



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**INCORPORACIÓN DEL OBJETIVO DEL USO EN RIEGO EN LA OPERACIÓN DE
LARGO PLAZO DE EMBALSES HIDROELÉCTRICOS MAULE Y LAJA EN EL
SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO NICOLÁS TORO MENA

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO MORENO VIEYRA
EDUARDO PEREIRA BONVALLET

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Ignacio Nicolás Toro Mena
FECHA: Junio 2017
PROFESOR GUÍA: Marcelo Olivares Alveal

INCORPORACIÓN DEL OBJETIVO DEL USO EN RIEGO EN LA OPERACIÓN DE LARGO PLAZO DE EMBALSES HIDROELÉCTRICOS MAULE Y LAJA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL, CHILE

Este trabajo se enmarca en la incorporación de los costos asociados al déficit de agua de riego, correspondientes a los embalses Maule y Laja, en la operación de largo plazo del Sistema Eléctrico Nacional, SEN, a través del software AMEBA, desarrollado por la compañía Spec Energy Consulting. El software constituye un conjunto de metodologías, algoritmos computacionales y modelos matemáticos para abordar íntegramente la toma de decisiones en los mercados eléctricos, que se utilizan para asignar la operación de todas las centrales de generación, con la lógica de satisfacer la demanda eléctrica a mínimo costo esperado en el largo plazo, tal como opera el sistema eléctrico chileno.

En el marco de lo anterior, se desarrolla una representación de la función de costo de déficit de agua de riego, que sea compatible con la estructura de AMEBA, recurriendo a modelos agroeconómicos como, *Positive Mathematical Programming*, obteniendo los beneficios marginales de temporada y, por ende, las funciones de beneficio, a partir de las cuales se construye la función de costo asociado al déficit. Luego, se introduce dicha función en AMEBA como una penalización económica al riego no servido.

Finalmente, se evalúa el impacto sobre los indicadores de operación del sistema, como la variación de los volúmenes en los embalses Maule y Laja con respecto a la operación puramente eléctrica, el impacto en el precio de la energía, la generación en dichas cuencas y el porcentaje de riego abastecido en relación al otorgado por cada convenio.

En conclusión, se propone una nueva política de asignación de agua, la cual otorga mayor flexibilidad al sistema eléctrico al reemplazar los convenios de riego por penalizaciones económicas, considerando su valor tanto en hidroelectricidad como en riego, dándole así un sentido más amplio al agua como recurso.

Agradecimientos

Primero que todo, me gustaría dedicar este trabajo a mi abue, quien con un par de porotos me enseñó a sumar y me demostró que con perseverancia y esfuerzo se alcanzan las metas.

Agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, a mi madre que siempre me motivó a estudiar y a dar lo mejor de mí, a mi padre de quien he aprendido muchas lecciones de vida, a Marcelo por ser mucho más que un padrastro y enseñarme tanto a lo largo de los años. A mis hermanos Fran y Noe, mis favoritos, por aguantarme y quererme, me hacen muy feliz.

A la Javi, por tenerme paciencia durante mi monotematismo memoriación, por quererme, apoyarme, animarme y reírse de mis desubicaciones.

Al chino (Fan Wang o Capitán de Barco en español), mi mejor amigo, y al Abner, mi primer amigo de U, con quienes compartí infinidad de almuerzos en las Delicias y partidos de pinpón.

A la Mei (Meilielizabeth, mi amiga favorita en el mundo mundial) y al Leo, con quienes compartí almuerzos/café de pelambre y mala intención, siempre cargados de humor negro y dolor de mejillas por tanto reír. A Nico Pino (te odio abuelo) quien con sus canas sumó experiencia y madurez al grupo y la Daisy, a quien nunca logré hacer enojar con mis pesadeces. Se convirtieron en un pilar fundamental los últimos años, gracias por las risas infinitas e incondicionalidad.

A los que les tengo un cariño especial por las cosas que vivimos juntos, a la Caro, Josu, Javi Córdova, Lizama, Tomás, Pancho J y Jonás. A las secretarias de Civil, Jacque y Paty, quienes siempre tuvieron una gran disposición para ayudarme con todas mis dudas y quehaceres, son las mejores.

Por último, agradecer a todos los que me apoyaron en el desarrollo de mi Trabajo de Título, al profe Marcelo quien siempre tuvo una gran disposición para guiarme en este camino, así como también Eduardo, quien fue un apoyo constante con AMEBA. A José Miguel González, quien facilitó su código de PMP y a mi amigo Tomás, quien me ayudó en la caracterización de cultivos. A SPEC Energy Consulting, por permitirme utilizar AMEBA para el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organización del documento.....	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
3	METODOLOGÍA	7
3.1	Definición de escenario hidrológico.....	7
3.2	Volúmenes de embalses	7
3.3	Funciones de demanda de riego.....	7
3.3.1	Selección de cultivos y rendimiento.....	8
3.3.2	Requerimiento hídrico de los cultivos	8
3.3.3	Costos totales de producción agrícola.....	10
3.3.4	Ingresos totales por venta de productos agrícolas	11
3.3.5	Funciones de demanda	11
3.3.6	Funciones de demanda de riego y desagregación mensual.....	12
3.4	Implementación en AMEBA	13
3.4.1	Conceptos generales de AMEBA	13
3.4.2	Funciones de penalización	14
3.5	Diagrama de flujo de la metodología.....	15
4	CASO DE ESTUDIO	17
4.1	Embalse Maule	18
4.1.1	Descripción general.....	18
4.1.2	Descripción del riego en Maule.....	19
4.1.3	Maule en el Sistema Eléctrico	22
4.1.4	Curvas de demanda de riego en Maule.....	22
4.1.5	Penalizaciones por riego no abastecido en Maule.....	30
4.2	Embalse Laja	32
4.2.1	Descripción general.....	32
4.2.2	Descripción del riego en Laja.....	33
4.2.3	Laja en el Sistema Eléctrico	35
4.2.4	Curvas de demanda de riego en Laja.....	37
4.2.5	Penalizaciones por riego no abastecido en Laja.....	44
5	RESULTADOS.....	47
5.1	Entregas de riego.....	47

5.2	Volumen y caudal entregado por embalses	50
5.3	Generación eléctrica	54
5.4	Costos marginales.....	58
5.5	Costos de generación y de riego.....	59
6	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	63
7	BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXOS	I
	Anexo A: Mapa de la región del Maule.....	II
	Anexo B: Evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea, para cultivos en Maule	III
	Anexo C: Valor de arriendo de terrenos y derechos de agua en Maule	IV
	Anexo D: Resultados obtenidos con PMP en Maule	V
	Anexo E: Requerimiento hídrico según temporadas y funciones de demanda mensual para Maule.....	VII
	Anexo F: Mapa de la región del Biobío	VIII
	Anexo G: Evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea, para cultivos en Laja	IX
	Anexo H: Valor de arriendo de terrenos y de derechos de agua en Laja	X
	Anexo I: Resultados obtenidos con PMP en Laja.....	XI
	Anexo J: Requerimiento hídrico según temporadas y funciones de demanda mensual para Laja.....	XIII
	Anexo K: Caudales asociados a las extracciones en Maule y Laja.....	XIV
	Anexo L: Variación de volumen en embalses de Maule.....	XV
	Anexo M: Variación de volumen en embalses de Biobío	XVII

1 INTRODUCCIÓN

La demanda eléctrica chilena se organiza territorialmente en 4 sistemas eléctricos (Sistema Interconectado Central, Sistema Interconectado del Norte Grande, Sistema Eléctrico de Aysén y Sistema Eléctrico de Magallanes), siendo el SIC el mayor de ellos, satisfaciendo el 74.8% de la demanda de energía a nivel nacional. El SIC se considera un sistema hidrotérmico, debido a que un 38% de su potencia instalada corresponde a fuentes hidráulicas y un 48% a fuentes térmicas (Ortega, 2016). La alta presencia de hidroelectricidad genera potenciales conflictos con los distintos usos del agua, tanto productivos como ambientales. En este trabajo se incluye al SIC y al SING ya interconectados, formando al Sistema Eléctrico Nacional, SEN.

Aparte de la generación hidroeléctrica, en la zona central el recurso hídrico cobra vital importancia como motor de diversas actividades económicas, una de las cuales es el riego, donde la calidad de las cosechas está directamente ligado a la disponibilidad de este recurso durante la temporada de riego. Debido a lo anterior, un manejo integrado del recurso para los diversos usos cobra vital importancia, sin embargo, la operación de embalses para generación hidroeléctrica, así como la operación de todas las demás centrales de generación, está determinada por el Coordinador Eléctrico Nacional, CEN, con una lógica de satisfacer la demanda eléctrica a mínimo costo esperado, dada la aleatoriedad introducida por la hidrología de las cuencas.

Para este efecto, el CEN utiliza el modelo de programación de largo plazo, PLP, cuyos resultados alimentan a los modelos de planificación de corto plazo de programación diaria o semanal (Matus et al., 2014).

El modelo PLP se basa en la estimación de funciones de costos futuros esperados, aproximadas por segmentos lineales, utilizando cortes de Benders (Pereira & Pinto, 1991). Una de las ventajas de esta metodología es el tiempo computacional que puede llegar a ahorrarse. Estas funciones lineales por partes son obtenidas a partir de los duales de los sub-problemas de optimización de cada etapa, separando además el problema en costos inmediatos y su respectiva función de costos futuros (Pereira & Pinto, 1991).

En dos de los embalses más importantes del SIC, Maule y Laja, con una capacidad instalada a nivel de cuenca de 1900 MW y de 1200 MW, respectivamente, el uso conjunto de sus aguas se encuentra normado según acuerdos de riego, los cuales son incorporados a dicho problema mediante restricciones (Matus et al., 2014).

Teniendo en mente que el problema que resuelve el modelo PLP apunta a la eficiencia económica, resulta interesante simular la operación del sistema al incorporar, además de los costos de generación, los costos asociados al déficit de agua de riego en dichas cuencas. Para simular la operación del SEN se utilizará el módulo de Coordinación

Hidrotérmica del software AMEBA, que constituye un conjunto de metodologías, algoritmos computacionales y modelos matemáticos para abordar íntegramente la toma de decisiones en los mercados eléctricos (Bassi, 2016).

Para la representación de los costos asociados al déficit de riego, se generan curvas de demanda económica a partir de modelos agroeconómicos, las cuales representan el valor económico del agua en la producción agrícola. Modelos de optimización agrícola calibrados permiten la derivación de las curvas de demanda utilizando menos información que la necesaria en modelos econométricos (Medellin-Azuara et al., 2010). El método denominado *Positive Mathematical Programming*, PMP, permite calibrar modelos según información observada, provee mayor flexibilidad a cambios en el modelo y evita discontinuidades abruptas que se observan en otros (Mérel & Howitt, 2014). Por todo lo anterior, los costos asociados al déficit de agua de riego se obtendrán aplicando PMP a las cuencas en estudio.

La incorporación de dichos costos a los asociados a generación eléctrica permitirá obtener nuevas políticas de uso de agua embalsada, traducidas en nuevos niveles en embalses, nuevos costos eléctricos asociados a cada barra, variaciones en generación, entre otros.

1.1 Objetivos

La presente memoria tiene como objetivo principal evaluar los impactos sobre el desempeño económico y operacional del Sistema Eléctrico Nacional, al incluir los costos asociados al déficit de agua de riego para la agricultura en la toma de decisiones de largo plazo.

Los objetivos específicos desarrollados en la presenta memoria son los siguientes.

- Desarrollar una representación de la función de costo de déficit de agua de riego para cuencas en Chile donde existe conflicto entre hidroelectricidad y riego.
- Idear e implementar un mecanismo para introducir la función de costo de déficit de riego como variable exógena compatible con la estructura del software AMEBA.
- Evaluar el impacto sobre los indicadores de operación del sistema como niveles de los embalses, sus caudales entregados, precios de venta de energía, generación y porcentaje de abastecimiento de riego en relación al otorgado por los convenios.

1.2 Organización del documento

En el Capítulo 2, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, se presenta la revisión bibliográfica y antecedentes referentes a la interferencia de usos en embalses multipropósito, descripción del sistema eléctrico chileno y su despacho a través del modelo de Programación de Largo Plazo, ejemplos de optimización conjunta de embalses multipropósito y una descripción general de métodos de estimación de curvas de demanda de agua, en particular sobre Positive Mathematical Programming.

En el Capítulo 3, METODOLOGÍA, se describe la metodología general utilizada para derivar las funciones económicas de riego, así como su implementación en el software AMEBA.

En el Capítulo 4, CASO DE ESTUDIO, se definen los alcances, la situación base y la situación propuesta a comparar. Se determinan las curvas de demanda para las cuencas consideradas en este trabajo y se presenta información pertinente sobre cada una de ellas.

En el Capítulo 5, RESULTADOS, se presentan los resultados de incorporar las penalizaciones de no abastecer riego en Maule y Laja en la operación del Sistema Eléctrico Nacional, en contraste a la asignación mediante convenios. Los resultados presentados corresponden a entregas de riego, volúmenes y caudales entregados por embalses, generación eléctrica, costos marginales de generación, entre otros.

Finalmente, el Capítulo 6, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO, contiene las conclusiones referentes a los resultados obtenidos, tanto sobre la representación económica del riego como sobre la operación del SEN, además del trabajo futuro.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En los distintos países del mundo, su calidad de vida y vida en sí misma, depende de tener un suministro seguro y sustentable de agua para su medioambiente, comunidades y bienestar económico (Alberta Environment, 2006).

En todo el mundo, el agua juega un rol clave al complementar la generación de energía, dar soporte a la industria agrícola, proveer suministro de agua a las comunidades, etc. Por otro lado, los problemas en la toma de decisiones sobre recursos hídricos, están generalmente enmarcados en contextos socio-económicos heterogéneos y ecológicos que involucran múltiples, conflictivos e inconmensurables objetivos de operación (Biglarbeigi et al., 2014), por lo que es importante adoptar nuevas prácticas de manejo que permitan un uso más eficiente y sustentable de los recursos hídricos.

En generación hidroeléctrica, los conflictos más comunes se producen debido a que el esquema de operación de los embalses no siempre coincide con el momento en que el recurso es requerido por los demás usos, debido a que en general, se rigen por la curva de demanda eléctrica (Molle et al., 2008), un ejemplo de esto es la interferencia de hidroelectricidad y riego, debido a la estacionalidad asociada a los cultivos versus los momentos de mayor demanda eléctrica.

Para resolver la interferencia de usos en embalses multipropósito, se han implementado distintas soluciones, que van desde el plano de la ingeniería hasta acuerdos legales de operación. Algunos casos de estudio se analizan en profundidad en publicaciones como (Alberta Environment, 2006; Antipova et al., 2002; Biglarbeigi et al., 2014; Branche, 2015; M Karamouz et al., 2000; Molle et al., 2008; Wolf et al., 2005) las que abarcan interferencias locales e internacionales. Chile no está ajeno a dicha realidad, presentando interferencia entre los usos asociados a energía y agricultura en cuencas como Maule y Laja.

El sistema eléctrico chileno se puede considerar hidrotérmico (Sistema Interconectado Central), esto debido a que un 38% de su potencia instalada corresponde a fuentes hidráulicas y un 48% a fuentes térmicas (Ortega, 2016), por tanto la relevancia de los embalses en la generación eléctrica es significativa.

Ejemplos de embalses de generación eléctrica son Rapel, Maule, Colbún, Laja, Ralco, sin embargo, Maule y Laja se destacan debido a que representan alrededor del 75% de la capacidad embalsable del país, además de la existencia de convenios vigentes que regulan la operación de dichos embalses con el fin de satisfacer las demandas de generación hidroeléctrica y de riego, los cuales datan de 1947 y 1958 respectivamente (Centro de Energía et al., 2014).

El sistema eléctrico chileno es operado por el Coordinador Eléctrico Nacional, CEN, con la lógica de satisfacer la demanda eléctrica a mínimo costo esperado, dicha lógica es también utilizada en la operación de los embalses asociados a hidroelectricidad. Las técnicas para resolver este problema han evolucionado hasta un punto donde una en particular, se ha asentado como la frontera en el estado del arte, denominada programación dinámica dual estocástica (Pereira & Pinto, 1991). Esta técnica corresponde a una adaptación de un algoritmo general, conocido como descomposición anidada de Benders (Birge & Louveaux, 1997), al problema de despacho hidrotérmico de largo plazo.

Siguiendo dicha tendencia, la herramienta utilizada por el CEN es el modelo de Planificación de Largo Plazo, PLP, el cual se basa en la implementación de funciones de costos futuros esperados, aproximadas por funciones lineales por parte. Para un mayor detalle sobre PLP se recomienda leer los informes (Centro de Energía et al., 2013, 2014), que incluyen modificaciones recientes al modelo o bien, los trabajos de título (Bolvarán, 2010; Medina, 2014; Puertas, 2015; Soler, 2013).

Así, la operación de los embalses asociados a generación eléctrica es llevada a cabo por el modelo PLP, el cual incorpora los acuerdos de riego como restricciones en el problema de optimización, por lo cual no existe una optimización conjunta entre los distintos usos, la función objetivo se limita a minimizar costos de operación eléctricos, no incorporando los costos asociados al déficit de agua para riego, por ejemplo.

En la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de optimización conjunta en embalses multipropósito (Goor et al., 2011; Mohammad Karamouz et al., 2014; Labadie, 2004; Mehta & Jain, 2009; Muleta & Nicklow, 2005; Wurbs, 2005), sin embargo, la aplicabilidad de dichas propuestas se reduce a sistemas aislados, sin implementarse en grandes sistemas eléctricos, por lo que no se logra observar la interacción entre embalses generada por la conexión entre cuencas (dada por el sistema eléctrico mismo), así como los impactos en el precio de la energía, incentivos en nuevos patrones de cultivos, etc. El motivo principal de este trabajo es observar y analizar dichos comportamientos en el sistema chileno, al incorporar los costos asociados al déficit de agua en riego.

Dada la gran cantidad de agua utilizada para actividades agrícolas en determinadas regiones, el valor económico del agua asociada al riego puede ser una herramienta importante para el manejo del recurso y el desarrollo de políticas. Funciones de demanda muestran la contribución incremental del agua en la producción agrícola (Medellin-Azuara et al., 2010).

Dichas curvas de demanda son estimadas utilizando modelos econométricos, matemáticos de programación calibrados, de equilibrio computable general (CGE), de máxima entropía, entre otros. Un análisis general de dichos modelos se puede encontrar en (Howitt, 2005), sin embargo, para mayor detalle se puede recurrir a las publicaciones

(Cromarty, 1959; da Silva et al., 2013; Heckelei & Wolf, 2003; Howitt & Msangi, 2014; Lance & Miller, 1998; Liu et al., 2016; Palatnik & Roson, 2012; Robinson et al., 1991; Schlenker & Hannemann, 2006) donde se aplican dichas metodologías a casos generales y de estudio.

De los modelos mencionados, uno de los más utilizados es Positive Mathematical Programming (Howitt, 1995), PMP, un procedimiento de tres etapas en el cual, una función de costos no lineal es calibrada con valores observados de los insumos utilizados en la producción agrícola (Medellin-Azuara et al., 2010).

PMP introduce un método formal de calibración de primer orden, el cual permite reproducir los valores de un cultivo de referencia, sin la necesidad de implementar restricciones artificiales. La calibración perfecta se logra mediante la no linealidad de la función objetivo, con suficientes parámetros para calibrar todo el conjunto de actividades (Mérel & Howitt, 2014). Dentro de las variables que permite calibrar, se encuentran el área de cultivo, la producción y el precio (Howitt, 1995).

El enfoque PMP se desarrolla para la mayoría de los modeladores que, a falta de una justificación empírica, disponibilidad de datos, o el costo, se encuentran con que el conjunto de restricciones empíricas no reproduce los resultados del año base (Howitt, 1995).

El principio fundamental de PMP es que, un modelo no lineal calibrado puede dar cuenta de la conducta económica observada, mientras genera respuestas suaves a los cambios en el entorno económico. Esta doble cualidad la ha transformado en una herramienta popular (Mérel & Howitt, 2014). Una descripción detallada de PMP y sus etapas puede encontrarse en (Henry de Frahan et al., 2007).

Debido a las ventajas presentadas anteriormente, se escoge este modelo para representar las funciones agroeconómicas que se incorporarán a la operación del SEN, correspondientes a los embalses Maule y Laja, los más relevantes a nivel nacional por los motivos ya descritos. La metodología utilizada para la generación de las funciones agroeconómicas se presenta en mayor detalle en la tesis doctoral (Medellín-Azuara, 2006).

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología general utilizada en el presente estudio, la que describe el escenario hidrológico considerado, la derivación de las curvas de demanda de riego y la incorporación en el software AMEBA.

3.1 Definición de escenario hidrológico

El escenario hidrológico utilizado en este trabajo es generado por secuencias de hidrologías, definidas como seca, media y húmeda.

Dichas hidrologías se definen en base a los años hidrológicos 2007, 1969 y 1986, los cuales tienen asignada la misma probabilidad de ocurrencia en el software AMEBA, añadiendo incertidumbre a la operación del sistema.

3.2 Volúmenes de embalses

Para ejecutar el modelo, AMEBA requiere como datos de entrada los volúmenes iniciales y finales de los embalses a incorporar en el análisis. Esto puede inducir a que los resultados se vean influenciados por las condiciones impuestas si el horizonte temporal es reducido, es por ello que se recomienda ejecutar un horizonte mayor al que se desea estudiar.

3.3 Funciones de demanda de riego

Para la determinación de las curvas de demanda se modificó un modelo existente (Gonzalez et al., 2016) basado en *Positive Mathematical Programming* (PMP). Los recursos considerados en el modelo corresponden a tierra y agua, los parámetros del modelo son el precio por unidad de producto, el rendimiento regional de los cultivos, recursos totales utilizados por temporada, el costo variable de cada recurso y el uso de recursos desagregado a cada cultivo. Para lo anterior, es necesario realizar un catastro de los cultivos presentes en la zona de estudio, escogiendo un grupo representativo con el cual caracterizar los costos de sus insumos, determinar el requerimiento hídrico inherente a su producción, obtener el rendimiento promedio asociado a cada cultivo y zona de estudio, además de la estructura de ingresos según los precios de venta al productor al final de la temporada.

La función de demanda (beneficio marginal) de agua para riego, corresponde a la derivada de la función de beneficio neto, es decir, representa el aumento de beneficio que se percibe al aumentar en una unidad el caudal de riego abastecido para la temporada. PMP construye directamente la curva de beneficio marginal para distintos niveles de disponibilidad de agua.

3.3.1 Selección de cultivos y rendimiento

Para la selección de los cultivos representativos y su rendimiento, se puede recurrir al Censo Agropecuario y Forestal, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) con una periodicidad de 10 años. Como complemento, puede ser de utilidad considerar distintos informes realizados por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), tales como los catastros frutícolas para obtener los distintos rendimientos de frutales en las zonas de interés.

3.3.2 Requerimiento hídrico de los cultivos

Con los cultivos ya escogidos y el área asignada a sembrar para cada uno (dados por la proporción regional informada en el censo agropecuario), se procede a determinar el requerimiento hídrico mensual de cada uno, parámetro que permite a PMP optimizar el área a sembrar según la disponibilidad de agua. Para ello, se propone utilizar el Boletín de Riego y Drenaje N°56 elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

La metodología utilizada considera que las demandas evapotranspirativas de un cultivo pueden representarse a través de ponderaciones (coeficientes de cultivo) de la evapotranspiración de referencia de la zona de estudio. Así, la evapotranspiración de cultivo estará dada por:

$$ET_{c_{i,j}} = K_{c_{i,j}} * ET_{r_j}$$

Donde:

$ET_{c_{i,j}}$: evapotranspiración de cultivo i , en la región j ; [mm]

$K_{c_{i,j}}$: coeficiente del cultivo i para la región j ; [-]

ET_{r_j} : evapotranspiración de referencia en la región j ; [mm]

La evapotranspiración de referencia corresponde a la que se presenta en un cultivo hipotético, cuyas características son conocidas y que corresponde a un cultivo de pasto de altura uniforme, bien regado y en óptimas condiciones de crecimiento. El coeficiente

de cultivo (K_c) representa la diferencia en evaporación y transpiración del cultivo de referencia con respecto a uno en particular, considerando tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, entre otros. Puede ser representado a nivel mensual o de acuerdo a la etapa del cultivo. La evapotranspiración de cultivo representa el límite máximo de evapotranspiración cuando no existen obstáculos al crecimiento de este debido a limitaciones de agua (Santibañez et al., 2015).

Con la evapotranspiración de cultivo se puede calcular el requerimiento hídrico mensual por hectárea, representada en este caso como caudal medio mensual a suplir:

$$Q_{s_{i,j,k}} = \frac{10 * ET_{c_{i,j,k}}}{86400 * D_m}$$

Donde:

$Q_{s_{i,j,k}}$: caudal medio requerido por el cultivo i , en la región j , durante el mes k , por unidad de superficie sembrada; [$\frac{m^3}{s} / ha$]

$ET_{c_{i,j,k}}$: evapotranspiración del cultivo i , en la región j , durante el mes k ; [mm]

D_m : días del mes

Luego, con el valor bruto de la superficie a cultivar, se determina el requerimiento hídrico mensual por cultivo:

$$Q_{i,j,k} = Q_{s_{i,j,k}} * S_{i,j}$$

Donde:

$Q_{i,j,k}$: caudal medio requerido por el cultivo i , en la región j , durante el mes k ; [$\frac{m^3}{s}$]

$Q_{s_{i,j,k}}$: caudal medio requerido por el cultivo i , en la región j , durante el mes k , por unidad de superficie sembrada; [$\frac{m^3}{s} / ha$]

$S_{i,j}$: superficie sembrada del cultivo i en la región j ; [ha]

Finalmente, se estima el requerimiento hídrico total mensual, que corresponde a la suma de los requerimientos hídricos de los cultivos en un mismo mes, es decir:

$$Q_{j,k} = \sum_i Q_{i,j,k}$$

Donde:

$Q_{j,k}$: caudal medio mensual total requerido para riego en la región j , durante el mes k ;
 $[\frac{m^3}{s}]$

$Q_{i,j,k}$: caudal medio requerido por el cultivo i , en la región j , durante el mes k ; $[\frac{m^3}{s}]$

Cabe destacar que se decidió utilizar los requerimientos hídricos en forma de caudal debido a que las entregas de los embalses se realizan en dichas unidades, sin embargo, el mismo análisis se puede realizar utilizando unidades de volumen.

3.3.3 Costos totales de producción agrícola

Siguiendo la metodología de PMP, los costos totales incluyen el costo de oportunidad de la tierra (arriendo), el costo de inversión referente a derechos de agua (inversión anualizada) y a los costos de producción promedio asociados a cada cultivo, como mano de obra, fertilizantes, pesticidas, etc.

Se considera que los costos de tierra y agua dependen de la zona de estudio, pero no del cultivo en cuestión. Por el contrario, los costos de producción se asumen variables entre cultivos e independientes de la zona a analizar, este supuesto es válido en la medida que las cuencas analizadas sean comparables en aspectos como conectividad, clima, distancia relativa, etc.

El valor asociado al arriendo de tierra puede obtenerse a través de cotizaciones y/o avisos publicados por corredoras de propiedades o los propios dueños. La información se organiza por precio total y superficie (hectáreas) para así, posteriormente obtener el valor por hectárea.

Por otro lado, las transacciones de derechos de agua se pueden encontrar en el registro llevado a cabo por el Conservador de Bienes Raíces, separándolos por tipo (consuntivos), por cuenca y considerando los más recientes para obtener una aproximación actual del valor a invertir por metro cúbico por segundo.

Luego, dicho valor de inversión es anualizado, considerando que el regante no paga la totalidad del valor el primer año, sino que la distribuye en pagos anuales. La anualización de la inversión se realiza según (Brealey & Myers, 2003):

$$Inv_a = Inv * frc$$
$$frc = \frac{i * (1 + i)^n}{((1 + i)^n - 1)}$$

10

Donde:

Inv_a : inversión anualizada

Inv : inversión total

frc : factor de recuperación del capital

n : periodo (años)

i : tasa de descuento

Por último, los costos de mano de obra e insumos (fertilizantes, pesticidas, entre otros), pueden ser obtenidos de las fichas técnicas de costo de producción elaboradas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA).

Los costos totales estarán dados por la superficie plantada y los costos unitarios por superficie, además del requerimiento hídrico de los cultivos y del costo unitario asociado al agua.

3.3.4 Ingresos totales por venta de productos agrícolas

Los ingresos totales son representados por la venta de la producción a un precio que depende del cultivo en cuestión.

Precios de venta de los productos agrícolas se pueden encontrar en informes desarrollados por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA).

Los ingresos que perciba el agricultor estarán dados por el precio y la cantidad producida del determinado cultivo, por ende, dependerá del rendimiento del cultivo en la zona y de la superficie sembrada.

3.3.5 Funciones de demanda

Con los cultivos escogidos, los costos e ingresos ya caracterizados y con los requerimientos hídricos calculados, se procede a utilizar el modelo PMP (Howitt, 2005) para obtener la curva de demanda asociada al riego en función del caudal total entregado durante la temporada.

Los resultados entregados por PMP, ligados al caudal disponible por temporada son:

- Beneficio marginal del agua para riego
- Beneficio neto por temporada en función del agua disponible
- Costos de producción por cultivo

- Ingresos netos por cultivo
- Hectáreas plantadas por cultivo
- Producción por cultivo
- Requerimiento hídrico de cada cultivo

El modelo se ejecutará 10 veces, partiendo de disponibilidad total y limitando un 10% del total cada vez, construyendo de esta manera las curvas de demanda de riego.

La función de demanda de riego representa el beneficio adicional que percibe un agricultor si el caudal entregado durante temporada de riego aumenta en una unidad. La función de demanda es decreciente, dado que, a mayor caudal, el aumento de beneficio producido por el aumento de una unidad de caudal, es menor.

3.3.6 Funciones de demanda de riego y desagregación mensual

Las curvas de demanda de riego son construidas a partir de los beneficios marginales a lo largo de la temporada, representando el beneficio adicional percibido al aumentar en una unidad la entrega de agua para riego durante la temporada analizada, resultado entregado por el modelo PMP.

Resulta de interés representar la función de demanda desagregada a escala mensual, debido a que la coordinación hidrotérmica de largo plazo considera decisiones mensuales e incluso semanales. Para ello, la entrega de agua total de temporada es desagregada según los requerimientos hídricos mensuales de la región, que dependen del patrón de cultivos, asignando según su porcentaje abastecido el mismo valor de beneficio marginal.

El supuesto de equimarginalidad considera que el aporte marginal asociado al aumento porcentual de caudal abastecido durante los meses de riego, es equivalente al evaluado para el mismo porcentaje abastecido en una temporada completa. En otras palabras, el aumento de beneficio producido por el aumento de un 1% del caudal abastecido para todos los meses, es equivalente al aumento de beneficio producido por el aumento de un 1% del caudal abastecido en la temporada completa.

El caudal mensual considerado corresponde al dado por la distribución de requerimientos de los cultivos en la temporada. Esto permite además encontrar inmediatamente en el gráfico desagregado la distribución de caudales mensuales asociados a un valor de beneficio marginal particular. Siguiendo con lo anterior, el supuesto considerado para la desagregación mensual significa asumir que el caudal asociado a las entregas mensuales de una temporada en particular, genera el mismo beneficio marginal.

En la Figura 3-1 se resalta los valores asociados al caso en que la disponibilidad de agua durante la temporada disminuya al 50%. Se observa que el caso donde la disponibilidad es completa corresponde al eje de las abscisas, donde el beneficio marginal es cero. Siguiendo lo anterior, la intersección de las curvas mensuales con el eje de las abscisas entrega el valor mensual demandado de caudal asociado a 100% de disponibilidad.

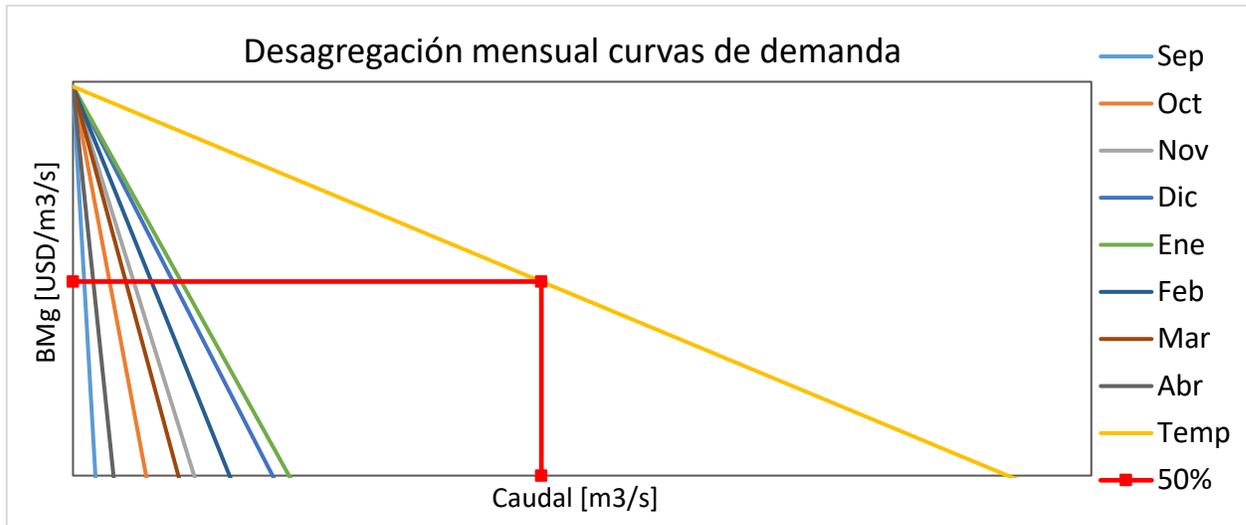


Figura 3-1: Desagregación mensual de curva de demanda de riego.

3.4 Implementación en AMEBA

3.4.1 Conceptos generales de AMEBA

AMEBA cuenta con una interfaz gráfica que permite implementar y analizar de manera sencilla sistemas hidrotérmicos, incorporando ERNC y agentes externos a la generación eléctrica, como la presencia de extracciones de riego en las cuencas a estudiar.

Lo anterior es realizado en dos interfaces distintas. Una de ellas representa al sistema eléctrico que se pretende estudiar, donde son agregadas las centrales, barras, demandas en las barras y las líneas de transmisión que las conectan, añadiendo información sobre precios, potencias instaladas, eficiencias, entre otros.

Por otro lado, existe la interfaz del sistema hidráulico asociado al sistema que se desea estudiar, en el cual se incorporan embalses, centrales hidráulicas, extracciones de riego, nodos desde donde se extrae o restituye caudal, afluentes e información referente a la cantidad de agua demandada por centrales y regantes, volúmenes de embalses, entre otros.

La manera de implementar las funciones de demanda de riego en AMEBA se realiza definiendo extractores de riego, asignándole a cada uno de ellos una demanda de agua para riego y un valor de penalización asociado al no abastecimiento de dicha necesidad.

Las extracciones son definidas de acuerdo a la posición en la cuenca en que se otorgan dichos derechos y a los requerimientos agregados de los regantes en dicha zona, simplificando el gran número de regantes a unas cuantas extracciones.

Las extracciones de riego se conectan a los hidronodos, donde se empalman las distintas centrales hidroeléctricas y afluentes, realizando en cada nodo el balance hídrico entre afluentes, aportes de embalses, restitución de centrales aguas arriba, extracciones de riego y de centrales de generación, tal como se muestra en la Figura 3-2.

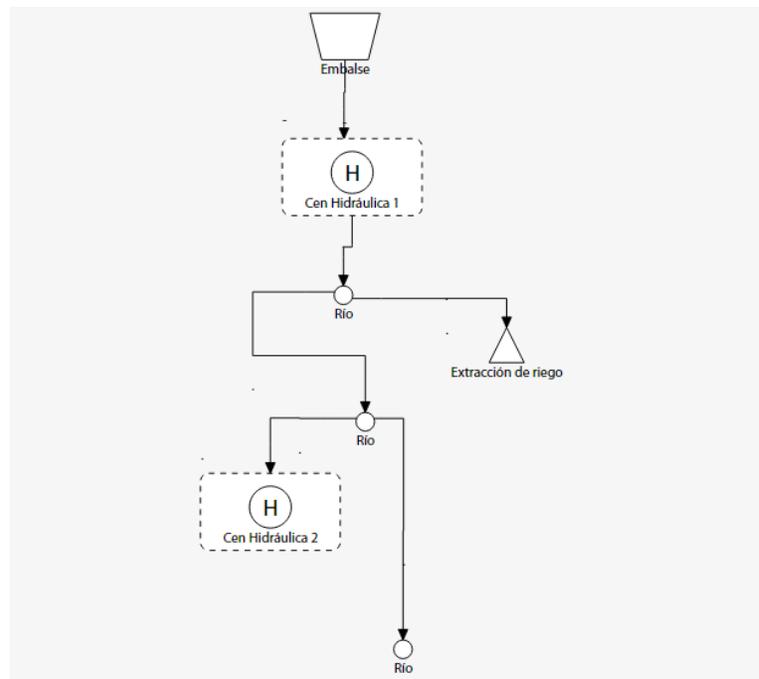


Figura 3-2: Representación de sistema hidráulico en AMEBA.

3.4.2 Funciones de penalización

AMEBA incorpora el valor del riego penalizando económicamente el riego no servido. Así, se debe definir una extracción de riego para luego, definir el caudal que solicita cada mes y la respectiva penalización asociada a no entregar un metro cúbico a dicha extracción para cada mes.

Debido a que AMEBA utiliza la notación anteriormente señalada, las curvas de demanda deben ser modificadas, integrándolas de derecha a izquierda, representando el costo neto por déficit.

Con lo anterior, el costo será cero si suministra todo el requerimiento y, por consiguiente, el costo asociado a no abastecer la totalidad del caudal demandado corresponderá al valor del beneficio total que se deja de percibir.

Como consecuencia del supuesto de equimarginalidad (presentado en el capítulo 3.3.6), los valores de penalización en función del porcentaje no abastecido serán los mismos independientemente del mes, no obstante, la cantidad total de caudal a abastecer para cada mes será diferente.

Por último, debido a que en AMEBA no es posible introducir una función de penalización como tal, la forma de incorporar la curva anterior será discretizando la función en intervalos de 5% de caudal no abastecido, utilizando la penalización media de cada intervalo.

3.5 Diagrama de flujo de la metodología

A modo de resumen, en la Figura 3-3 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la metodología implementada en el presente trabajo.

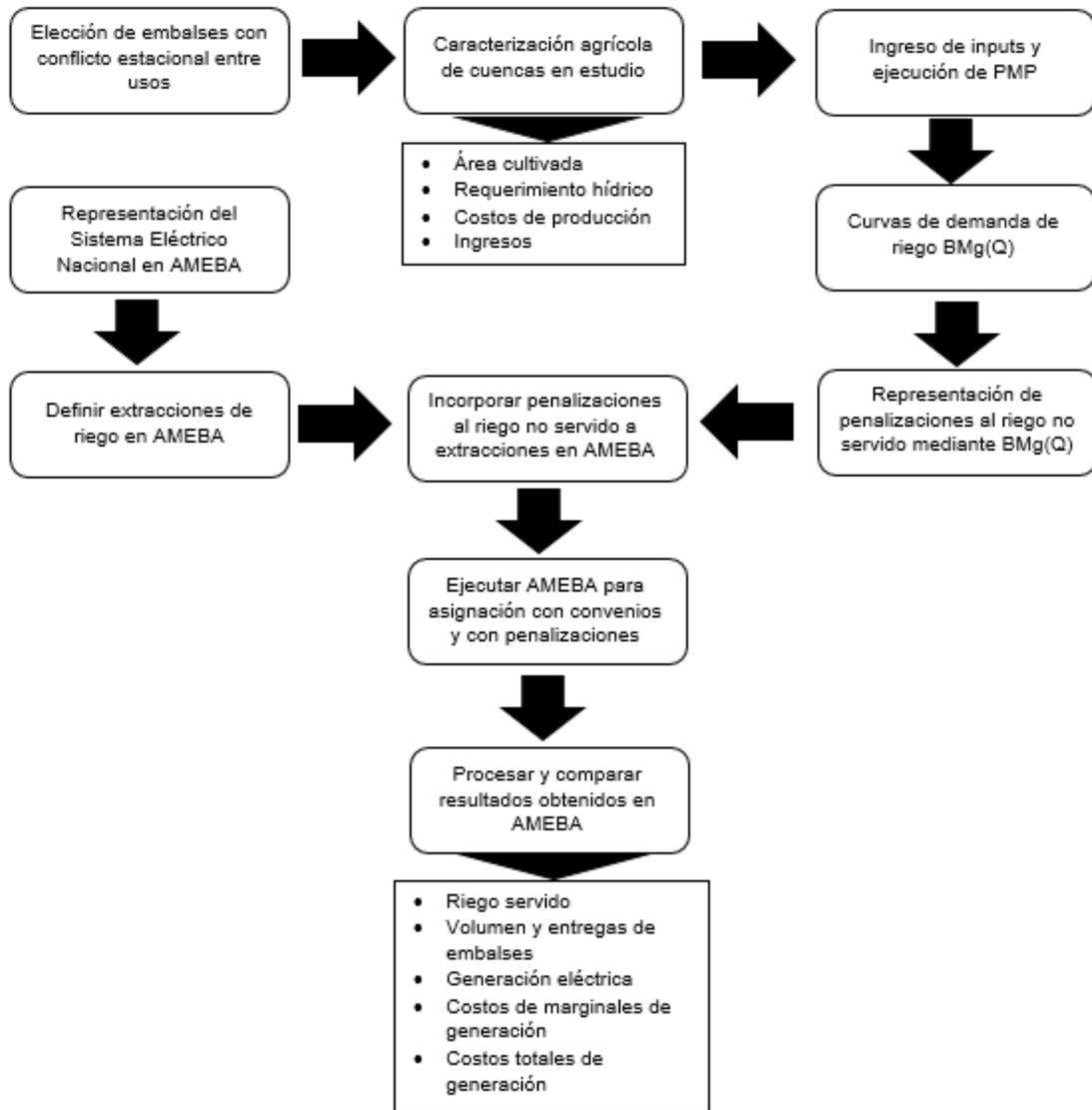


Figura 3-3: Diagrama de flujo de la metodología.

4 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a la incorporación de penalizaciones al riego no servido en las cuencas de Maule y Laja, comparando el desempeño del sistema eléctrico y las entregas de riego con la situación base, en la que operan ambos acuerdos de riego en un horizonte de 7 años a partir de 2018.

El sistema eléctrico analizado en este trabajo corresponde a la representación del Sistema Eléctrico Nacional, SEN, en AMEBA, el cual corresponde a la conexión del Sistema Interconectado del Norte Grande y Sistema Interconectado Central. Dicha representación posee 255 centrales generadoras, 33 barras y 11 embalses, además de las demandas eléctricas asociadas a cada barra.

Las fuentes de generación consideradas se dividen en:

- Térmicas, formadas por biomasa, carbón, gas y diésel, entre otras.
- Hidráulicas, formadas por centrales de embalse, pasada y mini hidráulicas.
- Eólica.
- Solar.

En este estudio se considerarán las hidrologías media, seca y húmeda, asociadas a los años 1969, 2007 y 1986, cuya incertidumbre es modelada mediante SDDP, incluido en AMEBA.

Lo anterior genera escenarios hidrológicos promedio, permitiendo realizar análisis de sensibilidad sobre la respuesta del sistema, pero no un análisis sobre ocurrencia y persistencia de eventos hidrológicos extremos.

Las condiciones iniciales y finales referentes a los volúmenes de embalses considerados se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Volúmenes de embalses en AMEBA.

Embalse	V _{máx} [Hm ³]	V _{mín} [Hm ³]	V _i [Hm ³]	V _f [Hm ³]
Laguna del Maule	1.453,41	0,00	729,28	729,28
Laguna Invernada	174,66	4,72	134,66	134,66
Melado	133,64	106,58	124,44	124,44
Colbún	1.553,25	381,62	1.309,11	1.309,11
Pangue	71,96	30,81	51,38	51,38
Angostura	112,56	105,82	109,19	109,19
Ralco	1.173,29	409,41	889,79	889,79
Canutillar	1.065,38	89,95	547,87	547,87

Rapel	563,21	272,30	491,30	491,30
Pilmaiquén	281,40	0,00	140,70	140,70
Laguna del Laja	5.585,89	431,02	1.964,32	1.964,32

4.1 Embalse Maule

4.1.1 Descripción general

El embalse Laguna del Maule se ubica en la cordillera de Los Andes, a 160 kilómetros de Talca y a 7 kilómetros del límite con Argentina, a 2 mil 200 metros sobre el nivel del mar. El embalse fue inaugurado el 16 de marzo de 1957, respondiendo a la necesidad de aumentar la capacidad de riego e hidroelectricidad en la zona, posee alrededor de 1.453 millones de metros cúbicos embalsados, los cuales son utilizados para abastecer de riego las provincias de Talca y Linares, superando las 150.000 hectáreas, proveyendo además el combustible necesario para el funcionamiento de las numerosas centrales hidroeléctricas presentes en su cuenca.

En la Figura 4-1, se presenta un mapa con la cuenca del Maule, además de la ubicación de lugares de interés, centrales de generación, las principales barras y ríos en la región. En el Anexo A se presenta un mapa con mayor detalle.

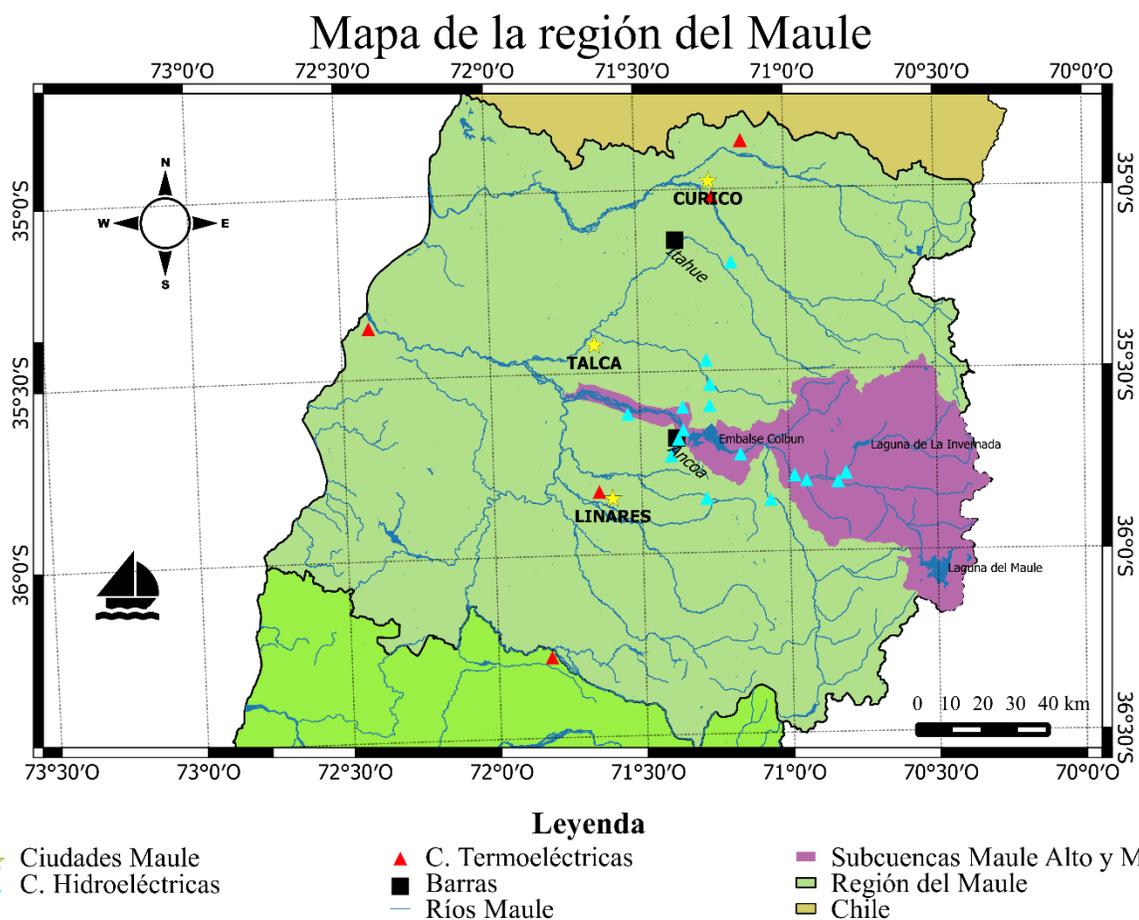


Figura 4-1: Mapa región del Maule.

4.1.2 Descripción del riego en Maule

La región del Maule concentra el 17,2% de la superficie nacional dedicada a rubros silvoagropecuarios, predominando plantaciones forestales (64,8%), seguidas por cereales, frutales, plantas forrajeras y viñas y parronales. Estos rubros, en conjunto, responden al 93,9% de la superficie de cultivos en la región, según el censo agrícola de 2007.

4.1.2.1 Convenio de riego en Maule

Los caudales entregados por la Laguna del Maule están sujetos al convenio de riego firmado en 1947, entre la Dirección General de Aguas, DGA, y ENDESA. El embalse se divide en 3 porciones, aplicándose distintas reglas de operación según el volumen en el que se encuentre la Laguna del Maule (Centro de Energía et al., 2014).

Lo que el acuerdo busca es garantizar un cierto caudal para cada mes de la temporada de riego, en la localidad de Culenar. Las entregas de la Laguna del Maule deberán suplir el déficit entre el régimen natural del río y la necesidad estacional definida en el acuerdo. El régimen natural del Maule se calcula como la suma de afluentes de la hoya intermedia entre Armerillo y las lagunas de Maule e Invernada (Centro de Energía et al., 2014). El requerimiento máximo estacional corresponde a $200 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 4-2 se muestran los requerimientos de riego mensuales definidos por el convenio.

En cuanto a la generación hidroeléctrica, el Convenio también establece límites máximos a extraer de la laguna. Las extracciones para generación no podrán superar un caudal medio mensual de $25 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal medio diario de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen máximo anual de 250 Hm^3 (Centro de Energía et al., 2014).

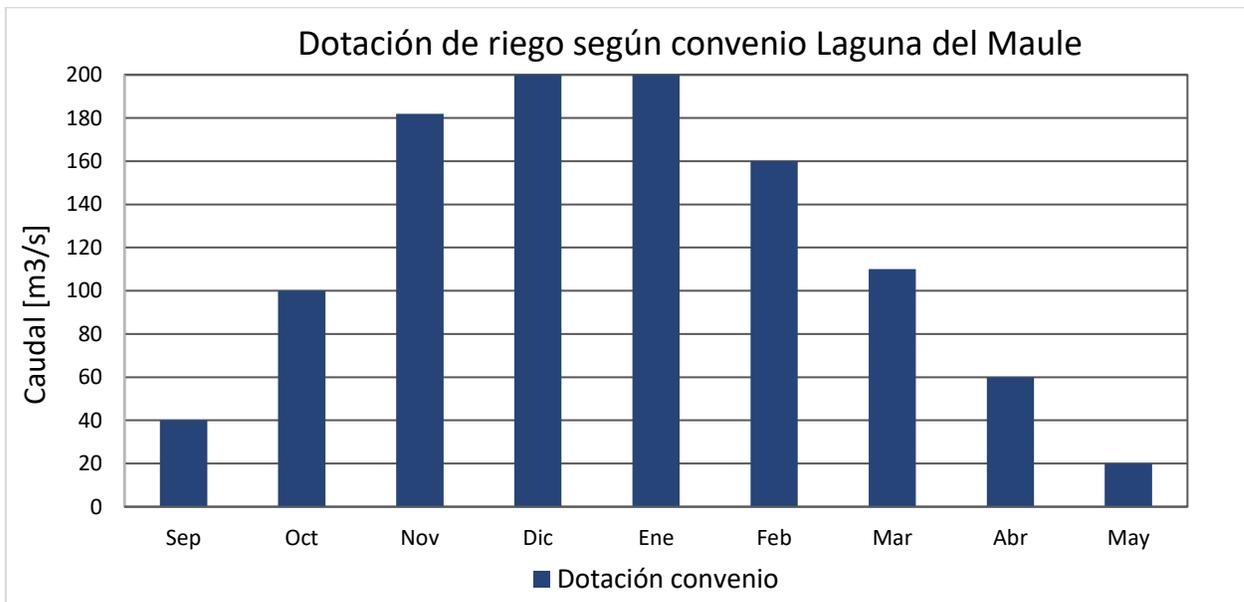


Figura 4-2: Requerimiento de riego mensual definida en acuerdo Maule.

4.1.2.2 Extracciones de riego en Maule

La ubicación de las extracciones de riego es clave en los resultados posteriores, debido a que de ello depende que compita en mayor o menor medida con las extracciones para generación.

En el caso de Maule, se considera la simplificación realizada en AMEBA, con 4 extracciones de riego, representadas en la Figura 4-3. Los caudales asociados a cada una de ellas se pueden encontrar en el Anexo K.

Mapa de extracciones de riego modeladas en Maule

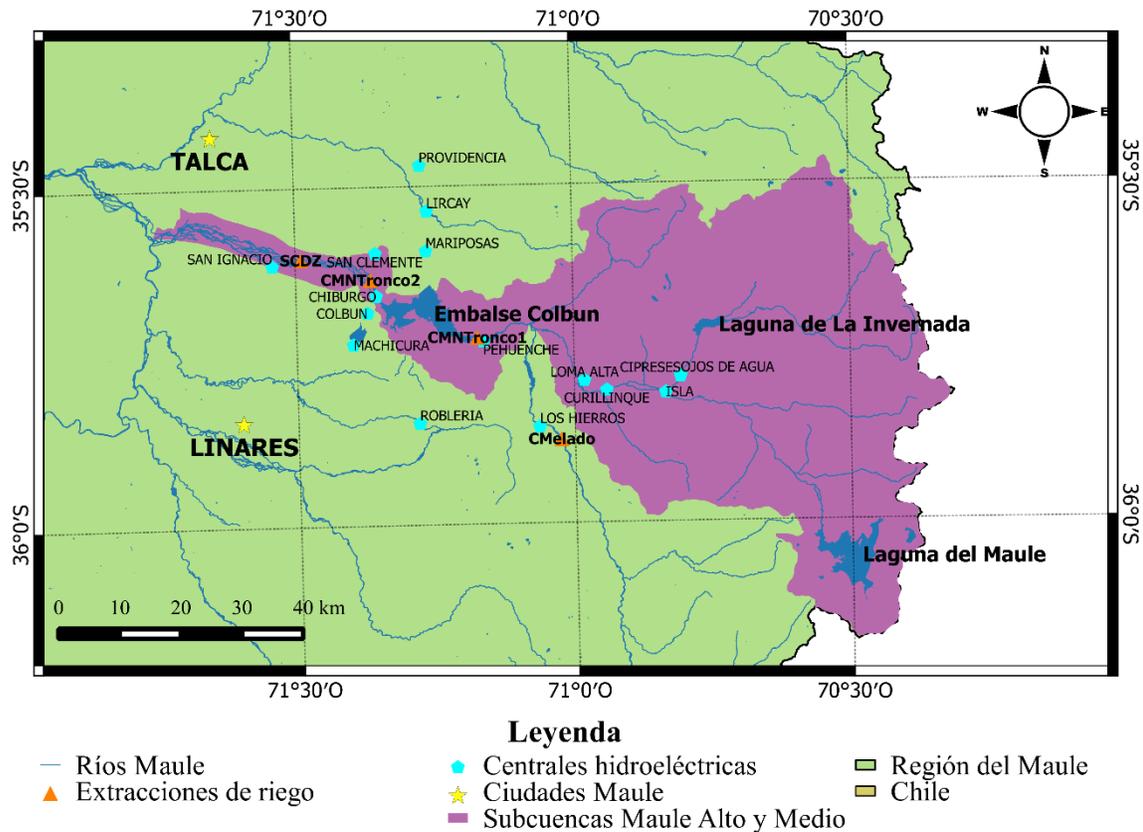


Figura 4-3: Extracciones de riego en Maule.

La simplificación llevada a cabo en AMEBA resume las extracciones asociadas a una zona particular, llamándola según el canal que representa o tiene mayor participación. En la Tabla 4-2, se presenta la nomenclatura utilizada en AMEBA y su respectivo significado.

Tabla 4-2: Extracciones de riego en Maule.

Extracciones Maule	
Extracción AMEBA	Regantes
CMelado	Canalistas de Melado Hierros
CMNTronco 1	Canalistas Maule Norte Alto
CMNTronco 2	Canalistas Maule Norte Bajo
SCDZ	Canalistas Salazar, Corinto, Duao Zapata y Molino

4.1.3 Maule en el Sistema Eléctrico

La región del Maule concentra una potencia instalada en centrales hidráulicas cercana a los 1.950 MW, distribuidas según se muestra en la Tabla 4-3 :

Tabla 4-3: Principales centrales hidroeléctricas Maule. (Capacidad instalada, CNE)

Central	P. instalada [MW]
Pehuenche	570
Colbún	474
Los Cóndores*	150
Ñuble*	136
Cipreses	106
Machicura	95

*Central en construcción.

Por otra parte, la presencia de centrales térmicas es mucho menor, alcanzando una potencia instalada del orden de los 150 MW, según se muestra en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4: Principales centrales térmicas Maule. (Capacidad instalada, CNE)

Central	P. instalada [MW]
Teno	59
Vinales	22
Constitución	15
CBB Centro	14

La demanda anual de energía eléctrica de la región del Maule asciende a cerca de 2.400 GWh, sin embargo, la generación anual promedio de las centrales ubicadas en Maule supera los 8.000 GWh, lo cual permite afirmar que dicha región abastece la demanda de otras zonas del país, es decir, es una región productora de energía.

4.1.4 Curvas de demanda de riego en Maule

4.1.4.1 Cultivos representativos en Maule

Para la modelación de las curvas de demanda de agua para riego es necesario definir los cultivos que serán considerados. Como primer paso, se estudia la presencia de cada tipo de cultivo en la región a partir del Censo Agrícola de 2007. Debido a que este estudio analiza al riego por temporadas, los cultivos a analizar serán los estacionales. La Figura 4-4 muestra la distribución de cultivos por categorías en la cuenca del Maule:

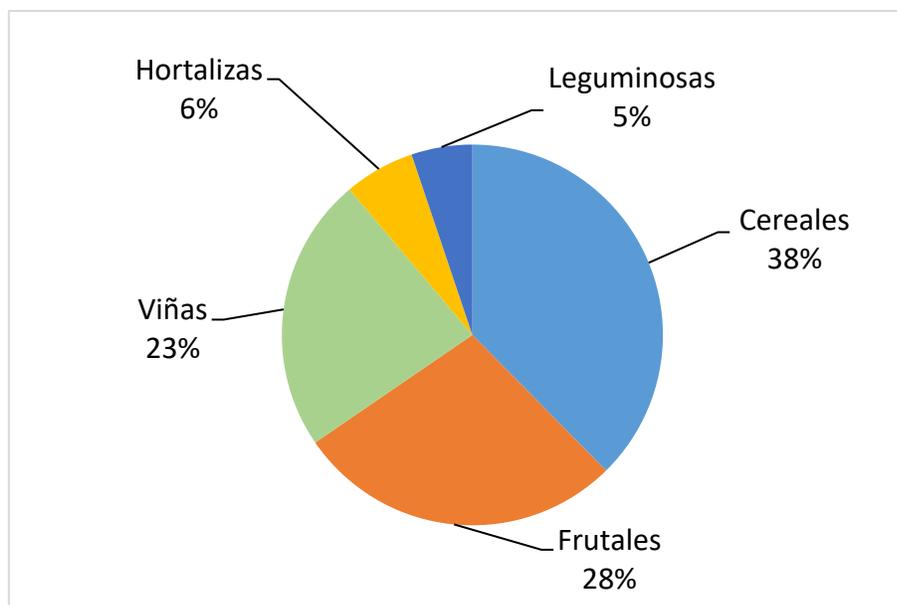


Figura 4-4: Distribución de cultivos por categorías en Maule.

Posteriormente, se procede a escoger un cultivo representativo para cada categoría, basándose principalmente en que tenga la mayor participación en dicha categoría, según se muestra en la Tabla 4-5:

Tabla 4-5: Cultivos escogidos para representar la temporada en Maule.

Rubro	Cultivos	Especie/Región
Cereales	Trigo	43,6%
Frutales	Manzana	33,1%
Viñas	Uva	100,0%
Hortalizas	Choclo	17,3%
Leguminosas	Poroto	44,2%

Con los cultivos ya escogidos, se determina el rendimiento asociado a cada uno, eso es, la producción por unidad de área. La unidad de medida comúnmente utilizada es el quintil métrico (qqm), el que corresponde a 100 kg.

Tabla 4-6: Rendimiento de cultivos en Maule. (Censo agrícola 2007)

Cultivos	Rendimiento [ton/ha]	Rendimiento [qqm/ha]
Trigo	6,96	69,60
Manzana	41,30	413,00
Uva	20,30	203,00
Choclo	9,94	99,40
Poroto	2,06	20,60

4.1.4.2 Requerimiento hídrico de los cultivos en Maule

Utilizando la metodología descrita en el Capítulo 3.3.2, se procede a escoger los valores de evapotranspiración de referencia correspondiente a Maule (Santibañez et al., 2015), los que se presentan en la Tabla 4-7. La información se presenta según la temporada de riego, definida en el convenio de riego, la cual comienza en septiembre.

Tabla 4-7: Evapotranspiración de referencia Maule.

Maule											
Evapotranspiración de Referencia Eto (mm)											
Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
78	117,8	153	186	192,2	156,8	136,4	93	65,1	45	43,4	55,8

Luego de obtener los valores de evapotranspiración de referencia, se escogen los coeficientes de cultivo, presentados en la Tabla 4-8, para finalmente obtener el requerimiento hídrico de los cultivos (Figura 4-5).

Tabla 4-8: Coeficientes de cultivos en Maule. (Comisión Nacional de Riego, 2011).

Coeficientes de Cultivo Kc												
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Trigo	0,40	0,70	0,80	1,15	1,15	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Manzana	0,00	0,40	0,60	0,85	1,00	1,00	0,95	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Uva	0,45	0,60	0,70	0,85	0,85	0,70	0,60	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Choclo	0,00	0,40	0,60	1,10	1,10	1,10	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Poroto	0,00	0,60	0,70	1,00	1,10	1,10	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En el Anexo B se presentan las tablas correspondientes a evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea para cada cultivo de Maule.

Considerando un área total sembrada de 160.000 hectáreas, distribuidas entre las provincias de Talca y Linares, se obtiene el área de cada cultivo (Tabla 4-9) y el requerimiento hídrico total mensual para cada cultivo (Figura 4-5) en Maule.

Tabla 4-9: Área cultivada Maule.

Cultivos	Cultivo/Región	Área Cultivada [ha]
Trigo	37,6%	60.197,2
Manzana	27,8%	44.501,4
Uva	23,4%	37.455,5
Choclo	6,0%	9.572,6

Poroto	5,2%	8.273,3
--------	------	---------

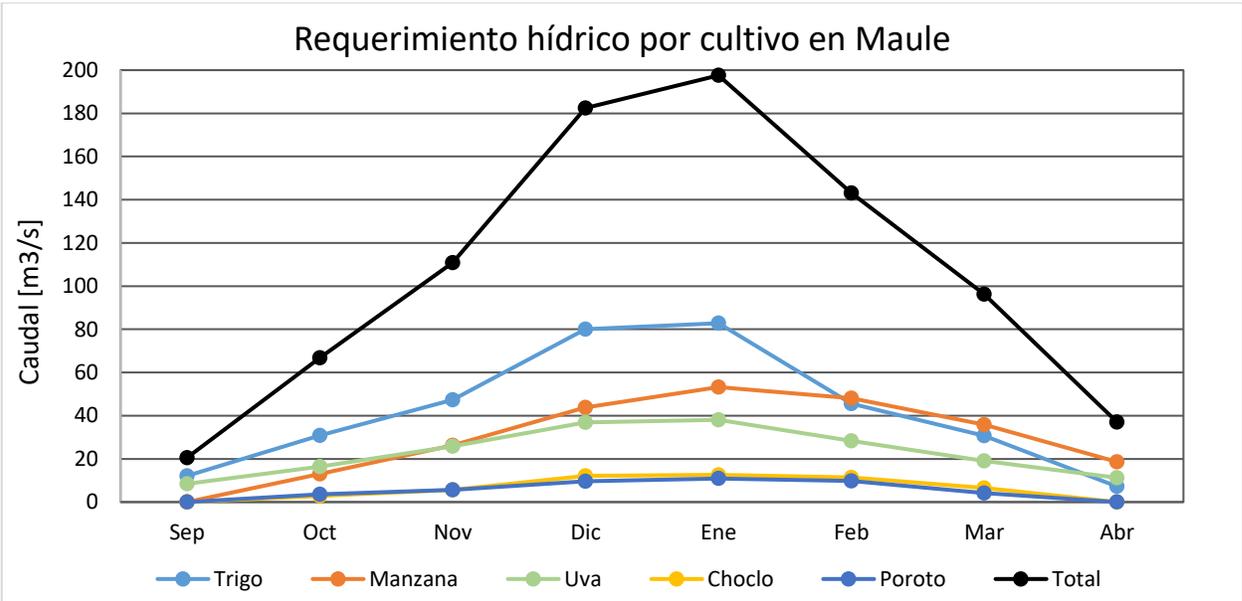


Figura 4-5: Requerimiento hídrico total para cultivos en Maule.

En la Figura 4-5 se puede observar que cada cultivo tiene requerimientos que siguen patrones diferentes, sin embargo, coinciden en que el momento de mayor demanda se produce en enero. Se destaca también que el trigo es el cultivo más demandante de recurso hídrico, debido en parte a que posee mayor superficie sembrada en relación a las demás.

Para verificar si los requerimientos hídricos pueden ser abastecidos, éstos se comparan con los establecidos por el convenio de riego en la Figura 4-6, donde se puede observar que el caudal requerido no supera al establecido por el convenio.

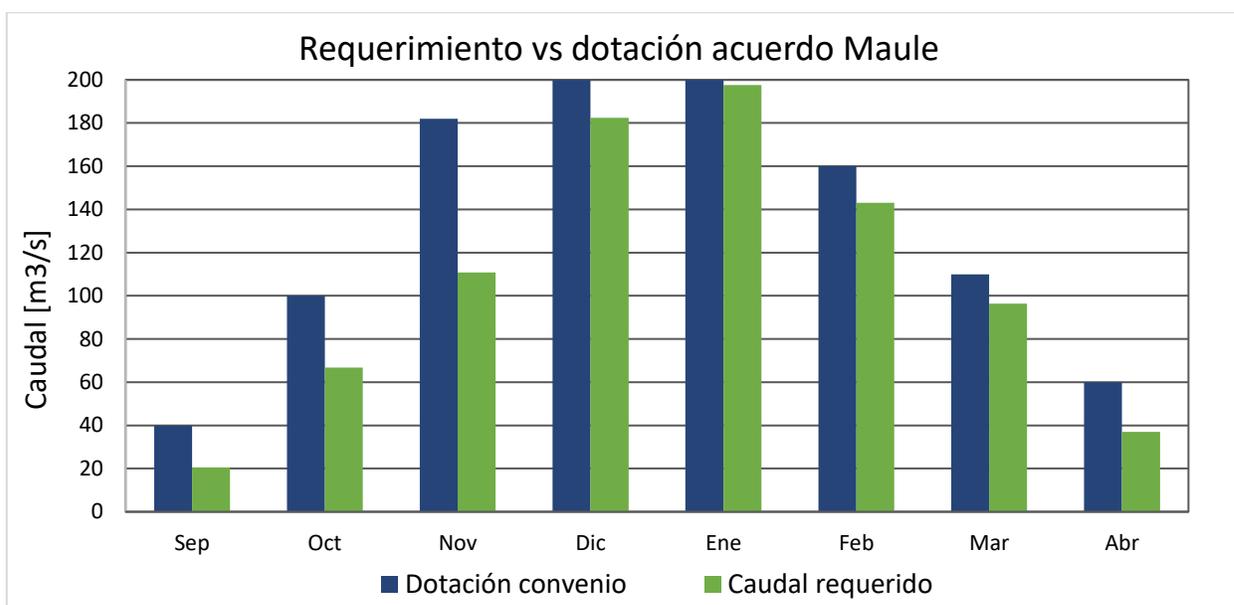


Figura 4-6: Requerimiento hídrico y dotación dada por acuerdo en Maule.

4.1.4.3 Costos de producción agrícola en Maule

Los costos considerados en este estudio se dividen en tres. Por una parte, los asociados al costo de oportunidad de los terrenos, reflejados a través de su valor de arrendamiento por temporada. En segundo lugar, el costo de inversión en derechos de agua para poder suplir a los cultivos del riego necesario para su crecimiento. Por último, los costos asociados a la mano de obra e insumos varios.

El valor asociado al arriendo de los terrenos se obtuvo al catastrar distintas ofertas de corredoras de propiedades y/o propietarios, donde se indica el precio y el área ofertada, para luego obtener el valor por hectárea. Dicha regresión puede ser encontrada en el Anexo C. Así, el valor de arriendo de terrenos en Maule corresponde a 579,3 USD\$/ha (valor del Dólar a noviembre de 2016).

El valor asociado a la inversión en derechos de agua se obtuvo al catastrar las transacciones en la cuenca de estudio, considerando sólo derechos de agua consuntivos. Dado que dicha inversión no se realiza de inmediato, el valor total es anualizado, considerando un horizonte de 25 años, obteniendo el equivalente anual de la inversión, lo cual ya fue explicado en el capítulo 3.3.3. Así, el valor de los derechos de agua en Maule corresponde a 2.105,3 USD\$/m³/s (valor del Dólar a noviembre de 2016).

Los costos de mano de obra e insumos pueden ser obtenidos de las fichas técnicas de costo de producción elaboradas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), los que están desagregados en mano de obra, insumos y pesticidas. En la Tabla 4-10, se presentan los resultados obtenidos por cada cultivo en Maule.

Tabla 4-10: Costos unitarios de mano de obra e insumos en Maule.

Cultivo	Costos unitarios de producción en Maule					
	Mano de Obra		Insumos		Costo Total	
	CLP/ha	USD/ha	CLP/ha	USD/ha	CLP/ha	USD/ha
Trigo	222.626	330	274.781	407	497.407	737
Manzana	2.128.760	3.154	1.182.316	1.752	3.311.076	4.905
Uva	3.400.000	5.037	2.206.737	3.269	5.606.737	8.306
Choclo	133.750	198	301.907	447	435.657	645
Poroto	652.000	966	499.894	741	1.151.894	1.707

Con las superficies definidas anteriormente y con el requerimiento hídrico calculado, se procede a determinar los costos totales por cultivo, considerando una temporada donde se cuenta con dotación completa.

Tabla 4-11: Costo total por cultivo en Maule.

Costo total por cultivo en Maule			
Cultivo	Superficie [USD]	Agua [USD]	Total [USD]
Trigo	79.231.374	708.708	79.940.082
Manzana	244.072.327	502.956	244.575.283
Uva	332.814.038	387.882	333.201.919
Choclo	11.723.655	107.606	11.831.261
Poroto	18.911.135	92.295	19.003.431
Total [USD]	686.752.528	1.799.448	688.551.976

4.1.4.4 Ingreso neto en Maule

Haciendo uso de los informes de precios al productor desarrollados por la ODEPA, se calculan los ingresos netos estimando previamente la producción total de los cultivos (Tabla 4-12), la que está dada por el rendimiento y la superficie sembrada.

Tabla 4-12: Producción total de cultivos en Maule.

Cultivos	Área cultivada [ha]	Rendimiento [qqm/ha]	Producción [qqm]
Trigo	60.197,2	69,6	4.189.725
Manzana	44.501,4	413,0	18.379.089
Uva	37.455,5	203,0	7.603.475
Choclo	9.572,6	99,4	951.512
Poroto	8.273,3	20,6	170.430

Con la producción total calculada, se procede a determinar los ingresos totales por cultivo en Maule.

Tabla 4-13: Ingresos totales por cultivo en Maule.

Cultivos	Producción [qqm]	Precio [USD/qqm]	Ingresos [USD]
Trigo	4.189.725	23,6	98.691.292
Manzana	18.379.089	16,0	294.065.422
Uva	7.603.475	51,1	388.622.072
Choclo	951.512	21,9	20.862.776
Poroto	170.430	207,4	35.348.373
		Total	837.589.936

Con los ingresos totales calculados, se procede a determinar el beneficio total de temporada, presentado en la Tabla 4-14, el que corresponde a la situación con total disponibilidad de recurso hídrico. Descontando los costos de producción calculados anteriormente, se obtiene el valor de beneficio total por cultivo, el que dividido por la superficie sembrada ofrece una idea de que tan rentable es un cultivo por unidad de área.

Tabla 4-14: Beneficio neto por cultivo en Maule.

Cultivos	Ingresos [USD]	Costos [USD]	Beneficio [USD]	Beneficio unitario [USD/ha]
Trigo	98.691.292	79.940.082	18.751.211	311,5
Manzana	294.065.422	244.575.283	49.490.139	1.112,1
Uva	388.622.072	333.201.919	55.420.153	1.479,6
Choclo	20.862.776	11.831.261	9.031.515	943,5
Poroto	35.348.373	19.003.431	16.344.943	1.975,6
Total	837.589.936	688.551.976	149.037.960	

4.1.4.5 Funciones económicas del riego en Maule

Con los inputs ya reunidos, se ejecuta el modelo PMP, obteniendo la función de demanda de riego, presentada en la Figura 4-7. Para un mayor detalle del procedimiento, se recomienda revisar el capítulo 3.3.6. Los resultados en mayor detalle pueden ser consultados en el Anexo D.

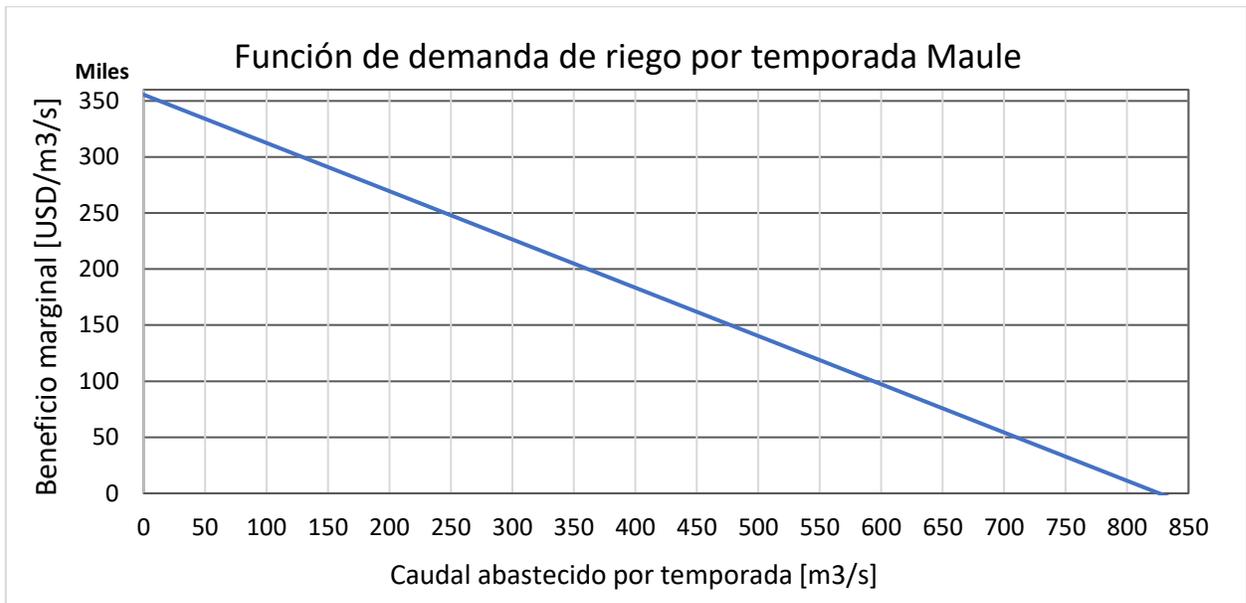


Figura 4-7: Función de demanda por temporada de riego en Maule.

Luego, con la función de demanda ya derivada, se procede a la desagregación mensual (Figura 4-8), considerando que, a menor disponibilidad, se mantienen las proporciones mensuales de requerimiento hídrico, lo cual se explica en el capítulo 3.3.6. En el Anexo E se adjunta figura con las funciones de demanda mensual más la función de temporada completa, además de los requerimientos hídricos en mayor detalle.

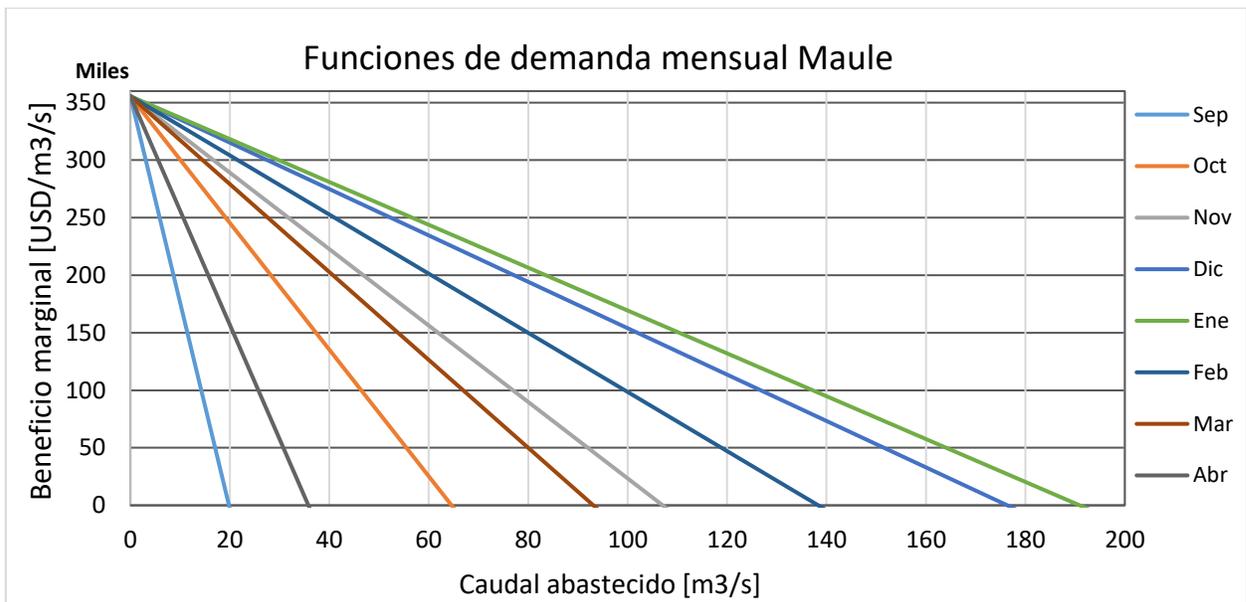


Figura 4-8: Funciones de demanda mensual en Maule.

Con las funciones de demanda mensuales, se procede a integrar cada una de ellas, obteniendo así las funciones de beneficio mensual de riego para la temporada en Maule (Figura 4-9).

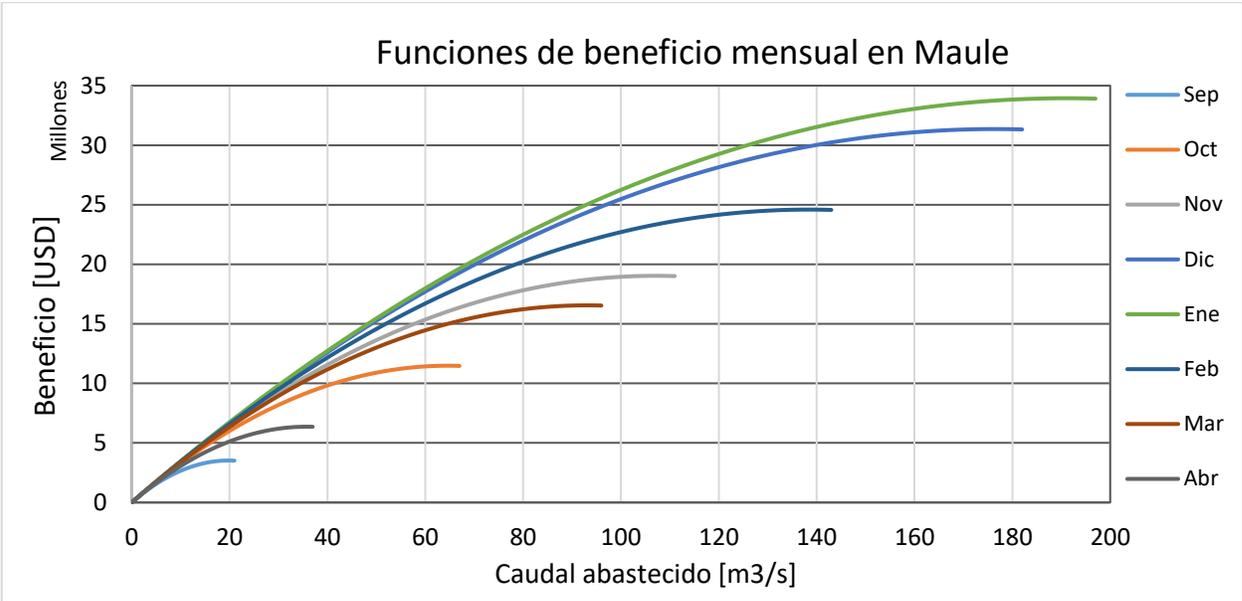


Figura 4-9: Funciones de beneficio mensual de riego en Maule.

4.1.5 Penalizaciones por riego no abastecido en Maule

Como fue explicado en el capítulo 3.4.2, las funciones de demanda deben ser reformuladas para que representen el costo neto por déficit de riego, integrándolas de derecha a izquierda, según se muestra en la Figura 4-10.

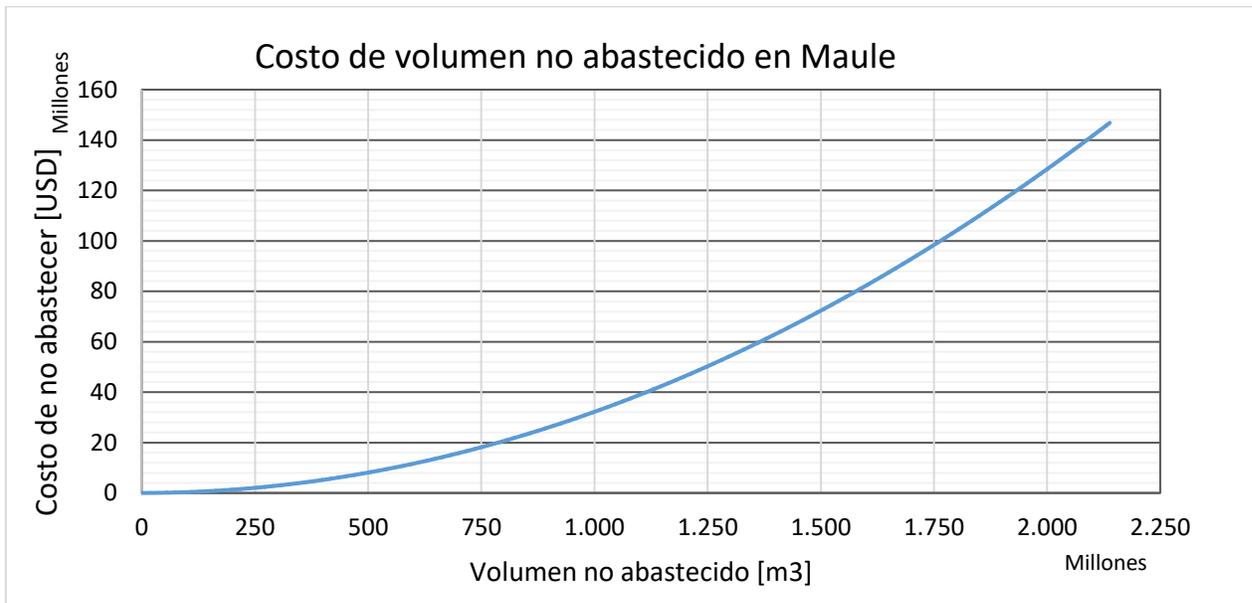


Figura 4-10: Costo de volumen no abastecido en Maule.

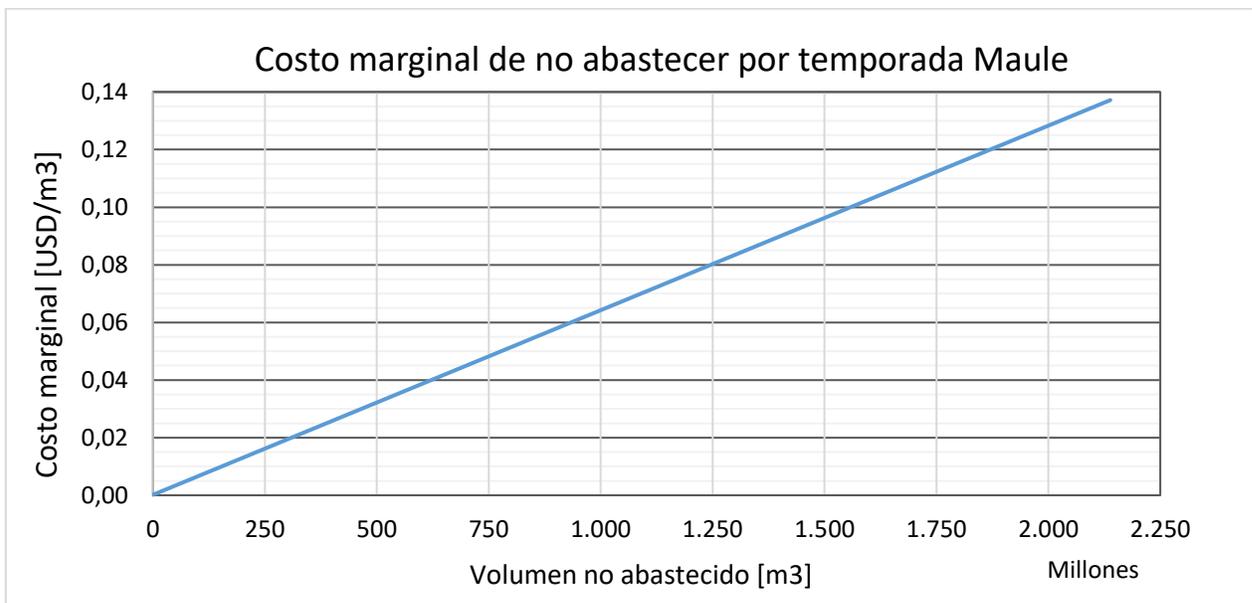


Figura 4-11: Costo marginal de volumen no abastecido en Maule.

Con los costos marginales se genera la función de penalización (Figura 4-12), la que penalizará cada m^3 no entregado, para intervalos de 5% de caudal. Debido a que para la segregación de curvas mensuales se consideró el supuesto de equimarginalidad, al transformar el problema a porcentaje no abastecido, la curva para cada mes será la misma. Debido a lo anterior, la curva de penalización será única, sin embargo, los caudales mensuales sobre los cuales se aplica serán distintos.

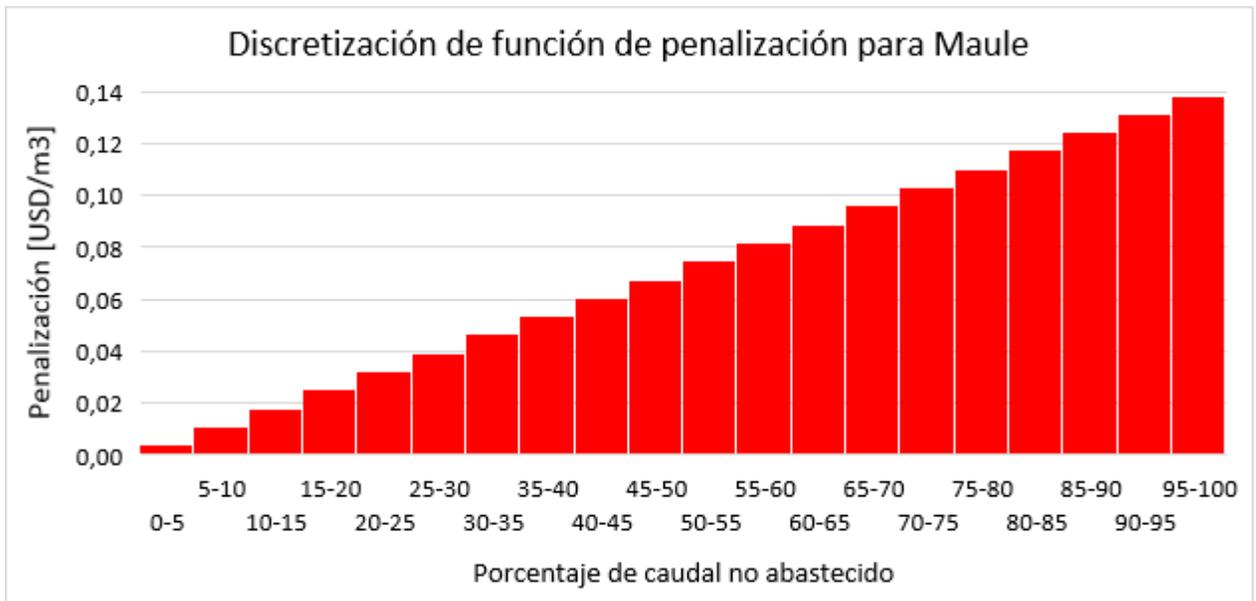


Figura 4-12: Discretización de función de penalización para Maule.

4.2 Embalse Laja

4.2.1 Descripción general

El embalse Laguna del Laja se ubica en la cordillera de Los Andes, a 90 kilómetros de Los Ángeles y a 5 kilómetros del límite con Argentina, a 1 mil 700 metros sobre el nivel del mar. El embalse fue inaugurado el 25 de junio de 1958, respondiendo a la necesidad de mantener la seguridad de riego e hidroelectricidad en la zona, posee alrededor de 5.600 millones de metros cúbicos embalsados, los cuales son utilizados para abastecer de riego a la provincia del Biobío, superando las 100.000 hectáreas, proveyendo además el combustible necesario para el funcionamiento de las numerosas centrales hidroeléctricas presentes en su cuenca.

En la Figura 4-13, se presenta un mapa con la cuenca del Laja, además de la ubicación de lugares de interés, centrales de generación, las principales barras y ríos en la región. En el Anexo F se presenta un mapa con mayor detalle.

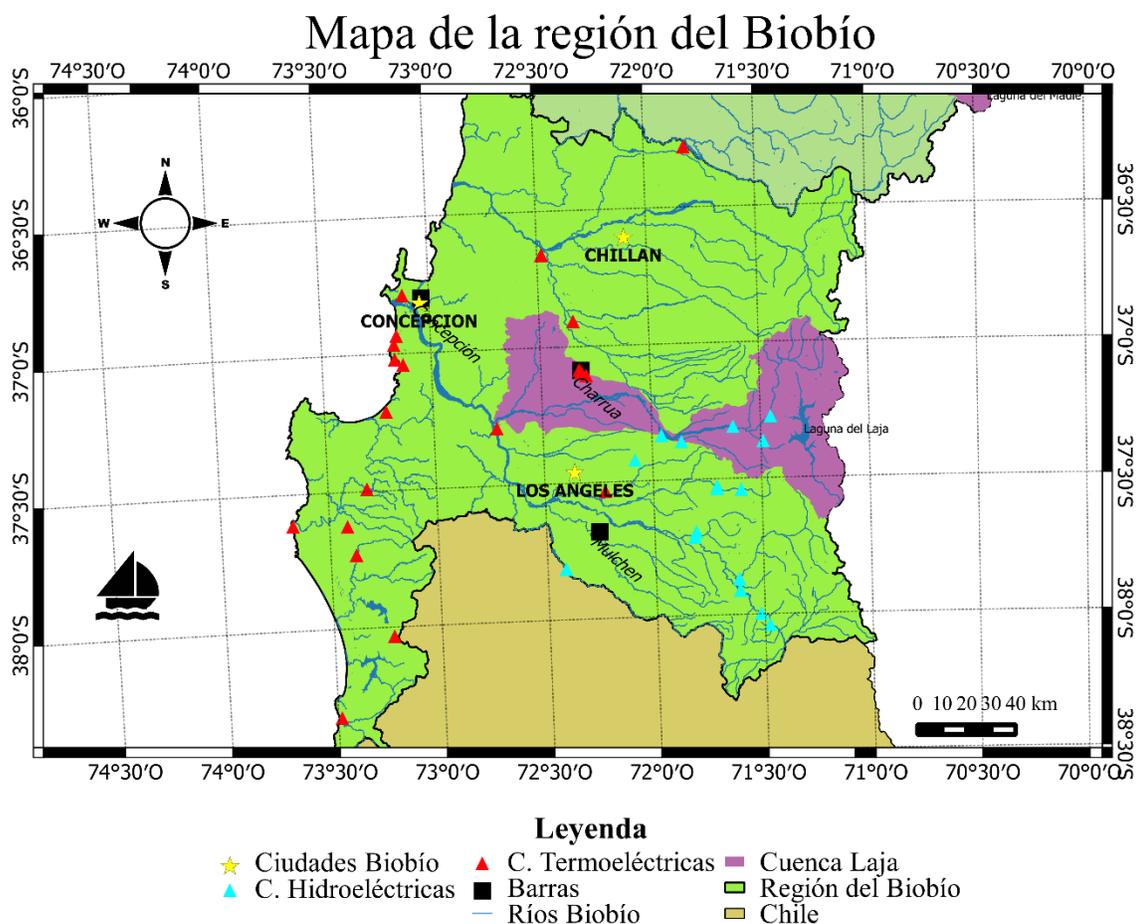


Figura 4-13: Mapa región del Biobío.

4.2.2 Descripción del riego en Laja

La región del Biobío concentra el 28% de la superficie nacional dedicada a rubros silvoagropecuarios, predominando plantaciones forestales (78,9%), seguidas por cereales, frutales, plantas forrajeras y viñas y parronales. Estos rubros, en conjunto, responden al 97,9% de la superficie de cultivos en la región, según el censo agrícola de 2007.

4.2.2.1 Convenio de riego en Laja

Los caudales entregados por la Laguna del Laja están sujetos al convenio de riego firmado en 1958, entre la Dirección General de Aguas, DGA, y ENDESA. El embalse se divide en 3 porciones, aplicándose distintas reglas de operación según el volumen en el que se encuentre la Laguna del Laja (Centro de Energía et al., 2014).

Lo que el acuerdo busca es garantizar un cierto caudal para cada mes de la temporada de riego, en Laja en Tucapel. Las entregas de la Laguna del Laja deberán suplir el gasto máximo para riego ($143 \text{ m}^3/\text{s}$) en Tucapel o completar las filtraciones históricas ($47 \text{ m}^3/\text{s}$) en la bocatoma de Abanico (Centro de Energía et al., 2014). En la Figura 4-14 se muestran los requerimientos de riego mensuales definidos por el convenio.

En cuanto a la generación hidroeléctrica, el Convenio también establece límites máximos a extraer de la laguna, incluyendo las filtraciones que afloran aguas arriba de la bocatoma de la central Abanico, estos corresponden a un gasto medio anual de ($57 \text{ m}^3/\text{s}$), gasto medio mensual de ($67 \text{ m}^3/\text{s}$) y gasto medio diario de ($85 \text{ m}^3/\text{s}$), este último podrá ser aumentado a voluntad por ENDESA sólo cuando el nivel de agua de la laguna suba sobre la cota 50 cm bajo el nivel del umbral de rebalse (Centro de Energía et al., 2014).

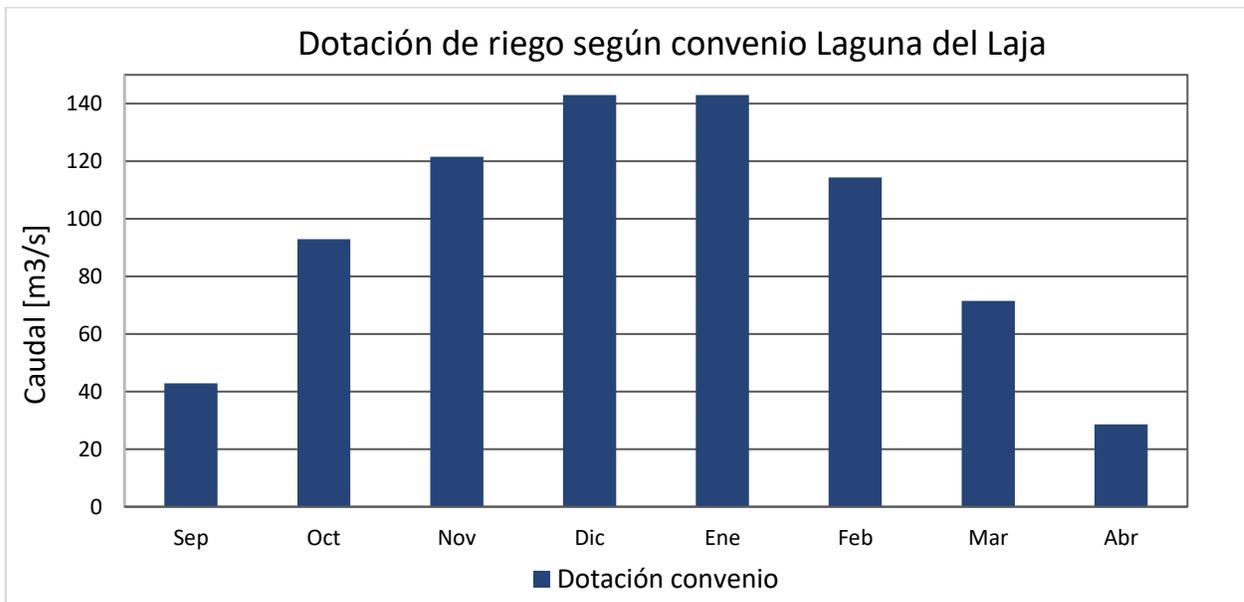


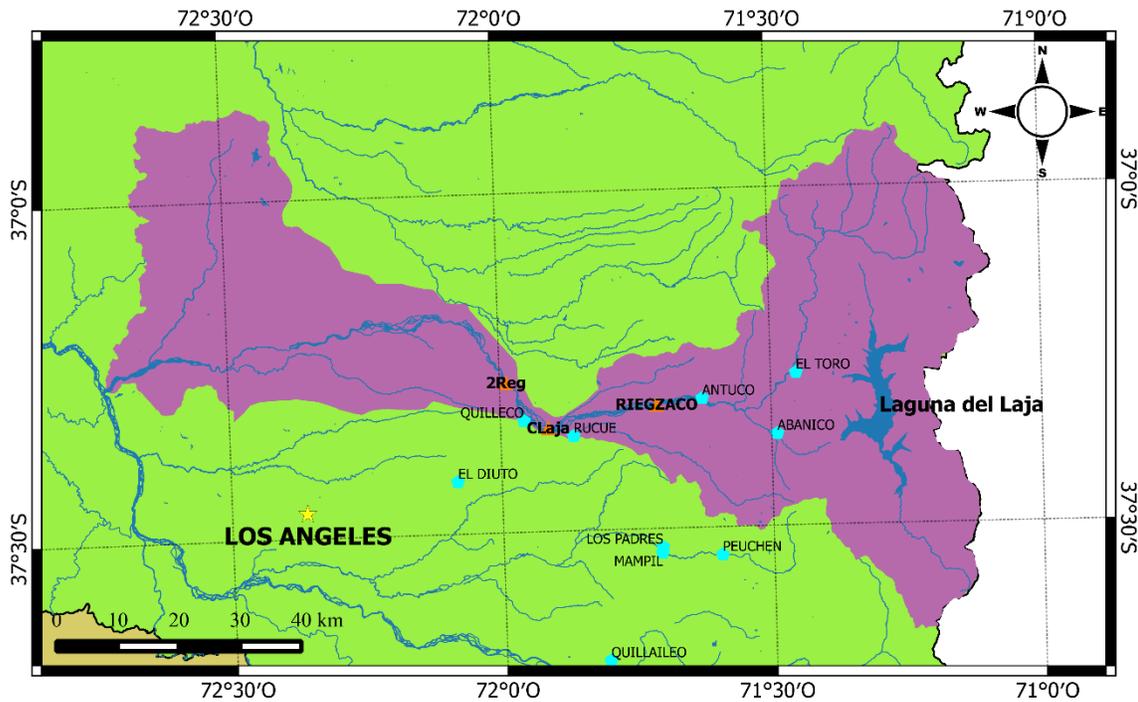
Figura 4-14: Requerimiento de riego mensual definido en acuerdo Laja.

4.2.2.2 Extracciones de riego en Laja

La ubicación de las extracciones de riego es clave en los resultados posteriores, debido a que de ello depende que compita en mayor o menor medida con las extracciones para generación.

En el caso de Laja, se considera la simplificación realizada en AMEBA, con 3 extracciones de riego, representadas en la Figura 4-15. Los caudales asociados a cada una de ellas se pueden encontrar en el Anexo K.

Mapa de extracciones de riego modeladas en Laja



- Legenda**
- Ríos Biobío
 - ▲ Extracciones de riego
 - Centrales hidroeléctricas
 - ★ Ciudades Biobío
 - Región del Biobío
 - Chile
 - Cuenca Laja

Figura 4-15: Extracciones de riego en Laja.

La simplificación llevada a cabo en AMEBA resume las extracciones asociadas a una zona particular, llamándola según el canal que representa o tiene mayor participación. En la Tabla 4-15, se presenta la nomenclatura utilizada en AMEBA y su respectivo significado.

Tabla 4-15: Extracciones de riego en Laja.

Extracciones Laja	
Extracción AMEBA	Regantes
RIEGZACO	Canalistas de Zañartu, Collao, Ortiz y Mirrihue
CLAJA	Canalistas del Laja
2reg	Segundos regantes del Laja

4.2.3 Laja en el Sistema Eléctrico

En la región del Biobío se concentra una potencia instalada en centrales hidráulicas cercana a los 2.700 MW, distribuidas según se muestra en la Tabla 4-16:

Tabla 4-16: Principales centrales hidroeléctricas Biobío. (Capacidad instalada, CNE)

Central	P. instalada [MW]
Ralco	690
Pangue	467
El Toro	450
Angostura	324
Antuco	320
Rucúe	178

Dentro de la región de Biobío, en la cuenca del Laja, se concentra una potencia instalada en centrales hidráulicas cercana a los 1.200 MW, como se presenta en la Tabla 4-17:

Tabla 4-17: Principales centrales hidroeléctricas cuenca del Laja. (Capacidad instalada, CNE)

Central	P. instalada [MW]
El Toro	450
Antuco	320
Rucúe	178
Abanico	136

En cuanto a la presencia de centrales térmicas, esta alcanza una potencia instalada del orden de los 1.800 MW, según se muestra en la Tabla 4-18:

Tabla 4-18: Principales centrales térmicas Biobío. (Capacidad instalada, CNE)

Central	P. instalada [MW]
Bocamina (I y II)	478
Santa María	370
Yungay	200
Santa Lidia	139
CMPC Laja	111
Los Pinos	104

La demanda anual de energía eléctrica de la región del Biobío asciende a cerca de 6.100 GWh, sin embargo, la generación anual promedio de las centrales ubicadas en Biobío supera los 21.000 GWh, lo cual permite afirmar que dicha región abastece la demanda de otras zonas del país, es decir, es una región productora de energía.

4.2.4 Curvas de demanda de riego en Laja

4.2.4.1 Cultivos representativos en Laja

Para la modelación de las curvas de demanda de agua para riego es necesario definir los cultivos que serán considerados. Como primer paso, se estudia la presencia de cada tipo de cultivo en la región a partir del Censo Agrícola de 2007. Debido a que este estudio analiza al riego por temporadas, los cultivos a analizar serán los estacionales. La Figura 4-16 muestra la distribución de cultivos por categorías en la cuenca del Laja:

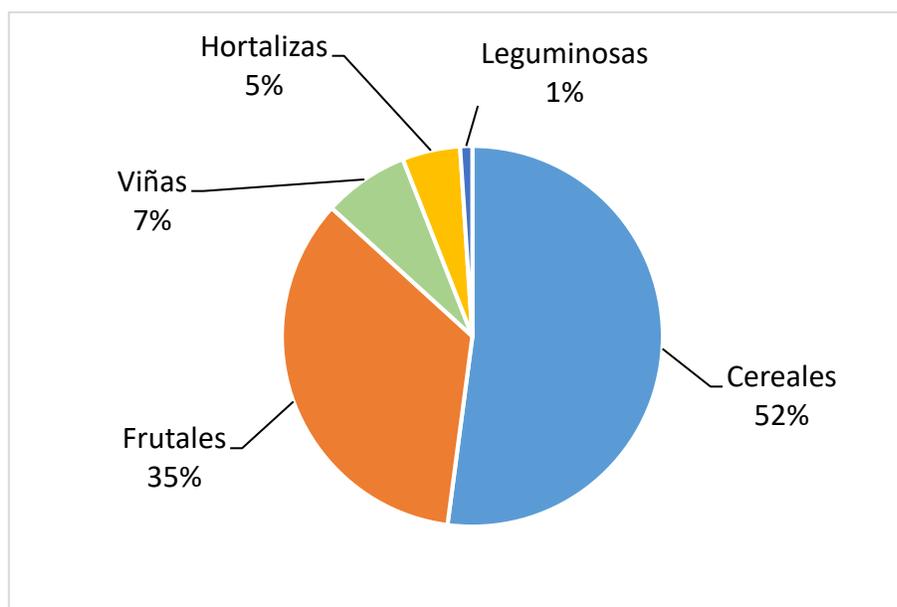


Figura 4-16: Distribución de cultivos por categoría en Laja.

Posteriormente, se procede a escoger un cultivo representativo para cada categoría, basándose principalmente en que tenga la mayor participación en dicha categoría, según se muestra en la Tabla 4-19:

Tabla 4-19: Cultivos escogidos para representar la temporada en Laja.

Rubro	Cultivos	Especie/Región
Cereales	Trigo	61,1%
Frutales	Frambuesa	9,9%
Viñas	Uva	100,0%
Hortalizas	Choclo	13,1%
Leguminosas	Poroto	30,5%

Con los cultivos ya escogidos, se determina el rendimiento asociado a cada uno, eso es, la producción por unidad de área. La unidad de medida comúnmente utilizada es el quintil métrico (qqm), el que corresponde a 100 kg.

Tabla 4-20: Rendimiento de cultivos en Laja. (Censo agrícola 2007)

Cultivos	Rendimiento [ton/ha]	Rendimiento [qqm/ha]
Trigo	7,07	70,70
Frambuesa	7,50	75,00
Uva	19,50	195,00
Choclo	9,29	92,90
Poroto	2,10	21,00

4.2.4.2 Requerimiento hídrico de los cultivos en Laja

Utilizando la metodología descrita en el Capítulo 3.3.2, se procede a escoger los valores de evapotranspiración de referencia correspondiente a Laja (Santibañez et al., 2015), los que se presentan en la Tabla 4-21. La información se presenta según la temporada de riego, definida en el convenio, la cual comienza en septiembre.

Tabla 4-21: Evapotranspiración de referencia Laja.

Laja											
Evapotranspiración de Referencia Eto (mm)											
Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
69	105,4	135	164,3	167,4	137,2	117,8	78	52,7	36	37,2	46,5

Luego de obtener los valores de evapotranspiración de referencia, se escogen los coeficientes de cultivo, presentados en la Tabla 4-22, para finalmente obtener el requerimiento hídrico de los mismos (Figura 4-17).

Tabla 4-22: Coeficientes de cultivos en Laja. (Comisión Nacional de Riego, 2011)

Coeficientes de Cultivo Kc												
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Trigo	0,40	0,70	0,80	1,15	1,15	0,70	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Frambuesa	0,00	0,45	0,51	0,55	0,69	0,75	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Uva	0,45	0,60	0,70	0,85	0,85	0,70	0,60	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Choclo	0,00	0,40	0,60	1,10	1,10	1,10	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Poroto	0,00	0,60	0,70	1,00	1,10	1,10	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En el Anexo G se presentan las tablas correspondientes a evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea para cada cultivo de Laja.

Considerando un área total sembrada de 140.000 hectáreas, distribuidas en la provincia de Biobío, se obtiene el área de cada cultivo (Tabla 4-23) y el requerimiento hídrico total mensual para cada cultivo (Figura 4-17) en Laja.

Tabla 4-23: Área cultivada Laja.

Cultivos	Cultivo/Región	Área Cultivada [ha]
Trigo	52,1%	72.926,9
Frambuesa	34,7%	48.552,3
Uva	7,3%	10.190,2
Choclo	4,9%	6.883,6
Poroto	1,0%	1.447,1

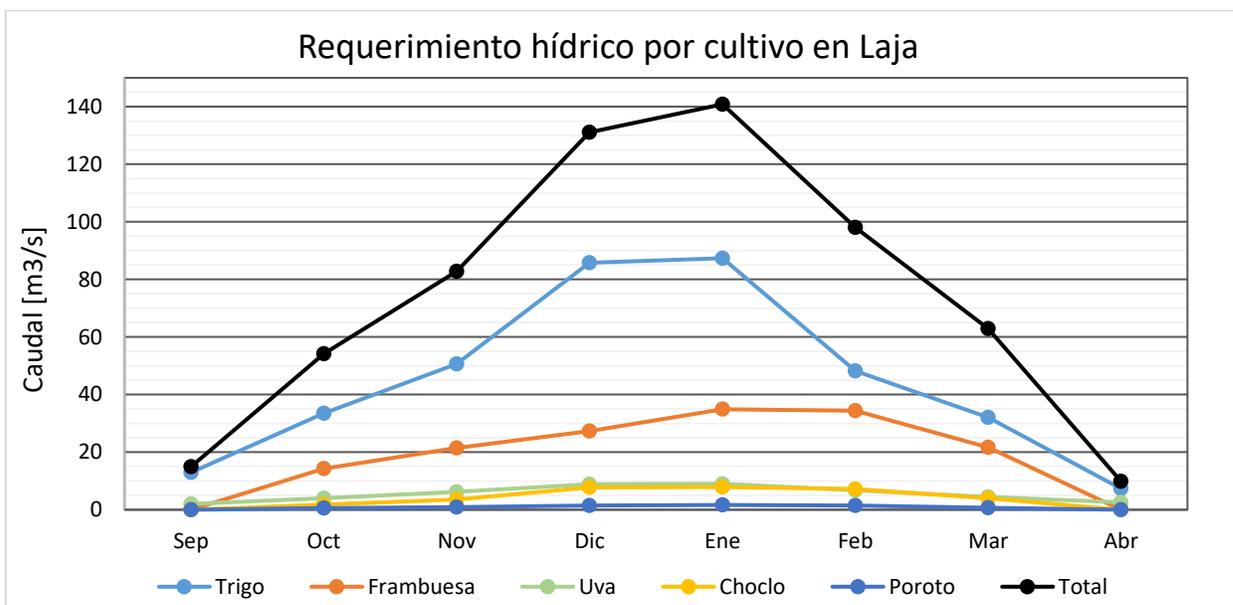


Figura 4-17: Requerimiento hídrico total para cultivos en Laja.

En la Figura 4-17 se puede observar que cada cultivo tiene requerimientos que siguen patrones diferentes, sin embargo, coinciden en que el momento de mayor demanda se produce en enero. Se destaca también que el trigo es el cultivo más demandante de recurso hídrico, debido en parte a que posee mayor superficie sembrada en relación a las demás.

Para verificar que los requerimientos hídricos pueden ser abastecidos, estos se comparan con los establecidos en el convenio de riego en la Figura 4-18, donde se puede observar que el caudal requerido no supera al establecido por el convenio.

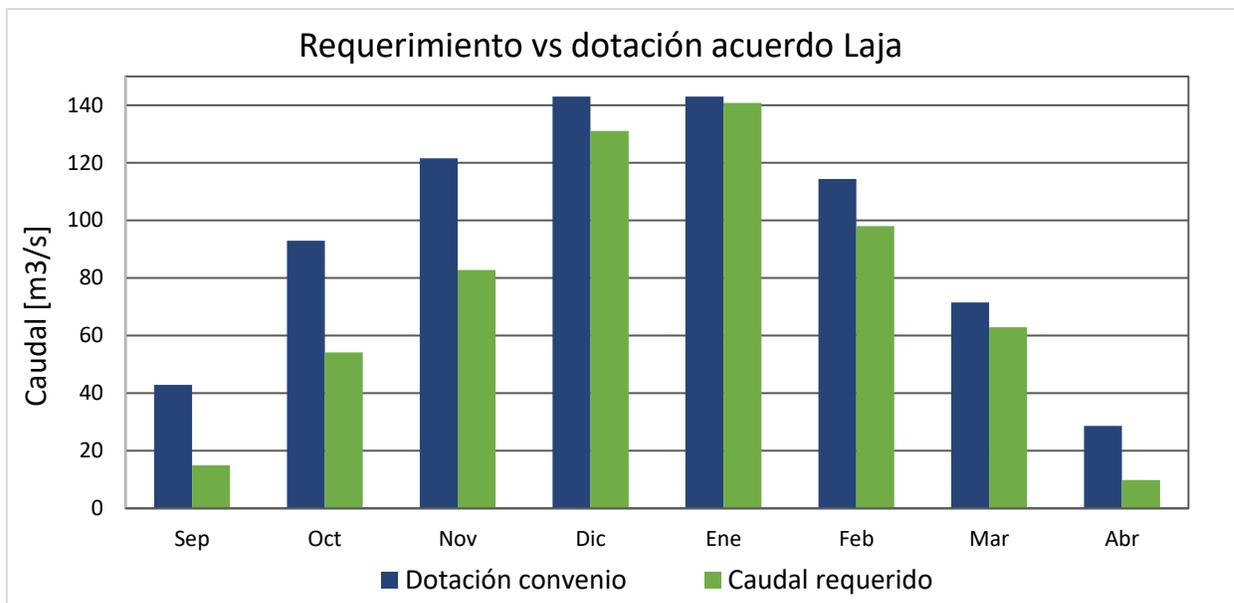


Figura 4-18: Requerimiento hídrico y dotación dada por acuerdo en Laja.

4.2.4.3 Costos de producción agrícola en Laja

Los costos considerados en este estudio se dividen en tres. Por una parte, los asociados al costo de oportunidad de los terrenos, reflejados a través de su valor de arrendamiento por temporada. En segundo lugar, el costo de inversión en derechos de agua para poder suplir a los cultivos del riego necesario para su crecimiento. Por último, los costos asociados a la mano de obra e insumos varios.

El valor asociado al arriendo de los terrenos se obtuvo al catastrar distintas ofertas de corredoras de propiedades y/o propietarios, donde se indica el precio y el área ofertada, para luego obtener el valor por hectárea. Dicha regresión puede ser encontrada en el Anexo H. Así, el valor de arriendo de terrenos en Laja corresponde a 373,1 USD\$/ha (valor del Dólar a noviembre de 2016).

El valor asociado a la inversión en derechos de agua se obtuvo al catastrar las transacciones en la cuenca de estudio, considerando sólo derechos de agua consuntivos. Dado que dicha inversión no se realiza de inmediato, el valor total es anualizado, considerando un horizonte de 25 años, obteniendo el equivalente anual de la inversión, lo cual ya fue explicado en el capítulo 3.3.3. Así, el valor de los derechos de agua en Laja corresponde a 2.105,3 USD\$/m³/s (valor del Dólar a noviembre de 2016).

Los costos de mano de obra e insumos pueden ser obtenidos de las fichas técnicas de costo de producción elaboradas por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA),

los que están desagregados en mano de obra, insumos y pesticidas. En la Tabla 4-24, se presentan los resultados obtenidos por cada cultivo en Laja.

Tabla 4-24: Costos unitarios de mano de obra e insumos en Laja.

	Costos unitarios de producción en Laja					
	Mano de Obra		Insumos		Costo Total	
Cultivo	CLP/ha	USD/ha	CLP/ha	USD/ha	CLP/ha	USD/ha
Trigo	222.626	330	274.781	407	497.407	737
Frambuesa	3.758.000	5.567	630.285	934	4.388.285	6.501
Uva	3.400.000	5.037	2.206.737	3.269	5.606.737	8.306
Choclo	133.750	198	301.907	447	435.657	645
Poroto	652.000	966	499.894	741	1.151.894	1.707

Con las superficies definidas anteriormente y con el requerimiento hídrico calculado, se procede a determinar los costos totales por cultivo, considerando una temporada donde se cuenta con dotación completa.

Tabla 4-25: Costo total por cultivo en Laja.

Costo total por cultivo en Laja			
Cultivo	Superficie [USD]	Agua [USD]	Total [USD]
Trigo	80.948.482	643.734	81.592.216
Frambuesa	333.760.843	277.332	334.038.175
Uva	88.444.182	78.969	88.523.151
Choclo	7.011.020	57.955	7.068.975
Poroto	3.009.392	12.103	3.021.496
Total [USD]	513.173.919	1.070.093	514.244.012

4.2.4.4 Ingreso neto en Laja

Haciendo uso de los informes de precios al productor desarrollados por la ODEPA, se calculan los ingresos netos estimando previamente la producción total de los cultivos (Tabla 4-26), la que está dada por el rendimiento y la superficie sembrada.

Tabla 4-26: Producción total de cultivos en Laja.

Cultivos	Área cultivada [ha]	Rendimiento [qqm/ha]	Producción [qqm]
Trigo	72.926,9	70,7	5.155.931
Frambuesa	48.552,3	75,0	3.641.420
Uva	10.190,2	195,0	1.987.081
Choclo	6.883,6	92,9	639.485

Poroto	1.447,1	21,0	30.389
--------	---------	------	--------

Con la producción total calculada, se procede a determinar los ingresos totales por cultivo en Laja.

Tabla 4-27: Ingresos totales por cultivo en Laja.

Cultivos	Producción [qqm]	Precio [USD/qqm]	Ingresos [USD]
Trigo	5.155.931	24,4	126.033.880
Frambuesa	3.641.420	103,7	377.628.747
Uva	1.987.081	51,9	103.033.823
Choclo	639.485	21,5	13.737.079
Poroto	30.389	192,6	5.852.707
		Total	626.286.237

Con los ingresos totales calculados, se procede a determinar el beneficio total de temporada, presentado en la Tabla 4-28, el que corresponde a la situación con total disponibilidad de recurso hídrico. Descontando los costos de producción calculados anteriormente, se obtiene el valor de beneficio total por cultivo, el que dividido por la superficie sembrada ofrece una idea de que tan rentable es un cultivo por unidad de área.

Tabla 4-28: Beneficio neto por cultivo en Laja.

Cultivos	Ingresos [USD]	Costos [USD]	Beneficio [USD]	Beneficio unitario [USD/ha]
Trigo	126.033.880	81.592.216	44.441.665	609,4
Frambuesa	377.628.747	334.038.175	43.590.573	897,8
Uva	103.033.823	88.523.151	14.510.672	1.424,0
Choclo	13.737.079	7.068.975	6.668.104	968,7
Poroto	5.852.707	3.021.496	2.831.211	1.956,5
Total	626.286.237	514.244.012	112.042.225	

4.2.4.5 Funciones económicas del riego en Laja

Con los inputs ya reunidos, se ejecuta el modelo PMP, obteniendo la función de demanda de riego, presentada en la Figura 4-19. Para un mayor detalle del procedimiento, se recomienda revisar el capítulo 3.3.6. Los resultados en mayor detalle pueden ser consultados en Anexo I.

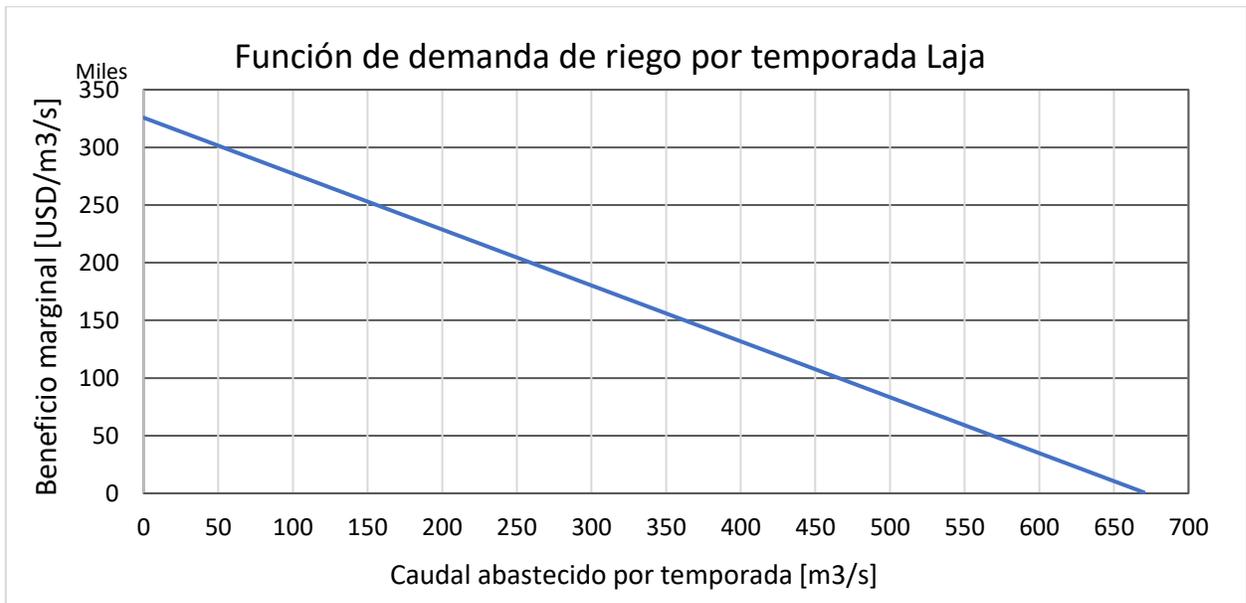


Figura 4-19: Función de demanda por temporada de riego en Laja.

Luego, con la función de demanda ya derivada, se procede a la desagregación mensual (Figura 4-20), considerando que, a menor disponibilidad, se mantienen las proporciones mensuales de requerimiento hídrico, lo cual se explica en el capítulo 3.3.6. En el Anexo J se adjunta figura con las funciones de demanda mensual más la función de temporada completa, además de los requerimientos hídricos en mayor detalle.

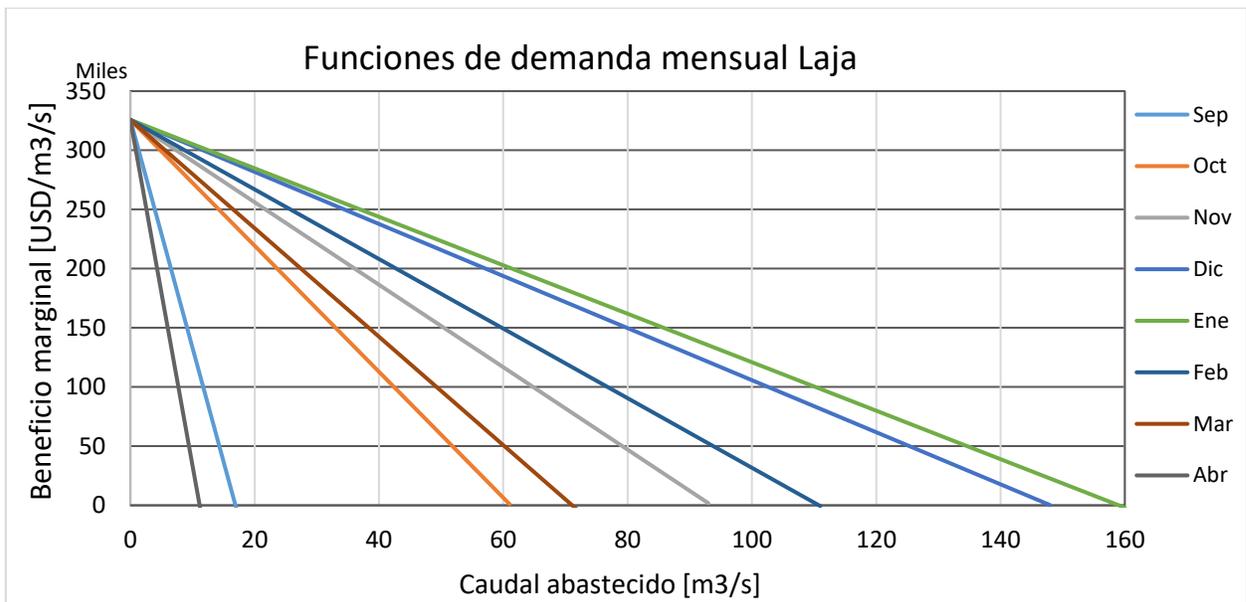


Figura 4-20: Funciones de demanda mensual en Laja.

Con las funciones de demanda mensuales, se procede a integrar cada una de ellas, obteniendo así las funciones de beneficio mensual de riego para la temporada en Laja (Figura 4-21).

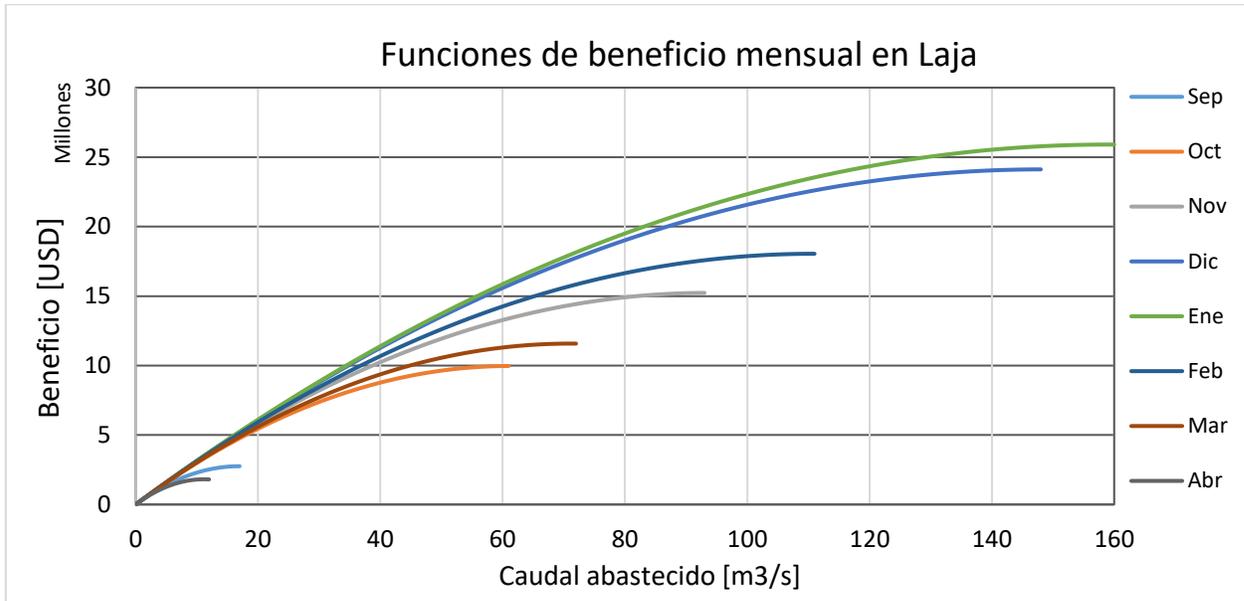


Figura 4-21: Funciones de beneficio mensual de riego en Laja.

4.2.5 Penalizaciones por riego no abastecido en Laja

Como fue explicado en el capítulo 3.4.2, las funciones de demanda deben ser reformuladas para que representen el costo neto por déficit de riego, integrándolas de derecha a izquierda, según se muestra en la Figura 4-22.

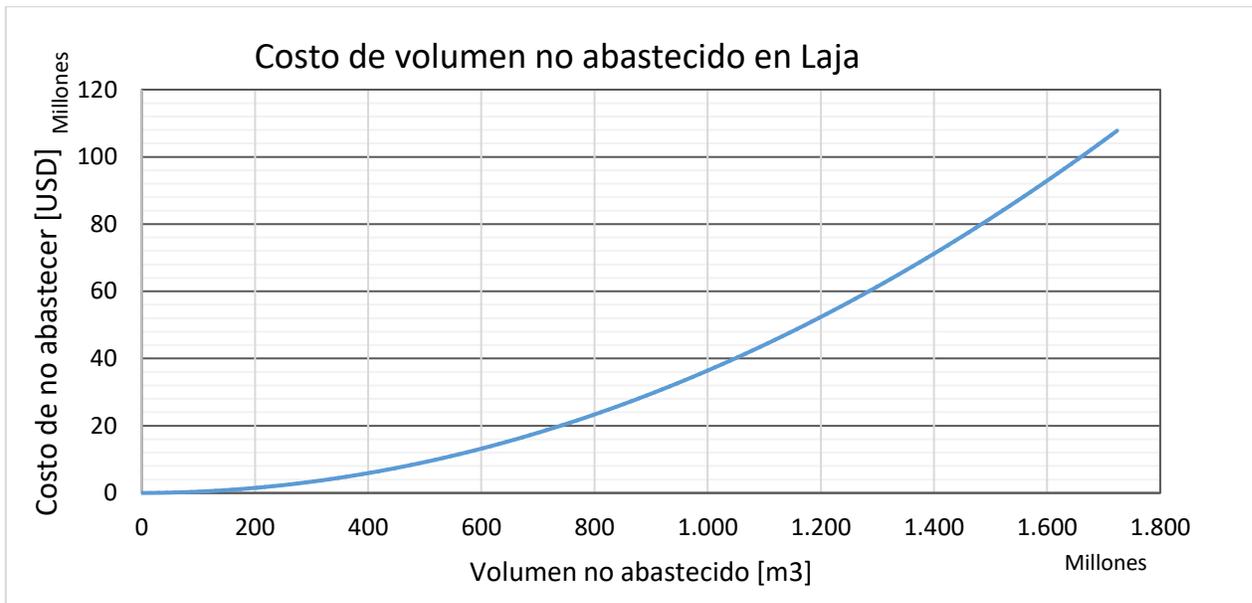


Figura 4-22: Costo de volumen no abastecido en Laja.

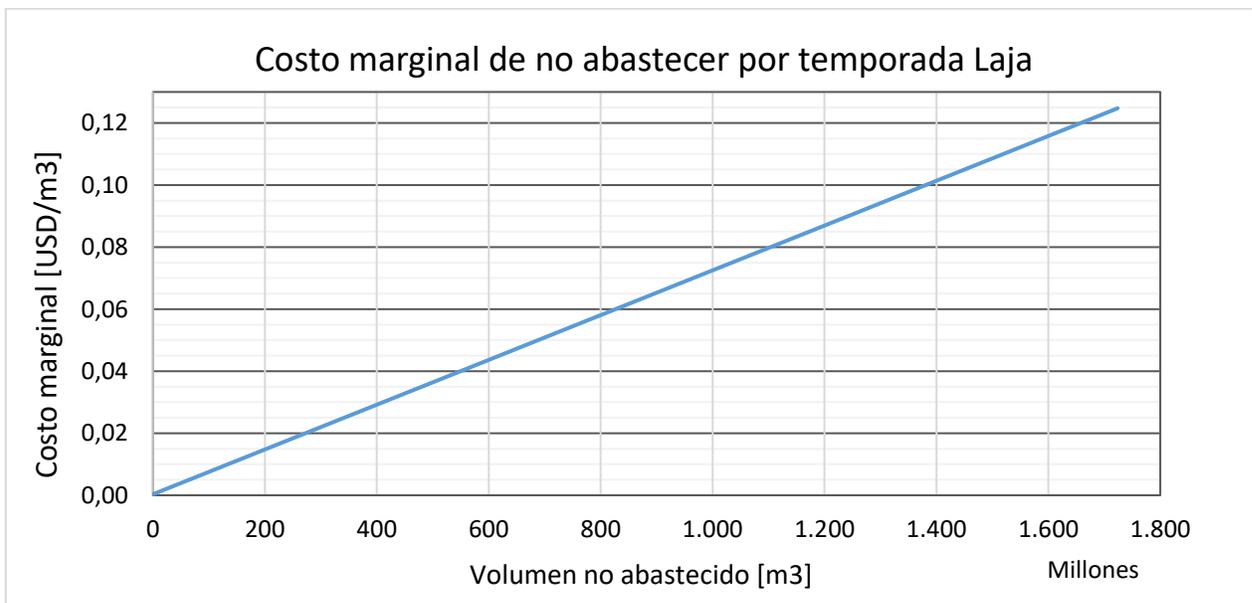


Figura 4-23: Costo marginal de volumen no abastecido en Laja.

Con los costos marginales se genera la función de penalización (Figura 4-24), la que penalizará cada m^3 no entregado, para intervalos de 5% de caudal. Debido a que para la segregación de curvas mensuales se consideró el supuesto de equimarginalidad, al transformar el problema a porcentaje no abastecido, la curva para cada mes será la misma. Debido a lo anterior, la curva de penalización será única, sin embargo, los caudales mensuales sobre los cuales se aplica serán distintos.

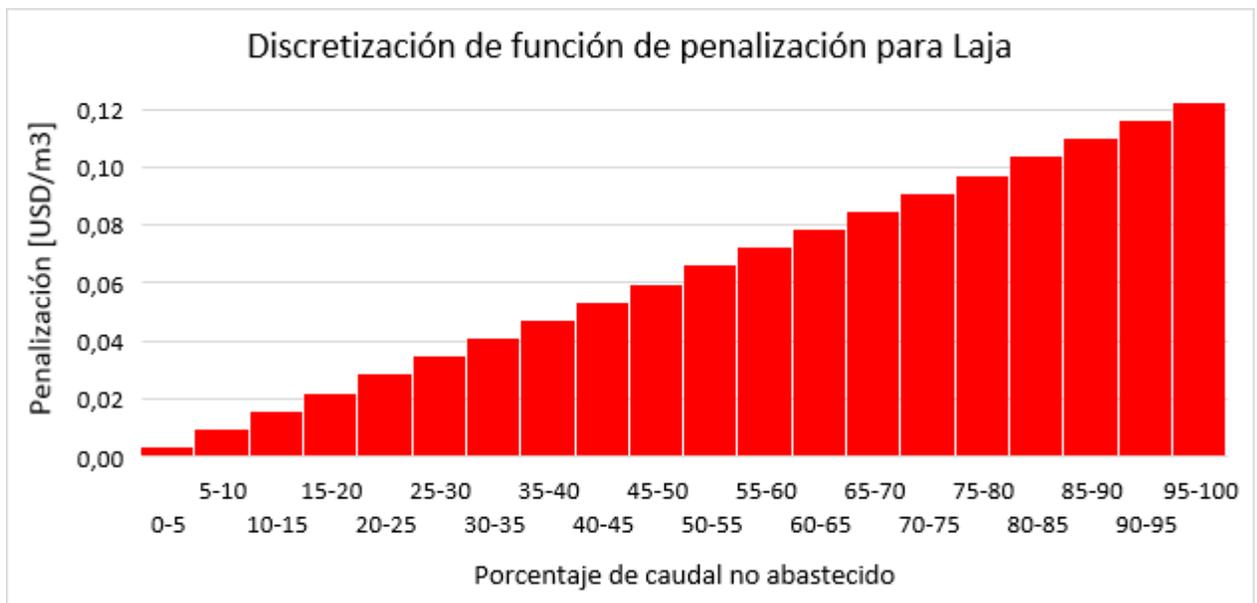


Figura 4-24: Discretización de función de penalización para Laja.

5 RESULTADOS

Los parámetros a analizar serán las entregas de riego, volúmenes de embalses, generación de energía eléctrica, evolución de los costos marginales y el análisis de los costos de generación y riego.

5.1 Entregas de riego

En esta sección, se presentarán los resultados referentes a las entregas de riego asociadas a la implementación de las penalizaciones en la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), comparadas con las entregas relacionadas a los respectivos convenios (Figura 5-1 y Figura 5-3).

Debido a que al implementar las penalizaciones de riego no abastecido este compite precio a precio con el valor de la energía, resulta interesante observar también la evolución de los costos marginales (valor esperado) de la energía en las barras Ancoa y Charrúa (Figura 5-2 y Figura 5-4).

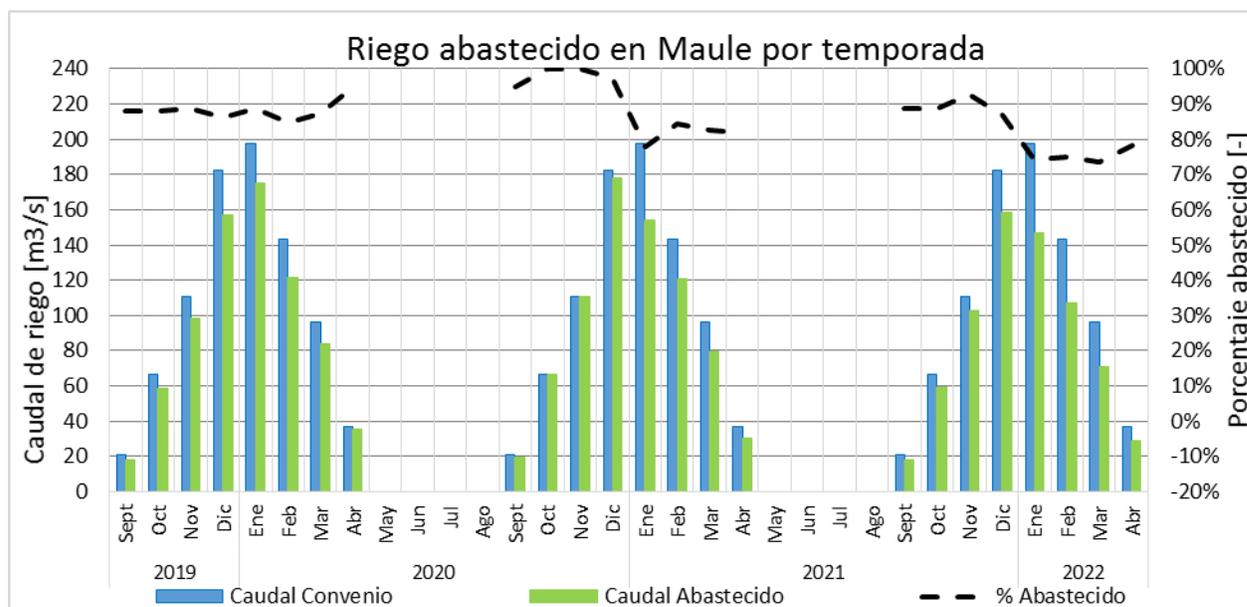


Figura 5-1: Riego abastecido en Maule.

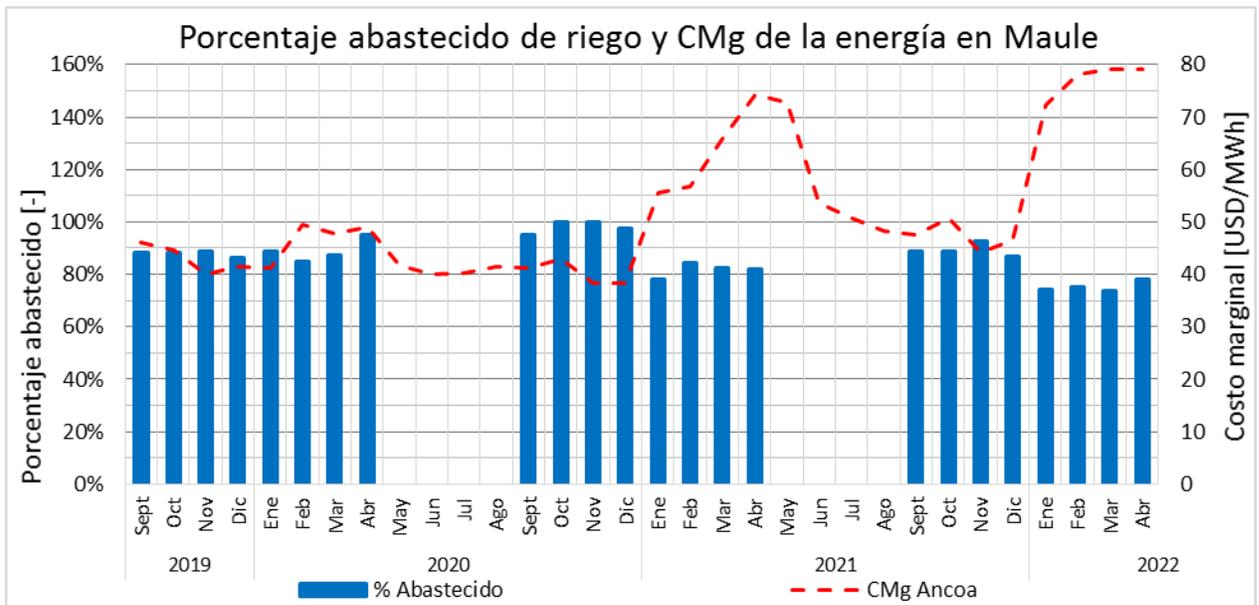


Figura 5-2: Porcentaje abastecido de riego y costos marginales en Maule.

Se puede observar que el riego abastecido está directamente relacionado con los precios de la energía. Cuando los precios de la energía en Maule se encuentran entre los 40 y 50 dólares por MWh, el abastecimiento supera el 80%, sin embargo, a partir de la segunda temporada evaluada, los precios aumentan entre enero y abril por sobre los 55 dólares por MWh, lo que produce una disminución en la entrega de agua para riego a cerca del 75% abastecido.

De la Figura 4-10 se desprende que resignar un 25% del riego por temporada no disminuye considerablemente el beneficio percibido en la cuenca. De hecho, el beneficio obtenido con un 75% de riego abastecido equivale a un 93,7% del total de beneficio que se percibiría en caso de abastecer un 100% de agua en riego, lo que equivale a una pérdida cercana a 9,2 millones de dólares por temporada.

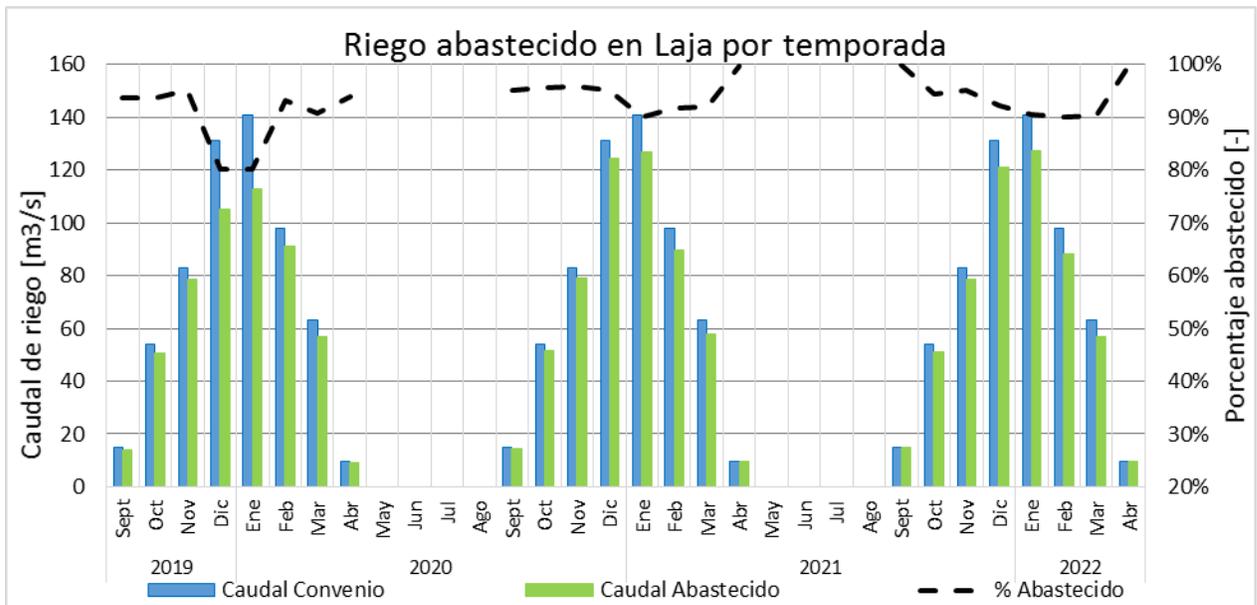


Figura 5-3: Riego abastecido en Laja.

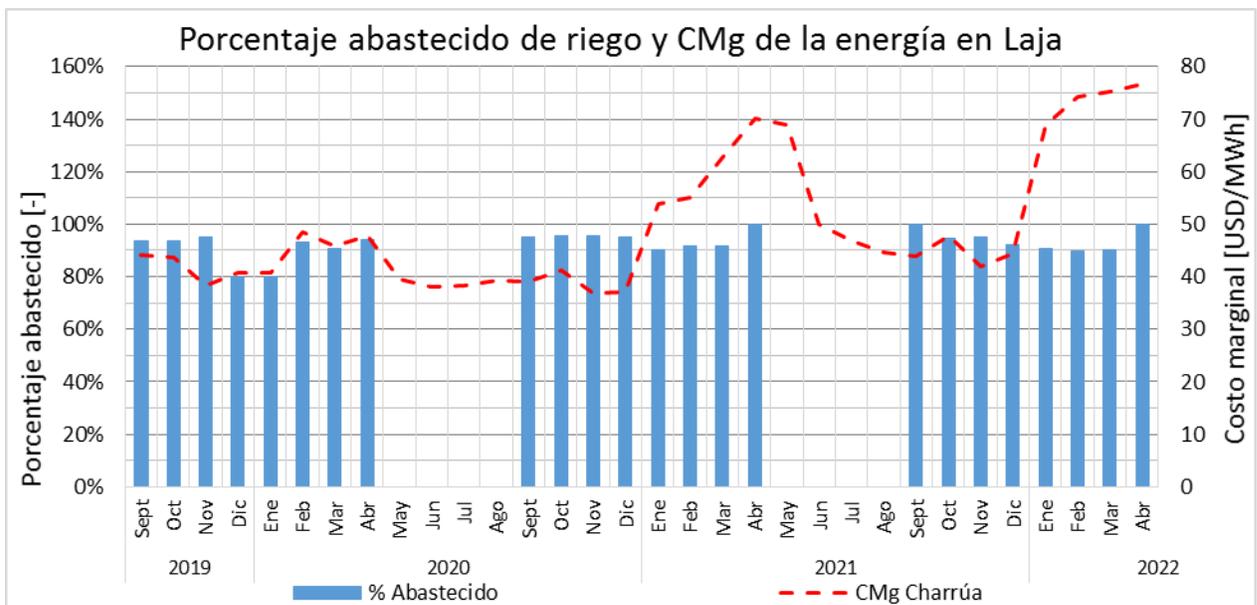


Figura 5-4: Porcentaje abastecido de riego y costos marginales en Laja.

Se puede observar que el riego abastecido en Laja no está fuertemente relacionado con los precios de la energía. El abastecimiento de riego en Laja supera el 90% prácticamente en todo momento, sin embargo, en la primera temporada se observa un déficit cercano al 20% en diciembre y enero, lo cual puede deberse a que los afluentes correspondan a una hidrología seca y que, por consiguiente, el embalse acumula agua durante ese periodo. Cabe señalar que las extracciones de riego en Laja se encuentran aguas abajo de las principales centrales de la cuenca, lo cual disminuye la competencia entre hidroelectricidad y riego, así, puede considerarse un sistema con mayor flexibilidad en relación al precio de la energía.

De la Figura 4-22 se desprende que resignar un 20% del riego por temporada no disminuye considerablemente el beneficio percibido en la cuenca. De hecho, el beneficio obtenido con un 80% de riego abastecido equivale a un 95,8% del total de beneficio que se percibiría en caso de abastecer un 100% de agua en riego. Por otro lado, como el valor más representativo corresponde a abastecer un 90% de riego, se debe señalar que éste equivale a un 98,8% del máximo beneficio que podría percibir Laja, lo que equivale a una pérdida cercana a 1,3 millones de dólares por temporada.

5.2 Volumen y caudal entregado por embalses

En esta sección, se presentarán los resultados referentes a la variación de volumen experimentado por los embalses presentes en Maule y Biobío, así como las entregas realizadas por las lagunas del Maule y Laja.

En la Figura 5-5 y Figura 5-6, se presenta los volúmenes esperados en las lagunas del Maule y Laja, entre la situación con convenio y penalizaciones.

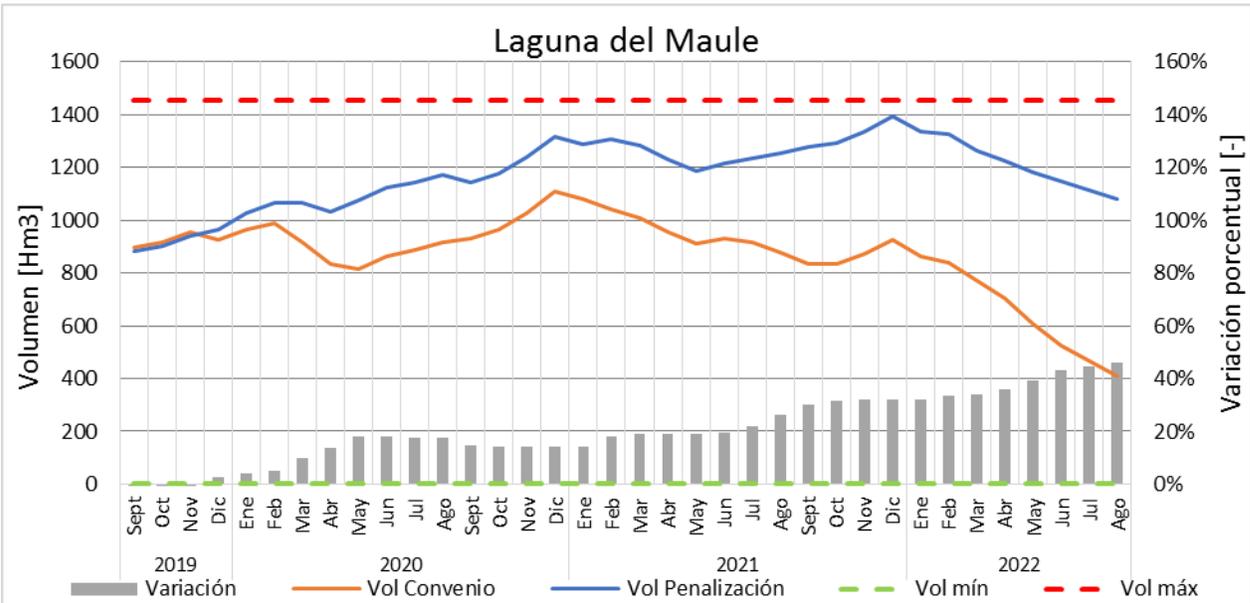


Figura 5-5: Valor esperado de volumen Laguna del Maule.

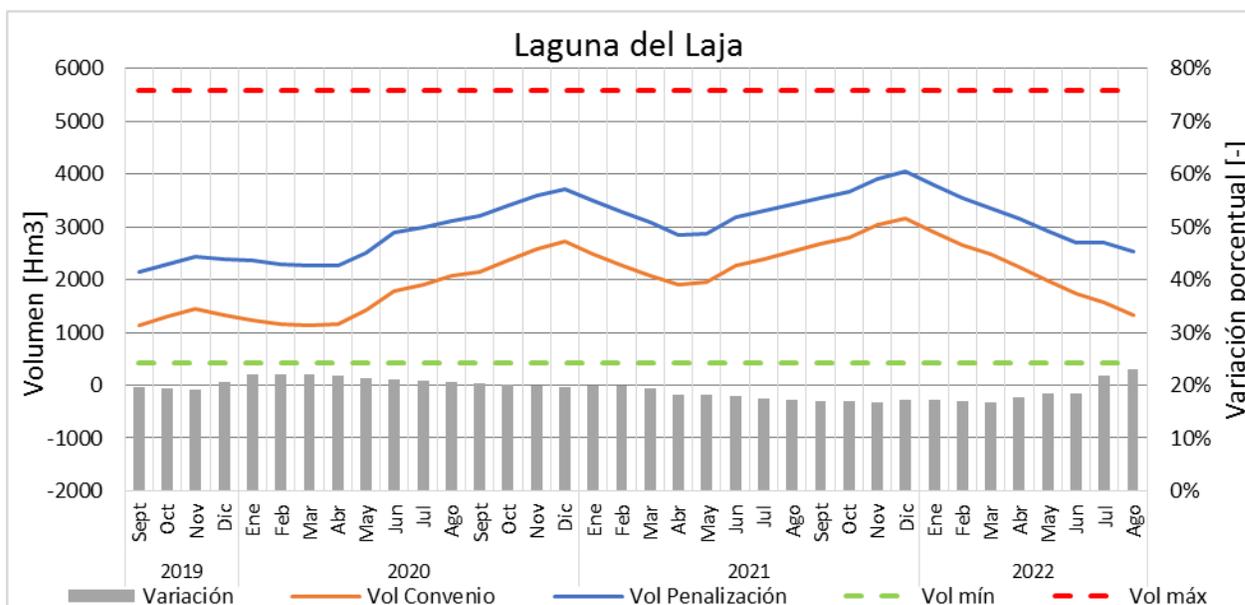


Figura 5-6: Valor esperado de volumen Laguna del Laja.

Se puede observar que los niveles obtenidos aplicando las penalizaciones son mayores, esto debido a que la incorporación de ellas otorga mayor flexibilidad a la operación del sistema, dado que las entregas ligadas al riego ya no son restricciones fuertes, es decir, parte del caudal que antes era entregado para riego ahora es almacenado, otorgándose según el valor económico que tenga en relación al precio de la energía, es decir, que tan competitivo puede ser el riego en comparación a la hidroelectricidad.

En la Figura 5-7 y Figura 5-8, se presentan los caudales entregados esperados en las lagunas del Maule y Laja, entre la situación con convenio y penalizaciones.

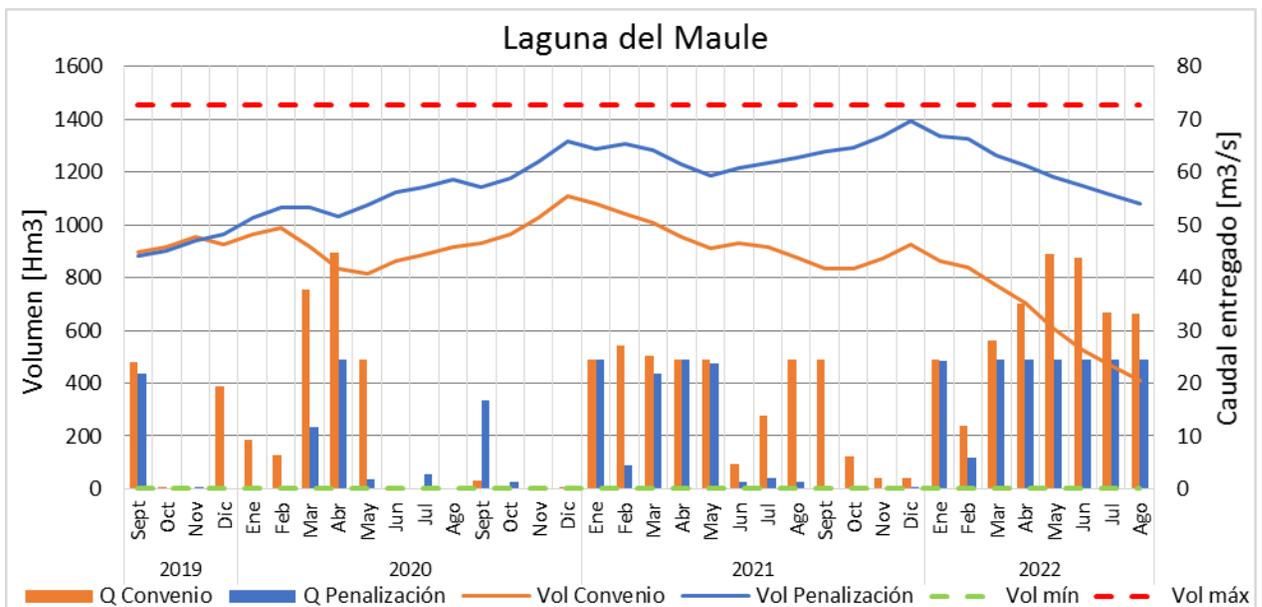


Figura 5-7: Caudal entregado por la Laguna del Maule.

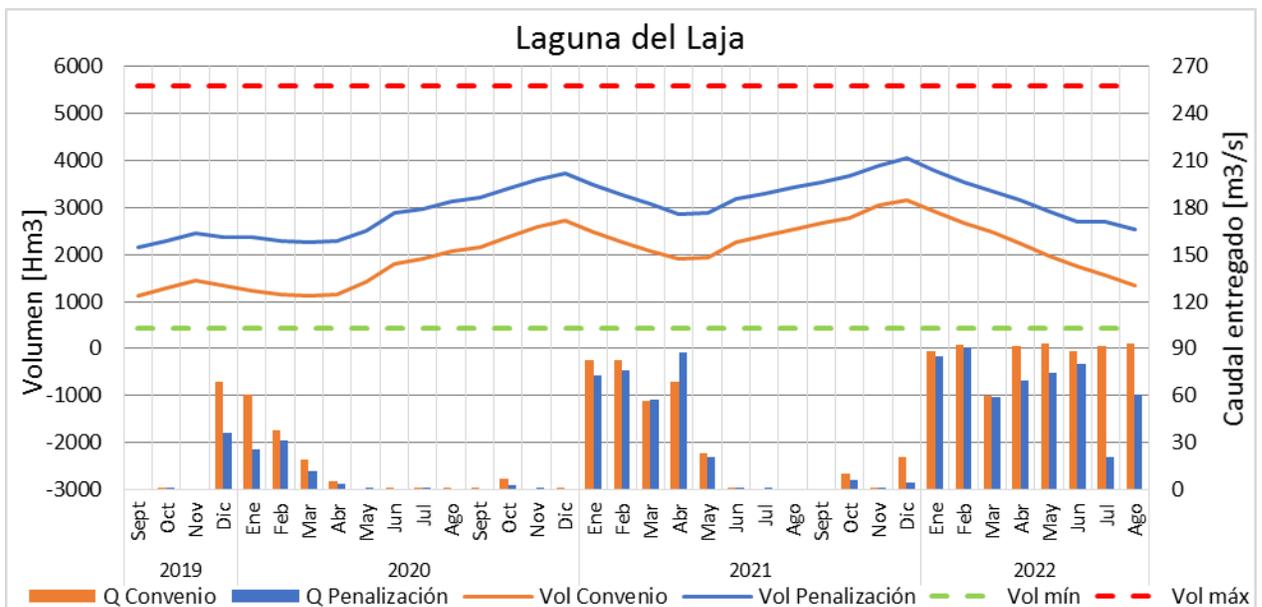


Figura 5-8: Caudal entregado por la Laguna del Laja.

Se puede observar que, en términos generales, los caudales entregados por ambas lagunas disminuyen en relación a la situación con convenio. Esto va de la mano con los mayores niveles observados en ambos embalses. Por otro lado, cabe señalar que los aportes de los embalses Maule y Laja al abastecimiento de riego se produce en mayor medida a partir de enero, debido a que los aportes de deshielos en los afluentes van a la baja, siendo los demás afluentes y aportes de otros embalses (Invernada, Melado, Colbún) los que suplen de agua al riego entre septiembre y diciembre.

Se puede apreciar que los caudales entregados son casi despreciables durante los meses de invierno, lo que no se condice con el conflicto estacional descrito en el Capítulo 2. Esto se debe a que en ambas cuencas existe una gran cantidad de afluentes independientes a los embalses, los cuales surten de agua a regantes y centrales, independizándose de la operación de los embalses.

La evolución particular de los demás embalses en Maule y Biobío puede ser encontrada en el Anexo L y Anexo M. En la Figura 5-9 y Figura 5-10, se presenta el resumen del comportamiento de dichos embalses.

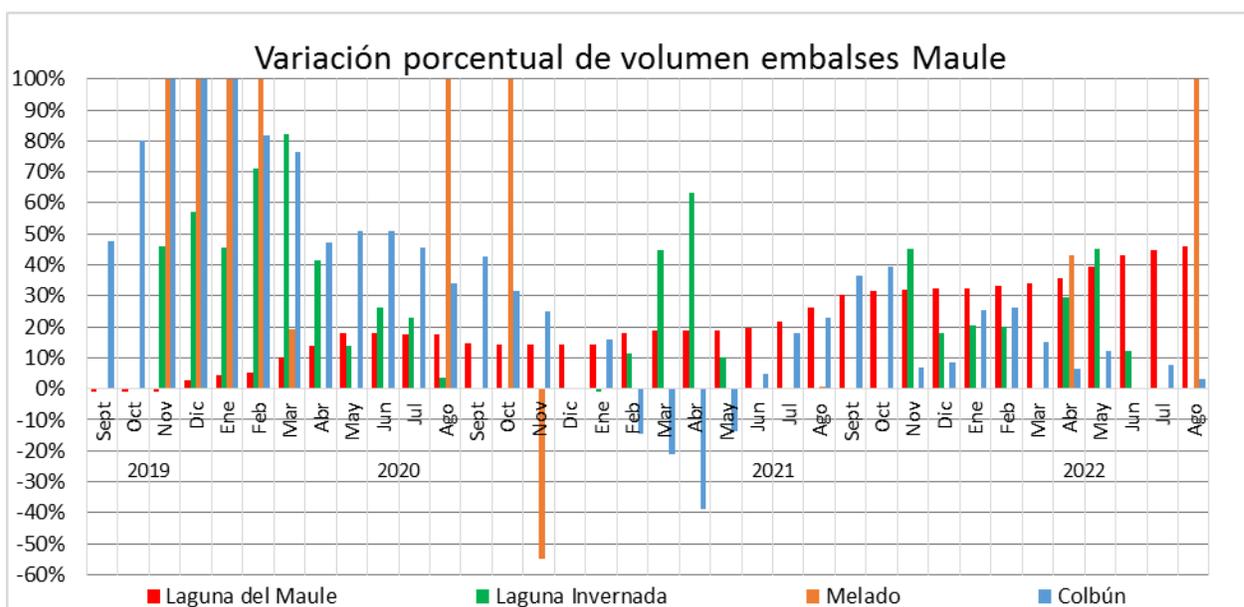


Figura 5-9: Variación de volumen de embalses en cuenca del Maule.

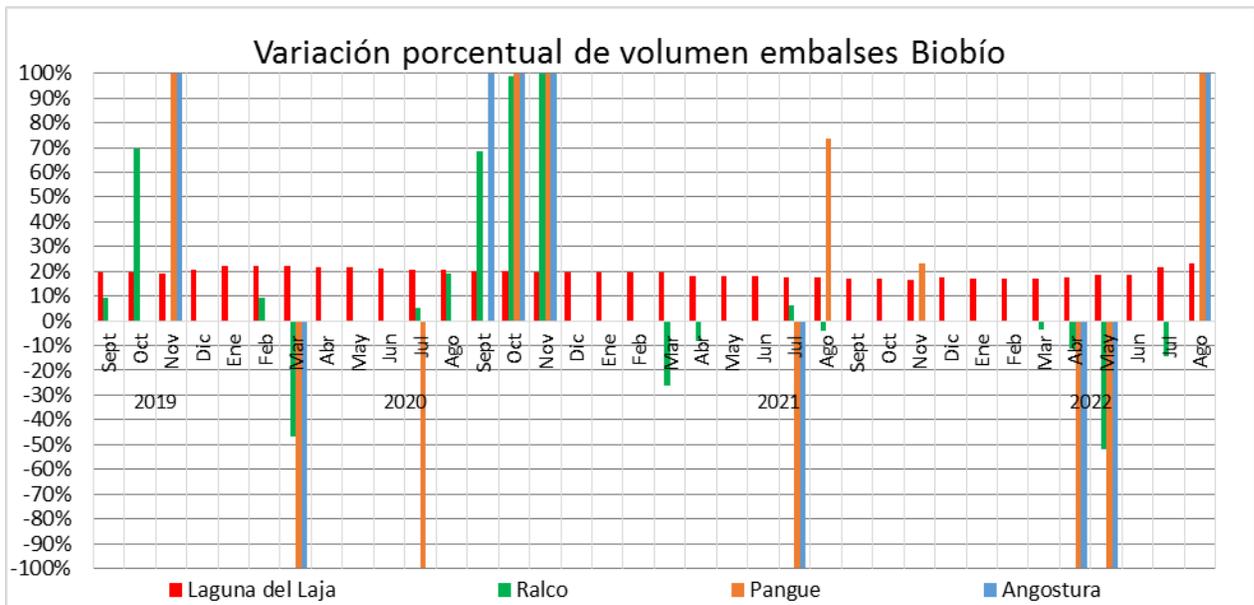


Figura 5-10: Variación de volumen de embalses en cuenca del Biobío.

Se puede observar que la tendencia de los embalses en Maule es a mantener mayores volúmenes almacenados, esto en parte a que todos los embalses analizados en Maule se encuentran en la misma cuenca, por lo que la implementación de las penalizaciones afecta a todos los embalses en cuestión.

Por otro lado, en Biobío no se observa una tendencia clara, en parte porque en la cuenca del Laja sólo está presente el embalse del mismo nombre y el resto se encuentra distribuido en la cuenca del Alto Biobío, por lo que el impacto de las penalizaciones no es directo para Ralco, Pangué y Angostura.

5.3 Generación eléctrica

En esta sección, se presentan los resultados referentes a la variación en la generación eléctrica en las cuencas de interés, comparando la situación con convenios y con penalizaciones.

En la Tabla 5-1 se presenta la generación anual promedio en la situación con convenio y con penalizaciones.

Tabla 5-1: Resumen generación anual.

Generación promedio anual [GWh]			
Fuente	Convenio	Penalización	Diferencia
Térmica	40.061	40.026	-35

Hidráulica	35.692	35.726	34
Eólica	3.569	3.571	2
Solar	8.653	8.653	0

Se puede observar que la situación con penalización permite un leve aumento en la generación de energía hidráulica, la cual, entre otros beneficios, facilita una mayor penetración de energías fluctuantes como la eólica y la solar en el largo plazo (lo que se ve reflejado en la generación eólica) y reduce levemente la generación proveniente de fuentes térmicas, lo que disminuye las emisiones de CO_2 y los precios de la energía.

Obtener mayores niveles en los embalses y generar más hidroelectricidad podría parecer contradictorio, sin embargo, cabe destacar que parte de los requerimientos de riego es abastecida por afluentes presentes en las cuencas, por lo que parte del caudal proveniente de los afluentes es utilizado en generación, no abasteciendo de riego a ciertas extracciones. En relación a la operación de los embalses, también se puede dar el caso de almacenar parte del riego no servido y entregar otra para generación.

Por otro lado, resulta interesante analizar la generación en las barras asociadas a Maule y Laja, las que corresponden a Ancoa (Figura 5-11, Figura 5-12) y Charrúa (Figura 5-13, Figura 5-14). Los resultados presentados consideran generación hidráulica y térmica.

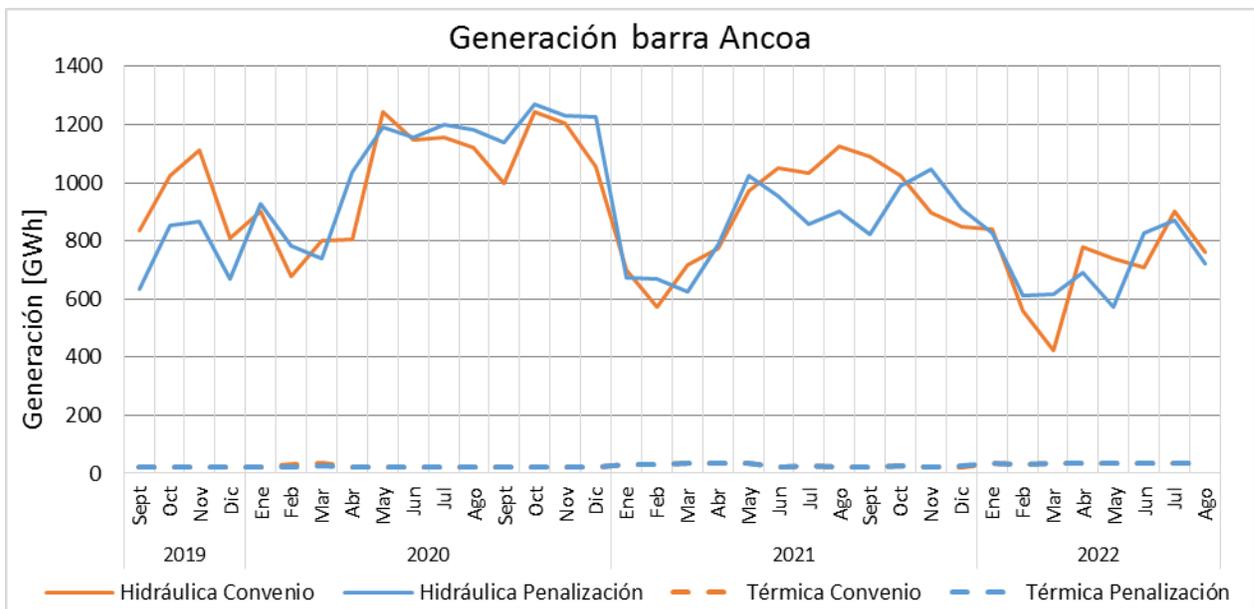


Figura 5-11: Generación de energía en la barra Ancoa.

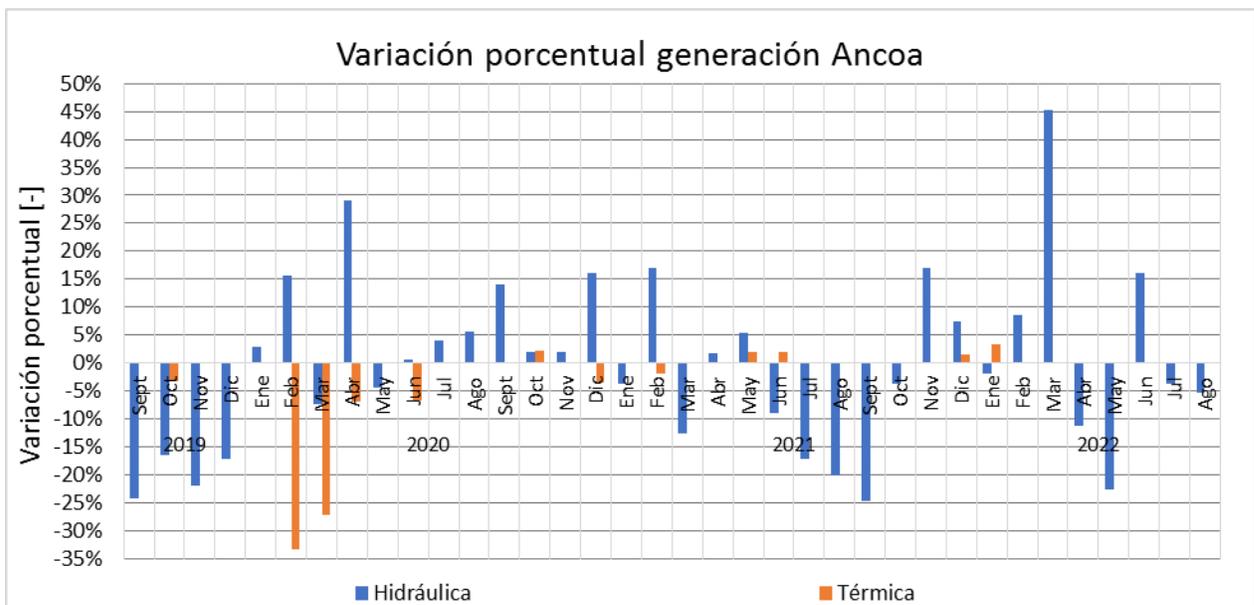


Figura 5-12: Variación porcentual de la generación en la barra Ancoa.

Se observa de la Figura 5-11 que en Ancoa la generación térmica es varios órdenes de magnitud menor en comparación a la generación por fuentes hidráulicas, lo que lleva a concluir que Maule es una región que produce principalmente energía hidráulica. Por otro lado, no se aprecia un patrón claro en el comportamiento de la generación, sin embargo, existe una mayor generación en periodos de tiempo menores.

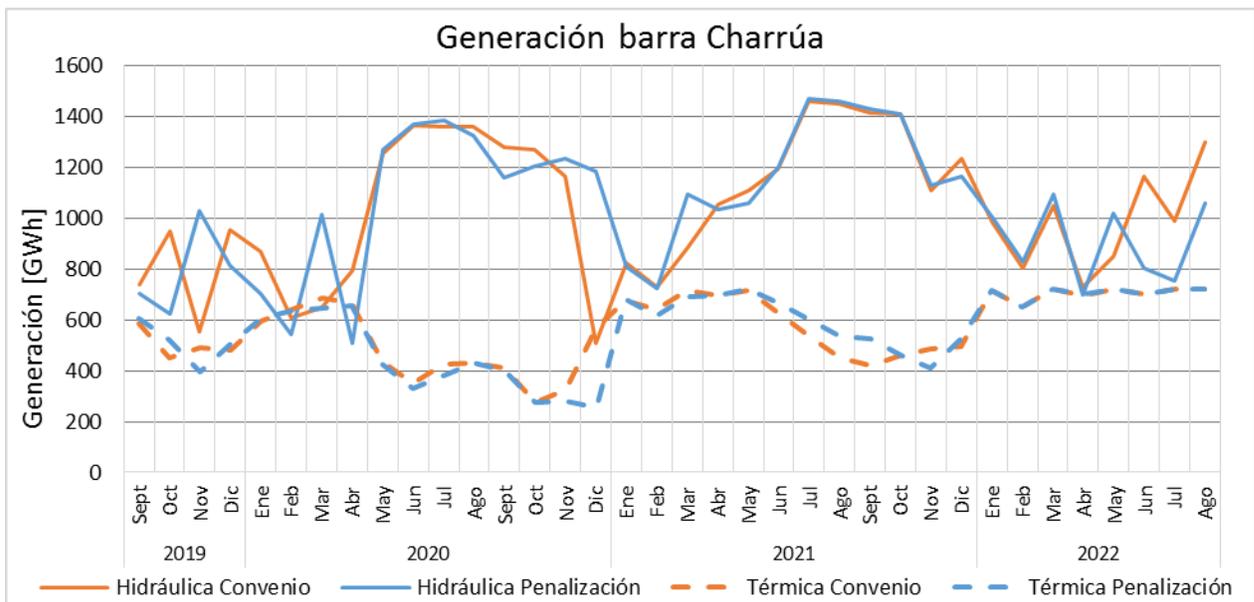


Figura 5-13: Generación de energía en la barra Charrúa.

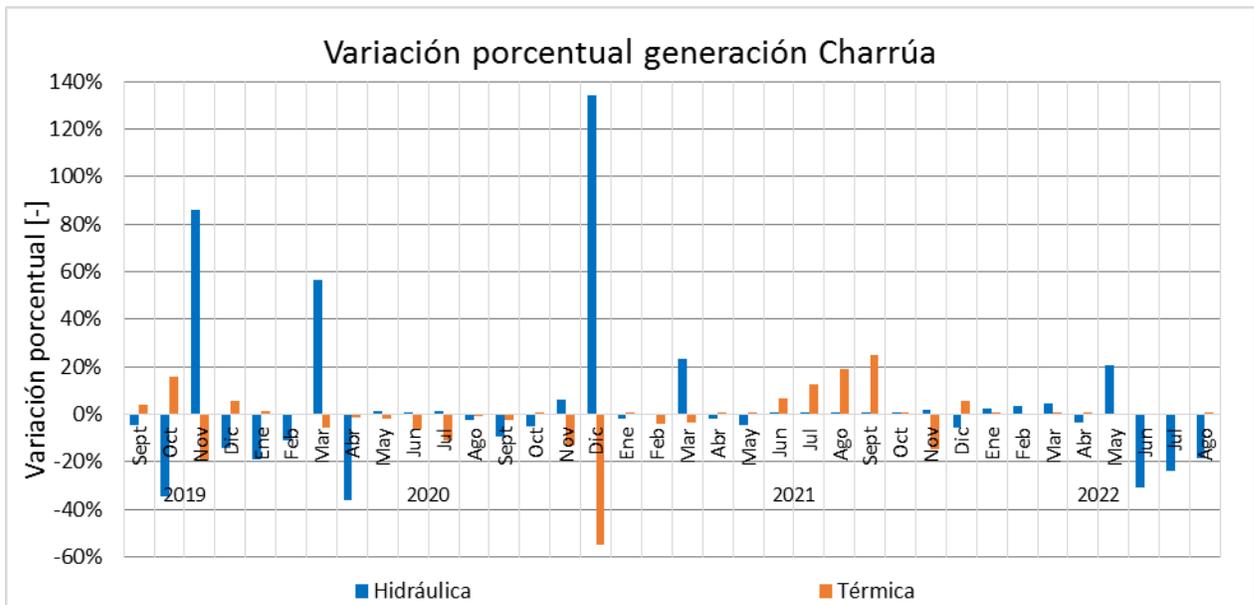


Figura 5-14: Variación porcentual de la generación en la barra Charrúa.

Se observa de la Figura 5-13 que en Charrúa la generación térmica es menor que la generación por fuentes hidráulicas, sin embargo, son comparables, lo que lleva a concluir que Biobío posee una matriz energética hidrotérmica. Por otro lado, se aprecia un aumento en la generación hidráulica y una disminución de la generación térmica la mayor cantidad del tiempo en la situación con penalización.

Dado que en el caso de Charrúa la generación hidráulica se divide entre las cuencas del Laja y la de Alto Biobío, se procede a analizar la variación porcentual de la generación en ambas cuencas, reflejado en la Figura 5-15.

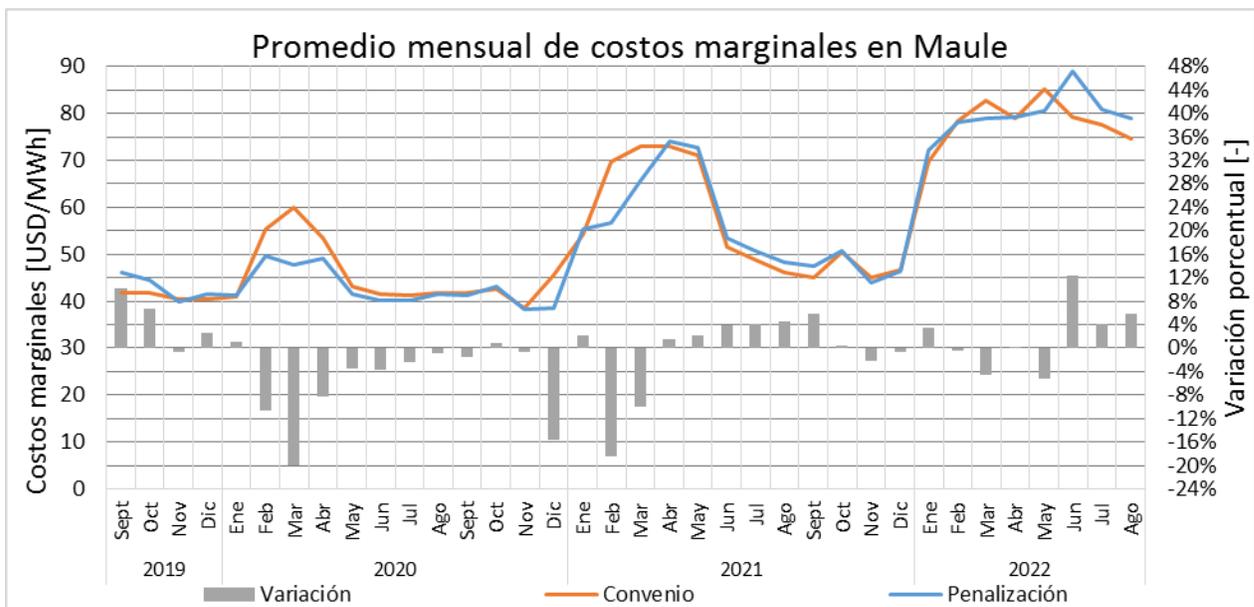


Figura 5-16: Costos marginales en barra Ancoa.

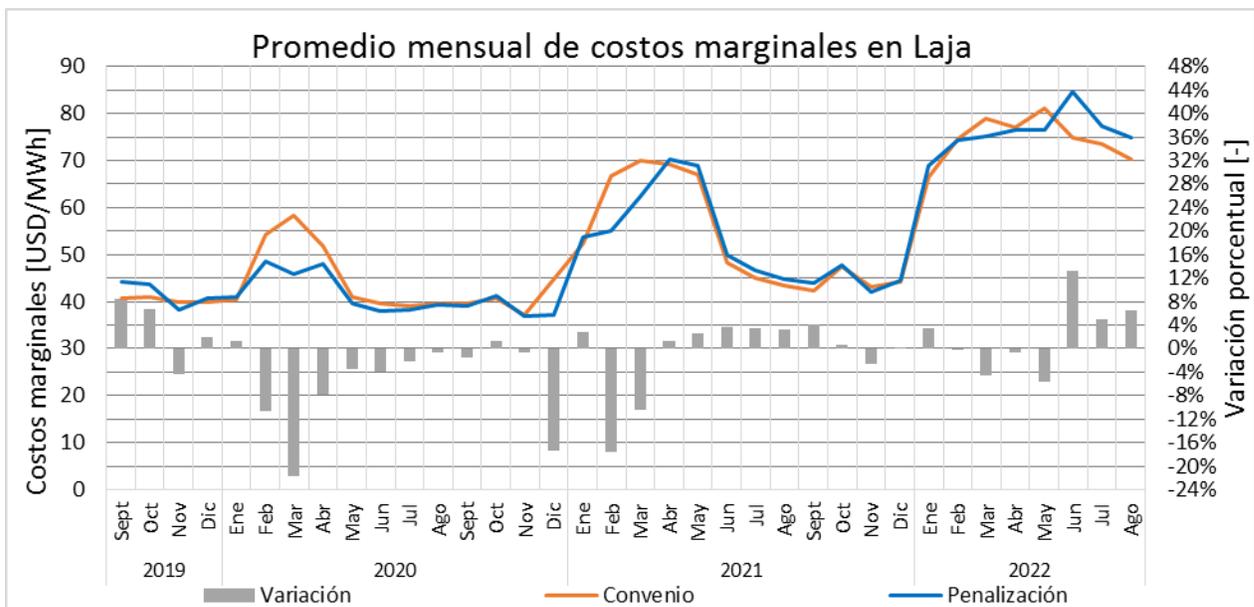


Figura 5-17: Costos marginales en barra Charrúa.

Se observa que los costos marginales son notoriamente menores en la situación con penalización, lo que reafirma la flexibilidad que le añade a la operación del sistema.

5.5 Costos de generación y de riego

En la Tabla 5-2 se presenta los costos de generación promedio, comparando la situación con convenio y penalizaciones.

Tabla 5-2: Comparación de costos de generación.

	Unidad	Convenio	Penalización	Diferencia
Costo promedio anual	MMUSD	5.032,5	5.006	-26,5
Costo promedio de generación	USD/MWh	19,07	18,97	-0,1

De la Tabla 5-2 se puede concluir que la implementación de penalizaciones produce una disminución promedio de 27 millones de Dólares por año (valor presente) en los costos de generación eléctrica.

Por otro lado, en la Tabla 5-3 se muestran los costos asociados al riego no servido por temporada en Maule y Laja en la situación con penalizaciones.

Tabla 5-3: Costos asociados al riego no servido.

	Maule	Laja	Costo Total [MMUSD]
% no abastecido	25%	10%	-
Costo [MMUSD]	9,2	1,3	10,5

De la Tabla 5-3 se puede concluir que la implementación de penalizaciones produce un costo asociado al no abastecimiento de riego de 10,5 millones de Dólares por temporada.

Se puede apreciar que la implementación de penalizaciones por riego no servido en la operación del Sistema Eléctrico Nacional propicia un ahorro en costos de generación cercano a 2,5 veces el costo por riego no servido en Maule y Laja.

Resulta de interés analizar los tradeoffs producidos entre el riego y la generación eléctrica. Dichos tradeoffs se pueden desagregar en las cuencas de estudio (Tabla 5-4 y Tabla 5-5) o en el sistema completo (Tabla 5-6).

Tabla 5-4: Costos marginales promedio de riego y generación en Maule.

	Convenio	Penalización
Barra Ancoa	CMg [USD/MWh]	CMg [USD/MWh]
	56,58	55,53
Riego	CMg [USD/m3/s]	CMg [USD/m3/s]
	0	89.230

Tabla 5-5: Costos marginales promedio de riego y generación en Laja.

	Convenio	Penalización
Barra Charrúa	CMg [USD/MWh]	CMg [USD/MWh]
	53,90	52,93
Riego	CMg [USD/m3/s]	CMg [USD/m3/s]
	0	33.366

Tabla 5-6: Costos totales promedio de riego y generación.

Costos Totales [MMUSD]			
Actividad	Convenio	Penalización	Diferencia
Generación	5.032,5	5.006,0	-26,5
Riego	0,0	10,5	10,5
		Diferencia Neta	-16,0

En la Figura 5-18 se representa como se relacionan los costos marginales asociados al riego en las cuencas de Maule y Laja con los costos marginales asociados a las barras Ancoa y Charrúa, cuando la asignación del agua se realiza mediante convenios y penalizaciones. Se puede observar que en ambas barras se produce prácticamente el mismo descenso en sus costos marginales de generación para la asignación mediante penalizaciones, sin embargo, la variación en los marginales del riego para Maule es casi el triple que en Laja, lo cual se condice con que Maule resulta ser una cuenca donde el riego adquiere un valor económico superior a Laja.

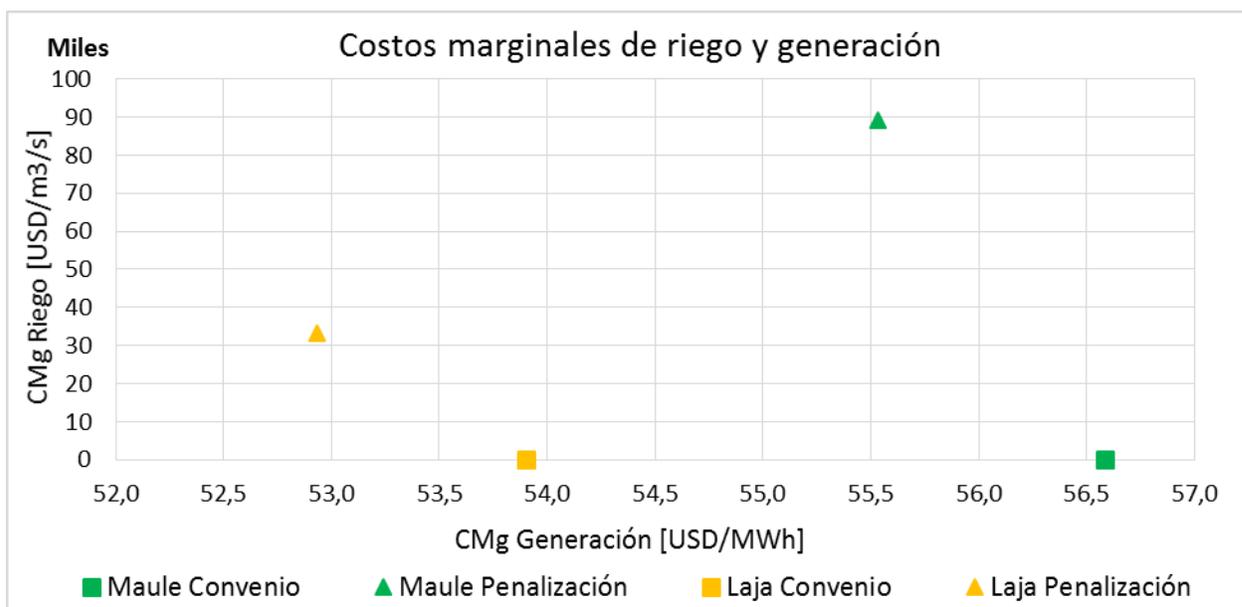


Figura 5-18: Costos marginales promedio de riego y generación en Maule y Laja.

En la Figura 5-19 se representa como se relacionan los costos totales asociados al riego no servido en las cuencas de Maule y Laja con los costos de generación asociados al Sistema Eléctrico Nacional, cuando la asignación del agua se realiza mediante convenios y penalizaciones. Se puede observar que la disminución en los costos de generación supera con creces al aumento de los costos asociado al riego no servido en las cuencas Maule y Laja, lo cual confirma que la asignación mediante penalizaciones es óptima en relación a la asignación con convenios.

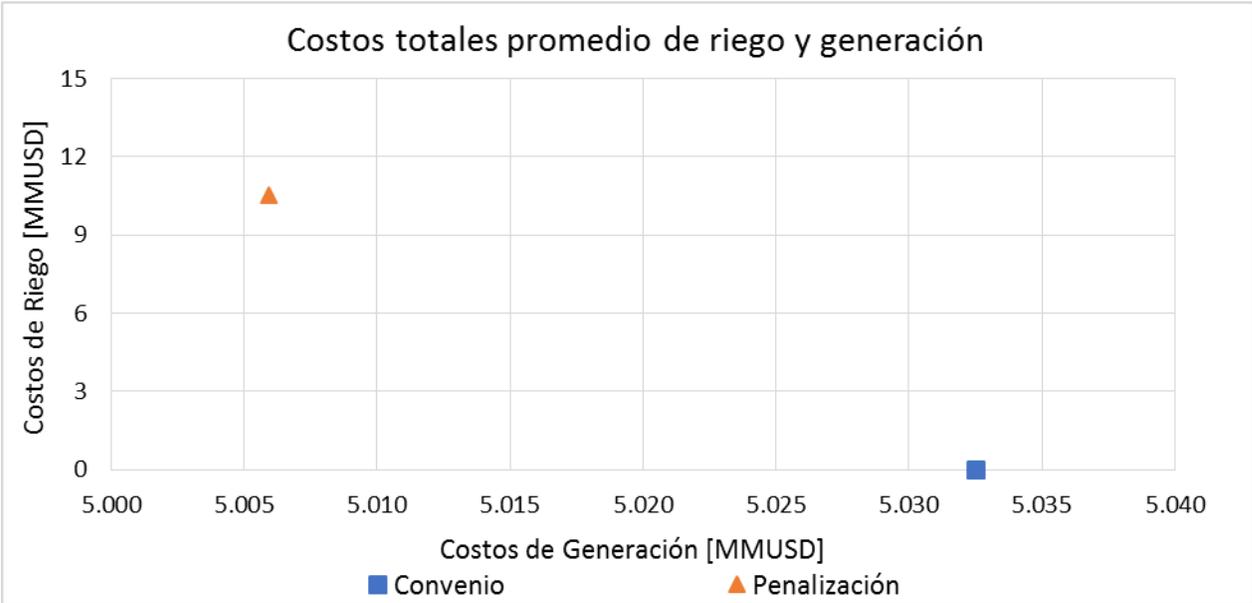


Figura 5-19: Costos totales promedio de riego y generación.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo presenta una metodología para caracterizar curvas económicas asociadas al riego de cualquier zona a estudiar, para posteriormente incorporar dicha información al tomador de decisión eléctrico, asignando el agua a las distintas actividades productivas minimizando los costos futuros del sistema completo. Dicha metodología propone una nueva política de uso del agua embalsada en Maule y Laja, siendo una alternativa a la situación actual, donde el embalse es administrado según los respectivos convenios de riego.

La representación de las curvas de demanda de riego se realizó mediante el modelo *Positive Mathematical Programming*, el cual se calibra mediante datos observados de uso de tierra y agua, por consiguiente, contar con información precisa, confiable y actualizada permitirá lograr los mejores resultados. En ese sentido, las funciones de costo de déficit de agua de riego fueron obtenidas con la información más precisa y actualizada posible, logrando valores del orden a los presentados en los Informes de Economía Regional 2016, desarrollados por la ODEPA, respaldando así los resultados de este trabajo.

La implementación de las curvas de demanda de riego en el sistema eléctrico representado a través del software AMEBA se logró de manera satisfactoria, debido a que su interfaz cuenta con la posibilidad de penalizar el riego no servido a las extracciones definidas por el usuario.

En relación a la caracterización de los cultivos, destaca que una de las principales diferencias entre la cuenca del Maule y Laja es la alta presencia de viñedos en Maule y la gran predominancia de cereales en Laja. Por otro lado, con respecto a la representación económica del riego, se puede concluir en base a los resultados que la cuenca del Maule resulta de mayor valor económico que Laja, esto se debe, en parte a la mayor superficie de terrenos para sembrar y un convenio de riego que garantiza una mayor disponibilidad de recurso hídrico para desarrollar dicha actividad, siendo este último un insumo indispensable.

En las regiones consideradas en este trabajo, Maule y Biobío, se produce cerca de 3,5 veces más energía de la que ellas demandan, lo cual ratifica su importancia en la operación del sistema eléctrico chileno para suplir la demanda de las demás regiones del país.

Del análisis del abastecimiento de riego y de la evolución de los precios de la energía, se puede concluir que Maule es más sensible al aumento del valor de la energía, esto en parte a que la competencia entre riego e hidroelectricidad es mayor dada la ubicación de las extracciones de riego. Por el contrario, Laja resulta responder de manera más flexible, teniendo menor impacto el precio de la energía sobre el abastecimiento de riego, esto se

debe principalmente a que la ubicación de las extracciones de riego se encuentran mayoritariamente aguas abajo de las principales centrales hidroeléctricas de la cuenca, disminuyendo su competencia por el recurso hídrico.

Cabe destacar que la aplicación de penalizaciones indujo mayores niveles almacenados en los embalses presentes en las cuencas de estudio. Por otro lado, se observan cambios en la operación de los embalses de Alto Biobío, relacionados a la cuenca del Laja debido a que comparten la barra a la cual inyectan su energía (Charrúa). Dichos cambios en la operación de los embalses se deben a que las penalizaciones relajan la restricción impuesta por el convenio.

En cuanto a la generación eléctrica, se aprecia que, con la implementación de las penalizaciones, las fuentes hidráulicas aumentan levemente y las térmicas disminuyen su colocación. También se debe destacar que, el esquema de generación eléctrica en la cuenca de Alto Biobío (conectada a Laja a través de la barra Charrúa) cambia, generando más en momentos donde antes le era infactible. En parte, este cambio se debe a que las penalizaciones relajan la restricción de operación impuesta en Laja, permitiendo que Alto Biobío pueda generar con mayor libertad.

Con lo expuesto anteriormente, se puede concluir que con la implementación de las penalizaciones el sistema gana flexibilidad en su operación. Esto debido a que, al relajar la restricción dada por el convenio, los embalses y las centrales tienen mayor libertad para administrar sus volúmenes almacenados y generar en momentos donde antes les era infactible.

Con respecto a la evolución de los costos marginales de generación, tanto en Ancoa como en Charrúa se observa una tendencia de disminución de precios, lo que se traduce en menores costos totales de generación, logrando precios más bajos de energía.

Se debe mencionar que cuando la asignación del agua se realiza mediante penalizaciones, un 25% de abastecimiento de riego no es servido en Maule y un 10% no es servido en Laja, lo que conlleva un costo de 10,5 millones de Dólares para los regantes, sin embargo, la reducción de los costos de generación es cercano a unos 27 millones de Dólares, en relación a la asignación mediante convenios. Por consiguiente, la implementación de penalizaciones alcanza beneficios económicos en el sistema eléctrico que son mayores a los costos de los regantes.

Como trabajo futuro, se propone seguir avanzando en una mejor caracterización de las curvas de demanda de riego, expandiendo el análisis a un mayor número de cultivos, añadiendo información sobre sus demandas hídricas reales y una mejor estimación de los costos de producción de los distintos cultivos presentes en la cuenca a analizar, además de incorporar al análisis la aleatoriedad de los precios. Por otro lado, los

resultados obtenidos corresponden a un escenario hidrológico promedio, no permitiendo analizar la respuesta del sistema eléctrico ante eventos hidrológicos extremos, lo cual podría abordarse en algún trabajo de título posterior.

A modo de conclusión final, de implementarse el método de asignación aquí presentado, se propone avanzar en el desarrollo de mecanismos de compensación a los regantes, considerando que el beneficio relacionado al ahorro en costos de generación supera al costo relacionado al riego no servido. Lo anterior permitiría disminuir las emisiones de CO₂, disminuir los costos de generación y facilitar la penetración de energías como la eólica y la solar.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alberta Environment. (2006). *Approved Water Management Plan for the South Saskatchewan River Basin (Alberta)*. Environment and Sustainable Resource Development - Government of Alberta.
- Antipova, E., Zyryanov, A., McKinney, D., & Savitsky, A. (2002). Optimization of Syr Darya Water and Energy Uses. *Water International*, 27(4), 504–516. <http://doi.org/10.1080/02508060308691694>
- Bassi, V. (2016). *EFFECTO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN CONVENCIONALES*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico. Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile.
- Biglarbeigi, P., Giuliani, M., & Castelletti, A. (2014). Many-objective direct policy search in the Dez and Karoun multireservoir system, Iran. *World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders*, 1050–1059.
- Birge, J., & Louveaux, F. (1997). *Introduction to Stochastic Programming*. (P. Glynn & S. Robinson, Eds.). Springer.
- Bolvarán, C. (2010). *Análisis operacional del proyecto hidroaysén en contraste con una alta entrada de generación en base a ernc en el sic*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico. Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile.
- Branche, E. (2015). Multipurpose water uses of hydropower reservoirs: the SHARE concept. *World Water Council*, 38. Retrieved from <https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/Multi-purpose water uses of hydropower reservoirs.pdf>
- Brealey, R., & Myers, S. (2003). *Principles of corporate finance* (7th ed.). The McGraw-Hill Companies.
- Centro de Energía, Matus, M., Ayaviri, J., Pereira, E., & Puschel, S. (2013). Mejoras software de programación de Largo Plazo – Bloques de Demanda. *Preparado Para CDEC-SIC*, 1–101.
- Centro de Energía, Matus, M., Pereira, E., Puschel, S., & Ayaviri, J. (2014). Mejoras software de Programación de Largo Plazo – Convenios de Riego y Gestión de Embalses. *Preparado Para CDEC-SIC*, 1–108.
- Comisión Nacional de Riego. (2011). Mejoramiento del riego de la cuenca del Río Teno, región del Maule.
- Cromarty, W. (1959). An Econometric Model for United States Agriculture. *American Statistical Association*, 54(287), 556–574.
- da Silva, M., Assis, P., de Sousa, R., & da Rocha, W. (2013). ESTIMATION OF COST ALLOCATION COEFFICIENTS AT THE FARM LEVEL USING AN ENTROPY APPROACH. *Journal of Applied Statistics*, 40(9), 20.
- Gonzalez, J., Olivares, M., Medellín-Azuara, J., Moreno, R., & Marques, G. (2016). Multi-Purpose Reservoir Operation: A Tradeoff Analysis between Hydropower Generation and Irrigated Agriculture Using Hydro-Economic Models. *World Environmental and Water Resources Congress 2016*, 241–250.
- Goor, Q., Kelman, R., & Tilmant, A. (2011). Optimal Multipurpose-Multireservoir Operation Model with Variable Productivity of Hydropower Plants. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 258–268. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452)
- Heckeley, T., & Wolf, H. (2003). Estimation of constrained optimisation models for

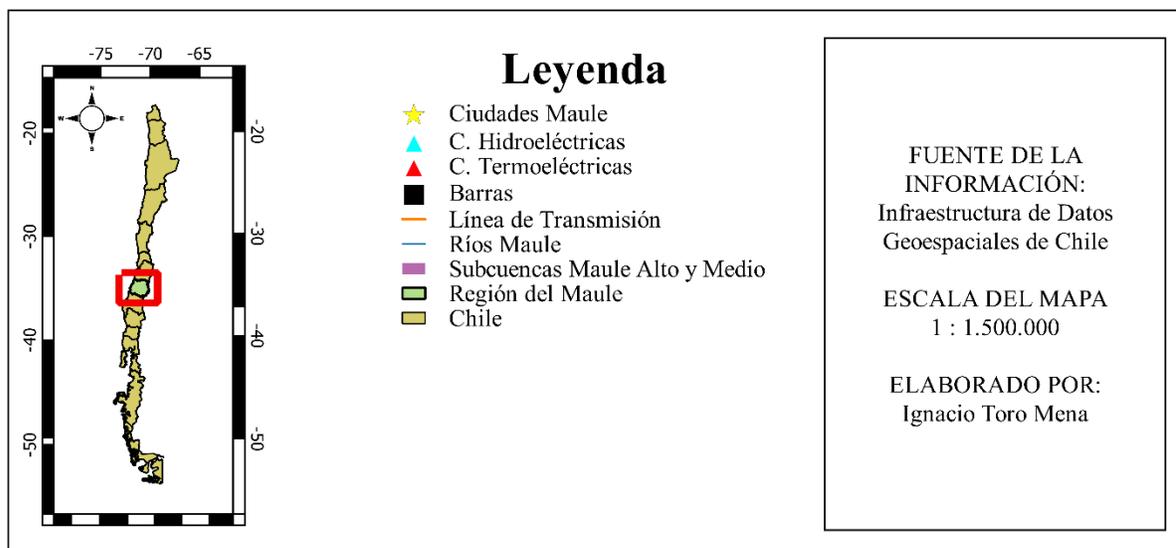
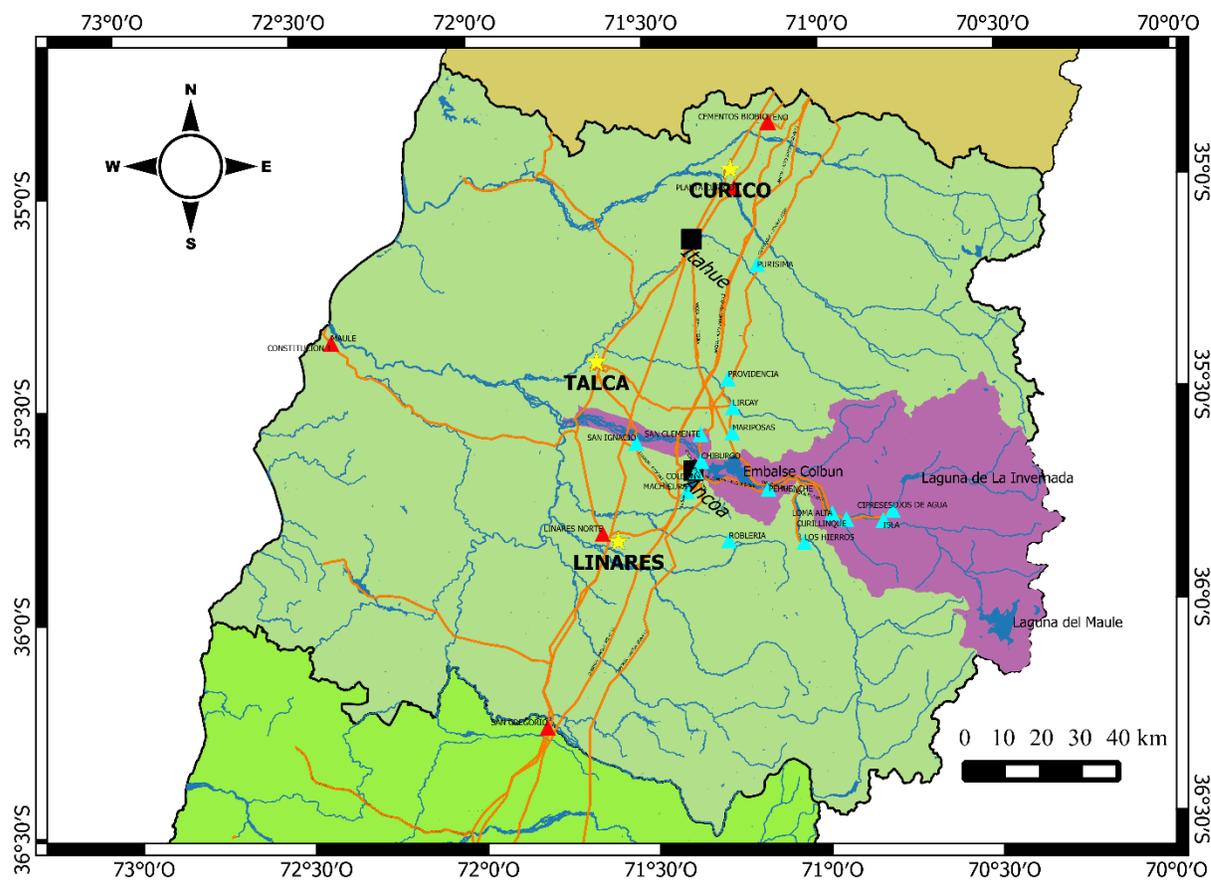
- agricultural supply analysis based on generalised maximum entropy. *European Review of Agricultural Economics*, 30(1), 27–50. <http://doi.org/10.1093/erae/30.1.27>
- Henry de Frahan, B., Buysse, J., Polomé, P., Fernagut, B., Harmignie, O., Lauwers, L., ... Van Meensel, J. (2007). POSITIVE MATHEMATICAL PROGRAMMING FOR AGRICULTURAL AND ENVIRONMENTAL POLICY ANALYSIS: REVIEW AND PRACTICE. In A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal, & R. Epstein (Eds.), *Handbook of Operations Research in Natural Resources* (Vol. 99, pp. 129–154). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-0-387-71815-6>
- Howitt, R. E. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 329–342. <http://doi.org/10.2307/1243543>
- Howitt, R. E. (2005). *Agricultural and Environmental Policy Models: Calibration, Estimation and Optimization*.
- Howitt, R. E., & Msangi, S. (2014). Entropy estimation of disaggregate production functions: An application to northern Mexico. *Entropy*, 16(3), 1349–1364. <http://doi.org/10.3390/e16031349>
- Karamouz, M., Nazif, S., Sherafat, M. A., & Zahmatkesh, Z. (2014). Development of an Optimal Reservoir Operation Scheme Using Extended Evolutionary Computing Algorithms Based on Conflict Resolution Approach: A Case Study. *Water Resources Management*, 28(11), 3539–3554. <http://doi.org/10.1007/s11269-014-0686-z>
- Karamouz, M., Zahraie, B., & Khodatalab, N. (2000). Decision Support System (KD-DSS) for Operation of Karoon and Dez Reservoirs in Iran. *Building Partnerships*, (1986), 1–11.
- Labadie, J. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(April), 93–111. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(93\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93))
- Lance, H. L., & Miller, D. J. L. B. (1998). Estimation of multioutput production functions with incomplete data: a generalized maximum entropy approach. *European Review of Agricultural Economics*, 25(3255), 188–209.
- Liu, J., Hertel, T., & Taheripour, F. (2016). Analyzing Future Water Scarcity in Computable General Equilibrium Models. *Water Economics and Policy*, 20.
- Matus, M., Pereira, E., Puschel, S., & Ayaviri, J. (2014). Mejoras software de Programación de Largo Plazo – Convenios de Riego y Gestión de Embalses. Centro de Energía.
- Medellín-Azuara, J. (2006). Economic-Engineering Analysis of Water Management for Restoring the Colorado River Delta. *University of California at Davis*, 96. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Medellin-Azuara, J., Harou, J., & Howitt, R. (2010). Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5639–5648. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>
- Medina, J. (2014). *Integración de la variabilidad de la generación eólica y solar en la coordinación hidrotérmica de largo plazo del SIC*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico. Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile.
- Mehta, R., & Jain, S. K. (2009). Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique. *Water Resources Management*, 23(3), 509–529. <http://doi.org/10.1007/s11269-008-9286-0>

- Mérel, P., & Howitt, R. (2014). Theory and Application of Positive Mathematical Programming in Agriculture and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 451–470. <http://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012447>.
- Molle, F., Jayakody, P., Ariyaratne, R., & Somatilake, H. S. (2008). Irrigation versus hydropower: Sectoral conflicts in southern Sri Lanka. *Water Policy*, 10(SUPPL. 1), 37–50. <http://doi.org/10.2166/wp.2008.051>
- Muleta, M. K., & Nicklow, J. W. (2005). Decision Support for Watershed Management Using Evolutionary Algorithms. *Water Resources*, 131(1), 35–44. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131)
- Ortega, C. (2016). Informe mensual de operación cdecsic. *Preparado Para Centro de Despacho Económico de Carga - Sistema Interconectado Central*, 53. Retrieved from <http://www.cdecsic.cl/informes-y-documentos/fichas/informe-operacion/>
- Palatnik, R. R., & Roson, R. (2012). Climate change and agriculture in computable general equilibrium models: Alternative modeling strategies and data needs. *Climatic Change*, 112(3–4), 1085–1100. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0356-6>
- Pereira, M. V. F., & Pinto, L. M. V. G. (1991). Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. *Mathematical Programming*, 52(1–3), 359–375.
- Puertas, J. (2015). *Efecto del convenio de riego del sistema hidroeléctrico laja sobre la planificación a largo plazo del sistema interconectado central de Chile*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Robinson, S., Burfisher, M., Hinojosa-Ojeda, R., & Thierfelder, K. (1991). *Agricultural Policies and Migration in a U.S.-Mexico Free Trade Area: A Computable General Equilibrium Analysis*.
- Santibañez, F., Santibañez, P., Caroca, C., Gonzalez, P., Huiza, F., Perry, P., & Melillán, C. (2015). Evapotranspiración de referencia. Para la determinación de las demandas de riego en Chile. *Centro AGRIMED. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.*, 1–110.
- Schlenker, W., & Hannemann, W. M. (2006). The Impact of Global Warming on the U.S. Agriculture: An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions. *The Review of Economics and Statistics*, 88(1), 113–125. <http://doi.org/10.1162/rest.2006.88.1.113>
- Soler, D. (2013). *Efectos técnico-económicos en la operación del SIC por ingreso de centrales ERNC*. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil Eléctrica. Departamento de Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile.
- Wolf, A. T., Kramer, A., Carius, A., & Dabelko, G. D. (2005). Managing Water Conflict and Cooperation. In *State of the World 2005: Redefining Global Security* (pp. 80–99). THE WORLDWATCH INSTITUTE STATE. Retrieved from http://tbw.geo.orst.edu/publications/abst_docs/wolf_sow_2005.pdf
- Wurbs, R. A. (2005). Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *Journal of Hydrology*, 300(1–4), 100–113. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.003>

ANEXOS

Anexo A: Mapa de la región del Maule

MAPA DE LA CUENCA ALTA DEL MAULE REGIÓN DEL MAULE - CHILE

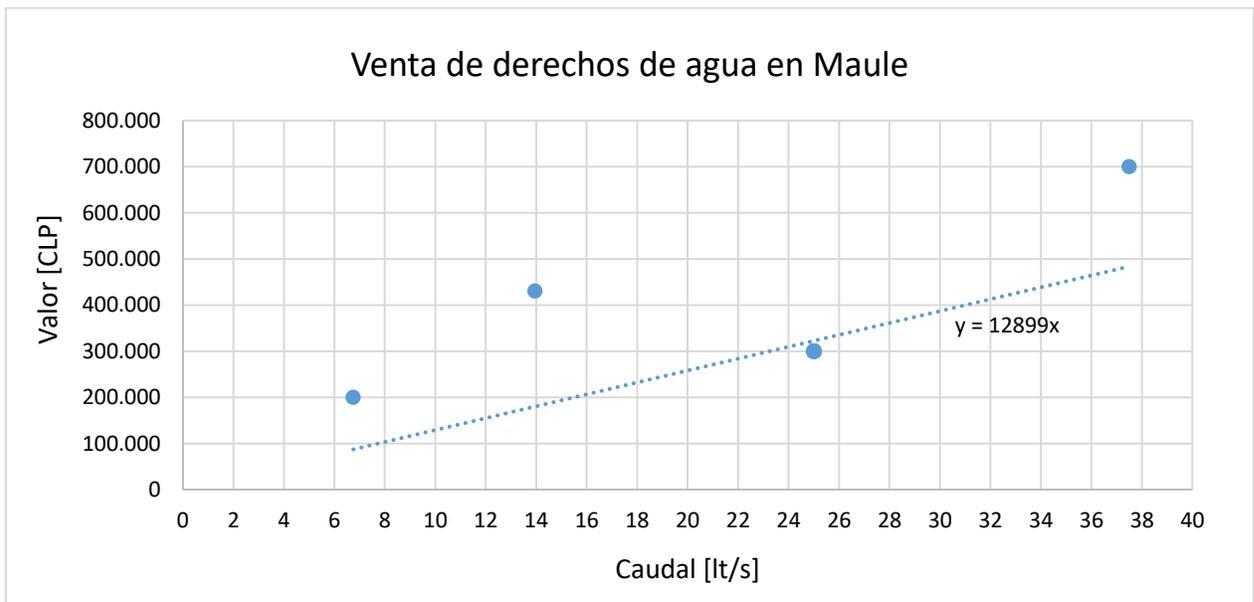


Anexo B: Evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea, para cultivos en Maule

Evapotranspiración de cultivo Etc [mm]												
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Trigo	31,2	82,5	122,4	213,9	221,0	109,8	81,8	18,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Manzana	0,0	47,1	91,8	158,1	192,2	156,8	129,6	65,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Uva	35,1	70,7	107,1	158,1	163,4	109,8	81,8	46,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Choclo	0,0	47,1	91,8	204,6	211,4	172,5	109,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Poroto	0,0	70,7	107,1	186,0	211,4	172,5	81,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Requerimiento Hídrico [m ³ /s/ha] x10E-3													
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Trigo	0,20	0,51	0,79	1,33	1,38	0,76	0,51	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	5,59
Manzana	0,00	0,29	0,59	0,98	1,20	1,08	0,81	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	5,37
Uva	0,23	0,44	0,69	0,98	1,02	0,76	0,51	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	4,92
Choclo	0,00	0,29	0,59	1,27	1,32	1,19	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,34
Poroto	0,00	0,44	0,69	1,16	1,32	1,19	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,30
Total	0,43	1,98	3,34	5,73	6,22	4,97	3,01	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	26,52

Anexo C: Valor de arriendo de terrenos y derechos de agua en Maule

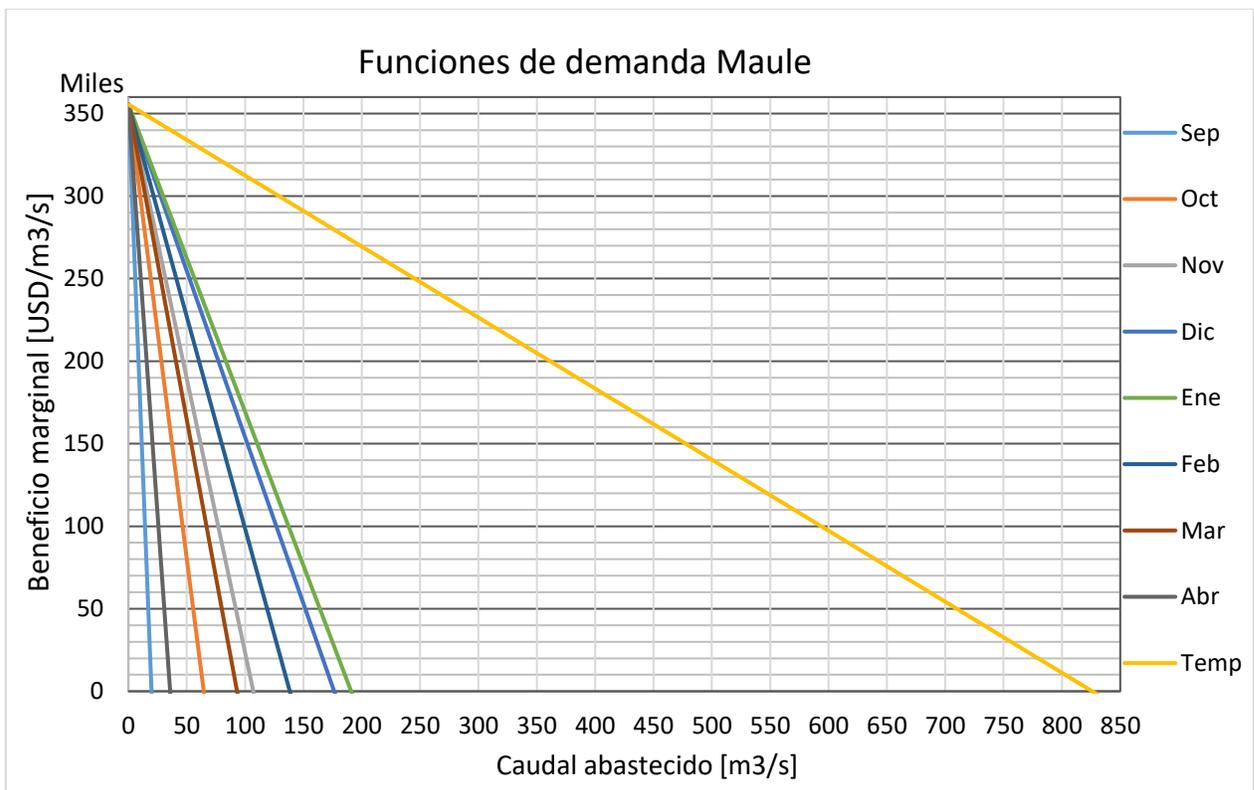
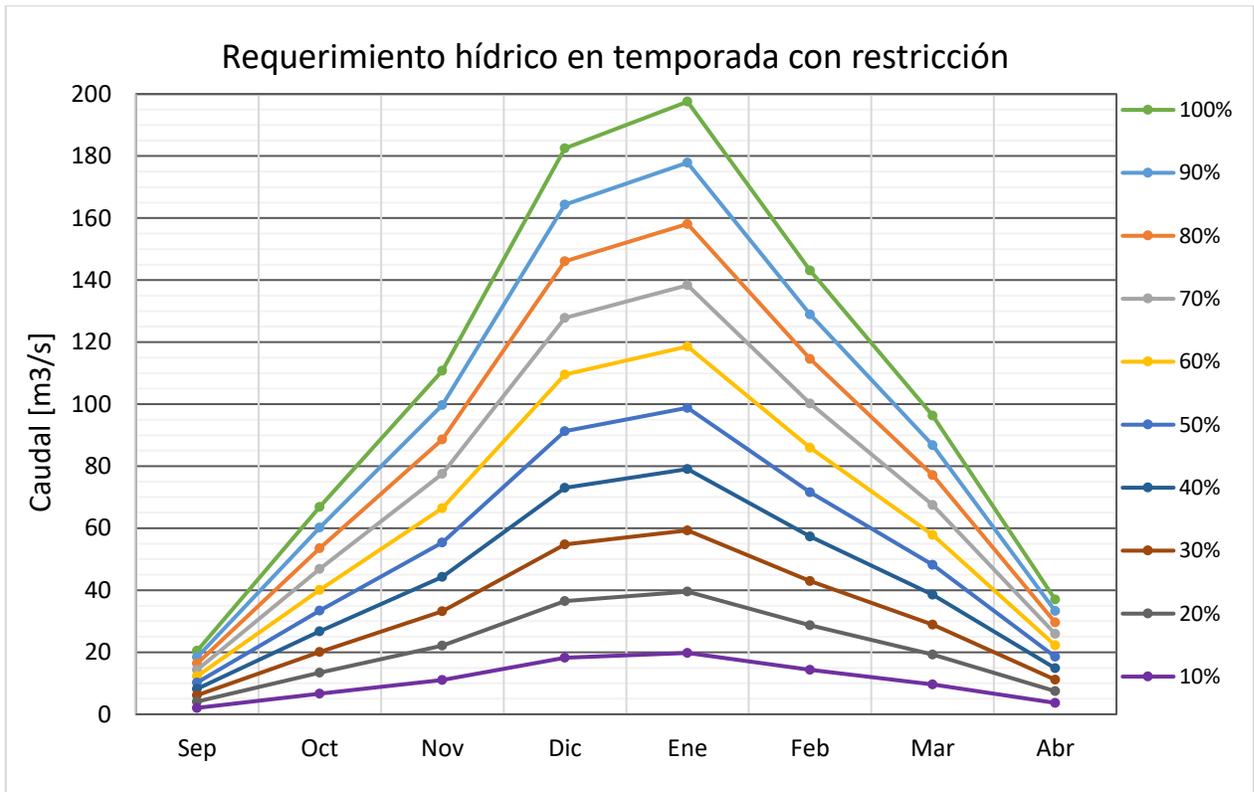


Anexo D: Resultados obtenidos con PMP en Maule

Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
855,0	Trigo	60.097,4	336,1	4.182.779	98,53	79,81	18,72
	Manzana	44.545,9	239,1	18.397.457	294,36	244,82	49,54
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	9.582,2	51,2	952.468	20,88	11,84	9,04
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	160.000,0	854,7		838,16	689,03	149,14
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
769,5	Trigo	44.885,4	251,0	3.124.021	73,59	59,61	13,98
	Manzana	44.545,9	239,1	18.397.457	294,36	244,82	49,54
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	9.582,2	51,2	952.468	20,88	11,84	9,04
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	144.788,0	769,6		813,23	668,83	144,40
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
684,0	Trigo	29.594,6	165,5	2.059.786	48,52	39,30	9,22
	Manzana	44.545,9	239,1	18.397.457	294,36	244,82	49,54
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	9.582,2	51,2	952.468	20,88	11,84	9,04
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	129.497,2	684,1		788,16	648,52	139,64
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
598,5	Trigo	14.303,9	80,0	995.551	23,45	19,00	4,46
	Manzana	44.545,9	239,1	18.397.457	294,36	244,82	49,54
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	9.582,2	51,2	952.468	20,88	11,84	9,04
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	114.206,5	598,6		763,09	628,22	134,87
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
513,0	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	44.545,9	239,1	18.397.457	294,36	244,82	49,54
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	8.548,5	45,6	849.719	18,63	10,57	8,07
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	98.868,9	513,1		737,38	607,94	129,44

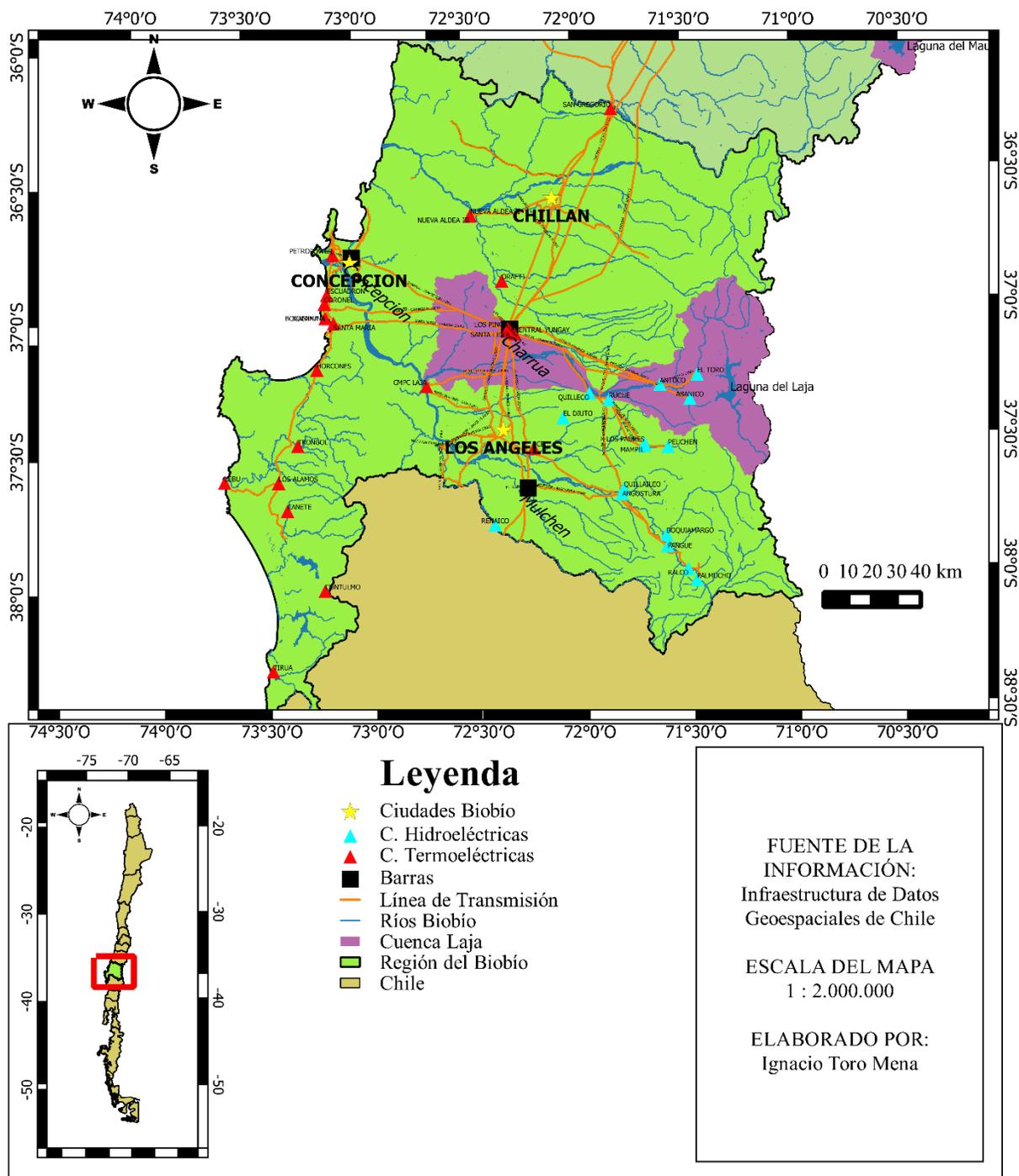
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
427,5	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	37.119,6	199,3	15.330.413	245,29	204,01	41,28
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	82.894,2	427,6		669,68	556,56	113,12
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
342,0	Trigo	0,0	0,00	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	21.193,0	113,77	8.752.718	140,04	116,47	23,57
	Uva	37.493,0	184,43	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	0,0	0,00	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	8.281,6	43,88	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	66.967,6	342,1		564,44	469,03	95,41
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
256,5	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	5.266,4	28,3	2.175.024	34,80	28,94	5,86
	Uva	37.493,0	184,4	7.611.070	389,01	333,53	55,48
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	51.040,9	256,6		459,19	381,50	77,69
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
171,0	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Uva	25.856,1	127,2	5.248.794	268,27	230,01	38,26
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	34.137,7	171,1		303,66	249,04	54,62
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
85,5	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Manzana	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Uva	8.470,4	41,7	1.719.498	87,89	75,35	12,53
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	8.281,6	43,9	170.600	35,38	19,02	16,36
	Total	16.752,0	85,5		123,27	94,37	28,89

Anexo E: Requerimiento hídrico según temporadas y funciones de demanda mensual para Maule



Anexo F: Mapa de la región del Biobío

MAPA DE LA CUENCA DEL LAJA REGIÓN DEL BIOBÍO - CHILE

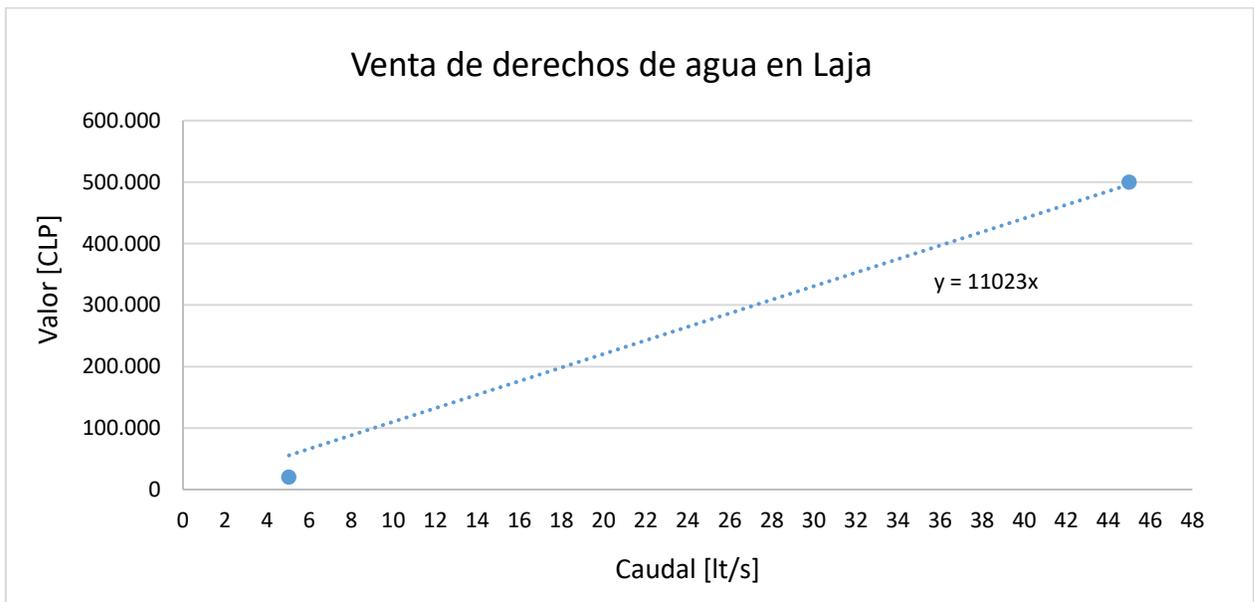
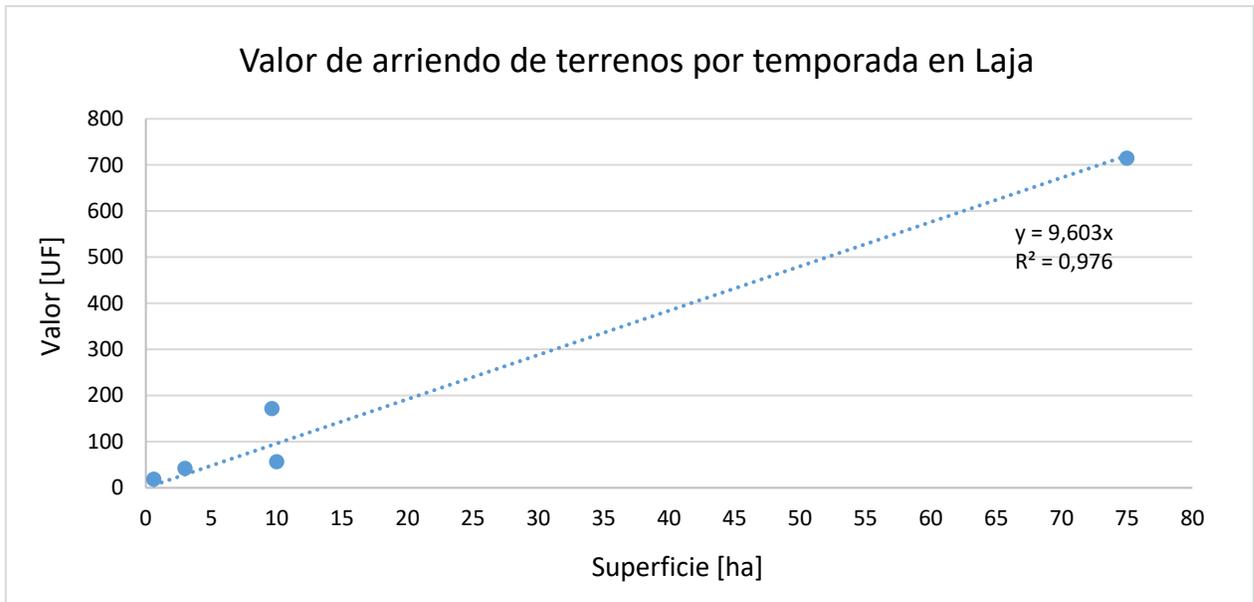


Anexo G: Evapotranspiración y requerimiento hídrico por hectárea, para cultivos en Laja

Evapotranspiración de cultivo Etc [mm]												
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Trigo	27,6	73,8	108,0	188,9	192,5	96,0	70,7	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Frambuesa	0,0	47,4	68,9	90,4	115,5	102,9	71,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Uva	31,1	63,2	94,5	139,7	142,3	96,0	70,7	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Choclo	0,0	42,2	81,0	180,7	184,1	150,9	94,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Poroto	0,0	63,2	94,5	164,3	184,1	150,9	70,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Requerimiento Hídrico [m ³ /s/ha] x10E-3													
Cultivo	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Trigo	0,18	0,46	0,69	1,18	1,20	0,66	0,44	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,91
Frambuesa	0,00	0,30	0,44	0,56	0,72	0,71	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,17
Uva	0,20	0,39	0,61	0,87	0,89	0,66	0,44	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	4,31
Choclo	0,00	0,26	0,52	1,12	1,15	1,04	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,68
Poroto	0,00	0,39	0,61	1,02	1,15	1,04	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,65
Total	0,38	1,80	2,87	4,75	5,09	4,11	2,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	21,72

Anexo H: Valor de arriendo de terrenos y de derechos de agua en Laja

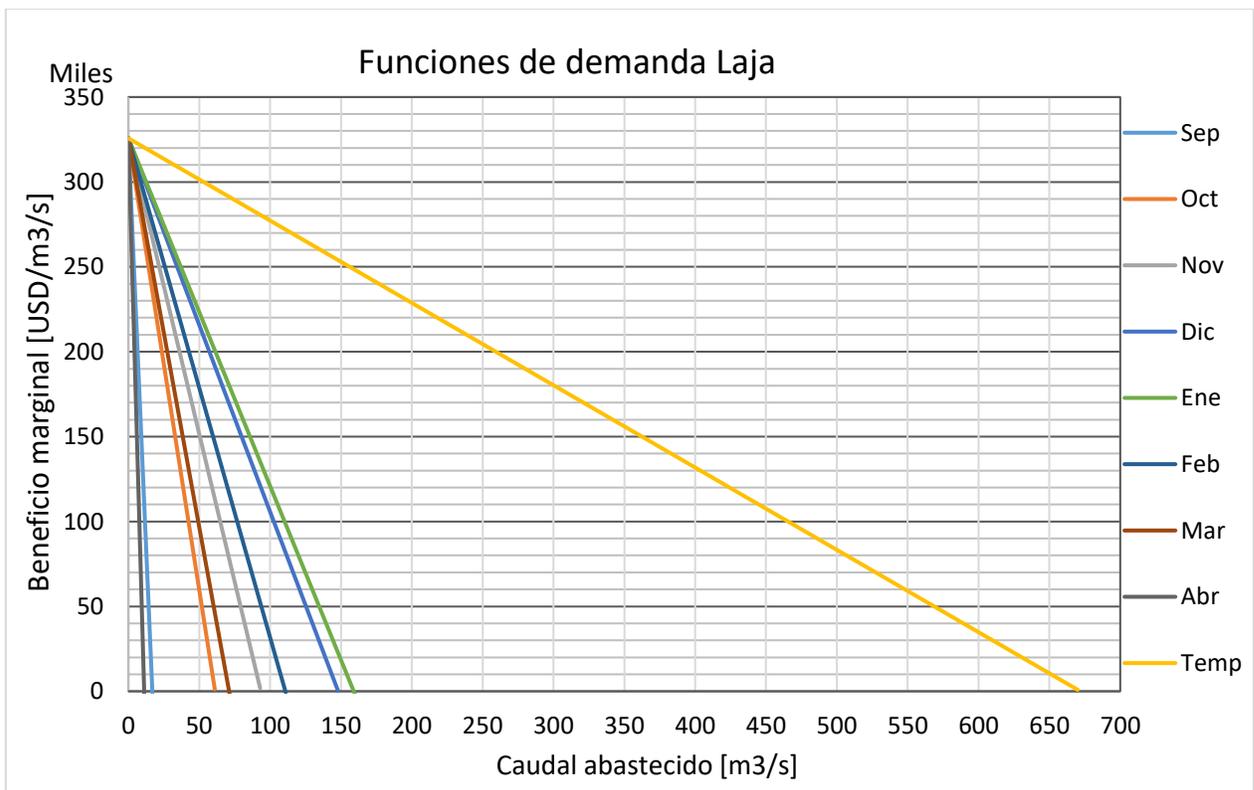
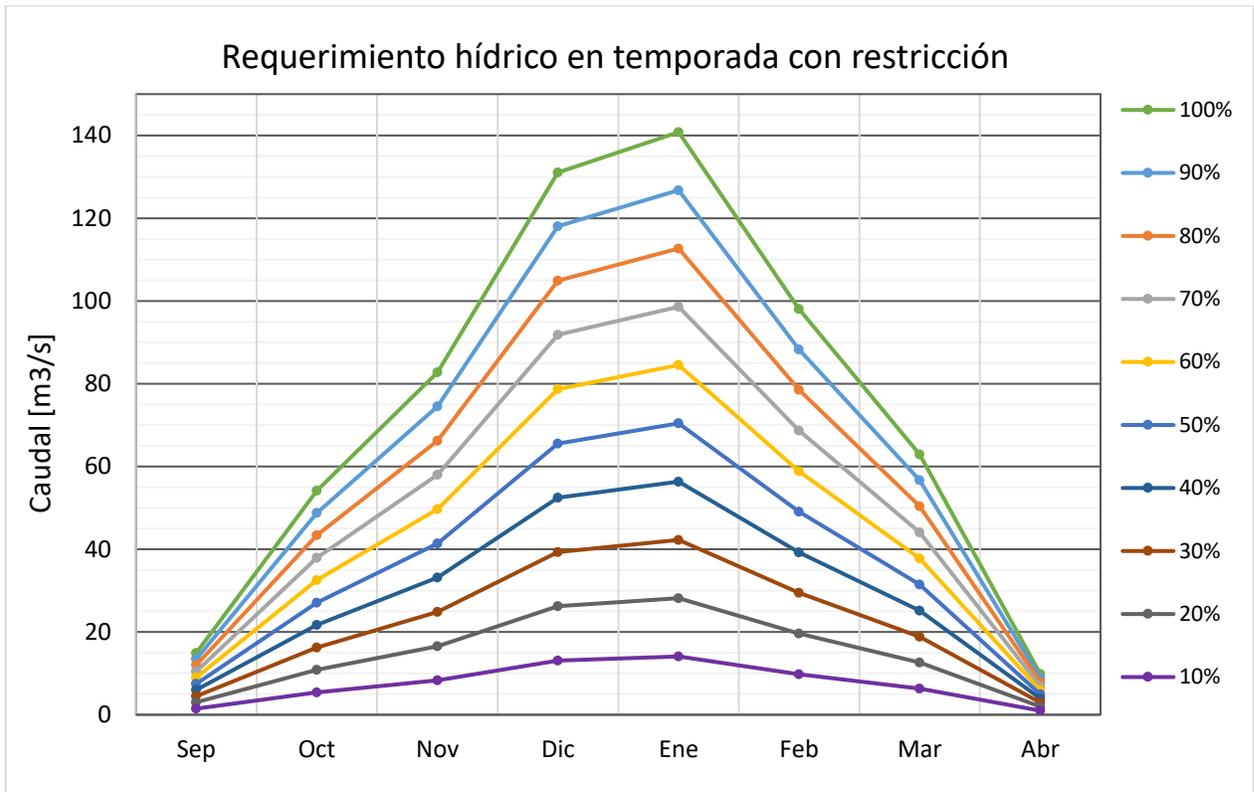


Anexo I: Resultados obtenidos con PMP en Laja

Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
595,0	Trigo	72.859,7	357,5	5.151.183	125,92	81,52	44,40
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	140.000,0	594,7		626,67	514,60	112,07
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
535,5	Trigo	60.792,1	298,3	4.297.998	105,06	68,02	37,05
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	127.932,3	535,5		605,82	501,10	104,71
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
476,0	Trigo	48.664,7	238,8	3.440.597	84,10	54,45	29,66
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	115.805,0	476,0		584,86	487,53	97,32
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
416,5	Trigo	36.537,4	179,3	2.583.197	63,14	40,88	22,27
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	103.677,7	416,5		563,90	473,96	89,93
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
357,0	Trigo	24.410,1	119,8	1.725.796	42,19	27,31	14,88
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	91.550,4	357,0		542,94	460,40	82,54

Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
297,5	Trigo	12.282,8	60,3	868.396	21,23	13,74	7,49
	Frambuesa	48.600,9	154,3	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,2	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	79.423,1	297,5		521,98	446,83	75,15
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
238,0	Trigo	155,5	0,76	10.995	0,27	0,17	0,09
	Frambuesa	48.600,9	154,31	3.645.064	378,01	334,37	43,63
	Uva	10.200,4	43,94	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	6.890,5	32,25	640.126	13,75	7,08	6,67
	Poroto	1.448,5	6,73	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	67.295,8	238,0		501,02	433,26	67,76
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
178,5	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Frambuesa	40.255,4	127,8	3.019.155	313,10	276,96	36,14
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	51.904,3	178,5		422,09	368,59	53,50
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
119,0	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Frambuesa	21.520,9	68,3	1.614.066	167,38	148,06	19,32
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	33.169,8	119,0		276,38	239,70	36,68
Q Temp [m3/s]	Cultivo	Land	Water	Producción [qqm]	Ingreso Mill USD	Costo Mill USD	Benef Mill USD
59,5	Trigo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Frambuesa	2.786,4	8,8	208.978	21,67	19,17	2,50
	Uva	10.200,4	43,9	1.989.076	103,14	88,61	14,53
	Choclo	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
	Poroto	1.448,5	6,7	30.419	5,86	3,02	2,83
	Total	14.435,3	59,5		130,67	110,81	19,86

Anexo J: Requerimiento hídrico según temporadas y funciones de demanda mensual para Laja

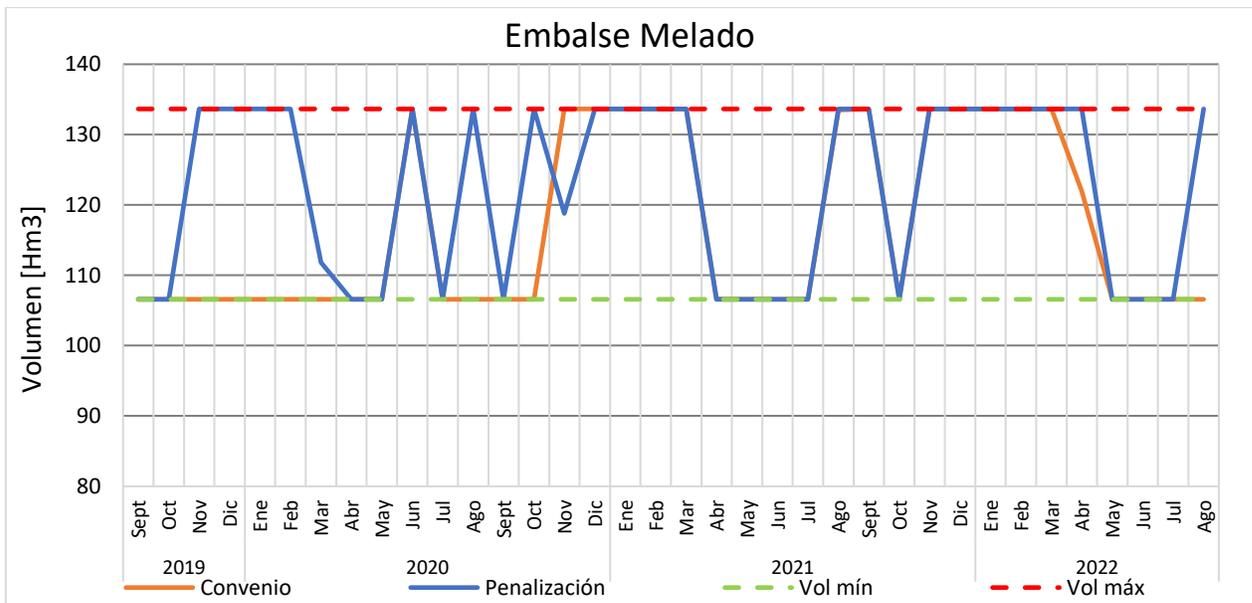
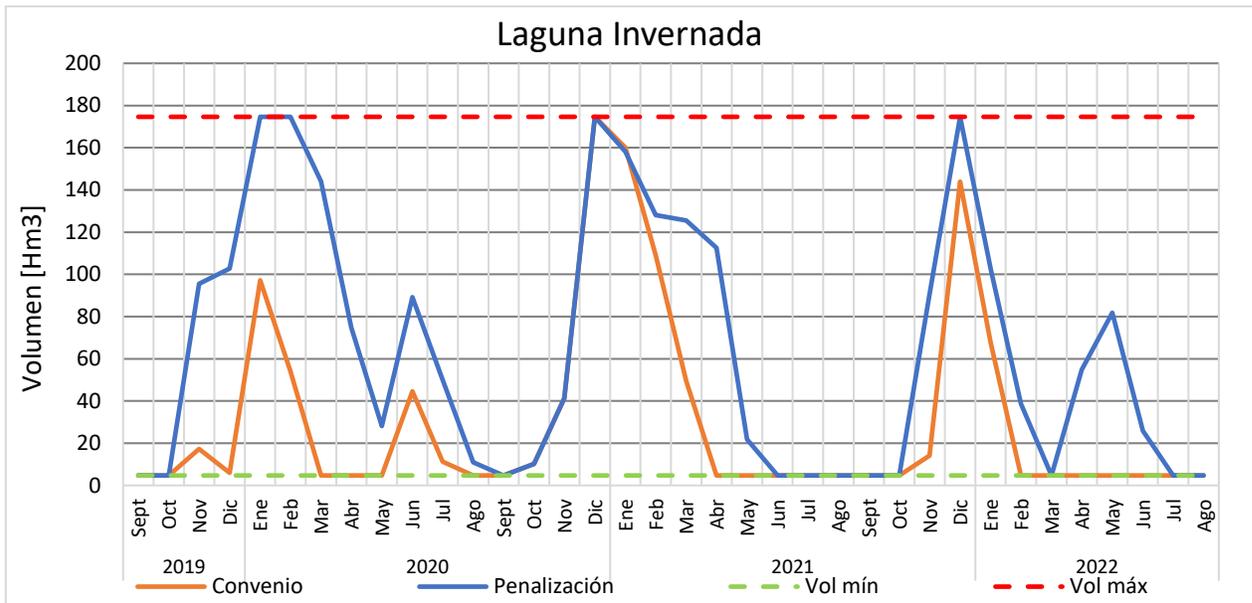


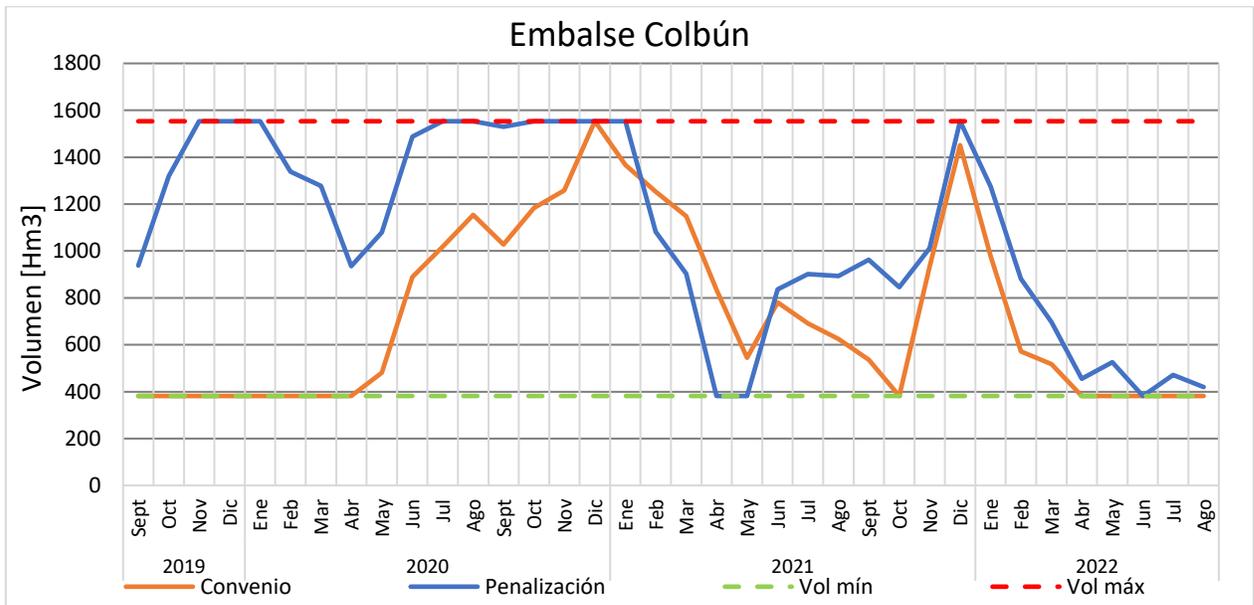
Anexo K: Caudales asociados a las extracciones en Maule y Laja

Total temporada Maule [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
197,55	143,14	96,34	37,04	0,00	0,00	0,00	0,00	20,52	66,84	110,77	182,48
Maule_CMNTronco1 [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
25,01	18,12	12,20	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60	8,46	14,02	23,10
Maule_CMNTronco2 [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
73,41	53,19	35,80	13,77	0,00	0,00	0,00	0,00	7,62	24,84	41,16	67,81
Maule_SCDZ [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
74,14	53,72	36,16	13,90	0,00	0,00	0,00	0,00	7,70	25,09	41,57	68,49
Maule_CMelado [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24,99	18,11	12,19	4,69	0,00	0,00	0,00	0,00	2,60	8,46	14,01	23,08

Total temporada Laja [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
140,80	98,08	62,94	9,87	0,00	0,00	0,00	0,00	14,97	54,19	82,78	131,09
Laja_RIEGZACO [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
44,31	30,86	19,81	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,71	17,05	26,05	41,25
Laja_CLAJA [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
44,31	30,86	19,81	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,71	17,05	26,05	41,25
Laja_2Reg [m3/s]											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
52,18	36,35	23,33	3,66	0,00	0,00	0,00	0,00	5,55	20,08	30,68	48,58

Anexo L: Variación de volumen en embalses de Maule





Anexo M: Variación de volumen en embalses de Biobío

