



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

**MODELACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA OPERACIONAL
ENTRE HIDROELECTRICIDAD Y RIEGO EN LA CUENCA DEL MAULE, CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

EUGENIO SEBASTIÁN FUENTES CONSTANZO

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MESA
EDUARDO PEREIRA BONVALLET

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y
MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

POR: Eugenio Sebastián Fuentes Constanzo

FECHA: 2023

PROFESOR GUÍA: Marcelo Olivares Alveal

MODELACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA OPERACIONAL ENTRE HIDROELECTRICIDAD Y RIEGO EN LA CUENCA DEL MAULE, CHILE.

La laguna del Maule es un embalse multipropósito, para riego y generación hidroeléctrica, cuya operación está sujeta al convenio ENDESA-Riego del año 1947. Como parte del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule se utilizó un modelo WEAP de simulación denominado “modelo cordillera” que tiene ciertas limitaciones como: la pobre representación de la evolución del volumen histórico de la laguna del Maule, la consideración de un solo modelo climático (CSIRO) en la cuenca y una proyección muy simplificada de la demanda hidroeléctrica.

En marco de lo anterior, el objetivo de este estudio es mejorar la herramienta de simulación, para posibilitar un adecuado análisis de la interferencia operacional entre uso del agua para generación hidroeléctrica y riego en la cuenca del Maule, considerando el efecto del cambio climático y las proyecciones de demanda para ambos usos en un horizonte de 25 años (periodo 2022-2046). Así, se realizó el análisis y validación del modelo cordillera en el periodo histórico, proponiendo modificaciones principalmente para mejorar la representación del comportamiento del volumen de la laguna del Maule. Una vez realizado el análisis y validación del modelo en el período histórico, para el escenario futuro (2022-2046): se desacopló el módulo precipitación-escorrentía del modelo cordillera, se incorporó como datos de entrada los caudales afluentes bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 obtenido del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y adicionalmente, en el módulo operacional se incorporó la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización de largo plazo del sistema eléctrico desarrollado en la plataforma AMEBA.

Como resultado, en términos operacionales se logró mejorar la representación histórica del volumen del embalse laguna del Maule y la demanda hidroeléctrica proyectada de la cuenca. En el periodo futuro (2022-2046) bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL, MIROC), el volumen del embalse laguna del Maule se ubica en promedio en el colchón intermedio de la laguna, obteniendo que las entregas del embalse no suministran la demanda total proyectada generando periodos fallos en el suministro de riego y de hidroelectricidad. Por ello, se recomienda un análisis futuro para explorar modificaciones al convenio para poder reducir la interferencia operacional entre ambos usos de la laguna del Maule. El presente trabajo demuestra la importancia de integrar en un modelo operacional de recursos hídricos los resultados de modelos hidrológicos y del modelo de operación del sistema eléctrico, posibilitando futuros análisis del sistema laguna del Maule.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en este camino.

A mi familia en especial a mi madre por su apoyo, por estar siempre presente y preocupada de nosotros. A mi pareja Marcia Morales por su amor, paciencia y apoyo incondicional en este proceso. A mi gran amigo Mauricio Rivera por su amistad y consejos.

A mi Profesor Guía Marcelo Olivares por su motivación, confianza, paciencia y comentarios en el desarrollo de este trabajo. Al Profesor Eduardo Pereira de SPEC Energy Consulting por su apoyo a la tesis, su buena disposición, quién me facilitó el acceso al modelo eléctrico de la cuenca del Maule desarrollado en AMEBA. A la Profesora Ximena Vargas por sus comentarios y observaciones para mejorar el desarrollo de este trabajo. A Julia Wiener por su apoyo, ideas y comentarios durante el desarrollo de la tesis.

También quiero aprovechar de agradecer a Jacqueline Suarez por su confianza, apoyo y preocupación en especial en los periodos más difíciles. Por último, agradecer al programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, profesores y compañeros por apoyarme y ser más ameno el desarrollo de este proceso.

Tabla de Contenido

Capítulo 1.	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Organización del Informe	3
Capítulo 2.	Marco Teórico	4
2.1	Nexo Agua Energía y Alimentos en la cuenca río Maule	4
2.2	Modelos Operacionales de Recursos Hídricos	5
2.2.1	Modelo WEAP	6
2.2.2	Modelación Hidroeléctrica	9
2.3	Escenarios de Cambio Climático	12
2.3.1	Actualización del Balance Hídrico Nacional	13
2.4	Criterios de Desempeño Operacional para entregas Laguna del Maule	16
Capítulo 3.	Caracterización Cuenca Río Maule Alto	18
3.1	Descripción Física y Climática	18
3.2	Usos de Agua y Cobertura Vegetal	20
3.3	Infraestructura Hídrica	21
3.3.1	Infraestructura Laguna del Maule	21
3.3.2	Infraestructura Laguna Invernada y Embalse Melado	22
3.4	Evolución Histórica de Embalses	22
3.5	Usuarios Cuenca Río Maule	24
3.5.1	Sistema de Riego	24
3.5.2	Sistema Hidroeléctrico	24
3.6	Aspectos Operacionales Cuenca Río Maule en Armerillo	26
3.6.1	Convenio Endesa Riego 1947	26
3.6.2	Resoluciones DGA	28
3.6.3	Disponibilidad Recursos Hídricos Cuenca Río Maule en Armerillo	29
Capítulo 4.	Descripción Modelo WEAP cordillera del PEGH	32
4.1	Modelo WEAP cordillera (Modelo WEAP original)	33
4.1.1	Modelo WEAP original: Modulo Hidrológico	33
4.1.2	Modelo WEAP original: Modulo Operacional	34
4.1.3	Simulaciones modelo WEAP cordillera	37
Capítulo 5.	Validación y Modificación del Modelo WEAP cordillera	38

5.1	Análisis y Modificación modelo WEAP Original. -----	39
5.1.1	Modificación Caudal Reconstituido en Armerillo. -----	39
5.1.2	Modificación Periodo Current Accounts Modelo WEAP Original -----	41
5.1.3	Modificación Prioridades de demanda modelo WEAP Original. -----	42
5.1.4	Modificación topología del sistema de entregas Laguna del Maule. -----	42
5.1.5	Modificación topología del sistema de entregas Laguna Invernada -----	43
5.2	Efecto combinado de las modificaciones -----	44
5.3	Desacople modelo WEAP cordillera -----	45
5.3.1	Caudales afluentes bajo escenarios de cambio climático RCP8.5 -----	46
5.4	Proyección de la Demanda Hidroeléctrica en la cuenca río Maule-----	55
Capítulo 6.	Resultados y Discusión -----	60
6.1	Análisis Laguna Maule -----	60
6.1.1	Volumen Laguna Maule -----	60
6.1.2	Entregas para Riego Laguna del Maule-----	63
6.1.3	Entregas Hidroelectricidad Laguna del Maule -----	65
6.1.4	Confiabilidad entregas riego e hidroelectricidad -----	66
Capítulo 7.	Conclusiones y Comentarios -----	72
Capítulo 8.	Bibliografía -----	74
ANEXOS	-----	78
Anexo A.	Usuarios consuntivos Junta de Vigilancia Río Maule. -----	78
Anexo B.	Antecedente Detallado Infraestructura y principales usuarios de la cuenca río Maule.-----	80
Anexo C.	Incorporación Central Hidroeléctrica de pasada La Mina -----	83
Anexo D.	Modelo WEAP Escenario Futuro: Sector Laguna Invernada -----	84
Anexo E.	Modelo WEAP Escenario Futuro: Sector Embalse Melado -----	89
Anexo F.	Funciones Modelo WEAP original -----	94

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Principales componentes del Modelo WEAP (Nodos y Líneas).	6
Tabla 2.2 Escenarios de cambio climático.	12
Tabla 2.3 Modelos Climáticos Balance Hídrico Nacional.	15
Tabla 3.1 Centrales hidroeléctricas Cuenca del Maule.	26
Tabla 3.2 Principales Aspectos legales cuenca río Maule	29
Tabla 4.1 URH y Bandas de Elevación.	34
Tabla 5.1 Estadísticos caudales afluentes semanales Laguna del Maule.....	50
Tabla 5.2 Estadísticos caudales afluentes naturales semanales cuenca río Maule en Armerillo (periodo 1984-2015).....	50
Tabla 5.3 Estadísticos caudales afluentes semanales Laguna del Maule.....	54
Tabla 5.4 Estadísticos caudales afluentes naturales semanales cuenca río Maule en Armerillo (periodo 2022-2046).....	54
Tabla 6.1 Estadísticos volumen laguna Maule (Hm ³)	62
Tabla 6.2 Entregas de Riego: Confiabilidad y Seguridad de Riego (%),	67
Tabla 6.3 Confiabilidad Entregas Hidroelectricidad (%), período 2022-2046	69
Tabla A.1 Usuarios Consuntivos	78
Tabla B.1 Embalses cuenca río Maule	81
Tabla B.2 Principales Canales de Riego Cuenca Río Maule.....	81
Tabla B.3 Centrales hidroeléctricas Cuenca Maule.....	81
Tabla F.1 Factor y Capacidad canales de Riego.....	99

Índice de Figuras

Figura 2.1 Interacción agua-energía-alimentos	4
Figura 2.2 Nexo Agua-Energía-Alimento cuenca río Maule.	5
Figura 2.3 Elementos hidrológicos modelo WEAP	7
Figura 2.4 Modelo WEAP: zonas de modelación de embalses	9
Figura 2.5 Mapa Sistema Eléctrico de Chile.....	10
Figura 2.6 Modelo de optimización en AMEBA, sector Laguna Maule.....	11
Figura 2.7 Emisiones de combustibles fósiles compatibles mediante los modelos de la CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales (PgC año ⁻¹). Las líneas discontinuas representan las estimaciones históricas y emisiones de los distintos escenarios RCP calculados mediante los modelos de evaluación utilizados para definir los escenarios RCP, las líneas continuas y los pernuchos muestran los resultados de los modelos del sistema Tierra de la CMIP5.....	13
Figura 2.8 Diagrama conceptual metodología Balance Hídrico Nacional.....	14
Figura 2.9 Variación porcentual de precipitación, escorrentía y evapotranspiración entre los periodos 2030-2060 y 1985-2015.....	16
Figura 3.1 Climograma Río Maule en Armerillo (periodo de análisis 1979-2019).	18
Figura 3.2 Curva de Variación Estacional Río Maule en Armerillo, periodo de análisis 1984-2018. Fuente: Orell, 2020.	19
Figura 3.3 Ubicación cuenca río Maule en Armerillo.	19
Figura 3.4 Mapa de Cobertura Vegetal y uso de suelo en la Región del Maule, cuenca del Maule y cuenca río Maule en Armerillo.....	20
Figura 3.5 Ubicación Embalses y Centrales Hidroeléctricas cuenca río Maule.....	21
Figura 3.6 Imagen Laguna del Maule (Febrero 2023).	22
Figura 3.7 Volumen de agua evolución histórica: a) laguna del Maule, b) laguna Invernada y c) embalse Melado, periodo 2003-2021 (escala semanal).	23
Figura 3.8 Diagrama Unifilar Sistema Riego – Hidroelectricidad.....	25
Figura 3.9 Resumen Convenio Endesa Riego (1947), Laguna del Maule.....	27
Figura 3.10 Diagrama Unifilar Balance Sistema Riego.	30
Figura 4.1 Modelos de Simulación PEGH Maule	32
Figura 4.2 Unidades de respuesta Hidrológica y Bandas de Elevación.	34
Figura 4.3 Modelo WEAP original del PEGH Maule (DGA, 2020).....	36
Figura 5.1 Esquema desarrollo metodológico Modelo WEAP modificado.....	38
Figura 5.2 Simulación Volumen Laguna Maule modelo WEAP original (PEGH).....	39
Figura 5.3 Simulación modelo WEAP original Laguna del Maule: a) Modificación formula caudal reconstituido en Armerillo, b) Entrega de Riego al modificar el caudal reconstituido en Armerillo.	40
Figura 5.4 Simulación volumen laguna del Maule.	41
Figura 5.5 Esquema Operacional Laguna del Maule.	42
Figura 5.6 Modelo WEAP original: Simulación Central Hidroeléctrica Cipreses.....	43
Figura 5.7 Actualización Entregas Laguna Invernada.	44
Figura 5.8 Comparación simulaciones central hidroeléctrica Cipreses del modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado.	44
Figura 5.9 Simulación volumen histórico laguna del Maule.....	45
Figura 5.10 Topología Modelo WEAP Modificado.	46
Figura 5.11 Caudales afluentes subcuenca Laguna Maule (periodo 1984-2015): a) series semanales en m ³ /s, b) series semanales modelos calibrados:	

	Balance Hídrico Nacional (CR2Met) y modelo WEAP original, c) series ciclo semanales en m ³ /s. Series de color azul, rojo, verde, morado y celeste obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional y las series de color café obtenida del modelo WEAP original.	48
Figura 5.12	Caudales afluentes cuenca río Maule en Armerillo (periodo 1984-2015): a) series semanales en m ³ /s, b) series semanales modelos calibrados del Balance Hídrico Nacional (CR2Met) y modelo WEAP original, c) series ciclo semanales en m ³ /s. Series de color azul, rojo, verde, morado y celeste obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional y las series de color café obtenida del modelo WEAP original.	49
Figura 5.13	Escenarios de cambio climático subcuenca Laguna del Maule (periodo 2022-2046): a) caudales afluentes semanales en m ³ /s, b) Series climáticas CSIRO: caudales afluentes del Balance Hídrico Nacional (2018) y modelo WEAP original, c) caudales afluentes ciclo semanal en m ³ /s. Series de color azul, rojo, verde y morado obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional utilizadas en las simulaciones del Modelo WEAP Modificado y las series de color café que corresponden al modelo WEAP original.	52
Figura 5.14	Escenarios de cambio climático cuenca río Maule en Armerillo (periodo 2022-2046): a) caudales afluentes semanales en m ³ /s, b) Series climáticas CSIRO: caudales afluentes del Balance Hídrico Nacional (2018) y modelo WEAP original, c) caudales afluentes ciclo semanal en m ³ /s. Series de color azul, rojo, verde y morado obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional utilizadas en las simulaciones del Modelo WEAP Modificado y las series de color café que corresponden al modelo WEAP original.	53
Figura 5.15	Comparación caudales afluentes Laguna del Maule bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y del Modelo eléctrico (AMEBA) de los modelos climáticos (periodo 2022-2046): a) CCSM4, b) CSIRO, c) IPSL, d) MIROC.	57
Figura 5.16	Modelación Hidroeléctrica en AMEBA.....	57
Figura 5.17	Demanda eléctrica escenario futuro (periodo 2022 - 2046): a) Central Hidroeléctrica Cipreses, b) Central Hidroeléctrica Pehuenche.....	58
Figura 6.1	Simulación Volumen Laguna Maule escenario de cambio climático RCP8.5.....	60
Figura 6.2	Simulación modelo WEAP modificado Laguna Maule modelos climáticos CSIRO, IPSL (periodo de análisis 2036 - 2039): a) y b) Volumen simulado Laguna del Maule, c) Caudales afluentes Laguna del Maule, d) Entregas Laguna del Maule.....	61
Figura 6.3	Laguna Maule: Análisis de Frecuencia volumen observado (periodo 2011-2021) y Volumen simulado (periodo 2022-2046).	62
Figura 6.4	Entregas para Riego Laguna del Maule modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado: a) Entregas para riego en escala semanal (periodo 2022-2046), b)Entregas para riego en escala semanal de los últimos 5 años de simulación (periodo 2042-2046), c) Entregas para riego promedio semanal (periodo 2022-2046).	64
Figura 6.5	Entregas Hidroelectricidad laguna Maule del modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado: a) Entregas hidroelectricidad en escala semanal (periodo 2022-2046), b) Entregas hidroelectricidad en escala	

	semanal de los últimos 5 años de simulación (periodo 2042-2046), c) Entregas hidroelectricidad promedio semanal (periodo 2022-2046).....	66
Figura 6.6	Figura 6.6 Criterios de Desempeño Entregas para Riego laguna del Maule: a) Número de fallas totales (umbral de demanda anual 85%), b) Indicadores de Confiabilidad, Resiliencia para un umbral de demanda anual del 85%, y Seguridad de Riego según norma Chilena, c) Indicador de Vulnerabilidad para distintos umbrales de demanda anual (m ³ /s), periodo 2022-2046.....	68
Figura 6.7	Figura 6.7 Criterios de desempeño Entregas Hidroelectricidad laguna del Maule: a) Número de fallas totales para un umbral de demanda del 85%, b) Indicadores de Confiabilidad y Resiliencia para un umbral de demanda del 85%, c) Indicador de Vulnerabilidad para distintos umbrales de demanda (m ³ /s), periodo 2022-2046.....	70
Figura B.1	Figura B.1 Diagrama Unifilar Sistema Riego – Hidroelectricidad	80
Figura C.1	Figura C.1 Topología sector la Mina modelo WEAP original (izquierda) y modelo WEAP modificado central hidroeléctrica La Mina (derecha).	83
Figura D.1	Figura D.1 Volumen simulado laguna Invernada (periodo 2022 - 2046)	84
Figura D.2	Figura D.2 Curva de duración volumen semanal simulado laguna Invernada (periodo 2022-2046).....	84
Figura D.3	Figura D.3 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).	85
Figura D.4	Figura D.4 Series semanales Modelo climático CCSM4 (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada(WEAP Modificado).	86
Figura D.5	Figura D.5 Series semanales Modelo climático IPSL (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).	87
Figura D.6	Figura D.6 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).	88
Figura E.1	Figura E.1 Volumen simulado embalse Melado (Periodo 2022 - 2046)	89
Figura E.2	Figura E.2 Curva de duración volumen simulado semanal embalse Melado (periodo 2022 – 2046).	89
Figura E.3	Figura E.3 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).....	90
Figura E.4	Figura E.4 Series semanales Modelo climático CCSM4 (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y	

entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).....	91
Figura E.5 Series semanales Modelo climático IPSL (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).....	92
Figura E.6 Series semanales Modelo climático MIROC (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).....	93
Figura F.1 Ubicación Laguna Maule.....	94
Figura F.2 Simulación Volumen semanal laguna Maule (Hm ³)	94
Figura F.3 Volumen Disponible de Riego en el año calendario	97
Figura F.4 Volumen disponible de riego en la semana t, año n.....	98
Figura F.5 Volumen Disponible de Hidroelectricidad (Hm ³)	100
Figura F.6 Factor Demanda Semanal (%).....	101
Figura F.7 Demanda Semanal Hidroelectricidad (Hm ³).....	101
Figura F.8 Volumen Disponible Hidroelectricidad (Hm ³)	102
Figura F.9 Canal Afluente central hidroeléctrica Isla	102
Figura F.10 Demanda Semanal Hidroelectricidad (m ³ /s)	103

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

El presente estudio se enmarca en la caracterización y análisis de la interferencia operacional entre hidroelectricidad y riego en la cuenca del Maule. Los recursos hídricos de la cuenca del Maule se utilizan para el desarrollo agrícola y generación hidroeléctrica, existiendo interferencias operacionales entre ambos usuarios principalmente por el uso compartido de los recursos hídricos de la laguna Maule, cuya operación está regulada por el convenio ENDESA-Riego del año 1947.

La agricultura en la cuenca del Maule representa cerca del 20% del área agrícola y el 15% de las exportaciones a nivel nacional. La cuenca se caracteriza por un gran potencial de desarrollo agrícola, que incluye principalmente cultivos tales como cereales, frutales, viñas, hortalizas y leguminosas (INE, 2021). La temporada de riego agrícola se desarrolla principalmente entre los meses de septiembre y mayo, que coinciden con el periodo de menor precipitación, la que tiene lugar principalmente en invierno.

Por otro lado, el Sistema Eléctrico Nacional cuenta con una capacidad instalada de 30.190 MW (Energía Abierta, 2022). El 22% de la capacidad instalada corresponde a generación de energía hidroeléctrica (de embalse y pasada), equivalente a 6.655 MW (Energía Abierta, 2022). En la cuenca del Maule, la potencia instalada hidroeléctrica es de 1.680 MW (DGA, 2020), que corresponde al 25% de la capacidad instalada de generación de energía hidroeléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), siendo de gran importancia para la producción de energía a nivel nacional.

La zona estudio corresponde a una subcuenca alta del Maule, definida por la estación fluviométrica Río Maule en Armerillo, sector donde se concentra gran parte de la generación hidroeléctrica y existe una potencial interferencia operacional con el sistema de riego. En la zona de estudio se encuentra el embalse Laguna del Maule que es de uso multipropósito (riego e hidroelectricidad), laguna Invernada y embalse Melado que son principalmente de uso hidroeléctrico, donde el uso y las condiciones de explotación de los recursos hídricos de la laguna del Maule y laguna Invernada están regulados por el convenio ENDESA-Riego del año 1947. El sistema de riego es administrado por la Junta de Vigilancia del Río Maule cuyo objetivo es administrar y distribuir los recursos hídricos a los usuarios consuntivos. El convenio establece que en caso de que la disponibilidad de los recursos hídricos para uso de riego, estimada en el sector de Armerillo, sea menor a la demanda de riego, la laguna del Maule deberá suministrar el déficit de riego. Por otra parte, la operación de embalses para generación hidroeléctrica está determinada por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), que utiliza un modelo de programación de largo plazo (PLP) con la lógica de satisfacer la demanda eléctrica a mínimo costo, y cuyos resultados alimentan a los modelos de programación diaria o semanal (Matus et al., 2014). El modelo PLP considera el convenio ENDESA-Riego de la laguna del Maule del año 1947, el que define las condiciones de uso de agua en tres niveles del embalse denominados: colchón superior, colchón intermedio y colchón inferior, no obstante, en la práctica se observan interferencias operacionales debido a la estacionalidad de ambos usos (riego e hidroelectricidad) particularmente desde el año 2011 cuando el embalse comenzó a experimentar los efectos de escasez de agua asociada a la megasequía, descendiendo el volumen de agua de la laguna del Maule desde el colchón superior al

colchón intermedio en aproximadamente 500 Hm³, manteniéndose hasta la actualidad el volumen de agua en el cochón intermedio de la laguna. Esta interferencia operacional sugiere la necesidad de analizar la operación del sistema Laguna del Maule, en particular bajo escenarios de escasez hídrica asociados al cambio climático.

Recientemente se publicaron los denominados Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para diferentes cuencas de Chile. Como parte del PEGH de la cuenca del Maule (DGA, 2020) se desarrollaron dos modelos de simulación para el análisis histórico de los recursos hídricos de la cuenca y en el periodo futuro bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, modelo climático CSIRO. El denominado “modelo cordillera”, implementado en la plataforma WEAP, abarcó el sector andino de la cuenca, incluye la laguna del Maule, laguna Invernada y embalse Melado. El segundo modelo de simulación abarcó la porción más baja de la cuenca, aguas abajo del dominio del modelo cordillera, se denominó “modelo de valle y costa” y consiste en un modelo acoplado WEAP-MODFLOW.

El presente estudio utiliza como modelo base el “modelo cordillera” denominado en este estudio modelo WEAP original, disponible públicamente en la DGA. El modelo WEAP corresponde a un modelo hidrológico-operacional, en el módulo hidrológico (módulo precipitación-escorrentía) se ingresa como datos de entrada series climáticas para la generación de escorrentía o caudales afluentes en régimen natural, y en el módulo operacional reglas de operación del sistema. Se realizó el análisis y validación operacional del modelo, principalmente para mejorar la representación del volumen histórico del embalse Laguna del Maule. Una vez realizadas las mejoras del modelo WEAP original denominado modelo WEAP Modificado, se desacopló el módulo precipitación-escorrentía y se incorporó como datos de entrada los caudales afluentes a la cuenca asociados a los distintos modelos climáticos globales incluidos en el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), en el módulo operacional se ingresó la demanda hidroeléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización en AMEBA®, una plataforma desarrollada por la consultora SPEC Energy Consulting en un horizonte de 25 años de simulación (periodo 2022-2046). A través de estas mejoras al modelo WEAP original, este trabajo contribuye a reducir la interferencia operacional del uso de agua entre la generación hidroeléctrica y el riego en la cuenca alta del río Maule.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Contribuir a reducir la interferencia operacional entre el uso del agua para generación hidroeléctrica y riego en la cuenca del Maule, Chile, mediante la validación y actualización de una herramienta computacional de simulación operacional de la cuenca.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Validar el modelo de simulación utilizado para el Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Maule en términos de la operación del sistema.
- Mejorar la representación de las demandas de agua para hidroelectricidad en el modelo de simulación.
- Representar diversos escenarios de caudales afluentes a la cuenca, asociados a distintos modelos climáticos.

1.3 Organización del Informe

El documento se compone de los siguientes capítulos:

Capítulo 2, corresponde al marco teórico para el desarrollo de este estudio. En este capítulo se presenta las principales componentes para el desarrollo de modelos operacionales (modelo WEAP y AMEBA) para el análisis de sistemas de recursos hídricos. Adicionalmente, se resumen los escenarios climáticos incluidos para el desarrollo de este trabajo e indicadores de desempeño para evaluar las simulaciones realizadas en el modelo WEAP para el análisis de sistemas de recursos hídricos.

Capítulo 3, corresponde a la descripción de la zona de estudio. En este capítulo se presenta la caracterización física y climática de la cuenca, usuarios consuntivos y/o no consuntivos que componen la zona de estudio, y antecedentes operacionales para la distribución de los recursos hídricos de la cuenca río Maule en Armerillo.

Capítulo 4, corresponde a la descripción del modelo WEAP cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (2020). El modelo WEAP cordillera (modelo WEAP original) corresponde al modelo base para el desarrollado de este estudio, donde se realizó el análisis y mejoras para el cumplimiento de objetivos.

Capítulo 5, corresponde a la modificación Modelo WEAP original (modelo WEAP modificado). En este capítulo se realizó el análisis preliminar del modelo WEAP original para mejorar la representación histórica de la simulación del embalse Laguna del Maule. Una vez realizado el análisis preliminar, se realizó el desacople del módulo precipitación-escorrentía del modelo WEAP modificado para poder incorporar en el periodo futuro (periodo 2022-2046) los caudales afluentes de escenarios de cambio climático obtenidos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) de la cuenca río Maule en Armerillo, y en el módulo operacional la demanda hidroeléctrica futura obtenida de un modelo de optimización, bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (periodo 2022-2046), estableciendo como condición inicial el volumen observado de los embalses para el desarrollo de simulaciones en el periodo 2022-2046.

Capítulo 6. En este capítulo se presenta los principales resultados obtenidos para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos bajos los distintos escenarios de cambio climático, enfocados principalmente en la simulación del embalse Laguna del Maule.

Capítulo 7. Se realiza el análisis y síntesis de resultados de las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original (periodo futuro 2022-2046) de la cuenca río Maule en Armerillo.

Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se presenta marco teórico para el análisis de la interferencia operacional entre uso del agua para generación hidroeléctrica y riego en la cuenca del Maule, enfocada principalmente en el nexo agua-energía-alimentos, escenarios de cambio climático y análisis de sistemas de recursos hídricos mediante el uso y mejoramiento del modelo WEAP original de la cuenca río Maule en Armerillo obtenido de Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (2020).

2.1 Nexo Agua Energía y Alimentos en la cuenca río Maule

El agua es la principal fuente de abastecimiento para consumo humano, utilizado por distintos sectores mediante el desarrollo industrial, minería, medioambiental, agrícola, energía, existiendo una alta demanda en el uso del agua.

En el ámbito de la ingeniería, el concepto de nexo corresponde a la interacción de 2 o más sistemas (interacción: agua-energía, agua-alimentos, agua-energía-alimentos). Cai et al. (2017) estudiaron el concepto nexo agua-energía-alimentos (WEF, por sus siglas en inglés) mencionando tres formas de interacciones: 1) físicas, biofísicas y químicas, 2) entrada y salida de recursos (ejemplo, agua para producción de alimentos), 3) Instituciones, como se aprecia en la Figura 2.1 donde se estudia en mayor detalle el concepto de nexo.

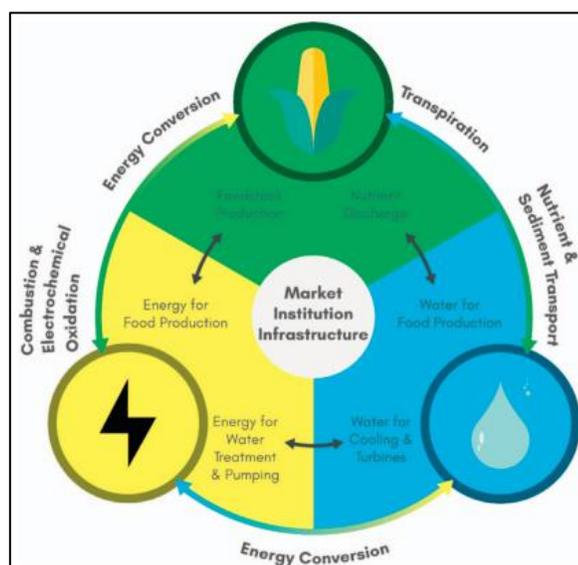


Figura 2.1 Interacción agua-energía-alimentos
Fuente: Cai et al. (2017).

De la Figura 2.1, para el análisis del presente estudio (escala de cuenca), el agua es el principal recurso del nexo agua-energía-alimentos, ya que el agua se usa para la producción de energía mediante el desarrollo hidroeléctrico, y la producción de alimentos mediante el desarrollo agrícola, lo que puede generar potenciales interferencias operacionales y rivalidades por el uso del agua.

En Chile, se han desarrollado estudios enfocados principalmente en el estudio de cuencas mediante el desarrollo de modelos, por ejemplo, uso del modelo WEAP para el estudio de cuencas intervenidas. En el estudio de cuencas intervenidas se pueden identificar rivalidad en el uso compartido de los recursos hídricos entre usuarios consuntivos (riego, industria, agua potable, minería y otros) y/o usuarios no consuntivos (hidroelectricidad). El sistema hidroeléctrico a pesar de ser un usuario no consuntivo es considerado como uso rival por otros usuarios (riego, industria, agua potable, y otros), generando potenciales conflictos debido a interferencias operacionales del uso del agua. El nexo agua-energía-alimentos en la cuenca del río Maule es el uso compartido de los recursos hídricos de la cuenca, principalmente del uso de la laguna del Maule que es un embalse natural multipropósito. El objetivo del embalse multipropósito laguna del Maule es satisfacer la demanda de los usuarios consuntivos (riego) y usuarios no consuntivos (hidroelectricidad) mediante reglas de operación regulada por el convenio ENDESA - Riego del año 1947. A pesar de la existencia de este convenio existen interferencias operacionales entre ambos usos, ya que la mayor demanda de riego ocurre en época de verano, mientras que la demanda hidroeléctrica ocurre principalmente en la época de otoño e invierno.

En la Figura 2.2, se muestra esquema del nexo agua-energía-alimento de la cuenca río Maule en Armerillo por el uso compartido de los recursos hídricos entre sistema de riego e hidroelectricidad.

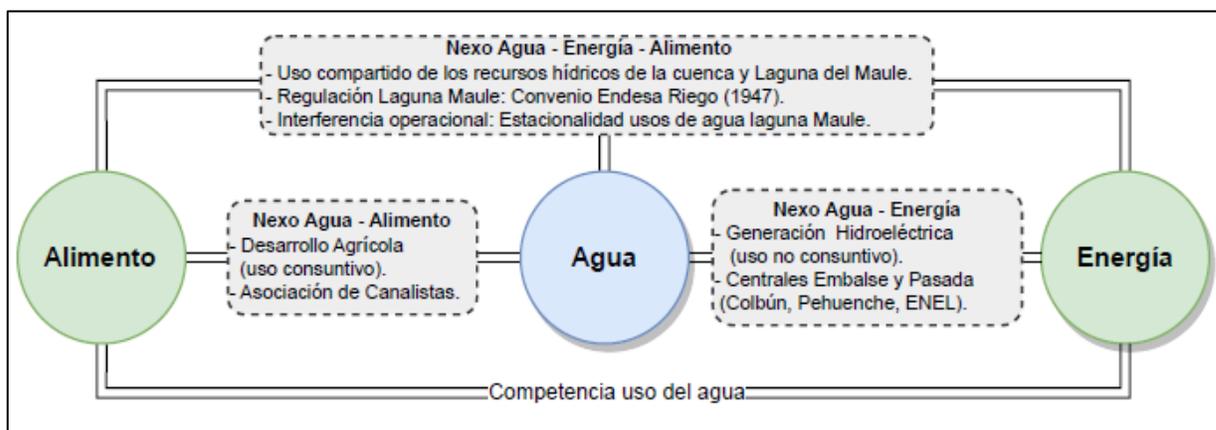


Figura 2.2 Nexo Agua-Energía-Alimento cuenca río Maule.

2.2 Modelos Operacionales de Recursos Hídricos

En Chile, se han realizado estudios a escala de cuencas para la investigación de nexo agua-energía-alimentos mediante el desarrollo de modelos matemáticos. Estos modelos matemáticos incluyen variables de decisión, que pueden ser de diseño y de política operacional de varios componentes del sistema de recursos hídricos (Loucks & van Beek, 2005).

Los modelos matemáticos para el análisis de sistemas de recursos hídricos pueden ser de optimización o de simulación de operación. El primero requiere una función objetivo y restricciones para resolver el problema, por ejemplo, minimizar costos para la generación de energía hidroeléctrica, mientras que los modelos de simulación requieren principalmente reglas de operación de los distintos elementos del sistema. En Chile, se

han realizado estudios enfocados en identificar los *tradeoffs* entre el riego y la hidroelectricidad. Por ejemplo, González (2020) desarrolló un modelo de programación de sistema eléctrico y un modelo a nivel de cuenca, para obtener el precio de la energía en el sector eléctrico y valor del agua en el sector agrícola. Los resultados se ingresaron en un modelo hidroeconómico, generando como resultado una buena representación del uso hidroeléctrico en un modelo a escala de cuenca y evidenciando los *tradeoffs* entre los sistemas de riego e hidroelectricidad. Rojas (2018) estudio los *tradeoffs* entre el uso de agua para generación hidroeléctrica y riego en un sistema eléctrico multi-cuenca, donde se implementó tres esquemas de co-optimización como parte de la coordinación hidrotérmica de largo plazo; se encontró que los costos de riego se pueden reducir un 98% al incluir el riego en el modelo de optimización, y el aumento de los costos de generación eléctrica en un 2% aproximadamente. Matus et al. (2014), estudiaron mejoras del software de programación de largo plazo (PLP) que se utiliza para el despacho económico del Sistema Eléctrico Nacional, mejorando la representación de los convenios y gestión de los embalses del Laja y Laguna del Maule en el modelo PLP. Por otro lado, con respecto a los modelos de simulación se han desarrollado estudios de gestión de agua denominados Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH), que incluye la cuenca Maule subdividida en dos zonas denominada “modelo cordillera” que abarca la zona alta de la cuenca (cuenca Río Maule en Armerillo), y la zona baja denominada “modelo de valle y costa” que consiste en un modelo acoplado WEAP-MODFLOW .

A continuación se describen las principales componentes del modelo WEAP que se utilizó como punto de partida para el desarrollo de este estudio, así como la modelación hidroeléctrica para la obtención de la demanda futura por hidroelectricidad en la cuenca de Maule bajo escenarios de cambio climático.

2.2.1 Modelo WEAP

El modelo WEAP (SEI, 1988) es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua aplicada en diferentes escalas temporales y espaciales, permite simular cuencas en régimen natural y cuencas intervenidas, posee una componente hidrológica que considera dos estanques para la simulación de procesos hidrológicos y una componente operacional para la simulación de embalses, reglas de operación y demandas.

El modelo WEAP ha sido utilizado en varios estudios de impacto del cambio climático y planificación en recursos hídricos (Purkey et al., 2007, Ingol-Blanco & Mckinney, 2009).

En la Tabla 2.1 se presenta los principales componentes del modelo WEAP nodos y líneas para el desarrollo de simulaciones.

Tabla 2.1 Principales componentes del Modelo WEAP (Nodos y Líneas).

Esquema	Nodos y Líneas	Funciones
	Demanda	Ingreso de demandas de uso consuntivo y no consuntivo.
	Demanda No Consuntiva	Ingreso de demandas de uso no consuntivo
	Almacenamiento	Simulación de embalses.

Esquema	Nodos y Líneas	Funciones
	Requerimiento de Flujo	Requerimiento de demanda de uso consuntivo y no consuntivo. Ingreso de funciones como reglas de operación.
	Ríos	Simulación agua superficial. Ingreso de series de caudales naturales a partir de otros modelos hidrológicos .
	Catchment	Generación de escorrentía mediante el ingreso de forzantes meteorológicas y parámetros para la calibración del modelo.
	Derivación	Derivación de ríos. Ejemplo: simulación de canales.
	Medidor de caudal	Ingreso de caudales medidos por ejemplo de estaciones de fluviométricas para la comparación de caudales medidos ver sus caudales simulados.
	Prioridades de demanda	Ingreso de un valor para clasificar la importancia de los diferentes nodos del modelo (nodos de almacenamiento, nodos de demanda, etc.), donde el nodo de menor valor es el más importante y de mayor prioridad, siendo de gran importancia para la simulación del modelo que asigna primero los recursos hídricos a los nodos de mayor prioridad y luego a los nodos de menor prioridad.

A continuación, se describen las componentes del modelo WEAP.

2.2.1.1 Modelo WEAP: Modulo Hidrológico

El módulo hidrológico corresponde al modelo de precipitación-escorrentía que requiere como datos de entrada (forzantes) variables meteorológicas como precipitación y temperatura principalmente. Para resolver el módulo hidrológico se debe realizar el balance de masa en los dos estanques de la Figura 2.3 que representa la zona de raíces el estanque superior y zona profunda el estanque inferior.

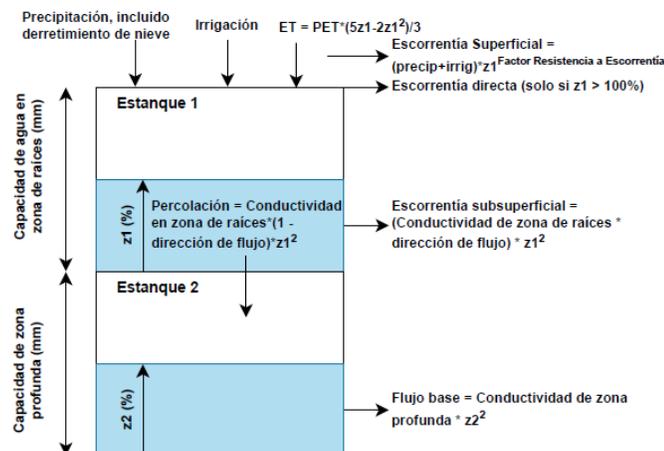


Figura 2.3 Elementos hidrológicos modelo WEAP
Fuente: Adaptada de Centro de Cambio Global, 2009

El balance de masa de cada estanque y las variables involucradas para el desarrollo del módulo hidrológico se resumen a continuación.

Estanque Superior

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = \underbrace{P_e(t)}_{1^{\text{er}} \text{ término}} - \underbrace{PET(t)k_{c,j}(t)}_{2^{\text{o}} \text{ término}} \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - \underbrace{P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_i}{2}}}_{3^{\text{er}} \text{ término}} - \underbrace{f_j k_s z_{1,j}^2}_{4^{\text{o}} \text{ término}} - \underbrace{(1 - f_j)k_s z_{1,j}^2}_{5^{\text{o}} \text{ término}} - \underbrace{(1 - f_j)k_s z_{1,j}^2}_{6^{\text{o}} \text{ término}} \quad (2.1)$$

Donde:

Primer término: representa el cambio en humedad del suelo.

Segundo término: representa la precipitación efectiva.

Tercer término: representa la evapotranspiración.

Cuarto término: representa la escorrentía superficial.

Quinto término: representa el flujo intermedio.

Sexto término: representa la percolación

Estanque Inferior

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = \underbrace{-k_d z_{1,j}^2}_{1^{\text{er}} \text{ término}} + \underbrace{(1 - f_j)k_s z_{2,j}^2}_{2^{\text{o}} \text{ término}} \quad (2.2)$$

Donde:

Primer término: representa el flujo base.

Segundo término: representa la percolación.

Las variables involucradas en el balance de masa de los estanques superior e inferior corresponden a:

- Sw_j : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces.
- Z_{1,j} : Nivel de humedad de la zona de raíces (%).
- P_e(t) : Precipitación efectiva.
- PET : Evapotranspiración potencial.
- K_{c,j} : Coeficiente de cultivo del uso de suelo.
- RRF_i : Factor de resistencia a la escorrentía.
- f_j : Dirección preferencial del flujo.
- K_s : Conductividad de zona de raíces.
- Dw_j : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda.
- Z_{2,j} : Nivel de humedad de la zona profunda (%).
- K_d : Conductividad de zona profunda.

2.2.1.2 Modelo WEAP: Modulo Operacional

Para la modelación de cuencas, la operación del sistema se utiliza para realizar la calibración del modelo que permite integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana,

embalses) (Hervis et al., 2018). En el caso de la simulación de embalses, si estos se encuentran ubicados en el punto de cierre de la cuenca la calibración hidrológica y operacional se realiza de forma independiente. En cambio, si la ubicación de embalses se encuentra en un punto superior al punto de cierre de la cuenca la calibración operacional se debe realizar de forma conjunta a la calibración hidrológica (Centro de Cambio Global, 2009).

En el modelo WEAP se definen 4 zonas en el embalse para efectos de operación: zona de control de inundación, zona de conservación y zona de amortiguamiento que corresponde al volumen de agua disponible para el uso de los recursos hídricos, y zona inactiva, donde los recursos hídricos no se encuentran disponibles. El modelo WEAP permite simular reglas de operación de embalses, distribución de agua en distintos tipos de usuarios (consuntivos y/o no consuntivos), siendo esto de gran ventaja para el estudio de cuencas intervenidas.

En la Figura 2.4, se muestra el esquema zonas del embalse para efectos de operación en el modelo WEAP.

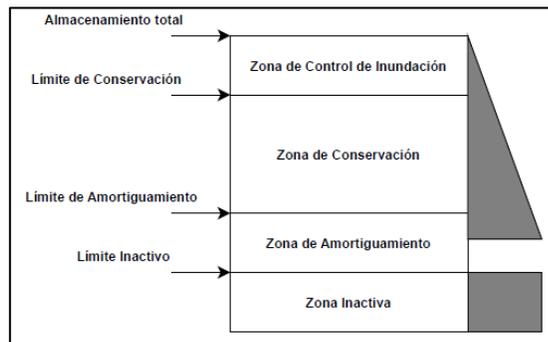


Figura 2.4 Modelo WEAP: zonas de modelación de embalses
Fuente: Adaptada de Centro de Cambio Global (2009).

2.2.2 Modelación Hidroeléctrica

La demanda eléctrica en Chile se organiza territorialmente en 3 sistemas eléctricos: el Sistema Eléctrico de Aysén (SEA), Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM) y el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Este último, hasta noviembre de 2017, estaba separado en dos subsistemas: Sistema Interconectado Central (SIC) y Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), siendo el Sistema Interconectado Central (SIC) el mayor de ellos.

La capacidad instalada, hasta diciembre del año 2022, en el Sistema Eléctrico Nacional era de 30190,48 MW, Sistema Eléctrico de Aysén (SEA) de 69,79 MW y el Sistema Eléctrico de Magallanes de 129,32 MW (CNE, 2022). La hidroelectricidad de embalse y de pasada, hasta igual fecha, representaban el 22,05% de la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional contando con una capacidad instalada de 6654,73 MW (CNE, 2022).

La operación de embalses para generación hidroeléctrica está determinada por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), que utiliza un modelo de programación de largo plazo (PLP) con la lógica de satisfacer la demanda eléctrica al mínimo costo, y cuyos

resultados alimentan a los modelos de programación de corto plazo, a escala diaria o semanal (Matus et al., 2014). El modelo PLP incluye todas las centrales para la generación de energía del Sistema Eléctrico Nacional, estableciendo metas de entrega de agua de los embalses de uso hidroeléctrico, incluyendo la cuenca del Maule.

En la Figura 2.5, se muestra mapa del Sistema Eléctrico de Chile obtenida de transparencia pública del Coordinador Eléctrico Nacional. La zona de color rojo corresponde a la zona de estudio.



Figura 2.5 Mapa Sistema Eléctrico de Chile.
Fuente: CEN, 2019.

AMEBA es un software desarrollado por la empresa SPEC Energy Consulting, permite simular la demanda eléctrica futura bajo escenarios de cambio climático desarrollado en un modelo de optimización, que incluye el modelo PLP en la modelación eléctrica, requiriendo como datos de entrada caudales afluentes de escenario de cambio climático

en las captaciones de cada central, y la integración de todo en Sistema Eléctrico Nacional (SEN), bajo la consigna minimizar costos del sistema eléctrico.

Ameba permite entender el comportamiento del mercado eléctrico y constituye un conjunto de metodologías, algoritmos computacionales y que permite orientar a la toma de decisiones en los mercados eléctricos (Bassi, 2016). AMEBA es capaz de realizar simulaciones a distintas escalas de tiempo (de minutos hasta años), además de modificar la cantidad y duración de los bloques de demanda junto con la estructura de formación de escenarios, además se pueden incluir distintos tipos de centrales, incluyendo proyectos futuros, ingresando la fecha de su puesta en marcha, para así realizar mejores proyecciones (Gómez, 2019). Además, la plataforma cuenta con una interfaz de usuario bajo una implementación web la cual permite acceso remoto, mediante cualquier computador, a los distintos modelos, casos de estudio, funcionalidades y soporte en línea (Paredes, 2017).

La Figura 2.6, se muestra topología sector laguna Maule del modelo de optimización desarrollado en AMEBA por SPEC Energy Consulting.

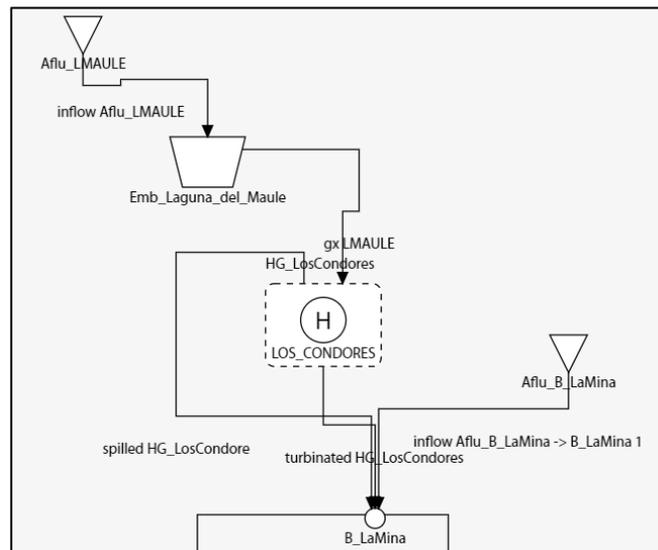


Figura 2.6 Modelo de optimización en AMEBA, sector Laguna Maule
Fuente: SPEC Energy Consulting.

En el modelo WEAP la modelación del sistema eléctrico se puede realizar de las siguientes formas:

- Nodo Sitio de Demanda: Se ingresa la demanda en unidades de volumen de agua requerido por la central hidroeléctrica. En el nodo se debe especificar que es de uso no consuntivo y valor prioridad de demanda.
- Nodo Requerimiento de caudal: Se ingresa la demanda en unidades de caudal requerido por la central hidroeléctrica y valor prioridad de demanda. En este caso, no es necesario especificar que es de uso no consuntivo, ya que la topología del sistema restituye el caudal aguas abajo de la central.

- **Nodo Central Hidroeléctrica:** Se requiere como datos de entrada caudal máximo de la central, factor de planta, eficiencia de generación, altura de agua, valor prioridad de demanda, y demanda de energía de la central.

2.3 Escenarios de Cambio Climático

El cambio climático corresponde a la variación del clima dado el aumento o disminución de las condiciones climáticas principalmente de la temperatura provocados por forzantes naturales o antropogénicos (efectos de gases invernadero, intervención humana, etc.).

Varias instituciones internacionales de investigación en ciencias atmosféricas y clima desarrollan modelos globales de clima acoplados (GCMs, por sus siglas en inglés), los cuales consideran el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales para la representación en el sistema climático (DGA, 2018). Estas plataformas de modelación son herramientas fundamentales en la evaluación del clima presente, y de escenarios de clima históricos y futuros. En particular, las proyecciones climáticas se realizan considerando supuestos de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, entre otras forzantes naturales y antrópicas (DGA, 2018).

En el Informe IPCC (2013) se presentó cuatro posibles escenarios de Concentración Representativos (RCP, por sus siglas en inglés), que definen la evolución temporal de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (DGA, 2018), que corresponden a los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, contemplando forzamientos radiativo al año 2100 de 2,6 (W/m²), 4,5 (W/m²), 6,0 (W/m²) y 8,5 (W/m²) en cada escenario.

En la Tabla 2.2, se muestran los escenarios de cambio climático del Informe IPCC 2013, y en la Figura 2.7 se muestran las trayectorias simuladas de los distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, siendo el escenario más desfavorable el RCP8.5.

Tabla 2.2 Escenarios de cambio climático.

Escenario	Forzante radiativa (W/m ²)	Tendencia del FR
RCP2.6	2,6	Decreciente para el año 2100
RCP4.5	4,5	Estable para el año 2100
RCP6.0	6,0	Creciente para el año 2100
RCP8.5	8,5	Creciente para el 2100

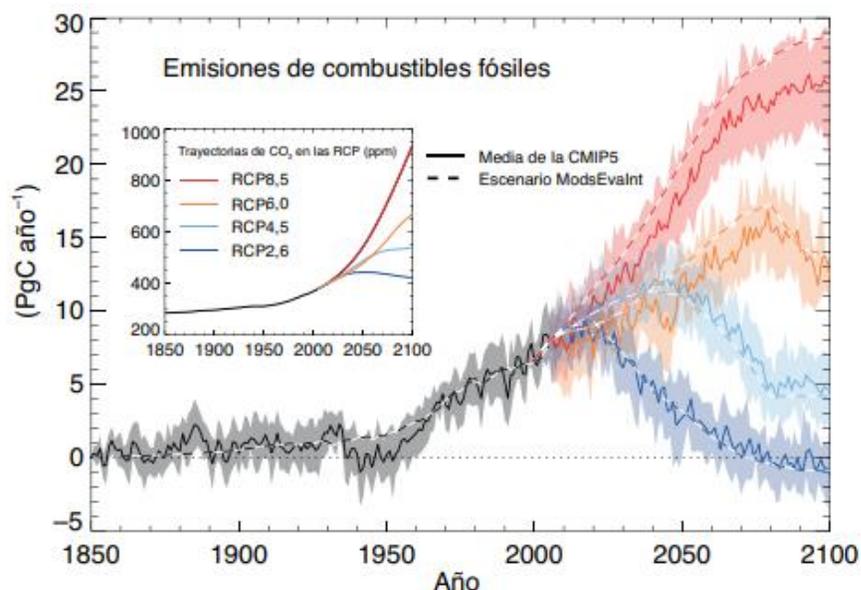


Figura 2.7 Emisiones de combustibles fósiles compatibles mediante los modelos de la CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales (PgC año^{-1}). Las líneas discontinuas representan las estimaciones históricas y emisiones de los distintos escenarios RCP calculados mediante los modelos de evaluación utilizados para definir los escenarios RCP, las líneas continuas y los pernachos muestran los resultados de los modelos del sistema Tierra de la CMIP5.

Fuente: Resumen Técnico del Quinto informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2013).

El estudio del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017, 2018, 2019) consideró el escenario de cambio climático RCP8.5, que considera una trayectoria de emisiones de GEI con tasas similares a las actuales, que busca establecer un límite superior en los efectos de cambio climático (DGA, 2018), considerando el aumento de la forzante radiativa a $8,5 \text{ W/m}^2$ para el año 2100.

A continuación, se da a conocer una breve descripción del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional para su aplicación a la obtención de caudales afluentes futuros en la cuenca del río Maule en Armerillo.

2.3.1 Actualización del Balance Hídrico Nacional

El proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) permite resolver el balance de masa, energía de los flujos y variables de estado de un sistema hidrológico. Para ello, se calibró el modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) usando el producto grillado CR2Met, como base para la obtención de las forzantes meteorológicas a una resolución de $0,05 \times 0,05$ grados (latitud, longitud).

En la etapa 2 del proyecto (DGA, 2018) se aplica la metodología en la zona de la cuenca del Maule, sintetizada en la Figura 2.8, que permite obtener forzantes meteorológicas, procesos hidrológicos como la escorrentía tanto en el periodo histórico como futuro.

La metodología adoptada para el desarrollo del Balance Hídrico Nacional consistió en los siguientes pasos (DGA, 2018):

1. Caracterización de la cuenca donde incluye los atributos físicos e hidrológicos.
2. Generación de forzantes meteorológicas.
3. Modelación hidrológica (modelo VIC) en cuencas no intervenidas y regionalización en todas las cuencas.
4. Validación de Procesos Hidrológicos.
5. Análisis del efecto de cambio climático para los escenarios seleccionados en la actualización del Balance Hídrico Nacional.

En la Figura 2.8, se muestra esquema del proceso metodológico obtenido del Informe de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017a).

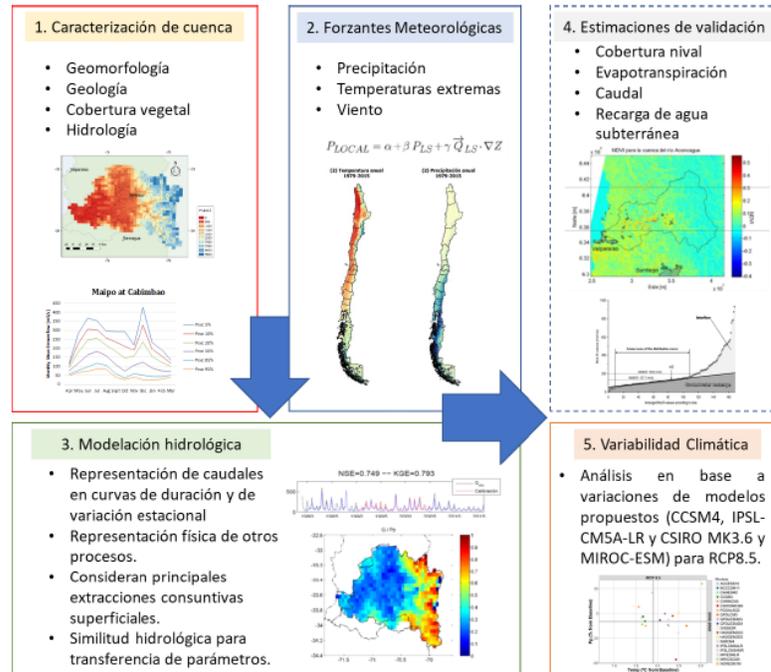


Figura 2.8 Diagrama conceptual metodología Balance Hídrico Nacional.
Fuente: DGA, 2017a.

Para el desarrollo del Balance Hídrico Nacional se utilizó el escenario de cambio climático RCP8.5 cuatro modelos de circulación global (GCM) aplicando en las series meteorológicas el método de escalamiento estadístico Quantile Delta Mapping (Cannon, 2016). Las series meteorológicas escaladas se ingresaron como datos de entrada en el modelo VIC calibrado para estudiar el efecto del cambio climático en las diferentes cuencas de Chile.

La selección de los modelos de circulación global en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) consideró los siguientes criterios:

- Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática, considera la influencia de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio sur (SAM) en la variabilidad de la precipitación en Chile.
- Sensibilidad climática, corresponde a la respuesta global del sistema climático a una cierta forzante externa, considerando típicamente el cambio en la temperatura

media del planeta como respuesta a un doblamiento en la concentración de GEI, identificándose modelos con sensibilidades bajas, medias y altas.

- Cambios regionales, considera como criterio de sensibilidad local se evaluó la variación de temperatura y precipitación en Chile entre el periodo 2030-2060 y el presente, según el escenario RCP8.5.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 2.3 se muestra los modelos de circulación global (GCMs) seleccionados para el desarrollo del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, siendo el de más baja sensibilidad climática el modelo climático CSIRO, y el de más alta sensibilidad climática el modelo climático IPSL.

Tabla 2.3 Modelos Climáticos Balance Hídrico Nacional.
Fuente: Adaptada de DGA, 2018.

Modelo	Institución	Sensibilidad Climática	Resolución Espacial
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema	1,25°
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja Moderada	1,9°
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta Moderada	2,8°
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta Extrema	1,875° x 3,75°

Parte de los análisis realizados en la etapa 2 de proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), se estimó la variación promedio entre los 4 GCMs de las variables de precipitación media anual y escorrentía natural entre los periodos 2030-2060 y 1985-2015, dando como resultado la disminución de las proyecciones de precipitación media anual y escorrentía natural en toda la zona de estudio definida en la etapa 2 del proyecto durante el periodo 2030-2060, siendo posiblemente la zona más afectada la cordillera de la región del Maule, donde se espera que aumente las pérdidas por evapotranspiración natural, aumento de temperaturas y disminución de precipitación y escorrentía.

En la Figura 2.9, se presenta la variación porcentual en diferentes cuencas de Chile entre los periodos 2030-2060 y 1985-2015, incluida la cuenca del Río Maule, se aprecia la variación promedio porcentual entre los 4 modelos GCMs la disminución de las variables de precipitación, evapotranspiración y caudal, estimando pérdidas en la escorrentía en un 22% aproximadamente en la cuenca del río Maule.

- Confiabilidad: se define como la probabilidad de no falla del sistema.
- Resiliencia: se define como la rapidez con que el sistema se recupera de una falla, volviendo al estado “normal” anterior a la ocurrencia de ésta.
- Vulnerabilidad: se define como la magnitud de la falla del déficit entre el suministro y la demanda.

Los criterios de desempeño se utilizan para evaluar la probabilidad de contar agua para satisfacer la demanda de riego. En Chile se utiliza como indicador el concepto de seguridad de riego de acuerdo a la ley 18450, que es un criterio de confiabilidad, que corresponde asegurar el 85% de la probabilidad del suministro. Para estimar la seguridad de riego se aplica la siguiente ecuación:

$$P(X= \text{No Falla}) = \frac{T - F}{T} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde,

- P : Probabilidad de no falla.
- T : Total de años simulados.
- F : Total de años fallo del sistema.

Para el concepto de seguridad de riego en Chile se define fallo cuando se cumple una de las dos condiciones:

- La entrega es menor o igual al 90% de la demanda objetivo en dos meses consecutivos.
- Cuando en un mes es menor o igual al 85% de la demanda objetivo.

Capítulo 3. Caracterización Cuenca Río Maule Alto

En el presente capítulo se caracteriza la cuenca del río Maule en Armerillo, incluye una descripción física y climática de la cuenca, usos de agua, infraestructura, principales usuarios que componen la cuenca del río Maule, y por último los aspectos operacionales para el uso compartido de los recursos hídricos de la cuenca.

3.1 Descripción Física y Climática

La cuenca del Maule tiene una superficie de 21.054 km², y cuenta con 9 subcuencas, las que a su vez se dividen en 64 subsubcuencas según el Banco Nacional del Agua (BNA) (DGA, 2020). El área de estudio corresponde a la subcuenca del Maule denominada cuenca río Maule en Armerillo (cuenca andina ubicada en la zona central de Chile) que abarca una superficie aproximada de 5469 km², sector donde se concentra gran parte de la demanda hidroeléctrica produciendo potenciales conflictos e interferencias operacionales con los usuarios de riego por el uso compartido de los recursos hídricos, principalmente el uso de la laguna Maule. El régimen de la cuenca río Maule en Armerillo es nivo-pluvial con altas precipitaciones en época de invierno y bajas precipitaciones en época de verano, registrando una precipitación media anual de 1600 mm. La temperatura media anual registrada es del orden 7,6°C con una temperatura media mínima registrada en la época de invierno del orden de 1°C, mientras que la temperatura media máxima registradas en la época de verano es del orden de 14,5°C. El análisis de precipitaciones y temperaturas se realizó en base a la información disponible del explorador climático CAMELS desde el año 1979 hasta el año 2019 utilizando la base de datos CR2MET año 2020 versión 2.0 para el análisis de precipitación y temperatura.

En la Figura 3.1, se muestra climografo de la cuenca río Maule en Armerillo entre los periodos 1979 - 2019.

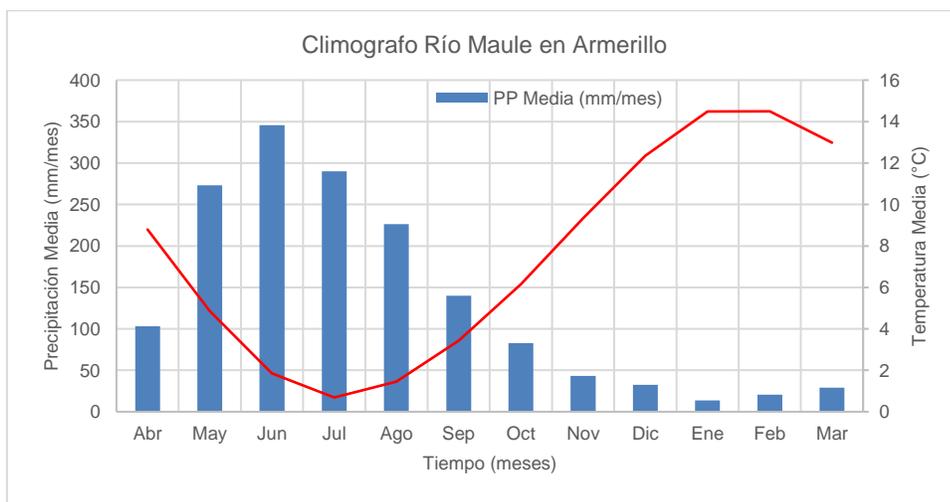


Figura 3.1 Climografo Río Maule en Armerillo (periodo de análisis 1979-2019).

En la Figura 3.2, se muestra la curva de variación estacional de los caudales medios mensuales en régimen natural del río Maule en Armerillo (Orell, 2020), se aprecia que la cuenca es de régimen nivo-pluvial con importantes aumentos de caudal en la época de invierno y primavera, observándose un caudal máximo en la temporada de deshielo.

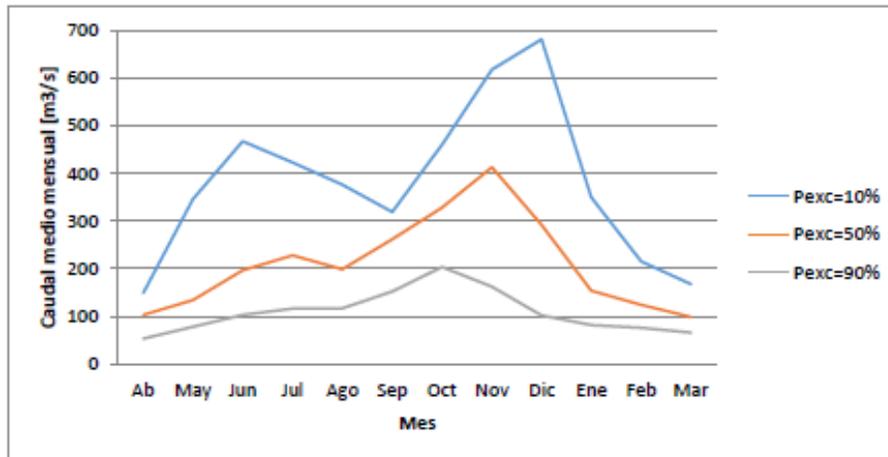


Figura 3.2 Curva de Variación Estacional Río Maule en Armerillo, periodo de análisis 1984-2018. Fuente: Orell, 2020.

El río Maule nace a partir de la laguna del Maule que se encuentra aproximadamente a 7 Km al oeste de la frontera Argentina y paralelo a la ruta Internacional CH145 que conecta la ciudad de Talca con la frontera Argentina. La longitud del río Maule es de aproximadamente 240 km desembocando en las costas marítimas de la ciudad de Constitución. Los principales afluentes del río Maule hasta el sector de Armerillo son los ríos: Puelche, Cipreses, Colorado, Claro y Melado, mientras que los embalse para suministro hidroeléctrico y de riego se encuentran la laguna del Maule (uso multipropósito), embalse la Invernada y embalse Melado ambos de uso hidroeléctrico.

En la Figura 3.3 se muestra zona de estudio para el desarrollo de la presente investigación.

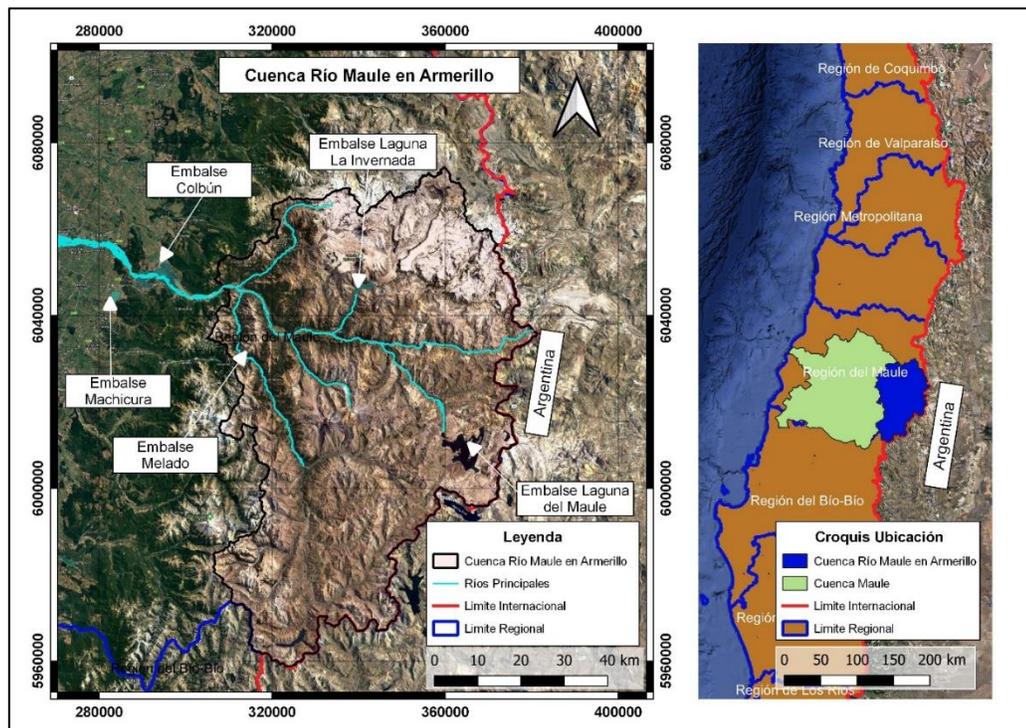


Figura 3.3 Ubicación cuenca río Maule en Armerillo.

3.2 Usos de Agua y Cobertura Vegetal

Los recursos hídricos de la cuenca del Maule y subcuenca río Maule en Armerillo se usa principalmente para suministro de la demanda hidroeléctrica y riego. En la Región del Maule, la producción instalada en centrales tipo embalse representa el 30,8% a nivel nacional, en cambio la cifra respecto a centrales de pasada es menos significativo 12,5% (DGA, 2017b). La agricultura en la región del Maule se concentra principalmente en cultivos como cereales, frutales, viñas, hortalizas y leguminosas (INE, 2021), donde la cuenca del Maule concentra cerca del 20% del área agrícola y el 15% de las exportaciones del país (Fundación Chile, 2022), siendo de vital importancia el uso compartido de los recursos hídricos de la cuenca del Maule, tanto por los usuarios consuntivos (sistema de riego) como por los usuarios no consuntivos (sistema hidroeléctrico).

En la Figura 3.4 se muestra la clasificación uso de suelo y cobertura vegetal en la Región del Maule, cuenca del Maule y cuenca río Maule en Armerillo. En la Cordillera de los Andes el uso de suelo predomina principalmente por áreas desprovistas de vegetación y en una menor cantidad por la presencia de praderas y matorrales. El uso de terrenos agrícolas se concentra principalmente en la depresión intermedia, y en la zona precordillerana, depresión intermedia y cordillera de la Costa por la presencia de bosques. La Figura 3.4 se desarrolló en base a la información pública disponible de la plataforma virtual Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE Chile).

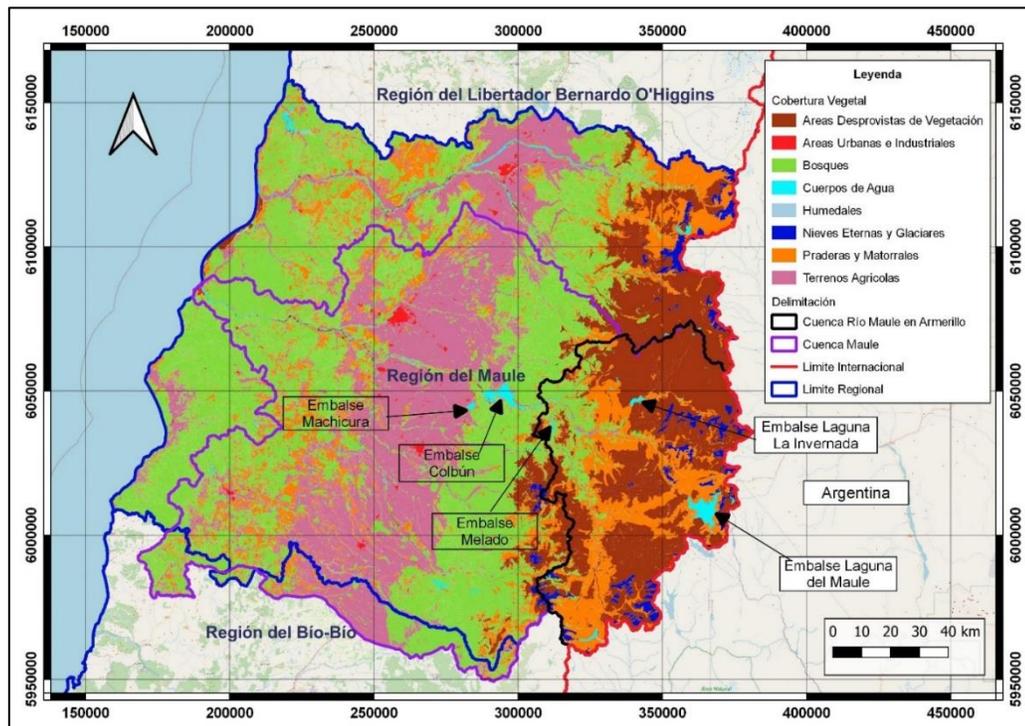


Figura 3.4 Mapa de Cobertura Vegetal y uso de suelo en la Región del Maule, cuenca del Maule y cuenca río Maule en Armerillo.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Infraestructura Hídrica

En este capítulo se presenta la infraestructura hídrica en la cuenca río Maule en Armerillo: laguna del Maule, laguna Invernada y embalse Melado. En la Figura 3.5, se muestra mapa georreferenciado cuenca río Maule en Armerillo (cuenca de color morado) con ubicación de embalses y centrales hidroeléctricas.

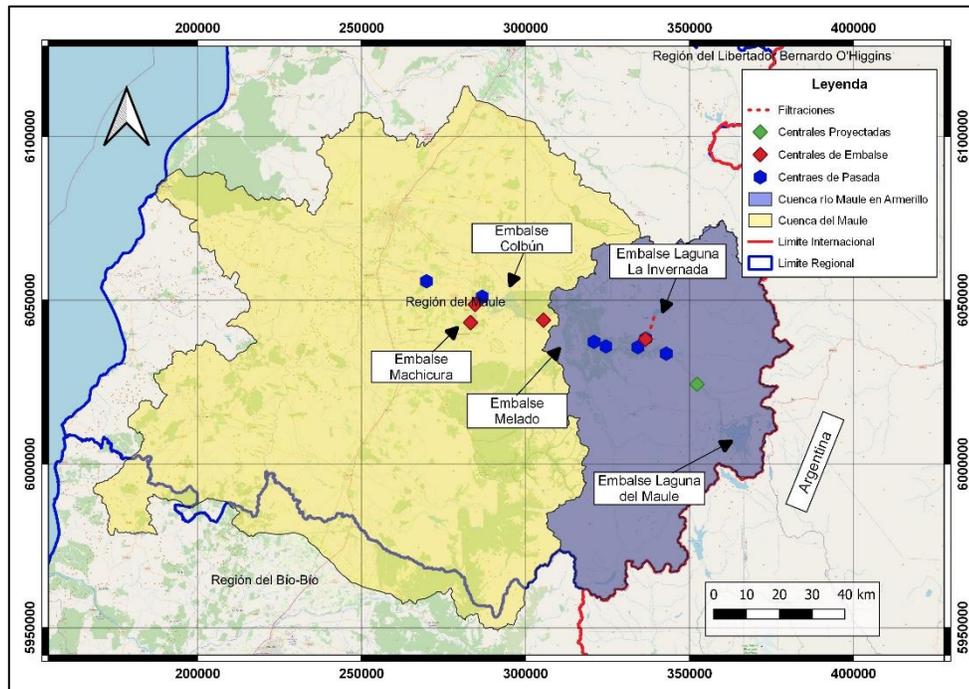


Figura 3.5 Ubicación Embalses y Centrales Hidroeléctricas cuenca río Maule.

3.3.1 Infraestructura Laguna del Maule

La laguna del Maule es un embalse de uso multipropósito de capacidad 1420 millones de m^3 , destinado para usuarios consuntivo y usuarios no consuntivos (riego e hidroelectricidad), regulada por el convenio ENDESA-Riego del año 1947, donde se establece el volumen máximo de extracción para satisfacer las demandas del sistema hidroeléctrico y el déficit de riego durante la temporada de riego/deshielo, según el colchón donde se encuentre el volumen de la laguna definido en el convenio.

Según Ingendesa (2020), se menciona que en la captación y bocatoma de la laguna Maule existe un ducto para entrega de riego y generación conduciendo los caudales que pasan tanto por las compuertas de riego y generación como por la válvula de ENDESA Chile. Desde el túnel de presión que conduce los caudales provenientes de la válvula mariposa de ENDESA Chile, se conectará la aducción proyectada de la central Los Cóndores que contará con una potencia instalada de 150 MW, con un caudal de diseño de $25 m^3/s$. La central hidroeléctrica Los Cóndores utilizará los derechos de agua de uso no consuntivo del embalse del Maule según resolución DGA 434 del año 1987, la que deberá ajustarse a los descrito en el convenio ENDESA - Riego del año 1947.



Figura 3.6 Imagen Laguna del Maule (Febrero 2023).

3.3.2 Infraestructura Laguna Invernada y Embalse Melado

La laguna Invernada y el embalse Melado son principalmente para uso de generación hidroeléctrica. La laguna Invernada posee una capacidad útil de 174 Hm^3 , suministrando agua para la generación hidroeléctrica de la central Cipreses, que cuenta con una potencia instalada de 106 MW, caudal de diseño $36 \text{ m}^3/\text{s}$. Según Ingendesa (2005), las filtraciones de la laguna Invernada y el desnivel existente entre los afloramientos de las filtraciones y la casa de máquinas de la central Cipreses, se utilizan para generación en la central Ojos de Agua (caudal de diseño $13 \text{ m}^3/\text{s}$), restituyendo su caudal en el canal aguas abajo de la central Cipreses.

En la confluencia del río Cipreses y río Maule se encuentra la central de pasada Isla, captando el agua proveniente del sector de la Invernada más la captación existente en el río Maule, restituyendo el caudal en las centrales de pasada Curillinque y Loma Alta. Las tres centrales cuentan con un caudal de diseño de $84,5 \text{ m}^3/\text{s}$ cada una.

Por otro lado, la central Pehuenche aprovecha parte de los recursos hidroeléctricos económicamente explotables de los ríos Maule y Melado y cuya puesta en marcha se produce en el año 1991 (Arias, 2011). La central Pehuenche se encuentra aguas abajo del embalse Melado (capacidad del embalse 133 Hm^3) que cuenta con una potencia instalada de 570 MW, caudal de diseño $300 \text{ m}^3/\text{s}$, restituyendo su caudal aguas abajo de la estación fluviométrica río Maule en Armerillo.

3.4 Evolución Histórica de Embalses

En este capítulo, se presenta la evolución histórica de los embalses de la cuenca río Maule en Armerillo (periodo 2003-2021) del embalse Laguna del Maule que es de uso multipropósito para entregas de riego e hidroelectricidad y laguna Invernada y embalse Melado principalmente de uso hidroeléctrico. En la Figura 3.7, se muestra la evolución

histórica del volumen de agua de la laguna del Maule (Figura 3.7.a), laguna Invernada (Figura 3.7.b) y embalse Melado (Figura 3.7.c) desarrollada en base a la información pública de la Dirección General de Aguas y del Coordinador Eléctrico Nacional.

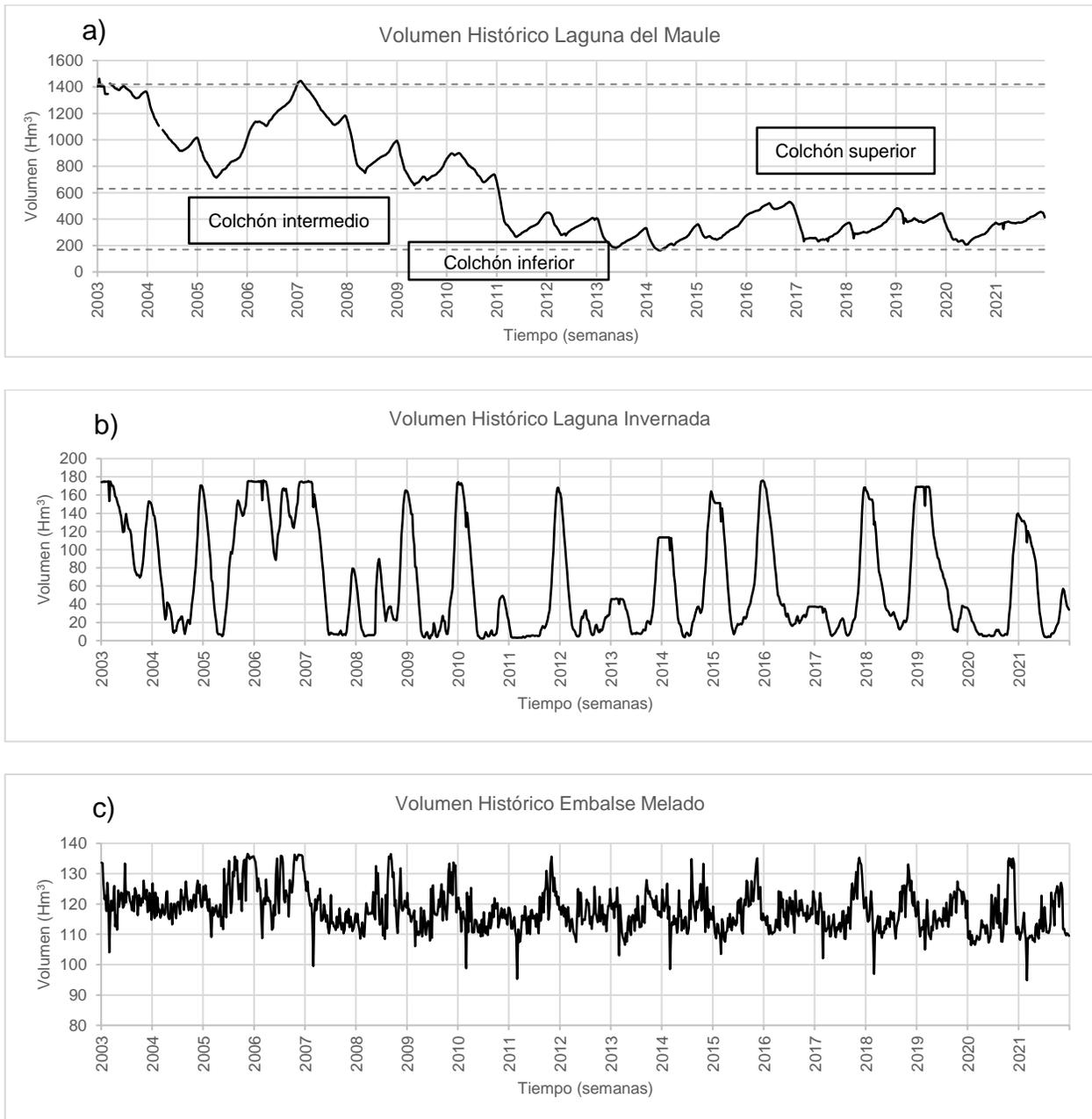


Figura 3.7 Volumen de agua evolución histórica: a) laguna del Maule, b) laguna Invernada y c) embalse Melado, periodo 2003-2021 (escala semanal).

De la Figura 3.7.a, se aprecia el descenso del volumen de agua de la laguna del Maule en el año 2011 desde el colchón superior al colchón intermedio cuando el embalse comenzó a experimentar los efectos de escasez de agua en el periodo de la megasequía de Chile, manteniéndose el volumen de agua de la laguna del Maule en el colchón intermedio hasta la actualidad. En la laguna Invernada (Figura 3.7.b) y el embalse Melado (Figura 3.7.c), no se aprecia mayores cambios en la evolución histórica de volumen de agua, no obstante, se aprecia que la laguna Invernada (Figura 3.7.b) alcanza volúmenes

máximos en la época de primavera y verano (periodo de deshielo), y volúmenes mínimos en la época de otoño e invierno. En el caso del embalse Melado (Figura 3.7.c), se aprecia que alcanza volúmenes máximos en la época de invierno-primavera, y volúmenes mínimos en la época de verano.

3.5 Usuarios Cuenca Río Maule

En Chile, quienes gestionan el agua son las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA), es decir, es en estas organizaciones donde se toman las decisiones, especialmente respecto a la distribución del recurso hídrico (Fuster, 2013). Según el Código de Aguas, (Artículo 266, 2022) “Las juntas de vigilancia tienen por objeto administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho sus miembros en las fuentes naturales, explotar y conservar las obras de aprovechamiento común y realizar los demás fines que les encomiende la ley. Podrán construir, también, nuevas obras relacionadas con su objeto o mejorar las existentes, con autorización de la Dirección General de Aguas”.

Los principales usuarios de la cuenca del río Maule la componen el sector hidroeléctrico (Colbún S.A., ENEL y Pehuenche S.A.) y el sistema de riego.

3.5.1 Sistema de Riego

Según DGA (2017b), la región del Maule es la tercera región de Chile con mayor cantidad de Organizaciones de Usuarios (17,3% del total Nacional), siendo las Juntas de Vigilancia que componen los usuarios más relevantes. El agua de la cuenca del río Maule es administrada y distribuida por la Junta de Vigilancia del Río Maule. Según resolución DGA N°2335/07, que corresponde a la Modificación de Estatutos de la “Junta de Vigilancia del Río Maule Primera Sección” (DGA, 2007), los usuarios consuntivos de la cuenca río Maule se compone principalmente por:

- 38 canales que corresponden a la ribera sur del río Maule, con un total de derechos de agua de 68655,08 acciones.
- 29 canales en la ribera norte del río Maule, con un total de derechos de agua de 73692,95 acciones.

En anexo A, se presenta el detalle de los usuarios consuntivos que componen el sistema de riego de la cuenca del río Maule regulada en el sector de Armerillo, sector donde se realiza el control, regulación y distribución de los recursos hídricos para satisfacer la demanda de riego, administrada por la Junta de Vigilancia del río Maule.

3.5.2 Sistema Hidroeléctrico

Los usuarios no consuntivos en la cuenca del río Maule corresponden a 12 centrales existentes y una central en construcción (Tabla 3.1), de embalse y pasada, con una potencia nominal instalada de 1548 MW en la cuenca del río Maule. De las 12 centrales hidroeléctricas, 7 centrales se encuentran dentro de la zona de estudio y 5 centrales se encuentran aguas abajo, en torno al embalse Colbún.

En la Figura 3.8, se muestra un esquema del sistema operacional en la cuenca Río Maule en Armerillo y sector de Colbún.

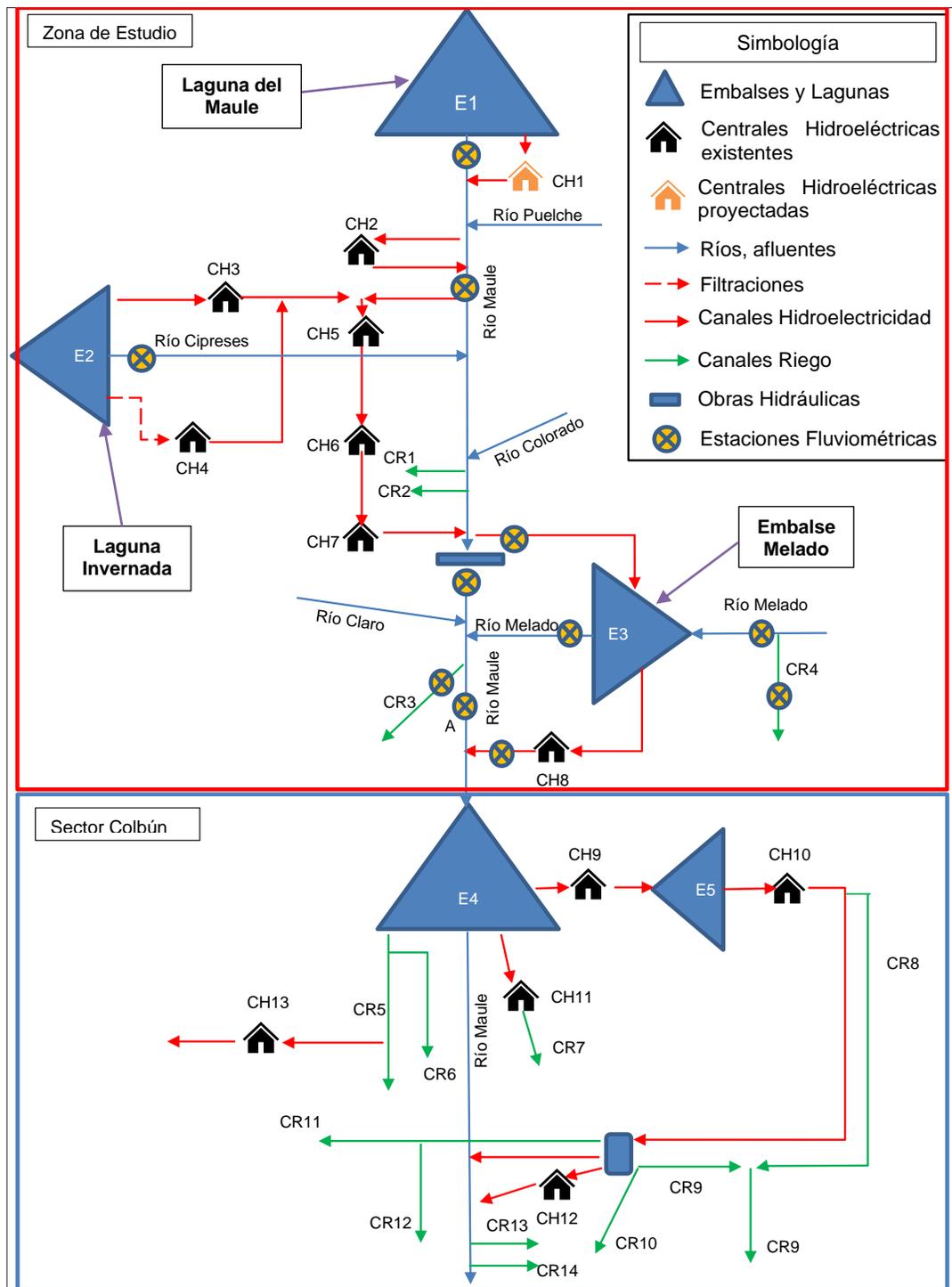


Figura 3.8 Diagrama Unifilar Sistema Riego – Hidroelectricidad.

Tabla 3.1 Centrales hidroeléctricas Cuenca del Maule.

Sector	Sigla	Nombre Central	Tipo	Caudal (m ³ /s)	Potencia (MW)	Empresa	Puesta en Servicio
Cuenca Río Maule en Armerillo	CH1	Los Cóndores	Embalse	25	150	ENEL	En Construcción
	CH2	La Mina	Pasada	60	34	Colbún S.A.	2017
	CH3	Cipreses	Embalse	36	106	ENEL	1955
	CH4	Ojos de Agua	Pasada	13	9	ENEL	2008
	CH5	Isla	Pasada	84	70	ENEL	1963
	CH6	Curillinque	Pasada	84	40	ENEL	1993
	CH7	Loma Alta	Pasada	84	89	ENEL	1997
	CH8	Pehuenche	Embalse	300	570	ENEL	1991
Aguas Abajo Cuenca Río Maule en Armerillo	CH9	Colbún	Embalse	280	474	Colbún S.A.	1985
	CH10	Machicura	Embalse	280	95	Colbún S.A.	1985
	CH11	Chiburgo	Pasada	20	19,4	Colbún S.A.	2007
	CH12	San Ignacio	Pasada	180	37	Colbún S.A.	1996
	CH13	San Clemente	Pasada	17	5,9	Colbún S.A.	2010

En Anexo B, se presenta el detalle nodos y líneas del sistema de la cuenca río Maule en Armerillo del diagrama unifilar de la Figura 3.8.

3.6 Aspectos Operacionales Cuenca Río Maule en Armerillo

El uso de los recursos hídricos de la cuenca del río Maule en Armerillo para el sistema de riego e hidroelectricidad es regulada por los derechos de agua para los usuarios consuntivos y no consuntivos, y por el Convenio Endesa-Riego del año 1947 que establece las condiciones del uso de los recursos hídricos de la laguna del Maule para riego e hidroelectricidad.

3.6.1 Convenio Endesa Riego 1947

El convenio Endesa Riego se desarrolló con el objetivo de obtener un mejor aprovechamiento de las aguas del río Maule, integrando el uso de los recursos hídricos de la laguna del Maule, de acuerdo con los requerimientos y necesidades del sistema de riego e hidroelectricidad.

En la Figura 3.9, se presenta resumen de los aspectos principales del convenio Endesa-Riego del año 1947 para uso hidroeléctrico y riego, donde el volumen total de la laguna Maule se subdivide en tres colchones: superior, intermedio e inferior.

	Volumen	Riego	Hidroelectricidad*
1420 Hm ³	V= 790 Hm ³ Colchón Superior	-Uso Déficit de Riego. -Volumen máximo temporada riego 800 Hm ³ .	-Uso déficit de riego (sin indemnización). -Volumen adicional = 250 Hm ³ . -Economías de Agua laguna Invernada -Volumen compensación máximo 350 Hm ³ .
630 Hm ³	V= 460 Hm ³ Colchón Intermedio	Uso déficit de riego hasta un volumen máximo para la temporada de riego del 80 % de la reserva ordinaria más el 80% de los afluentes.	-Uso déficit de riego (sin indemnización). -Cuota adicional uso hidroeléctrico con un volumen máximo de generación del 20% de la reserva ordinaria más el 20% de los afluentes.
170 Hm ³	V= 170 Hm ³ Colchón Inferior	Uso común acuerdo entre Endesa y DOH.	Uso común acuerdo entre Endesa y DOH.
0 Hm ³			

*: - Caudal medio mensual = 25 m³/s.
- Caudal medio diario = 30 m³/s.

Figura 3.9 Resumen Convenio Endesa Riego (1947), Laguna del Maule.

A continuación, se describe en mayor detalle el uso del convenio ENDESA-Riego (1947) para usos de riego e hidroelectricidad.

3.6.1.1 Sistema de Riego

Para el sistema de riego, el aspecto principal del Convenio Endesa-Riego del año 1947 es poder suministrar, desde la laguna del Maule, el déficit de riego si no se cuenta con la disponibilidad de los recursos hídricos en el río Maule para satisfacer su demanda. Para las entregas de déficit de riego desde la laguna del Maule se debe cumplir las siguientes restricciones:

- Si el nivel de agua se encuentra en la porción superior de la laguna del Maule podrá satisfacer el déficit de riego hasta una cuota máxima de 800 Hm³ durante la temporada de riego.
- Si el nivel de agua se encuentra en la porción intermedia de la laguna denominada reserva ordinaria, podrá satisfacer el déficit de riego hasta una cuota máxima del 80% de la reserva ordinaria más el 80% de los afluentes de la laguna del Maule.
- Si el nivel de agua se encuentra en la porción inferior de la laguna denominada reserva extraordinaria, no se podrá satisfacer el déficit de riego.

3.6.1.2 Sistema Hidroeléctrico

Para el sistema hidroeléctrico el aspecto principal del Convenio Endesa-Riego del año 1947 es poder suministrar desde la laguna del Maule la demanda requerida por el sistema hidroeléctrico, bajo las siguientes restricciones:

- La empresa eléctrica Endesa podrá utilizar desde la laguna del Maule, las aguas correspondientes al déficit de riego sin indemnización a favor de los usuarios consuntivos.
- Si el nivel de agua se encuentra en la porción superior de la laguna del Maule podrá hacer uso de una cuota adicional de 250 Hm³ por año calendario.
- Si el nivel de agua se encuentra en la porción intermedia de la laguna, denominada reserva ordinaria, podrá hacer uso del déficit de riego más una cuota adicional con un volumen máximo del 20% de la reserva ordinaria más el 20% de los afluentes de la laguna Maule.
- Si el nivel de agua se encuentra en la porción inferior de la laguna denominada reserva extraordinaria, no podrá hacer uso de los recursos hídricos para la demanda hidroeléctrica.
- Las extracciones para generación de energía eléctrica no podrán exceder un gasto medio mensual de 25 m³/s, ni de un gasto medio diario de 30 m³/s.
- Si Endesa ha extraído de su cuota adicional para energía eléctrica menos de 250 Hm³ durante uno o más años calendario (porción superior de la laguna), podrá hacer uso de un volumen de compensación extrayendo mayores cantidades de agua en los años siguientes, hasta un máximo de 350 Hm³, que podrá ser utilizada como cuota suplementaria a lo largo de uno o más años calendarios. La disponibilidad del volumen de compensación se realiza si la laguna del Maule se encuentra en la porción superior.
- Si la laguna del Maule no es capaz de suplir el déficit de riego, el sistema de riego podrá utilizar los recursos hídricos de la laguna Invernada durante el tiempo que sea necesario o cuando los gastos del río Maule y sus afluentes (sin incluir la laguna del Maule) tenga un gasto inferior a 250 m³/s. En caso, de que la laguna Invernada entregue un caudal mayor a los afluentes de la laguna Invernada, el exceso de aguas será acumulado en la laguna Maule como economías de agua la cual que se podrá usar solamente si el volumen de la laguna del Maule se encuentra en el colchón superior.

3.6.2 Resoluciones DGA

A partir de la reforma del código de aguas en el año 1981, se generaron resoluciones con el fin de regularizar los derechos de agua de uso consuntivo y no consuntivo. En el caso de la cuenca del río Maule los derechos de agua de uso consuntivo corresponden aquellos derechos que son concedidos al titular (principalmente a usuarios de riego) que permiten consumir la totalidad de sus derechos, en cambio, los derechos de uso no consuntivo obligan al titular (sistema hidroeléctrico) a devolver el agua en la misma cantidad y calidad, después de hacer uso de los recursos hídricos. A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta resumen de los principales derechos de agua de uso consuntivo (riego) y de uso no consuntivo (hidroelectricidad) en la cuenca del río Maule en Armerillo.

Tabla 3.2 Principales Aspectos legales cuenca río Maule

Documento	Antecedentes
Resolución DGA 105/83	<p>Se establece los derechos de agua de uso no consuntivos, permanente y continuo en río Maule a favor de Endesa (actualmente Colbún S.A) por un caudal medio anual de 190 m³/s, con un máximo de 280 m³/s, dando viabilidad a la construcción de los embalses Colbún y Machicura.</p> <p>Adicionalmente se establecen los derechos de agua de uso consuntivo del río Maule, midiendo la disponibilidad de los recursos hídricos como la suma de caudales medida en la estación fluviométrica del río Maule en Armerillo más las captaciones aguas arriba de la estación, incluido el canal Melado en los Hierros. La resolución DGA N°105/83, establece que los derechos de agua deberán ser respetados si en el río Maule exista la disponibilidad equivalente a ellos, incluido el efecto de la aplicación del convenio Endesa - Riego del año 1947.</p>
Resolución DGA 312/84	<p>Establece los derechos de agua de uso no consuntivos, permanente y continuo a favor de Endesa (Central Hidroeléctrica Pehuenche) por un caudal de 140 m³/s del río Maule en canal aducción a embalse Melado, y un caudal promedio anual de 104,5 m³/s en río Melado con un caudal máximo instantáneo de 300 m³/s.</p>
Resolución DGA 434/88	<p>Establece los derechos de agua de uso no consuntivos, permanente y continuo a favor de Endesa desde la laguna Maule con un caudal medio mensual 25 m³/s y caudal máximo de 30 m³/s como caudal medio diario. Los derechos de agua deberán ajustarse a lo dispuesto en el Convenio Endesa - Riego del año 1947, que regula la operación de la laguna Maule. Según el Estudio de Impacto Ambiental "Proyecto Central Hidroeléctrica Los Cóndores" los derechos de agua se utilizarán a favor de la central que se encuentra en construcción.</p>
Expediente ND-0702-31 (resolución DGA 409/88)	<p>Se establecen los derechos de agua de uso no consuntivos, permanente y continuo a favor de las centrales de pasada Curillinque con un caudal de hasta 84 m³/s provenientes del río Maule y Cipreses. La central Loma Alta podrá aprovechar los recursos hídricos provenientes de la Central Curillinque y un caudal de hasta 20 m³/s del río Colorado.</p>
Resolución DGA 609/67	<p>Se establecen los derechos de agua a favor de Endesa de uso no consuntivo desde el río Cipreses por un caudal de 48 m³/s, y del río Maule por un caudal de 42 m³/s. Los derechos de agua son usados a favor de la central de pasada Isla de capacidad 84 m³/s.</p>

3.6.3 Disponibilidad Recursos Hídricos Cuenca Río Maule en Armerillo

La disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca río Maule se realiza en el sector de Armerillo para poder satisfacer la demanda de riego. En la actualidad el caudal reconstituido en Armerillo se estima según oficio DGA N°681 del 28 de Junio de 2013 que establece como la sumatoria de los caudales registrados en la estación fluviométrica río Maule en Armerillo, canales de riego aguas arriba del sector de Armerillo, canal de

evacuación central hidroeléctrica Pehuenche y variación de volumen del embalse Melado.

La Figura 3.10 corresponde a un diagrama unifilar resumido de la cuenca río Maule en Armerillo, donde se muestra los principales canales y estación fluviométrica para estimar la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca para el sistema de riego.

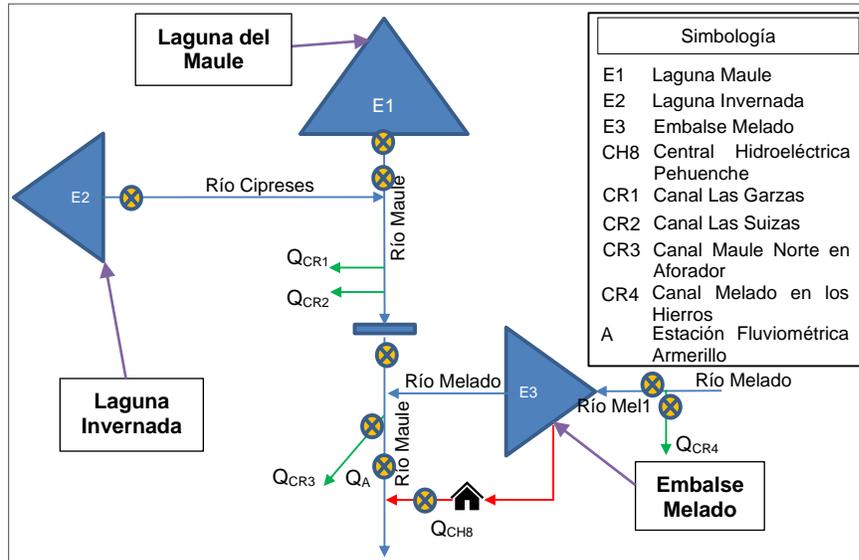


Figura 3.10 Diagrama Unifilar Balance Sistema Riego.

De los antecedentes proporcionados a través de atención ciudadana por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), región del Maule, desde el año 1996 se han establecido las siguientes metodologías para estimar el caudal reconstituido en Armerillo que corresponden a las siguientes expresiones:

- Oficio **DGA N°158 del 02 de Febrero de 1996.**

$$Q_{RA} = Q_{CR1} + Q_{CR2} + Q_{CR3} + Q_{CR4} + Q_{RM1} + Q_{CH8} \pm Q_{\Delta E3} \quad (3.1)$$

Donde,

$$Q_{\Delta E3} = \pm \frac{Vol. Embalse_{Dia 2} - Vol. Embalse_{Dia 1}}{86400} \quad (3.2)$$

- Oficio **DGA N°601 del 08 de Mayo de 2008**, función utilizada en el modelo cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca del Maule (2020):

$$Q_{RA} = Q_{CR1} + Q_{CR2} + Q_{CR3} + Q_{Cr4} + Q_{RM1} + Q_{CH8} + Q_{RMel1} \quad (3.3)$$

- Oficio **DGA N°681 del 28 de Junio de 2013**, función utilizada en la actualidad para estimar el caudal reconstituido en Armerillo (función usada en el modelo WEAP mejorado):

$$Q_{RA} = Q_{CR1} + Q_{CR2} + Q_{CR3} + Q_{CR4} + Q_A + Q_{CH8} + Q_{\Delta E3} \quad (3.4)$$

Donde,

- Q_{RA} : caudal reconstituido en Armerillo.
- Q_{CR1} : caudal canal las Garzas.
- Q_{CR2} : caudal canal Las Suizas.
- Q_{CR3} : caudal canal Maule Norte en Aforador.
- Q_{CR4} : caudal canal Melado en Los Hierros.
- Q_A : caudal estación fluviométrica río Maule en Armerillo.
- Q_{CH8} : caudal canal evacuación central Pehuenche.
- $Q_{\Delta E3}$: variación de volumen embalse Melado en términos de caudal.
- Q_{RMel1} : caudal río Melado en El Salto (estación fluviométrica) ubicada agua abajo del canal Melado en Los Hierros. El caudal río Melado en El Salto solo se usó para estimar el caudal reconstituido en Armerillo según lo indicado en el oficio DGA N°601 del 08 de Mayo de 2008.

Nota: La suma de los caudales canal las Garzas (Q_{CR1}) y el canal Las Suizas (Q_{CR2}) se supone/considera igual a 1 m³/s.

Capítulo 4. Descripción Modelo WEAP cordillera del PEGH

El Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule fue desarrollado en el año 2020 con el objetivo principal de analizar la disponibilidad hídrica de los recursos superficiales y subterráneos mediante el desarrollo de dos modelos de simulación abarcando el período histórico (1985 - 2015) mediante la calibración y validación de los modelos de simulación con los datos históricos de la cuenca, y el período futuro (2016 - 2050) con la incorporación del escenario de cambio climático RCP8.5 (modelo climático CSIRO-Mk3-6-0), proponiendo una cartera de acciones que permita suplir el déficit de agua en la cuenca del Maule mediante soluciones basada en infraestructura. La modelación de la cuenca Maule se subdividió en 2 subsistemas denominados “modelo cordillera” que abarco la zona alta de la cuenca Maule (laguna Maule, laguna Invernada y embalse Melado), y el segundo subsistema se denominó “modelo de valle y costa” que abarco la zona aguas abajo del modelo cordillera.

En la Figura 4.1 se muestra subdivisión de la cuenca del Maule de los modelos de simulación desarrollados en el Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020).

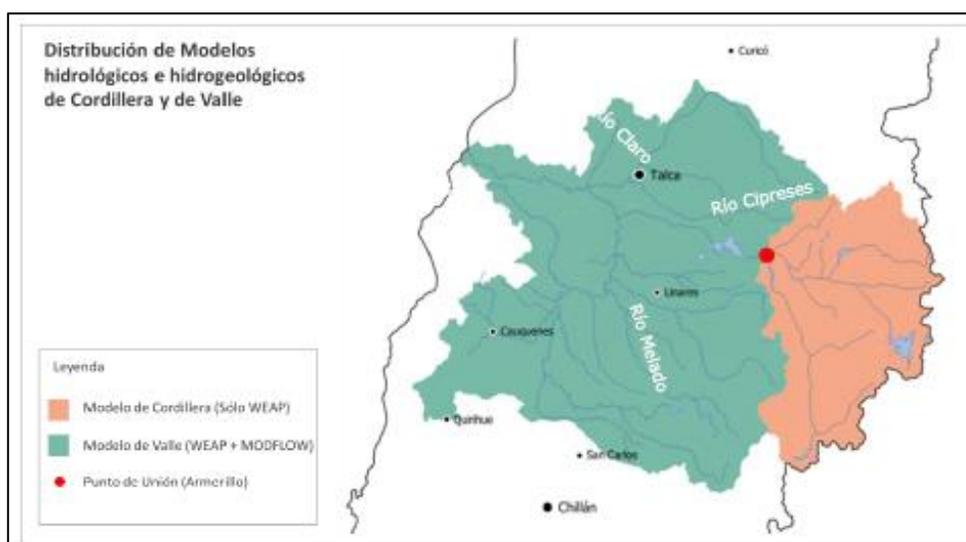


Figura 4.1 Modelos de Simulación PEGH Maule
Fuente: DGA, 2020.

De la Figura 4.1, se identifica que la cuenca de color verde corresponde al “modelo valle y costa” y la cuenca de color naranja al “modelo cordillera”. El presente estudio utilizó como modelo base mejorando el modelo WEAP cordillera (modelo WEAP original) para el análisis futuro de la cuenca río Maule en Armerillo, principalmente de la laguna del Maule que es de uso multipropósito.

A continuación, se da a conocer los aspectos principales del modelo WEAP original desarrollado en el Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule.

4.1 Modelo WEAP cordillera (Modelo WEAP original)

El modelo WEAP cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica abarcó la zona alta de la cuenca Maule denominada cuenca del río Maule en Armerillo que corresponde a un modelo hidrológico-operacional. En el módulo hidrológico (modelo precipitación-escorrentía) se ingresaron forzantes climáticas y parámetros de uso de suelo para la calibración del modelo, mientras que en el módulo operacional se ingresaron reglas de operación para la simulación de embalses, entregas de riego, entregas y generación de hidroelectricidad. La simulación del modelo WEAP original se realizó en escala semanal, tanto en el periodo histórico (1985-2015) como en el periodo futuro (2016-2050).

4.1.1 Modelo WEAP original: Modulo Hidrológico

El modelo WEAP original se desarrolló mediante la subdivisión de la cuenca río en Armerillo en 12 subcuencas, cada subcuenca se subdividió en bandas de elevación, y en cada banda de elevación se ingresaron como datos de entrada forzantes meteorológicas, principalmente datos temperatura y precipitación. A partir de la estación meteorológica en Armerillo (datos de precipitación, código estación BNA: 07320002-4) y de la estación meteorológica Colorado (datos de temperatura, código estación BNA: 07378003-9) se extrapolaron los datos en las 83 bandas de elevación definidas mediante diferencia de alturas que compone el modelo WEAP original mediante un factor de ajuste distribuido en toda la cuenca para el ingreso de las forzantes climáticas en cada banda de elevación (nodo catchment). En el modelo WEAP original se ingresaron en cada banda de elevación parámetros para la calibración del modelo, considerando la subdivisión de cada banda de elevación en diferentes tipos de suelo como: áreas desprovistas de vegetación, bosques, cuerpos de agua, plantaciones forestales, praderas y matorrales, terrenos agrícolas y áreas urbanas. Una vez calibrado el modelo, se realizó la modelación del periodo futuro entre los años 2016 hasta el año 2050. La modelación del periodo futuro se realizó mediante la incorporación del escenario RCP8.5 del modelo climático CSIRO-Mk3-6-0 que corresponde a un modelo global de clima acoplado (GCM, por sus siglas en inglés), ingresando como datos de entrada las forzantes climáticas escaladas en el modelo WEAP original.

En la Figura 4.2 se muestra subcuencas de la cuenca río Maule en Armerillo denominadas Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) y bandas de elevación generadas en la cuenca río Maule en Armerillo. En la Tabla 4.1 se muestra resumen de bandas de elevación generadas por subcuenca del modelo WEAP original.

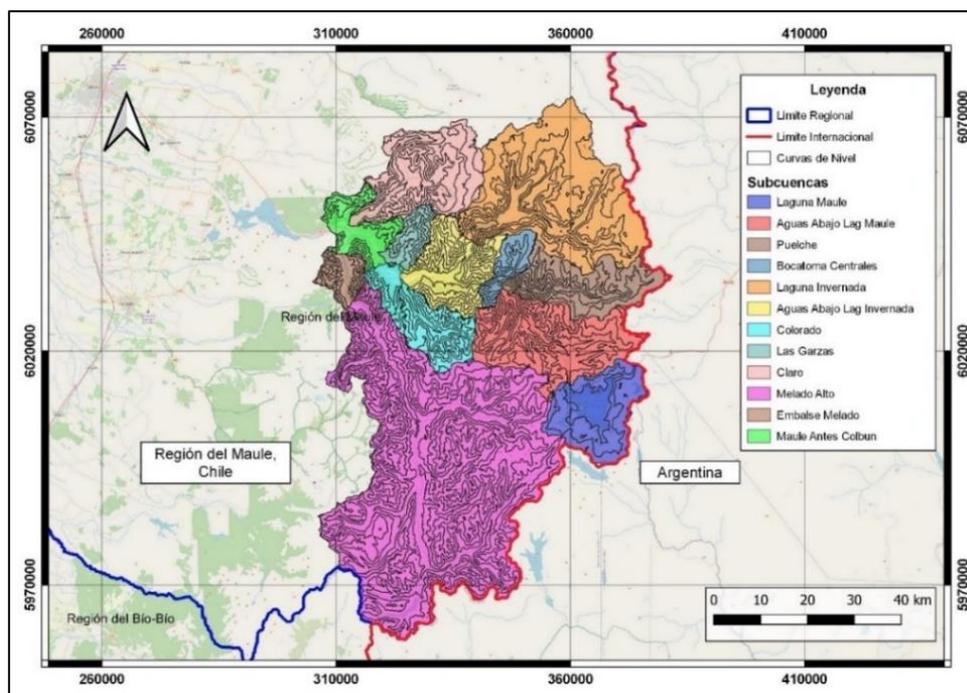


Figura 4.2 Unidades de respuesta Hidrológica y Bandas de Elevación.

Tabla 4.1 URH y Bandas de Elevación.

URH	Bandas de Elevación	Área (Km ²)
Laguna del Maule	4	307,94
Aguas Abajo Laguna del Maule	7	475,23
Puelche	7	300,28
Bocatoma Centrales	8	87,37
Laguna Invernada	7	871,68
Las Garzas	7	84,24
Claro	8	400,08
Melado Alto	8	2181,94
Embalse Melado	5	87,21
Aguas Abajo Laguna Invernada	8	272,54
Colorado	8	248,18
Maule Antes Colbun	6	156,38
Total	83	5473,07

4.1.2 Modelo WEAP original: Modulo Operacional

En el modelo WEAP original en la cuenca río Maule en Armerillo se realizaron las simulaciones de los embalses de la laguna del Maule, laguna Invernada y embalse Melado, describiéndose a continuación:

4.1.2.1 Simulación Laguna del Maule

La simulación entregas para uso de riego e hidroeléctrica de la laguna Maule se realizó aplicando las reglas de operación del convenio ENDESA-Riego del año 1947, para

suministrar el déficit de riego generado en el sector de Armerillo y las entregas al sistema hidroeléctrico.

En el modelo WEAP original el déficit de riego para las entregas de la laguna del Maule se estimó de la diferencia entre los derechos de agua del sistema de riego y el caudal reconstituido en Armerillo. En el modelo WEAP original para estimar el caudal reconstituido en Armerillo se utilizó la función del oficio DGA N°601 del 08 de mayo de 2008, encontrándose vigente por un periodo de 5 años. No obstante, en el modelo WEAP modificado la estimación del caudal reconstituido en Armerillo se reemplazó por la función indicada en el oficio DGA N°681 del 28 de Junio de 2013, encontrándose vigente hasta la actualidad.

La demanda hidroeléctrica de la laguna del Maule se obtuvo mediante la multiplicación de un factor semanal definido en el modelo WEAP original, multiplicado por el volumen disponible de hidroelectricidad durante el año calendario. La suma de los factores de demanda semanal equivale al 100% durante el año calendario. El volumen disponible de hidroelectricidad para el año calendario se estimó según lo definido en el artículo 4 y 5 de convenio ENDESA Riego del año 1947.

Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado desde el año 2024 hasta el término del periodo de simulación (2046), se incorporó la demanda eléctrica central Los Cóndores de la laguna del Maule obtenida de un modelo de optimización, desarrollado en AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting, bajo las restricciones del convenio ENDESA Riego del año 1947. Al incorporar la demanda eléctrica central Los Cóndores en el modelo WEAP modificado se reemplazó las funciones del modelo WEAP original para obtener la demanda eléctrica de la laguna del Maule.

En anexo F, se muestra las funciones utilizadas en el modelo WEAP original para la simulación del embalse Laguna del Maule, aplicando las reglas de operación del convenio ENDESA-Riego del año 1947.

4.1.2.2 Simulación Laguna Invernada y embalse Melado

La laguna Invernada y embalse Melado corresponden a embalses de uso hidroeléctrico. Para suministrar los recursos hídricos de la laguna Invernada a la central de embalse Cipreses y a la central de pasada Ojos de Agua se realizó aplicando reglas matemáticas definido en el modelo WEAP original. En cambio, las entregas del embalse Melado a la central hidroeléctrica Pehuenche, consideró la capacidad máxima de la central y la demanda requerida obtenida mediante funciones de potencia y eficiencia de la central Pehuenche.

En el modelo WEAP modificado se realizó modificación del esquema operacional de la laguna Invernada para poder integrar la demanda futura del sistema eléctrico bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, de distintos modelos climáticos (CSIRO, CCSM4, IPSL y MIROC), según se indica en el Capítulo 5.

4.1.2.3 Simulación Centrales Hidroeléctricas

El modelo WEAP original en la cuenca río Maule en Armerillo considera la simulación de 6 centrales hidroeléctricas, que corresponden a 2 centrales de embalse (central Cipreses y central Pehuenche), y 4 centrales de pasada (Ojos de agua, La Isla, Curillinque y Loma Alta). Las centrales de pasada la Isla, Curillinque y Loma Alta considera el caudal turbinado proveniente de la central hidroeléctrica Cipreses, central Ojos de Agua, y la captación del río Maule de capacidad máxima 42 m³/s, restituyendo el caudal aguas abajo de la central hidroeléctrica Loma Alta.

En el modelo WEAP modificado se ingresó las centrales de pasada La Mina y la central hidroeléctrica Los Cóndores, donde la central Los Cóndores dispondrá de los recursos hídricos de la laguna del Maule bajo las reglas de operación del convenio ENDESA-Riego del año 1947.

4.1.2.4 Simulación Canales de Riego

En el modelo WEAP original las simulaciones de los canales de riego que se encuentran entorno al sector de Armerillo, se estimaron considerando el mínimo valor entre el caudal Reconstituido WEAP Mejorado definido en el modelo WEAP original (ver anexo F) y los derechos de agua, multiplicado por un factor que corresponde al porcentaje de derecho de agua de cada canal de riego.

En el modelo WEAP modificado los caudales en canales de riego se estimó como el mínimo valor entre los derechos de agua y el caudal disponible en la captación de cada canal, multiplicado por el porcentaje de derecho de agua que le corresponde a cada canal de riego.

A continuación, en la Figura 4.3 se muestra el modelo WEAP original desarrollado en el Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule Alto.

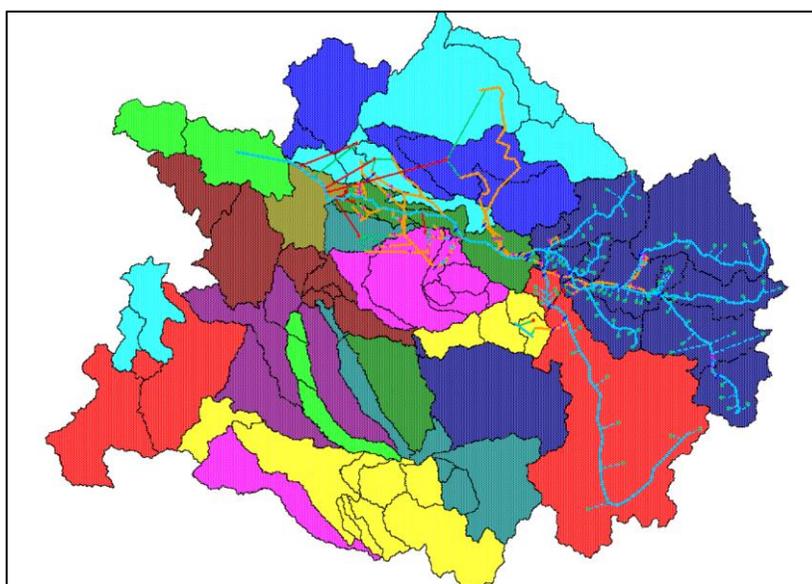


Figura 4.3 Modelo WEAP original del PEGH Maule (DGA, 2020).

4.1.3 Simulaciones modelo WEAP cordillera

En el modelo WEAP original se generó simulaciones que corresponden al periodo histórico (modelo calibrado) y periodo futuro bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelo climático CSIRO), generando distintas alternativas propuestas en el PEGH Maule.

A continuación, se describe las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original:

- Periodo Current Accounts: corresponde al primer año de simulación denominado periodo cuentas corrientes. En el periodo current accounts se ingresó datos de entrada forzantes meteorológicas, parámetros, demandas, etc., para poder realizar la simulación del primer año. Los siguientes años la simulación se realizó con la información ingresada en los escenarios generados en el modelo WEAP original que corresponden al escenario calibración semanal, escenario Base CSIRO-Mk3-6-0, y alternativas del PEGH.
- Escenario Calibración semanal: corresponde a la simulación del periodo histórico de la cuenca. La simulación del periodo histórico se ejecuta el periodo current accounts más el periodo del escenario calibración semanal (año 2 hasta el último año de la simulación).
- Escenario Base CSIRO-Mk3-6-0: corresponde a la simulación del periodo futuro bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelo climático CSIRO). La simulación del periodo futuro se ejecuta el periodo current accounts más el periodo del Escenario Base CSIRO-Mk3-6-0 (año 2 hasta el último de la simulación).
- Escenario Gestión de Embalses: corresponde a la simulación alternativa 1 del PEGH Maule, generada a partir del escenario Base CSIRO-Mk3-6-0. La simulación del escenario Gestión de Embalses se ejecuta el periodo current accounts más el periodo del Escenario Gestión de Embalses (año 2 hasta el último de la simulación). La alternativa corresponde a la incorporación de embalses futuros descrito en el PEGH Maule (DGA, 2020).
- Escenario Oferta Sustentable Superficial: corresponde a la simulación alternativa 2 del PEGH Maule, generada a partir del escenario Base CSIRO-Mk3-6-0. La simulación del escenario Oferta Sustentable Superficial se ejecuta el periodo current accounts más el periodo del Escenario Oferta Sustentable Superficial (año 2 hasta el último de la simulación). La alternativa corresponde al aumento de la eficiencia de riego hasta cumplir una meta del 70% de eficiencia descrito en el PEGH Maule (DGA, 2020).
- Escenario Gestión de aguas subterráneas: Las zonas de acuífero considerada para la modelación de aguas subterráneas de la cuenca Maule corresponden al dominio aguas abajo de la cuenca río Maule en Armerillo por lo que no se consideró como alternativa de solución para la zona alta de la cuenca Maule.

En el siguiente capítulo se da a conocer las principales modificaciones realizadas en el modelo WEAP original para el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 5. Validación y Modificación del Modelo WEAP cordillera

El desarrollo de este trabajo es poder contribuir a reducir la interferencia operacional entre el uso del agua para generación hidroeléctrica y riego en la cuenca Maule, mediante la validación y actualización del modelo WEAP cordillera del PEGH Maule.

En la Figura 5.1, se muestra esquema desarrollo metodológico utilizado en el presente estudio que consiste en mejorar el modelo WEAP original en términos de operación del sistema, mejorar la demanda eléctrica proyectada y representar diversos escenarios de cambio climático en el periodo 2022-2046.

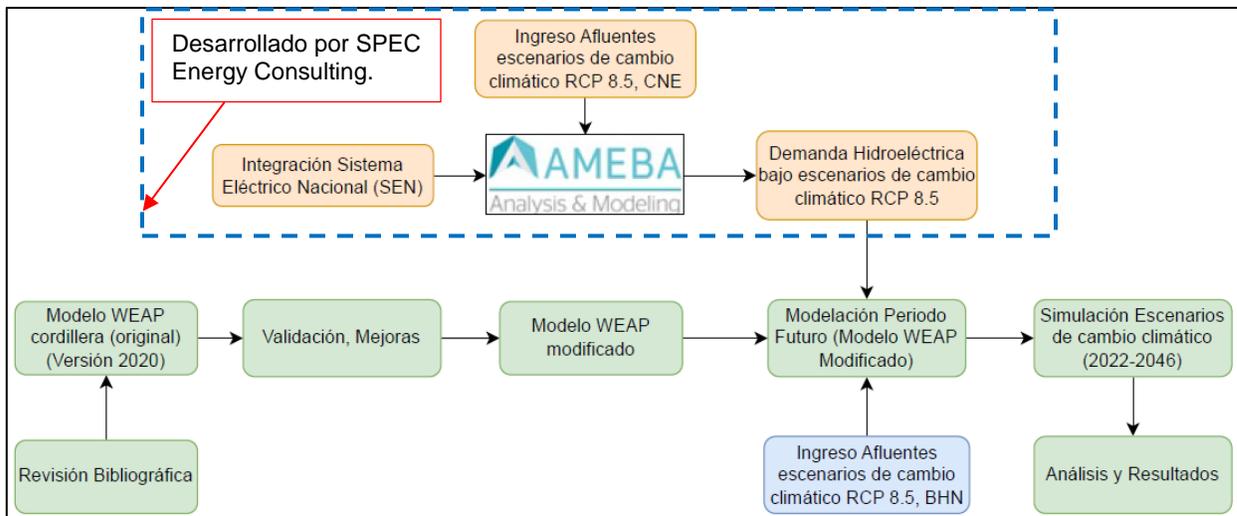


Figura 5.1 Esquema desarrollo metodológico Modelo WEAP modificado.

Para el desarrollo del modelo WEAP modificado, primero se realizó la validación y mejoramiento del modelo WEAP original (periodo histórico), considerando principalmente las siguientes mejoras:

- Simulación embalse Laguna del Maule y actualización caudal reconstituido en Armerillo.
- Modificación operacional cuenca río Maule en Armerillo.

Una vez realizada la validación y mejoras del modelo WEAP original (periodo histórico), se realizó en el modelo WEAP modificado simulaciones bajo escenario de cambio climático RCP8.5 (periodo 2022-2046), mediante el ingreso de los siguientes datos de entrada:

- Caudales afluentes a la cuenca bajo escenarios de cambio climático RCP8.5, obtenidas del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) en cada banda de elevación, mediante el desacople módulo precipitación-escorrentía del modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046).
- Demanda hidroeléctrica en la cuenca río Maule en Armerillo bajo escenarios de cambio climático RCP8.5, obtenidas de un modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting (periodo 2022-2046).

A continuación, se describe en mayor detalle las mejoras realizadas en el modelo WEAP original, y la modelación del periodo futuro bajo escenario de cambio climático RCP8.5.

5.1 Análisis y Modificación modelo WEAP Original.

Las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original en el periodo histórico que corresponde al modelo calibrado del PEGH Maule de la cuenca río Maule en Armerillo (modelo desarrollado con forzantes meteorológicas históricas de la cuenca) surgieron a partir del análisis del periodo histórico del modelo, principalmente de la laguna del Maule. La simulación del volumen de agua del embalse Laguna del Maule (modelo WEAP original) se desarrolló en el colchón superior de la laguna, mientras los registros históricos del embalse muestran que en el año 2011 el volumen de agua descendió del colchón superior al colchón intermedio de la laguna (Figura 5.2).

En la Figura 5.2, se muestra la simulación de volumen de agua del embalse Maule (línea de color rojo) del modelo WEAP original (modelo calibrado), y la evolución del volumen histórico de agua del embalse Laguna del Maule (línea de color negro).

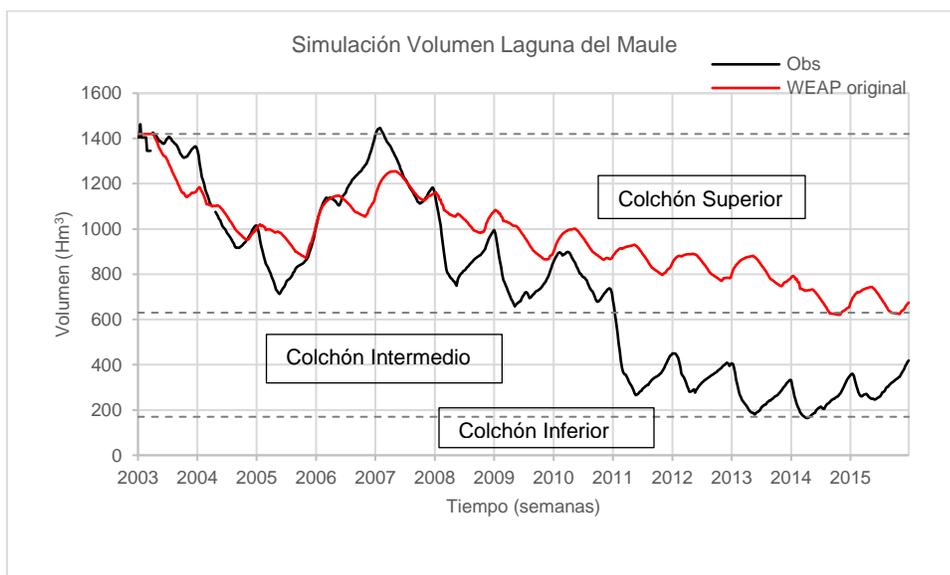


Figura 5.2 Simulación Volumen Laguna Maule modelo WEAP original (PEGH).

De la Figura 5.2, se aprecia que se debe realizar mejoras en la simulación del volumen de agua del embalse Laguna del Maule, ya que la simulación del periodo histórico se desarrolló en el colchón superior de la laguna, en cambio, el volumen histórico de agua del embalse (volumen observado) a partir del año 2011 se desarrolló en el colchón intermedio de la laguna. Las principales modificaciones realizadas en el modelo WEAP original fueron las siguientes:

5.1.1 Modificación Caudal Reconstituido en Armerillo.

El caudal reconstituido en Armerillo corresponde al caudal a la salida de la cuenca en estudio, es decir, a la suma del caudal medido en la estación fluviométrica río Maule en Armerillo más las captaciones aguas arriba de la estación. El caudal reconstituido en Armerillo representa el caudal disponible para abastecer la demanda del sistema de

riego. Si el caudal reconstituido en Armerillo es menor a los derechos de agua del sistema de riego, la laguna Maule deberá suministrar el déficit de riego, en caso contrario, el caudal disponible para el sistema de riego corresponderá a los derechos de agua. En el modelo WEAP original para estimar el caudal reconstituido en Armerillo se utilizó la función indicada en el oficio N°601 del 08 de mayo de 2008 encontrándose vigente por un periodo de 5 años. En cambio, en el modelo WEAP modificado la estimación del caudal reconstituido en Armerillo fue reemplazada por la función indicada en el oficio DGA N°681 del 28 de Junio de 2013, que se encuentra vigente hasta la actualidad (vigente 9 años hasta el año 2022).

En la Figura 5.3.a, se muestra simulaciones del caudal reconstituido en Armerillo del modelo WEAP original y modificación fórmula del caudal reconstituido en Armerillo. En la Figura 5.3.b, se muestra simulaciones entregas de riego del embalse Maule del modelo WEAP original y al modificar la fórmula para el caudal reconstituido en Armerillo. La línea de color rojo corresponde a la simulación realizada en el modelo WEAP original, la línea de color azul corresponde la simulación realizada al modificar la fórmula del caudal reconstituido en Armerillo.

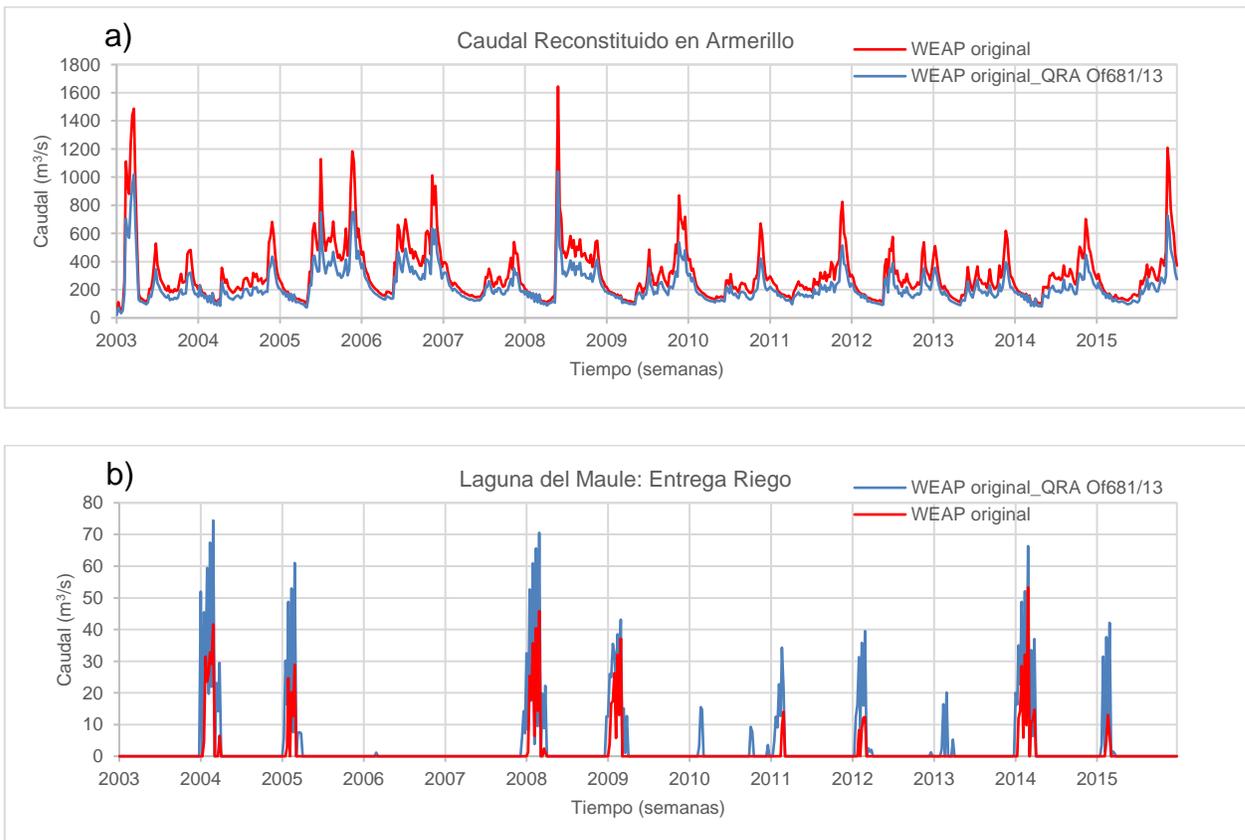


Figura 5.3 Simulación modelo WEAP original Laguna del Maule: a) Modificación fórmula caudal reconstituido en Armerillo, b) Entrega de Riego al modificar el caudal reconstituido en Armerillo.

De la Figura 5.3.a, se aprecia que al modificar la fórmula del caudal reconstituido en Armerillo en el modelo WEAP original, se estima una menor disponibilidad de los recursos hídricos a la salida de la cuenca (caudal reconstituido en Armerillo según oficio DGA N°681 del año 2013), generando mayor déficit de riego en el sector de Armerillo, y

mayores entregas de riego de la laguna del Maule en comparación a la simulación realizada en el modelo WEAP original (Figura 5.3.b).

La Figura 5.4 muestra las simulaciones realizadas del volumen del embalse Laguna del Maule, desde el año 2003 hasta el año 2015, en el modelo WEAP original (línea de color rojo), la simulación realizada al modificar la fórmula para el caudal reconstituido en Armerillo (línea color azul), línea de color negro corresponde al volumen observado.

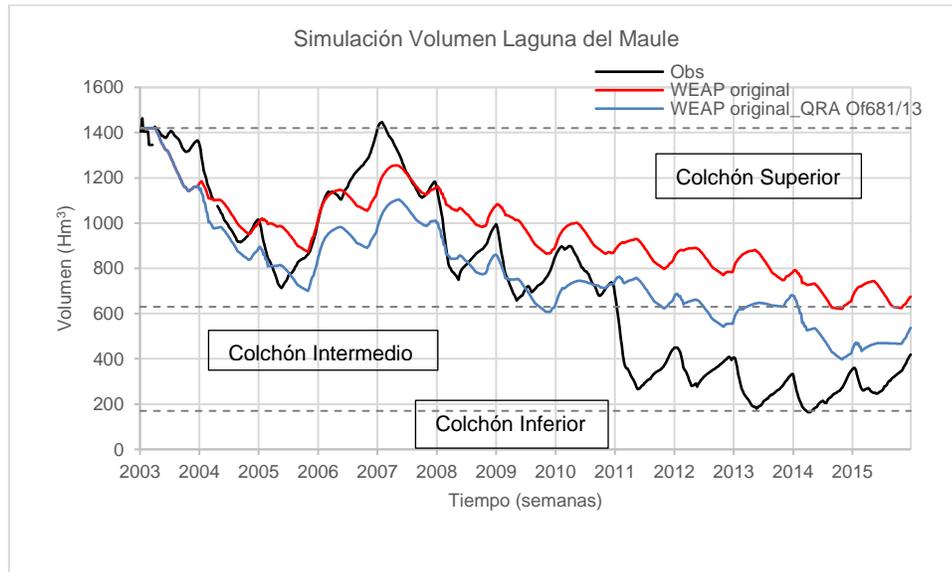


Figura 5.4 Simulación volumen laguna del Maule.

De la Figura 5.4, se puede observar que al modificar la función del caudal reconstituido en Armerillo en el modelo WEAP original (línea de color azul), mejora la simulación del volumen del embalse del Maule acercándose más al volumen observado de la laguna que se encuentra en el colchón intermedio desde el año 2011 hasta el año 2015.

5.1.2 Modificación Periodo Current Accounts Modelo WEAP Original

Al realizar la verificación de las funciones y parámetros asignados en el modelo WEAP original se logró identificar que las funciones y parámetros asignados en el primer año de simulación (periodo current accounts) son distintas a las funciones y parámetros asignados desde el año 2 hasta el último año de modelación que corresponde al escenario calibración semanal (simulación periodo histórico) y al escenario Base_CSIRO-Mk3-6-0 (simulación de periodo histórico y futuro) de la cuenca río Maule en Armerillo. Para efectuar las simulaciones del modelo WEAP original se debe ejecutar el periodo current accounts (primer año de simulación) más los escenarios desarrollados en el modelo WEAP original (escenario calibración semanal, escenario Base_CSIRO-Mk3-6-0) que corresponde a las simulaciones desarrolladas desde el año 2 hasta el último año de modelación.

Las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original en el primer año de simulación (periodo current accounts) corresponden a la modificación de parámetros, prioridades de demanda, asignación de demanda, en base a lo definido en el escenario calibración

semanal y en el escenario Base_CSIRO-Mk3-6-0, ya que ambos escenarios corresponden a la calibración del modelo WEAP original.

5.1.3 Modificación Prioridades de demanda modelo WEAP Original.

En el modelo original, las prioridades de demandas se establecieron en el siguiente orden: 1°) Entregas déficit de riego y entregas de hidroelectricidad de la laguna del Maule, 2°) Demanda canales de riego en el sector de Armerillo y llenado de embalses, principalmente de la laguna del Maule. Al poseer el mismo orden de prioridad de demanda, el modelo WEAP original reparte de forma proporcional los recursos hídricos disponible en la cuenca para satisfacer las demandas de los canales de riego en el sector de Armerillo y para el llenado del embalse, es decir, la demanda aguas abajo de la laguna Maule se abastece de las entregas del embalse, de la subcuenca aguas abajo del embalse y de una fracción de caudales afluentes de la laguna del Maule, mientras que otra fracción de caudales afluentes de la laguna del Maule es para el llenado del embalse. En cambio, en el modelo WEAP modificado se realizó la reasignación de prioridades de demanda, para poder cumplir primero con las demandas: 1°) Entregas de riego e hidroelectricidad de la laguna del Maule, 2°) Llenado de embalses, principalmente de la laguna del Maule, 3°) Demandas canales de riego en el sector de Armerillo y sistema hidroeléctrico. De este modo las demandas establecidas aguas abajo de la subcuenca de la laguna del Maule serán abastecidas solo desde el embalse Laguna del Maule y las subcuencas aguas abajo del embalse.

5.1.4 Modificación topología del sistema de entregas Laguna del Maule.

Se modificó topología del sistema de entregas de riego e hidroelectricidad de la laguna del Maule debido a la incorporación central hidroeléctrica Los Cóndores. Según Ingendesa (2007), el sistema se compone de una línea de aducción para entregas del sistema de riego y una línea de aducción para entregas de uso hidroeléctrico central Los Cóndores.

En la Figura 5.5, se muestra topología sector laguna del Maule del modelo original (izquierda), y la nueva topología laguna del Maule (derecha) del modelo WEAP modificado. La nomenclatura de la Figura 5.5, se define en la Tabla 2.1 del capítulo 2.2.1.

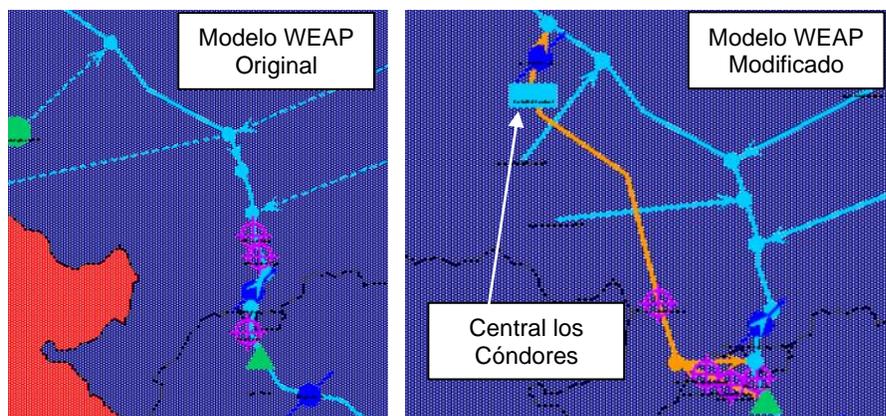


Figura 5.5 Esquema Operacional Laguna del Maule.

5.1.5 Modificación topología del sistema de entregas Laguna Invernada

La laguna Invernada suministra agua para la generación hidroeléctrica de la central Cipreses, que cuenta con un caudal de diseño de 36 m³/s. En el análisis del sistema de entregas laguna Invernada del modelo WEAP original (periodo histórico), se logró identificar que la simulación de la central Cipreses es distinta a la demanda de la central, siendo en algunos periodos mayor a su capacidad máxima, tal como se muestra en la Figura 5.6, donde la línea continua de color negro corresponde a la demanda de la central, línea segmentada de color negro a la capacidad máxima de la central y línea de color rojo corresponde a la simulación de la central Cipreses del modelo WEAP original.

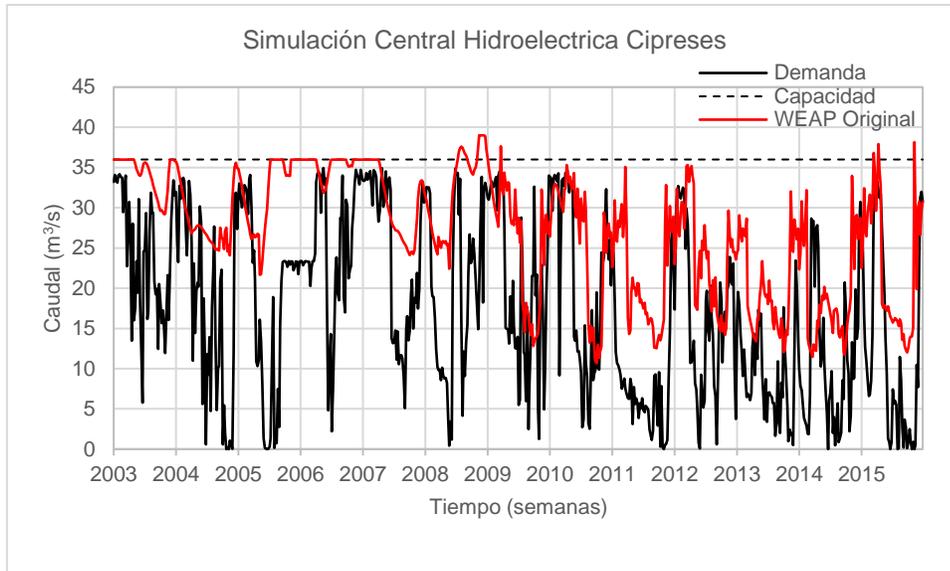


Figura 5.6 Modelo WEAP original: Simulación Central Hidroeléctrica Cipreses

A partir de (Ingendesa, 2005) y (Matus et al., 2014), se modificó el esquema operacional y topología entregas laguna Invernada para la central hidroeléctrica Cipreses, vertimiento de la laguna Invernada en río Cipreses y filtraciones existentes de la laguna Invernada para mejorar la simulación del sistema de entregas de la laguna Invernada. La nueva topología consiste en una línea de aducción para las entregas de los recursos hídricos de la laguna Invernada para la generación hidroeléctrica Central Cipreses, vertimiento de la laguna Invernada en río Cipreses, filtraciones de la laguna Invernada para generación hidroeléctrica central Ojos de Agua restituyendo el caudal turbinado aguas abajo de la central hidroeléctrica Cipreses.

En la Figura 5.7, se muestra topología sector laguna Invernada del modelo WEAP original (izquierda), y la nueva topología laguna Invernada del modelo WEAP modificado (derecha). La nomenclatura de la Figura 5.7 se define en la Tabla 2.1 del capítulo 2.2.1.

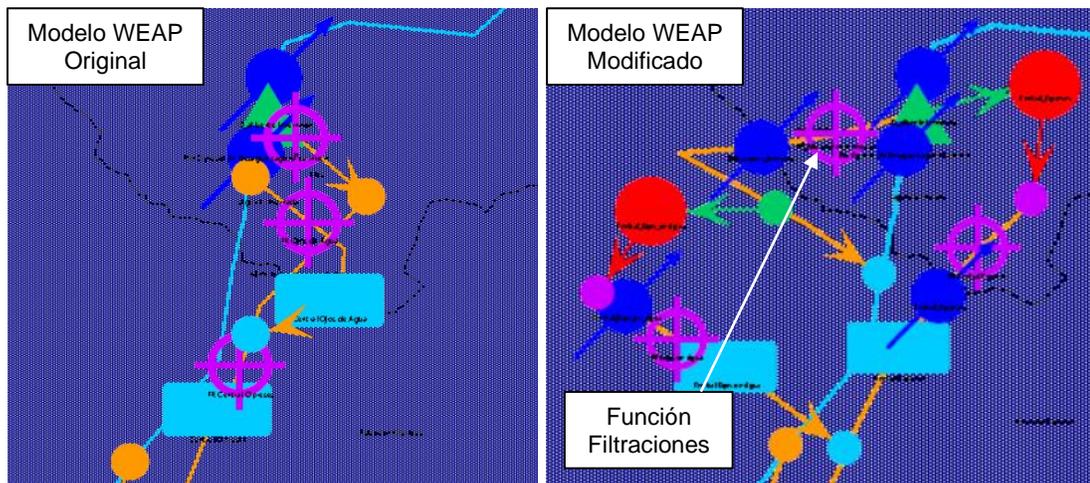


Figura 5.7 Actualización Entregas Laguna Invernada.

En la Figura 5.8, se muestran los resultados al modificar la topología del sector laguna Invernada, donde la línea de color verde corresponde a la simulación central hidroeléctrica Cipreses del modelo WEAP modificado, y línea de color rojo a la simulación realizada en el modelo WEAP original.

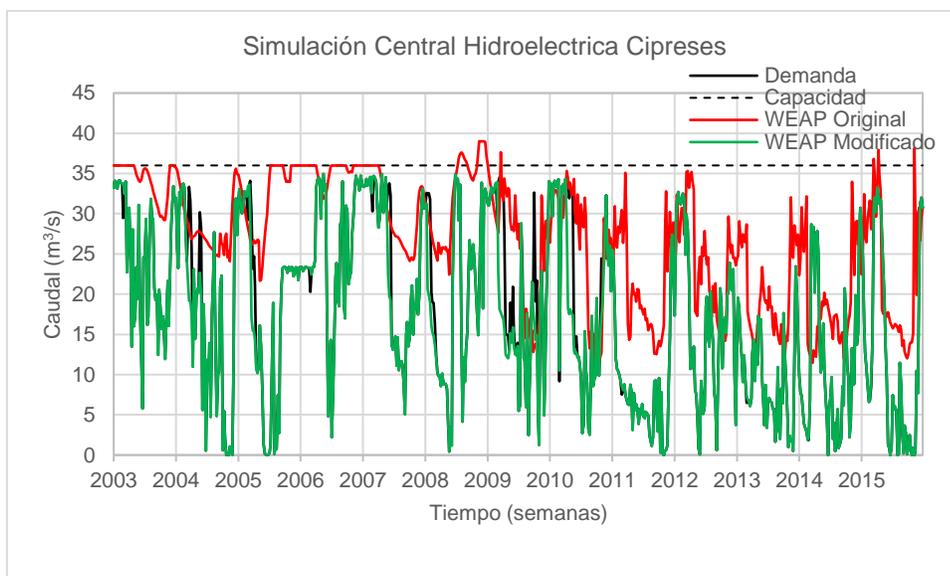


Figura 5.8 Comparación simulaciones central hidroeléctrica Cipreses del modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado.

De la Figura 5.8, se aprecia que al modificar la topología del sistema de entregas de la laguna Invernada, mejora las simulaciones de la central hidroeléctrica Cipreses, dando como resultado que las entregas de la laguna Invernada son similares a la demanda de la central, logrando mejorar la simulación del sistema.

5.2 Efecto combinado de las modificaciones

El efecto combinado de las modificaciones realizadas en el capítulo 5.1 en el modelo WEAP original, la simulación del volumen histórico del embalse Laguna del Maule a partir del año 2003 hasta el año 2015 se muestra en la Figura 5.9, donde la línea de color verde

corresponde a la simulación del modelo WEAP modificado, línea de color azul al solo modificar el caudal reconstituido en Armerillo en el modelo WEAP original, línea de color rojo simulación del modelo WEAP original y la línea de color negro evolución del volumen histórico de agua de la laguna Maule (volumen observado).

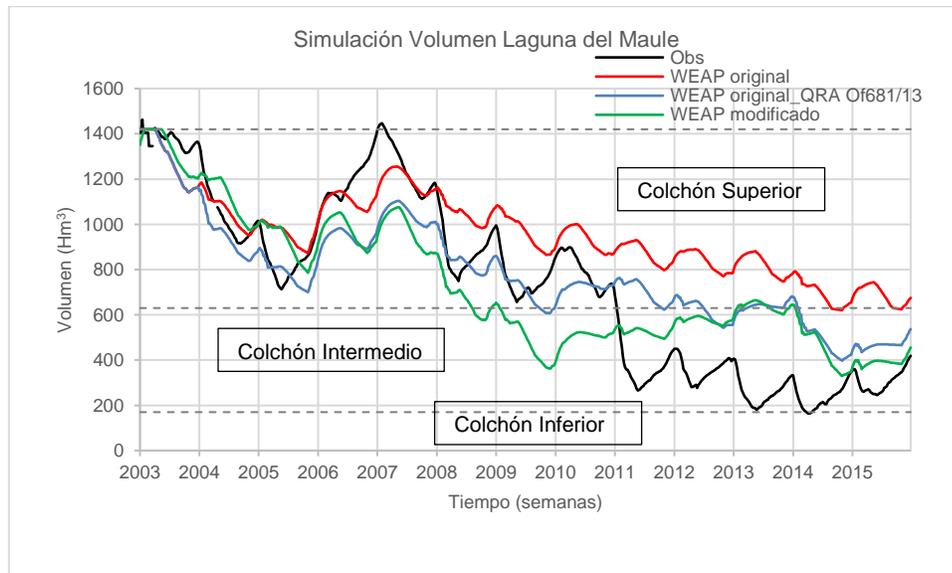


Figura 5.9 Simulación volumen histórico laguna del Maule.

Como resultado de las modificaciones realizadas al modelo WEAP original, se puede apreciar en la Figura 5.9 que a partir del año 2009 la simulación del volumen del embalse Laguna del Maule (línea de color verde) pasa del colchón superior al colchón intermedio manteniéndose en la porción intermedia hasta el término del periodo histórico (año 2015), acercándose a la condición histórica del volumen observado de la laguna que se encuentra en el colchón intermedio desde el año 2011 hasta la actualidad.

A continuación, en los siguientes capítulos se describe las principales contribuciones realizadas para el desarrollo de simulaciones en el periodo futuro del modelo WEAP modificado bajo el escenario de cambio climático RCP8.5.

5.3 Desacople modelo WEAP cordillera

Con la finalidad de utilizar los resultados del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, que permite obtener la escorrentía espacialmente distribuida en una grilla 0,05 x 0,05 grados se determinaron, a nivel diario, los caudales afluentes simulados en distintas cuencas del país en el periodo histórico y futuro bajo escenarios de cambio climático RCP8.5 usando cuatro modelos de circulación global (CSIRO, CCSM4, IPSL y MIROC). Los caudales afluentes de escenarios de cambio climático en la cuenca río Maule en Armerillo en el periodo futuro (2022-2046), se ingresaron como datos de entrada en el modelo WEAP modificado para poder obtener un mayor rango de variabilidad de resultados en comparación a la simulación realizada en el modelo WEAP original en el periodo futuro (2016-2050) que se desarrolló bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelo climático CSIRO) Para el ingreso de los caudales afluentes de escenarios de cambio climático obtenidas del Balance Hídrico Nacional, se llevó a cabo el desacople del módulo precipitación-escorrentía del modelo WEAP modificado,

reemplazando los nodos catchment por nodos de ríos para el ingreso de los datos de entrada del Balance Hídrico Nacional, para un horizonte de 25 años de simulación (periodo 2022-2046).

La Figura 5.10 corresponde a la topología del modelo WEAP modificado de la cuenca río Maule en Armerillo, que incorpora las modificaciones descritas en el capítulo 5.1, la incorporación de caudales afluentes futuros bajo el escenarios climático RCP8.5 descrita en el capítulo 5.3.1.2 (periodo futuro), y la incorporación demanda eléctrica proyectada obtenida de un modelo de optimización (AMEBA) descrita en el capítulo 5.4.

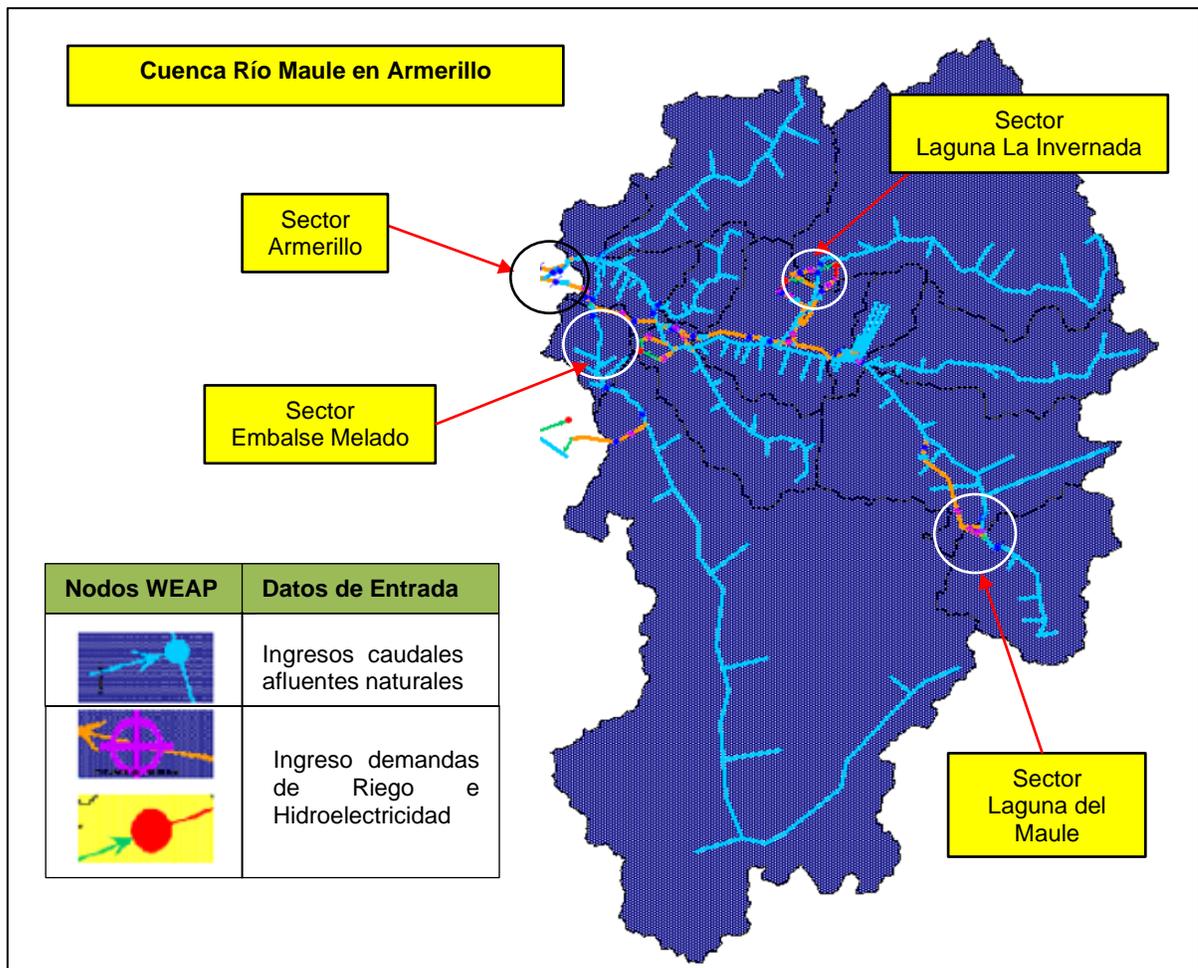


Figura 5.10 Topología Modelo WEAP Modificado.

5.3.1 Caudales afluentes bajo escenarios de cambio climático RCP8.5

El desarrollo de este estudio es poder analizar el periodo futuro de la cuenca bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (periodo 2022-2046). Para la modelación del periodo futuro (modelo WEAP modificado) de la cuenca río Maule en Armerillo bajo los distintos escenarios de cambio climático, se utilizó la información del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), que corresponde a un producto grillado de 0.05 x 0.05 grados. Mediante un código generado en Python, se obtuvieron los caudales afluentes futuros al intersectar los polígonos de las bandas de elevación de la cuenca río Maule en Armerillo con el producto grillado del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Para la ejecución del

código se requirió como datos de entrada polígonos en formato shapes (.shp) de las 83 bandas de elevación, la asignación de un código identificador y atributos de área en km². Los atributos generados para cada banda de elevación se realizaron mediante la herramienta computacional QGIS que corresponde a un software de libre acceso para sistemas de información geográfica que permite el procesamiento de datos para la generación de polígonos, generación de cartografías, y otros. Una vez obtenidos los caudales afluentes de escenarios de cambio climático del Balance Hídrico Nacional (2018), se ingresó como datos de entrada en el modelo WEAP modificado (periodo futuro) en las 83 bandas de elevación de la cuenca río Maule en Armerillo, estableciendo como condición inicial el volumen observado de los embalses para la simulación en el periodo futuro (2022-2046).

A continuación, se da a conocer el análisis de los caudales afluentes bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 en el periodo histórico, y caudales afluentes en el periodo futuro que se utilizó como datos de entrada para el desarrollo de simulaciones en el modelo WEAP modificado en el periodo 2022-2046.

5.3.1.1 Caudales afluentes periodo histórico (periodo de análisis 1984-2015)

El presente capítulo corresponde al análisis de los caudales afluentes de la subcuenca Laguna del Maule y cuenca río Maule en Armerillo (en régimen natural) en el periodo histórico (1984-2015), obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional (series generadas con las forzantes meteorológicas escaladas de los modelos climáticos GCMs y series generadas con forzantes meteorológicas del producto grillado CR2Met), y del modelo WEAP Original que corresponde a las simulaciones realizadas en el escenario calibración y validación del modelo que utilizó como datos de entrada forzantes meteorológicas históricas de la cuenca.

En las Figuras 5.11 y 5.12 se muestran los caudales afluentes en el periodo histórico (1984-2015), obtenidas de las siguientes bases de datos:

- Escenario de cambio climático RCP8.5 (modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL, MIROC): corresponde a las series de caudales obtenidas del Balance Hídrico Nacional (líneas de color rojo, azul, verde y morado).
- Escenario Histórico BHN: corresponde a las series de caudales obtenidas del Balance Hídrico Nacional (línea de color celeste) que utilizo como base de datos forzantes meteorológicas del producto grillado CR2Met.
- Escenario Histórico modelo WEAP Original: corresponde a las series de caudales generadas en el periodo histórico escenario calibración y validación del modelo WEAP original (línea de color café), dado que la simulación bajo el escenario de cambio climático (modelo CSIRO) se desarrolló solo en el periodo futuro (2016-2050).

En la Figura 5.11.a, b y Figura 5.12.a, b se muestran las series semanales de los caudales afluentes. Las Figuras 5.11.c y 5.12.c se muestran las series ciclo semanales (promedio semanal) de los caudales afluentes de la subcuenca Laguna del Maule y cuenca Río Maule en Armerillo (afluentes en régimen natural).

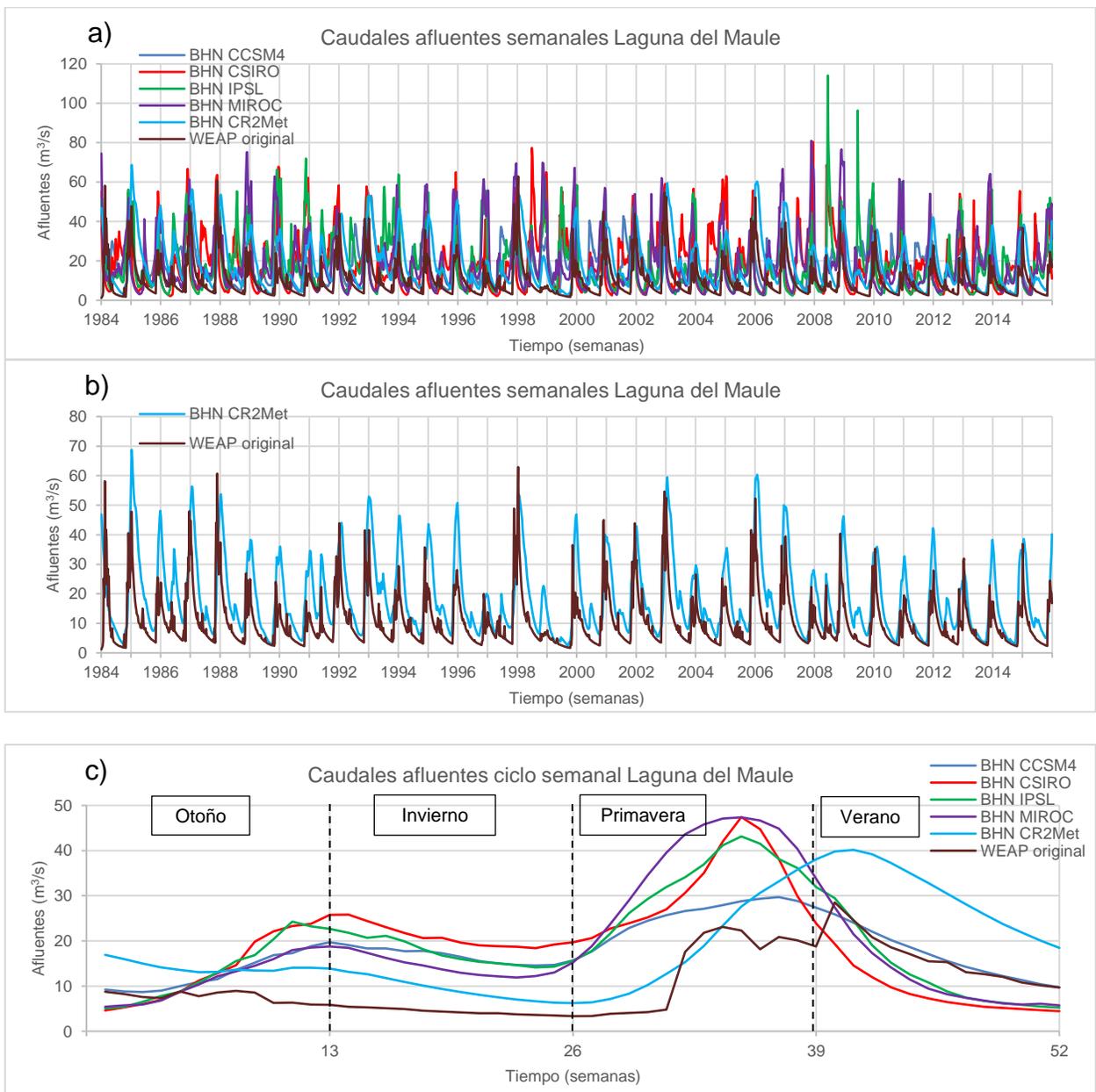


Figura 5.11 Caudales afluentes subcuenca Laguna Maule (periodo 1984-2015): a) series semanales en m^3/s , b) series semanales modelos calibrados: Balance Hídrico Nacional (CR2Met) y modelo WEAP original, c) series ciclo semanales en m^3/s . Series de color azul, rojo, verde, morado y celeste obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional y las series de color café obtenida del modelo WEAP original.

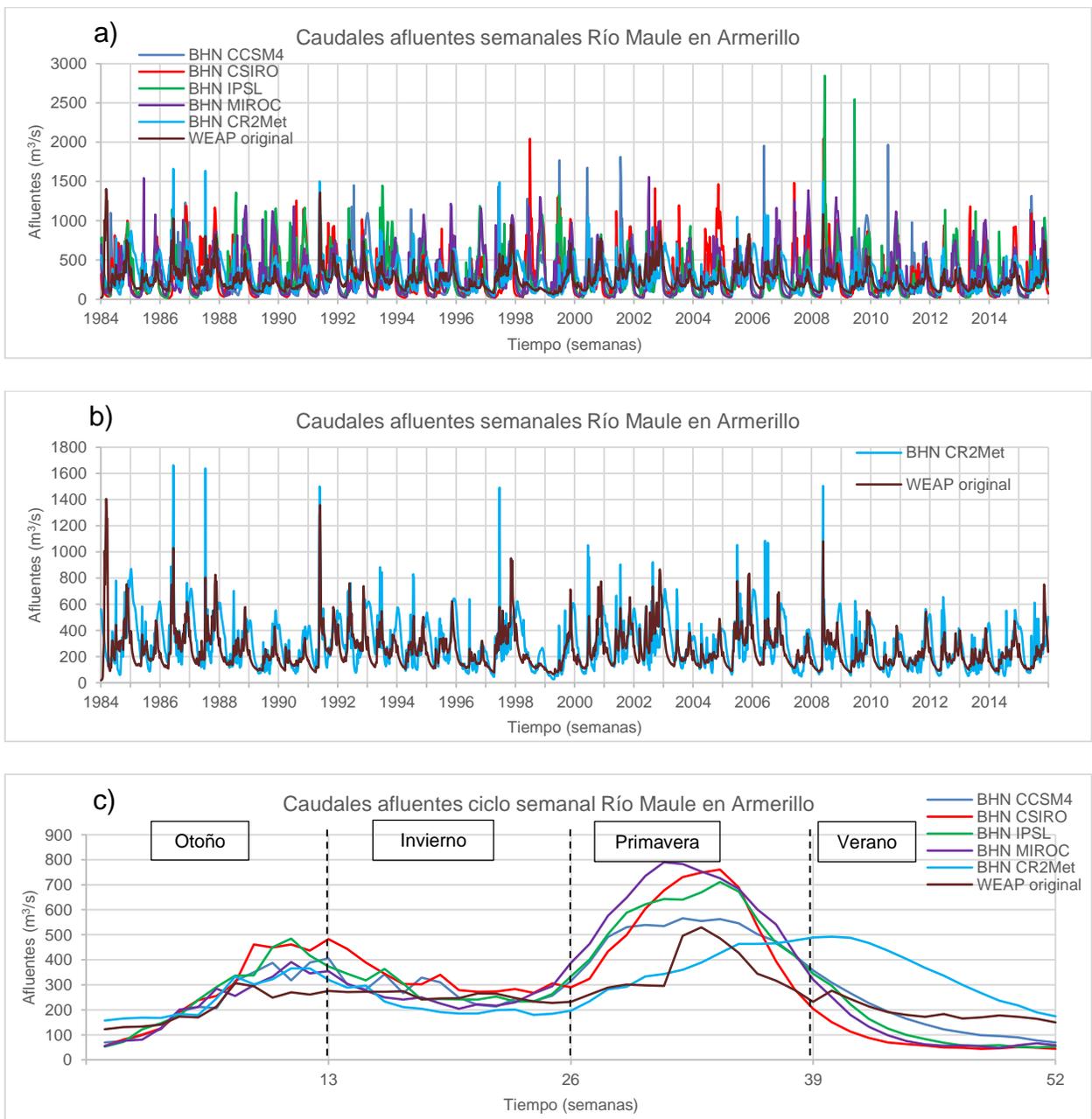


Figura 5.12 Caudales afluentes cuenca río Maule en Armerillo (periodo 1984-2015): a) series semanales en m^3/s , b) series semanales modelos calibrados del Balance Hídrico Nacional (CR2Met) y modelo WEAP original, c) series ciclo semanales en m^3/s . Series de color azul, rojo, verde, morado y celeste obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional y las series de color café obtenida del modelo WEAP original.

Las Tablas 5.1 y 5.2 corresponden a estadísticos de caudales afluentes semanales obtenidos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y los caudales afluentes semanales del modelo WEAP original para la subcuenca Laguna del Maule y la cuenca río Maule en Armerillo (afluentes régimen natural) entre los periodos 1984-2015.

Tabla 5.1 Estadísticos caudales afluentes semanales Laguna del Maule
(periodo 1984-2015)

Estadísticos	WEAP Original en m ³ /s	BHN (m ³ /s)				
		Hist. (CR2Met)	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio	10,51	18,53	18,00	18,74	19,06	18,89
Máximo	62,91	68,74	56,67	80,46	114,14	80,99
Mínimo	1,20	2,57	3,41	2,08	2,35	2,58
Percentil 15	3,65	7,15	7,85	5,16	6,06	6,28
Percentil 50	7,34	14,33	16,52	15,81	14,56	13,46
Percentil 85	18,40	33,11	27,66	32,57	34,69	35,65

Tabla 5.2 Estadísticos caudales afluentes naturales semanales cuenca río Maule en
Armerillo (periodo 1984-2015)

Estadísticos	WEAP Original en m ³ /s	BHN (m ³ /s)				
		Hist. (CR2Met)	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio	250,96	296,64	291,00	298,03	302,73	300,53
Máximo	1404,78	1662,39	1968,60	2048,05	2847,72	1557,78
Mínimo	18,63	25,01	19,11	14,50	16,86	18,41
Percentil 15	126,24	111,88	73,55	45,77	54,70	53,26
Percentil 50	209,94	257,49	218,13	218,94	213,04	207,28
Percentil 85	375,58	488,41	524,26	610,16	590,08	619,87

En términos generales a partir de las Figuras 5.11, 5.12, y Tablas 5.1, 5.2 en el periodo histórico se desprenden los siguientes comentarios:

- Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y en el Balance Hídrico Nacional son diferentes debido a que se desarrollaron en distintos modelos (modelo WEAP para el PEGH Maule y modelo VIC para el Balance Hídrico Nacional), desarrollados por distintas entidades, con distintos supuestos y distintas metodologías.
- En el periodo histórico las series de caudales generadas en el modelo WEAP Original y en el Balance Hídrico Nacional, se obtiene que la estacionalidad de los caudales afluentes semanales de la Laguna del Maule es principalmente de régimen nival con la presencia de máximos caudales semanales generadas de los modelos climáticos del Balance Hídrico Nacional en la época de primavera, y máximos caudales semanales generadas en el Balance Hídrico Nacional con la base de datos CR2Met en la época de verano. En el punto de cierre de la cuenca río Maule en Armerillo el régimen es nivo-pluvial, con importantes aumentos de caudales semanales en la época de primavera con las series generadas de los modelos climáticos del Balance Hídrico Nacional y series generadas del modelo WEAP original, y máximos caudales semanales en el periodo de verano con las series generadas en el Balance Hídrico Nacional a partir de la base de datos CR2Met.
- En la Figura 5.11 (b, c) y Figura 5.12 (b, c), se aprecia que las series de caudales semanales generadas en el Balance Hídrico Nacional con forzantes meteorológicas del CR2Met son mayores que las series de caudales semanales generadas en el modelo WEAP Original.

- En la Laguna del Maule en promedio los caudales afluentes semanales generados en el periodo histórico con las series del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son aproximadamente el doble que el obtenido de las series semanales generadas en el modelo WEAP original. En cambio, para cuenca río Maule en Armerillo en promedio los caudales semanales generados con las series del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) es el 16% mayor aproximadamente.
- En la subcuenca Laguna del Maule el caudal máximo semanal de las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son aproximadamente el 22% mayor que el obtenido de la serie semanal generada en el modelo WEAP original. En cambio, para caudales mínimos semanales las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son prácticamente equivalentes a las series semanales generadas en el modelo WEAP original.
- En la cuenca del río Maule en Armerillo el caudal máximo semanal de las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son aproximadamente 30% mayor que el obtenido de la serie semanal generada en el modelo WEAP original. En cambio, los caudales mínimos semanales las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son prácticamente equivalentes a las series semanales generadas en el modelo WEAP original.

5.3.1.2 Caudales afluentes periodo futuro (periodo de análisis 2022-2046)

El presente capítulo corresponde al análisis de los caudales afluentes de la subcuenca de la Laguna Maule y cuenca Río Maule en Armerillo (en régimen natural) en el periodo futuro (2022-2046) obtenida del producto grillado del Balance Hídrico Nacional (modelos climáticos) y del modelo WEAP Original (modelo climático CSIRO), para poder realizar el análisis de las distintas series de caudales desarrolladas en los modelos.

Las Figuras 5.13 y 5.14 corresponden a los caudales afluentes de escenarios de cambio climático obtenidas en el periodo futuro (2022-2046):

- Escenario de cambio climático RCP 8.5 (modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC) obtenidas del Balance Hídrico Nacional (líneas de color rojo, azul, verde y morado) utilizadas para realizar las simulaciones en el periodo futuro del modelo WEAP modificado.
- Escenario de cambio climático RCP 8.5, modelo climático CSIRO (línea de color café) del modelo WEAP original para poder comparar con las series generadas en el Balance Hídrico Nacional.

En la Figura 5.13.a, b y Figura 5.14.a, b se muestran las series semanales de los caudales afluentes, y las figuras 5.13.c y 5.14.c corresponden a las series ciclo semanales (promedio semanal) de los caudales afluentes de la subcuenca Laguna del Maule y cuenca río Maule en Armerillo (afluentes en régimen natural).

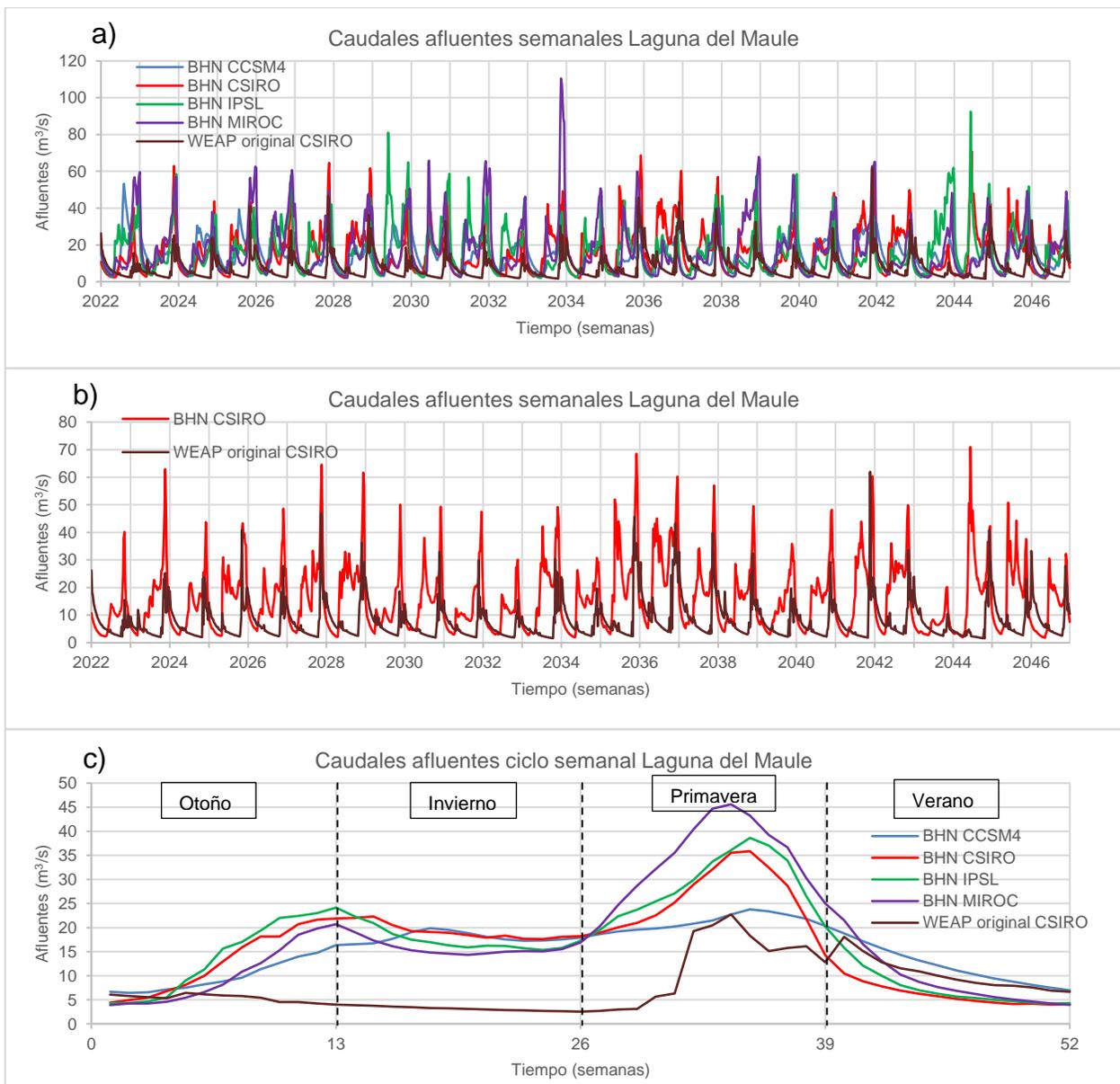


Figura 5.13 Escenarios de cambio climático subcuenca Laguna del Maule (periodo 2022-2046): a) caudales afluentes semanales en m^3/s , b) Series climáticas CSIRO: caudales afluentes del Balance Hídrico Nacional (2018) y modelo WEAP original, c) caudales afluentes ciclo semanal en m^3/s . Series de color azul, rojo, verde y morado obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional utilizadas en las simulaciones del Modelo WEAP Modificado y las series de color café que corresponden al modelo WEAP original.

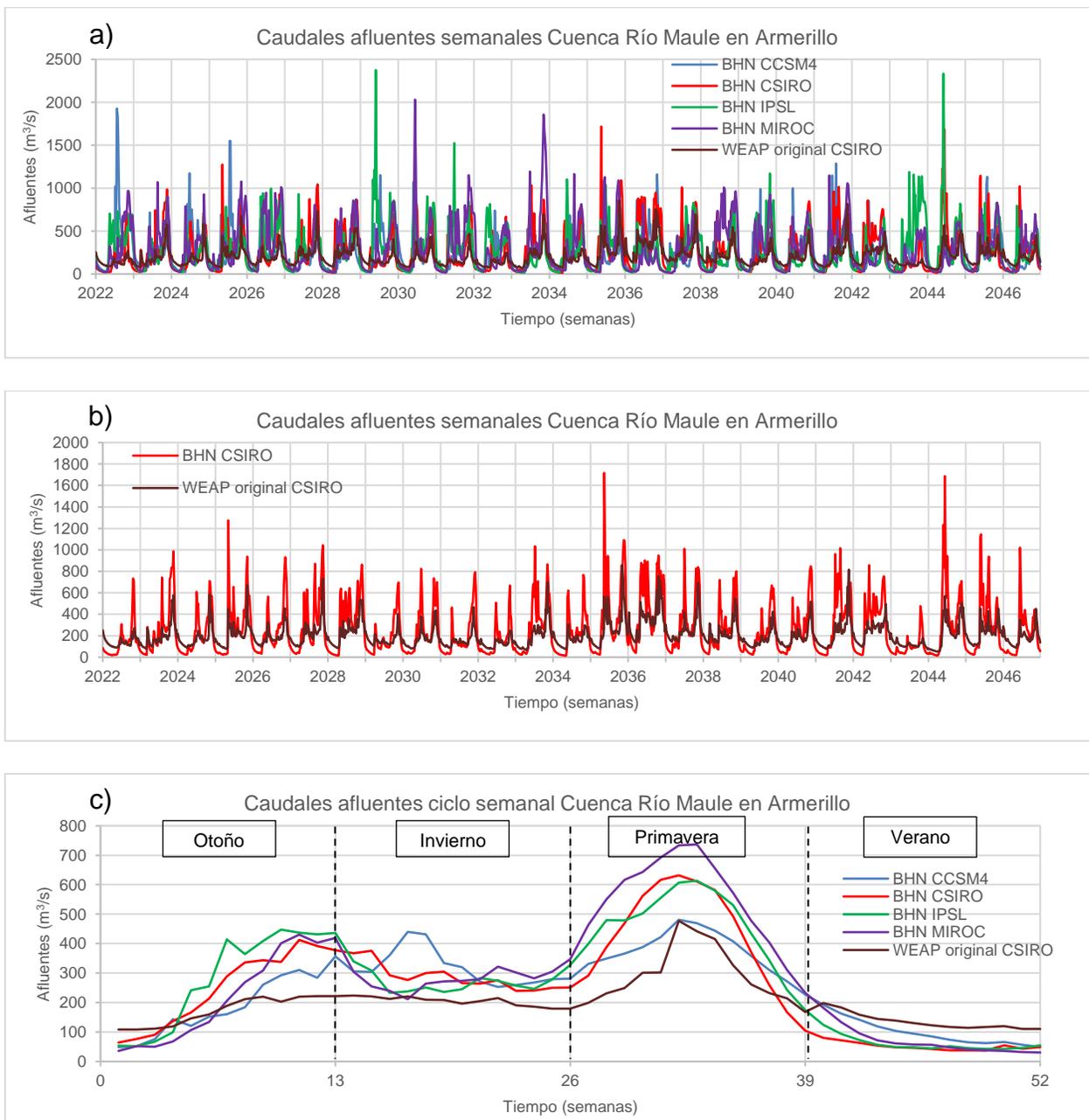


Figura 5.14 Escenarios de cambio climático cuenca río Maule en Armerillo (periodo 2022-2046): a) caudales afluentes semanales en m^3/s , b) Series climáticas CSIRO: caudales afluentes del Balance Hídrico Nacional (2018) y modelo WEAP original, c) caudales afluentes ciclo semanal en m^3/s . Series de color azul, rojo, verde y morado obtenidas del producto del Balance Hídrico Nacional utilizadas en las simulaciones del Modelo WEAP Modificado y las series de color café que corresponden al modelo WEAP original.

Las Tablas 5.3 y 5.4 corresponden a estadísticos de caudales afluentes semanales obtenidos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y los caudales afluentes semanales del modelo WEAP original para la subcuenca laguna del Maule y la cuenca río Maule en Armerillo (afluentes régimen natural), en una extensión de 25 años de simulación (periodo 2022-2046).

Tabla 5.3 Estadísticos caudales afluentes semanales Laguna del Maule (periodo 2022-2046)

Estadísticos	WEAP Original (CSIRO), en m ³ /s	BHN (m ³ /s)			
		CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio	7,78	15,22	15,98	16,81	17,29
Máximo	61,97	53,24	70,96	92,46	110,49
Mínimo	1,57	3,04	1,78	1,98	1,52
Percentil 15	2,78	7,20	4,29	4,60	4,48
Percentil 50	5,42	14,25	13,09	14,04	12,14
Percentil 85	12,91	23,19	27,47	29,24	31,75

Tabla 5.4 Estadísticos caudales afluentes naturales semanales cuenca río Maule en Armerillo (periodo 2022-2046)

Estadísticos	WEAP Original (CSIRO), en m ³ /s	BHN (m ³ /s)			
		CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio	201,44	243,25	252,90	268,14	279,10
Máximo	855,89	1926,50	1717,15	2375,56	2030,61
Mínimo	51,71	18,44	14,17	16,17	11,44
Percentil 15	106,48	59,40	38,93	38,89	37,41
Percentil 50	170,58	197,40	168,91	194,28	182,63
Percentil 85	299,63	421,21	505,15	533,58	575,77

A partir de las Figuras 5.13, 5.14, y Tablas 5.3, 5.4, se desprenden los siguientes comentarios:

- Al comparar las figuras del periodo histórico (Figura 5.11 y Figura 5.12) con las figuras del periodo futuro (Figura 5.13 y Figura 5.14) bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), en promedio las series de caudales semanales generadas con los modelos GCMs disminuyen desde el periodo histórico al periodo futuro en un 12,6% aproximadamente en la subcuenca Laguna del Maule y la cuenca río Maule en Armerillo (en régimen natural), se observa además que no sufren variación en el tipo de régimen en ambas cuencas en el periodo histórico y en el periodo futuro.
- Se aprecia en las Figuras 5.13 y 5.14 las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y en el Balance Hídrico Nacional son diferentes debido a que se desarrollaron en distintos modelos, con distintos datos de entrada, desarrollados por distintas entidades, con distintos supuestos y distintas metodologías.
- En la Figura 5.13 (b, c) y Figura 5.14 (b, c), se aprecia que las series de caudales semanales generadas en el Balance Hídrico Nacional con forzantes meteorológicas del modelo climático CSIRO son mayores que las series de caudales semanales generadas en el modelo WEAP Original con forzantes meteorológicas del modelo climático CSIRO.
- De las proyecciones de cambio climático se obtiene que la estacionalidad de los caudales afluentes de la laguna Maule es principalmente de régimen nival con altos caudales en la época de primavera-verano debido al deshielo de la subcuenca, mientras que en el punto de cierre cuenca río Maule en Armerillo el régimen es nivo-pluvial debido a la alta presencia de precipitaciones en época de invierno, y al deshielo de la cuenca en la época primavera-verano.

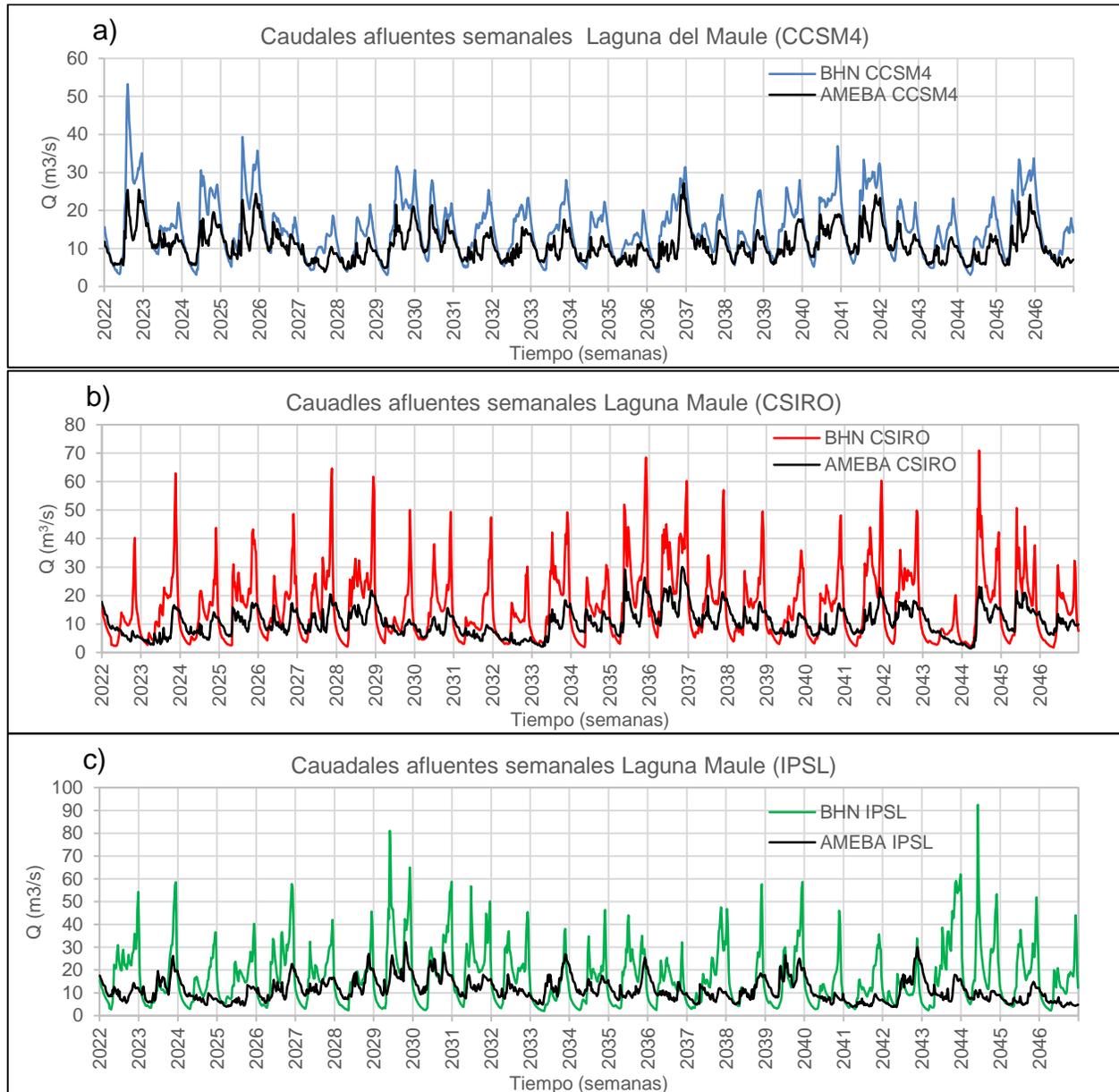
- Como se describen en los siguientes puntos, los caudales afluentes bajo escenario de cambio climático del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son mayores a los caudales afluentes del escenario de cambio climático del modelo WEAP original. A pesar de las discrepancias existentes, se incorporó como datos de entrada en el modelo WEAP modificado los caudales afluentes de escenario de cambio climático del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) para poder obtener una mayor diversidad de escenarios caudales afluentes a la cuenca y un mayor rango de variabilidad de resultados en comparación al modelo WEAP original para el desarrollo de simulaciones en el escenario futuro (periodo 2022-2046).
- En la Laguna del Maule en promedio los caudales afluentes semanales generados en el periodo 2022-2046 con las series del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son aproximadamente el doble que el obtenido de las series semanales generadas en el modelo WEAP original. En cambio, para cuenca río Maule en Armerillo en promedio los caudales semanales generados con las series del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) es el 33% mayor aproximadamente.
- En la Laguna del Maule, el caudal máximo semanal de las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) es aproximadamente 45% mayor que el obtenido de la serie semanal generada en el modelo WEAP original, a excepción del modelo climático CCSM4 que es un 15% menor aproximadamente. En cambio, para caudales mínimos semanales las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son prácticamente equivalentes a las series semanales generadas en el modelo WEAP original.
- En la cuenca río Maule en Armerillo el caudal máximo semanal de las series generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) es aproximadamente el doble que el obtenido de las series semanales generadas en el modelo WEAP original. En cambio, para periodos de caudales mínimos semanales principalmente en la época de verano las series semanales generadas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) son menores a las series semanales generadas en el modelo WEAP original.

5.4 Proyección de la Demanda Hidroeléctrica en la cuenca río Maule

La proyección de la demanda hidroeléctrica en la cuenca río Maule en Armerillo bajo escenarios de cambio climático se obtuvo de un modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting en un horizonte de 25 años de simulación (periodo 2022-2046). Los caudales afluentes de escenarios de cambio climático en cada captación del Sistema Eléctrico Nacional se obtuvieron de Meteodata (2020), disponible públicamente en la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2020). La demanda hidroeléctrica obtenida en AMEBA se ingresó como una serie de tiempo en un nodo de demanda en el modelo WEAP modificado. La principal limitación para el desarrollo de este estudio es que se utilizaron distintas fuentes de información para el desarrollo de simulaciones en el modelo WEAP modificado y en el modelo de optimización desarrollado en AMEBA. En el modelo WEAP modificado se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático RCP 8.5 del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) en la cuenca río Maule en Armerillo. En cambio, en el modelo de optimización en AMEBA, se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático de la Comisión Nacional de Energía (CNE)

en cada central de Chile, que requiere la integración de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el desarrollo de la simulación del modelo.

En la Figura 5.15, se muestran los caudales afluentes de la laguna Maule obtenidos del producto grillado del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y del modelo eléctrico desarrollado en AMEBA entre los periodos 2022 hasta el año 2046, para los distintos modelos climáticos.



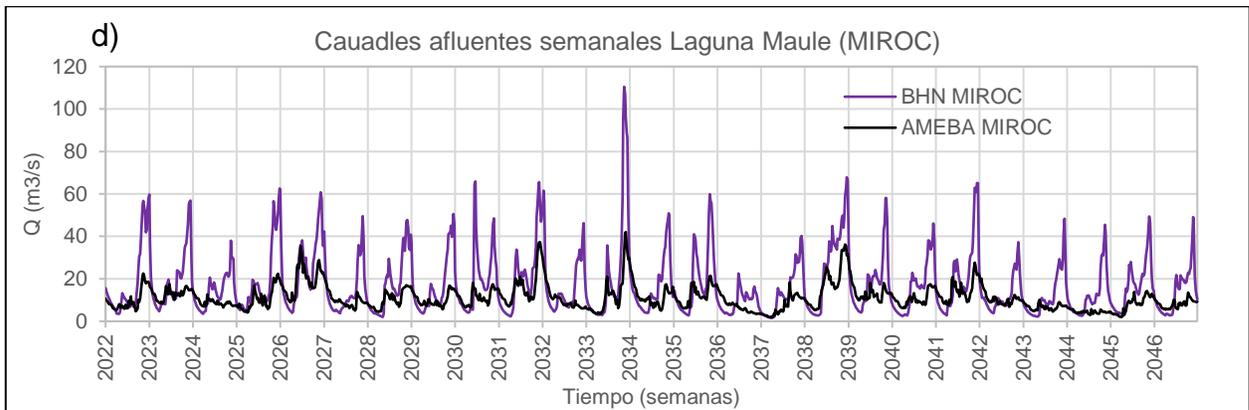


Figura 5.15 Comparación caudales afluentes Laguna del Maule bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y del Modelo eléctrico (AMEBA) de los modelos climáticos (periodo 2022-2046): a) CCSM4, b) CSIRO, c) IPSL, d) MIROC.

A pesar de las discrepancias entre los caudales afluentes proyectados (Figura 5.15) por el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) y Meteodata (2020) utilizado en el modelo eléctrico, se utilizó como datos de entrada en el modelo WEAP modificando los caudales afluentes proyectados del Balance Hídrico Nacional ya que corresponde a la información oficial del estudio de cuencas en Chile desarrollado para la Dirección General de Aguas (DGA).

A continuación, en la Figura 5.16 se presenta los principales requerimientos como datos de entrada para desarrollo del modelo de optimización en AMEBA, obteniendo como resultado la demanda eléctrica proyectada.

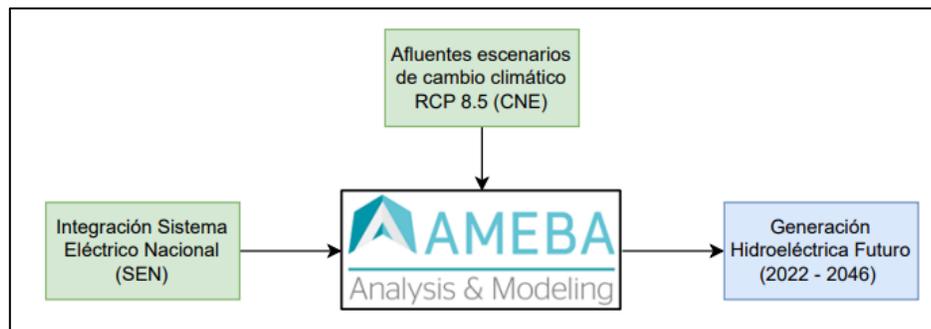


Figura 5.16 Modelación Hidroeléctrica en AMEBA.

La modelación del sistema eléctrico se desarrolló en escala mensual en un horizonte de tiempo de 25 años, donde cada mes se dividió en etapas y bloques, cada bloque corresponde a 1 hora, por lo que los resultados de escala mensual de la demanda hidroeléctrica se asignaron a cada bloque y etapa para obtener resultados en escala diaria y luego se traspasó a escala semanal para el ingreso de demandas proyectadas en modelo WEAP modificado. Es importante señalar que en el modelo AMEBA se obtuvo la generación hidroeléctrica de la central Los Cóndores, que debería entrar en operación en el año 2024 aproximadamente, la cual utilizará las entregas de la laguna Maule. En el modelo WEAP modificado se ingresaron las demandas hidroeléctricas en cada central de la cuenca del río Maule en Armerillo, incorporando además la central hidroeléctrica

Los Cóndores y la central de pasada La Mina que no fueron incorporadas en el modelo WEAP original.

La Figura 5.17, muestra la representación de la demanda eléctrica del modelo WEAP original (línea de color rojo) que no corresponde a un escenario de proyección de cambio climático, ya que se obtuvo mediante regresión de la generación histórica de la demanda, y del modelo de optimización desarrollado en AMEBA (línea de color negro) entre los periodos 2022 y 2046 del modelo climático CSIRO. En el anexo D y E se presentan resultados demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (sector laguna Invernada) y central hidroeléctrica Pehuenche (sector embalse Melado) bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 de los modelos climáticos CCSM4, CSIRO, MIROC, IPSL obtenidos del modelo de optimización desarrollado en AMEBA.

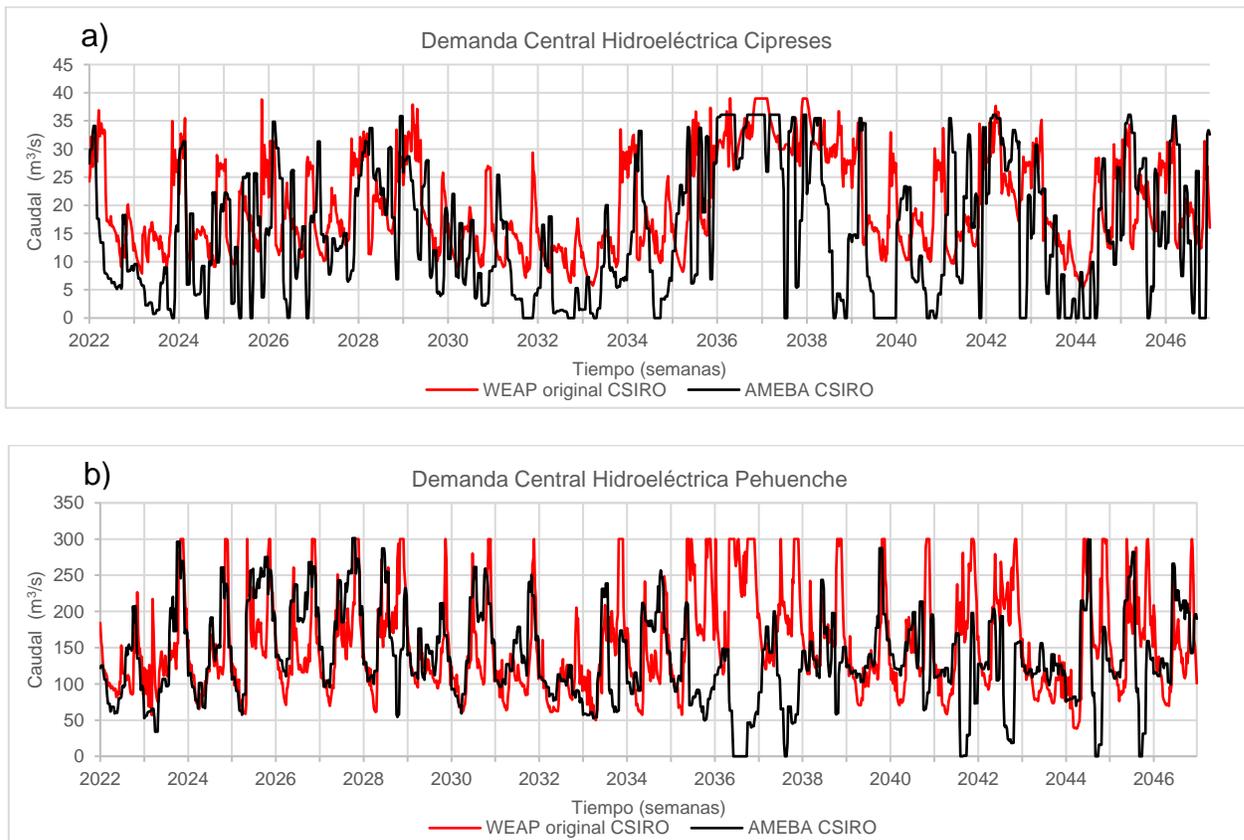


Figura 5.17 Demanda eléctrica escenario futuro (periodo 2022 - 2046): a) Central Hidroeléctrica Cipreses, b) Central Hidroeléctrica Pehuenche.

De la Figura 5.17, se aprecian diferencias de las demandas obtenidas del modelo WEAP original y del modelo de optimización desarrollado en AMEBA, donde en gran parte del periodo de simulación la demanda del modelo WEAP original es mayor a la demanda proyectada en AMEBA. Es importante mencionar que la demanda eléctrica del modelo WEAP original (periodo futuro) se obtuvo mediante reglas matemáticas. En cambio, la demanda eléctrica obtenida del modelo de optimización (AMEBA), simula el modelo de sistema de energía, integrando todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con el objetivo de satisfacer la demanda eléctrica al mínimo costo. Es por ello, que en el presente trabajo se utilizó los resultados de la demanda eléctrica obtenida en el modelo de optimización

desarrollado en AMEBA para poder mejorar la representación de la demanda proyectada en el modelo WEAP modificado.

En anexo C se presenta descripción de la central Hidroeléctrica La Mina que se incorporó en el modelo futuro (periodo 2022-2046) del modelo WEAP modificado para realizar las simulaciones de la cuenca río Maule en Armerillo.

Capítulo 6. Resultados y Discusión

A continuación, se presentan y analizan resultados obtenidos a partir del modelo WEAP modificado en la cuenca río Maule en Armerillo. El análisis se enfocará principalmente en la simulación Laguna del Maule (uso multipropósito), para comparar los resultados obtenidos del modelo WEAP original bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 (modelo climático CSIRO), con los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado bajo escenario de cambio climático RCP8.5, asociados a los modelos climáticos CCSM4, CSIRO, MIROC, IPSL (periodo de simulación 2022-2046). Para poder simplificar las leyendas de las figuras del presente capítulo, los resultados del modelo WEAP modificado se presentó como CCSM4, CSIRO, MIROC, IPSL, y en el modelo WEAP original se presentó como WEAP original CSIRO.

6.1 Análisis Laguna Maule

6.1.1 Volumen Laguna Maule

Es importante mencionar que en el modelo WEAP modificado (modelo futuro) se incorporó la central Los Cóndores, que se encuentra en fase de construcción, bajo el supuesto que entre en operación en el año 2024. La demanda hidroeléctrica central Los Cóndores se obtuvo del modelo AMEBA, y se ingresó como nodo de demanda en el modelo WEAP modificado bajo las reglas de operación del convenio ENDESA - Riego del año 1947.

La Figura 6.1 corresponde al volumen simulado de la Laguna del Maule bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 para un periodo de análisis de 25 años (2022 - 2046). Las simulaciones se realizaron en escala semanal, donde la línea de color negro corresponde al volumen observado desde el año 2011 hasta el año 2021, la línea de color azul (línea más gruesa) corresponde a los resultados obtenidos del modelo WEAP original (periodo histórico), la línea de color café (línea más gruesa) corresponde los resultados obtenidos del modelo WEAP original (escenario cambio climático RCP8.5, modelo climático CSIRO), y las líneas de color azul, rojo, verde y morado corresponde a los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046). Se considero como condición inicial el volumen observado de los embalses para la simulación del modelo WEAP modificado en el periodo 2022-2046.

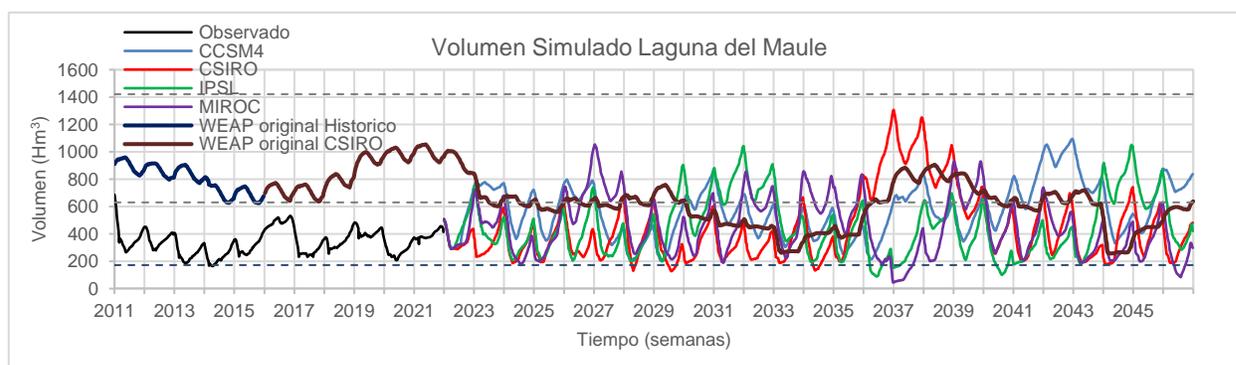


Figura 6.1 Simulación Volumen Laguna Maule escenario de cambio climático RCP8.5.

De la Figura 6.1 se puede apreciar lo siguiente:

- Desde el año 2011 hasta el año 2021 el volumen observado de la laguna Maule se encuentra en el colchón intermedio. Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado, el volumen de la laguna Maule opera principalmente en el colchón intermedio (periodo de análisis 2022 - 2046), mientras que en el modelo WEAP original la simulación realizada bajo el escenario de cambio climático CSIRO, el volumen de la laguna Maule opera en el colchón superior y colchón intermedio (periodo de análisis 2022 - 2046).
- A pesar de que los caudales afluentes laguna Maule en el modelo WEAP original (periodo futuro) son menores a los caudales afluentes ingresados en el modelo WEAP modificado (Figura 5.13), las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado se obtuvo menores volúmenes de agua del embalse, producto de las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original descritas en el capítulo 5.1, principalmente la modificación de la formula del caudal reconstituido en Armerillo y modificación topología del sistema.
- Como se indicó en el primer comentario el volumen simulado de la laguna Maule se encuentra principalmente en el colchón intermedio (periodo 2022-2046), encontrándose en algunos periodos en el límite del colchón intermedio y colchón inferior o inclusive pasando desde el colchón intermedio al colchón inferior en una frecuencia de 1,5 años aproximadamente. También se puede observar que entre los años 2036 y 2039 para la simulación realizada en el escenario de cambio climático CSIRO, el volumen del embalse se encuentra en el colchón superior, mientras que en el escenario de cambio climático IPSL, el volumen del embalse se encuentra en el colchón intermedio e inferior. Lo anterior se debe principalmente a que el modelo CSIRO proyecta mayores caudales afluentes al embalse entre los años 2036 y 2038 que el modelo MIROC. Por otro lado, las entregas de la laguna Maule del escenario de cambio climático CSIRO son menores en el año 2036 que el escenario de cambio climático MIROC, extrayendo una menor cantidad caudal del embalse, como se puede observar en la Figura 6.2.

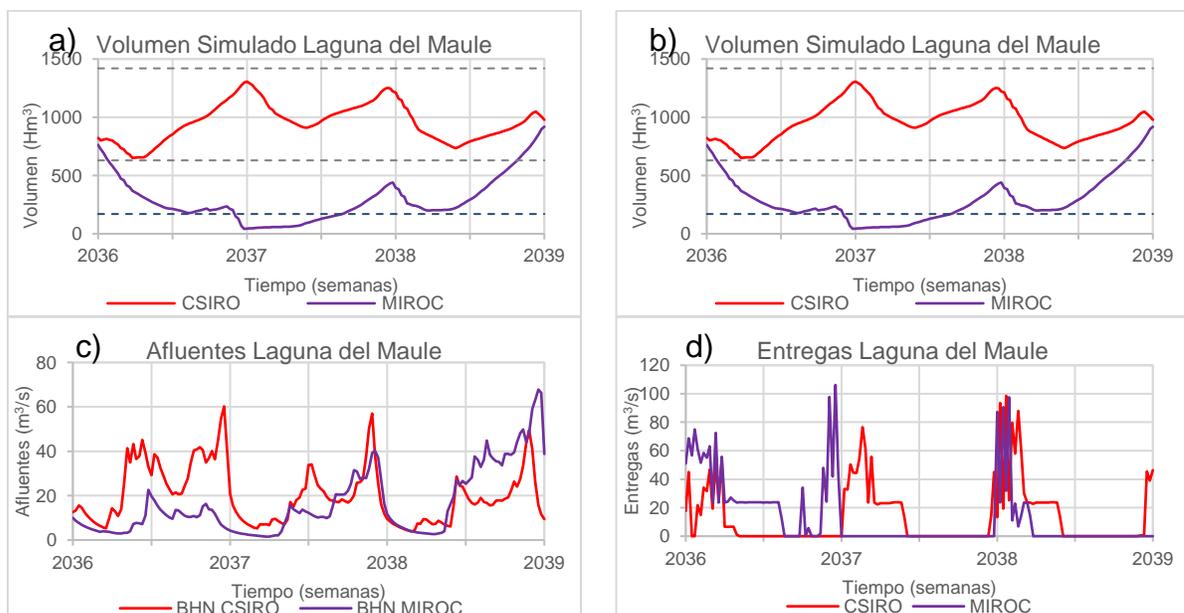


Figura 6.2 Simulación modelo WEAP modificado Laguna Maule modelos climáticos CSIRO, IPSL (periodo de análisis 2036 - 2039): a) y b) Volumen simulado Laguna del Maule, c) Caudales afluentes Laguna del Maule, d) Entregas Laguna del Maule.

En la Figura 6.3 se presenta análisis de frecuencia (Distribución de Weibull), y Tabla 6.1 estadísticos de la laguna del Maule del volumen observado desde el año 2011 hasta el año 2021 (dado que en el periodo 2011 el volumen de agua de la laguna del Maule descendió desde el colchón superior al colchón intermedio de la laguna, manteniéndose en el colchón intermedio hasta la actualidad), volumen simulado modelo WEAP original (periodo 2022-2046), y simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado (periodo 2022-2046).

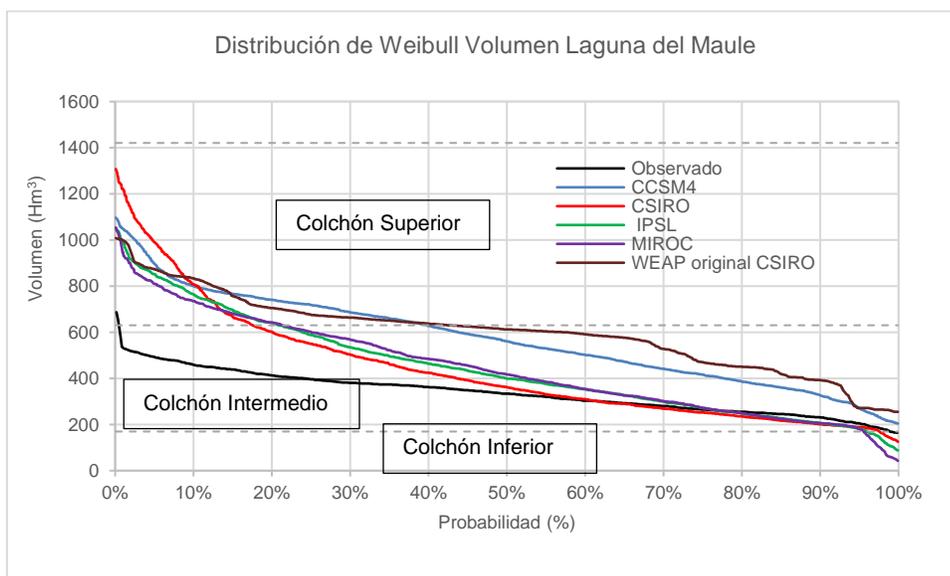


Figura 6.3 Laguna Maule: Análisis de Frecuencia volumen observado (periodo 2011-2021) y Volumen simulado (periodo 2022-2046).

Tabla 6.1 Estadísticos volumen laguna Maule (Hm³)

Estadísticos	Observado	WEAP Original (CSIRO)	WEAP Modificado			
			CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Promedio	337,68	599,08	569,57	436,06	444,75	445,35
Máximo	686,48	1007,96	1096,19	1306,43	1049,93	1053,53
Mínimo	164,39	255,35	204,25	125,86	88,19	42,06
Percentil 15	244,89	418,78	360,20	216,99	227,24	224,33
Percentil 50	333,19	612,13	560,33	361,58	399,03	416,43
Percentil 85	437,88	756,86	765,59	666,01	696,44	679,50

De la Figura 6.3 y Tabla 6.1, se desprende los siguientes comentarios:

- Durante el periodo histórico (periodo 2011-2022), la probabilidad de que el volumen observado se encuentre en el colchón intermedio es de un 99%, y la probabilidad de que se encuentre en el colchón superior es de un 1% que corresponde al inicio del año 2011, cuando el volumen de agua de la laguna Maule descendió desde el colchón superior al colchón intermedio, manteniéndose el volumen de la laguna en el colchón intermedio hasta la actualidad.
- Como se mencionó en la Figura 6.1, a pesar de que los caudales afluentes de la laguna Maule en el modelo WEAP original (periodo futuro) son menores a los caudales afluentes ingresados en el modelo WEAP modificado (Figura 5.13), las simulaciones realizadas de proyección de cambio climático en el modelo WEAP

modificado se obtuvo menores volúmenes de agua del embalse que la simulación realizada en el modelo WEAP original, producto de las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original descritas en el capítulo 5.1.

- Según los resultados del WEAP modificado bajo el escenario CCSM4, la probabilidad de que el volumen de la laguna se encuentre en el colchón superior es de un 40% y en el colchón intermedio es de un 60%, siendo en promedio el volumen simulado mayor que los otros escenarios de cambio climático (CSIRO, IPSL y MIROC) durante el periodo de análisis.
- Para la simulación realizada en el modelo WEAP original (escenario CSIRO), y la simulación realizada en el modelo WEAP modificado (escenario CCSM4), la probabilidad de que el volumen de la laguna Maule se encuentre en el colchón superior es de aproximadamente un 40%, mientras que existe una probabilidad del 100% que el volumen de la laguna al menos se encuentre en el colchón intermedio del embalse. Las simulaciones realizadas en ambos modelos no alcanzan a pasar al colchón inferior de la laguna durante el periodo de análisis (2022-2046).
- Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado para los escenarios CSIRO, IPSL y MIROC, la probabilidad de que el volumen de la laguna se encuentre al menos en el colchón intermedio es de un 95%, mientras la probabilidad de que el volumen de la laguna Maule se encuentre en el colchón inferior es de un 5%. En promedio el volumen simulado en los escenarios CSIRO, IPSL y MIROC son similares, obteniendo un máximo volumen en el escenario CSIRO, y el menor volumen en el escenario MIROC.
- Al realizar la comparación de las simulaciones realizadas entre el modelo WEAP original y el modelo WEAP modificado se puede apreciar que en promedio el volumen simulado es mayor en el modelo WEAP original que las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado, alcanzado un volumen mínimo durante el periodo de simulación un valor de 255,35 Hm³ en el año 2044.

6.1.2 Entregas para Riego Laguna del Maule

El presente capítulo se presentan los resultados entregas para riego laguna del Maule regulada por el convenio ENDESA-Riego del año 1947 de las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y en modelo WEAP modificado bajo el escenario de cambio climático RCP8.5.

Las Figuras 6.4.a y 6.4.b, corresponden a las simulaciones entregas para riego laguna del Maule semanales entre los periodos 2022-2046 y 2042-2046 respectivamente, para poder obtener una mejor visualización de resultados en la Figura 6.4.b. La Figura 6.4.c, corresponde a las entregas de riego ciclo semanal (promedio semanal) del embalse Maule durante el periodo de análisis 2022-2046.

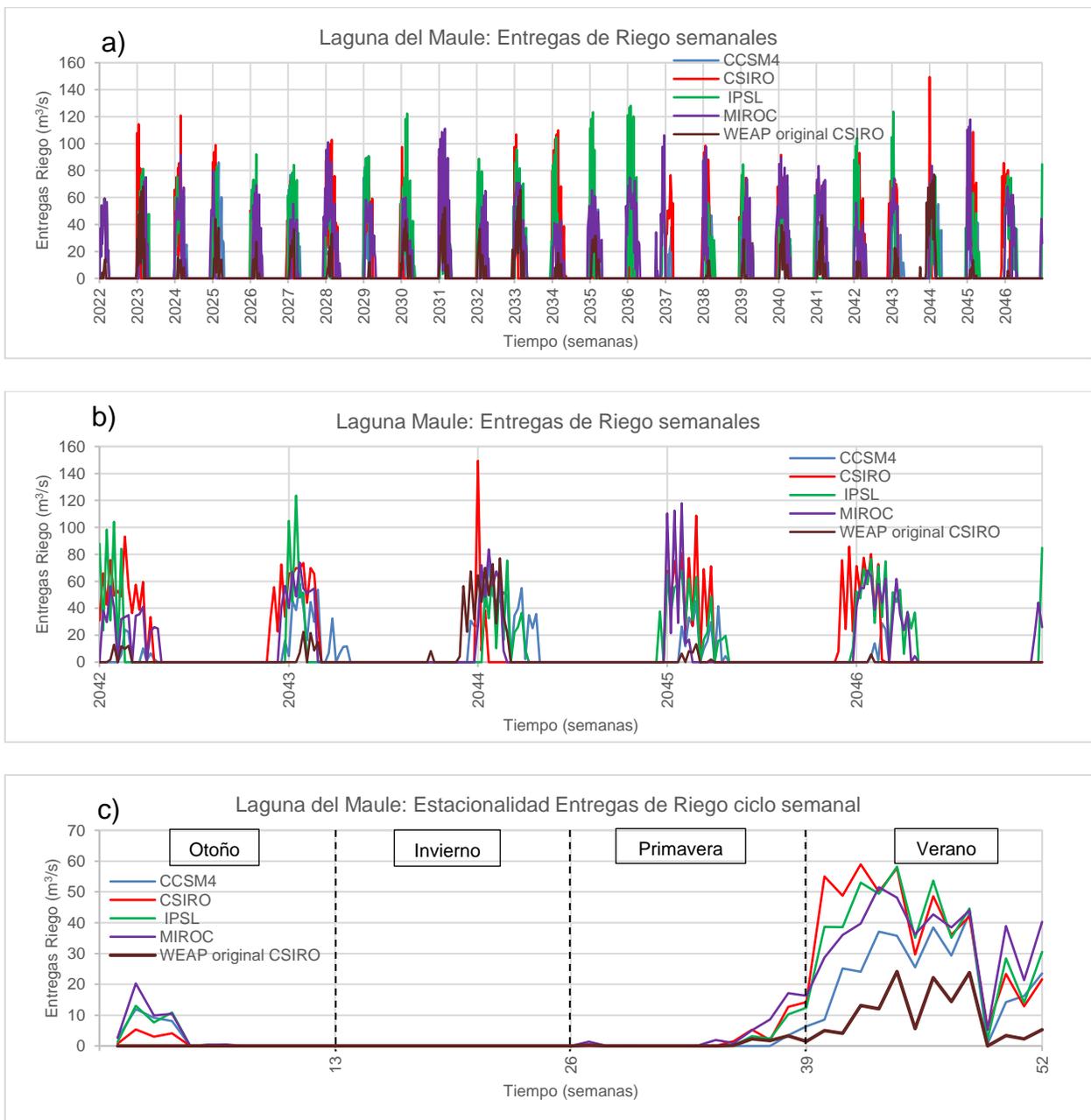


Figura 6.4 Entregas para Riego Laguna del Maule modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado: a) Entregas para riego en escala semanal (periodo 2022-2046), b) Entregas para riego en escala semanal de los últimos 5 años de simulación (periodo 2042-2046), c) Entregas para riego promedio semanal (periodo 2022-2046).

De la Figura 6.4 se desprende lo siguiente:

- Las simulaciones realizadas de los escenarios de proyecciones de cambio climático del modelo WEAP original y modelo WEAP modificado, las entregas para riego laguna Maule se cumple que la estacionalidad del uso de riego se produce principalmente en la época de verano.
- Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado para el escenario CCSM4 genera menores entregas de riego en comparación a los escenarios CSIRO, IPSL y MIROC, validando que en promedio la simulación del volumen del

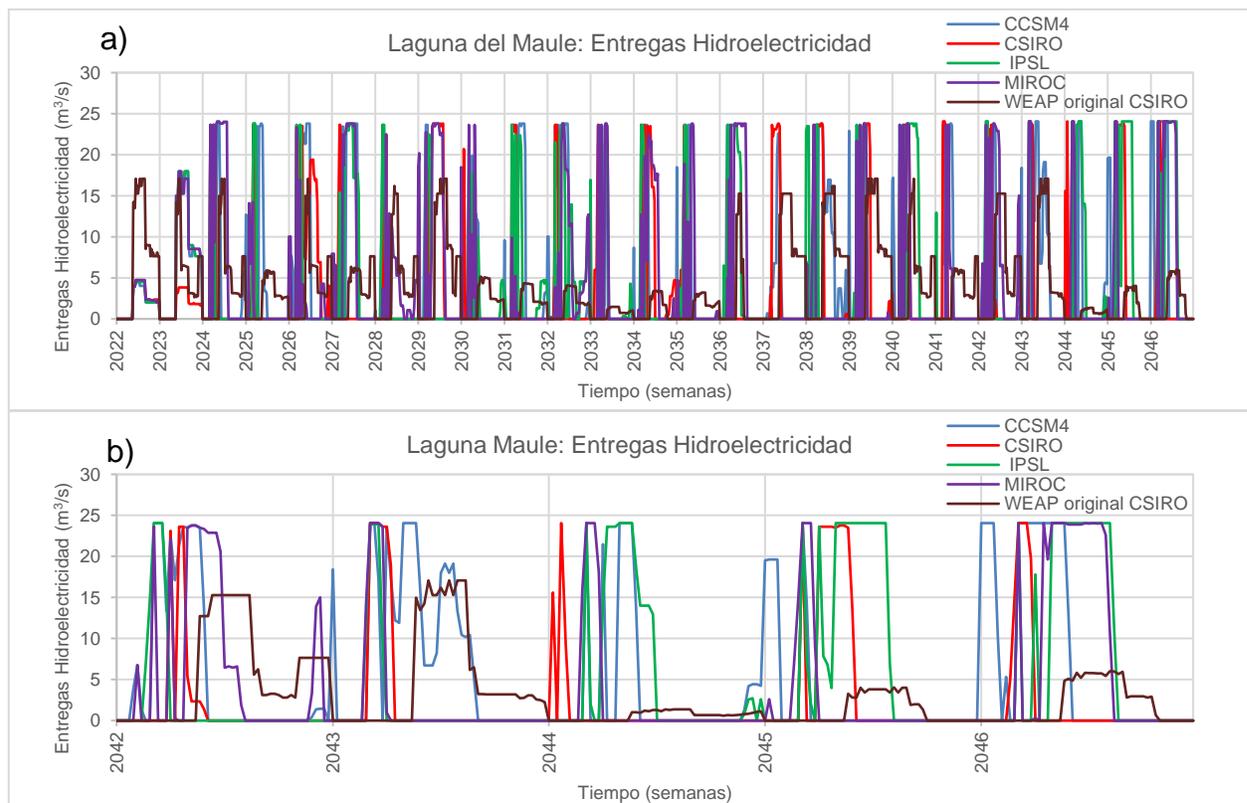
embalse es mayor en el escenario CCSM4 que los otros escenarios (CSIRO, IPSL y MIROC), tal como se muestra en las Figuras 6.1 y 6.3.

- La simulación realizada en el modelo WEAP original (escenario CSIRO) muestra que requiere menor caudal para suplir el déficit de riego en la cuenca río Maule en Armerillo en comparación a los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado. Lo anterior, se debe a las modificaciones realizadas en el modelo WEAP original, descritas en el capítulo 5.1, que corresponde principalmente a la modificación de las fórmulas del convenio (principalmente del caudal reconstituido en Armerillo) y modificación topología del sistema.

6.1.3 Entregas Hidroelectricidad Laguna del Maule

Para las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado entre los años 2022 y 2023 se mantuvo la función de demanda hidroeléctrica original, no obstante, a partir del año 2024, bajo el supuesto que entre operación la central Los Cóndores, se incorporó como nodo de demanda en el modelo WEAP modificado la demanda hidroeléctrica de la central obtenida del modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting, aplicando las reglas de operación del convenio ENDESA - Riego del año 1947.

Las entregas generadas de uso hidroeléctrico en el modelo WEAP modificado y en el modelo WEAP original, se muestran en las Figuras 6.5.a y 6.5.b que corresponde a las entregas de uso hidroeléctrico en escala semanal entre los periodos 2022-2046 y los periodos 2042-2046 respectivamente, para obtener una mejor visualización de resultados en la Figura 6.5.b. La Figura 6.5.c, corresponde a las entregas de uso hidroeléctrico ciclo semanal (promedio semanal) entre los periodos 2022- 2046.



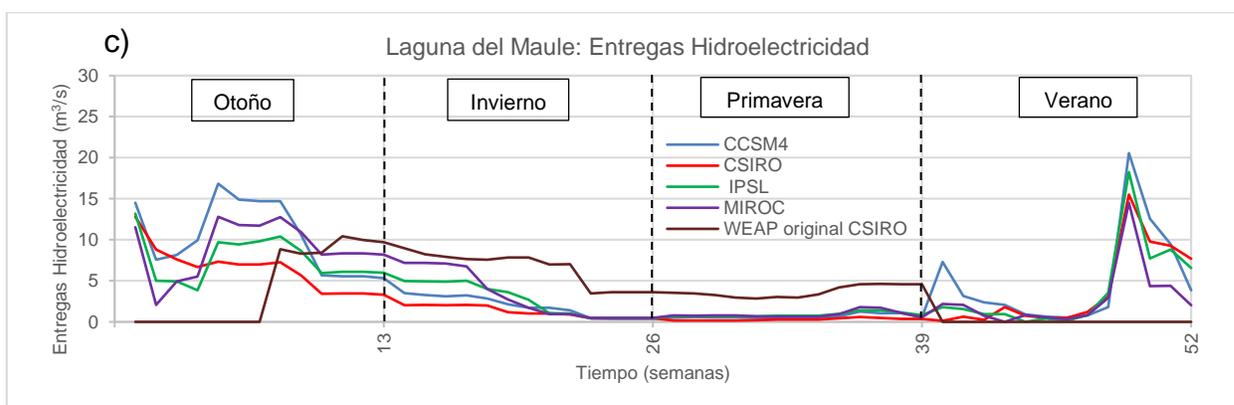


Figura 6.5 Entregas Hidroelectricidad laguna Maule del modelo WEAP original y del modelo WEAP modificado: a) Entregas hidroelectricidad en escala semanal (periodo 2022-2046), b) Entregas hidroelectricidad en escala semanal de los últimos 5 años de simulación (periodo 2042-2046), c) Entregas hidroelectricidad promedio semanal (periodo 2022-2046).

De la Figura 6.5 se puede apreciar los siguientes comentarios:

- En el modelo WEAP original la estacionalidad de uso hidroeléctrico ocurre principalmente en la época de otoño e invierno que corresponde a una función matemática para uso hidroeléctrico desde la laguna Maule definido en el modelo WEAP original, funciones definidas en el anexo F.
- En el modelo WEAP modificado la estacionalidad de uso hidroeléctrico de las entregas de la laguna Maule se produce principalmente en la época otoño, invierno y parte de verano con un caudal menor a la capacidad máxima de 25 m³/s de la central hidroeléctrica Los Cóndores.

De las simulaciones realizadas no hay vertimiento de la laguna Maule ya no sobrepasa su capacidad de 1420 Hm³ durante el periodo de simulación (años 2022-2046).

En anexo D y anexo E, se entrega resultados para el periodo futuro laguna Invernada y embalse Melado respectivamente, que corresponden a las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado bajo escenario de cambio climático RCP8.5.

6.1.4 Confiabilidad entregas riego e hidroelectricidad

A partir de las entregas de riego e hidroelectricidad de la laguna del Maule, se realizó un análisis de distintos criterios de desempeño, incluyendo confiabilidad y vulnerabilidad, para satisfacer la demanda. Para el riego se consideró como etapa de desempeño el año calendario, mientras que para la hidroelectricidad se verificó a nivel mensual.

El análisis se realizó considerando las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y en el modelo WEAP modificado.

6.1.4.1 Desempeño Entregas de Riego

Un objetivo de las entregas de la laguna Maule es satisfacer el déficit entre los derechos de agua del sistema de riego y el caudal reconstituido en Armerillo, hasta hacer uso del

volumen total disponible de riego de la laguna del Maule durante el año calendario, según reglas de operación del convenio ENDESA Riego del año 1947.

El análisis se realizó considerando las entregas de riego de la laguna del Maule, y el déficit de riego mensual generado entre los derechos de agua del sistema de riego y el caudal reconstituido en Armerillo. Ambos antecedentes se obtuvieron de los modelos de simulación “modelo WEAP original” y “modelo WEAP modificado”.

Para el análisis se consideró la definición de seguridad de riego, un indicador de confiabilidad, de la ley 18450 de la norma Chilena, que corresponde asegurar el 85% de la probabilidad del suministro, considerando como año fallo si un mes no se cumple el umbral de demanda. Los criterios de desempeño utilizados en la literatura confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad se evaluaron para distintos umbrales de déficit de riego de la laguna Maule, considerando como año fallo si no se cumple un umbral de demanda anual (déficit de riego).

En la Tabla 6.2, se presenta indicadores de confiabilidad para distintos umbrales de demanda anual y seguridad de riego según norma Chilena de las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y modelo WEAP modificado para el análisis de desempeño uso de riego de la laguna Maule.

Tabla 6.2 Entregas de Riego: Confiabilidad y Seguridad de Riego (%), periodo 2022-2046.

Modelo	Confiabilidad (Umbral % Déficit de Riego)					Seguridad de Riego
	100%	95%	85%	75%	65%	
CCSM4	84%	84%	84%	84%	88%	84%
CSIRO	44%	44%	44%	44%	48%	44%
IPSL	52%	52%	52%	56%	60%	52%
MIROC	68%	68%	68%	72%	76%	68%
WEAP original	96%	96%	96%	96%	96%	96%

De la Tabla 6.2, se aprecia que para distintos umbrales de demanda no varía la confiabilidad del sistema de riego, obteniendo fallas severas en las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado debido al bajo porcentaje de confiabilidad para un umbral de demanda del 65%. También se puede observar para las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado no se cumple la seguridad de riego del 85%, obteniendo como mejor indicador en el modelo climático CCSM4 equivalente a un 80%. Lo anterior, se debe principalmente a que el volumen disponible de riego de la laguna Maule estimado según las reglas del convenio Endesa-Riego (1947) no fue suficiente para satisfacer el déficit de riego durante el año calendario.

En la Figura 6.6.a, se muestra resultados del número de fallas totales considerando un umbral de demanda anual del 85%. En la Figura 6.6.b, se muestran los indicadores de confiabilidad y resiliencia considerando un umbral de demanda anual del 85%, y seguridad de riego considerando año fallo según la norma Chilena. En la Figura 6.6.c, se muestra los resultados del indicador de vulnerabilidad para un umbral de demanda anual del 85% y 100%. Los resultados corresponden a las simulaciones realizadas en el modelo WEAP original y modelo WEAP modificado.

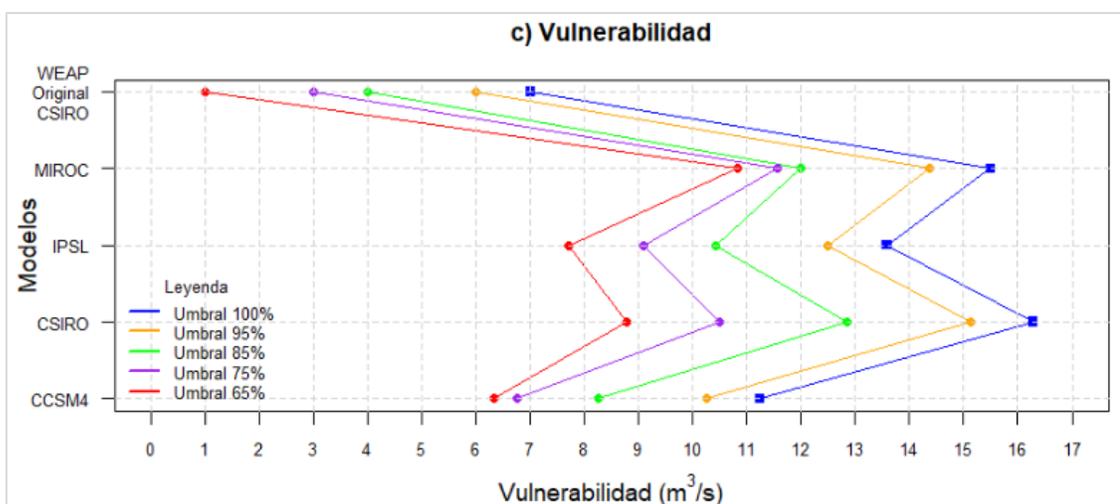
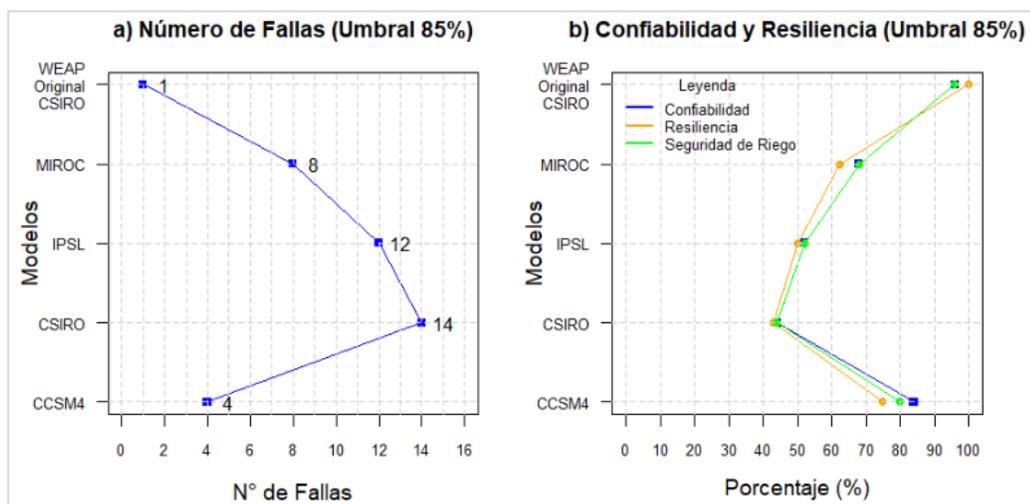


Figura 6.6 Criterios de Desempeño Entregas para Riego laguna del Maule: a) Número de fallas totales (umbral de demanda anual 85%), b) Indicadores de Confiabilidad, Resiliencia para un umbral de demanda anual del 85%, y Seguridad de Riego según norma Chilena, c) Indicador de Vulnerabilidad para distintos umbrales de demanda anual (m^3/s), periodo 2022-2046.

De la Figura 6.6, se puede apreciar los siguientes comentarios:

- Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado no cumple con la seguridad de riego del 85% (Figura 6.6.b). Con respecto al indicador de confiabilidad (Figura 6.6.b) considerando el análisis hasta un umbral de demanda anual del 65%, se obtuvo como resultado un porcentaje de confiabilidad menor al 85%, obteniendo fallas severas por no cumplir las entregas del embalse Maule con el suministro de déficit de riego.
- La simulación realizada en el modelo WEAP original cumple con el indicador de confiabilidad y seguridad de riego del 85% (Figura 6.6.b), no obstante, en la actualidad la laguna Maule no es capaz de suministrar el total de déficit de riego generado en la cuenca río Maule en Armerillo, encontrándose el volumen de la laguna Maule (volumen observado) en el colchón intermedio del embalse, cercano al límite del colchón inferior. No obstante, la simulación realizada en el modelo

WEAP original el volumen simulado se encuentra en el borde del colchón superior y colchón intermedio, disponiendo de una mayor cantidad de recursos hídricos de la laguna Maule con respecto a lo observado en los últimos años.

- Del modelo WEAP modificado, el modelo climático CCSM4 corresponde al escenario de mayor confiabilidad para satisfacer el déficit de riego, siendo el escenario con el menor número de fallas totales, de menor vulnerabilidad generando menores déficit, y el de mayor probabilidad para recuperarse de una falla. Es importante mencionar, de las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado, el modelo climático CCSM4 es el que genera mayores volúmenes del embalse durante el periodo de simulación (periodo 2022-2046), disponiendo de una mayor cantidad de recursos hídricos en la laguna Maule para satisfacer el déficit de riego generado en el sector de Armerillo.
- Del modelo WEAP modificado, el modelo climático CSIRO corresponde al escenario de menor confiabilidad para satisfacer el déficit de riego generado entre los derechos de agua y el caudal reconstituido en Armerillo, siendo el escenario con el mayor número de fallas totales, de mayor vulnerabilidad generando mayores déficits, y el de menor probabilidad para recuperarse de una falla.

6.1.4.2 Hidroelectricidad Laguna del Maule

En el modelo WEAP original la demanda de hidroelectricidad de la laguna Maule se estima multiplicando un factor de demanda semanal por el volumen disponible de hidroelectricidad. La suma del factor de demanda semanal durante el año calendario equivale al 100%.

En cambio, en el modelo WEAP modificado la demanda hidroeléctrica se define como una variable de entrada (exógena) y se incorporó como nodo de demanda en el modelo WEAP modificado la demanda hidroeléctrica de la central Los Cóndores, aplicando las reglas de operación del convenio ENDESA - Riego del año 1947.

Para el análisis de desempeño para uso hidroeléctrico de la laguna Maule, se aplicó los criterios de desempeño utilizados en la literatura (confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad) evaluando para distintos umbrales de demanda a nivel mensual.

En la Tabla 6.3, se presenta resultados indicadores de confiabilidad para distintos umbrales de demanda mensual para el análisis de desempeño uso hidroeléctrico laguna del Maule del modelo WEAP original y modelo WEAP modificado.

Tabla 6.3 Confiabilidad Entregas Hidroelectricidad (%), período 2022-2046

Umbral (% Demanda Hidroelectricidad)	Modelo WEAP Modificado				Modelo WEAP Original
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	
Umbral 100%	79%	70%	67%	77%	100%
Umbral 95%	79%	71%	67%	77%	100%
Umbral 85%	80%	72%	68%	78%	100%
Umbral 75%	81%	72%	68%	78%	100%
Umbral 65%	82%	72%	68%	79%	100%

De la Tabla 6.3, las modelaciones realizadas en el modelo WEAP modificado se aprecia que para distintos umbrales de demanda la confiabilidad del sistema varia levemente obteniendo una mayor confiabilidad a medida que disminuye el umbral de demanda. En cambio, en el modelo WEAP original la simulación se realizó para satisfacer el 100% de la demanda eléctrica desde la laguna Maule, aplicando reglas matemáticas indicadas en el anexo F.

En la Figura 6.7.a, se muestra el número de fallas totales para un umbral del 85% de la demanda mensual. En la Figura 6.7.b, se muestra resultados de los indicadores confiabilidad y resiliencia para el umbral del 85% de la demanda mensual. En la Figura 6.7.c, se muestra resultados del indicador de vulnerabilidad para distintos umbrales de demanda a nivel mensual.

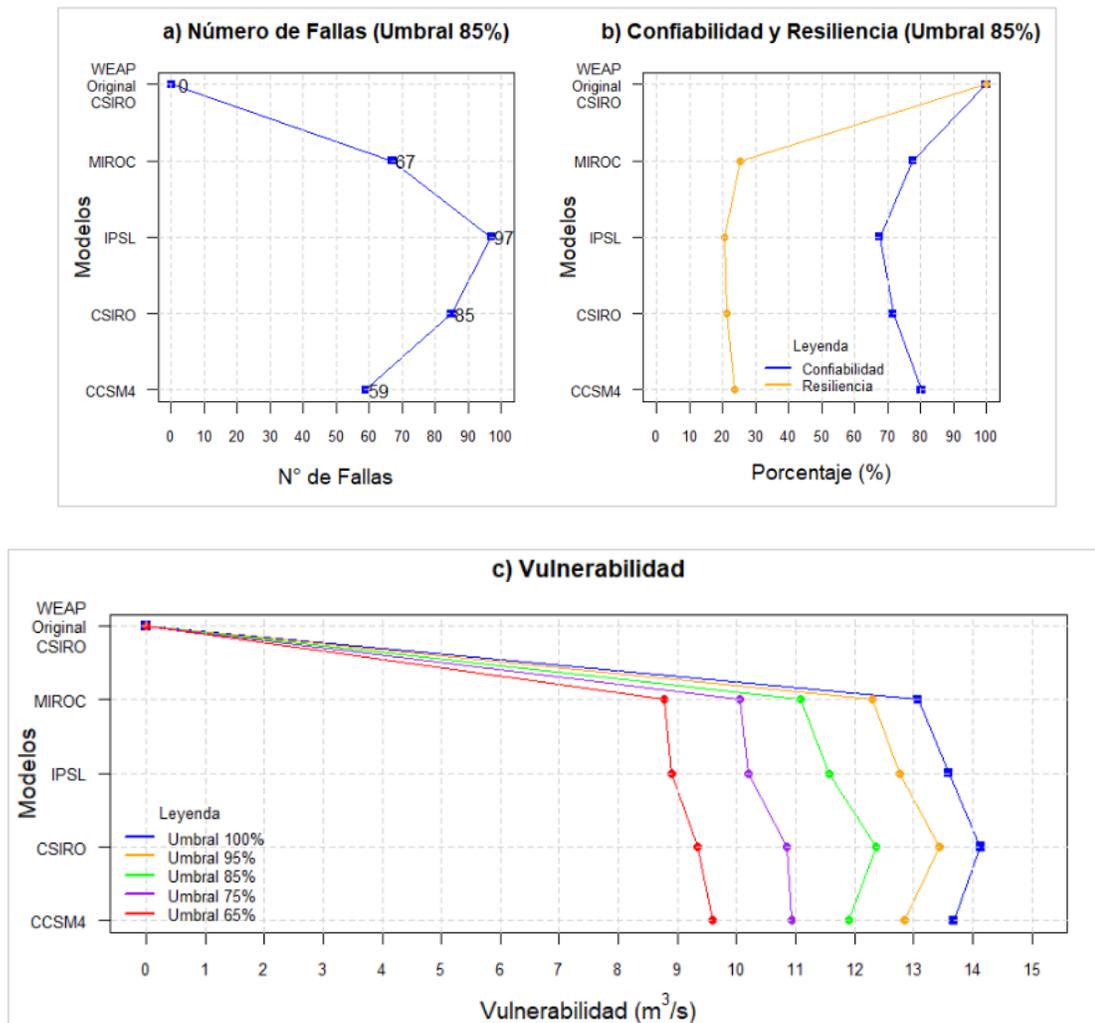


Figura 6.7 Criterios de desempeño Entregas Hidroelectricidad laguna del Maule: a) Número de fallas totales para un umbral de demanda del 85%, b) Indicadores de Confiabilidad y Resiliencia para un umbral de demanda del 85%, c) Indicador de Vulnerabilidad para distintos umbrales de demanda (m^3/s), periodo 2022-2046.

De la Figura 6.7, se puede apreciar los siguientes comentarios:

- La confiabilidad de que se cumpla la demanda eléctrica de la laguna Maule en el modelo WEAP original es del 100%, dado que en el modelo WEAP original las entregas para uso hidroeléctrico se generaron mediante reglas matemáticas tal que se cumpla el 100% de la demanda.
- En el modelo WEAP modificado, al aplicar las reglas del convenio no se alcanza a satisfacer la demanda generada proyectada por el sistema eléctrico, dado que ambos modelos (modelo WEAP modificado y modelo de optimización) se desarrollaron bajo distintas fuentes de información.
- Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado la resiliencia es de aproximadamente del 20% (Figura 6.7.b) de los distintos modelos climáticos (CCSM4, CSIRO, IPSL, MIROC), es decir, la rapidez para recuperarse de un estado de falla a no falla en promedio es de 5 meses aproximadamente.
- Del modelo WEAP modificado, el modelo climático CCSM4 corresponde al escenario de mayor confiabilidad para satisfacer la demanda eléctrica, siendo el escenario con el menor número de fallas totales, de menor vulnerabilidad generando menores déficit, y el de mayor probabilidad para recuperarse de una falla. Es importante mencionar, de las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado, el escenario climático CCSM4 es el que genera mayores volúmenes del embalse durante el periodo de simulación (periodo 2022-2046), disponiendo de una mayor cantidad de recursos hídricos en la laguna Maule para satisfacer la demanda eléctrica.
- Del modelo WEAP modificado las simulaciones que generan menor confiabilidad para satisfacer la demanda eléctrica corresponden a los escenarios IPSL y CSIRO, generando bajos volúmenes en el embalse, siendo los sistemas con el mayor número de fallas totales, de mayor vulnerabilidad generando mayores déficits y de menor resiliencia para recuperarse de una falla.

Capítulo 7. Conclusiones y Comentarios

El desarrollo de este trabajo se enmarca en la modelación para el análisis de la interferencia operacional entre hidroelectricidad y riego en la cuenca del Maule, mejorando la herramienta de simulación modelo WEAP cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020).

La interferencia operacional entre hidroelectricidad y riego en la cuenca Maule, se produce por el uso compartido de los recursos hídricos de la cuenca, principalmente el uso de la Laguna del Maule que es un embalse de uso multipropósito.

El modelo WEAP cordillera (utilizado para el PEGH) corresponde a un modelo hidrológico operacional de la cuenca río Maule en Armerillo, la simulación se realizó en el periodo histórico (1984-2015) y en el periodo futuro bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, modelo climático CSIRO Mk3-6-0 (2016-2050). En el modelo WEAP original la simulación del volumen del embalse Laguna del Maule durante el periodo histórico se desarrolló en el colchón superior de la laguna, por lo que no se logró una buena representación del volumen del embalse en comparación a los registros históricos.

El desarrollo de este trabajo se logró mejorar la simulación histórica del volumen del embalse Laguna del Maule, mediante la modificación de las reglas de operación del convenio ENDESA-Riego (modificación caudal reconstituido en Armerillo), y modificaciones en el esquema operacional de la cuenca río Maule en Armerillo, logrando que la simulación del embalse Laguna del Maule descienda del colchón superior al colchón intermedio de la laguna.

Una vez realizadas las mejoras, se desacopló el módulo precipitación-escorrentía del modelo WEAP modificado. La principal contribución en el modelo WEAP modificado fue la incorporación de caudales afluentes a la cuenca bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, de los distintos modelos climáticos del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), y el ingreso de la demanda eléctrica obtenida de un modelo de optimización en AMEBA, desarrollado por la empresa SPEC Energy Consulting, mejorando la representación de las demandas de agua para uso hidroeléctrico bajo distintos modelos de cambio climático, logrando obtener un mayor rango de variabilidad de resultados para el análisis de futuros escenarios.

De los resultados obtenidos, la simulación del modelo WEAP original, modelo climático CSIRO (periodo 2022-2046), el volumen simulado del embalse Laguna del Maule se desarrolló entre el colchón superior y colchón intermedio de la laguna. En cambio, en el modelo WEAP modificado las simulaciones realizadas bajo los distintos escenarios de cambio climático RCP8.5 (modelos climáticos CCSM4, CSIRO, IPSL, MIROC), el volumen del embalse en promedio se desarrolló en el colchón intermedio de la laguna, siguiendo la tendencia de los registros históricos del embalse del Maule.

Del modelo de optimización desarrollado en AMEBA, la importancia de modelar todo el Sistema Eléctrico Nacional es que busca resolver el problema de operación en sistemas eléctricos hidrotérmicos, respetando restricciones del sistema eléctrico, restricciones de recursos hídricos (convenios, disponibilidad de agua de los embalses, etc.) bajo la función objetivo de minimizar costos para la generación de energía, permitiendo obtener como

resultados proyecciones de demanda para la generación de cada central, estableciendo metas de entrega de los embalses para uso hidroeléctrico en la operación del sistema eléctrico. En cambio, en el modelo WEAP original la proyección de demanda se obtuvo mediante reglas matemáticas, logrando una baja representación de la demanda eléctrica futura.

La importancia del modelo WEAP modificado es que permite obtener un mayor rango de variabilidad de resultados para el análisis futuro de la cuenca, mediante el ingreso de caudales afluentes y el ingreso de la demanda eléctrica bajo distintos escenarios de cambio climático, obtenidos a partir de distintos modelos de simulación. La principal ventaja es que permite a los tomadores de decisiones analizar y evaluar el impacto de los posibles escenarios futuros de cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca, mediante la formulación de políticas, generación de soluciones operacionales para un uso más eficiente de los recursos en periodos de escasez hídrica.

Es importante mencionar que las principales limitaciones para el desarrollo de este estudio, en el modelo WEAP modificado y en el modelo de optimización desarrollado en AMEBA, se utilizaron distintas fuentes de información. En el modelo WEAP modificado se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). En cambio, en el modelo de optimización en AMEBA, se utilizó como datos de entrada los caudales afluentes de escenarios de cambio climático de la Comisión Nacional de Energía (CNE), requiriendo la integración de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para la simulación del modelo. A pesar de las discrepancias existentes entre ambas fuentes de información, se recomienda para el desarrollo de trabajos futuros incorporar en el modelo de optimización caudales afluentes bajo escenarios de cambio climático del Balance Hídrico Nacional que corresponde a la información oficial del estudio de cuencas en Chile, permitiendo reducir la incertidumbre hidrológica en el desarrollo de los modelos.

Para finalizar, se recomienda explorar en realizar modificaciones al convenio y adecuarla a las nuevas condiciones climáticas y futura para poder reducir la interferencia operacional entre el uso de riego e hidroelectricidad de la Laguna del Maule, dada la escasez de recursos hídricos en el periodo histórico y en los posibles escenarios de cambio climático.

Capítulo 8. Bibliografía

- Arias, C. (2011). Análisis de los Efectos de distintos Escenarios de Registro Histórico en la Estimación de Caudales de Crecida. Aplicación a Obras Hidráulicas de la Cuenca del Río Maule. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Biblioteca Nacional del Congreso (BNC) (2022). Código de Aguas. Artículo 266. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605>
- Bassi, V. (2016). Efecto 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 Eléctrica. Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Cai, X., Wallington, K., Shafiee-Jood, M., & Marston, L. (2018). Understanding and managing the food-energy-water nexus—opportunities for water resources research. *Advances in Water Resources*, 111, 259-273.
- Cannon, A. J. (2016). Multivariate bias correction of climate model output: Matching marginal distributions and intervariable dependence structure. *Journal of Climate*, 29(19), 7045–7064. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0679.1>
- Center for Climate and Resilience Research (CR2). Base de datos. Productos grillados. Web: <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>.
- Center for Climate and Resilience Research (CR2). Servicios climáticos. Explorador de cuencas Hidrográficas Camels. Web: <https://camels.cr2.cl/>.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. (2009). Guía Metodológica Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). Web: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/12/BD_CNE_cc_v1.1.zip.
- Convenio ENDESA-Dirección de Riego del M.O.P. (1947). Uso compartido de los Recursos del Embalse Laguna del Maule.
- Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). Reportes y Estadísticas. Web: <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>
- Dirección General de Aguas (DGA). Información de Recursos y Organizaciones de Usuarios. Sistema Hidrométrico en Línea. Datos de estaciones en línea. Web: https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_param/dgasat_param.jsp?param=1
- Dirección General de Aguas (DGA) (2007). Resolución DGA N° 2335/07 Modificación de Estatutos de la “Junta de Vigilancia del Río Maule Primera Sección.”

- Dirección General de Aguas (DGA) (2017a). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2017b). Plan Maestro de los Recursos Hídricos Región del Maule. EVERIS CHILE S.A.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en la Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. In Dirección General de Aguas, División de Estudios.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2020). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Maule. UTP EVERIS CHILE S.A.-HIDROGESTIÓN.
- Energía Abierta (2022). Capacidad Instalada. Disponible públicamente en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>
- Fundación Chile, (2022). Cuencas Regenerativas de la crisis a la Seguridad Hídrica Hoja Ruta Maipo y Maule.
- Fuster, R. (2013). El Estado de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile: Estudio de Casos en la Cuenca del Río Limarí. Tesis Doctoral en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Gómez, M. (2019). Impactos de Posibles Megasequías en la Generación Hidroeléctrica del Sistema Eléctrico Nacional de Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- González, J., Olivares, M., Medellín-Azuara, J., & Moreno, R. (2020). Multipurpose Reservoir Operation: a Multi-Scale Tradeoff Analysis between Hydropower Generation and Irrigated Agriculture. *Water Resources Management*, 34(9), 2837–2849. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02586-5>
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 18(1), 14–20.
- Hervis, G., Geler, T., Díaz, R., & Amestoy, I. (2018). El modelo WEAP: una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático WEAP. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28326.32325>
- Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE Chile). SNIT. Geoportal de Chile. Acceder al catálogo. Catálogo. Catastros de Uso de Suelo y Vegetación. Web: <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B15CA318D-12F7-486B-A2AB-C0BAF8903ED6%7D>.

- Ingendesa, (2005). Declaración de Impacto Ambiental MiniCentral Hidroeléctrica Ojos de Agua.
- Ingendesa, (2007). Estudio de Impacto Ambiental Central Hidroeléctrica Los Cóndores.
- Ingendesa, (2010). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto “Central Hidroeléctrica La Mina”.
- Ingol-Blanco, E., & Mckinney, D. C. (2009). Hydrologic Model for the Rio Conchos Basin: Calibration and Validation. <http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html2>.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2021). Censo Agropecuario. Web: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>
- IPCC, (2013) “Resumen para responsables de políticas, En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. WEB: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Kjeldsen, T., & Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. In Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques (Issue 5).
- Loucks, D., & van Beek, E. (2005). Water Resources Systems Planning and Management.
- 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. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Meteodata. (2020). Análisis de la Estadística Hidrológica utilizada en los procesos de la Comisión Nacional de Energía.
- Moy, W.-S., Cohon, J. L., & Reville, C. S. (1986). A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. In WATER RESOURCES RESEARCH (Vol. 22, Issue 4).
- Paredes, M. (2017). Análisis de Alteración Hidrológica producto de la Interconexión SIC-SING en un Escenario de Incorporación Masiva de Energía Solar en el Norte Grande de Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Purkey, D. R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M. W., Dale, L. L., Yates, D., & Dracup, J. A. (2007). Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture

and other sectors: A case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, 87(1 SUPPL). <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9375-8>

Rojas, P. (2018). Tradeoffs entre Hidroelectricidad y Riego en un Sistema Eléctrico Hidrotérmico Multi-Cuenca. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

ANEXOS

Anexo A. Usuarios consuntivos Junta de Vigilancia Río Maule.

De acuerdo a la información adquirida de la página de la Junta de Vigilancia Río Maule (JVRRM) los principales canales de uso consuntivos para el sistema de riego son los siguientes:

Tabla A.1 Usuarios Consuntivos

Canales Ribera Sur	Acciones	Canales Ribera Norte	Acciones
Melado	18000	Las Garzas	250
Maule Sur - Chiburgo	17034,16	Las Suizas	150
Canal Sur 1 - Maule Sur		Maule Norte	37766,48
Santa Elena Alto N°1	309,12	Esperanza	2000
Santa Elena Alto N°2	213	Restitución Maitenes	
Santa Elena Alto N°3	14,67	Riesco Maitenes	700
Santa Elena Alto N°4	122,91	Mariposas San Vicente	2504,64
Machicura B	732,78	Prado Interesado	502
Santa Elena Bajo N°6	61,07	Silva Henríquez	4732,65
La Barra	281,66	Oriente	1177,17
Floresta N°8	574,2	Lircay Mandiola	1926,99
Flor Lillo 1 y 2	399,14	Santa Elena	1938,84
Flor Lillo 3	335,9	Peña Palo Seco	1870
Caracoles Media Máquina	186	Riesco Chico	116
Abranquil b	2900,96	Sandoval - San Miguel	3537,14
El Carmen	198,23	Flor del Llano	991,86
Benavente B	772,84	Alimentador Norte	
Canal Sur 1 - Canales Particulares		Bella Unión	499
San Ramón	828,72	Volcán	160
Benavente 3	371,2	Chequén	720
Cunaco	1371,06	Montero	337
Benavente 1	95,1	Canal San Clemente	
Esperanza Sur	1275,73	Duao Zapata - Vista Hermosa	5937,18
Guiones	1268,14	Colin	1363
Benavente 2	336	Mercedes	236,94
Rosa Fabry	721,83	Peña Palo Seco	263,06
Bustamante	826,76	Quiñantu	611
Peñuelas Sur	946,88	Armonía	781
Melozal	4270,46	Huilquilemu	1825
Canal Sur 2 - Canales Particulares		Hacienda Maule	700
Romero	1036,3	La Isla	26
Michaud	624,9	Santa Rosa	70
Gatica	1520,26	Total Ribera Norte	73692,95

Cerda	1292,23
Canales Ribera Sur	Acciones
San Pablo	937,18
Canal Sur 3 - Canales Particulares	
Olivar San Ignacio	2724,79
Pando	2400
Bobadilla	223
San Luis	225,95
Chivato Loncoche	2120
El Molino y La Unión	1101,95
Total Ribera Sur	68655,08

Anexo B. Antecedente Detallado Infraestructura y principales usuarios de la cuenca río Maule.

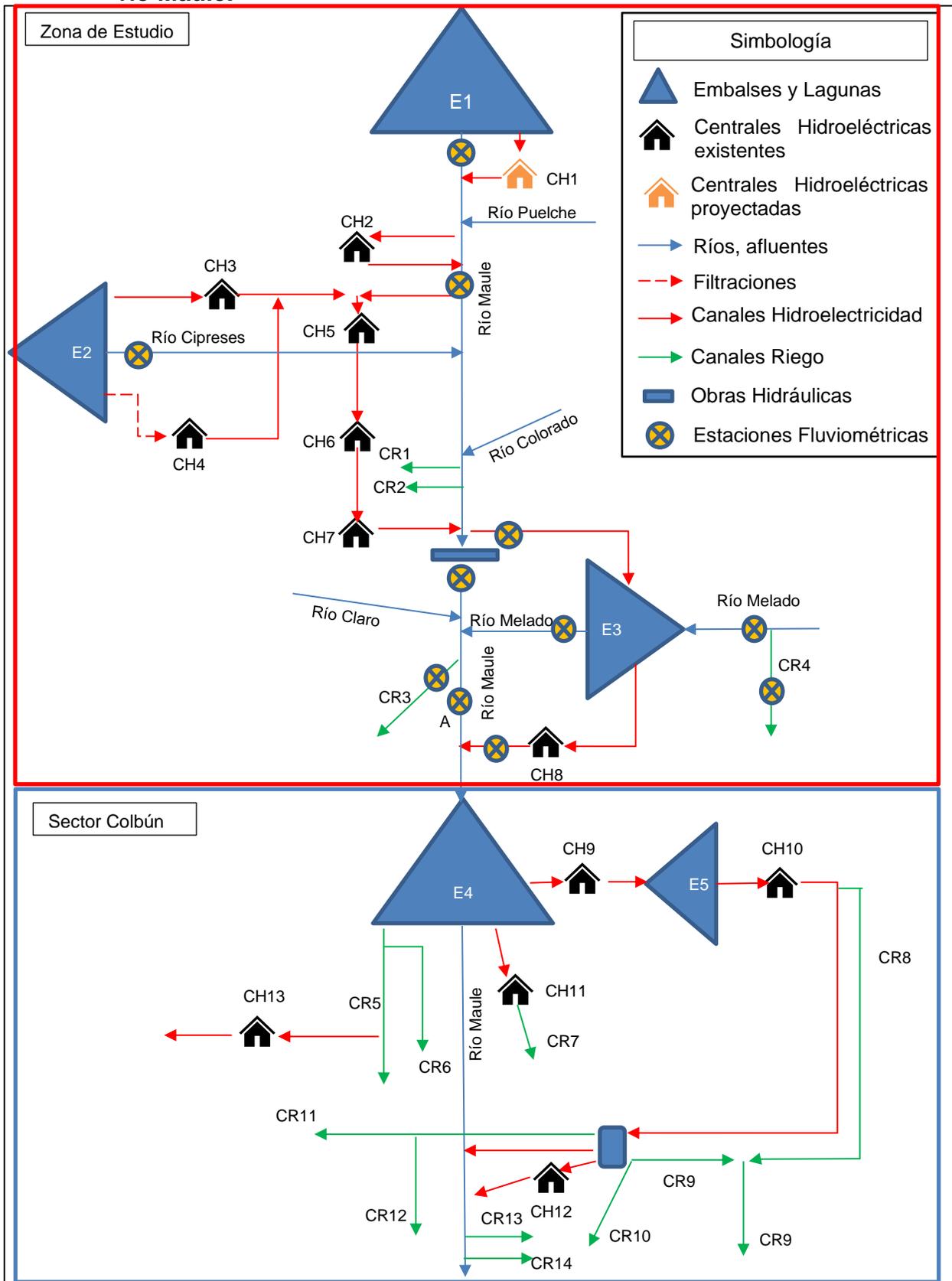


Figura B.1 Diagrama Unifilar Sistema Riego – Hidroelectricidad

Del diagrama Unifilar Figura B.1, la zona marcada en color rojo corresponde a la zona de estudio del presente trabajo cuenca río Maule en Armerillo, mientras que la zona marcada en color azul corresponde al sector de Colbún donde los canales de riego del sector de Colbún más los canales de riego de la cuenca río Maule en Armerillo pertenecen al sistema de riego administrada por la Junta de Vigilancia del Río Maule (JVVM).

Las siguientes tablas corresponden a la infraestructura de la cuenca del río Maule bajo la nomenclatura indica en el diagrama Unifilar de la Figura B.1.

Tabla B.1 Embalses cuenca río Maule

Sigla	Embalses y lagunas	Volumen Máximo (Hm³)	Uso
E1	Laguna del Maule	1570	Riego e Hidroelectricidad
E2	Laguna La Invernada	174	Hidroelectricidad
E3	Embalse Melado	133	Hidroelectricidad
E4	Embalse Colbún	1544	Hidroelectricidad
E5	Embalse Machicura	55	Hidroelectricidad

Tabla B.2 Principales Canales de Riego Cuenca Río Maule

Sigla	Nombre Canales	% Distribución Riego
CR1	Las Garzas	1,69
CR2	Las Suizas	
CR3	Maule Norte Alto	10,97
CR4	Melado Los Hierros	12,65
CR5	Maule Norte Bajo	16,2
CR6	Sistema Maitenes	8,99
CR7	Maule Sur	11,97
CR8	Sur 1	12,54
CR9	Sur 2	3,92
CR10	Sur 3	4,02
CR11	San Clemente	13,8
CR12	Duao Zapata	
CR13	Unión Molino	1,90
CR14	Chivato Loncoche	1,38

Tabla B.3 Centrales hidroeléctricas Cuenca Maule

Sigla	Nombre Central	Tipo	Caudal (m³/s)	Potencia (MWh)	Empresa	Puesta en Servicio
CH1	Los Cóndores	Embalse	25	150	ENEL	En Construcción
CH2	La Mina	Pasada	60	34	Colbún S.A.	2017
CH3	Cipreses	Embalse	36	106	ENEL	1955
CH4	Ojos de Agua	Pasada	13	9	ENEL	2008
CH5	Isla	Pasada	84	70	ENEL	1963
CH6	Curillínque	Pasada	84	40	ENEL	1993
CH7	Loma Alta	Pasada	84	89	ENEL	1997
CH8	Pehuenche	Embalse	300	570	ENEL	1991
CH9	Colbún	Embalse	280	474	Colbún S.A.	1985

Sigla	Nombre Central	Tipo	Caudal (m³/s)	Potencia (MWh)	Empresa	Puesta en Servicio
CH10	Machicura	Embalse	280	95	Colbún S.A.	1985
CH11	Chiburgo	Pasada	20	19,4	Colbún S.A.	2007
CH12	San Ignacio	Pasada	180	37	Colbún S.A.	1996
CH13	San Clemente	Pasada	17	5,9	Colbún S.A.	2010

Anexo C. Incorporación Central Hidroeléctrica de pasada La Mina

En el modelo WEAP modificado se incorporó la central hidroeléctrica de pasada La Mina al no encontrarse incluida en el modelo WEAP original, modificándose parte de la topología del sistema de la cuenca río Maule entre la zona captación y canal de restitución de la central hidroeléctrica La Mina.

Según Ingendesa (2010), aguas abajo de la confluencia río Puelche y río Maule se incorporó la central hidroeléctrica de pasada La Mina de capacidad $60 \text{ m}^3/\text{s}$, encontrándose operativa desde el año 2017, estableciendo un caudal ecológico en el río Maule para el hábitat de las especies de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (aguas abajo de la captación central hidroeléctrica La Mina). Para efectos de modelación no tiene implicancia en los resultados de la simulación de la laguna del Maule, ya que se estableció como demanda en el periodo futuro la central hidroeléctrica Los Cóndores para el uso de los recursos hídricos de la laguna del Maule.

En la Figura C.1, se muestra topología en el sector la Mina del modelo WEAP original (izquierda), y topología central de pasada La Mina del modelo WEAP modificado (derecha). La nomenclatura de la Figura C.1, se define en la Tabla 2.1 del capítulo 2.2.1.

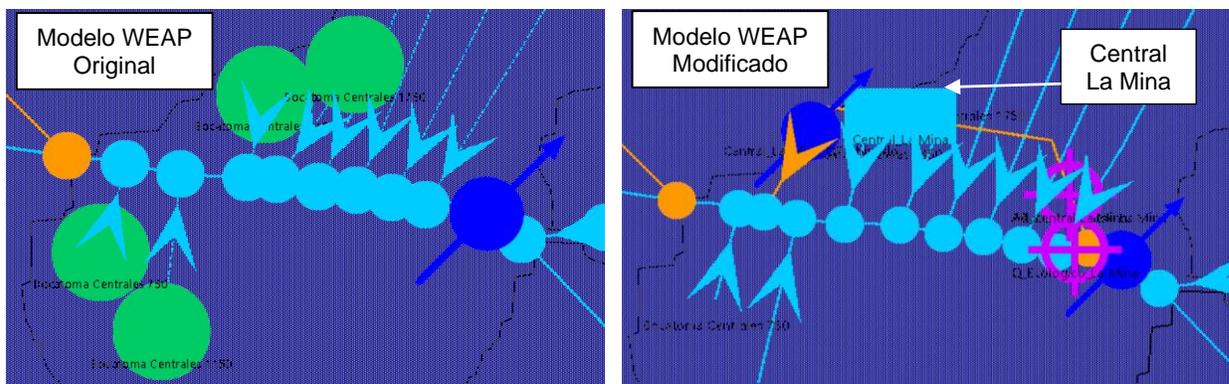


Figura C.1 Topología sector la Mina modelo WEAP original (izquierda) y modelo WEAP modificado central hidroeléctrica La Mina (derecha).

Anexo D. Modelo WEAP Escenario Futuro: Sector Laguna Invernada

A continuación, se presentan los resultados (series semanales) obtenidos en el sector laguna la Invernada, donde las líneas de color azul, rojo, verde y morado corresponden a las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado (series generadas con caudales afluentes obtenidas de los modelos climáticos GCMs del Balance Hídrico Nacional), y la línea de color café corresponde a la simulación realizada en el modelo WEAP original (modelo climático CSIRO).

Anexo D.1. Volumen laguna Invernada

A continuación, se presenta los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado y del modelo WEAP original (modelo climático CSIRO) en una extensión de 25 años de simulación (2022-2046). La Figura D.1 corresponde al volumen semanal simulado del embalse y la Figura D.2 corresponde al análisis de frecuencia del volumen semanal simulado del embalse.

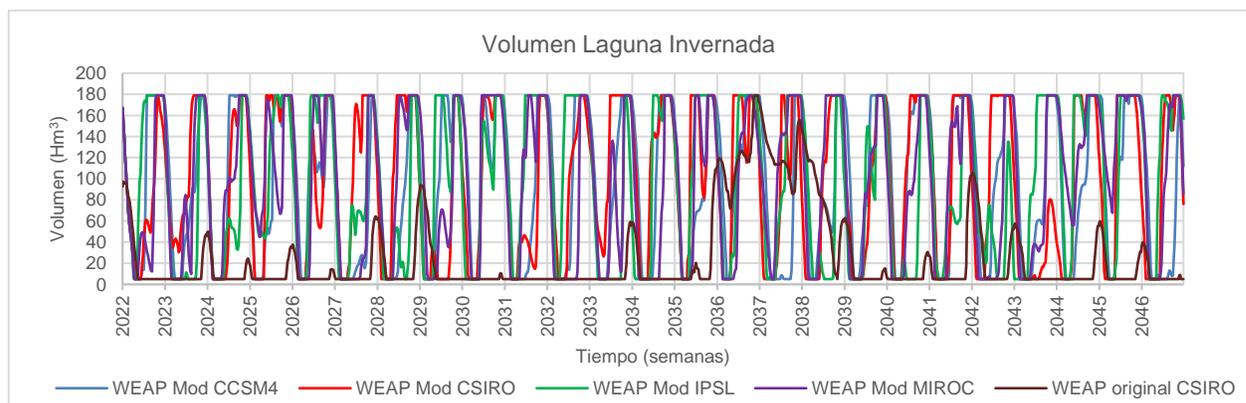


Figura D.1 Volumen simulado laguna Invernada (periodo 2022 - 2046)

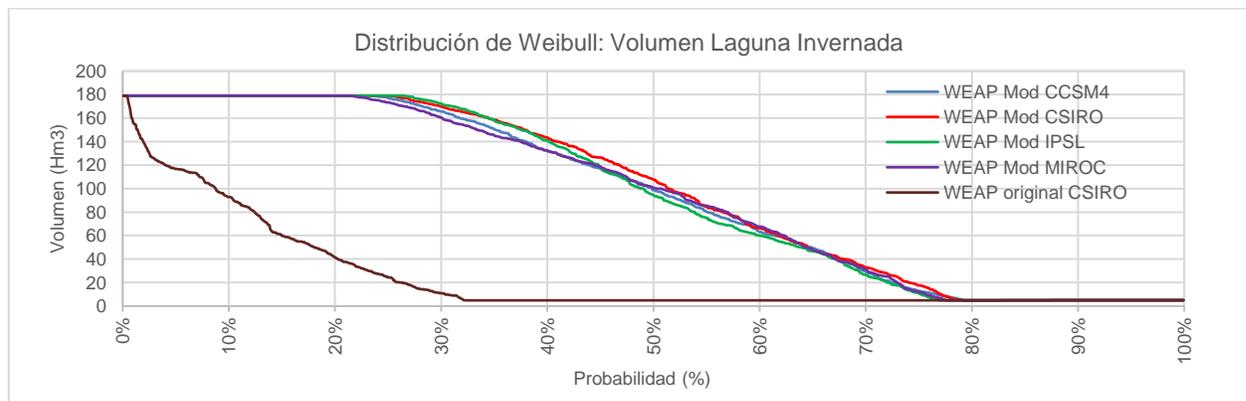


Figura D.2 Curva de duración volumen semanal simulado laguna Invernada (periodo 2022-2046).

Anexo D.2. Central Hidroeléctrica Cipreses

A continuación, se presenta los resultados (series semanales) obtenidos central hidroeléctrica Cipreses bajo los distintos escenarios de cambio climático, donde la línea de color negro corresponde a la demanda eléctrica obtenida del modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la consultora SPEC Energy Consulting, las líneas de color rojo, azul, verde y morado corresponde a las entregas generadas desde la laguna Invernada a la central Cipreses, volumen laguna Invernada y afluentes a la laguna Invernada obtenidas del modelo WEAP modificado.

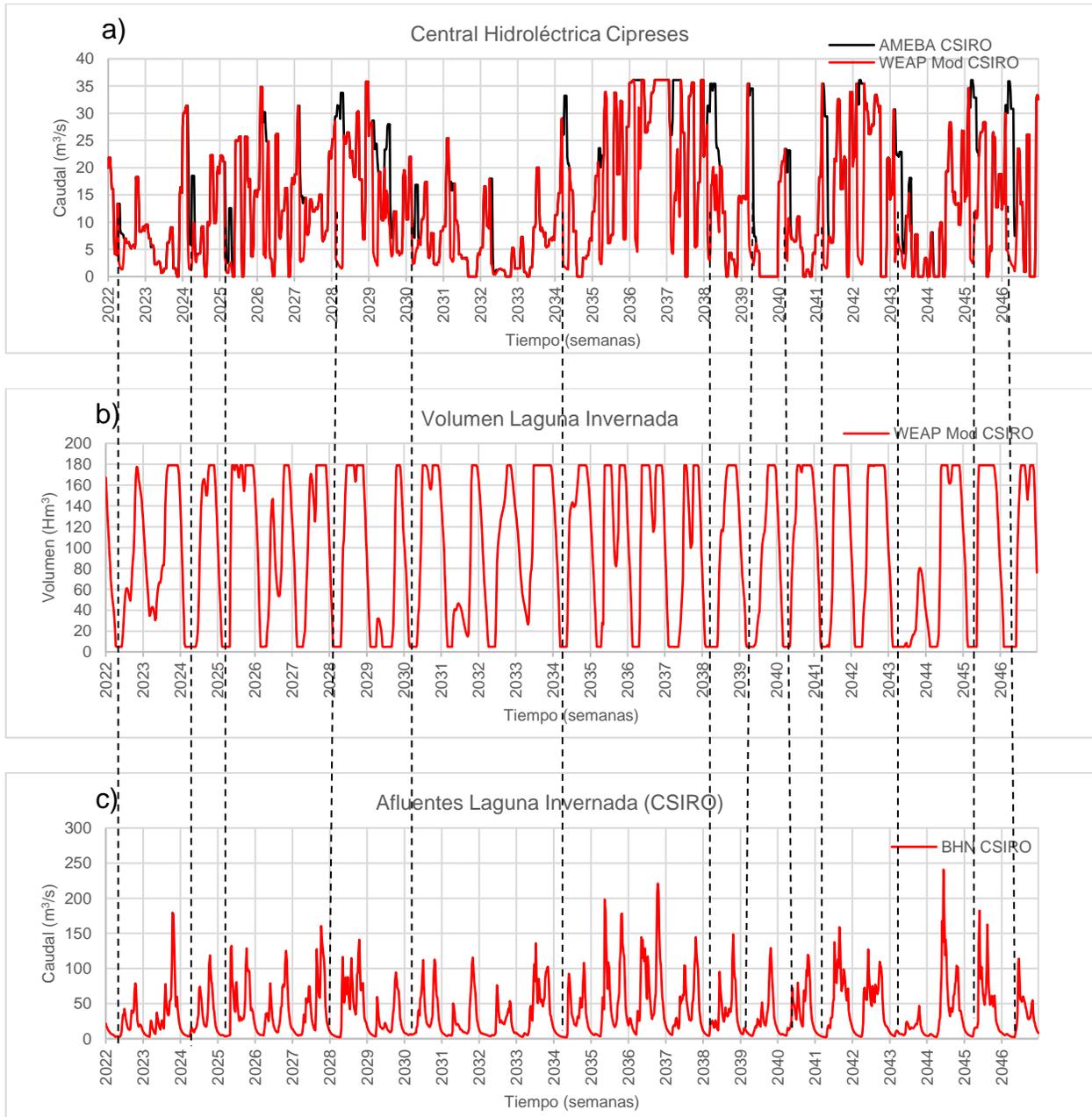


Figura D.3 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).

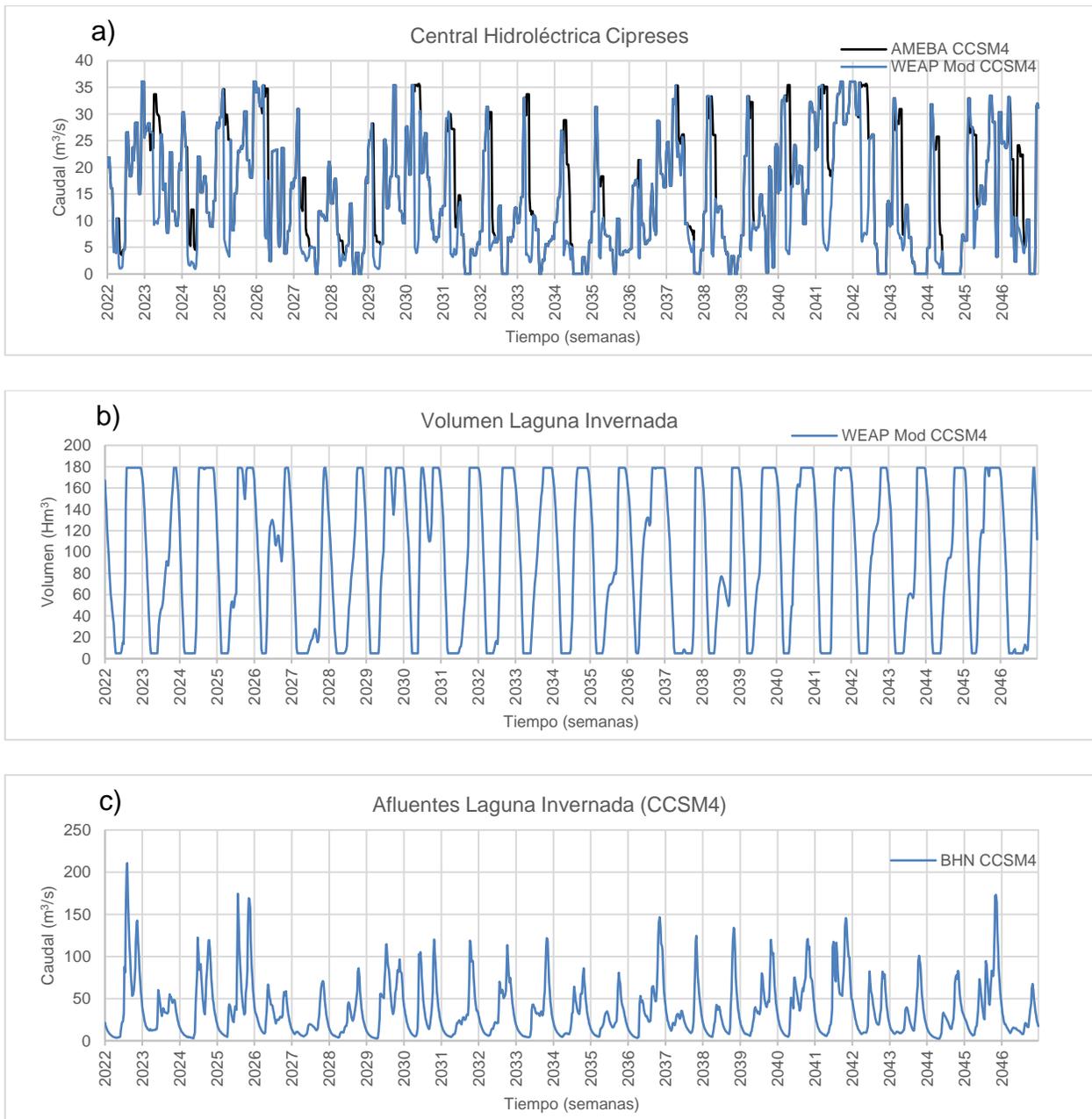


Figura D.4 Series semanales Modelo climático CCSM4 (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).

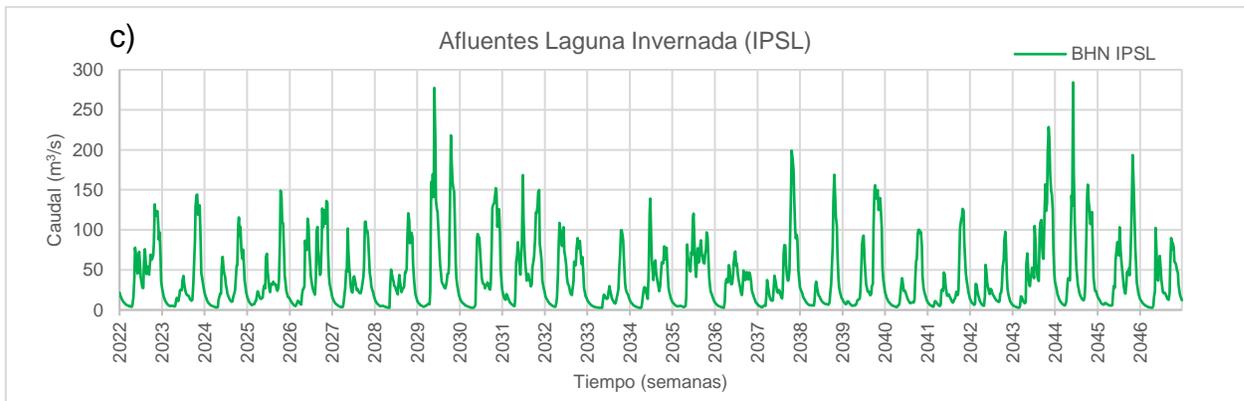
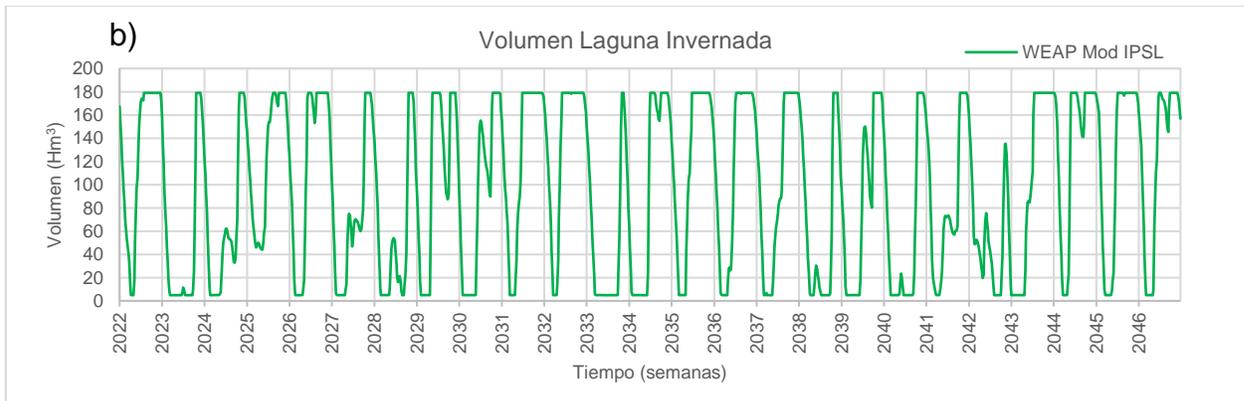
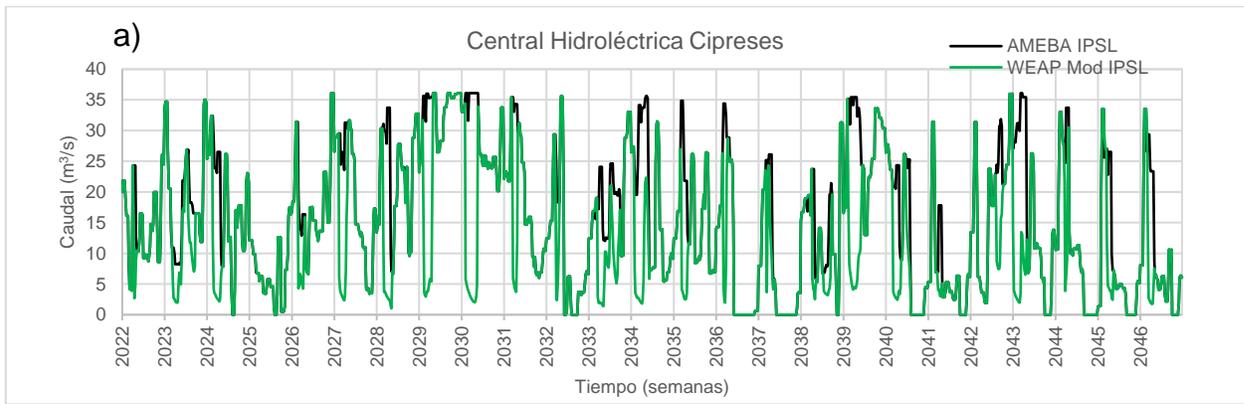


Figura D.5 Series semanales Modelo climático IPSL (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).

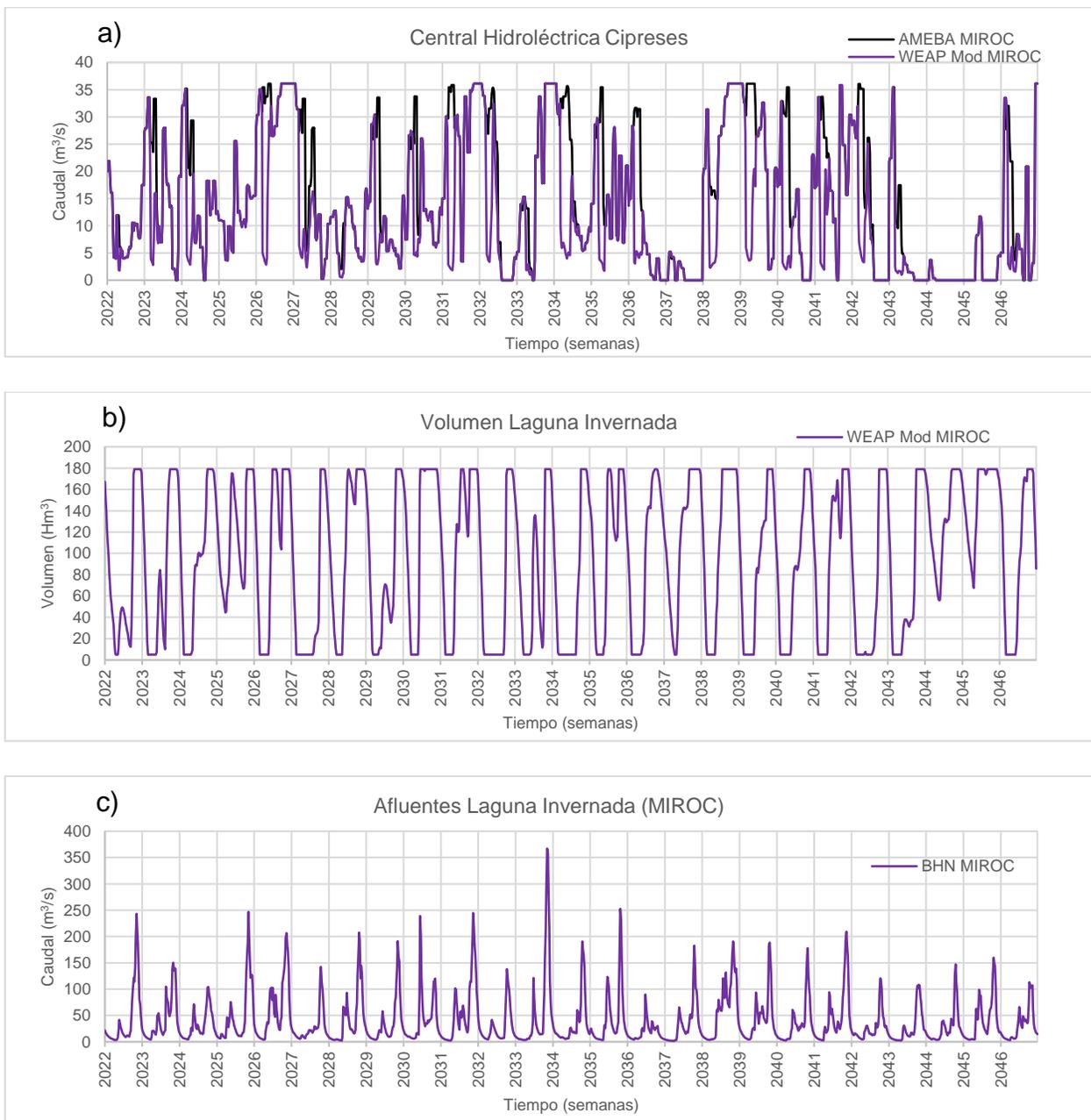


Figura D.6 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Cipreses (AMEBA) y entregas simuladas laguna Invernada (WEAP Modificado), b) Volumen simulado laguna Invernada (WEAP Modificado), c) caudales afluentes a laguna Invernada (WEAP Modificado).

Como se puede apreciar en las distintas figuras D.3, D.4, D.5 y D.6 para los distintos escenarios de cambio climático existen periodos donde se alcanza a cumplir la demanda hidroeléctrica central Cipreses, que corresponde a periodos cuando el volumen de la laguna y sus afluentes se encuentran en su valor mínimo por lo que no alcanzan a suministrar la demanda requerida por la central Cipreses.

Anexo E. Modelo WEAP Escenario Futuro: Sector Embalse Melado

A continuación, se presenta los resultados (series semanales) de volumen del embalse para una extensión de 25 años de simulación (2022-2046) obtenidas del modelo WEAP modificado (series generadas con caudales afluentes obtenidas de los modelos climáticos GCMs del Balance Hídrico Nacional) y del modelo WEAP original (modelo climático CSIRO).

Anexo E.1. Volumen Embalse Melado

A continuación, se presenta los resultados obtenidos del modelo WEAP modificado y del modelo WEAP original (modelo climático CSIRO) en una extensión de 25 años de simulación (2022-2046). La Figura E.1 corresponde al volumen semanal simulado del embalse y la Figura E.2 corresponde al análisis de frecuencia del volumen semanal simulado del embalse.

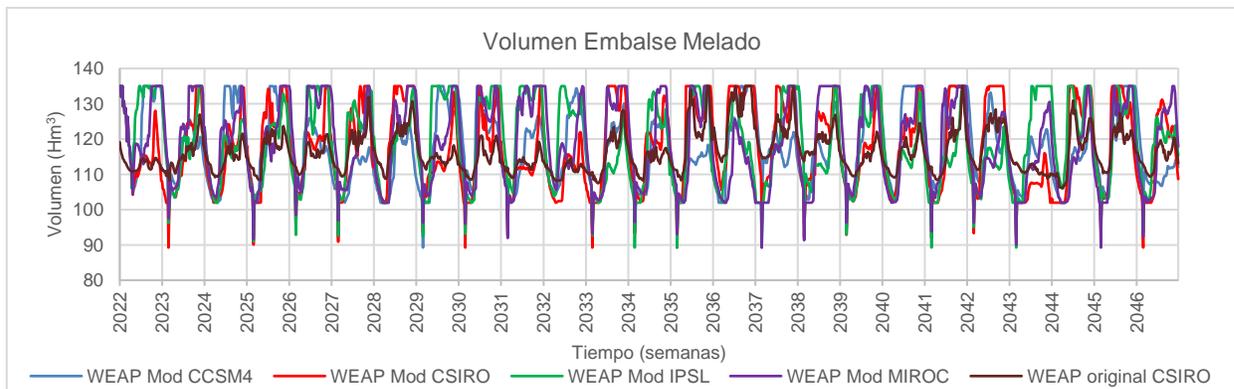


Figura E.1 Volumen simulado embalse Melado (Periodo 2022 - 2046)

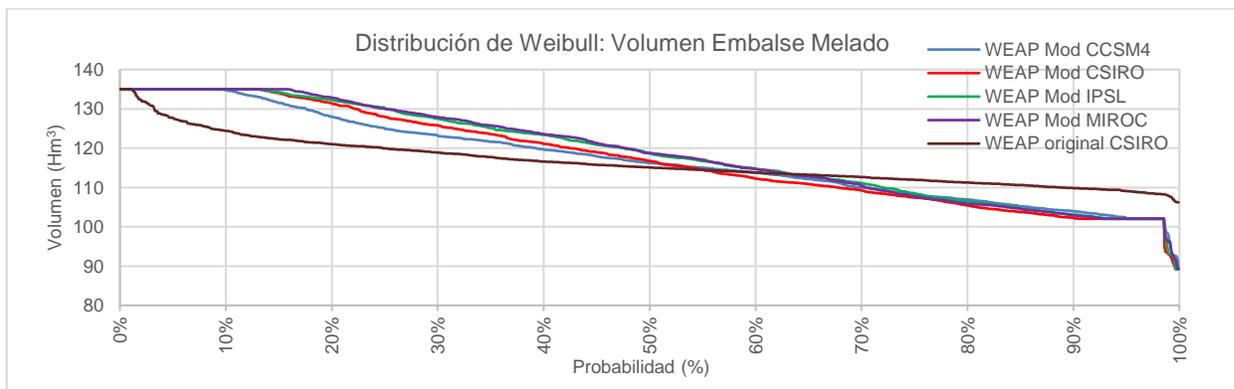


Figura E.2 Curva de duración volumen simulado semanal embalse Melado (periodo 2022 – 2046).

Anexo E.2. Central Hidroeléctrica Pehuenche

A continuación, se presenta los resultados (series semanales) obtenidos central hidroeléctrica Pehuenche bajo los distintos escenarios de cambio climático, donde la línea de color negro corresponde a la demanda eléctrica obtenida del modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la consultora SPEC Energy Consulting, las líneas de color rojo, azul, verde y morado corresponde a las entregas generadas desde el embalse Melado, volumen embalse Melado y afluentes al embalse Melado obtenidas del modelo WEAP modificado.

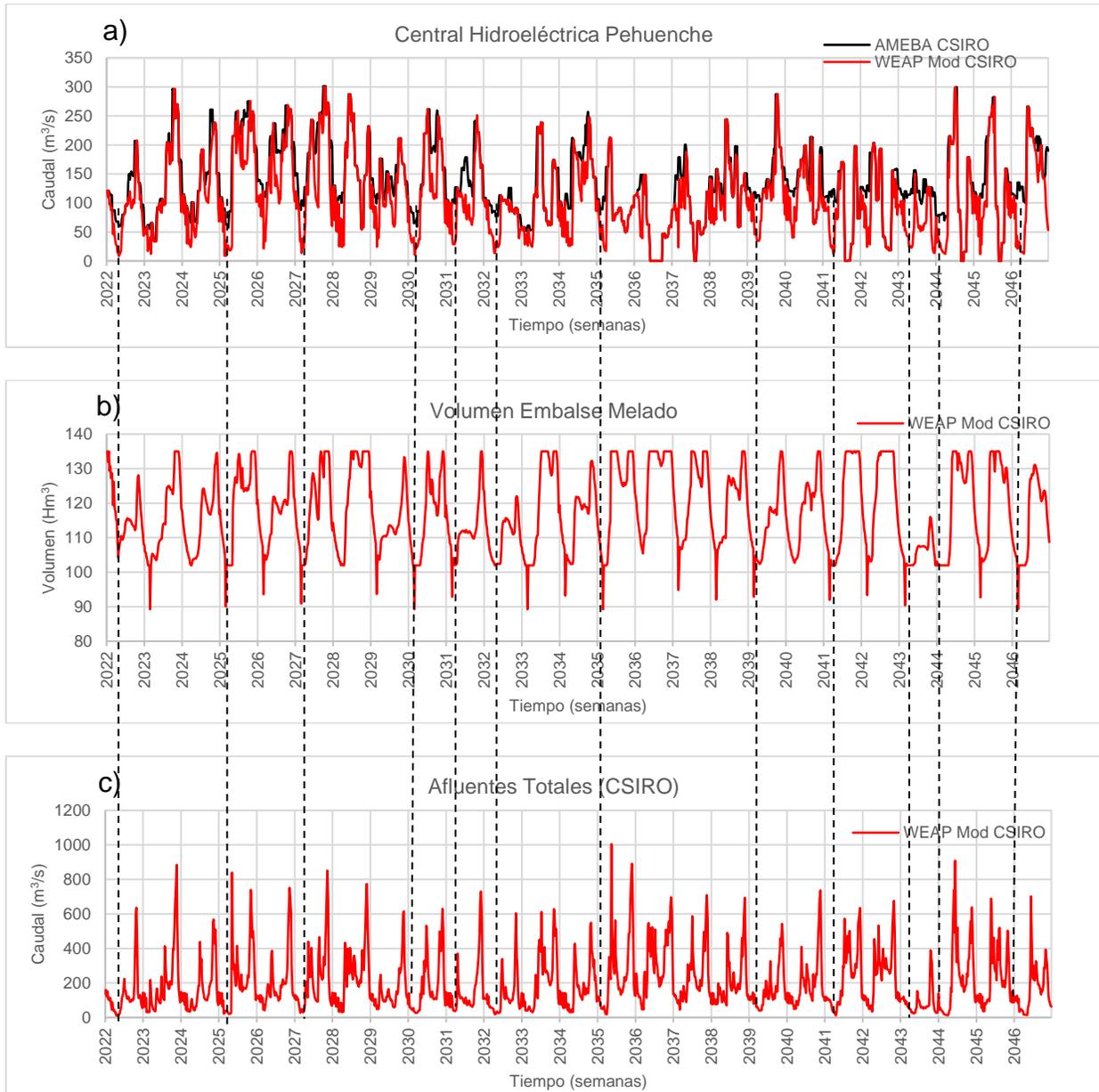


Figura E.3 Series semanales Modelo climático CSIRO (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).

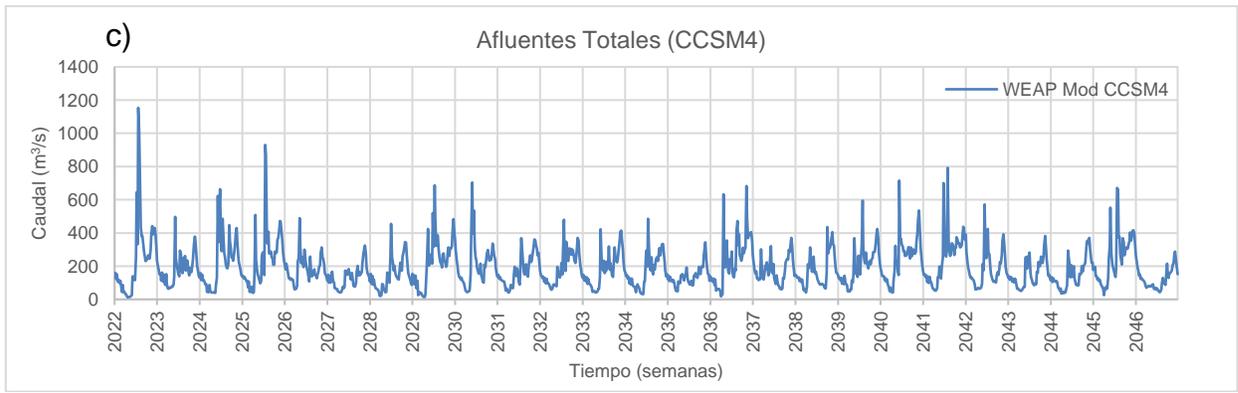
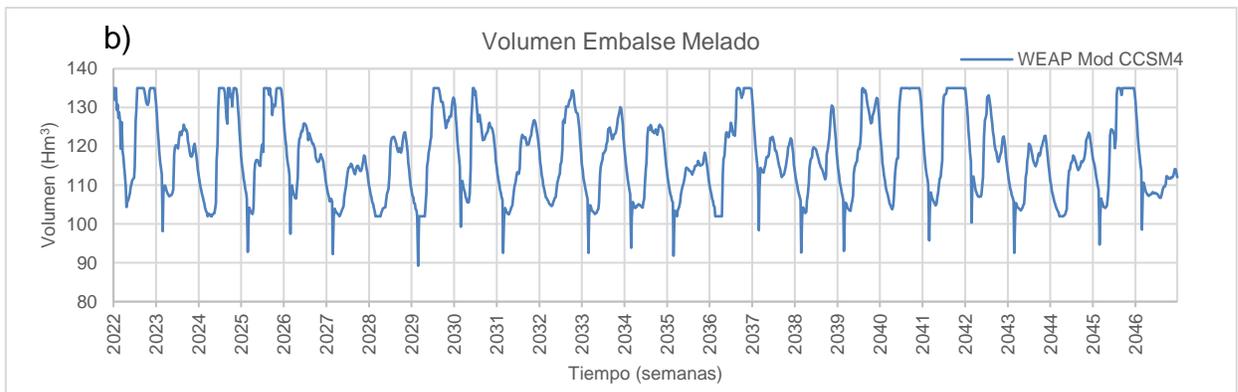
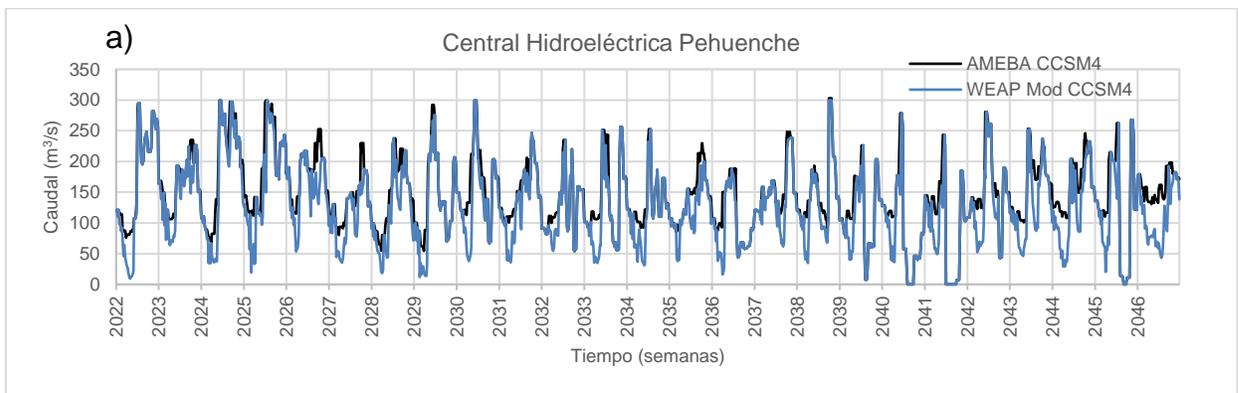


Figura E.4 Series semanales Modelo climático CCSM4 (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).

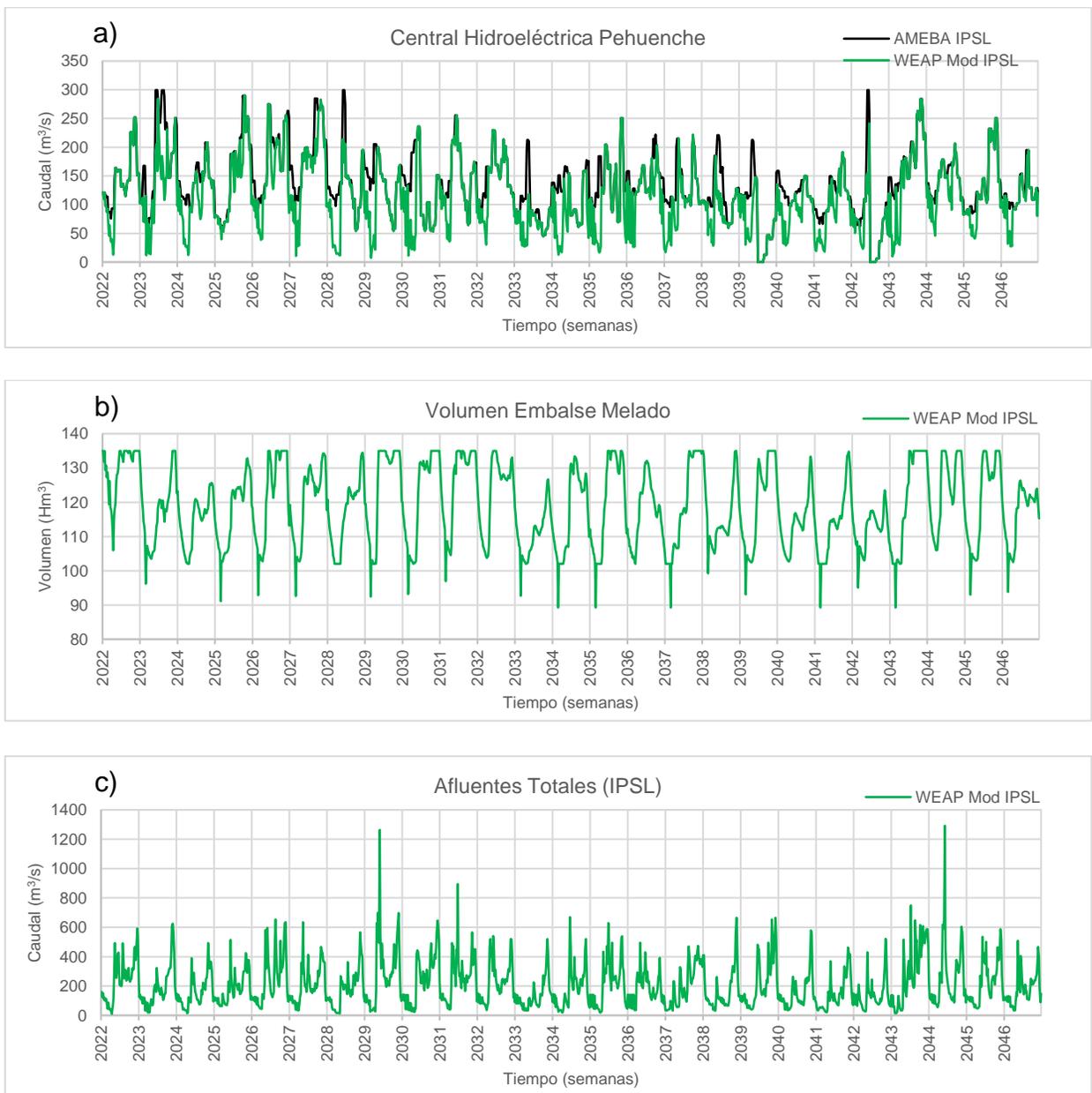


Figura E.5 Series semanales Modelo climático IPSL (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).

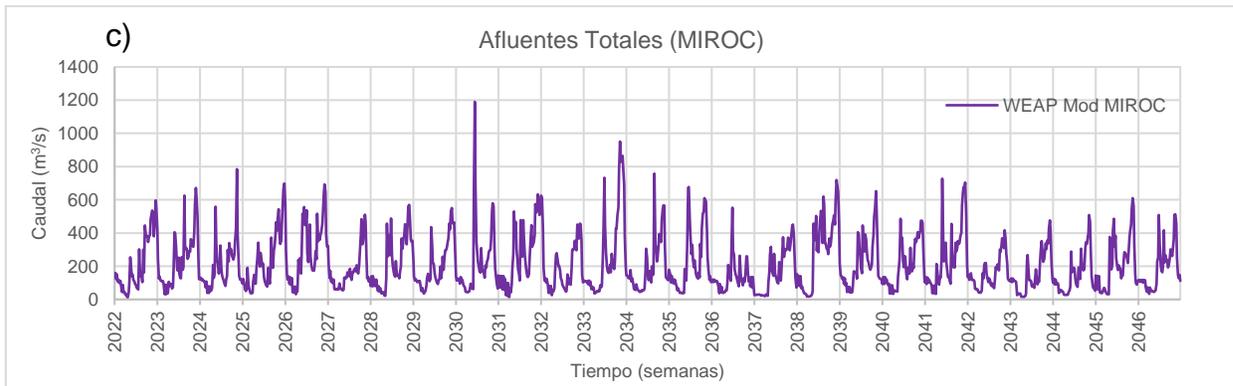
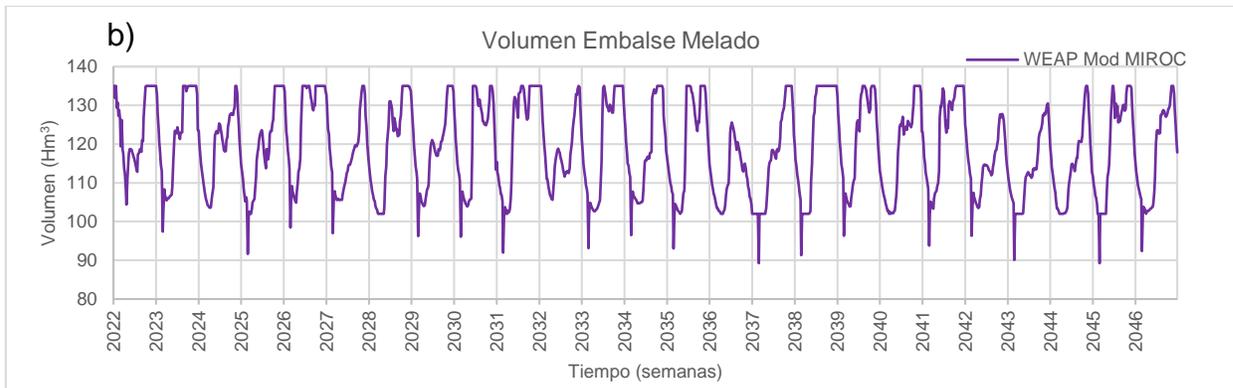
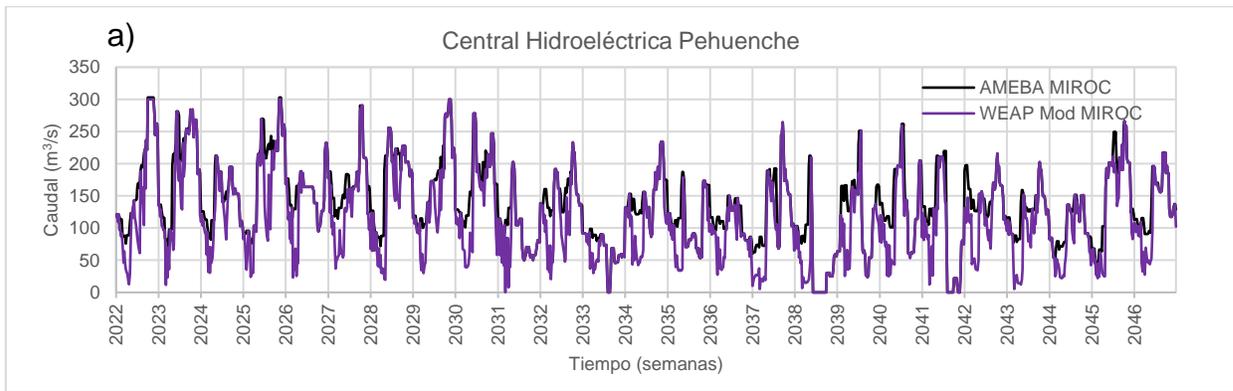


Figura E.6 Series semanales Modelo climático MIROC (Periodo 2022 - 2046): a) Demanda proyectada central hidroeléctrica Pehuenche (AMEBA) y entregas simuladas embalse Melado (WEAP Modificado), b) Volumen simulado embalse Melado (WEAP Modificado), c) Caudales afluentes al embalse Melado (WEAP Modificado).

Como se puede apreciar en las figuras E.3, E.4, E.5 y E.6 para los distintos escenarios de cambio climático existen periodos donde se alcanza a cumplir la demanda hidroeléctrica central Pehuenche, que corresponde a periodos cuando el volumen de la laguna y sus afluentes se encuentran en su valor mínimo por lo que no alcanzan a suministrar la demanda requerida por la central Pehuenche.

Anexo F. Funciones Modelo WEAP original

En el presente anexo se indica las principales funciones del módulo operacional de las entregas de la laguna Maule utilizadas en el modelo WEAP cordillera del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Maule (DGA, 2020), bajo las reglas de operación establecidas en el convenio ENDESA Riego del año 1947.

En la Figura F.1, se muestra diagrama con ubicación de embalses e infraestructura para estimar el caudal reconstituido en Armerillo.

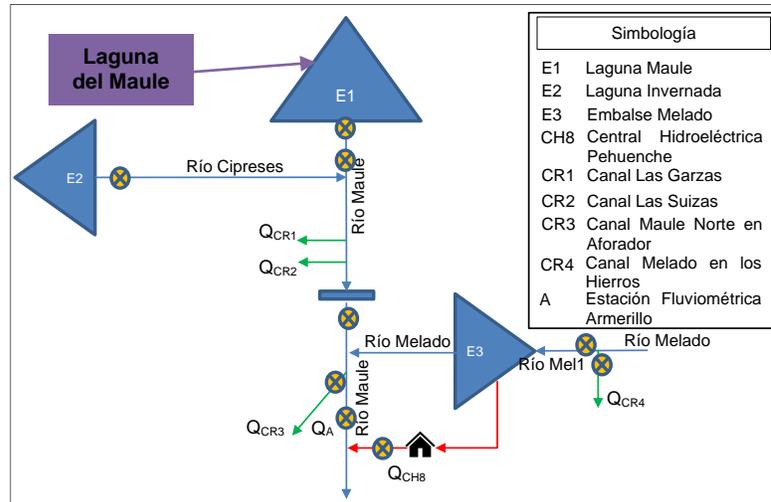


Figura F.1 Ubicación Laguna Maule

En la Figura F.2 se presentan los resultados obtenidos del modelo WEAP original volumen semanal simulado laguna del Maule para el periodo de análisis desde el año 2003 hasta el año 2015.

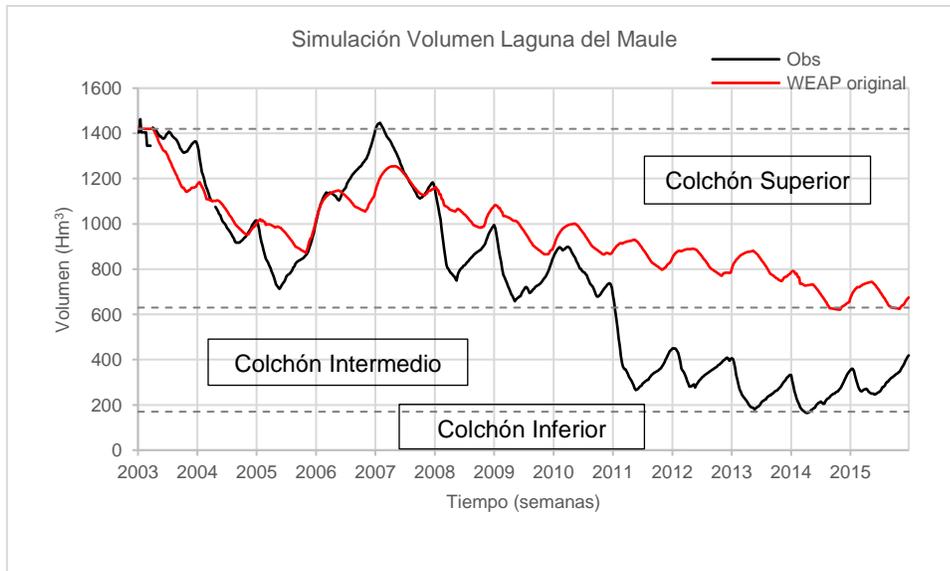


Figura F.2 Simulación Volumen semanal laguna Maule (Hm³)

De la revisión del modelo WEAP original se establece si las entregas simuladas de la laguna Maule en la semana t coincide las entregas estimadas de riego, entregas de hidroelectricidad y filtraciones, el modelo WEAP selecciona el mayor valor para la entrega total de la laguna Maule. A continuación, se presenta capítulos descripción metodológica modulo operacional del modelo WEAP original:

- Filtraciones de la Laguna Maule.
- Metodología Modelo Operacional Entregas de Riego de la Laguna Maule.
- Metodología Modelo Operacional Entregas de Hidroelectricidad de la Laguna Maule.

Las siguientes notaciones corresponden a siglas que se mencionaran en los siguientes capítulos:

- n: año n, desde n=1 (año 2003) hasta n=13 (año 2015).
- t: semana t, desde t=1 (semana 1 del año calendario) hasta n= 52 (semana 52, última semana del año calendario).
- Colchón superior: zona superior de la laguna Maule, volumen superior a 630 Hm³.
- Colchón intermedio: zona intermedia de la laguna Maule, zona de la laguna Maule que se encuentra entre el volumen de 170 Hm³ y 630 Hm³.
- Colchón inferior: zona inferior de la laguna Maule, zona de la laguna Maule que se encuentra en una zona inferior a los 170 Hm³.

Anexo F.1. Filtraciones Laguna Maule

Las filtraciones se determinan en escala semanal que es una función que depende del volumen de la laguna Maule (volumen simulado). En el modelo WEAP original se indica la siguiente función:

*“(If(PrevTSValue(Supply and Resources\River\Rio Laguna del Maule\Reservoirs\Laguna del Maule:Storage Volume[m^3])>172.3*1000000, If(PrevTSValue(Supply and Resources\River\Rio Laguna del Maule\Reservoirs\Laguna del Maule:Storage Volume[m^3])>104.4*1000000,0.0783*PrevTSValue(Supply and Resources\River\Rio Laguna del Maule\Reservoirs\Laguna del Maule:Storage Volume[m^3])/1000000+6.622,0.0416*PrevTSValue(Supply and Resources\River\Rio Laguna del Maule\Reservoirs\Laguna del Maule:Storage Volume[m^3])/1000000+10.476),0.1243*PrevTSValue(Supply and Resources\River\Rio Laguna del Maule\Reservoirs\Laguna del Maule:Storage Volume[m^3])/1000000-1.4181))*0.06”*

De la función anterior, se desprende lo siguiente:

- Si V_{t-1} (volumen laguna Maule de la semana t-1) es mayor que 172,3 x 10⁶ (m³) y mayor a 104,4 x10⁶ (m³), las filtraciones se estiman como:

$$0,0783 * V_{t-1} + 6.622$$

- Si V_{t-1} es menor que 172,3 x 10⁶ (m³), las filtraciones se estiman como:

$$0,1243 * V_{t-1} - 1,4181$$

- El resultado de las expresiones anteriores se multiplica por un factor de 0,06, obteniéndose el valor de filtraciones de la semana t en m³/s. El volumen de la laguna Maule en las ecuaciones anteriores se ingresan en unidades de Hm³.

Anexo F.2. Metodología Entregas de Riego Laguna Maule

La simulación de las entregas de riego de la laguna Maule en el modelo WEAP original se realiza en escala semanal, aplicándose la siguiente metodología:

Paso 1: Se debe verificar al finalizar la semana 52 (última semana del año calendario, año n-1), el volumen del embalse y colchón donde se encuentra nivel de agua de la laguna (colchón superior, colchón intermedio o colchón inferior) para poder estimar el volumen disponible de riego (Vd Riego) para el año calendario, que corresponde a una función que depende de las reglas de operación del convenio Endesa-Riego del año 1947 (artículo 3 y artículo 6).

El volumen disponible de riego (Vd Riego) para el año calendario (año n) se estima a partir de las siguientes expresiones:

- Si Volumen de la Laguna Maule en la semana 52 del año n-1 es mayor a 630 (Hm³):

$$\text{Vd Riego} = 800 \text{ (Hm}^3\text{)}.$$

- Si Volumen Laguna Maule en la semana 52 del año n-1 se encuentra en el colchón intermedio de la laguna, es decir, entre 170 (Hm³) y 630 (Hm³):

$$\text{Vd Riego} = 0,8 * (\text{Volumen Laguna Maule} - 170) \text{ en Hm}^3$$

- Si Volumen Laguna Maule en la semana 52 del año n-1 es menor 170 (Hm³):

$$\text{Vd Riego} = 0.4 * \text{Volumen Laguna Maule}$$

La última expresión (destacado en color rojo) se modificó ya que el convenio establece que las entregas para volumen de embalse menor a 170 (Hm³), queda disponible para entregas si existe un mutuo acuerdo entre el sistema de riego e hidroelectricidad. En el modelo WEAP modificado se definió que si el volumen de la laguna se encuentra en el colchón inferior (semana 52, año n-1) no hay entregas desde la laguna Maule para el sistema de riego e hidroelectricidad.

Del modelo WEAP original se obtuvo que el volumen disponible de riego para el año calendario es de 800 (Hm³), ya que el volumen de la laguna en todos los años en la semana 52 se mantuvo en el colchón superior de la laguna, durante el periodo de análisis desde el año 2003 hasta el año 2015. Como se puede apreciar en la Figura F.3 en el año 2003 el volumen disponible para riego es de 0 Hm³, ya que la demanda definida en el primer año de simulación (Periodo Current Accounts), se definieron demandas igual a cero, la que fue corregida en el modelo WEAP modificado.

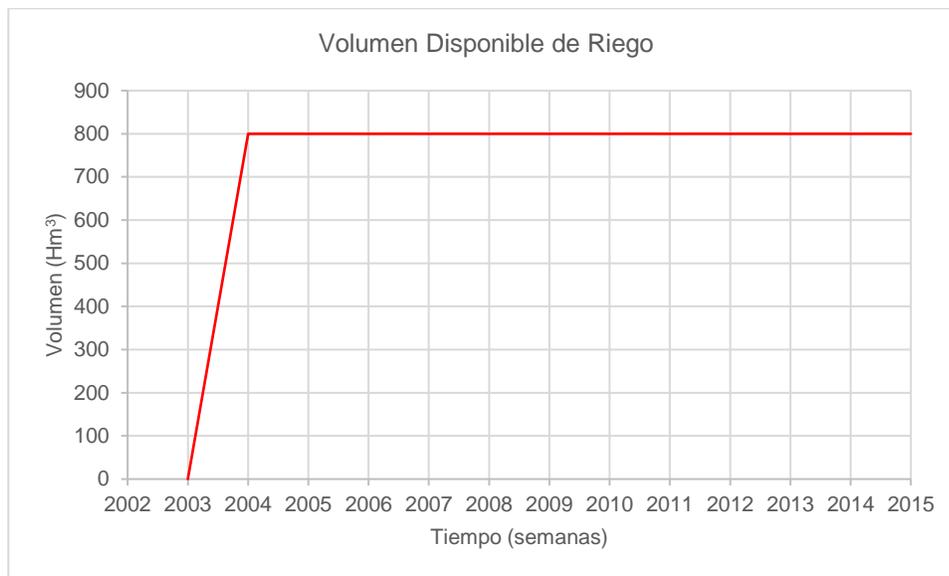


Figura F.3 Volumen Disponible de Riego en el año calendario

Paso 2: Se estima el caudal reconstituido en Armerillo con las series generadas en el modelo WEAP original de la semana t-1. Lo anterior, verifica el caudal disponible en la semana t para el sistema de riego.

El caudal reconstituido en Armerillo en el modelo WEAP original se aplicó la expresión indicada en el oficio N°601 del 08 de mayo de 2008 encontrándose vigente por un periodo de 5 años. En cambio, en el modelo WEAP modificado la estimación del caudal reconstituido en Armerillo fue reemplazada por la expresión definida en el oficio DGA N°681 del 28 de Junio de 2013, encontrándose vigente hasta la actualidad.

Paso 3: En el modelo WEAP original se estima la demanda de riego es equivalente a los derechos de agua para el sistema cuenca río Maule en Armerillo.

Paso 4: Se estima el déficit de riego de la semana t que debe suministrar la laguna Maule en caso de que no se cumpla los requerimientos de riego en el sector de Armerillo, que corresponde a la diferencia entre los derechos de agua del sistema de riego de la semana t y el caudal reconstituido en Armerillo de la semana t-1.

$$\text{Déficit Riego}_t = \text{Derechos de agua}_t - \text{Caudal reconstituido en Armerillo}_{t-1} \quad (\text{F.1})$$

Paso 5: Se estima el volumen disponible de riego en la semana t, que corresponde a la diferencia entre el volumen disponible de riego de la semana t-1 menos el déficit de riego de la semana t, hasta ocupar el total de volumen disponible de riego de la laguna Maule, definido en el paso 1.

En la Figura F.4, se muestra el volumen disponible de riego en la semana t para los diferentes años de simulación.

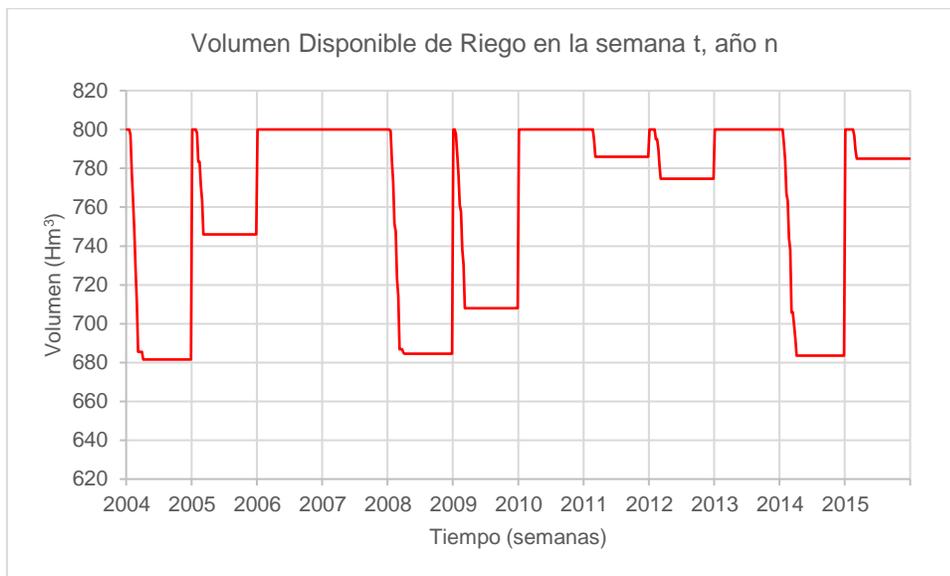


Figura F.4 Volumen disponible de riego en la semana t, año n

Paso 6: En el modelo WEAP original los caudales en canales de riego se estima mediante los siguientes pasos: 1) Se estima el caudal Reconstituido WEAP Mejorado (denominación del modelo WEAP original) que consiste en la suma del caudal reconstituido en Armerillo (obtenida del paso 2) más un término de estacionalidad definido en el modelo WEAP original, 2) Si el caudal Reconstituido WEAP Mejorado es menor que los derechos de agua del sistema de riego, se multiplica por un factor que corresponde al porcentaje de derecho de agua de cada canal de riego. En caso contrario, si el caudal reconstituido en Armerillo Mejorado es mayor que los derechos de agua, se multiplica los derechos de agua por el factor que corresponde al porcentaje de derecho de agua de cada canal de riego.

En el modelo WEAP modificado los caudales en canales de riego se estimó como el mínimo valor entre los derechos de agua y el caudal disponible en la captación de cada canal multiplicado por un factor que corresponde al porcentaje de derecho de agua de cada canal.

En la Tabla F.1, se muestra la capacidad de los canales de riego y factor de los derechos de agua totales que le corresponden a cada canal de riego.

Tabla F.1 Factor y Capacidad canales de Riego

Canales	Fraccion	Capacidad Canal m3/s
Melado	0.12645	19
Las Garzas	0.00176	20
Las Suizas	0.00105	20
La Esperanza	0.01405	20
Maule Norte Alto	0.10709	60
Maule Norte Bajo	0.15822	60
Sistema Maitenes	0.0876	20
Duao Zapata	0.05057	40
San Clemente	0.09176	40
Maule Sur	0.11966	
Sur1	0.13639	40
Sur 1 SORPRAM	0.08639	40
Sur 1 Maule Sur		40
Sur2	0.03801	40
Sur3	0.03916	40
Union Molino	0.00774	20
Chivato Loncoche	0.01489	20
Hacienda Maule	0.00492	20
La Isla	0.00018	20
Santa Rosa	0.00049	20
Sistema Riego Colbún	0.17936	

(Fuente: modelo WEAP original)

Anexo F.3. Metodología Entregas Hidroelectricidad Laguna Maule

La simulación de las entregas de hidroelectricidad de la laguna Maule en el modelo WEAP original se realizó en escala semanal, aplicándose la siguiente metodología:

Paso 1: Se debe verificar el volumen embalse y colchón donde se encuentra nivel de agua de la laguna (colchón superior, intermedio o inferior). Se estima para cada semana t-1 el volumen disponible de hidroelectricidad (Vd Hidro), que es función que depende del volumen de la laguna para dar cumplimiento a las restricciones convenio ENDESA Riego del año 1947 (artículos 5 y 6).

El volumen disponible de hidroelectricidad (Vd Hidro) se define a partir del volumen de la laguna Maule de la semana t-1, no obstante, para el modelo WEAP modificado se definió a partir del volumen de la laguna Maule de la semana 52 del año anterior (para definir una cantidad total de volumen disponible de hidroelectricidad para el año calendario). Las funciones que se requieren para estimar el volumen disponible de hidroelectricidad es la siguiente:

- Si Volumen Laguna Maule en la semana t-1 es mayor a 630 (Hm³):

$$Vd \text{ Hidro} = 250 \text{ (Hm}^3\text{)}.$$

- Si Volumen Laguna Maule en la semana t-1 se encuentra en el colchón intermedio de la laguna, es decir, entre 170 (Hm³) y 630 (Hm³):

$$Vd \text{ Hidro} = 0.2 * (\text{Volumen Laguna Maule} - 170) \text{ en Hm}^3$$

- Si Volumen Laguna Maule en la semana t-1 es menor 170 (Hm³):

$$V_d \text{ Hidro} = 0.1 * \text{Volumen Laguna Maule}$$

La última expresión (destacado en color rojo) se modificó ya que el convenio establece que las entregas para volumen de embalse menor a 170 (Hm³), queda disponible para entregas si existe un mutuo acuerdo entre el sistema de riego e hidroelectricidad. En el modelo WEAP modificado se definió que si el volumen de la laguna se encuentra en el colchón inferior (semana 52 del año calendario, año n-1) no hay entregas desde la laguna Maule para el sistema de riego e hidroelectricidad.

En la Figura F.5, se muestra el volumen total disponible de hidroelectricidad desde la laguna Maule durante el año calendario obtenido del modelo WEAP original.

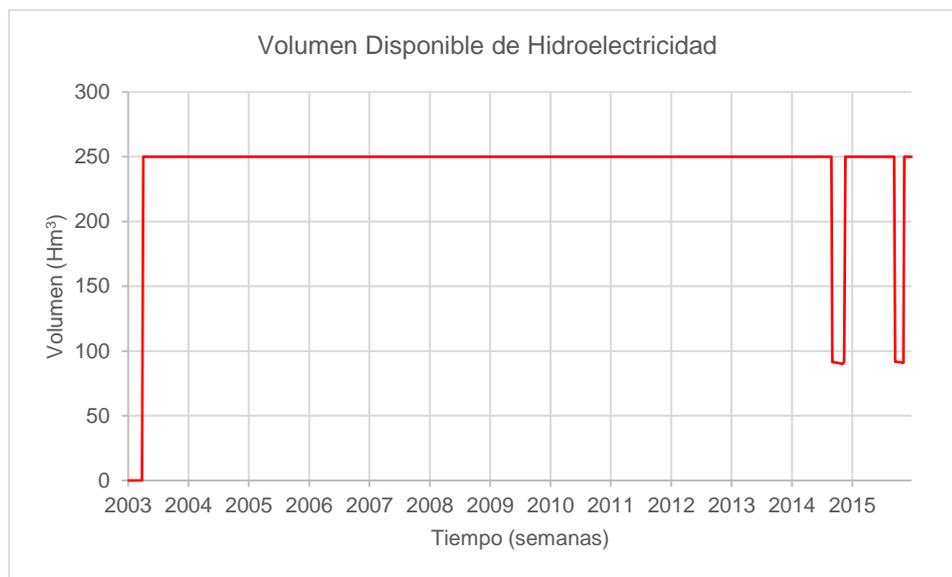


Figura F.5 Volumen Disponible de Hidroelectricidad (Hm³)

Paso 2: Se estima la demanda semanal de hidroelectricidad de la laguna Maule. En el modelo WEAP original se denomina “Demanda mensual hidro en m³ s”. La demanda semanal de hidroelectricidad se define como el factor de demanda semanal (ver siguiente gráfica) multiplicado por el volumen disponible de hidroelectricidad (Vd Hidro) obtenida en el paso 1.

$$\text{Demanda}_H = \frac{\text{Factor Demanda Semanal}}{100} \times \frac{V_d \text{ Hidro}}{86400 \times 7} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (\text{F.2})$$

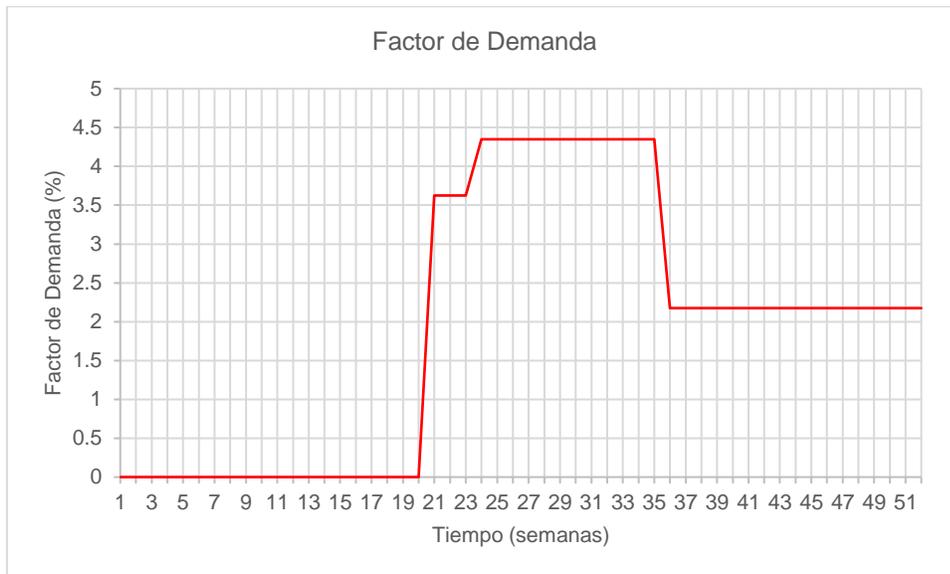


Figura F.6 Factor Demanda Semanal (%)

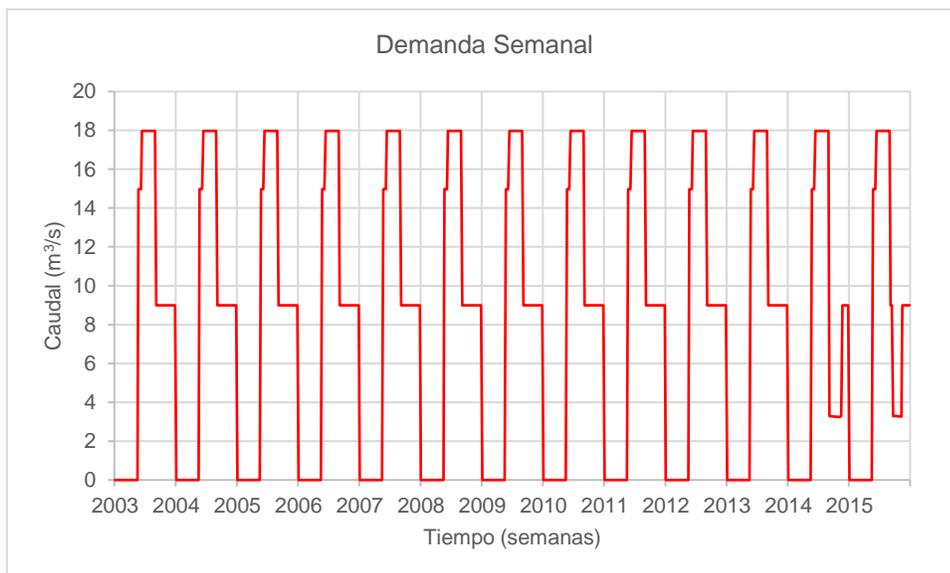


Figura F.7 Demanda Semanal Hidroelectricidad (Hm³)

Paso 3: Se estima el volumen disponible de hidroelectricidad de la semana t, que consiste en la diferencia entre el volumen disponible de hidroelectricidad de la semana t-1 menos la demanda semanal de hidroelectricidad de la semana t, hasta ocupar el total de la cuota disponible de hidroelectricidad de la laguna Maule (volumen disponible de Hidroelectricidad de la semana 52 del año calendario, Vd Hidro) si el sistema lo requiere.

En la Figura F.8 se muestra el volumen disponible de hidroelectricidad de la laguna Maule en la semana t durante el año calendario, obtenido del modelo WEAP original.

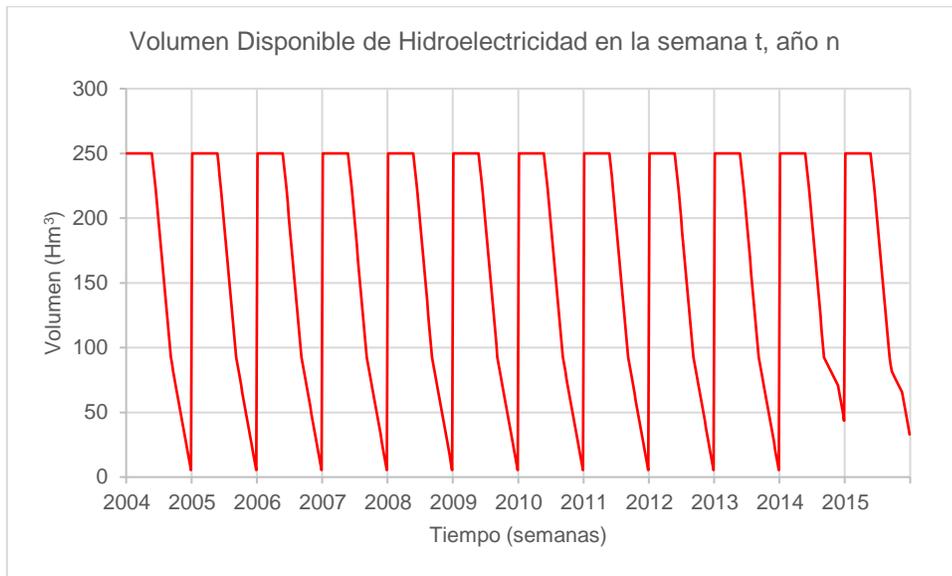


Figura F.8 Volumen Disponible Hidroelectricidad (Hm³)

Paso 4: Se estima el déficit de caudal canal afluente central Isla de la semana t, que corresponde al diferencial entre los derechos de agua del canal afluente central Isla de la semana t, menos el caudal disponible en el canal afluente central Isla de la semana t-1.

$$\text{Deficit}_{\text{canal Isla}} = Q_{\text{Derechos de agua}} - Q_{\text{canal Afluente Isla}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (F.3)$$

Donde:

$Q_{\text{Derechos de Agua}}$: Derechos de Agua canal afluente central hidroeléctrica Isla 42 m³/s.

$Q_{\text{canal Afluente Isla}}$: caudal disponible en canal afluente central hidroeléctrica Isla de la semana t-1.

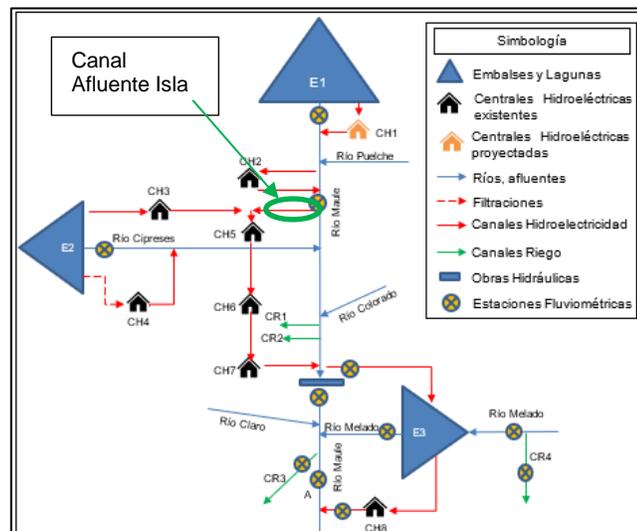


Figura F.9 Canal Afluente central hidroeléctrica Isla

Paso 5: Se aplica un factor de corrección a la demanda semanal de hidroelectricidad definida en el modelo WEAP original.

El factor de corrección se obtiene a partir del déficit de caudal obtenida en el paso 4, donde:

- Si el déficit de caudal canal afluente central Isla es mayor que 15 m³/s, el factor es 1.
- Si el déficit de caudal canal afluente central Isla es menor que 6 m³/s, el factor es 0,85.
- Si el déficit de caudal canal afluente central Isla es menor que 7 m³/s, el factor es 0,90.
- Si el déficit de caudal canal afluente central Isla se encuentra entorno a los 7 y 15 m³/s, el factor es de 0,95.

Finalmente, la demanda hidroeléctrica semanal (entregas de la laguna Maule), denominada en el modelo WEAP original como “Demanda mensual de Hidro posible” se estima aplicando la siguiente expresión:

$$Demanda_{Hidroelectrica} = Demanda_{H,paso\ 2} \times \text{Factor} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (F.4)$$

En la Figura F.10 se muestra la demanda semanal de hidroelectricidad de la laguna Maule obtenido del modelo WEAP original.

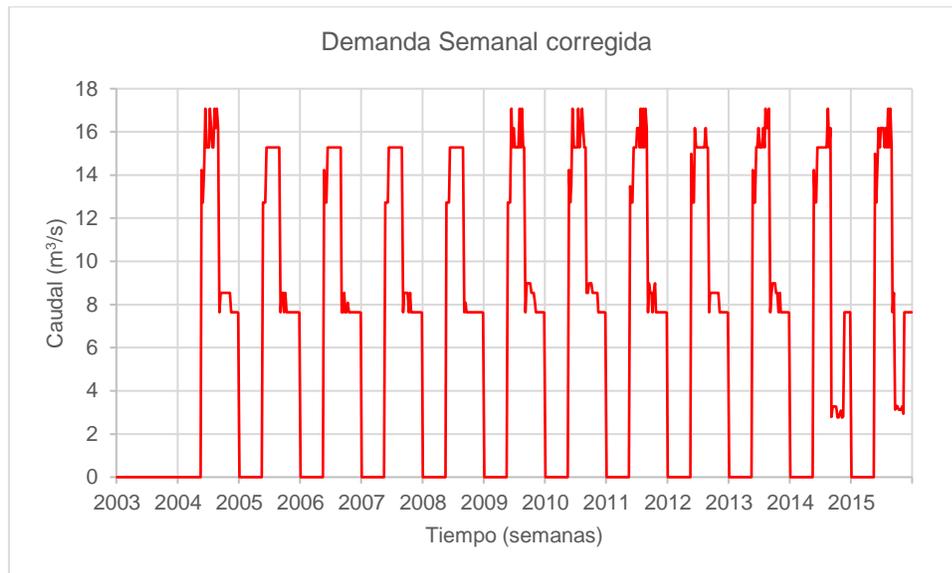


Figura F.10 Demanda Semanal Hidroelectricidad (m³/s)

Modelo WEAP modificado. Las simulaciones realizadas en el modelo WEAP modificado desde el año 2024 hasta el término del periodo de simulación (2046), se incorporó la demanda eléctrica central Los Cóndores de la laguna Maule obtenida del modelo de optimización desarrollado en AMEBA por la empresa SPEC Energy Consulting bajo las restricciones del convenio ENDESA Riego del año 1947. Al incorporar la demanda eléctrica central Los Cóndores en el modelo WEAP modificado se eliminaron las funciones indicadas en el paso 2, paso 4 y paso 5 de la metodología utilizada en las entregas de hidroelectricidad laguna Maule del modelo WEAP original.