

Modelación hidroeconómica de la cuenca del Río Maule, Chile

Diagnóstico bajo condiciones actuales
y bajo cambio climático

Autores:

Efrain Rueda

Pedro Coli Valdes Daussa

Mauro Nalesso

Kleber Machado

María José Gómez

Claudia Galleguillos

Editor técnico:

Marcello Basani

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-01959

Modelación hidroeconómica de la cuenca del Río Maule, Chile

Diagnóstico bajo condiciones actuales
y bajo cambio climático

Autores:

Efrain Rueda

Pedro Coli Valdes Dausa

Mauro Nalesso

Kleber Machado

María José Gómez

Claudia Galleguillos

Editor técnico:

Marcello Basani

Julio 2020

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo
Modelización hidroeconómica de la Cuenca del Río Maule, Chile: diagnóstico bajo
condiciones actuales y bajo cambio climático / Efrain Rueda, Pedro Coli Valdes
Daussa, Mauro Nalesso, Kleber Machado, María José Gómez, Claudia Galleguillos;
editor técnico, Marcello Basani.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1959)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Watershed management-Chile-Computer simulation. 2. Water-supply-Chile-
Management-Computer simulation. 3. Water resources development-Chile-Computer
simulation. 4. Water use-Chile-Computer simulation. 5. Climatic changes-Chile-
Computer simulation. I. Rueda, Efrain. II. Coli Valdes Daussa, Pedro. III. Nalesso,
Mauro. IV. Machado, Kleber. V. Gómez, María José. VI. Galleguillos, Claudia VII.
Basani, Marcello, editor. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y

Palabras clave: Agua, cuencas, recursos hídricos, modelización, HydroBID, Maule,
cambio climático, socio-económico.

Códigos JEL: Q21, Q25, Q54.

<http://www.iadb.org>


Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





MODELACIÓN HIDROECONÓMICA DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE, CHILE

Diagnóstico bajo
condiciones actuales
y bajo cambio climático

Autores

Efrain Rueda
Pedro Coli Valdes Daussa
Mauro Nalesso
Kleber Machado
María José Gómez
Claudia Galleguillos

Editor técnico

Marcello Basani

Julio de 2020

FCH
FUNDACIÓN CHILE

 **BID**

MODELACIÓN HIDROECONÓMICA DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE, CHILE

Diagnóstico bajo condiciones actuales
y bajo cambio climático

Autores

Efrain Rueda
Pedro Coli Valdes Daussa
Mauro Nalesso
Kleber Machado
María José Gómez
Claudia Galleguillos

Editor técnico

Marcello Basani

Julio de 2020

ÍNDICE

Agradecimientos	vii
1. Introducción	1
2. Objetivos del estudio	5
3. Modelo de simulación	7
Modelo HydroBID	7
Modelo de Simulación WaterALLOC	8
4. Funcionamiento del modelo de simulación	11
a. Funcionamiento del embalse	11
b. Funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.....	12
c. Funcionamiento de los distritos de riego	12
d. Resultados del modelo	13
5. Los nodos y sus demandas por agua	15
a. Demanda de agua superficial.....	15
Demanda agrícola.....	16
Demanda hidroeléctrica.....	20
b. Demanda por agua subterránea.....	22
Forestal	23
Demanda para consumo humano	24
Demandas por extracción de agua subterránea de los sectores pecuario e industrial.....	25
6. Nodos y sus beneficios.....	27
a. Beneficios agrícolas	27
b. Beneficios hidroeléctricos	28
c. Beneficios por consumo humano	28
d. Beneficios del sector forestal.....	30
e. Beneficios de los sectores pecuario e industrial.....	30

7. Metodología de análisis y resultados	31
a. Sector agrícola (resultado integral de las áreas de riego).....	32
Resultados por nodo de riego.....	34
b. Generación de energía hidroeléctrica.....	35
Resultados por central hidroeléctrica.....	37
8. Análisis del sector forestal	39
a. Métodos del análisis.....	39
b. Resultados.....	42
c. Discusión, conclusión y mejoramientos futuros.....	44
9. Impactos del cambio climático sobre el agua superficial	47
a. Sector agrícola.....	47
Análisis de sensibilidad al supuesto del agua subterránea.....	51
b. Sector hidroeléctrico.....	52
c. Impacto agregado por el fenómeno del cambio climático en los sectores simulados.....	55
d. Sector forestal.....	57
10. Aguas subterráneas	59
11. Conclusiones y recomendaciones	61
Referencias	63
Anexos	65

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Cuenca del río Maule.....	1
Ilustración 2. Cuenca del río Maule representada en la AHD de HydroBID.....	8
Ilustración 3. Representación de flujo de la red del sistema superficial de la cuenca del río Maule con el modelo WaterALLOC.....	9
Ilustración 4. Esquema de los ríos de la cuenca del Maule.....	16
Ilustración 5. Nodos de demanda para riego.....	19
Ilustración 6. Modelo de Demanda.....	30
Ilustración 7. Serie de agua suministrada.....	32
Ilustración 8. Suministro de agua para uso agrícola.....	33
Ilustración 9. Uso de agua subterránea (racionamiento).....	33
Ilustración 10. Ingreso neto en áreas de riego.....	34
Ilustración 11. Generación de energía hidroeléctrica.....	36
Ilustración 12. Frecuencia de uso de la capacidad instalada.....	36
Ilustración 13. Serie de ingresos por generación hidroeléctrica.....	37
Ilustración 14. Aumento porcentual de la escorrentía sin bosques.....	42
Ilustración 15. Porcentaje de bosques en cada COMID.....	43

Ilustración 16. Disponibilidad de agua (millones de m ³ /año) en el modelo original (a) y en el modelo sin bosques (b).....	43
Ilustración 17. Serie anual de agua utilizada para riego (escenario con cambio climático)....	48
Ilustración 18. Ingresos netos anuales.....	49
Ilustración 19. Suministro de agua superficial para riego (escenario con cambio climático)..	49
Ilustración 20. Costo económico en agricultura (escenario sin medidas de adaptación).....	50
Ilustración 21. Distribución probabilística de los costos en agricultura.....	50
Ilustración 22. Probabilidad de exceder el costo en agricultura.....	51
Ilustración 23. Energía generada (escenario con cambio climático).....	52
Ilustración 24. Ingresos por generación hidroeléctrica (escenario con cambio climático).....	53
Ilustración 25. Frecuencia de uso de la capacidad instalada (escenario con cambio climático).....	54
Ilustración 26. Costo en generación eléctrica.....	54
Ilustración 27. Probabilidad del costo en generación eléctrica.....	55
Ilustración 28. Probabilidad de exceder el costo en energía.....	55
Ilustración 29. Costos económicos de la cuenca por no adaptación.....	56
Ilustración 30. Distribución probabilística del costo por CC en el uso del agua.....	56
Ilustración 31. Probabilidad de excedencia de los costos totales.....	57
Ilustración 32. Cauquenes MODFLOW – Resumen de salida del modelo de estado estacionario.....	59
Ilustración 33. Los Puercos MODFLOW – Resumen de salida del modelo de estado estacionario.....	60

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis de demandas para la Región del Maule.....	3
Tabla 2. Identificación de estaciones de flujo.....	10
Tabla 3. Captación de agua por comuna.....	17
Tabla 4. Eficiencias de riego.....	17
Tabla 5. Porcentaje del tipo de riego por comuna.....	18
Tabla 6. Relación nodos de demanda de agua y comunas.....	18
Tabla 7. Áreas de riego.....	19
Tabla 8. Demandas mensuales por nodo agrícola en (m ³ /s).....	20
Tabla 9. Demandas mensuales por nodo agrícola en l/s/ha.....	21
Tabla 10. Desembalses promedio mensuales del 2017.....	21
Tabla 11. Características de las hidroeléctricas.....	22
Tabla 12. Características de los embalses y su evaporación.....	22
Tabla 13. Demanda forestal.....	23
Tabla 14. Caudal mensual de la demanda forestal.....	24
Tabla 15. Demandas de agua subterránea para consumo humano (doméstico).....	25
Tabla 16. Demanda de agua de los sectores pecuario e industrial.....	25
Tabla 17. Ingresos netos por hectárea de cultivo con riego.....	28
Tabla 18. Costos marginales promedio de la energía del sistema interconectado de Chile.....	29
Tabla 19. Ingresos netos por hectárea de siembra forestal.....	30

Tabla 20. Estadísticas del agua suministrada por área de riego.....	34
Tabla 21. Distribución probabilística de suministro de agua (en %)	35
Tabla 22. Estadísticas de la generación de energía en cada central.....	38
Tabla 23. Distribución probabilística de la capacidad instalada utilizada por hidroeléctrica ..	38
Tabla 24. Número de subcuencas con cada clasificación de uso de suelo forestales presentes en la cuenca del río Maule	40
Tabla 25. Tabla de clasificación de uso de suelo y tipos de suelo usados para el cálculo del número de curva.....	40
Tabla 26. Desglose de los tipos de bosque y de suelo presentes en la cuenca	41
Tabla 27. Disponibilidad total de agua en la cuenca del Maule (m ³ /año)	44
Tabla 28. Subcuencas destacadas con diferencias considerables en la disponibilidad de agua entre los dos modelos	44
Tabla 29. Resultados de escenario de cambio climático	47
Tabla 30. Análisis de sensibilidad de los ingresos agrícolas al nivel freático	52

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las personas y organizaciones que hicieron contribuciones importantes al éxito del presente proyecto “Modelación hidroeconómica de la cuenca del río Maule, Chile: diagnóstico bajo condiciones actuales y bajo cambio climático”.

Yolanda Martínez Mancilla, representante del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Chile y Jorge Ducci, especialista jubilado de la División de Agua y Saneamiento del BID, quienes brindaron liderazgo y un fuerte apoyo para desarrollar este estudio de caso. Ulrike Broschek, Claudia Galleguillos, Paola Matus y Adriana López, representantes de Fundación Chile, quienes sirvieron de enlace con las partes interesadas locales, recopilaron los datos y la información necesaria para realizar el estudio, y organizaron la logística de las reuniones durante las misiones de campo.

Enrique Triana, Fekadu Moreda, y Juliana Corrales, especialistas de RTI International en Estados Unidos, quienes trabajaron junto al equipo del BID en procesar los datos recopilados, y configurar y correr los modelos de simulación utilizados para preparar este estudio.

Además, estamos agradecidos por la excelente colaboración y participación de las instituciones nacionales las cuales facilitaron el intercambio de información. Especialmente queremos agradecer a Andrea Osses y Carlos Flores de la Dirección General de Aguas (DGA), Alex Santander y Carlos Mancilla

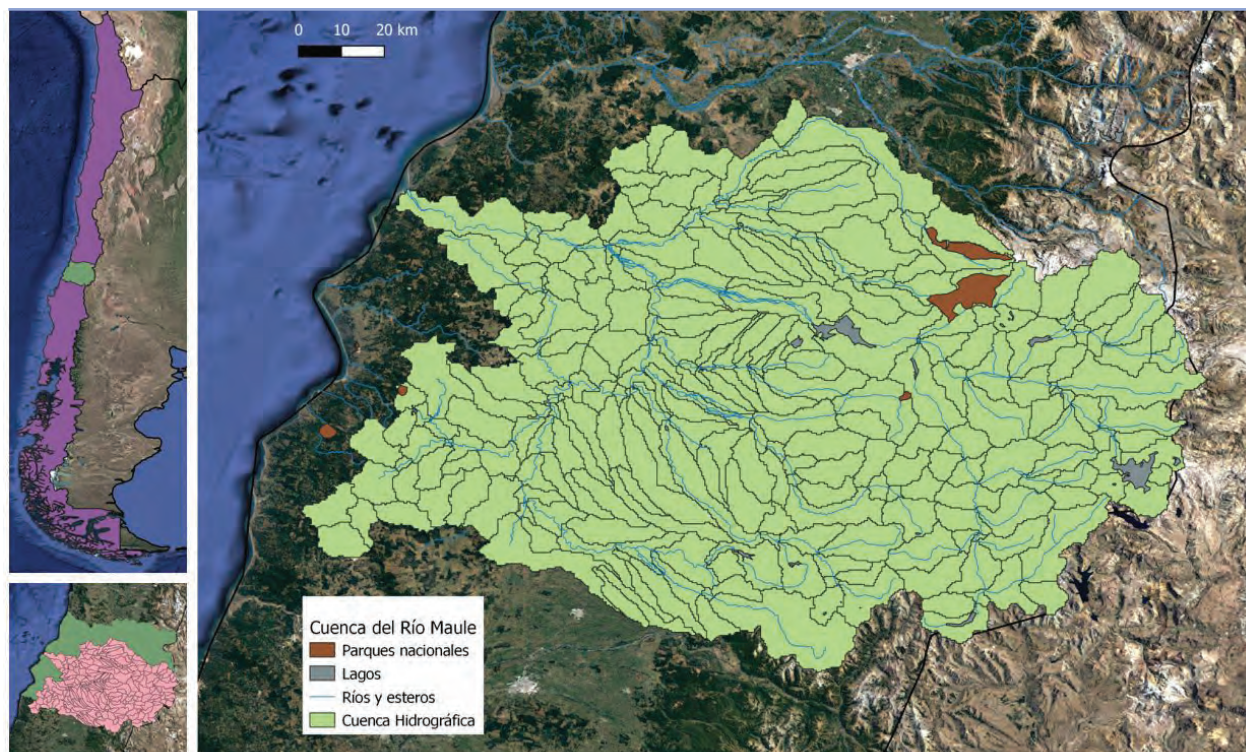
del Ministerio de Energía, Javier Bustos de la Asociación de Empresas Eléctricas, Juan Araneda del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), Antonio Yaksic y Liliana Villanueva del Ministerio de Agricultura, Alfredo Apey de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ernesto Veres de la Comisión Nacional de Riego (CNR), Carlos Descourvieres representante de Chilealimentos, Pedro Vial e Iván Cabrera de Colbún S.A. De la misma manera queremos agradecer a las instituciones locales de la cuenca del río Maule los cuales contribuyeron enormemente al entendimiento de la dinámica de la cuenca y entrega de información. Carlos Diez Jugovic, Felipe Olivares, Jimena Latrach, y Cristian Beas, de la Junta de Vigilancia del Río Maule, Enrique Osorio de DGA Maule, Leonardo Sandoval CNR Maule, Álvaro Seguel consultor CNR Maule, Paula Gajardo PER Maule, René Gallardo, Pablo Castiglione y Pedro Saez de Enel Generación Chile S.A, Ana María Cisterna y Elías Castillo de Aguas Nuevo Sur, Sara Pereira de Superintendencia de Servicios Sanitarios Maule (SISS), Angel Gallis y Luis Vega de la Cooperativa de Servicios Sanitarios, y Cecilia Román del Programa de Agua Potable Rural (APR) Cumpeo.

1

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Maule nace en la cordillera de Los Andes y desemboca en el mar, con un área de 21.052 km², de los que el 94 % corresponde a la Región del Maule y solo el 6 % a la actual Región de Ñuble. La Región del Maule está formada por las provincias de Cauquenes, Curicó, Linares y Talca, concentrando la población urbana en la comuna de Talca con 220.357 habitantes; seguido de Linares con 93.602 habitantes. Las comunas de Maule, Cauquenes, Constitución, Molina, San Javier, San Clemente y Parral concentran cada una en promedio 45.000 personas (INE, 2018). La población total de la cuenca asciende a unos 800.000 habitantes para el año 2015¹.

ILUSTRACIÓN 1. Cuenca del río Maule



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

¹Fuente: INE 2015.

El río Maule nace en el extremo norponiente de la laguna del Maule, a partir de la unión del río Puelche y el río Melado. Los ríos generados en la cordillera de Los Andes van paralelos al río Maule y son captados por el río Loncomilla, que drena toda la cuenca sur (ríos Achibueno, Longaví y Perquilauquen), y por el Claro, que colecta las aguas del sector norte (estero Pangue y el río Lircay). A 90 kilómetros de su origen, el río Maule entra a la llanura aluvial central hasta la cordillera de la Costa, donde se une al río Claro, que a su vez recoge las aguas del estero Pangue y el río Lircay, y luego se mezcla con el Loncomilla cerca de San Javier. A 10 kilómetros de la desembocadura, el río Maule se ensancha en un estuario de casi 900 metros de ancho hasta terminar en la ciudad de Constitución (DGA, 2005).

El río Maule presenta un régimen marcadamente nival en sus zonas alta y media, mostrando un gran aumento de caudal en los meses de primavera, como consecuencia de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, posee un régimen pluvial, por lo que presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones (DGA, 2005). La precipitación anual presenta una alta variabilidad, habiendo años secos y húmedos con una precipitación equivalente al 25 % y 180 % del promedio anual (INH, 2016). La oferta hídrica referencial en la cuenca del río Maule, considerando un 85 % de probabilidad de excedencia, corresponde a 243,4 m³/s en aguas superficiales y 58 m³/s en aguas subterráneas (INH, 2016), sumando un total de 301,40 m³/s.

En los últimos años, la cuenca ha sido afectada por los efectos del cambio climático, que se manifiestan principalmente en una tendencia a la baja en las precipitaciones, que continuará acentuándose en los próximos años. Adicionalmente, se presenta una

tendencia al aumento de temperaturas lo que, aunado a la disminución de la precipitación, afectará los caudales superficiales disponibles en un 10 % al 40 % en el futuro. Estas variaciones desencadenarán otros fenómenos, como el aumento en el consumo de agua por efecto de la evapotranspiración; la redistribución estacional de los caudales mensuales y una mayor probabilidad de aluviones causados principalmente por la elevación de la isoterma 0 °C; aumento en la intensidad y frecuencia de las lluvias convectivas (aumentan cantidad de agua en poco tiempo y en zonas determinadas) y la existencia de suelos inestables expuestos por el retroceso de los glaciares o nieves perpetuas. Esto significa que donde antes caía nieve que se acumulaba en las zonas más altas de la cordillera, ahora cae agua en forma líquida (precipitaciones); por lo tanto, la mayor disponibilidad de agua para su uso estará en invierno y no en verano.

La cuenca del río Maule cuenta con un gran desarrollo productivo basado en el uso intensivo del recurso hídrico que principalmente corresponde a los sectores agrícola, hidroeléctrico y forestal. Adicionalmente, este recurso también es utilizado para satisfacer las demandas de agua potable, industrial y pecuario en donde se ha manifestado un crecimiento de agroindustrias y aserraderos con altos consumos de agua. La utilización del recurso hídrico ha hecho que en algunos tramos de los ríos y en algunos períodos del año el caudal se reduzca drásticamente.

Los análisis de demandas para la Región del Maule realizados en el marco de la “Radiografía del agua” (Jaramillo y Acevedo, 2017; para “Escenarios hídricos 2030, 2018”) y con base en la metodología de Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011), muestran que para la cuenca del río Maule existe una captación de aguas de

TABLA 1. Análisis de demandas para la Región del Maule

Uso	Captación ^a [m ³ /s]	Devolución ^b [m ³ /s]	Devolución ^c [%]	Consumo	
				HH Azul ^d [m ³ /s]	HH Verde ^e [m ³ /s]
Agrícola (riego)	96,51	58,47	61%	38,04	8,15
Minero	0	0	0%	0	0
Agua potable y saneamiento	1,75	1,62	93%	0,13	0
Industrial	1,21	1,11	92%	0,10	0
Forestal	0	0	0%	0	35,44
Generación eléctrica	447,19	444,91	100%	2,1	0
Pecuario	0,14	0,09	65%	0,05	0

Fuente: Jaramillo y Acevedo (2017).

- Captación (m³/s):** volumen de agua dulce superficial y/o subterránea extraída de fuentes naturales para ser utilizada por diferentes usuarios.
- Devolución (m³/s):** volumen de agua que, después de ser utilizada por parte de los diferentes usuarios, es retornada al sistema natural. Calculada como la diferencia entre captación y HH azul.
- Devolución (%):** porcentaje de agua devuelta respecto del total de agua captada.
- Consumo HH Azul (m³/s):** volumen de agua fresca extraída de fuentes, superficiales y/o subterráneas, por parte de diferentes usuarios, que no retorna al ambiente de donde se extrajo. Puede ocurrir por: a) evaporación o evapotranspiración del agua, b) incorporación del agua en el producto, c) agua que no retorna a la misma cuenca de extracción o que se descarga al mar, o d) agua que retorna en un periodo de tiempo distinto al que se extrajo.
- Consumo HH Verde (m³/s):** volumen de agua lluvia utilizada por parte de diferentes sectores, que queda temporalmente almacenada en la parte superficial del suelo o en la vegetación.

fuentes superficiales y subterráneas de 546,62 m³/s. Para esta cuenca, el mayor consumo por Huella Hídrica Azul se realiza por parte del sector agrícola, con un volumen captado de 38,04 m³/s, seguido del sector hidroeléctrico con un consumo de 2,1 m³/s. Por otro lado, el consumo de Huella Hídrica Verde ocurre en primer lugar por parte del sector forestal con 35,44 m³/s, seguido del sector agrícola con 8,15 m³/s. La siguiente tabla muestra un análisis más detallado de los resultados del estudio para cada sector productivo.

La comparación entre oferta referencial y demandas (“Escenarios hídricos 2030, 2018”) muestran que la cuenca del río Maule tiene una **brecha hídrica del 13 %** (consumo/oferta x 100), lo que significa que se consume el 13 % de la oferta y corresponde a una presión sobre el recurso hídrico de nivel moderado, ya que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador

del desarrollo (escala basada en Rivera et al., 2004).

En ese contexto, las decisiones sobre la asignación y el uso del recurso hídrico requieren no solo de elementos de juicio técnicos (relativos a la cantidad del recurso hídrico), sino también elementos de juicio socioeconómicos (costos y beneficios, reglas de optimización, entre otros).

Una *modelación hidroeconómica* de una cuenca se refiere a la integración del sistema económico y de los distintos sistemas usuarios del recurso hídrico (agua). Por medio de la integración de estos sistemas, el análisis de la economía de escala puede ayudar a responder las preguntas y problemas relacionados con el manejo efectivo y eficiente de la asignación de uso de los recursos hídricos (cantidad) en una cuenca y entre diferentes actividades económicas (productivas,

ambientales y consumo humano). En particular, tal análisis se puede utilizar para examinar los intercambios económicos relacionados con una gran variedad de decisiones de gestión de uso de agua, tales como el cálculo de los costos y los beneficios de inversiones y diseños en infraestructura de agua alternativos.

Para lograr lo anterior, en el presente estudio se desarrolló una herramienta de análisis hidroeconómico que específicamente usa información de caudales generada por el software HydroBID; también, realiza los balances oferta-demanda en cada uno de los puntos donde se utiliza agua para actividades socioeconómicas (que llamaremos nodos de demanda); calcula la cantidad de agua utili-

zada y determina los racionamientos, dándole valor económico a estos dos aspectos (uso y racionamiento) y utilizando la infraestructura y las demandas existentes al año 2017. Adicionalmente, se elabora el mismo diagnóstico (año 2017) con un escenario de cambio climático al año 2050 para determinar los posibles racionamientos y sus valores económicos. Esta herramienta permite conocer los costos sociales y económicos del impacto del cambio climático y permitirá elaborar la evaluación económica (análisis costo-beneficio) de proyectos o medidas que tengan como objetivo mitigar o adaptarse a los efectos del cambio climático (análisis costo-beneficio) de proyectos o medidas que tengan como objetivo mitigar o adaptarse a los efectos del cambio climático.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos del estudio son: i) elaborar el diagnóstico (demandas del año 2017) del uso del recurso hídrico, incluyendo los beneficios económicos a consecuencia del uso del agua y costos económicos por el racionamiento; y ii) extender este análisis a un escenario de cambio climático (demandas del año 2017 con hidrometeorología del año 2050).

Para alcanzar estos objetivos debemos confrontar las demandas de los diferentes sectores a la disponibilidad del recurso hídrico. Como esta no es determinista, es necesario utilizar hidrología estocástica o probabilística para determinar los promedios del uso del agua en cada punto donde se utiliza y las probabilidades de que las demandas del año en estudio sean satisfechas. Las metodologías existentes para determinar estas probabilidades son: a) la generación de series sintéticas de caudales a lo largo y ancho de toda la cuenca, utilizando el método de Montecarlo² (implicaría tener un modelo que genere caudales sintéticos en las distintas subcuencas de la cuenca del Maule necesarias para el análisis) y el modelo de Matalas³ (o similar); y b) utilizar la serie histórica reconstruida con el modelo HydroBID (26 años de caudales superficiales), teniendo en cuenta que cada año tiene la misma probabilidad de ocurrencia y es igual a 1/26 (3,8 % de probabilidad de ocurrencia). Este segundo método requiere de mucho menos información y menos capacidad computacional.

El propósito del estudio es elaborar un modelo hidrológico económico incluyendo el agua superficial y el agua subterránea. Desafortunadamente, no se cuenta con la información necesaria del agua subterránea. Solo se consiguió información (parcial) de dos acuíferos, no de la totalidad de acuíferos de la cuenca. Por lo tanto, se elaboró un modelo del agua superficial y sus usos. Para las aguas subterráneas se calcularon las demandas de agua que utilizan dicho recurso y se elaboraron los modelos de beneficios. Adicionalmente, se supuso que para complementar el riego en agricultura se utiliza el agua subterránea y su uso es marginal en la cantidad de agua almacenada en el acuífero. Finalmente, a este supuesto se le elaboró un análisis de sensibilidad.

² Método de Montecarlo: Generación sintética de series estocásticas de caudales. Los caudales aleatorios provienen de una distribución probabilística que la serie histórica de los caudales.

³ Matalas N. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology, Water Resources Research 3 (4). pp 937-945.

MODELO DE SIMULACIÓN



La simulación hidrológica de la cuenca del río Maule se realizó utilizando dos herramientas, la primera para generar los caudales a partir de la serie de lluvias utilizando el modelo HydroBID, y la segunda, a partir de los caudales ya generados, para realizar los balances oferta-demanda utilizando el módulo WaterALLOC en cada punto que demanda agua cuyos resultados se le aplican modelos de beneficios y costos económicos.

Modelo HydroBID

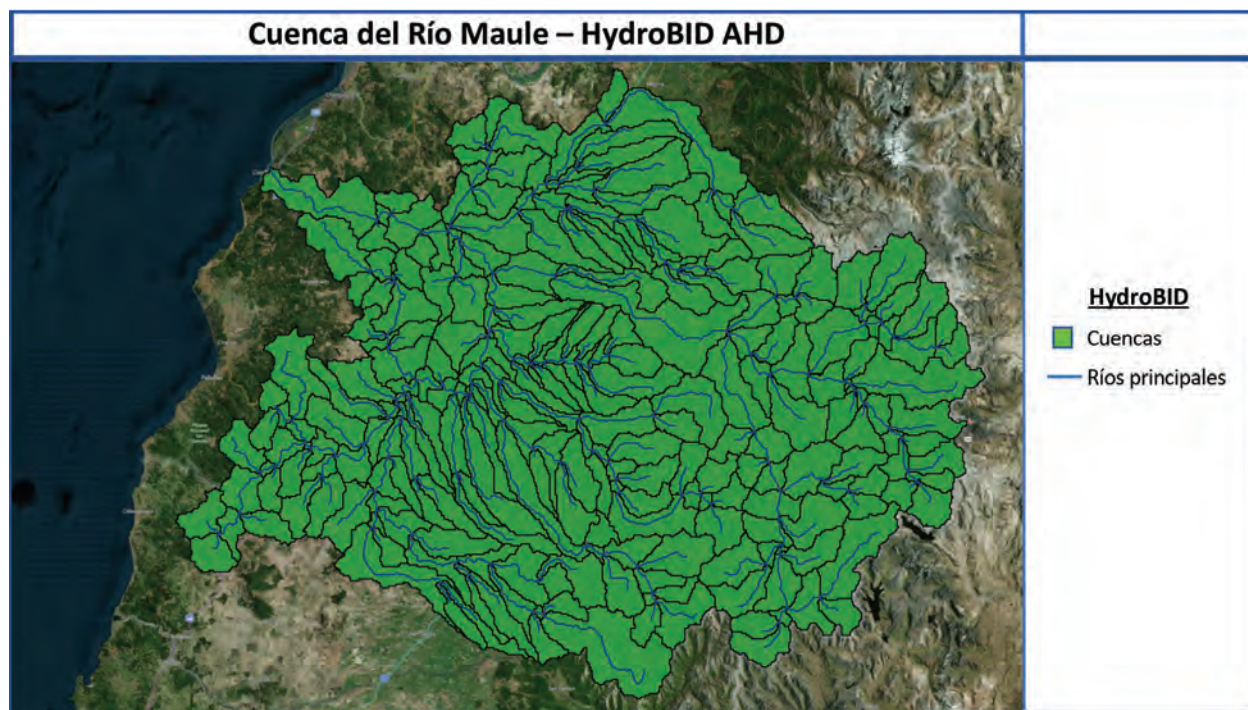
HydroBID es un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de América Latina y el Caribe, bajo escenarios de cambio (por ejemplo, clima, uso del suelo, población), que permite evaluar la oferta hídrica a nivel de cuenca, subcuenca y microcuenca.

HydroBID cuenta con una base de datos hidrológica analítica, denominada AHD, por sus siglas en inglés, para toda la región de América Latina y el Caribe. La AHD es una base de datos de aguas superficiales espacialmente explícita (es decir, basada en el sistema de información geográfica GIS). Sirve como una plataforma regional de datos espaciales para integrar información necesaria y así respaldar los modelos regionales de hidrografía. También, proporciona un marco para la parametrización de modelos de manera consistente, contiene la conectividad de flujo aguas arriba/aguas abajo necesarias para los modelos y proporciona los datos necesarios para mostrar los resultados en forma gráfica. El modelo calcula

los caudales a partir de la información de lluvias, uso del suelo y morfología (pendientes, permeabilidad, tipo de suelo, etc.). Por lo tanto, los caudales de los ríos son el resultado de la lluvia y de las funciones de infiltración, de la evapotranspiración real de la capa vegetal existente (bosques, cultivos, rastrojos etc.) y potencial y flujo base proveniente de las aguas subterráneas. El modelo se calibra con información existente de caudales en algunos puntos donde están localizadas las estaciones fluviométricas.

La cuenca del río Maule cuenta con 271 subcuencas (ilustración 2) caracterizadas en la AHD de HydroBID, que cubren un área total de 21,107.79 km².

Para cada subcuenca representada en la AHD del Maule, HydroBID generó una serie histórica de caudales diarios de 26 años (de enero de 1990 a diciembre de 2015). Para efectos del presente estudio, los caudales diarios se agregan hasta obtener caudales a nivel mensual. Adicionalmente, se identifican los puntos a lo largo de los ríos donde el agua se utiliza para usos económicos y los puntos donde

ILUSTRACIÓN 2. Cuenca del río Maule representada en la AHD de HydroBID

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

existen embalses, representados en el modelo WaterALLOC (ilustración 3).

Modelo de Simulación WaterALLOC

WaterALLOC es una herramienta con elementos georreferenciados para la evaluación de disponibilidad de agua, que utiliza como insumo los caudales naturales resultantes de HydroBID, las demandas de agua definidas, los permisos de uso y operaciones de regulación y almacenamiento. Esta herramienta crea la red de simulación de MODSIM⁴ automáticamente de la red de la AHD de HydroBID, usando los cauces y las subcuencas para definir los vínculos y nodos de la red de MODSIM.

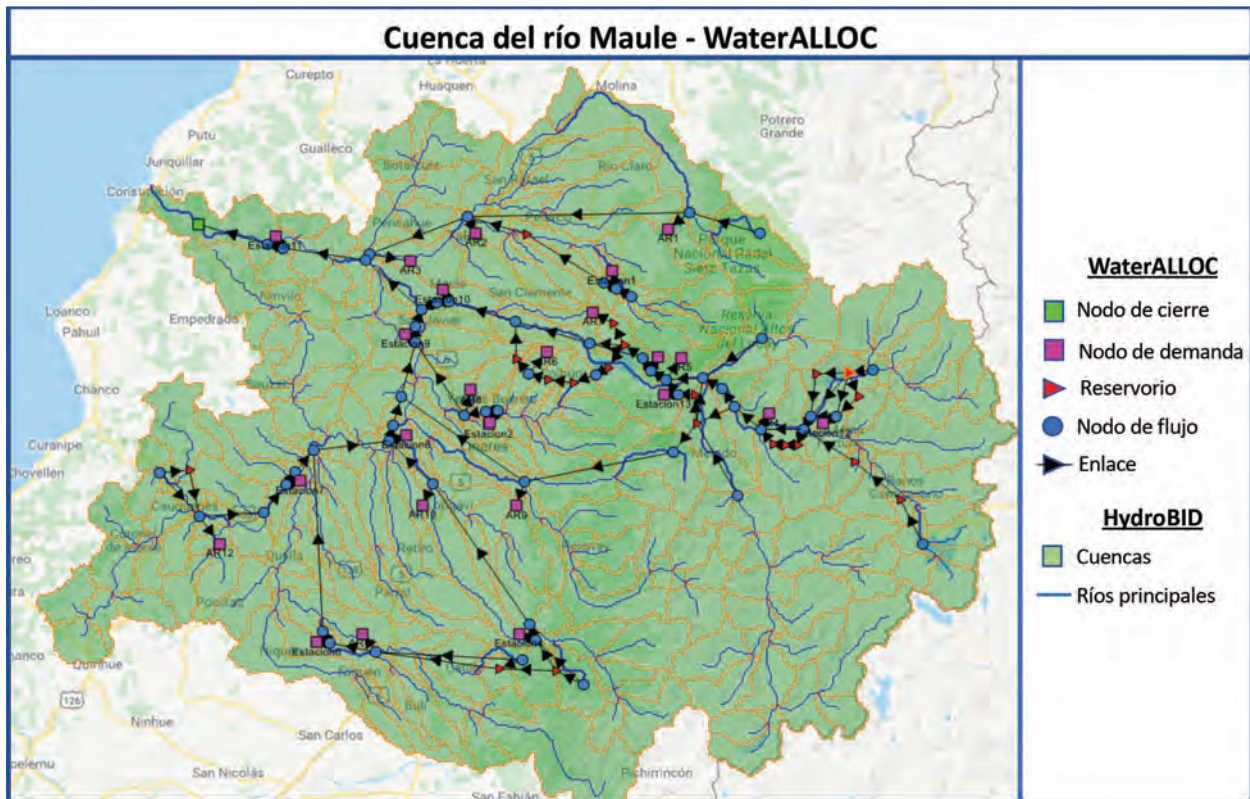
WaterALLOC vincula los resultados de escorrentía local de HydroBID en los nodos de entrada de MODSIM, permitiendo simular el enrutamiento de los caudales en los cau-

ces de la cuenca. WaterALLOC permite crear nodos de demanda georreferenciados y establecer vínculos para simular la toma y el consumo de agua de acuerdo con la disponibilidad hídrica en los diferentes puntos de la cuenca y de acuerdo con los permisos, prioridades y limitaciones físicas e hidráulicas del sistema. WaterALLOC permite también la creación y simulación de operación de sistemas de embalses, simulando operaciones de suministro de agua y generación eléctrica.

La ilustración 3 muestra la red de flujo generada para la cuenca del río Maule, generada

⁴ MODSIM es un sistema generalizado de apoyo a la toma de decisiones sobre las cuencas fluviales, que usa optimización en una red de flujo para simular el movimiento de agua en la cuenca. MODSIM fue desarrollado en la Universidad Estatal de Colorado con el objetivo de ayudar a los administradores de cuencas hidrográficas con el análisis de suministro hídrico ante la incertidumbre hidrológica y el crecimiento de la demanda <http://modsim.engr.colostate.edu/>.

ILUSTRACIÓN 3. Representación de flujo de la red del sistema superficial de la cuenca del río Maule con el modelo WaterALLOC



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID y uso del modelo WaterALLOC.

en WaterALLOC con base en la AHD (Ilustración 2), con los puntos de afluencia concentrados en puntos claves, los nodos de demanda consuntiva, los embalses, los puntos de generación hidroeléctrica y las estaciones de aforo.

Los principales supuestos para la simulación de operaciones en la cuenca del río Maule con el modelo WaterALLOC incluyen:

- Los embalses se operan para cumplir con los volúmenes de almacenamiento de fin de mes operados en 2017 (“almacenamiento objetivo”) y minimizar las descargas en el océano; es decir, se opera el sistema para almacenar la mayor cantidad de agua disponible por debajo del volumen objetivo. El almacena-

miento objetivo se interpola linealmente entre el final de los meses y se repite año tras año en el período de simulación.

- La simulación de los trasvases entre cuencas se realiza principalmente para cumplir con los valores de almacenamiento objetivos, satisfacer las demandas y generar un beneficio de generación de energía hidroeléctrica. En esta versión, no se especificaron preferencias para que las transferencias equilibren el almacenamiento entre cuencas hidrográficas.
- Las demandas agrícolas representan la condición actual (2017) en todos los escenarios. El estudio de Jaramillo y Acevedo, para “Escenarios hídricos 2030, 2018”, se utilizó para obtener la información unitaria (demanda por hectárea y

TABLA 2. Identificación de estaciones de flujo

Identificación	Nombre de la estación
Estación 1	Río Lircay en puente las rastras
Estación 2	Río Putagán en yerbas buenas
Estación 3	Río Achibueno en la recova
Estación 4	Río Longaví en la Quiriquina
Estación 5	Río Perquilauquen en san Manuel
Estación 6	Río Perquilauquen en Gniquen
Estación 7	Río Cauquenes en desembocadura
Estación 8	Río Loncomilla en bodega
Estación 9	Río Loncomilla en las brisas
Estación 10	Río Maule en longitudinal
Estación 11	Río Maule en Forel

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información proporcionada por la Fundación Chile.

por cultivo) que aplicaría para cualquier año. El área utilizada en el análisis es la cultivada en el año 2017 (consolidación de la información de la Junta de Vigilancia del río Maule y el Plan Director de la cuenca del río Maule⁵).

- Para efectos de la simulación y para el cálculo de los impactos económicos mínimos, se supuso que no hay restricciones en el bombeo de aguas subterráneas para cubrir los déficits agrícolas. Este supuesto podría ser real en el escenario 2017, ya que el agua de riego que percola al acuífero es probable que sea mayor a la extracción.
- La generación de energía hidroeléctrica se calcula con el factor de producción, el cual es una función del caudal. Para plantas con almacenamiento asociado, el uso del factor de producción usa una cabeza hidráulica constante en el cálculo de producción eléctrica.

- Los flujos observados son una guía para las operaciones simuladas del sistema. Sin embargo, no se puso mucho énfasis en igualar estos flujos, porque la operación del reservorio intenta repetir los niveles de 2017; las demandas, además, están en los niveles de 2017 y, por lo tanto, se espera una discrepancia con los flujos históricos observados.
- Las estaciones de flujo observadas incluyeron las estaciones base (estación 1 a estación 11) y observaciones en Canal Maule Norte, Río Melado Salto, Canal de Restitución y Canal de Evacuación. La clasificación de las estaciones utilizadas se muestra en la tabla 2.

⁵ Dirección General de Aguas. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Maule. Fase II, S.I.T. N° 134, mayo 2008.

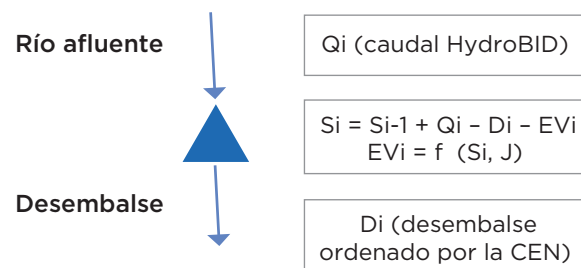
FUNCIONAMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo simula el tránsito del agua desde la divisoria de agua hasta llegar al mar. En su recorrido se va entregando el agua a cada nodo que la demanda. Este puede ser una central hidroeléctrica o una toma para distrito de riego. Allí se capta agua hasta copar la capacidad de la demanda. El exceso se transita aguas abajo por el río en cuestión. El agua captada se compara con la demanda y se calcula el racionamiento como la diferencia de la demanda y el agua suministrada. Igualmente se calcula el valor del agua utilizada y el valor de racionamiento si es que este se produce. Cuando el agua transitada llega a un embalse se realiza la operación de embalsamiento o desembalse de acuerdo con la regla de operación, la cual se explica más adelante. Adicionalmente, el agua retorna al cauce del río en caso de desborde de un embalse o en caso de que el nodo que la utilice tenga retornos al río (por ejemplo, en las hidroeléctricas luego de su uso retorna el 100 %).

El modelo de simulación considera los principales sectores productivos que captan agua de los ríos en la cuenca del río Maule para sus actividades económicas, correspondientes a los sectores hidroeléctrico y agrícola (con riego). Para cada mes, el modelo transita el agua desde aguas arriba (límite de la cuenca en su divisoria de aguas) hacia aguas abajo (ver ilustración 2).

a. Funcionamiento del embalse

Cuando el agua proveniente de aguas arriba llega a los embalses de uso hidroeléctrico o de riego, es acumulada, y desembalsa **Di** de acuerdo con los despachos ordenados por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

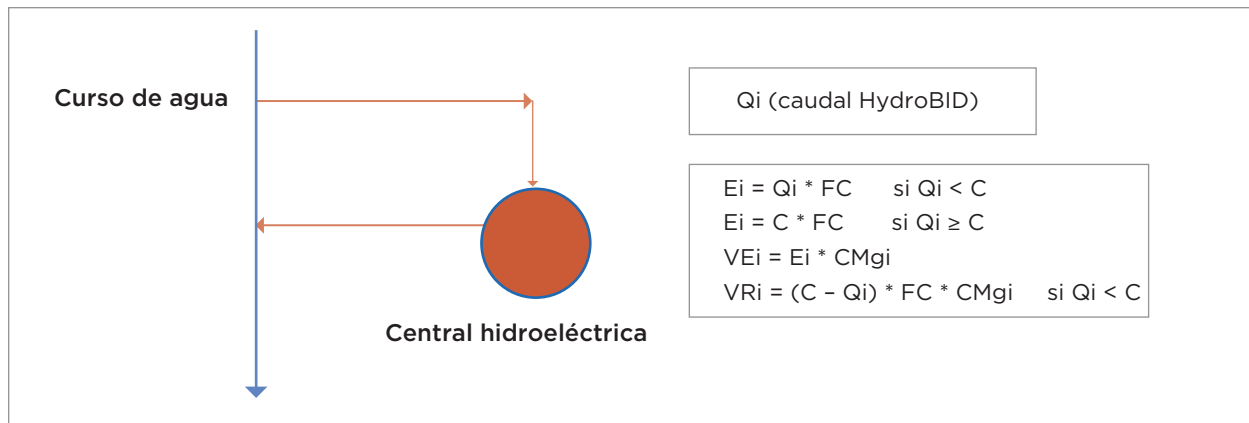


En donde **Si** corresponde al agua acumulada en el embalse en el mes **i**; **Qi** caudal que proviene de aguas arriba; **EVi**, evaporación correspondiente que depende del volumen almacenado S_{i-1} y del mes **J**; y **Di**, el agua desembalsada ordenada por el CEN o demanda de agua solicitada por un distrito de riego localizado aguas abajo.

b. Funcionamiento de las centrales hidroeléctricas

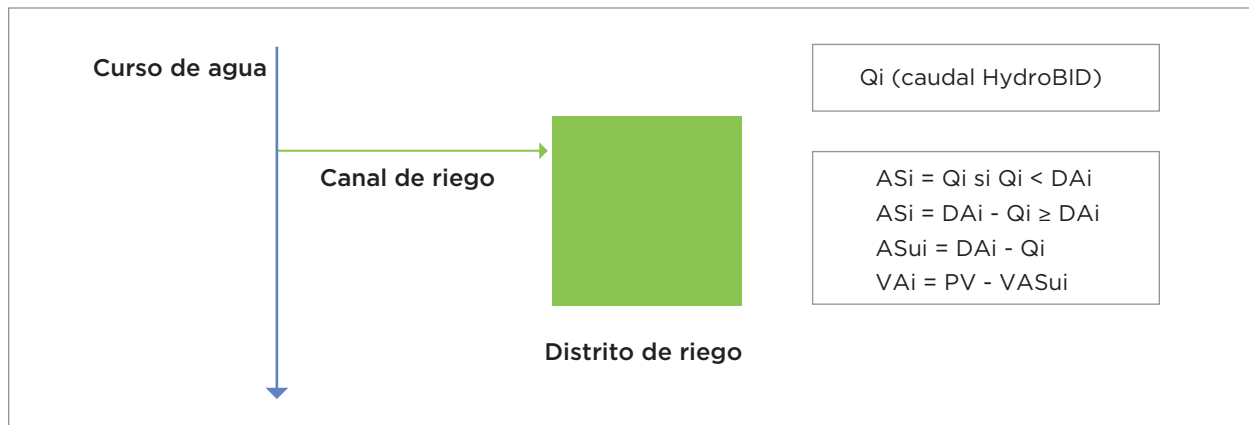
Cuando el caudal del río llega a una hidroeléctrica, este se capta hasta copar la capacidad de la central. El exceso se transita aguas abajo por el río en cuestión. El agua captada se compara con la capacidad y se calcula el racionamiento como la diferencia de la demanda y el agua suministrada. Igualmente se calcula el valor del agua utilizada y el valor de racionamiento si es que este

se produce. La esquematización de la central hidroeléctrica se muestra en el recuadro de su simulación hidroeléctrica en donde **FC** es el factor de conversión de caudal a energía de la central hidroeléctrica; **Ei**, la energía generada en el mes **i**; **C**, la capacidad de turbinación de la central; **Cmgi**, el costo marginal de la energía para dicho mes determinada por el CEN; y **VEi** y **VRI**, los valores de uso de agua y racionamiento respectivamente.



c. Funcionamiento de los distritos de riego

Esquematización de un distrito de riego:



El valor de la producción del distrito de riego **VAi** es igual al precio de venta en finca de la producción, menos los costos de pro-

ducción y menos los costos de bombeo del agua subterránea, **VASui** utilizada durante todo el año de producción. El agua subterrá-

nea utilizada **AS_{ui}** depende de si la disponibilidad del agua en bocatoma **Q_i** supera o no la demanda de agua del distrito de riego en el mes **i**, **DA_i**.

d. Resultados del modelo

Como resultados, el modelo entrega valores diarios del uso del agua en cada nodo (que

son agregados mensualmente) del valor económico que produce el agua y del tamaño promedio de los racionamientos, para cada uno de los 26 años simulados. Adicionalmente, obtiene los promedios mensuales de estas variables para todo el período simulado y las estadísticas más importantes como la desviación estándar y el coeficiente de variación, así como la probabilidad de racionamiento.

LOS NODOS Y SUS DEMANDAS POR AGUA



En esta sección se identifican los nodos o puntos presentes en los ríos en donde se capta agua para su posterior uso, y se resumen también las demandas existentes de agua superficial y subterránea en la cuenca del río Maule. Si bien se estiman la demanda y los beneficios para todos los sectores que utilizan agua, solo se hizo la modelación hidroeconómica con los sectores hidroeléctrico y agrícola (con riego), como se mencionó previamente, ya que corresponden a los principales usuarios de agua superficial, y debido a que no hay información suficiente en la totalidad de la cuenca del río Maule como para incluir la modelación del agua subterránea.

Dicho lo anterior, en cuanto al agua superficial se estimó la demanda para riego, las capacidades de generación de las hidroeléctricas y la Huella Hídrica Azul de los embalses de la cuenca. Respecto del agua subterránea, se estimó la huella hídrica para el sector forestal, la demanda del sector doméstico —que se abastece en un 95 % de agua subterránea—, la demanda del sector industrial y finalmente la demanda del sector pecuario. Para los balances de estas demandas, la oferta de agua subterránea se supuso que es fija.

Estas demandas se aglutinaron en los nodos de demanda creados para desarrollar un modelo de simulación matemática y poder elaborar los balances oferta demanda por mes. Los nodos de demandas agrícolas agrupan el conjunto de tomas para riego por río. Las demandas por agua subterránea están agrupadas por comuna (las comunas son la división administrativa menor y bási-

ca de Chile las cuales corresponde a lo que en otros países se conoce como municipio).

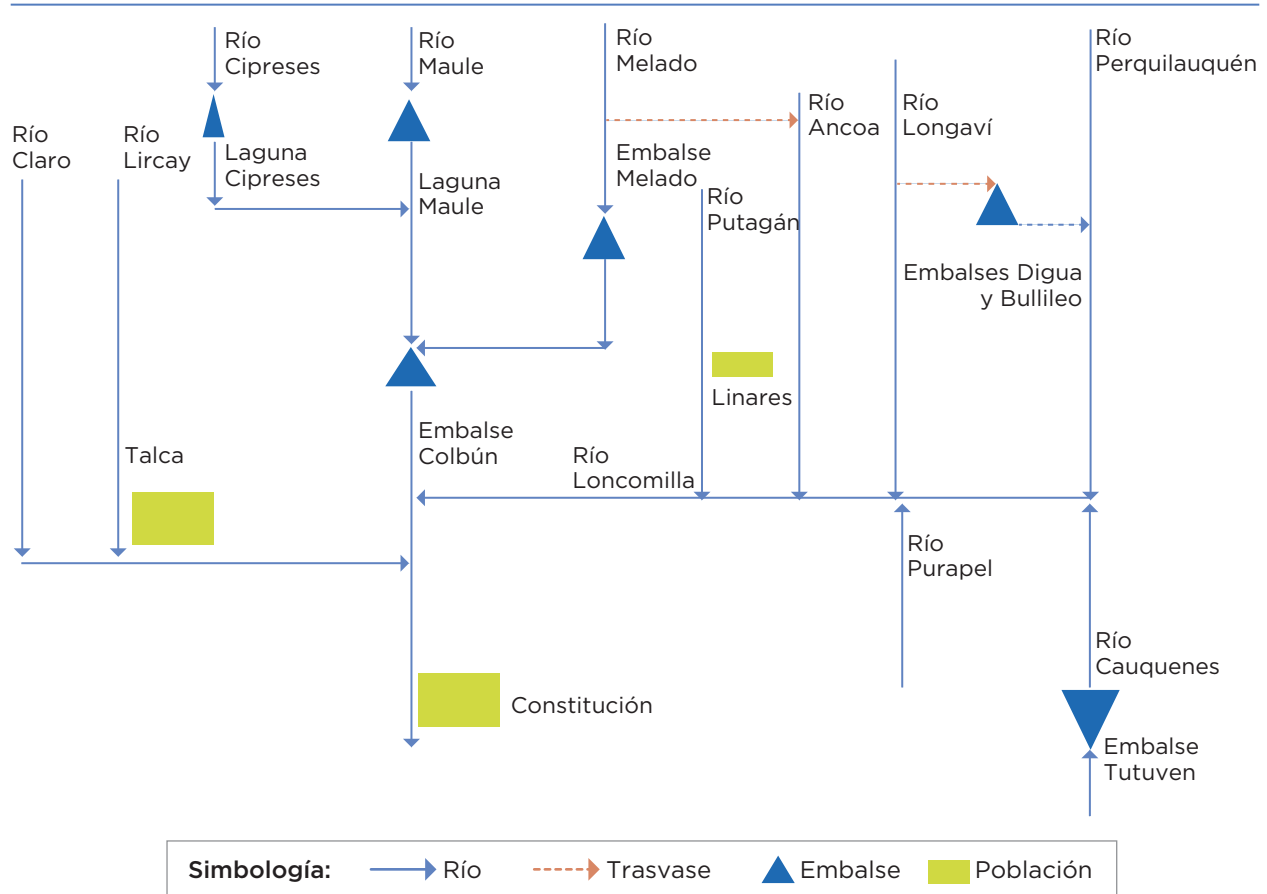
a. Demanda de agua superficial

La demanda de agua promedio anual para riego es de 139 m³/s para un área bajo riego de 264.000 ha, equivalente a 0,53 lts/ha. El mes de mayor demanda para el sector es enero, con una demanda de 415 m³/s (1,57 lts/ha); y los de menor demanda son mayo, junio, julio y agosto con un valor de 0 m³/s⁶. Esta información es el resultado de la recopilación de información, procesamiento y cálculos como se verá más adelante.

En el caso de generación de energía eléctrica, la capacidad instalada es de 1.511 MW

⁶ Elaboración propia, información deducida a partir de: 1. Plan Director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule, DGA, mayo 2018; 2. Presentación de Junta de Vigilancia del río Maule, noviembre 2018; 3. Jaramillo y Acevedo, 2017 para Escenarios Hídricos 2030, 2018.

ILUSTRACIÓN 4. Esquema de los ríos de la cuenca del Maule



Fuente: Elaboración propia de los autores.

y utilizaría 1.400 m³/s en caso de generar a su capacidad máxima. En la ilustración 4 se presenta el esquema de la cuenca identificando los ríos principales, los embalses y los trasvases; y en la ilustración del anexo (al final del documento) el esquema detallado de los nodos de demanda.

Demanda agrícola

Se estimaron las demandas agregadas mensuales por nodo a partir de las demandas mensuales por comuna obtenidas del informe “Aplicación de la metodología de contabilidad de Huella Hídrica directa a doce regiones de Chile” (Jaramillo y Acevedo, 2017. Las

hectáreas regadas se obtuvieron de la información que presentaron las juntas de vigilancia y se complementaron con informes de la DGA⁷.

Estimación de las demandas

Como se mencionó anteriormente, la demanda para el sector agrícola fue obtenida de las áreas regadas en el 2017 y las evapotranspiraciones potenciales de cada cultivo consignadas en el estudio de Jaramillo y Acevedo (2017). En este informe, el cálculo de Huella Hídrica Azul⁸ fue realizado por comuna, y

⁷ “Plan Director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Maule, DGA”, mayo 2018.

se hizo considerando la evapotranspiración mensual por cultivo y el número de hectáreas sembradas de este. A partir de la Huella Hídrica Azul, en el presente trabajo se calculó la cantidad de agua que debería ser captada para ser aplicada en riego, teniendo en cuenta las *eficiencias* de riego y el número de hectáreas sembradas con *cada eficiencia*

para cada comuna. La Huella Hídrica Azul y la captación para cada comuna presente en la cuenca del río Maule se observan en la tabla 3.

^a Huella Hídrica Azul corresponde al uso consuntivo o evapotranspiración potencial.

TABLA 3. Captación de agua por comuna

Comuna	Captación ^a (Mm ³ /año)	HHAZUL (Mm ³ /año)	Área regada (1000 ha)
Talca	140.32	53.92	7.7
Constitución	6.41	2.80	
Maule	59.43	22.67	4.8
Pelarco	110.26	37.99	8.3
Pencahue	99.06	57.63	10.0
Río Claro	170.38	70.45	12.0
San Clemente	312.97	115.61	23.8
San Rafael	132.02	49.55	6.9
Cauquenes	69.58	48.36	6.8
Molina	212.03	89.18	
Linares	255.23	85.09	13.0
Colbún	191.52	65.17	10.2
Longaví	309.94	119.47	19.0
Parral	344.04	151.78	20.0
Retiro	233.34	85.79	12.8
San Javier	236.87	88.66	12.4
Villa Alegre	128.80	47.18	6.9
Yerbas Buenas	225.62	77.79	12.5

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en la información del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017).

^a Mm³ Se refiere a Millones de metros cúbicos.

Las eficiencias tenidas en cuenta fueron:

TABLA 4. Eficiencias de riego

Tipo de riego	Por tendido	Por surco	Otro tradicional	Por aspersión tradicional	Por carrete o pivote	Por goteo o cinta	Microaspersión y microjet
%	0.3	0.45	0.6	0.75	0.75	0.9	0.95

Fuente: Jaramillo y Acevedo (2017).

Y la distribución en fracciones del tipo de riego por comuna tenida en cuenta en este estudio fue:

TABLA 5. Porcentaje del tipo de riego por comuna

Comuna	Por tendido	Por surco	Otro tradicional	Por aspersión tradicional	Por carrete o pivote	Por goteo o cinta	Microaspersión y microjet
Talca	0.45	0.42	0.04	0.00	0.01	0.08	0.00
Constitución	0.42	0.05	0.22	0.22	0.08	0.01	0.00
Maule	0.48	0.39	0.00	0.02	0.03	0.08	0.00
Pelarco	0.65	0.32	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Pencahue	0.17	0.21	0.01	0.00	0.01	0.59	0.00
Río Claro	0.38	0.42	0.00	0.01	0.00	0.09	0.10
San Clemente	0.50	0.43	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
San Rafael	0.59	0.20	0.04	0.00	0.00	0.13	0.04
Cauquenes	0.14	0.01	0.03	0.00	0.00	0.81	0.00
Molina	0.40	0.33	0.01	0.05	0.00	0.11	0.10
Linares	0.76	0.19	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
Colbún	0.75	0.14	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04
Longaví	0.48	0.32	0.11	0.00	0.01	0.04	0.04
Parral	0.34	0.14	0.44	0.03	0.02	0.02	0.00
Retiro	0.56	0.34	0.01	0.00	0.02	0.03	0.02
San Javier	0.58	0.24	0.01	0.00	0.00	0.16	0.01
Villa Alegre	0.54	0.37	0.01	0.00	0.01	0.07	0.00
Yerbas Buenas	0.70	0.21	0.00	0.01	0.00	0.05	0.03

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Para efectos de la simulación de la distribución del agua para el análisis hidroeconómico a realizar, las áreas de riego se distribuyeron en nodos de demanda de acuerdo con lo indicado por la Junta de Vigilancia del río Maule y el Plan Director de la cuenca del río Maule (ver tabla 6). La relación de los nodos con las áreas regadas en las comunas se muestra en la tabla 7.

A partir de los volúmenes de agua demandados por comuna, se calcularon las demandas por nodo. Las comunas se asignaron a los nodos de acuerdo con los canales de riego siguiendo la distribución que se presenta en la tabla 6.

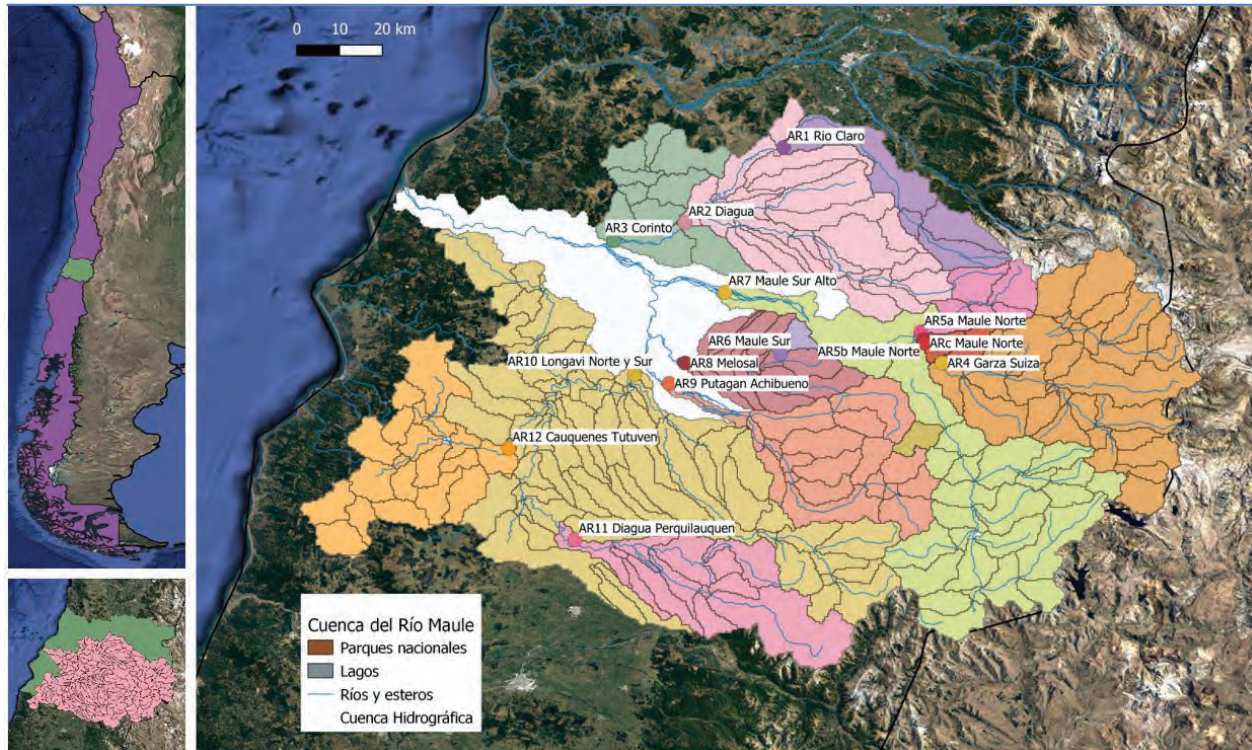
La localización de los nodos agrícolas se presenta en la ilustración 5.

TABLA 6. Relación nodos de demanda de agua y comunas

Nodo	Comunas aportantes
AR1	Río Claro
AR2	Pencahue
AR3	Pencahue
AR4	San Clemente
AR5	San clemente, Pelarco, San Rafael, Talca, Maule
AR6	Yerbas Buena, Villa Alegre
AR7	Colbún, San Javier
AR8	San Javier
AR9	Linares
AR10	Retiro, Longavi
AR11	Parral, Cauquenes
AR12	Cauquenes

Fuente: Elaboración propia de los autores.

ILUSTRACIÓN 5. Nodos de demanda para riego



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID y uso del modelo WaterALLOC.

Debido a que las áreas de riego de las comunas no coincidían exactamente con las de los nodos, para obtener los caudales demandados en los nodos se compensó con la relación de las áreas. Por ejemplo, el área de Río Claro es de 12.000 ha y la correspondiente del nodo AR1 es de 18.000 ha. Por lo tanto,

para estimar el caudal en AR1 se multiplicó la demanda de Río Claro ($170,38 \text{ Mm}^3/\text{año}$) por la relación de áreas (18/12). Así, el caudal demandado en AR1 sería de $255,57 \text{ Mm}^3/\text{año}$; es decir, $8,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Las hectáreas regadas por nodo y los caudales promedio anuales demandados se presentan en la tabla 7:

TABLA 7. Áreas de riego

Nodo	Nombre	Área (1000 ha)	Caudal demandado (m^3/s)
AR1	Río Claro	18.0	8.1
AR2	Pencahue	7.5	2.4
AR3	Corinto	1.2	0.4
AR4	Garza Suiza	1.5	0.6
AR5	Maule Norte	60.0	27.9
AR6	Maule Sur Bajo	25.0	14.5

(continúa en la página siguiente)

TABLA 7. Áreas de riego (continuación)

Nodo	Nombre	Área (1000 ha)	Caudal demandado (m ³ /s)
AR7	Maule Sur Alto	35.0	21.0
AR8	Melozal	8.5	5.1
AR9	Putagán-Achibueno	28.0	17.4
AR10	Longaví Norte y Sur	33.7	18.3
AR11	Diagua-Perqui	24.4	13.1
AR12	Cauquenes	0.7	0.2
Total		243.5	128.9

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo (año 2017).

Las demandas mensuales por nodo se calcularon utilizando la relación de la Huella Hídrica Azul por mes por comuna (valores obtenidos

del estudio de Jaramillo y Acevedo, 2017). Los resultados son:

TABLA 8. Demandas mensuales por nodo agrícola en (m³/s)

Nodo	Enero	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
AR1	24.0	16.2	10.2	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	5.5	17.1	23.0	8.1
AR2	6.7	4.6	2.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.0	4.9	6.6	2.4
AR3	1.1	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	1.1	0.4
AR4	2.2	1.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.5	1.9	0.6
AR5	89.8	49.7	28.5	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	14.6	63.8	83.4	27.9
AR6	43.3	27.9	16.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	8.2	33.7	43.8	14.5
AR7	61.6	42.8	25.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	14.3	45.1	60.8	21.0
AR8	15.1	11.0	6.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	3.5	10.2	14.6	5.1
AR9	48.8	32.4	16.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	15.1	40.3	50.9	17.4
AR10	53.7	36.9	21.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	11.8	40.5	51.9	18.3
AR11	36.8	26.1	14.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	12.4	27.7	34.2	13.1
AR12	0.7	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.2
Total	384.0	250.2	143.8	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	88.1	286.1	372.9	129.0

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Adicionalmente se calculó la demanda por hectárea dividiendo la demanda mensual por el número de hectáreas (ver tabla 9).

Demanda hidroeléctrica

La demanda hidroeléctrica la determina el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). El

sistema eléctrico de Chile está totalmente integrado. El CEN determina los despachos a nivel diario. Por lo tanto, para simular el sistema hidroeléctrico de la cuenca del Maule es necesario contar con los despachos del CNE. Para la región del Maule, el CNE determina los desembalses de los embalses Laguna del Maule, Colbún, Laguna la Invernada,

TABLA 9. Demandas mensuales por nodo agrícola en l/s/ha

Nodo	Enero	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Jun.	Jul.	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
AR1	1.34	0.90	0.57	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.30	0.95	1.28	0.45
AR2	0.89	0.61	0.37	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.26	0.65	0.88	0.31
AR3	0.89	0.61	0.37	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.26	0.65	0.88	0.31
AR4	1.45	0.77	0.44	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.98	1.28	0.42
AR5	1.50	0.83	0.48	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.24	1.06	1.39	0.46
AR6	1.73	1.12	0.64	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.33	1.35	1.75	0.58
AR7	1.76	1.22	0.72	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.41	1.29	1.74	0.60
AR8	1.77	1.30	0.80	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.42	1.19	1.72	0.61
AR9	1.75	1.16	0.59	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.54	1.44	1.82	0.62
AR10	1.59	1.10	0.64	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.35	1.20	1.54	0.54
AR11	1.53	1.09	0.61	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.52	1.16	1.43	0.55
AR12	0.96	0.70	0.52	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.19	0.59	0.88	0.32
Total	1.57	1.01	0.58	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.35	1.17	1.52	0.53

Fuente: Elaboración propia de los autores.

TABLA 10. Desembalses promedio mensuales del 2017

Mes	Laguna Maule	Invernada	Melado	Colbún	Machicura
Enero	50,0	20,0	81,6	59,5	61,9
Febrero	48,4	18,2	76,7	60,9	59,5
Marzo	10,3	21,2	51,8	68,7	67,3
Abril	2,5	16,6	42,3	126,7	127,4
Mayo	9,6	19,4	62,6	174,4	175,2
Junio	16,9	12,3	120,1	66,8	66,0
Julio	7,1	15,3	109,8	132,2	133,0
Agosto	0,1	20,8	109,1	53,7	53,1
Septiembre	0,2	10,2	135,4	47,9	49,2
Octubre	0,2	14,8	243,3	122,4	121,6
Noviembre	0,5	13,5	290,3	289,5	290,5
Diciembre	0,2	32,4	207,6	241,8	240,7

Fuente: Elaboración propia de los autores, a partir de datos a nivel horario y caudales de entrada a nivel horario suministrados por la CNE.

Melado y Machicura. Para el año simulado, 2017, los desembalses se muestran en la tabla 10.

Estos desembalses son el resultado de minimizar los costos de generación eléctrica nacional y deben respetar los acuerdos con los distritos de riego. Las hidroeléctricas y

sus características que se tendrán en cuenta en la simulación del sistema se muestran en la tabla 11.

El uso del agua para generar energía eléctrica no crea evapotranspiración (no hay uso consuntivo). Sin embargo, los embalses sí tienen evaporación y, por lo tanto, se tendrán

TABLA 11. Características de las hidroeléctricas

Nodo	Nombre	Potencia (MW)	Capacidad (m ³ /s)	Factor de conversión (GWH/mes) / (m ³ /s)
HE1	Lircay	19,0	25,0	0,55
HE2	Cipreses	115,8	36,0	2,35
HE3	Isla	68,0	84,0	0,59
HE4	Curillinque	40,0	84,0	0,35
HE5	Loma Alta	89,0	84,0	0,77
HE6	Pehuenche	524,0	297,8	1,28
HE7	Colbún	474,0	281,0	1,23
HE8	Machicura	94,6	286,4	0,24
HE9	San Ignacio	19,4	102,1	0,14
HE10	Chiburgo	19,4	16,6	0,85
HE11	La Mina	34,0	60,0	0,41
HE12	Ojo de Agua	9,0	13,0	0,51
Total		1.511,2		

Fuente: Cálculos propios de los autores, con base en información las empresas de energía eléctrica ENEL y Colbún.

en cuenta como uso consuntivo para efectos de este análisis. Los embalses y la deman-

da por evaporación, obtenidos de Jaramillo y Acevedo (2017), se muestran en la tabla 12.

TABLA 12. Características de los embalses y su evaporación

Nodo	Nombre	Capacidad (Mm ³)	Área (Km ²)	Evaporación (Mm ³ /año)	Evaporación (m ³ /s)
EMB1	Laguna Maule	1.420	51.0	29.67	0.941
EMB2	Laguna Invernadas	170	7.5	4.36	0.138
EMB3	Colbún	1.560	46.0	26.76	0.849
EMB4	Machicura	55	5.0	2.91	0.092
EMB5	Melado	133	3.8	2.21	0.070
EMB6	Digua	255	4.2	2.44	0.077
EMB7	Bullileo	60	2.0	1.16	0.037
EMB8	Tutuven	22	1.2	0.70	0.022

Fuente: Jaramillo y Acevedo (2017).

b. Demanda por agua subterránea

A pesar de que en las simulaciones no se incluyó la interacción dinámica con los acuíferos por falta de información, si se calcularon las demandas por el recurso. La demanda por agua subterránea está com-

puesta por la demanda forestal de cerca de 300.000 hectáreas sembradas en coníferas, cuya demanda asciende a 120 m³/s, la cual se produce por la evapotranspiración y por demandas que se satisfacen por bombeo del agua subterránea.

Estas son demanda por agua para consumo doméstico de 800.000 personas, cuya demanda promedio es de 2 m³/s, demanda industrial (1,8 m³/s) y demanda pecuaria (0,135 m³/s). A continuación, se detalla el cálculo de la demanda por agua subterránea por comuna.

Forestal

La cuenca del Maule tiene cerca de 300 mil hectáreas sembradas en coníferas con

objetivos comerciales. Existen 36.000 hectáreas en eucalipto y 263.000 en pino. La evapotranspiración potencial promedio del área es de 1.300 mm/año (estudio de Jaramillo y Acevedo, 2017). En una futura simulación del agua subterránea se podría suponer que existe una extracción concentrada en el centro de gravedad de las áreas sembradas y se agruparían por comuna. Las áreas sembradas por comuna y sus demandas y los consumos (HH Verde) según Jaramillo y Acevedo se muestran en la tabla 13.

TABLA 13. Demanda forestal

Comuna	Área (ha)	Etp (mm/año)	Demanda (Mm ³ /año)	Demanda (m ³ /s)	HH Verde (Mm ³ /año)	HH Verde (m ³ /s)
Talca	148	1,326	1.97	0.1	0,4	0,0
Constitución	75,034	1,135	851.56	27.7	240,5	7,6
Maule	2,381	1,150	27.38	0.9	11,1	0,4
Pelarco	4,944	1,326	65.55	2.1	17,5	0,6
Pencahue	31,910	1,191	379.91	12.4	88,1	2,8
Río Claro	5,133	1,286	66.04	2.1	18,0	0,6
San Clemente	18,395	1,323	243.28	7.9	92,0	2,9
San Rafael	1,866	1,344	25.08	0.8	5,9	0,2
Cauquenes	70,548	1,260	889.22	28.9	225,7	7,2
Molina	6,769	1,321	89.43	2.9	27,3	0,9
Linares	7,714	1,295	99.93	3.2	26,6	0,8
Colbún	6,318	1,277	80.69	2.6	22,1	0,7
Longaví	18,827	1,301	245.00	8.0	84,3	2,7
Parral	21,479	1,307	280.81	9.1	82,4	2,6
Retiro	4,600	1,307	60.14	2.0	18,5	0,6
San Javier	21,922	1,341	293.96	9.6	73,1	2,3
Villa Alegre	112	1,326	1.49	0.0	0,5	0,0
Yerbas Buenas	684	1,298	8.88	0.3	2,7	0,1
Total	298,785	1,284	3,710	120.6	1.036,7	32,9

Fuente: Elaboración propia de los autores, a partir del informe del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017).

La distribución mensual de la demanda, así como el consumo mensual (HH Verde) de cada una de las comunas, sigue este patrón

(así como la demanda total de la cuenca sobre las aguas subterráneas). Se calculó el caudal mensual demandado (azul)

y consumido (verde) mediante el producto del área total sembrada en bosques y la evapotranspiración mensual de la cuenca (azul) y distribuyendo proporcionalmente el

consumo anual (verde) siguiendo el patrón de la evapotranspiración obtenida del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017). El resultado se presenta en la tabla 14.

TABLA 14. Caudal mensual de la demanda forestal

Mes	Caudal demandado (m ³ /s)	Consumo HH Verde (m ³ /s)
Enero	206,4	56,3
Febrero	168,1	45,9
Marzo	145,5	39,7
Abril	101,5	27,7
Mayo	71,1	19,4
Junio	52,4	14,3
Julio	50,8	13,8
Agosto	64,3	17,5
Septiembre	88,4	24,1
Octubre	132,0	36,0
Noviembre	167,0	45,6
Diciembre	199,7	54,5
Total	120,6	32,9

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en la información del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017).

Demanda para consumo humano

Para efectos de la simulación se dividió, en cada comuna, la población en urbana y rural y se concentró cada tipo de población en el centro de gravedad de cada comuna. Se utilizó una captación per cápita para el sector urbano de 101,2 m³/año (277 lhd)⁹. Se supuso una tasa de agua no contabilizada del 30 %, que es el porcentaje normal de pérdidas en sistemas pequeños (menores a 100.000 conexiones), de acuerdo con observaciones de campo. Por lo tanto, la demanda diaria per cápita sería de 194 lhd a un precio de

CLP 1.564,7 por m³, como se detallará en el apartado de beneficios.

Para el sector rural, el valor de captación per cápita es 29,7 m³/año (81 lhd), que corresponden a 22,8 m³/año (62 lhd), aplicando el 30 % de agua no contabilizada asumido para este tipo de sistemas. Las poblaciones, la demanda per cápita y el consumo total anual se muestran en la tabla 15.

⁹ Jaramillo y Acevedo (2017).

TABLA 15. Demandas de agua subterránea para consumo humano (doméstico)

Comunas	Población (Hab)		Demanda Mm ³ /año		Captación Mm ³ -año		Total de captación	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Mm ³ /año	m ³ /s
Talca	224.040	9.299	15,87	0,19	22,67	0,28	22,95	0,73
Constitución	40.975	9.779	2,90	0,20	4,15	0,29	4,44	0,14
Maule	19.746	29.588	1,40	0,62	2,00	0,88	2,88	0,09
Pelarco	1.990	5.946	0,14	0,12	0,20	0,18	0,38	0,01
Pencahue	2.167	6.678	0,15	0,14	0,22	0,20	0,42	0,01
Río Claro	2.820	10.689	0,20	0,22	0,29	0,32	0,60	0,02
San Clemente	14.942	26.614	1,06	0,55	1,51	0,79	2,30	0,07
San Rafael	4.438	5.344	0,31	0,11	0,45	0,16	0,61	0,02
Cauquenes	30.356	10.305	2,15	0,21	3,07	0,31	3,38	0,11
Molina	30.982	11.291	2,19	0,24	3,14	0,34	3,47	0,11
Linares	74.601	16.429	5,28	0,34	7,55	0,49	8,04	0,25
Colbún	5.686	13.758	0,40	0,29	0,58	0,41	0,98	0,03
Longaví	6.507	23.019	0,46	0,48	0,66	0,68	1,34	0,04
Parral	27.000	11.686	1,91	0,24	2,73	0,35	3,08	0,10
Retiro	5.018	14.688	0,36	0,31	0,51	0,44	0,94	0,03
San Javier	23.929	17.170	1,70	0,36	2,42	0,51	2,93	0,09
Villa Alegre	5.688	9.662	0,40	0,20	0,58	0,29	0,86	0,03
Yerbas Buenas	1.803	16.436	0,13	0,34	0,18	0,49	0,67	0,02
Total	522.687	248.382	37,03	5,17	52,90	7,39	60,28	1,91

Fuente: Elaboración propia de los autores, a partir de información del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017).

Demandas por extracción de agua subterránea de los sectores pecuario e industrial

Otras demandas por agua subterránea menores, pero muy importantes a nivel socioeco-

nómico, son la pecuaria y la industrial. Dichas demandas por comuna se presentan en la tabla 16.

TABLA 16. Demanda de agua de los sectores pecuario e industrial

Comunas	Industrial		Pecuario	
	Mm ³ /año	l/s	Mm ³ /año	l/s
Talca	0.57	18	0.08	3
Constitución	28.87	939	0.10	3
Maule	0.31	10	0.12	4
Pelarco	0.12	4	0.33	11
Pencahue	0.12	4	0.08	3

(continúa en la página siguiente)

TABLA 16. Demanda de agua de los sectores pecuario e industrial (continuación)

Comunas	Industrial		Pecuario	
	Mm ³ /año	l/s	Mm ³ /año	l/s
Río Claro	0.06	2	0.25	8
San Clemente	0.07	2	0.44	14
San Rafael	0.09	3	0.21	7
Cauquenes	0.02	1	0.32	10
Molina	0.00	0	0.17	5
Linares	0.10	3	0.29	9
Colbún	0.01	0	0.22	7
Longaví	0.04	1	0.37	12
Parral	0.22	7	0.38	12
Retiro	0.17	6	0.36	12
San Javier	0.08	3	0.26	8
Villa Alegre	0.21	7	0.07	2
Yerbas Buenas	24.37	792	0.20	7
Total (litros)		1.802		138
Total (m³/s)	55	(1,8)	4	(0,14)

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en la información del estudio de Jaramillo y Acevedo (2017).

NODOS Y SUS BENEFICIOS



Para cada una de las demandas se determinaron los modelos de los beneficios por el uso del agua y los costos de racionamiento por no cumplir las demandas. Para el caso de las hidroeléctricas se determinó cuál es el costo de la capacidad ociosa, asociado a no tener agua suficiente.

a. Beneficios agrícolas

Los beneficios agrícolas tenidos en cuenta en cada uno de los nodos de demanda son la totalidad de los márgenes netos de cada cultivo del nodo. Como solo se cuenta con la distribución de cultivos de la región para el año 2017, se supuso que esta distribución de cultivos es similar en cada nodo.

Debido a la cantidad de productos sembrados en las 264.000 ha del estudio (están registrados 179 especies), se seleccionaron los cultivos más representativos, o sea, los que tienen un área regada superior a 2.500 ha para realizar los cálculos de margen económico. El número de especies cultivadas con más de 2.500 ha es de 19 y cubren un total de 206.000 ha para un 80 % del área en estudio. Para cada uno de estos cultivos se obtuvo el rendimiento económico neto, el cual está consignado en las fichas técnico-económicas de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA (Ministerio de Agricultura).

Los productos más importantes son: uva vinífera con 53.000 ha sembradas; trigo, con 28.000 ha; maíz, con 21.000 ha; y manzano rojo, con 18.000 ha. Los beneficios netos fluc-

túan entre CLP 30.000 por hectárea sembrada en arroz hasta CLP 7.000.000 por hectárea en tomate industrial. Los ingresos y costos de los 19 productos se presentan en la tabla 17. Estos ingresos no incluyen impuestos.

El beneficio neto promedio por hectárea es de CLP 1.317.000 (valor ponderado por área). Para obtener los beneficios potenciales totales de los distritos de riego (nodos agrícolas), este valor se multiplica por las hectáreas cultivadas. El costo de racionamiento es igual al costo de bombeo de agua subterránea¹⁰ para suplir el agua no entregada por el sistema de riego de agua superficial. Este valor es de CLP 214.420 (USD 322) por hectárea sembrada en frutales, la cual requiere un total de 7.892 m³ por año¹¹; es decir, USD 0,041 por m³ equivalente a CLP 27,3 por m³ ⁽¹²⁾. Se supuso que el ingreso por hectárea era igual en cada nodo agrícola, ya que no

¹⁰ El costo de bombeo fue suministrado por la Junta de Vigilancia del Maule.

¹¹ Cálculo propio a partir de los requerimientos de riego promedio de las áreas sembradas en frutales en la cuenca (789 mm/año).

¹² Tasa de cambio 1 USD = CLP 665,9 Departamento de Inversiones del Ministerio de Planificación (Mideplan).

TABLA 17. Ingresos netos por hectárea de cultivo con riego

Cultivo	Área cultivada 2017 [ha]	Ingreso por hectárea [CLP]	Total costos [CLP]	Margen neto [CLP]
Uva vinífera	52.963	1.920.000	1.189.451	730.549
Trigo	27.788	942.500	763.560	178.940
Maíz consumo	21.320	1.800.000	1.571.183	228.817
Manzano roja	18.706	8.800.000	6.069.710	2.730.290
Arroz	17.395	1.314.892	1.283.628	31.264
Cerezo	11.131	12.650.000	8.430.648	4.219.352
Avellano europeo	6.586	6.800.000	3.583.808	3.216.192
Remolacha azucarera (bete-rraga)	5.953	5.600.000	3.699.654	1.900.346
Poroto	5.420	3.080.000	1.834.752	1.245.248
Olivo	5.134	2.100.000	978.053	1.121.947
Arándano	4.750	12.600.000	8.915.943	3.684.057
Kiwi	4.609	3.000.000	2.705.430	294.570
Nogal	4.367	6.800.000	3.583.808	3.216.192
Papa	4.168	4.710.000	3.075.992	1.634.008
Manzano Verde	3.362	8.800.000	6.069.710	2.730.290
Maíz Semilla	3.353	1.800.000	1.571.183	228.817
Tomate Industrial	3.340	17.500.000	10.133.025	7.366.975
Avena	3.172	910.000	675.780	234.220
Peral	2.743	6.750.000	5.121.997	1.628.003

Fuente: Información suministrada por el Ministerio de Agricultura (fichas técnicas de la ODEPA) e INDAP.

se encontró información detallada del área sembrada por cultivo por nodo.

b. Beneficios hidroeléctricos

El beneficio económico de generación hidroeléctrica está dado por la energía producida en cada hidroeléctrica, valorada al costo marginal (CMg) de largo plazo. La Comisión Nacional de Energía, CNE, suministró la información de los costos marginales de largo y corto plazo (año 2017). Los promedios de los diferentes subsistemas con los que se hicieron los cálculos de la simulación se muestran en la tabla 18.

El valor económico de la energía ($VE_{i,j}$) generado en cada hidroeléctrica, i , en el mes, j , el

cual se presentó en la conceptualización del modelo de simulación, es

$$VE_{i,j} = Q_{i,j} * FC_i * CMg_j$$

Donde $Q_{i,j}$ es el caudal turbinado en la hidroeléctrica i , FC_i el factor de conversión de la hidroeléctrica i y CMg_j el costo marginal de largo plazo para el mes j .

c. Beneficios por consumo humano

Los beneficios económicos por consumo de agua potable mensual y por persona están representados en la disposición a pagar por dicho servicio. En la ilustración 6 se muestra el modelo económico de la demanda de agua el cual representa dicha disposición

TABLA 18. Costos marginales promedio de la energía del sistema interconectado de Chile

Mes	Escenario			
	Corto Plazo		Largo Plazo	
	CLP/kwh	USD/kwh	CLP/kwh	USD/kwh
Enero	26,7	0,040	26,5	0,040
Febrero	26,7	0,040	35,6	0,054
Marzo	26,7	0,040	44,4	0,067
Abril	29,1	0,044	43,1	0,065
Mayo	24,7	0,037	42,5	0,064
Junio	26,0	0,039	38,8	0,058
Julio	24,8	0,037	38,7	0,058
Agosto	23,3	0,035	33,7	0,051
Septiembre	20,6	0,031	26,1	0,039
Octubre	18,3	0,027	24,6	0,037
Noviembre	13,8	0,021	18,7	0,028
Diciembre	14,6	0,022	21,0	0,032

Fuente: Comisión Nacional de Energía, CNE, costos marginales de largo y corto plazo, 2017

a pagar¹³. En la gráfica se representan los beneficios por un consumo de agua Q_1 , en donde P_0 es el costo económico de distribuir agua en carro aljibe y Q_0 es el agua que un ciudadano consumiría del acueducto si la tarifa fuera P_0 . La tarifa actual es P_1 para la cual el usuario consumiría Q_1 . El modelo de la demanda de agua está dado por:

$$Q = \alpha P^e$$

Donde Q es cantidad de agua demandada, P es el precio del agua y e es la elasticidad precio de la demanda por agua. Se adoptó una elasticidad de $-0,31$ sugerida por Mideplan. Este valor se corroboró con el trabajo elaborado recientemente para la Región Bio Bio¹⁴, cuyo resultado fue de una elasticidad de $-0,308$. El modelo de beneficios o valor económico por uso de agua es:

$$VA = P_{Aljibe} * Q_0 + \int P dq$$

(valorada entre Q_0 y Q_1)

P en función de Q está dada por:

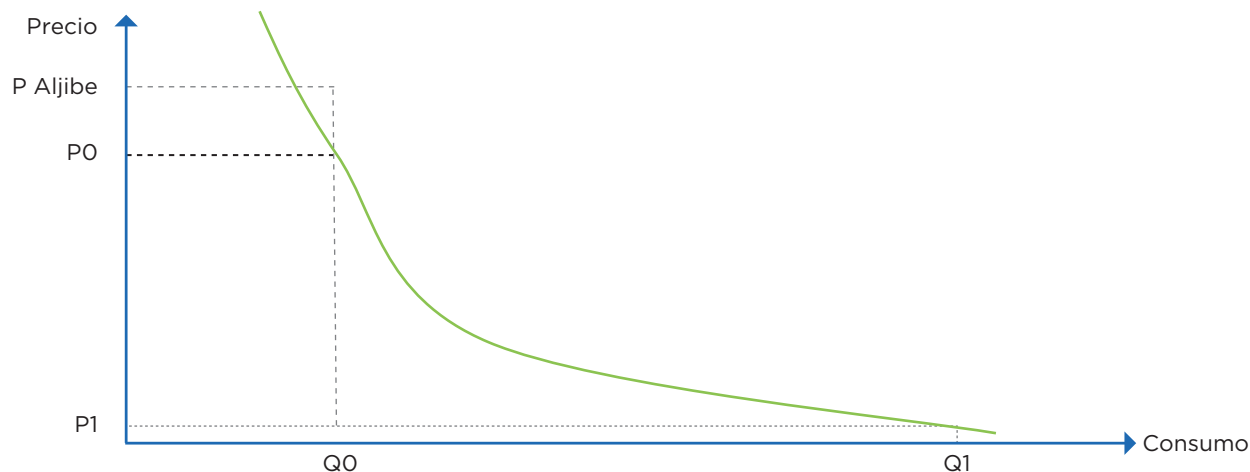
$$P = (Q/\alpha)^{1/e}$$

De acuerdo con la información de la empresa de agua potable Nuevo Sur, la tarifa (valores del 2017) de agua más saneamiento (incluyendo el cargo fijo) es de CLP 1.564,7 por m^3 . El consumo mensual es de $8,43 m^3/habitante$ por mes. Los parámetros de la función de beneficios por consumo de agua potable per cápita son: el precio promedio de

¹³ Inversión Pública, Eficiencia y Equidad, Mideplan, Departamento de Inversiones.

¹⁴ Estimación econométrica de la demanda de agua potable residencial para la Octava Región; Felipe Ariel Espinoza; Universidad de Concepción; 2016.

ILUSTRACIÓN 6. Modelo de Demanda



Fuente: Elaboración propia de los autores.

camión aljibe (**P Aljibe**) es CLP 9.984 por m^3 (información suministrada por las municipalidades de la cuenca), cantidad de agua consumida al precio **P₀**, (**Q₀**) 2,61 m^3 por mes, la tarifa actual (**P₁**) CLP 1.564,7 y la demanda a este precio (**Q₁**) 8,43 m^3 .

d. Beneficios del sector forestal

Los beneficios forestales tenidos en cuenta en cada comuna son la totalidad de los márgenes netos de cada sembradío. Para cada uno de estos cultivos se obtuvo el rendimiento económico neto, el cual está consignado en las fichas técnico-económicas de la ODEPA (Ministerio de Agricultura). Los dos sembradíos forestales con los que se cuenta en la cuenca y sus rendimientos y beneficios netos anuales se presentan en la tabla 19.

Los ingresos potenciales de la cuenca por productos forestales son: CLP 2.730 millones (USD 4,1 millones) por Eucaliptus y CLP 99.019 millones (USD 148,7 millones) para un

TABLA 19. Ingresos netos por hectárea de siembra forestal

Siembra	Ingreso neto (CLP/ha/año)	Ingreso neto (USD/ha/año)
Eucalyptus	76.638	115,0
Pino Insigne	376.537	565,4

Fuente: Información suministrada por el Ministerio de Agricultura (fichas técnicas de la ODEPA) e INDAP, año 2018.

total de USD 152,8 millones anuales exentos de impuestos.

e. Beneficios de los sectores pecuario e industrial

Los beneficios del sector pecuario e industrial son los costos evitados. En este caso, en donde los dos sectores utilizan aguas subterráneas, el costo evitado es el acarreo de agua con camión aljibe. Por lo tanto, el beneficio del agua utilizada es CLP 9.984 por m^3 menos el costo de bombeo de un m^3 , el cual es CLP 23,3; es decir, CLP 9.960,7 por m^3 utilizado.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y RESULTADOS



Como se mencionó en el acápite de los objetivos, con este estudio se busca determinar el caudal promedio que el sistema hídrico de la cuenca del río Maule¹⁵ puede suministrar a los nodos de demanda. Adicionalmente, la simulación permite obtener las probabilidades de cumplimiento de la demanda en los distritos de riego; las probabilidades de falla del cumplimiento de la demanda y sus distribuciones probabilísticas y parámetros estadísticos más importantes para la hidrología histórica y escenarios con cambio climático; el promedio de generación de energía hidroeléctrica y la distribución probabilística y sus estadísticas principales de la suma de las 12 hidroeléctricas simuladas y de cada hidroeléctrica. Así, a partir de los 26 años de caudales diarios de agua superficial generados por el HydroBID, se simuló la cuenca utilizando las demandas, las reglas de operación de los embalses y la infraestructura existentes en el año 2017. Los resultados de cada año tienen una probabilidad de ocurrencia de 3,8 %, tal como se explicó en el objetivo.

Debido a la falta de información, se debió adoptar varios supuestos. El principal es la capacidad de los acuíferos de suministrar agua en forma ilimitada a los distritos de riego en caso de que el agua superficial sea insuficiente. Adicionalmente, se supuso que no existía descenso en los niveles freáticos debido a la utilización de los acuíferos. Estos supuestos son conservadores, ya que si el uso de las aguas subterráneas no es sostenible las ganancias serán menores y los impactos del cambio climático mayores. Adicionalmente, se supuso una regla de operación del embalse Colbún para distribuir las aguas al nodo de la hidroeléctrica HE10 (Chiburgo). Esta regla consiste en entregar agua a este nodo si sobra agua después de cumplir con

los desembalses para la hidroeléctrica HE7 (Colbún).

Como resultado se obtuvo que el caudal promedio utilizado en riego con las demandas del año 2017 proveniente de las aguas superficiales es de 2.303 millones de m³ por año, y la energía generada, de 4.251 GWH/año. Los resultados se presentan en forma estadística, mostrando el valor esperado, la desviación típica (estándar), las probabilidades de ocurrencia del agua suministrada, los racionamientos de los distritos de riego y la capacidad utilizada de las hidroeléctricas.

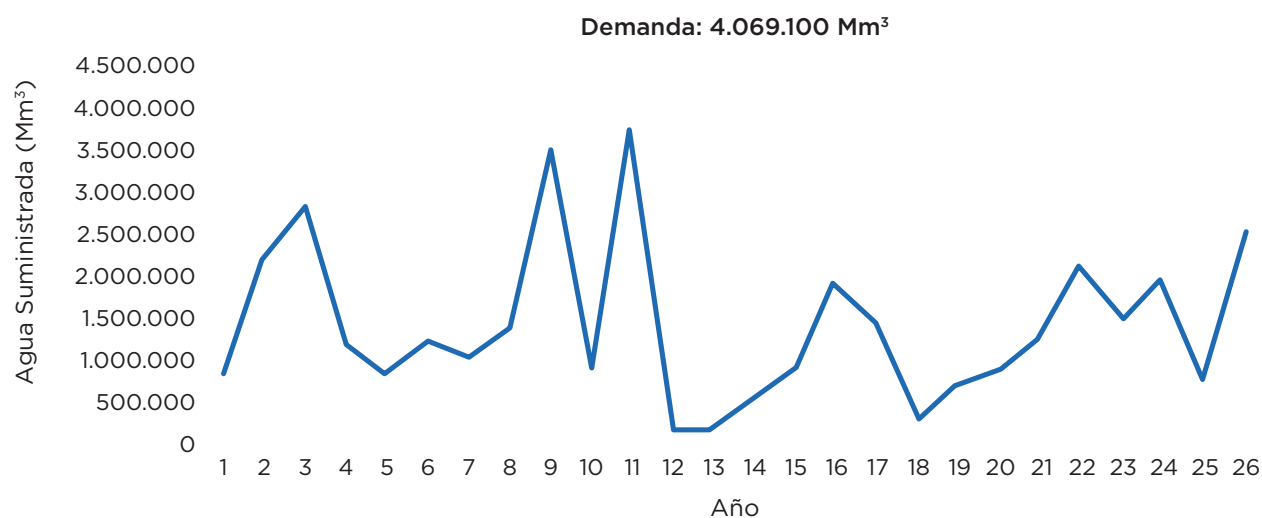
¹⁵ Sistema Hídrico definido como el conjunto de ríos, embalses y transvases de la cuenca.

a. Sector agrícola (resultado integral de las áreas de riego)

Los resultados de la simulación muestran que en promedio el agua disponible en los ríos no es suficiente para suplir la demanda de riego. Esta demanda asciende a 4.069,1 millones de m³ por año. En promedio el sistema¹⁶ puede entregar 2.800 millones de m³ (69 % de la demanda) con una desviación

estándar de 832 millones de m³. Para complementar la demanda, se necesitaría bombear del agua subterránea la diferencia, es decir, 1.269 millones de m³, a un costo promedio de CLP 32.616 (USD 49,0 millones). La serie de agua suministrada obtenida a partir del modelo de simulación se muestra en la ilustración 7.

ILUSTRACIÓN 7. Serie de agua suministrada



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo

El rango del agua suministrada para riego va desde 725 millones de m³ hasta 4.000 millones de m³. La distribución probabilística del agua suministrada se presenta en la ilustración 8.

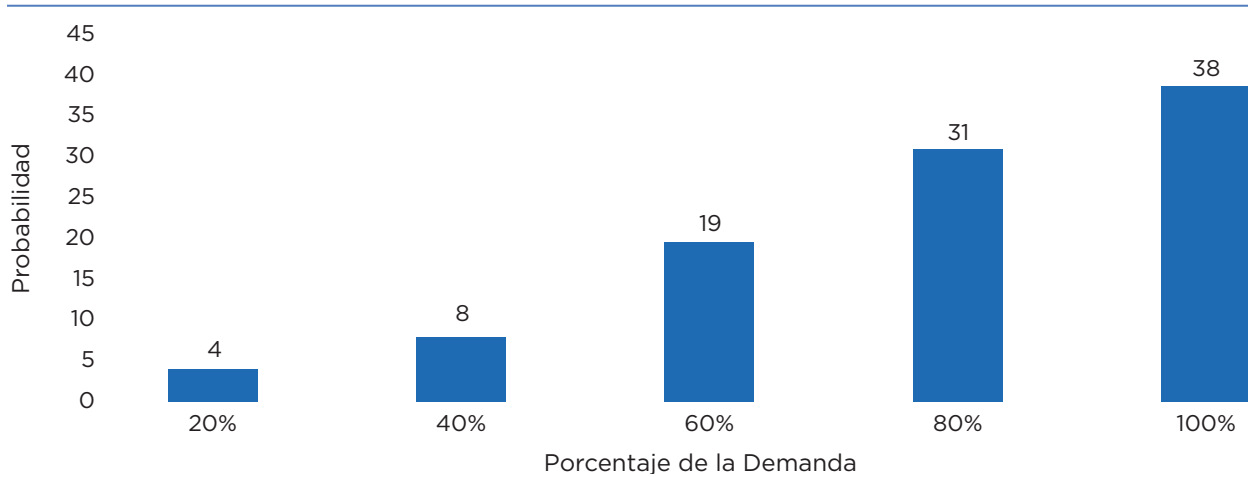
La ilustración anterior muestra que la demanda se cumple (entre el 80 y 100 % de lo demandado) casi el 70 % de los años, es decir, el racionamiento es bajo. Esta afirmación se corrobora con la baja probabilidad (12 %) de contar con menos del 50 % del agua demandada.

El racionamiento se suple con el bombeo de agua subterránea. La serie de bombeo se muestra en la ilustración 9.

El ingreso esperado (promedio), el cual se calcula como el ingreso total (tabla 19) menos el costo promedio del bombeo del agua subterránea, de las 12 áreas de riego ascendería a CLP 287.885 millones (USD 432 millones),

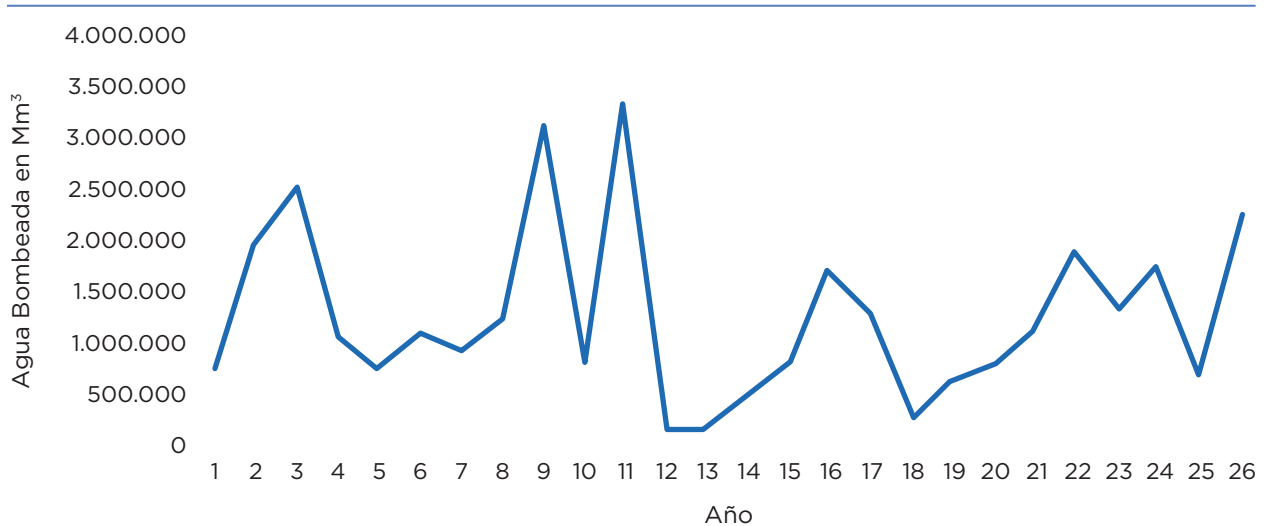
¹⁶ Sistema corresponde al grupo de ríos, embalses, transvases y reglas de operación de la infraestructura hidráulica de la cuenca del río Maule.

ILUSTRACIÓN 8. Suministro de agua para uso agrícola



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

ILUSTRACIÓN 9. Uso de agua subterránea (racionamiento)

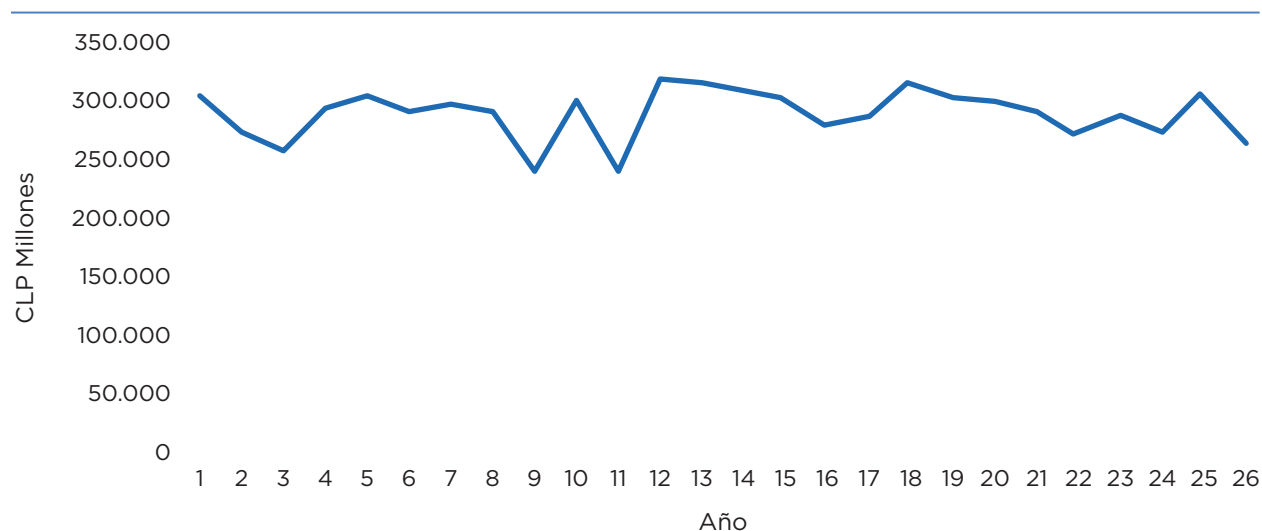


Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

con una desviación de CLP 21.388 millones (USD 32 millones). La serie del ingreso sería:

El rango de estos ingresos anuales oscilaría entre CLP 250.000 millones (USD 375 millones) y CLP 315.000 millones (USD 473 millo-

nes). Esta variación es pequeña comparada con la del agua utilizada, y es debido a que el costo de bombeo es tan solo de USD 0,04 por m^3 comparado con el valor generado por el agua superficial, que es de USD 0,12 por m^3 .

ILUSTRACIÓN 10. Ingreso neto en áreas de riego

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Resultados por nodo de riego

A partir de la simulación de los 26 años se encontraron los usos promedio y las estadísticas del agua utilizada en cada una de ellas. Los resultados se presentan en la tabla 20.

Las probabilidades de suministro de agua del 100 % de la demanda en cada área de riego se muestran en la tabla 21.

La tabla 21 muestra que solo en los distritos de riego AR2 y AR3 (subcuenca del río

TABLA 20. Estadísticas del agua suministrada por área de riego

Nodo	Nombre	Área de riego	Demanda anual	Agua suministrada	
		(1000 ha)	(1000 m ³)	Promedio (1000 m ³)	Desviación (1000 m ³)
AR1	Río Claro	18,0	255.576	166.360	58.236
AR2	Diagua	7,5	74.295	74.098	691
AR3	Corinto	1,2	11.887	11.887	0
AR4	Garza Suiza	1,5	19.725	5.913	7.113
AR5	Maule Note	60,0	879.613	751.469	182.347
AR6	Maule Sur Bajo	25,0	456.736	387.194	118.073
AR7	Maule Sur Alto	35,0	663.439	536.846	187.544
AR8	Melozal	8,5	162.370	158.049	11.180
AR9	Putagán-Achibueno	27,9	549.725	233.504	129.893
AR10	Longaví Norte y Sur	33,7	575.733	307.090	125.631
AR11	Diagua-Perqui	24,4	412.854	160.325	85.040
AR12	Cauquenes	0,7	7.162	5.072	1.366

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

TABLA 21. Distribución probabilística de suministro de agua (en %)

Identificación	Nombre	Porcentaje de la demanda atendida				
		20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
AR1	Río Claro	0	15	31	23	31
AR2	Diagua	0	0	0	0	100
AR3	Corinto	0	0	0	0	100
AR4	Garza Suiza	50	8	12	15	12
AR5	Maule Note	0	8	0	15	77
AR6	Maule Sur Bajo	4	4	12	12	69
AR7	Maule Sur Alto	4	8	12	12	65
AR8	Melozal	0	0	0	4	96
AR9	Putagán-Achibueno	23	27	31	8	12
AR10	Longaví Norte y Sur	8	19	35	27	12
AR11	Diagua-Perqui	19	42	23	12	4
AR12	Cauquenes	0	8	15	46	31

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Lircay) la demanda puede ser atendida con una probabilidad de 100 %. Sin embargo, en AR11, AR4, AR9 y AR10, la probabilidad de suministrar la totalidad del agua demandada es menor al 12 % (principalmente, los sistemas de riego de la subcuenca del río Lanco, los cuales tienen poca capacidad de regulación de caudales en los embalses).

Los resultados muestran que las áreas de riego menos vulnerables son las que cuentan con grandes embalses de regulación. Es así como las áreas conglomeradas en la Junta de Vigilancia del Maule (AR5, AR6 y AR7) y las áreas AR2, AR3, AR8 y AR12 tienen una baja probabilidad (menor al 30 %) de obtener menos del 80 % del agua demandada. Las áreas de riego con embalses de regulación pequeños o sin regulación (excepto AR2, AR3 y AR8) tienen probabilidades altas (mayores al 30 %) de recibir menos del 80 % de la demanda.

La distribución probabilística sirve para guiar a las autoridades de riego o a las juntas

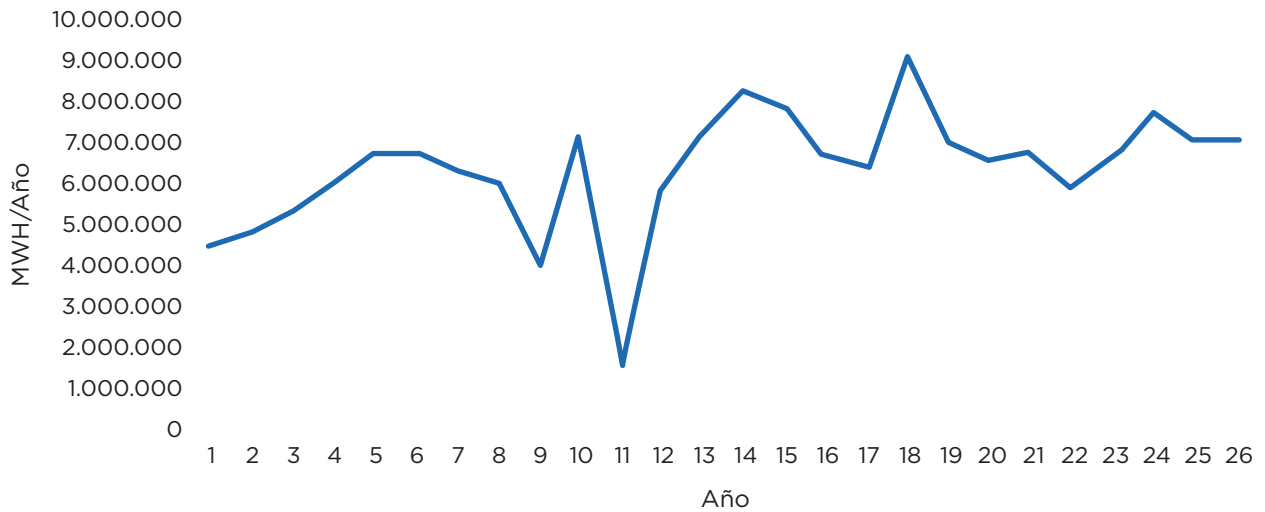
de vigilancia a tomar decisiones sobre políticas de eficiencia de riego, reglas de operación de los embalses existentes o implementación de nueva infraestructura y/o acciones que permitan abastecer las demandas en época de escasez.

b. Generación de energía hidroeléctrica

Los resultados de la simulación muestran que en promedio en la cuenca se genera 6.300 GWH/año con una desviación estándar de 1.113 GWH/año (21.259 Mm³/año o 674 m³/s) incluyendo en la simulación las 12 hidroeléctricas mostradas en la tabla 11. La cuenca tiene una capacidad de generación de 13.194 GWH/año, es decir que se utiliza el 48 % de la capacidad instalada. La serie de generación de energía resultante de la simulación se presenta en la ilustración 11.

La ilustración muestra que la generación anual (o rango de generación) puede ir desde 1.600 GWH/año hasta 9.000 GWH/año,

ILUSTRACIÓN 11. Generación de energía hidroeléctrica

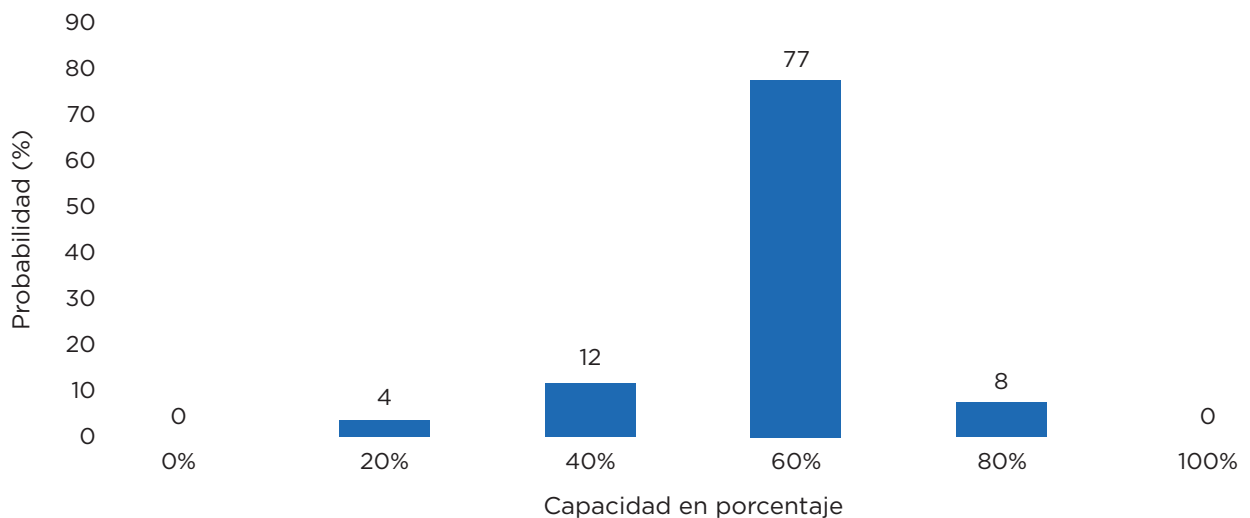


Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

dependiendo de los caudales disponibles (en el río) y/o del caudal liberado de los embalses. La distribución probabilística de la producción de energía de la cuenca se presenta en la ilustración 12.

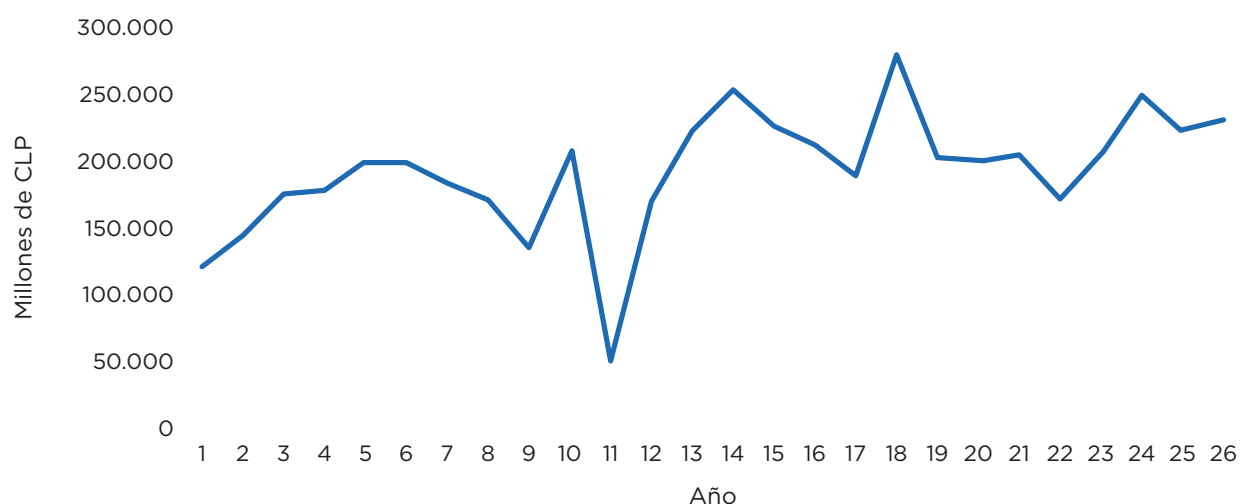
La distribución muestra que la producción es bastante estable a pesar de la variación hidrológica, centrada entre el 40 y el 80 % de la capacidad instalada, siendo el 60 % la mediana y moda.

ILUSTRACIÓN 12. Frecuencia de uso de la capacidad instalada



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

ILUSTRACIÓN 13. Serie de ingresos por generación hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Los valores de energía se transformaron a valores económicos utilizando los costos marginales de largo plazo (tabla 18), siguiendo la metodología expuesta en la sección de Beneficios hidroeléctricos. La serie de ingresos económicos se puede observar en la ilustración 13.

El ingreso esperado en el largo plazo (uso de los costos marginales de largo plazo en la tabla 18 es de CLP 191.721 millones (USD 289,5 millones), con una desviación estándar de CLP 45.455 millones.

Resultados por central hidroeléctrica

A partir de la simulación de los 26 años, se encontraron los usos promedio y las estadísticas de la generación en cada hidroeléctrica. Los resultados se presentan en la tabla 22.

La distribución probabilística de la utilización de la capacidad instalada se consigna en la tabla 23.

Para analizar los resultados que se presentan en la tabla 23 hay que tener en cuenta que los datos utilizados corresponden a la generación anual. En las hidroeléctricas Isla, Curillinque, Loma Alta y San Ignacio la capacidad instalada se usa la totalidad del tiempo el 8 % de los años en las tres primeras y el 19 % en la última. Adicionalmente, en la tabla se muestra que en las hidroeléctricas Chiburgo y Ojo de Agua hay años que no se turbinan agua (11 % de los años en la primera y 54 % en la segunda). Con la simulación realizada (que se hace a nivel diario) no se puede analizar el uso de la potencia instalada, ya que este análisis debe hacerse con información horaria. Un resultado importante es que más del 50 % de los años se utiliza más del 40 % de la capacidad instalada, a pesar de que la Laguna del Maule y el embalse Colbún disminuyen sus desembalses durante el invierno debido al convenio que se tiene con las autoridades de riego.

TABLA 22. Estadísticas de la generación de energía en cada central

Nodo	Nombre	Potencia	Capacidad		Generación promedio	Desviación	Ingresos promedios anuales	
		(MW)	(m ³ /S)	MWH	MWH	MWH	CLP MM	USD MM
HE1	Lircay	19	25	166.440	93.803	18.430	3.036	4,6
HE2	Cipreses	115,8	36	1.014.408	550.092	125.678	16.751	25,2
HE3	Isla	68	84	595.680	371.863	81.534	11.516	17,3
HE4	Curillínque	40	84	350.400	221.888	48.671	6.867	10,3
HE5	Loma Alta	89	84	779.640	494.038	108.299	15.292	23,0
HE6	Pehuenche	524	297,8	4.590.240	2.077.448	505.280	62.548	93,9
HE7	Colbún	474,0	281	4.152.240	1.894.583	458.729	57.304	86,0
HE8	Machicura	94,6	286,4	828.696	375.725	90.997	11.369	17,1
HE9	San Ignacio	19,4	102,1	169.944	121.547	22.199	3.880	5,8
HE10	Chiburgo	19,4	16,6	169.944	44.869	27.800	1.383	2,1
HE11	La Mina	34,0	60	297.840	51.131	12.684	1.716	2,6
HE12	Ojo de Agua	9,0	13	78.840	2.305	6.315	59	0,1

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

TABLA 23. Distribución probabilística de la capacidad instalada utilizada por hidroeléctrica

Nodo	Nombre	Porcentaje de la capacidad instalada utilizada					
		0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
HE1	Lircay	0,0	3,8	3,8	57,7	34,6	0,0
HE2	Cipreses	0,0	3,8	3,8	57,7	34,6	0,0
HE3	Isla	0,0	3,8	3,8	23,1	61,5	7,7
HE4	Curillínque	0,0	3,8	0,0	26,9	61,5	7,7
HE5	Loma Alta	0,0	3,8	0,0	26,9	61,5	7,7
HE6	Pehuenche	0,0	3,8	15,4	76,9	3,8	0,0
HE7	Colbún	0,0	3,8	15,4	76,9	3,8	0,0
HE8	Machicura	0,0	3,8	15,4	76,9	3,8	0,0
HE9	San Ignacio	0,0	0,0	3,8	11,5	65,4	19,2
HE10	Chiburgo	11,5	19,2	50,0	15,4	3,8	0,0
HE11	La Mina	0,0	61,5	38,5	0,0	0,0	0,0
HE12	Ojo de Agua	53,8	38,5	7,7	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Nota: Los valores de probabilidad no suman 100 % debido a redondeo.

ANÁLISIS DEL SECTOR FORESTAL



En los últimos 40 años, el sector forestal en Chile ha sido testigo de una conversión de bosque nativo a plantaciones forestales exóticas utilizadas con fines comerciales. En todo el país, el 31 % de los bosques nativos ha sido convertido entre 1978 y 1987 para fines agrícolas, pastoriles y forestales, cuyo nuevo uso del suelo ha jugado un papel económico importante (Bottaro, Roco, Pettenella, Micheletti, & Vanhulst, 2018).

Hay aproximadamente 397.341 hectáreas de tierras forestales en la cuenca del Maule, de acuerdo con los datos de la Base de Datos de Uso del Suelo¹⁷ en HydroBID, que comprenden el 31 % del área de la cuenca del Maule. Según un estudio de Jaramillo y Acevedo, aproximadamente 298.785 hectáreas del área boscosa están bajo uso comercial, las cuales, utilizando el área boscosa de HydroBID, se aproximarían al 75 % comercial y al 25 % nativo¹⁸.

Dentro de la cuenca del Maule, las especies forestales nativas son principalmente *Nothofagus glauca*, así como *Nothofagus leonii*, *Nothofagus alessandri* y *Gomortega keule*. De manera similar, para el país en su conjunto, gran parte del área ha sido convertida a otros usos de la tierra, siendo el área de uso del suelo agrícola (26,4 %) y las plantaciones forestales (16,3 %) las más prevalentes a partir de 2015 (Pérez, et al., 2015). Dentro del área de estudio del Río Maule-Cobquecura (578,164 ha), entre los años 1975 y 2000 hubo una reducción del área de bosque natural del 67 %, lo que equivale a una tasa anual de pérdida de bosque del 4,5 % por año, usando

una fórmula de tasa de interés compuesto (Echeverría, et al., 2006).

Esta conversión dentro de la cuenca ha causado la fragmentación del paisaje forestal natural y ha demostrado limitar la biodiversidad, aumentar las especies invasoras y afectar los recursos hídricos (Gutiérrez Flores & Becerra Osses, 2017). En esta sección se determina cómo las áreas forestales, que han sufrido cambios dramáticos, afectan la disponibilidad de agua en la cuenca del río Maule.

a. Métodos del análisis

Para calcular este efecto dentro de HydroBID, se realizó una modificación en la base de datos SQLite. Todos los usos del suelo

¹⁷ Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe, BID, 2014.

¹⁸ La variación en las estadísticas puede atribuirse a las diferentes fechas y áreas a las que se hace referencia, ya que la superficie terrestre ha cambiado mucho en los últimos años, y muchas fuentes hacen referencia a la región del Maule en su conjunto y no a la cuenca del Maule; sin embargo, estas cifras siguen estando en consonancia con otras estimaciones.

forestales relevantes y los números de curva correspondientes dentro de la base de datos se cambiaron a un uso del suelo con números de curva altos. Luego, se utilizó la base de datos SQLite modificada, “sin bosques”, para ejecutar el modelo calibrado y determinar la diferencia en la disponibilidad de agua para cada COMID, y para la cuenca hidrográ-

fica en general. Esta diferencia puede apuntar hacia el “uso” del agua proporcionada naturalmente (es decir, basada en la precipitación) por las áreas forestales.

En la tabla 24 se muestran los usos del suelo y los números de curva utilizados en el modelo HydroBID.

TABLA 24. Número de subcuencas con cada clasificación de uso de suelo forestales presentes en la cuenca del río Maule

Código USGS	Tipo	Subcuencas (#)
11	Bosque latifoliado caducifolio	71
13	Bosque latifoliado siempre verde	50
15	Bosque mixto	91
19	Barren o escasamente vegetado	53

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

En este análisis, los usos del suelo forestal de tipo 11-15 fueron cambiados a un uso del suelo forestal de tipo 19 (escasamente vegetado o barren). En la cuenca del río Maule, había un total de 128 microcuencas que contenían bosques (de diferentes áreas) de las 271 cuencas totales. Específicamente, estuvieron presentes los usos del suelo 11,

13 y 15, correspondientes a bosque latifoliado caducifolio, bosque latifoliado perennifolio y bosque mixto, como se muestran en la tabla 25. Los tipos de suelo variaban de A a D, pero el tipo de suelo más frecuente era el tipo B (Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe, BID 2014).

TABLA 25. Tabla de clasificación de uso de suelo y tipos de suelo usados para el cálculo del número de curva

Código USGS	Descripción	Número de curva			
		A	B	C	D
1	Urbano y suelo urbanizable	82	88	92	93
2	Tierras de cultivo y pastos en zonas áridas	64	75	82	85
3	Cultivos de regadío y pastos	64	75	82	85
4	Tierras mixtas de secano/cultivos de regadío y pastos	40	64	75	81
5	Mosaico de tierras de cultivo/pastizales	40	64	75	81
6	Mosaico de tierras de cultivo/madera	40	64	75	81
7	Pastizal	49	70	80	87
8	Matorral	45	57	68	74

(continúa en la página siguiente)

TABLA 25. Tabla de clasificación de uso de suelo y tipos de suelo usados para el cálculo del número de curva (continuación)

Código USGS	Descripción	Número de curva			
		A	B	C	D
9	Matorral mixto/pastizal	45	57	68	74
10	Sabana	49	70	80	87
11	Bosque latifoliado caducifolio	36	60	73	79
12	Bosque caducifolio de hojas blancas	36	60	73	79
13	Bosque latifoliado siempre verde	36	60	73	79
14	Bosque siempre verde de hojas blancas	36	60	73	79
15	Bosque mixto	36	60	73	79
16	Cuerpos de agua	100	100	100	100
17	Humedal herbáceo	49	70	80	87
18	Humedal arbolado	49	70	80	87
19	Estéril o poco vegetado	77	86	91	94
20	Tundra herbácea	45	57	68	74
21	Tundra arbolada	45	57	68	74
22	Tundra mixta	45	57	68	74
23	Tundra desnuda	77	86	91	94
24	Nieve o hielo	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

Los detalles de las clasificaciones forestales antes de ser modificadas en el modelo y

su tipo de suelo se pueden encontrar en la tabla 26.

TABLA 26. Desglose de los tipos de bosque y de suelo presentes en la cuenca

nlcd ID	Tipo de bosque ^a	%	Total área (ha)	Tipo de suelo A		Tipo de suelo B		Tipo de suelo C		Tipo de suelo D	
				(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
11	Latifoliado caducifolio	45 %	178.011	94	0 %	177.244	100 %	672	0 %	0	0 %
13	Latifoliado siempre verde	5 %	19.941	0	0 %	1.219	6 %	8.397	42 %	10.325	52 %
15	Mixta	50 %	199.389	20.942	11 %	156.117	78 %	6.412	3 %	15.917	8 %
Área total forestal			397.341	21.036	5 %	334.581	84 %	15.482	4 %	26.242	7 %

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de USGS GLCC 1992/1993 - datos de uso del suelo.

^a Con base en USGS GLCC 1992/1993 Uso del suelo datos.

En HydroBID todavía no existe un método para diferenciar entre los bosques comerciales y los bosques nativos, por lo tanto, el modelo incluye todas las áreas foresta-

les al calcular el uso del bosque. Como se mencionó anteriormente, aproximadamente 298.785 de las 397,341 hectáreas (75 %) son plantaciones comerciales. Arriba, los euca-

liptos están representados por el *uso del suelo 13*, que comprende 9-12 % de las plantaciones forestales y principalmente tienen un *suelo tipo C y D*. Ambos usos del suelo 11 y 15 tienen un tipo de suelo prevalente de tipo B. Los pinos, que representan el 88 % de las plantaciones comerciales, están incluidos en el uso del suelo de bosques mixtos, 15. Los árboles nativos están representados por el uso del suelo 11. Sin embargo, se observa que estos porcentajes se basan en los datos de uso del suelo de 1992 y 1993¹⁹.

Mientras que estas ligeras discrepancias en los porcentajes de uso del suelo deben ser tratadas, el tipo de suelo y el número de curva siguen siendo consistentes, ya sea que el uso del suelo esté clasificado como bosque latifoliado caducifolio (bosque natural) o bosque mixto (que representa las plantaciones de pino). Por lo tanto, el modelo sigue calculando la misma disponibilidad de agua

independientemente del uso preciso del suelo forestal (11-15).

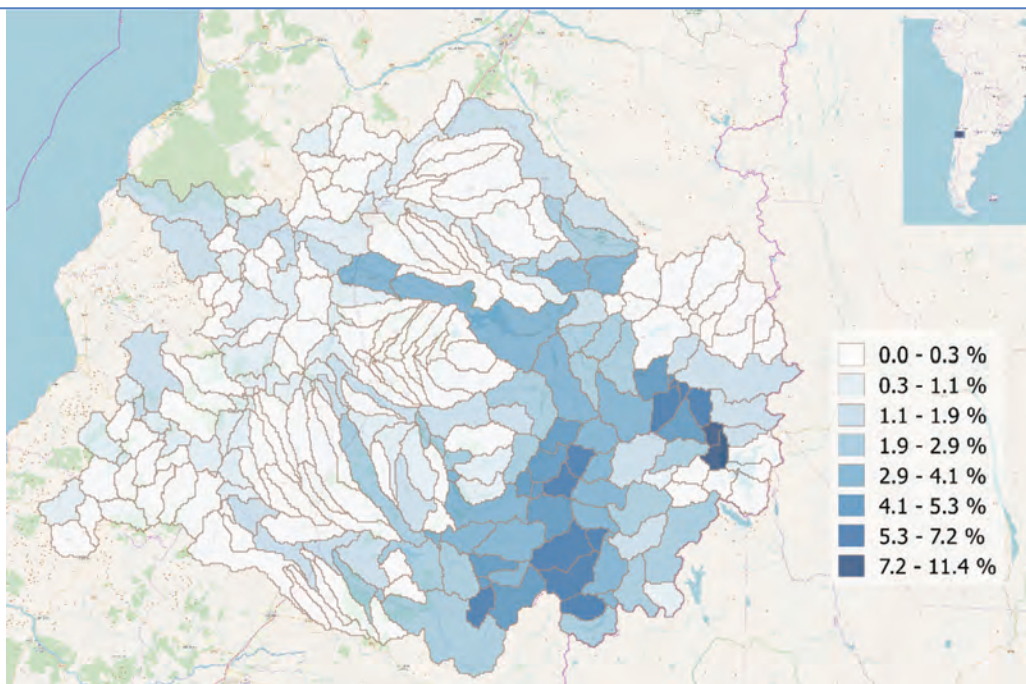
b. Resultados

Después de realizar el cambio de uso del suelo dentro de la base de datos SQLite, se obtuvieron los resultados del modelo donde se determinó y demostró la diferencia porcentual en la disponibilidad de agua (escorrentía) en la ilustración 14, que se relaciona con áreas altamente boscosas, como se muestra en la ilustración 15.

Como se muestra en la ilustración 16, hay una diferencia muy pequeña en la desembocadura de la cuenca; las diferencias oscilan

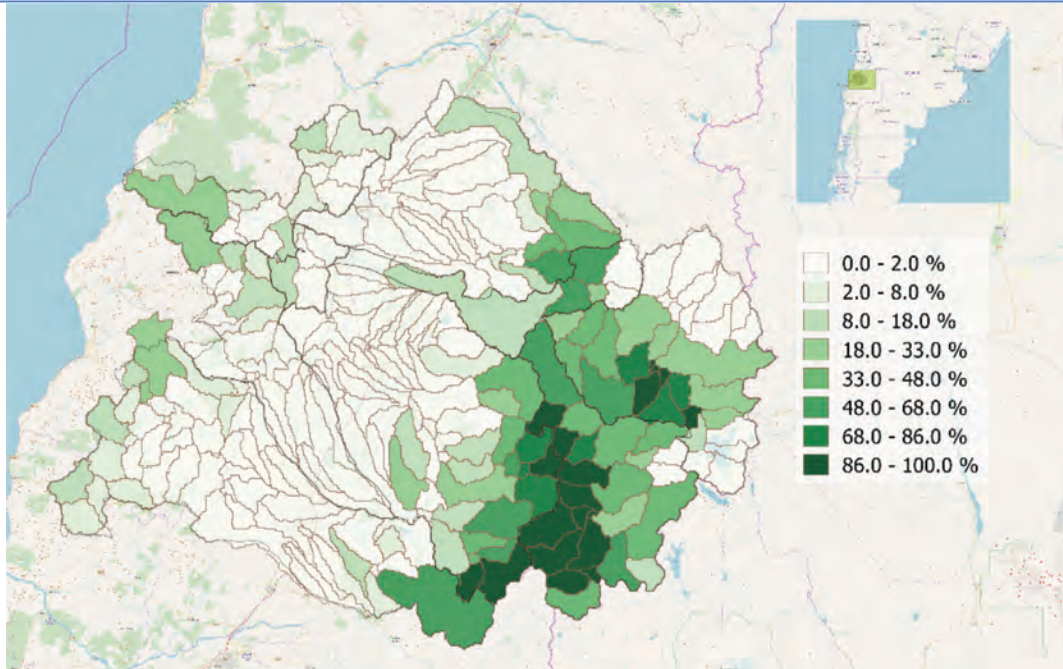
¹⁹ Un estudio de caso dentro de la región del Maule encontró que estos bosques nativos disminuyeron de 52 % a 20 % entre 1978 y 1997, los cuales fueron reemplazados principalmente por plantaciones de pino. (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009).

ILUSTRACIÓN 14. Aumento porcentual de la escorrentía sin bosques



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

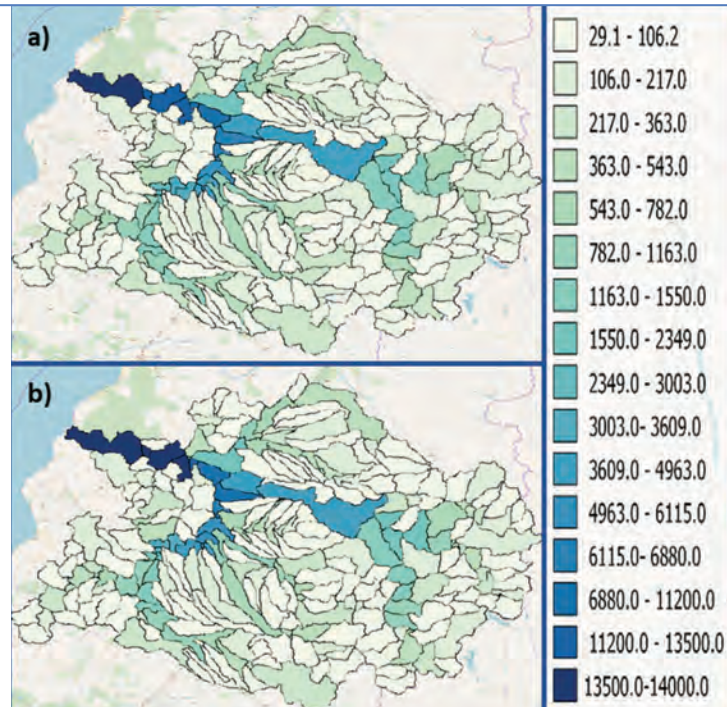
ILUSTRACIÓN 15. Porcentaje de bosques en cada COMID



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

Nota: Analisis basada en la clasificación de uso del suelo del USGS NLCD.

ILUSTRACIÓN 16. Disponibilidad de agua (millones de m³/año) en el modelo original (a) y en el modelo sin bosques (b)



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información de la base de datos de HydroBID.

entre el 0 y el 11 % dependiendo de la superficie forestal presente. La disponibilidad total de agua (tabla 27) presenta un incremento

del 1,48 % en la disponibilidad de agua con la ausencia de bosques.

TABLA 27. Disponibilidad total de agua en la cuenca del Maule (m³/año)

Escenario	Disponibilidad total (m ³ /año)	% de cambio
Sin bosque	2,179 * 10 ¹¹	
Modelo original	2,147 * 10 ¹¹	1,48 % aumento de la disponibilidad de agua sin bosques

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información del modelo HydroBID.

Las subcuencas detalladas en la tabla 28 destacan las diferencias más significativas presentes con el cambio en el uso del suelo forestal. Como lo demuestran las subcuencas más dinámicas, el tipo de suelo más

prevalente es el tipo de suelo B y el uso del suelo más dominante es el uso del suelo 15, bosque mixto. Esto coincide con el tipo de suelo y el uso del suelo más frecuente en la región.

TABLA 28. Subcuencas destacadas con diferencias considerables en la disponibilidad de agua entre los dos modelos

COMID	Porcentaje de área boscosa	Uso dominante de la tierra	Tipo de suelo dominante	Flujo de Salida Sin Bosque (106 m ³ / año)	Flujo de Salida Original (106 m ³ / año)	Diferencia de porcentaje
317408100	12 %	19	B	228	205	11,38 %
317392100	90 %	15	B	280	256	9,65 %
317387100	82 %	15	B	410	382	7,25 %
317373500	100 %	15	B	474	444	6,89 %
317368100	100 %	15	B	525	492	6,79 %

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información del modelo HydroBID.

c. Discusión, conclusión y mejoramientos futuros

Los resultados del análisis ilustran que los bosques influyen en la disponibilidad de agua dentro de las regiones muy boscosas; sin embargo, considerando la disponibilidad de agua a escala de la cuenca del Maule, la diferencia es casi imperceptible (-1,5 %). No obstante, esta pequeña diferencia es probable-

mente una subestimación, y puede atribuirse a muchos factores que aún no se han abordado en el modelo, tales como:

a. Clasificación del uso del suelo desactualizada o imprecisa

Aunque los datos más recientes del USGS sobre el uso del suelo se implementan en

la base de datos de HydroBID, estos datos se compilan a partir de imágenes satelitales tomadas en 1992 y 1993, y por lo tanto podrían estar representando de manera inexacta algunos usos de la tierra en la región. Sin embargo, al considerar los diferentes usos del suelo forestal, los números de curvas no cambian de acuerdo con el sistema de clasificación de uso del suelo NLCD del USGS.

Esto apunta a áreas de inexactitud con el modelo que representa el uso del agua del bosque, ya que ha habido una diferencia comprobada entre los usos del agua del bosque nativo y del bosque de plantación, así como diferencias en las distintas especies de árboles de plantación. Además, el consumo de agua subterránea, que se sabe que es un factor importante de consumo por las áreas forestales, puede afectar en gran medida los resultados, pero no está representado en el modelo. El tipo de suelo también juega un papel importante en la disponibilidad de agua.

b. Diferencia entre el consumo y los efectos de la escorrentía de los bosques nativos y de las plantaciones forestales

Un estudio chileno recientemente realizó una comparación específica de las mejores relaciones precipitación-escorrentía dentro de un área de estudio en la Región del Maule, las cuencas hidrográficas de Purapel en Nirivilo y Cauquenes en el Arrayán, comparando el uso del agua de los bosques nativos versus las plantaciones forestales. En esta área de estudio, se encontró que la cobertura de bosque nativo disminuyó de 52 % a 20 % entre 1978 y 1997, con un aumento correspondiente en la plantación de *Pinus radiata* de 19 % a 52 %. El estudio confirmó las alegaciones de estudios anteriores de

que en áreas donde las plantaciones exóticas han reemplazado a los bosques nativos, hubo una disminución significativa de la escorrentía, especialmente en el verano. El estudio cita una regresión lineal desarrollada para seis cuencas (Lara et. Al) mostrando que hay una “disminución del 20,4 % en la escorrentía estival por cada 10 % en el área de plantaciones forestales exóticas” (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009).

c. Diferencia entre el consumo de agua de las plantaciones forestales y los efectos de la escorrentía

En términos generales, el consumo de agua es mayor en las plantaciones forestales con especies de crecimiento rápido, en comparación con las plantaciones de especies de crecimiento lento o los bosques nativos. Esto puede resultar en una disminución en la escorrentía del agua de la cuenca; de hecho, en las cuencas altas, las altas concentraciones de bosque de coníferas pueden causar un aumento de 15 a 20 % en el flujo anual del arroyo, y pueden reducir la recarga del agua subterránea en un 70 % o más en comparación con el pasto (Forest Research, 2019). Sin embargo, algunos estudios han demostrado la importancia de la presencia de bosques en la cuenca en general, y que el cambio en la escorrentía del agua no es evidente cuando las plantaciones ocupan alrededor del 20 % del área de captación (Lima, 2011). Esta conclusión podría apuntar al leve cambio en la disponibilidad de agua entre los dos escenarios de uso del suelo calculados por el estudio.

Limitándose a la región del Maule, hay dos tipos de árboles que prevalecen en las plantaciones de árboles: *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, que pueden influir en la evapotranspiración, la escorrentía y la disponibilidad de agua subterránea. Estas características

particulares de los tipos de árbol no están representadas en el modelo.

El *Pinus radiata* tiene el 88 % de las plantaciones más grandes de la región del Maule y está clasificada como una hoja de seda perenne, pero está representada en la región como Bosque Mixto, uso del suelo tipo 15. El árbol crecerá con raíces muy profundas si la profundidad del suelo lo permite (Yáñez Barrios, 2018). Tolerará precipitaciones anuales entre 350 y 2500 mm pero tiene su mayor productividad con 1000 mm de precipitaciones anuales (CABI, 2018). En Argentina, se encontró que las plantaciones de *Pinus ponderosa* tienen un 33-64 % más de uso de agua, y mayor profundidad en el suelo, que el bosque nativo, *Austrocedrus chilensis* (Licata et al., 2008) (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009).

El *Eucalyptus globulus* está clasificado como un árbol de hoja ancha perenne de tamaño mediano a grande (uso del suelo tipo 13) y representa el 12 % de las plantaciones forestales comerciales en la cuenca. El árbol, una especie de crecimiento extremadamente rápido, requiere una precipitación media anual de entre 500 y 1500 mm, y puede crecer durante todo el año siempre y cuando las condiciones de temperatura y agua sean favorables (CABI, 2018). La especie utiliza grandes cantidades de agua del suelo por hectárea y puede afectar negativamente la disponibilidad de agua subterránea (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009). Un estudio realizado en Etiopía, Fetene y Beck (2004), encontró que la especie utiliza has-

ta 5 veces más agua (en volumen) que los árboles de crecimiento lento con tamaño y características ambientales similares (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009). La especie utiliza más agua debido a las mayores tasas de fotosíntesis, pero lo hace de manera más eficiente (es decir, mayor biomasa arbórea acumulada por la cantidad de agua utilizada) (Myers, 2017).

Un estudio chileno determinó que los rangos de porcentaje de disminución de escorrentía para los pinos y eucaliptos son 16-17 % y 10-11 % respectivamente, pero con un mayor caudal en las cuencas cubiertas predominantemente de pinos debido a una mayor evapotranspiración por parte de los eucaliptos. (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009).

d. Diferencia en el tipo de suelo y efectos de escorrentía

Como otra consideración para los resultados de este análisis, el suelo más prevalente es el tipo de suelo B, que tiene un número de curva menor que los tipos de suelo C y D. Esto significa que habrá menos escorrentía en comparación con los tipos de suelo C y D, independientemente del uso del suelo. En el caso de los eucaliptos, el tipo de suelo en el que se plantan estos árboles, los tipos de suelo C y D, tienen un elevado número de curvas y, en consecuencia, una mayor escorrentía. Sin embargo, estos representan solo el 12 % de los árboles comerciales plantados; la mayoría de las plantaciones de árboles, que son plantaciones de pinos, tienen suelo tipo B.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL AGUA SUPERFICIAL



Se generó un escenario de entrada de cambio climático utilizando los cambios estimados en la precipitación y la temperatura para 2050 a partir del informe “Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980–2010) y proyección al año 2050”. Se seleccionó un escenario representativo en Colbún, donde se encuentra el reservorio más grande de la cuenca, el cual tiene gran importancia en el suministro de agua para diferentes sectores. Este escenario de cambio climático representativo fue aplicado a toda la cuenca del río Maule.

El escenario de cambio climático resultó en una disminución de un 24 % de la precipitación con respecto al porcentaje de la línea base, un incremento en la temperatura de 2.3 °C entre los meses de octubre y marzo, y un aumento de la temperatura de 1.65 °C entre los meses de abril y septiembre (ver tabla 29).

En cuanto a los resultados de la simulación con la hidrología afectada por el cambio climático y utilizando las mismas condiciones de demanda superficial, beneficios y costos económicos del 2017, se encontró que el caudal promedio utilizado en riego proveniente de las aguas superficia-

les es de 1.203 millones de m³ y la energía generada de 2.415 GWH/año. Los ingresos netos económicos anuales se reducirían a CLP 246.911 millones (USD 370,7 millones) en el sector agrícola y CLP 78.668 millones (USD 118,1 millones) en el sector hidroeléctrico.

a. Sector agrícola

A partir de la serie de caudales que incluyen el impacto del cambio climático, el caudal promedio de aguas superficiales utilizado en riego se reduce de 2.800 millones de m³ al año a 1.637 millones (58 % del original), con desviación estándar de 572 millo-

TABLA 29. Resultados de escenario de cambio climático

	Precipitación anual en % de línea base	Octubre-marzo incremento en temperatura	Abril-septiembre incremento en temperatura
Escenario de cambio climático	76 %	2.3 °C	1.65 °C

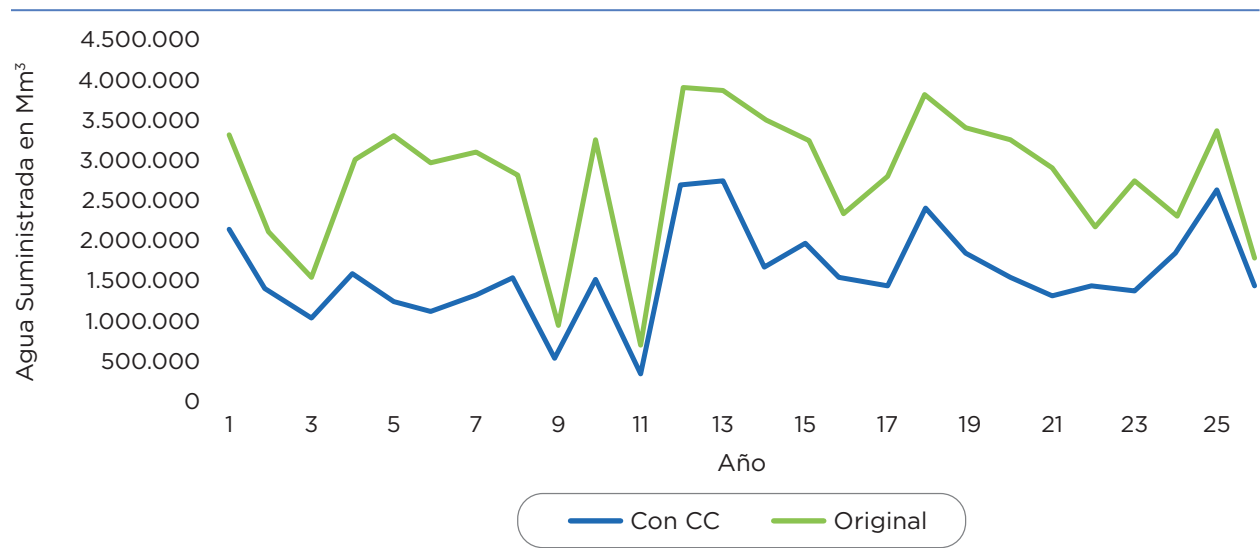
Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información del modelo HydroBID.

nes de m³; o sea, una reducción de 1.163 millones de m³ correspondiente al 41,5 % del caudal original utilizado. Esta reducción produciría una disminución de ingresos netos en términos económicos de CLP 287,885 a CLP 258.051 mil millones (CLP 29,8 mil millones anuales o USD 44,8 millones); es decir, 10,4 % de los ingresos netos

originales, que en valor presente sería de CLP 497 mil millones (USD 745 millones), utilizando una tasa social de descuento del 6 %.

La serie de agua suministrada a los distritos de riego en el escenario de cambio climático se muestra en la ilustración 17.

ILUSTRACIÓN 17. Serie anual de agua utilizada para riego (escenario con cambio climático)



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

En el escenario con cambio climático, el rango de valores de agua que puede ser utilizada en riego puede ir desde 350 millones de m³ hasta 2.800 millones anuales. El uso del agua subterránea anual aumenta a 2.432 millones de m³, un aumento del 91 % suponiendo que el agua subterránea no disminuye su potencial.

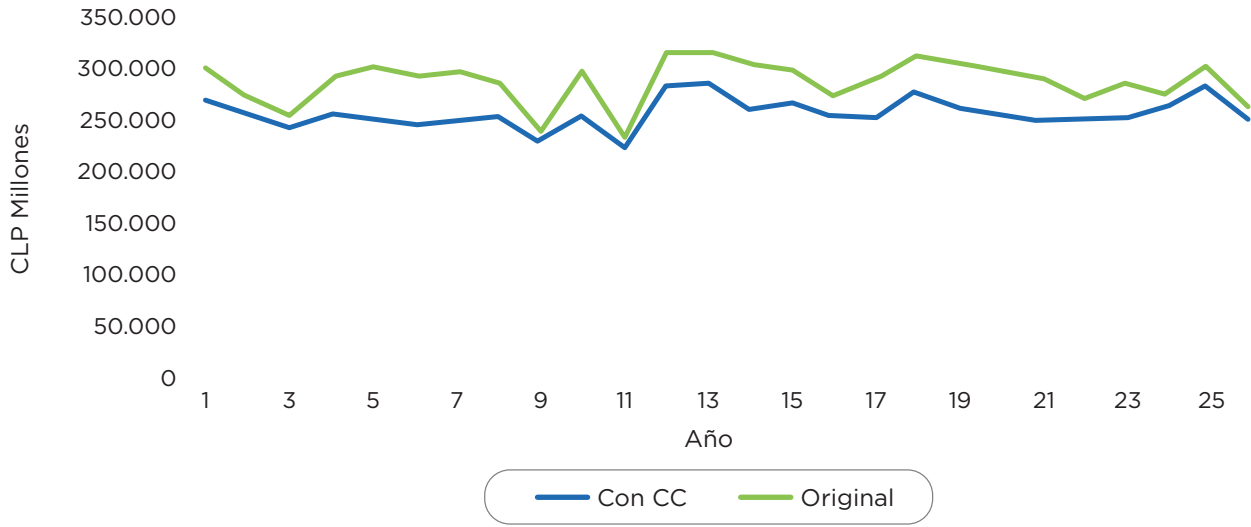
Los ingresos esperados en el sector agrícola con una infraestructura y áreas regadas iguales a las del 2017 serían de CLP 258.051 millones (USD 387,5 millones) con una desviación de CLP 14.703 (USD 22,1 millones).

Las series de ingresos con y sin cambio climático se muestran en la ilustración 18.

Los ingresos con cambio climático son menores, pero las variaciones año a año también son menores. Esto debido a que el recurso principal proviene del agua subterránea, y se asume que el nivel freático no disminuye con su utilización y la recarga no disminuye con el cambio climático.

La distribución probabilística de suministro de agua se presenta en la ilustración 19. Hay una probabilidad del 100 % de que no

ILUSTRACIÓN 18. Ingresos netos anuales

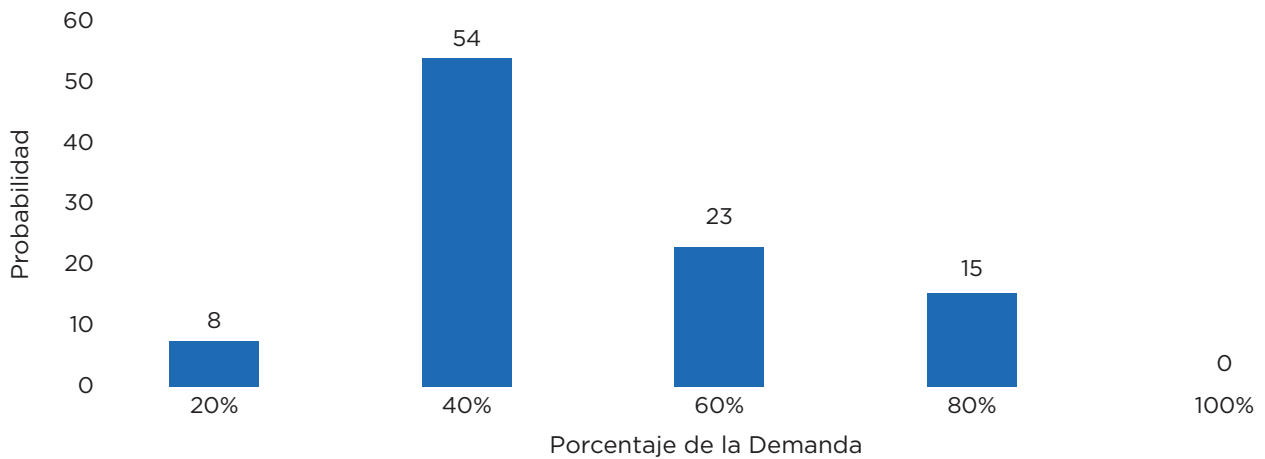


Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

se pueda suministrar más del 80 % del agua demandada. Es más, la probabilidad de que

no se pueda suministrar más del 40 % del agua demandada aumenta del 16 % al 62 %.

ILUSTRACIÓN 19. Suministro de agua superficial para riego (escenario con cambio climático)

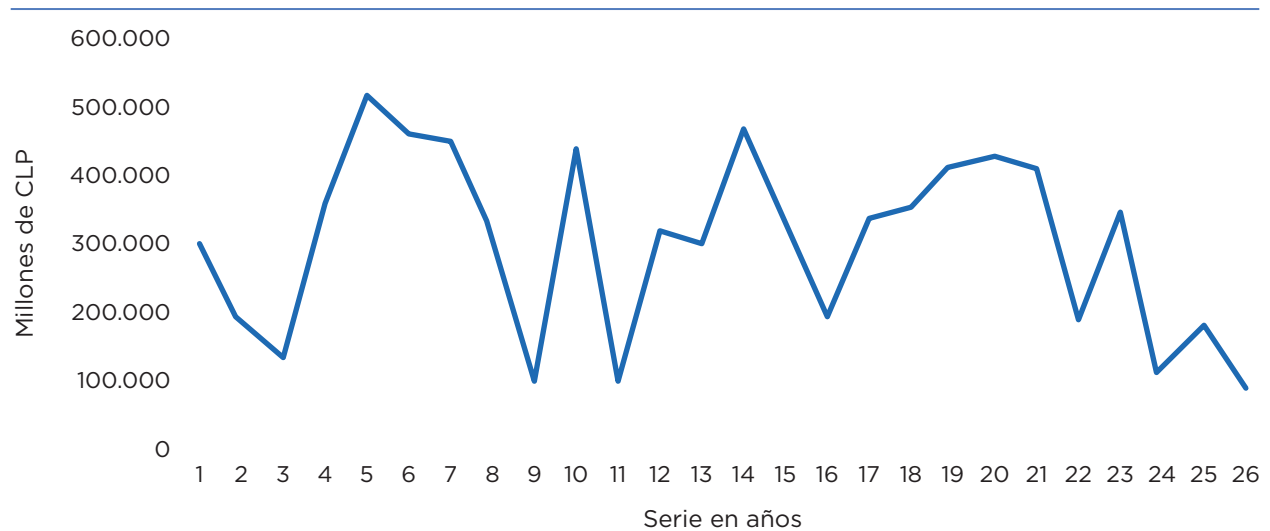


Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

En caso de que no se tomen medidas de adaptación, el costo en el sector agrícola sería de CLP 29,8 mil millones anuales

(USD 44,8 millones) y la serie resultante de la simulación. La serie resultante de la simulación se presenta en la ilustración 20.

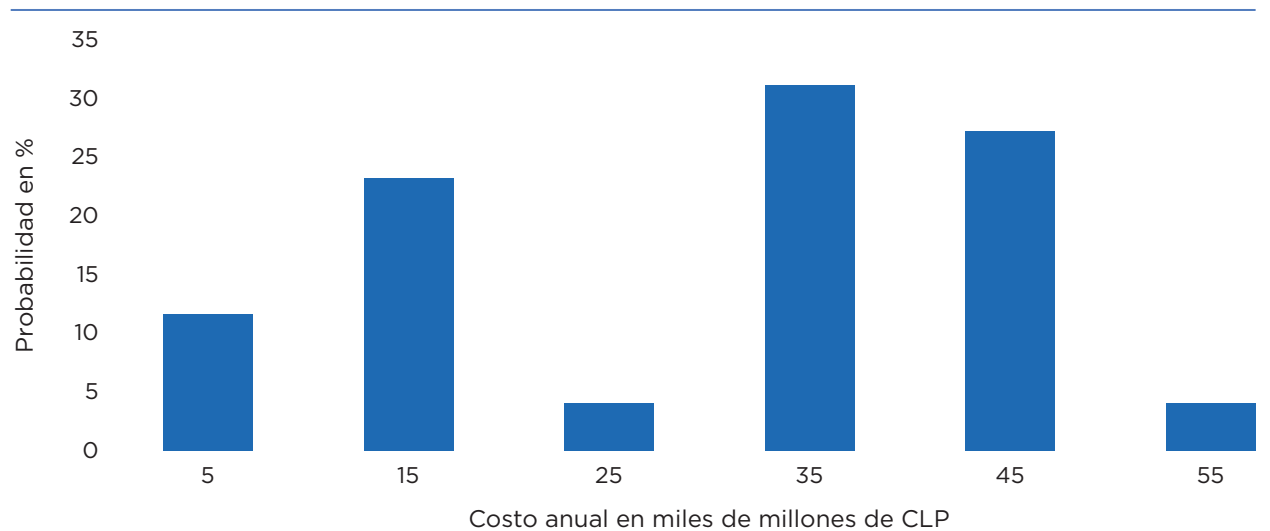
ILUSTRACIÓN 20. Costo económico en agricultura (escenario sin medidas de adaptación)



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

La distribución probabilística de esta serie se presenta en la ilustración 21.

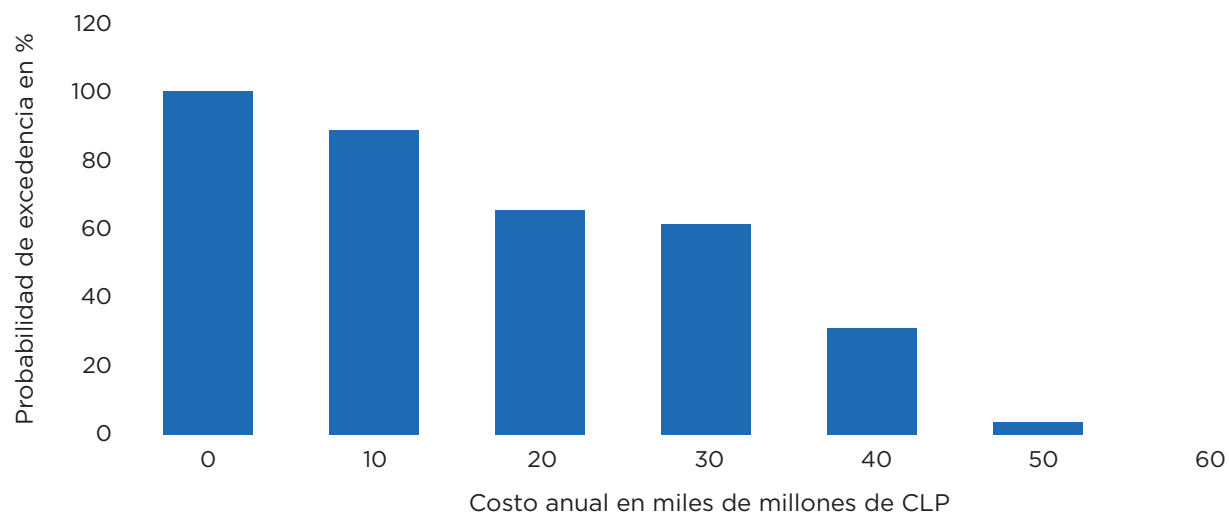
ILUSTRACIÓN 21. Distribución probabilística de los costos en agricultura



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Y la probabilidad de excedencia del costo económico en un año cualquiera debido al cambio climático está representada en la ilustración 22.

ILUSTRACIÓN 22. Probabilidad de exceder el costo en agricultura



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

De las ilustraciones se puede deducir que en cualquier año, la probabilidad de que el costo económico debido al cambio climático sea mayor a CLP 30.000 millones es 60 % (ilustración 22), y la probabilidad que este costo esté entre CLP 30.000 y 40.000 millones es de 30 % (ilustración 21). Se puede concluir que los costos por el cambio climático no excederán en ningún año los CLP 50 mil millones (ilustración 22).

Análisis de sensibilidad al supuesto del agua subterránea

El supuesto de contar con unos acuíferos que no se modifican con su uso para riego no es crucial, ya que en un escenario *sin* cambio climático la recarga por riego es, como máximo, de 1.200 millones de m³, y la extracción promedio es de 1.269 millones de m³. Para el análisis se estudiaron 3 condiciones en los dos escenarios de cambio climático. La primera condición fue suponer que el nivel freático se mantiene constante. La segunda fue suponer que el nivel

freático desciende al doble de la profundidad actual de los acuíferos y la tercera que el nivel freático desciende tanto que la utilización de los acuíferos se hace inviable económicamente (al descender la profundidad del nivel freático al triple del estado actual, los costos de bombeo superarían los USD 0,12 en relación con el ingreso neto por m³ de agua utilizada). Los resultados se muestran en la tabla 30.

El supuesto crucial en el sector agrícola es el del agua subterránea. Si el nivel freático descendiese a una distancia de la superficie del doble de la actual, los costos de bombeo aumentarían de USD 49,2 millones a USD 98,4 millones y los ingresos anuales se reducirían a USD 379,6 millones. En caso de no poder utilizar el acuífero, el área regada sería únicamente de 71.000 ha (caudal sostenible o caudal firme que puede dar el sistema de embalses actuales) en el escenario de cambio climático y los ingresos serían de USD 140 millones.

TABLA 30. Análisis de sensibilidad de los ingresos agrícolas al nivel freático

Escenario	Condición del nivel freático	Demanda (Mm ³)	Agua superficial (Mm ³)	Agua subterránea (Mm ³)	Ingreso Bruto (MM USD)	Ingreso neto (MM USD)
Sin CC	1	4.069	2.800	1.269	481,1	431,9
Sin CC	2	4.069	2.800	1.269	481,1	379,6
Sin CC	3	4.069	2.800	1.269	481,1	328,8
Con CC	1	4.069	1.637	2.432	481,1	383,8
Con CC	2	4.069	1.637	2.432	481,1	286,5
Con CC	3	4.069	1.637	2.432	481,1	189,2

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo

CC: Cambio climático.

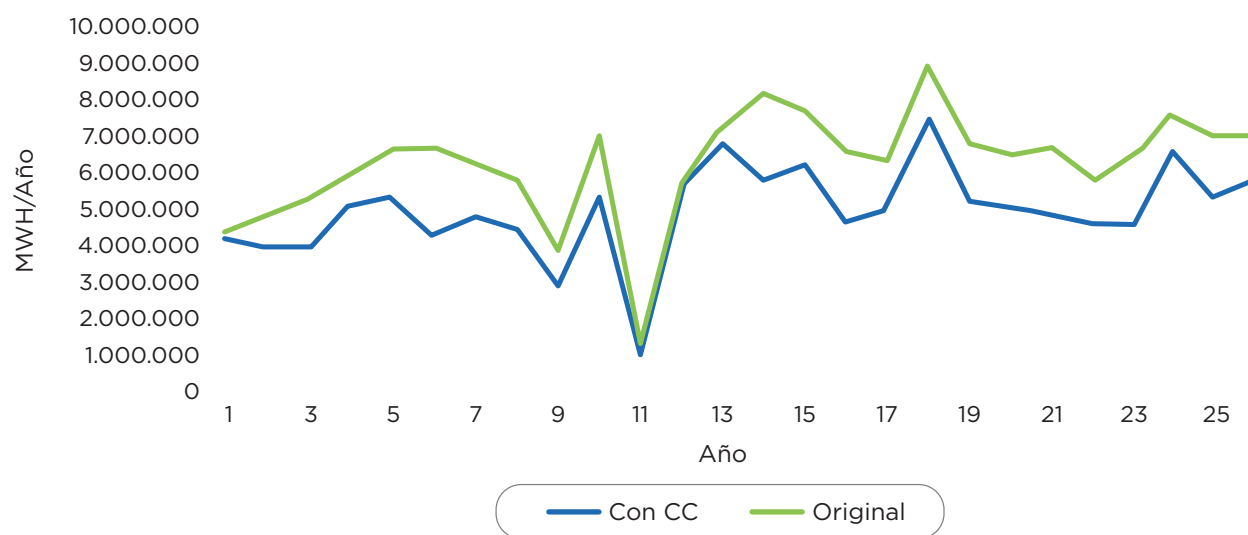
Nivel freático: 1. Profundidad actual, 2. Profundidad doble y 3. Profundidad triple.

Costo de bombeo: 1. USD 0,04 por m³, 2. USD USD 0,08 y 3. USD 0,12.

b. Sector hidroeléctrico

El impacto del fenómeno del cambio climático en el sector hidroeléctrico reduciría la generación de 6.300 GWH/año (21.259 Mm³ turbinados o 674 m³/s) a 5.004 GWH/año (16.629 Mm³ turbinados o 537 m³/s) una reducción del 21 % del escenario original. Esta reducción producirá un descenso de los ingresos de CLP 191.721 millones (USD 287,9 millones) en el escenario original a CLP 157.363 millo-

nes (USD 236,3 millones), es decir, un 82 % de los ingresos esperados originales. Esta reducción produciría un descenso en los ingresos de CLP 34.358 millones (18 % de los ingresos originales) que en valor presente serían CLP 572.633 millones (USD 860 millones) utilizando una tasa social de descuento del 6 %. En el siguiente gráfico se presenta la serie de energía hidroeléctrica comparada con el escenario sin cambio climático.

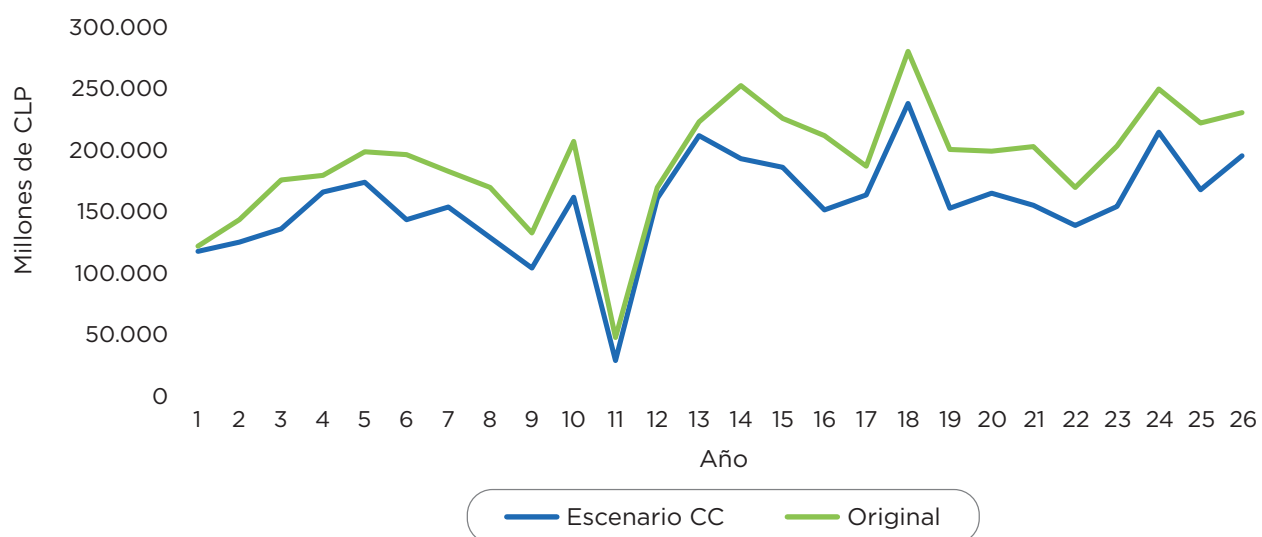
ILUSTRACIÓN 23. Energía generada (escenario con cambio climático)

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

El impacto en el año de mayor generación es de 1.400 GWH (16 %) descendiendo de 9.000 GWH a 7.600 GWH. En el año más seco, el impacto es mucho mayor en porcentaje ya que desciende 690 GWH (45 %) descendiendo de 1.550 GWH a 860 GWH. El impacto en porcentaje es mayor en los años secos que en los años húmedos.

En el escenario con cambio climático, el ingreso bruto esperado por la generación de energía hidroeléctrica sería de CLP 157,363 millones anuales (USD 236 millones) con una desviación de CLP 39.463 millones (USD 59,3 millones) lo cual corresponde al 82 % del ingreso del escenario original. La serie de ingresos comparada a la serie original se puede apreciar en la ilustración 24.

ILUSTRACIÓN 24. Ingresos por generación hidroeléctrica (escenario con cambio climático)



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

La distribución probabilística de la generación hidroeléctrica en el escenario de cambio climático se muestra a en la ilustración 25.

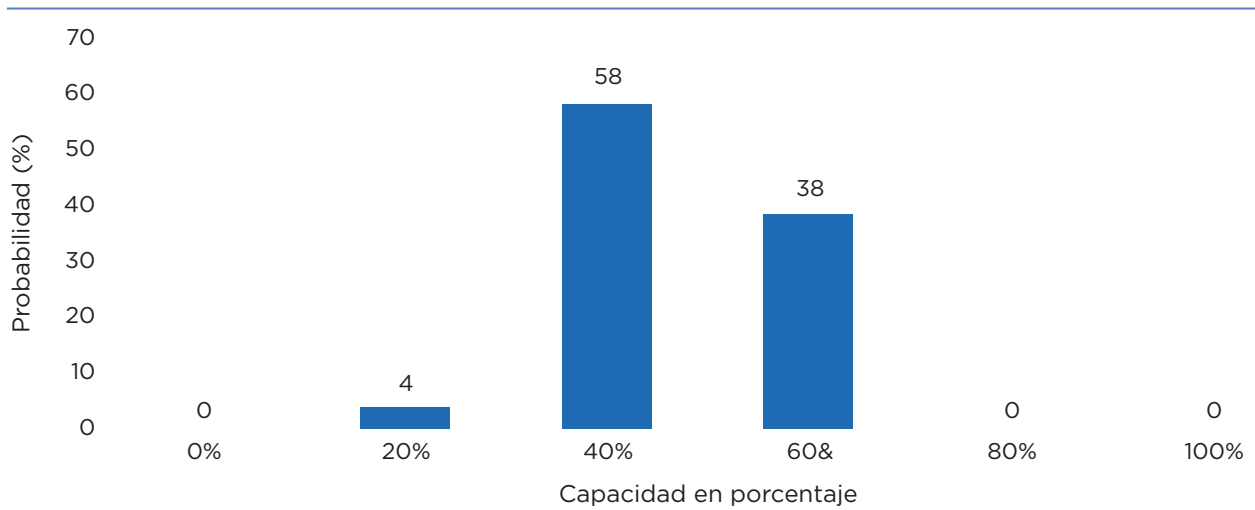
Las probabilidades de utilización de la capacidad instalada se reducirían con el fenómeno del cambio climático. El 100 % de la generación hidroeléctrica anual caería por debajo del 60 % de la capacidad instalada, es decir, siempre se generarían menos de 7.920 GWH al año de los 13.200 GWH de capacidad instalada.

En caso de que no se tomen medidas de adaptación, el costo en el sector energético sería de CLP 34,4 mil millones anuales (USD 51,6 millones) y la serie resultante resultante se observa en la ilustración 26.

La distribución probabilística de esta serie estaría representada en la ilustración 27.

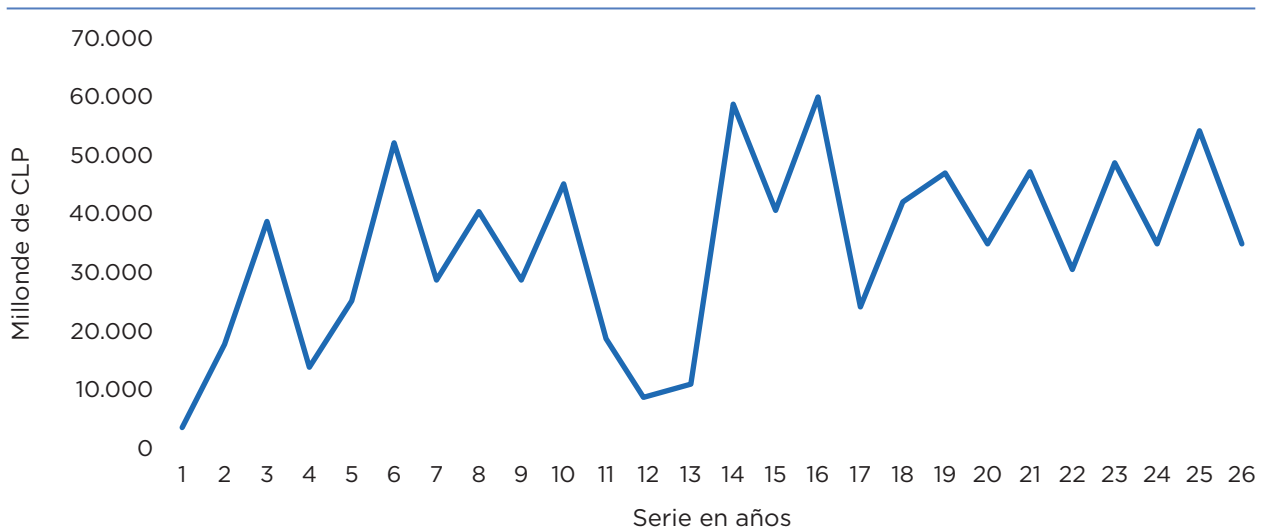
Y la probabilidad de excedencia de un costo debido al cambio climático se aprecia en la ilustración 28.

ILUSTRACIÓN 25. Frecuencia de uso de la capacidad instalada (escenario con cambio climático)



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

ILUSTRACIÓN 26. Costo en generación eléctrica

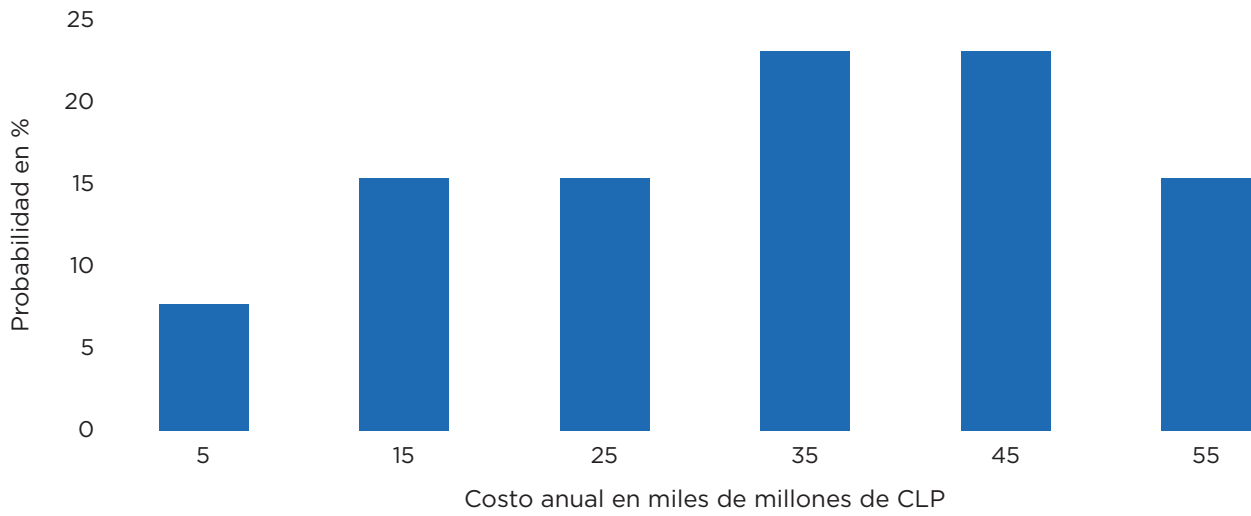


Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

De las ilustraciones se puede deducir que, en cualquier año, la probabilidad de que el costo económico debido al cambio climático sea mayor a CLP 30.000 millones es 60 % (ilustración 28) y la probabilidad que

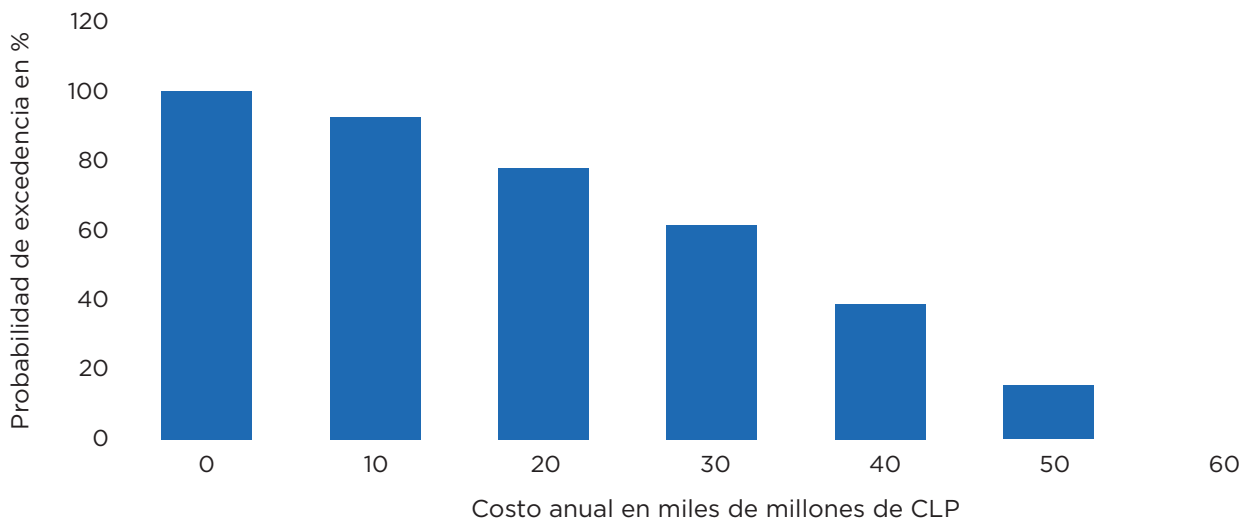
este costo esté entre CLP 30.000 y 40.000 millones son de 23 % (ilustración 27). Adicionalmente, se podría concluir que el impacto en el sector eléctrico no superaría los CLP 60 mil millones.

ILUSTRACIÓN 27. Probabilidad del costo en generación eléctrica



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

ILUSTRACIÓN 28. Probabilidad de exceder el costo en energía



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

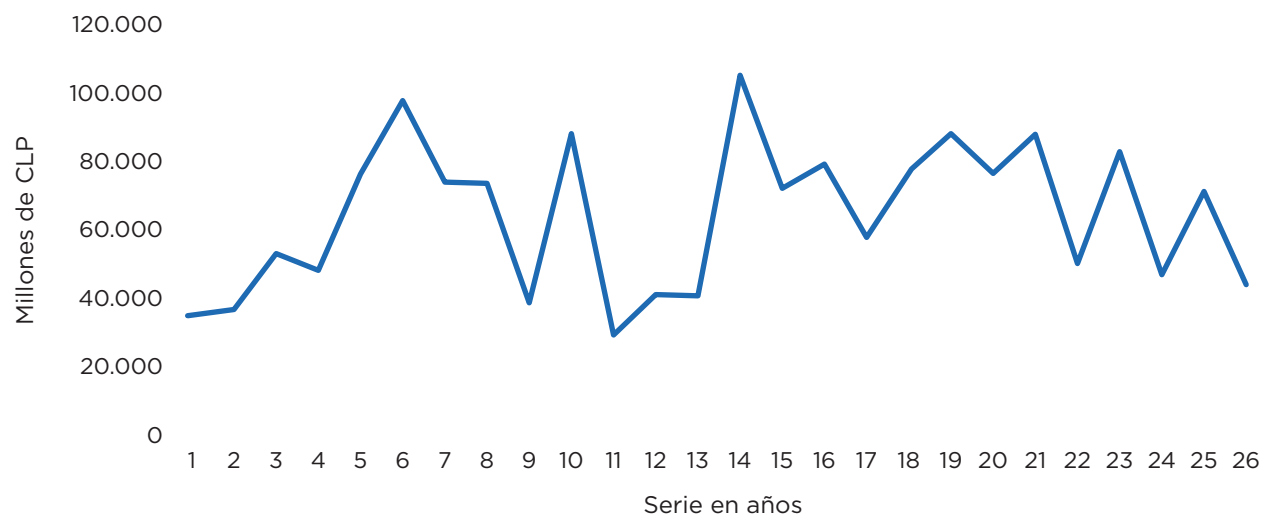
c. Impacto agregado por el fenómeno del cambio climático en los sectores simulados

De las simulaciones realizadas se obtuvo la serie del costo total para la cuenca del fenó-

meno del cambio climático suponiendo que no hay un plan de adaptación. Para esto se adicionaron los efectos en el sector agrícola y en el sector de generación de energía eléctrica. El costo anual esperado total sería de

CLP 64,2 mil millones de CPL (USD 96,4 millones). La serie resultante de la simulación se puede apreciar en la ilustración 29.

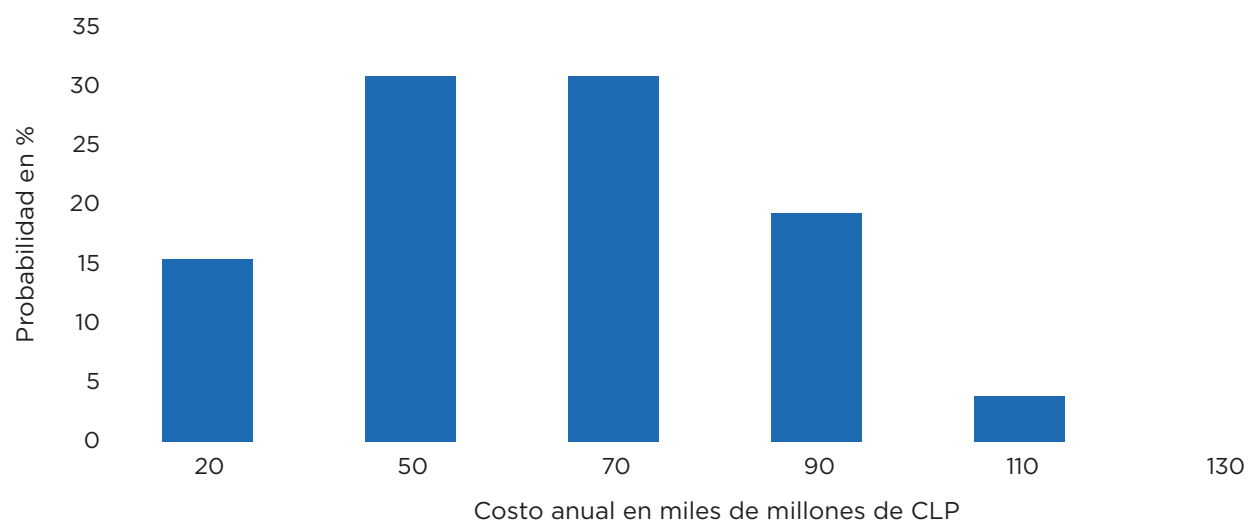
ILUSTRACIÓN 29. Costos económicos de la cuenca por no adaptación



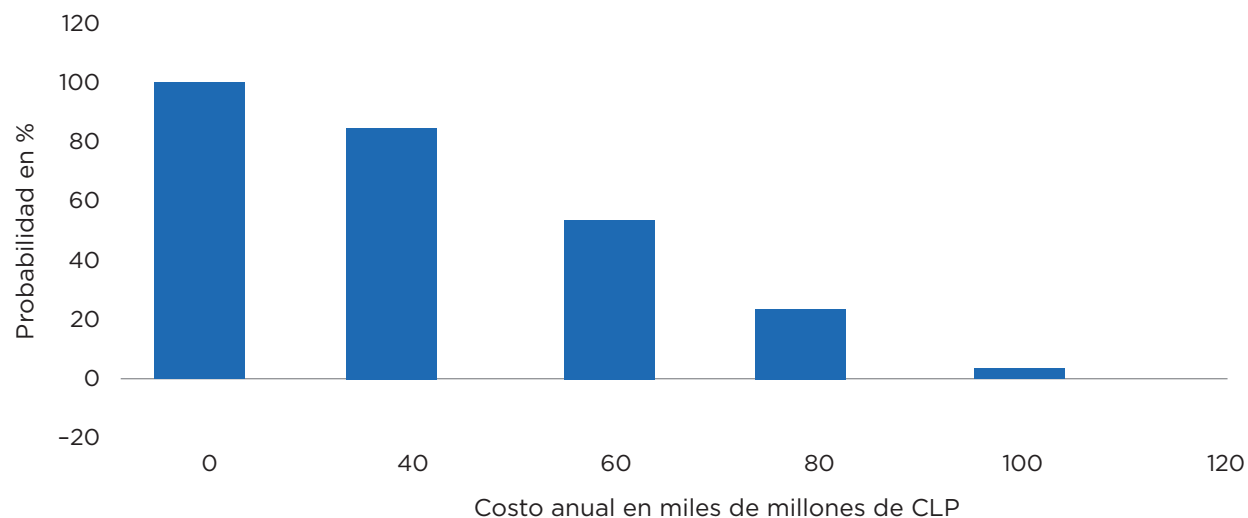
Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

La distribución probabilística del costo anual que describe la serie presentada en la ilustración 29 se puede observar en la ilustración 30.

ILUSTRACIÓN 30. Distribución probabilística del costo por CC en el uso del agua



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

ILUSTRACIÓN 31. Probabilidad de excedencia de los costos totales

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en los resultados del modelo.

Y la probabilidad de excedencia del costo se presenta en la ilustración 31.

En la ilustración 30 se ve que la media estaría entre CLP 50 y 70 miles de millones (CLP 64,2 mil millones es la media) con una probabilidad del 30 %. En la ilustración 31 se ve que la probabilidad de exceder CLP 60 mil millones es aproximadamente 50 %. Se espera que los costos totales nunca excedan los CLP 100 mil millones.

d. Sector forestal

Como se vio en el acápite de ingresos, el sector forestal tiene ingresos netos. Teniendo en cuenta que en el escenario de cambio climático la lluvia se reduce en un 24 % se podría suponer que los ingresos netos del sector forestal se reducirían en una cantidad similar. Por lo tanto, se esperaría que los ingresos del sector forestal en un escenario de cambio climático se reduzcan a CPL 77.311 millones (USD 116,1 millones).

AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para este estudio se revisaron los dos modelos de agua subterránea MODFLOW proporcionados por la Dirección Nacional de Aguas. Los modelos son de estado estacionario (paso único) y transitorios del sistema de agua subterránea en dos subáreas del área de estudio, Cauquenes y Los Puercos. Los resultados de estado estacionario muestran un sistema de flujo de ganancia simulado (término de fugas del río) en el modelo de Cauquenes y un flujo de ganancia neta en el modelo de Los Puercos. La magnitud de las ganancias netas en los dos modelos se muestra en las ilustraciones 32 y 33. Los resultados de los dos modelos de aguas subterráneas representan un área mínima de la cuenca, por lo cual no se pudo realizar un balance de aguas subterráneas en la cuenca bajo este estudio.

ILUSTRACIÓN 32. Cauquenes MODFLOW - Resumen de salida del modelo de estado estacionario

```

DRAWDOWN WILL BE SAVED ON UNIT 51 AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1
1
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1
-----
CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
CONSTANT HEAD =          0.0000      CONSTANT HEAD =          0.0000
DRAINS =          0.0000      DRAINS =          0.0000
RIVER LEAKAGE =          0.0000      RIVER LEAKAGE =          0.0000
RECHARGE =        67465.7500      RECHARGE =        67465.7500

TOTAL IN =        67465.7500      TOTAL IN =        67465.7500

OUT:
---
CONSTANT HEAD =          0.0000      CONSTANT HEAD =          0.0000
DRAINS =        18658.3887      DRAINS =        18658.3887
RIVER LEAKAGE =        48807.1914      RIVER LEAKAGE =        48807.1914
RECHARGE =          0.0000      RECHARGE =          0.0000

TOTAL OUT =        67465.5781      TOTAL OUT =        67465.5781

IN - OUT =          0.1719      IN - OUT =          0.1719

PERCENT DISCREPANCY =          0.00      PERCENT DISCREPANCY =          0.00
    
```

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información proporcionada por Fundación Chile.

ILUSTRACIÓN 33. Los Puercos MODFLOW - Resumen de salida del modelo de estado estacionario

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1			
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	8446.2568	RIVER LEAKAGE =	8446.2568
RECHARGE =	14665.1836	RECHARGE =	14665.1836
TOTAL IN =	23111.4414	TOTAL IN =	23111.4414
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	744.5460	DRAINS =	744.5460
RIVER LEAKAGE =	22367.0332	RIVER LEAKAGE =	22367.0332
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	23111.5801	TOTAL OUT =	23111.5801
IN - OUT =	-0.1387	IN - OUT =	-0.1387
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información proporcionada por Fundación Chile.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Del diagnóstico de los balances oferta-demanda del uso del agua superficial en la cuenca del río Maule se puede concluir que para riego la cuenca es deficitaria, ya que las 240.000 ha sembradas para ser regadas demanda unos 4.000 millones de m³ al año y en promedio el sistema puede entregar 2.800 millones de m³ (70 % de la demanda). Para complementar la demanda, se necesita bombear del agua subterránea la diferencia, es decir, 1.200 y esto suponiendo que la recarga de los acuíferos lo permite. El ingreso promedio en finca por venta de los productos sería de CLP 320.514 millones (USD 481 millones). Descontando los costos de bombeo, el ingreso esperado neto en finca sería de CLP 287.885 millones (USD 432 millones) por año, con un costo de bombeo de agua subterránea de CLP 32.629 millones (USD 49 millones) siempre y cuando el valor de bombeo se mantenga en CLP 27,3 (USD 0,04) por m³. Sin embargo, si hoy en día el nivel de los pozos no se ha recuperado a su estado original, la tasa de extracción de agua subterránea no es sostenible y por lo tanto debería tomarse medidas para reducirla.

Un resultado importante es que los distritos de riego que captan agua de fuentes con baja capacidad de regulación (subcuenca del río Lancomilla) requieren un mayor uso de aguas subterráneas que los que están localizados en la subcuenca del río Maule. Se debería explorar la posibilidad de aumentar la regulación, ya sea con embalses o con recarga artificial de acuíferos. Adicionalmente, los niveles de eficiencia de riego son bajos (entre el 30 % al 50 %) porque la mayoría del riego se hace por tendido o por surco. En las políticas del sector se debería incentivar el aumento de estas eficiencias.

El sector hidroeléctrico (las 12 centrales incluidas en el estudio, de las cuales 11 tie-

nen algún tipo de regulación de embalses y solo Lircay se puede considerar de pasada) tiene una capacidad de generación de 13.194 GWH/año y en promedio se utilizaría 6.300 GWH /año; es decir, un 48 % de su capacidad de acuerdo con los balances realizados con la serie de caudales de 26 años generados por el modelo HydroBID. Los ingresos brutos en el sector serían en promedio de CLP191.721 millones (USD 290 millones) utilizando los costos marginales de largo plazo.

Con el escenario de cambio climático (disminución del 24 % de la precipitación y un incremento de la temperatura de 2,3 °C), el agua superficial disponible en los distritos de riego sería 1.637 millones de m³ al año,

reduciéndose al 58 % de agua disponible; y la energía generada sería de 5.000 GWH/año, con una reducción del 21 % del escenario original. Las implicaciones económicas en estos dos sectores serían importantes, ya que los ingresos netos económicos anuales del sector agrícola se reducirían de CLP 287.885 millones (USD 432,3 millones) a CLP 258.051 millones (USD 387,5 millones); y en el sector hidroeléctrico de CLP 191.721 millones (USD 288 millones) a CLP 157.363 millones (USD 236,3 millones). Esto implicaría una reducción de ingresos en valor presente de CLP 470 mil millones (USD 705 millones) en el sector agrícola, y de CLP 572,6 mil millones (USD 860 millones) en el sector hidroeléctrico. En el sector agrícola la reducción de ingresos no es tan grande en términos porcentuales porque existe el recurso del agua subterránea y el supuesto detrás de los balances es que el nivel freático no descendería en el largo plazo lo cual probablemente no ocurra. Es decir que en caso de que no haya medidas de adaptación al cambio climático, las pérdidas anuales esperadas en agricultura serían de CLP 29.800 millones (USD 44,8 millones) y estas podrían oscilar entre CLP 5.000 millones y CLP 55.000 millones. En el sector de generación hidroeléctrica se obtendrían resultados similares ya que se esperarían pérdidas por CLP 34.400 millones (USD 51,6 millones) las cuales podrían oscilar entre CLP 5.000 millones y CLP 60.000 millones. En total se pronostican unas pérdidas anuales promedio de CLP 64.200 millones (USD 96,4 millones)

que pueden variar entre CLP 30.000 millones y CLP 105.000 millones. El valor presente de las pérdidas totales ascendería a CLP 1,1 billones (USD 1.600 millones), utilizando una tasa de descuento del 6 %.

El impacto en el sector agrícola (reducción del 42 %) es muy superior al impacto en el sector hidroeléctrico (reducción del 21 %), debido principalmente a la existencia de los embalses. En un escenario de cambio climático el efecto negativo se magnifica en la subcuenca del Larcomilla por la falta de regulación del agua superficial.

El supuesto crucial en el sector agrícola es el del agua subterránea. Si el nivel freático descendiese a una distancia de la superficie del doble de la actual, los costos de bombeo aumentarían de USD 49,2 millones a USD 98,4 millones, y los ingresos anuales se reducirían a USD 379,6 millones. En caso de no poder utilizar el acuífero, el área regada sería únicamente de 71.000 ha en el escenario de cambio climático, y los ingresos serían de USD 140 millones. Esto significa que el área bajo riego descendería 193.00 ha y solo se cultivaría bajo riego el 27 % del área cultivada en el año 2017.

En cuanto al sector forestal, en el escenario de cambio climático 2050 los ingresos podrían reducirse un 24 % de CPL 101.750 millones anuales (USD 152,8 millones) en el escenario base a CPL 77.311 millones (USD 116,1 millones).

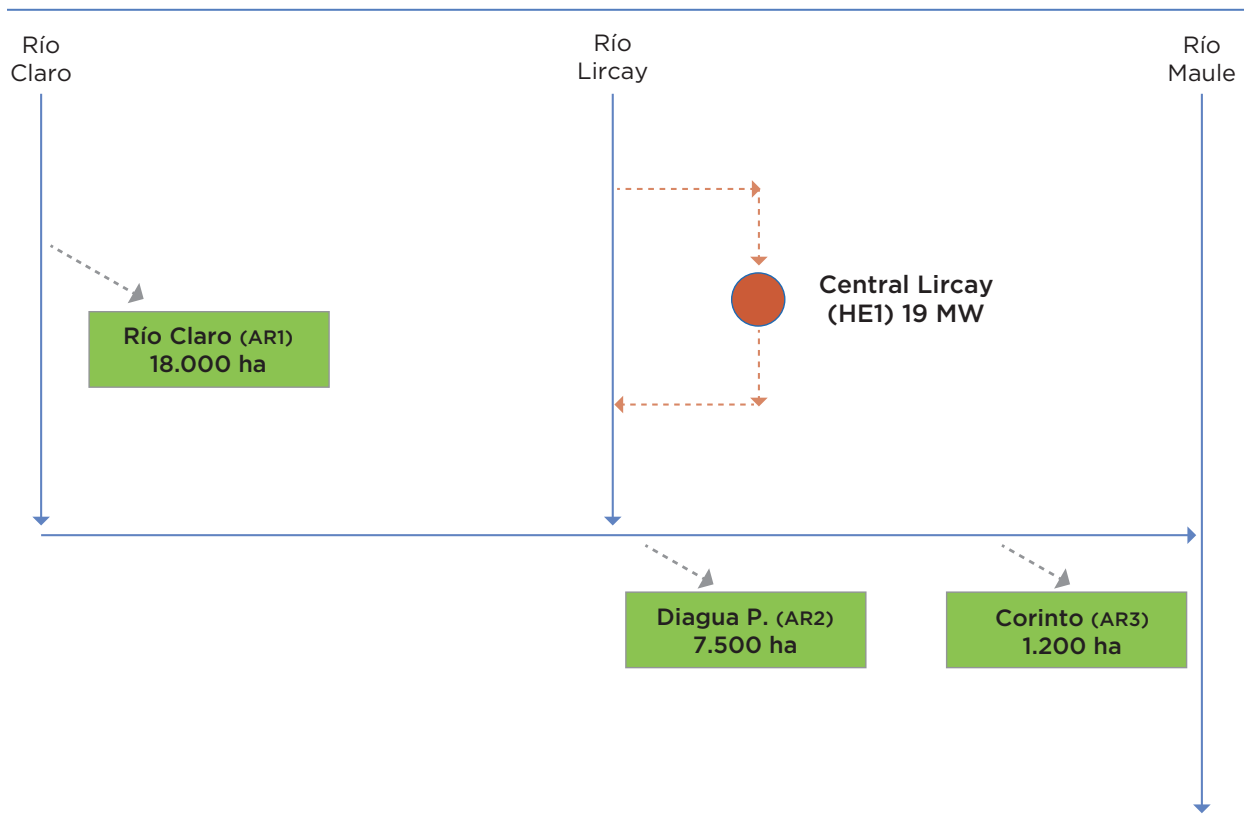
REFERENCIAS

- Jaramillo, C. y Acevedo, R. (2017). “Aplicación de la metodología de contabilidad de huella hídrica directa a 15 regiones de Chile”. Informe elaborado para “Escenarios hídricos 2030”, Santiago, Chile. Disponible en URL: www.escenarioshidricos.cl/multimedia.
- Escenarios Hídricos 2030. (2018). “Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile”. Santiago, Chile. Disponible en URL: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/resumen-radiografia-del-agua-1.pdf>.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK.
- “Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule”, DGA, mayo 2018.
- Matalas N.. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology, Water Resources Research 3 (4). pp 937-945.
- MODSIM Modelo de simulación de cuencas, Colorado State University <http://modsim.engr.colostate.edu>. Dirección General de Aguas. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Maule. Fase II, S.I.T. N° 134, Mayo 2008.
- ODEPA. Ministerio de Agricultura, Chile . Fichas técnico-económicas de cada cultivo y región.
- Inversión Pública, Eficiencia y Equidad, Mideplan, Departamento de Inversiones
- Estimación econométrica de la demanda de agua potable residencial para la Octava Región; Felipe Ariel Espinoza; Universidad de Concepción; 2016.
- USGS GLCC 1992/1993. Datos de uso del suelo.
- Austrocedrus chilensis* (Licata et al., 2008) (Little, Lara, McPhee, & Urrutia, 2009).
- “Evaluación de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del río Maule”, DGA, mayo de 2005.
- Moreda, F., F. Miralles-Wilhelm, and R. M. Castillo (2014b), Technical Note 2. Hydro-BID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources, *IDB*.
- Rineer, James; Bruhn, Mark; Miralles-Wilhelm, Fernando; Muñoz Castillo, Raúl (2014a), Technical Note 1. Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe, *IDB*.

ANEXOS

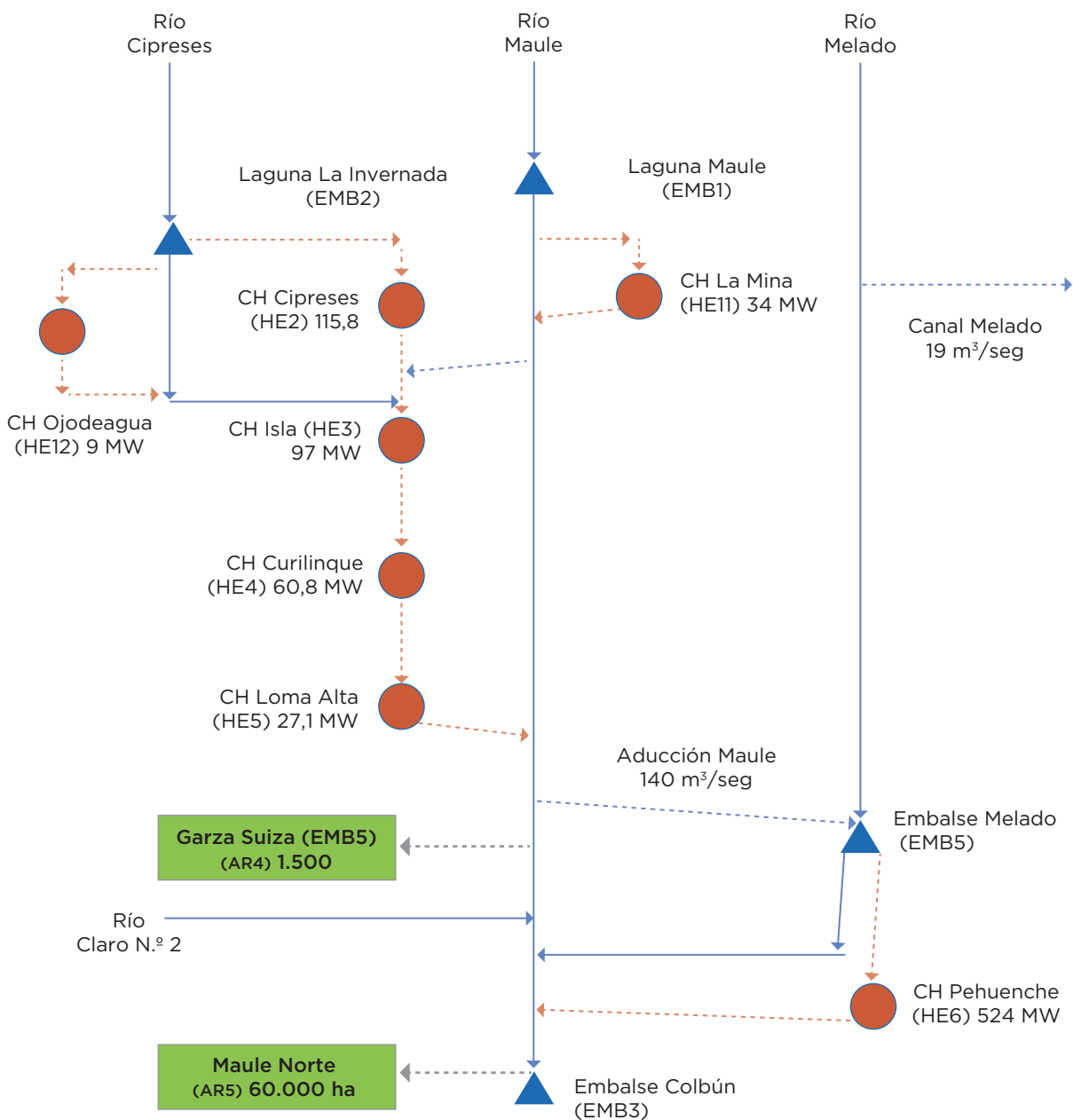
ESQUEMATIZACIÓN DE LAS DEMANDAS DE AGUA SUPERFICIAL ESQUEMA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS

Lircay - Claro



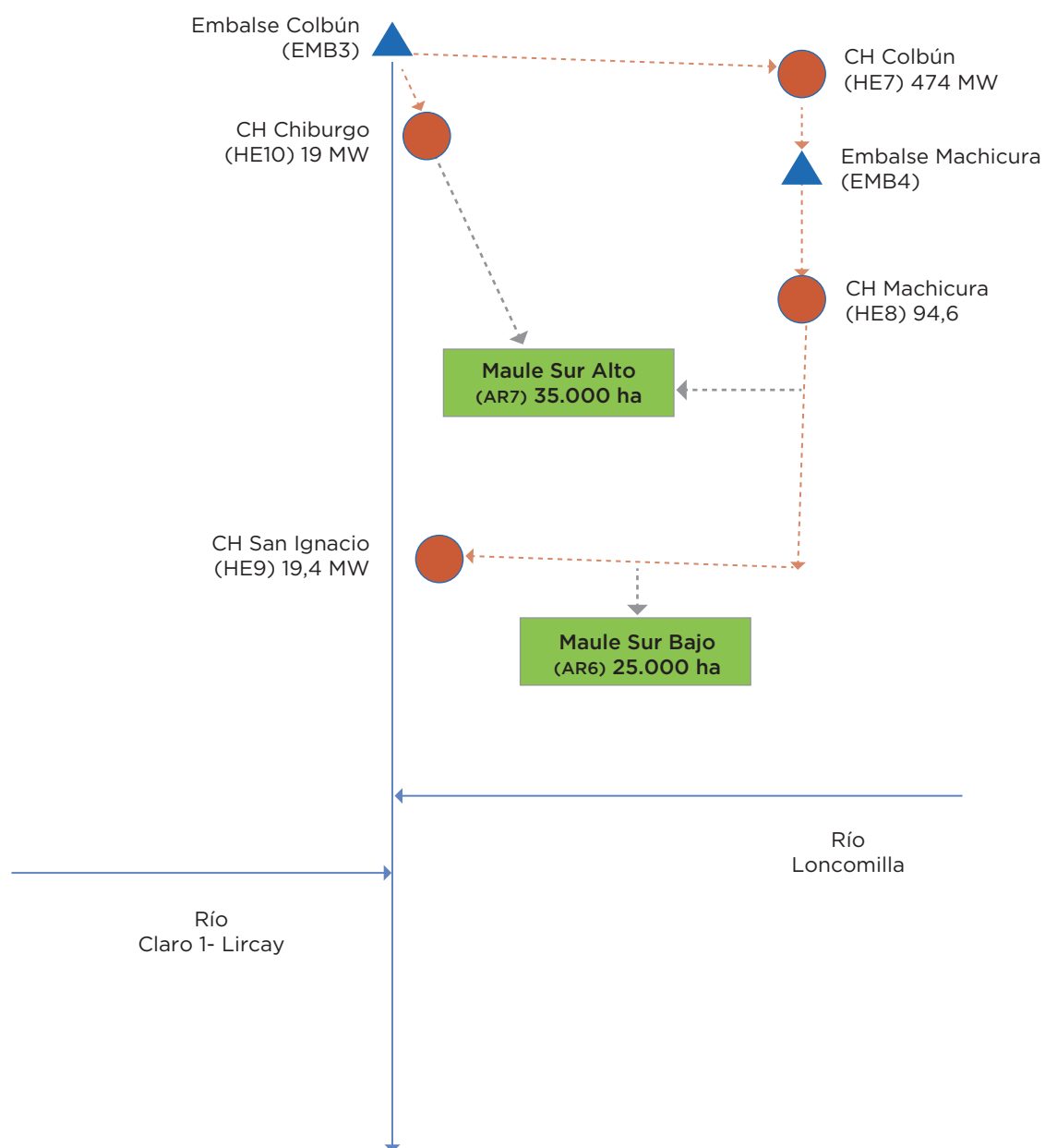
Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información recolectada en campo.

Cuenca alta del río Maule



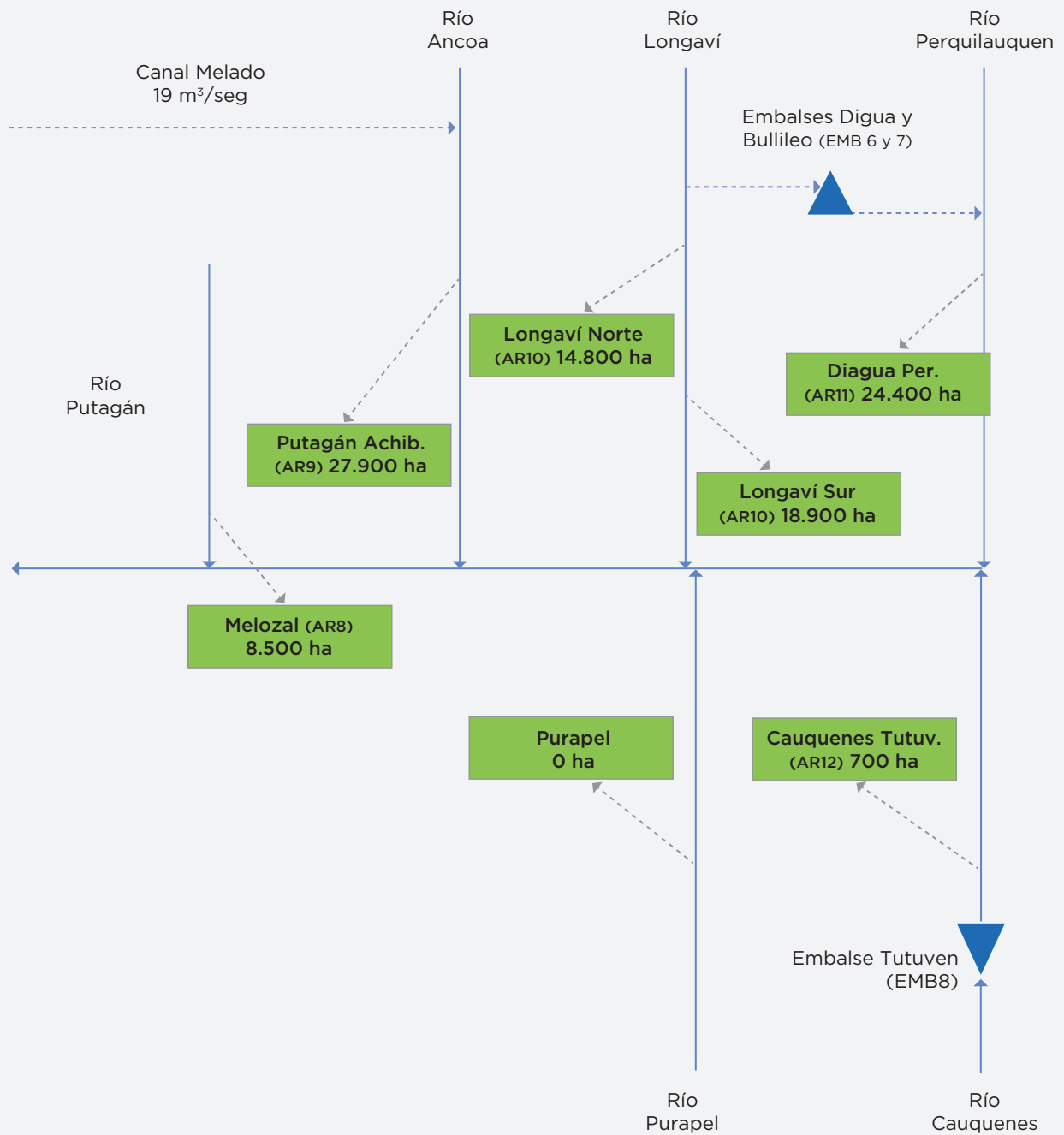
Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información recolectada en campo.

Cuenca baja del río Maule



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información recolectada en campo.

Cuenca del río Loncomilla



Fuente: Elaboración propia de los autores, con base en información recolectada en campo.

