Tabla 11-1).

**Tabla 11-1: Cuadro resumen de actividades desarrolladas durante el proyecto.**

Hito	Fecha	Actividades
Presentación inicial del estudio	14/04/2021	Dar a conocer los alcances del estudio.
Seminario de difusión	07/09/2021 (Maipo)	Difundir los alcances, metodologías y resultados parciales del estudio en la cuenca, junto con validar y solicitar información a las OUAs.
	20/07/2021 (Rapel)	
	25/06/2021 (Mataquito)	
	11/8/2021 (Maule)	
Talleres de transferencia	12/01/2022 (Maipo 1)	Presentar, entregar y capacitar a las OUAs en el uso de la herramienta de pronóstico de escorrentía superficial ( <a href="http://www.github.com/ccalvocm/Demo-SRM">www.github.com/ccalvocm/Demo-SRM</a> ).
	17/01/2022 (Maipo 2)	
	01/12/2021 (Rapel)	
	17/12/2021 (Mataquito)	
	16/12/2021 (Maule)	

Fuente: Elaboración propia.