**DE MODELOS DE GESTIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS,
PARA LAS CUENCAS DE LAS PROVINCIAS DE
ELQUI, LIMARÍ Y CHOAPA**

ÍNDICE

1. Introducción 1-1

2. Objetivo del estudio 2-1

2.1 Objetivo general 2-1
2.2 Objetivos específicos del estudio 2-2

3. Comparación de modelos nacionales e internacionales 3-1

3.1 Antecedentes 3-1
3.2 Clasificación de modelos según conceptos de representación espacial de la cuenca 3-3
3.2.1 Modelos semi-agregados 3-4
3.2.2 Modelos semi-distribuidos 3-7
3.2.3 Otros modelos 3-8
3.3 Análisis comparativo detallado 3-11
3.3.1 Criterio económico 3-11
3.3.2 Criterios operativos 3-12
3.3.3 Criterios técnicos 3-15
3.4 Resultado del análisis de modelos estudio "Modelo para la gestión de la cuenca de Huasco" 3-22
3.4.1 Modelos de simulación 3-22
3.4.2 Modelos de optimización 3-23
3.5 Comentario final 3-23

4. Campañas de terreno 4-1

5. Talleres de participación de actores y usuarios 5-1

5.1 Objetivo de los talleres 5-1
5.2 Metodología de facilitación grupal 5-1
5.3 Generación de la lista de invitados 5-2
5.4 Resultados de los talleres 5-2

6. Habilitación del modelo WEAP 6-1

6.1 Obtención del modelo 6-1
6.2 Estructura del modelo 6-1

6.2.1 Esquema 6-1
6.2.2 Datos 6-2
6.2.3 Resultados 6-2
6.2.4 Explorador de Escenarios 6-2
6.2.5 Notas 6-3
6.3 Apoyo externo al modelo 6-3

7. Extracción de resultados del modelo WEAP 7-1

7.1 Tipos de resultados del WEAP 7-1
7.2 Preparación de los resultados y exportación a Excel 7-4
7.3 Metodología de análisis de resultados 7-7
7.3.1 Planilla Calib_SUP 7-7
7.3.2 Planilla Calib_SUB 7-8
7.3.3 Planilla Balance_ZR 7-8
7.3.4 Planilla Balance_AC 7-10
7.3.5 Planilla Balance_CA 7-12

8. Modelo WEAP Elqui 8-1

8.1 Datos de entrada Modelo WEAP-Elqui 8-1
8.1.1 Topología 8-1
8.1.2 Key Assumptions 8-15
8.1.3 Demand Sites and Catchments 8-22
8.1.4 Supply and Resources 8-31
8.1.5 Carpeta Datos 8-34
8.1.6 Carpeta SIG 8-36
8.2 Regla de operación del sistema Elqui 8-36
8.2.1 Consideraciones previas 8-37
8.2.2 Regla de operación del sistema 8-46
8.3 Calibración, validación y proyección del modelo 8-49
8.3.1 Calibración del modelo 8-49
8.3.2 Validación del modelo 8-50
8.3.3 Extensión del modelo: Escenario Futuro Base 3 8-50
8.3.4 Resultados gráficos de los escenarios de calibración, validación y Futuro Base 3 8-51
8.3.5 Resultados globales del escenario de Calibración 8-96
8.3.6 Resultados globales del escenario Futuro Base 3 8-99
8.3.7 Comentario sobre escenario Futuro Base 3 8-101
8.4 Escenario Futuro Operación 1: Liberación de acuíferos don 70%

		demanda	8-102
		8.4.1 Estimación del desmarque	8-103
		8.4.2 Configuración del escenario	8-104
		8.4.3 Presentación de resultados relevantes	8-104
		8.4.4 Resultados globales del escenario Futuro Operación	8-111
		8.4.5 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 1	8-113
	8.5	Escenario Futuro Operación 2: Liberación de acuíferos con 100% demanda	8-115
		8.5.1 Configuración del escenario	8-115
		8.5.2 Presentación de resultados relevantes	8-115
		8.5.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 2	8-118
		8.5.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2	8-121
		8.5.5 Conclusión final sobre el set de escenarios	8-122
	8.6	Escenario Futuro Base Ext 2	8-123
		8.6.1 Configuración del escenario	8-123
		8.6.2 Estimación del desmarque	8-124
		8.6.3 Presentación de resultados relevantes	8-124
		8.6.4 Resultados globales del escenario Futuro Base Ext 2	8-130
		8.6.5 Comentario sobre el escenario Futuro Base Ext 2	8-135
	8.7	Escenario Futuro Operación 4: Embalse Cabecera Estero Derecho 2 millones m3	8-137
		8.7.1 Configuración del escenario	8-137
		8.7.2 Presentación de resultados relevantes	8-137
		8.7.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 4	8-140
		8.7.4 Comentarios sobre el escenario Futuro Operación 4	8-142
	8.8	Escenario Futuro Operación 5: Mejoramiento de canales	8-143
		8.8.1 Configuración del escenario	8-143
		8.8.2 Presentación de resultados relevantes	8-144
		8.8.2 Resultados globales del escenario Futuro Operación 5	8-147
		8.8.3 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 5	8-149
	8.9	Conclusiones y recomendaciones cuenca del Elqui	8-150
		8.9.1 Algunos resultados relevantes	8-150
		8.9.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios	8-152
		Recomendaciones a partir del análisis de los escenarios Futuro Base 3, Operación 1 y Operación 2	8-154
		8.9.3 Recomendaciones a partir de los escenarios Futuro Base Ext 2, Operación 4 y Operación 5	8-156
		8.9.4 Regla de operación del sistema hídrico	8-156
9.	**Modelo WEAP Limarí CRDP 2014**		**9-1**
	9.1	Adaptación del modelo WEAP-Limarí UC	9-1
		9.1.1 Reemplazo de la hidrología de entrada	9-2
		9.1.2 Definición de acuíferos adicionales	9-3
		9.1.3 Cambio de concepto para modelación de acuíferos	9-4

	9.1.4	Cambio de método de cálculo de la demanda de riego	9-4
	9.1.5	Ajuste de áreas de riego	9-5
	9.1.6	Limitación de la entrega embalse Cogotí a 2,0 m3/s	9-5
	9.1.7	Extracciones desde acuíferos según derechos	9-5
	9.1.8	Demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana	9-5
	9.1.9	Reordenamiento de prioridades de demanda en toda la Cuenca	9-6
	9.1.10	Ajustes de la topología	9-6
9.2	Datos de entrada modelo WEAP-Limarí		9-6
	9.2.1	Topología	9-6
	9.2.2	Key Assumptions	9-22
	9.2.3	Demand Sites and Catchments	9-35
	9.2.4	Supply and Resources	9-39
	9.2.5	Carpeta Datos	9-42
	9.2.6	Carpeta SIG	9-44
9.3	Calibración y validación del modelo		9-45
	9.3.1	Calibración del modelo	9-45
	9.3.2	Validación del modelo	9-46
	9.3.3	Resultados gráficos de los escenarios de calibración y validación	9-47
	9.3.4	Resultados globales del escenario de Calibración	9-83
	9.3.5	Comentario acerca del escenario de Calibración	9-85
9.4	Escenario Futuro Base 1		9-86
	9.4.1	Configuración del escenario Futuro Base 1	9-86
	9.4.2	Presentación de resultados relevantes	9-86
	9.4.3	Resultados globales del escenario Futuro Base 1	9-93
	9.4.4	Comentarios acerca del escenario Futuro Base 1	9-96
9.5	Escenario Futuro Operación 1: Embalses Valle Hermoso y Rapel		9-96
	9.5.1	Configuración del escenario Futuro Operación 1	9-97
	9.5.2	Presentación de resultados relevantes	9-97
	9.5.3	Resultados globales del escenario Futuro Operación 1	9-107
	9.5.4	Comentarios sobre el escenario Futuro Operación 1	9-110
9.6	Escenario Futuro Operación 2: Aumento eficiencia de Conducción		9-110
	9.6.1	Configuración del escenario Futuro Operación 2	9-111
	9.6.2	Presentación de resultados relevantes	9-111
	9.6.3	Resultados globales del escenario Futuro Operación 2	9-117
	9.6.4	Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2	9-120
9.7	Escenario Futuro Operación 3: Aumento de eficiencia de riego		9-120
	9.7.1	Configuración del escenario Futuro Operación 3	9-120
	9.7.2	Presentación de resultados relevantes	9-120
	9.7.3	Resultados globales del escenario Futuro Operación 3	9-127
	9.7.4	Comentario sobre el escenario Futuro Operación 3	9-129
9.8	Conclusión y recomendaciones		9-129
	9.8.1	Algunos resultados relevantes	9-129

9.8.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios 9-131
9.8.3 Recomendaciones a partir de escenarios Futuro Base 1, Operación 1, 2 y 3 9-133

10. Modelo WEAP Choapa CRDP 2014 10-1

10.1 Datos de entrada Modelo WEAP-Choapa 10-1
10.1.1 Topología 10-1
10.1.2 Key Assumptions 10-12
10.1.3 Demand Sites and Catchments 10-22
10.1.4 Supply and Resources 10-37
10.1.5 Carpeta Datos 10-39
10.1.6 Carpeta SIG 10-41
10.2 Reglas de operación del sistema Choapa 10-42
10.2.1 Regla de operación del río Choapa 10-42
10.2.2 Regla de operación río Chalinga 10-42
10.2.3 Regla de operación del río Illapel y embalse El Bato 10-43
10.2.4 Regla de operación del Canal Alimentador Corrales 10-44
10.2.5 Regla de operación del Embalse Corrales 10-45
10.2.6 Regla de operación de pozos de restitución MLP 10-45
10.3 Calibración del modelo y escenario extensión Futuro Base 1 10-45
10.3.1 Proceso de calibración 10-45
10.3.2 Configuración del escenario Futuro Base 1 10-47
10.3.3 Presentación de resultados relevantes 10-49
10.3.4 Resultados globales del escenario Calibración y Futuro Base 1 10-87
10.3.5 Comentario sobre escenarios de Calibración y Futuro Base 1 10-92
10.4 Escenario Futuro Operación 1: Uso de acuíferos para apoyar Desmarques 10-94
10.4.1 Configuración del escenario 10-94
10.4.2 Presentación de resultados relevantes 10-94
10.4.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 1 10-100
10.4.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 1 10-103
10.5 Escenario Futuro Base 2 10-104
10.5.1 Configuración del escenario 10-104
10.5.2 Presentación de resultados relevantes 10-104
10.5.3 Resultados globales del escenario Futuro Base 2 10-111
10.5.4 Comentario sobre escenario Futuro Base 2 10-114
10.6 Escenario Futuro Operación 2 10-115
10.6.1 Configuración del escenario 10-115
10.6.2 Presentación de resultados relevantes 10-116
10.6.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 2 10-119
10.6.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2 10-122
10.7 Escenario Futuro Base 3 10-123

10.7.1 Configuración del escenario Futuro Base 3 10-123
10.7.2 Presentación de resultados relevantes 10-124
10.7.3 Resultados globales del escenario Futuro Base 3 10-128
10.7.4 Comentario sobre el escenario Futuro Base 3 10-131
10.8 Escenario Futuro Operación 3: Activación de dos nuevos Embalses 10-132
10.8.1 Configuración del escenario 10-132
10.8.2 Presentación de resultados relevantes 10-132
10.8.3 Resultados globales de escenario Futuro Operación 3 10-138
10.8.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 3 10-141
10.9 Conclusiones y recomendaciones cuenca del Choapa 10-142
10.9.1 Algunos resultados relevantes 10-142
10.9.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios 10-144
10.9.3 Conclusiones acerca de los escenarios simulados 10-146
10.9.3 Recomendaciones a partir del análisis de los escenarios simulados 10-149

11. Modelo de pronóstico HBV 11-1

11.1 Objetivo de la aplicación del modelo HBV 11-1
11.2 Breve descripción del modelo HBV 11-2
11.3 Pre calibración por grupo de subcuencas 11-6
11.4 Calibración del modelo HBV en Elqui en Algarrobal 11-9
11.5 Datos para el pronóstico con HBV 11-11
11.6 Pronóstico de temporada 11-12
11.7 Comparación de valores de volumen acumulado entre agosto y marzo. 11-14
11.8 Conclusiones 11-15

12. Talleres de capacitación 12-1

13. Conclusiones generales 13-1

13. Anexo Digital 14-1
13.1 Anexo Texto 14-1
13.2 Anexo Capítulo 4 14-1
13.3 Anexo Capítulo 5 14-1
13.4 Anexo Capítulo 8 (WEAP Elqui) 14-1
13.5 Anexo Capítulo 9 (WEAP Limarí) 14-2
13.6 Anexo Capítulo 10 (WEAP Choapa) 14-2
13.7 Anexo Capítulo 12 (WEAP Choapa) 14-3
13.8 Anexo WEAP 14-3
13.9 Presentaciones Powerpoint 14-3

15. Referencias bibliográficas y antecedentes 15-1

1. Introducción

La Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo, entidad sin fines de lucro creada el año 2009 con el objetivo de ser un articulador entre organismos públicos, privados, académicos, científicos y la comunidad, licitó públicamente el "Estudio de modelos de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, para las cuencas de las provincias de Elqui, Limarí y Choapa", con fecha 1 de Diciembre de 2013.

El objetivo de la entidad (en adelante CRDP) es contribuir al desarrollo regional sustentable, aportando elementos que generen sinergia entre los diferentes actores de un territorio, para enfrentar los desafíos venideros. Para ello, la CRDP se ha organizado en torno a 5 ejes de acción:

- Calidad de vida y sustentabilidad
- Capital Humano
- Energía
- Recursos Hídricos
- Internacionalización de la región

La presente propuesta se enmarca dentro del eje de Recursos Hídricos.

La necesidad de realizar el presente estudio emana no sólo del hecho de que la región se ve afectada por un prolongado período de sequía, sino que también del uso cada vez más intensivo que cada usuario hace de sus derechos de agua, al crecer la Región en cuanto a sus actividades productivas. Entre las estrategias consideradas por la CRDP para apoyar el desarrollo productivo, se encuentra la gestión integrada del recurso hídrico, y la gestión de los acuíferos en su calidad de almacenamiento natural.

Por lo señalado, el objetivo central del presente estudio fue generar una herramienta que pudiera ser aplicada para la gestión de los recursos hídricos, en especial para la gestión de los acuíferos en épocas de sequía. La herramienta debió ser entregada a los usuarios interesados en manejarla, de modo que también hubo que generar contacto con los usuarios y hacer capacitaciones para iniciarlos en el uso del modelo WEAP.

2. Objetivo del estudio

2.1 Objetivo general

De acuerdo con lo señalado en los Términos de Referencia, el objetivo del presente estudio es contar con una herramienta técnica de modelación que permita simular en forma integrada el comportamiento de aguas superficiales y subterráneas, que sirva de apoyo a la toma de decisiones, y que permita evaluar el efecto de la priorización de las diferentes alternativas de uso del agua por parte del sector productivo de la cuenca, a través de la exploración de escenarios.

La herramienta técnica que permite la simulación y consiguiente exploración de escenarios, en la actualidad, la constituyen los modelos de simulación integrada de recursos hídricos, los cuales, además de incorporar y hacer disponible una gran cantidad de información, entregan también gran cantidad de resultados.

Por lo señalado, este tipo de herramienta permite entender el funcionamiento del sistema hídrico en su globalidad a nivel de una cuenca completa, permite conocer o estimar la interrelación entre las diversas variables que conforman el sistema, y, dentro de sus posibilidades y limitaciones, permite evaluar diferentes escenarios futuros de análisis.

Dentro de la naturaleza de los modelos de simulación integrada de cuencas está el hecho de que pueden ser operados en diversos escenarios, permitiendo al operador situarse en diversas condiciones de análisis, ya sea respecto de la oferta como de la demanda de agua, y conocer sus efectos sobre el sistema global. Los resultados de los diversos escenarios pueden ser evaluados desde el punto de vista técnico, económico, ambiental (ecológico) y legal. De esta forma, los modelos constituyen una herramienta de utilidad para el apoyo de la toma de decisiones productivas, reevaluación de prioridades o evaluación de acciones para períodos críticos.

Si bien el Código de Aguas actualmente no fomenta la gestión integrada del recurso hídrico, por considerar en forma separada y competitiva las aguas superficiales versus las subterráneas, la realidad muestra que en la práctica el enfoque integrado es no sólo necesario, sino que también muy beneficioso, y que, al menos en eventos como sequías, los acuíferos históricamente han jugado un rol fundamental de complementariedad frente al recurso superficial escaso. Más aún, integrando el recurso subterráneo a la gestión consuetudinaria, se cuenta con una capacidad de almacenamiento y capacidad de regulación, provistos por la naturaleza, que no se pueden pasar por alto al momento de buscar una forma de gestión óptima de un recurso escaso.

De esta forma, el objetivo general del presente estudio consiste en desarrollar tres modelos de simulación integrada, para cada una de las cuencas Elqui, Limarí y Choapa, calibrarlos y generar diversos escenarios de análisis. Los escenarios serán establecidos en concordancia con los requerimientos del mandante y los actores usuarios del agua.

2.2 Objetivos específicos del estudio

De acuerdo con los términos de referencia, el estudio tiene los siguientes objetivos específicos:

a) Configurar y calibrar el sistema de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos a utilizar, para la modelación de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.

b) Desarrollar escenarios para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, en base a requerimientos de la CRDP Coquimbo, en conjunto con organizaciones de usuarios de agua de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.

c) Desarrollar capacitación a miembros de las organizaciones de usuarios de agua de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, que participen en el estudio.

3. Comparación de modelos nacionales e internacionales

3.1 Antecedentes

La intención original del presente estudio era la de potenciar la aplicación del modelo de uso libre llamado MAGIC (Modelación Analítica Genérica Integrada de Cuencas), de la DGA.

El modelo MAGIC deriva de un modelo simple y muy amigable, llamado MOS, al cual se le agregó la parte de modelación subterránea, también conceptualmente muy simple.

Dicho modelo estaba recién desarrollado por la DGA, cuando se inició el estudio"Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso: Región de Coquimbo", realizado por CAZALAC / RODHOS en 2006, para el Gobierno Regional. En ese momento, el consultor pensó que la forma más útil y novedosa de enfrentar el estudio de eficiencia, sería a través de un modelo de simulación integrada, debido a que se tenía experiencia con el modelo MOS. El estudio se prestaba para probar el modelo MAGIC, y hacer un trabajo muy completo en relación con los diversos tipos de eficiencia en las cuencas, especialmente la cuantitativa, que era la que más interesaba. En dicho estudio se desarrollaron tres modelos, para las cuencas Elqui, Limarí y Choapa.

Durante dicho estudio hubo apoyo y respaldo permanente para el uso del modelo MAGIC, en la DGA. El profesional encargado respondía todas las dudas y asumía todas las sugerencias de mejoramiento. Era un modelo en desarrollo con soporte técnico.

A lo largo del desarrollo de dicho primer estudio, se mostraron las fortalezas de abarcar temas cuantitativos con la modelación integrada, y se apreciaron las fortalezas del modelo MAGIC, como el hecho de que, entregándole las estadísticas históricas de caudales reales tanto de cabecera como de captación de canales y entrega de embalses (desmarques), calibraba muy bien. Sin embargo, también se percibieron sus limitaciones: la simulación de escenarios futuros sólo podía operarse de acuerdo con la demanda, no de acuerdo con derechos, y no se podían aplicar reglas de operación en canales ni embalses, de modo que las respuestas no necesariamente eran muy realistas, dada la forma en que se operan las cuencas en la realidad.

En el Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo, CONIC_BF 2013, al igual que en el primer estudio, se solicitaban aspectos que no era posible responder sin una modelación. Debido a que los plazos eran reducidos, la cantidad de cuencas a modelar era alta (6 cuencas), había tres cuencas ya modeladas y por lo tanto había experiencia con el modelo MAGIC, se ofreció utilizar la misma herramienta de modelación, haciendo presente sus limitaciones.

En este segundo estudio, nuevamente las calibraciones y validaciones resultaron muy bien. Sin embargo, también quedaron muy claras las limitaciones del modelo:

- No contaba con ningún tipo de soporte técnico
- No había iniciativas de mejora del modelo por parte de la DGA

- No fue posible acceder al código fuente para realizar las mejoras necesarias
- No tiene la posibilidad de implementación de reglas de operación de embalses, canales y acuíferos, para simular escenarios futuros en las condiciones que el operador defina
- No tiene la posibilidad de priorizar la asignación del recurso hídrico entre las diferentes demandas
- No tiene la flexibilidad para programar cualquiera de las variables del balance, para ajustarse a las condiciones de operación real de las cuencas.
- No cuenta con una interfaz amigable de entrada y de salida de datos

Por lo señalado, una de las primeras conclusiones del Plan Maestro fue que, si se quería seguir operando con MAGIC, especialmente en escenarios futuros en que se analizara la gestión del recurso hídrico, el modelo debía ser sustancialmente mejorado, además de que se debía contar con un soporte técnico.

Por otro lado, para lograr una buena gestión integrada de los recursos hídricos, el uso de herramientas de modelación ha tomado cada vez más importancia en los últimos años en el mundo. Muchas instituciones, en diferentes países, han sido encargadas de desarrollar modelos de gestión integrada del recurso hídrico, por lo general con financiamiento público, y hoy en día están disponibles para su implementación en nuestro país.

El interés del presente estudio es generar una herramienta de modelación para ser usada por los usuarios, que sea capaz de admitir diversos escenarios, diversas condiciones de operación del sistema y diversas reglas de operación de los elementos integrantes, y que entregue resultados en forma amistosa, condiciones que el modelo MAGIC no puede satisfacer.

Por este motivo y con el fin de identificar modelos capaces de cumplir el papel de herramienta de apoyo operacional para la gestión del recurso hídrico en la forma deseada, se llevó a cabo una revisión de modelos existentes a nivel mundial y un análisis comparativo según los siguientes tres criterios:

- criterio económico: se verificó el tipo de licencia (libre o comercial) y su costo

- criterio operativo: el modelo debe poder representar adecuadamente y/o poder adecuarse a la realidad de las cuencas chilenas. Se analizó el tipo de modelo y el paso de tiempo de la simulación (resolución temporal), la posibilidad de tener acceso al código fuente para su modificación (código abierto o cerrado), ejemplos de implementación del modelo en cuencas chilenas y la institución a cargo del modelo, entre otros. Por otro lado y debido a que es importante que la herramienta sea fácil de internalizar por los usuarios, se analizó la disponibilidad de material de capacitación y funcionamiento para que el usuario se pueda familiarizar con su uso rápidamente. Para esto se analizaron los siguientes parámetros: existencia de un pre-procesador, de un post-procesador y de una interfaz SIG (Sistemas de Información Geográfica); disponibilidad de manuales y tutoriales de iniciación y otras instancias de capacitación; soporte técnico, entre otras.

- criterio técnico: se evaluó la forma en que son abordados algunos aspectos específicos relacionados con la modelación por cada uno de los modelos. Dichos aspectos son: modelación interna o externa de la hidrología de cuencas de cabeceras e intermedias, grado de complejidad de la modelación de acuíferos, método de cálculo de la demanda de las zonas cultivadas y datos requeridos para ello, forma en que se surte la demanda agrícola (capacidad de priorización de canales frente a pozos), posibilidad de modelar reglas de operación de embalses y/o de canales, y otras características.

3.2 Clasificación de modelos según conceptos de representación espacial de la cuenca

Generalmente los modelos hidrológicos de clasifican en 2 tipos, agregados o distribuidos, dependiendo de la forma en que queda representada la realidad física de la cuenca.

a) Modelos agregados

Los modelos **agregados** buscan representar la cuenca basándose en una discretización que respeta la organización espacial de los diferentes elementos discretizados. Según si la discretización es fina o bien trata de delimitar Unidades Hidrológicas Relativamente Homogéneas (UHRHs) independientes y que pueden ser descritas de forma razonable por un modelo hidrológico propio, se habla de

- un modelo agregado, en cuyo caso la discretización es fina
- un modelo semi-agregado, cuando la discretización se hace en UHRH.

Los métodos y criterios de discretización posibles son múltiples, sin embargo hay dos criterios comunes o más usados para hacer la discretización, que son:

- la homogeneidad de los procesos hidrológicos y de las solicitaciones meteorológicas, y
- la existencia de sitios de interés específico (estación de calibración superficial, embalses o un sitio donde se requiere visualizar algún resultado).

b) Modelos distribuidos

Los modelos distribuidos suponen que la cuenca puede ser representada por un número limitado de Unidades Hidrológicas Representativas (UHRs) de los principales comportamientos hidrológicos observados en la cuenca. La afección de un elemento de superficie de la cuenca a una UHR es independiente de la ubicación espacial y responde a uno o más criterios o una combinación de ellos como la altitud o un índice topológico por ejemplo. La respuesta hidrológica de la cuenca completa se obtiene como una suma de las respuestas calculadas para las diferentes UHRs, ponderadas por lo general por el área de cada UHR.

Por lo tanto, estos dos tipos de modelos corresponden a una lógica distinta que obliga al usuario a entender y preparar los antecedentes que alimentan el modelo en diferentes formatos y la traducción de un tipo de modelo al otro en una misma cuenca no es necesariamente ni fácil ni inmediata.

A continuación se describen de forma somera los diferentes modelos recopilados, antes de llevar a cabo un análisis comparativo más detallado en el capítulo 3.3 siguiente.

3.2.1 Modelos semi-agregados

a) Modelo MAGIC (Dirección General de Aguas)

El modelo MAGIC es un modelo semi-agregado de base física, cuya topología está definida con objetos cuyos parámetros se pueden modificar (representando fácilmente los cambios en las condiciones de la cuenca) y que se relacionan entre ellos.

A mediados del año 2002, la D.G.A. comenzó un proyecto destinado a fusionar las mejores características de dos modelos (MOS Aconcagua y SSuRH) en un solo modelo genérico, flexible e integrado, que permitiera realizar una simulación hidrológica superficial y subterránea de cualquier cuenca de la cual se dispusiera de toda la información necesaria. Con esto se pretendió evitar la necesidad de destinar recursos económicos a la elaboración de un nuevo modelo cada vez que se requiriera simular el comportamiento de una nueva cuenca y destinar dichos recursos sólo a la recopilación de la información necesaria para alimentar el modelo.

El proyecto se denominó MAGIC, sigla que corresponde a Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas. Este modelo es analítico por la naturaleza de todas las relaciones matemáticas y computacionales involucradas en él, es genérico, porque puede ser aplicado a cualquier cuenca (siempre que exista información) y es integrado porque abarca tanto la parte superficial como subterránea de la cuenca bajo estudio. Este proyecto tomó el concepto de cuenca y el código fuente del estudio “Complemento Diseño Modelación Hidrológica, DGA, 2000” y los fundió con el concepto y la forma de funcionamiento de los acuíferos, zonas de riego y embalses del estudio “Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Maule, VII Región, DGA, 1997“.

Además, se definió una estructura de variables completamente nueva y una interfaz de usuario superior. Todo lo anterior hizo necesario escribir un nuevo código fuente que incorporara todos los elementos mencionados anteriormente, para lo cual se utilizó el lenguaje de programación Delphi 5.0 (orientado a objetos).

No obstante lo señalado, quedó pendiente la incorporación de la posibilidad de que el usuario determine reglas de operación, por un lado, y la salida amistosa de resultados, por otro.

b) Modelo AQUATOOL (Universidad Politécnica de Valencia)

El Área de Ingeniería de Recursos Hídricos del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la **Universidad Politécnica de Valencia (UPV)** ha desarrollado un sistema soporte de decisión (SSD) en materia de planificación de recursos hidráulicos, denominado AQUATOOL.

Es un modelo conceptual semi-agregado con el cual se pueden analizar de forma integrada, y a escala de cuenca hidrográfica aspectos cuantitativos, cualitativos, económicos y ambientales, incorporando también otros aspectos, como prioridades y reglas de gestión. Así mismo, permite tener toda la información en una sola aplicación, evaluar múltiples alternativas para distintos escenarios, obtener los intercambios entre los distintos objetivos, y estimar los riesgos asociados a las decisiones y al análisis de sensibilidad. Consta de una serie de módulos que están integrados en un sistema único en el que la unidad de control del usuario permite la definición gráfica del esquema del sistema de recursos hídricos, el control de las bases de datos, la utilización de los módulos mencionados y el análisis gráfico de los resultados. Se ha obtenido una valiosa experiencia con dicho sistema en su aplicación a casos reales de planificación en cuencas españolas (Júcar, Segura, Tajo, Duero y otras) y de otros países como Argentina, Chile, Italia, Brasil y otros. Estas aplicaciones demuestran la robustez de las herramientas y su flexibilidad para modelar gran variedad de sistemas. Los distintos módulos han sido diseñados con orientación a metodologías consolidadas de análisis de sistemas de recursos hídricos.

Dentro de los módulos disponibles se pueden mencionar entre otros:

- SIMGES: Simulación de gestión de cuencas. Está orientado hacia la gestión integral de recursos hídricos, incluyendo elementos como tramos de río, canales, acuíferos, embalses, demandas consuntivas, demandas hidroeléctricas, etc.
- GESCAL: Simulación de la calidad del agua. Permite modelar parámetros como la temperatura del agua, materia orgánica, oxígeno disuelto, ciclos de nitrógeno y fósforo y problemas de eutrofización.
- OPTIGES: Optimización para la gestión de recursos hídricos. Este módulo permite la resolución del problema de la asignación de recurso hídrico mediante la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo.
- AQUIVAL: Modelo discreto de acuíferos lineales mediante autovalores. Este método permite una modelación distribuida con gran eficiencia computacional de los acuíferos.
- ECOGES: Consideración de aspectos económicos en la gestión. Permite la evaluación económica de las alternativas de estrategias de gestión de recursos hídricos.

Más antecedentes en www.upv.es/aquatool/

c) Modelo WEAP (Stockholm Environment Institute)

El modelo WEAP (Water Evaluation And Planning) es un modelo semi-espacializado de base física. Fue creado en 1988 como iniciativa del **Stockholm Environment Institute (**SEI), con el objetivo de generar una herramienta de planificación flexible, integral y transparente para evaluar la sostenibilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance. La primera aplicación importante del modelo WEAP fue en la región del Mar de Aral en 1989 con el auspicio del recién formado Stockholm Environment Institute (SEI) quien continuó apoyando su desarrollo a través de su Centro en Estados Unidos (SEI-US), establecido en 1989 y fue organizado por el Tellus Institute hasta 2006.

El Hydrologic Engineering Center (HEC) del US Army Corps of Engineers financió mejoras significativas en el modelo. Un número de agencias, incluyendo la O.N.U., Banco Mundial, Agencia de Ayuda para el Desarrollo del Pueblo de los Estados Unidos, Agencia Protección Ambiental de los Estados Unidos, IWMI, Water Research Foundation (anteriormente AwwaRF) y el Fondo para Infraestructura Global del Japón, han proporcionado ayuda al proyecto. A través de los años el modelo WEAP se ha aplicado en cuencas en docenas de países y sistemas fluviales. El software ha sido transferido a planificadores de recursos hídricos alrededor del mundo y sus manuales traducidas a una gran cantidad de idiomas.

WEAP se caracteriza por su enfoque integral al simular tanto los componentes naturales (ej. las demandas por evapotranspiración, escorrentía, flujo base) como los componentes de infraestructura (ej. embalses, bombeo de agua subterránea, etc.) de los sistemas de agua, permitiendo al planificador una mirada más comprensiva de la amplia gama de factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos hídricos para el uso presente y futuro.

SEI-US es una organización sin fines de lucro registrada 501(c)(3) por lo que todo el dinero recaudado con las licencias de WEAP (de usuarios en países con altos ingresos) se destina para apoyar a usuarios de países en vías de desarrollo y el desarrollo adicional del software y su documentación.

Más antecedentes en www.weap21.org

d) MODSIM-DSS(Colorado State University)

MODSIM es un sistema de soporte para la decisión (DSS), desarrollado originalmente en 1978 en la Colorado State University (Shafer and Labadie, 1978), lo que hace de él el sistema de gestión de cuencas más antiguo, permanentemente actualizado, existente hasta hoy. Una de las gran ventajas de este modelo es la posibilidad de personalizar el programa en ambiente .NET Framework, especificando reglas de operación, datos de entrada, informe de resultados y acoplándolo a otros modelos externos, sin tener que modificar su código.

El modelo está diseñado como una herramienta para la evaluación de estrategias regionales tanto para la gestión del agua a corto plazo como para la planificación a largo plazo, elaboración de planes de sequía, análisis de derechos de agua y resolución de conflictos entre usos urbanos, agrícola, medioambiental y minero, entre otros usos.

Su interfaz gráfica conecta MODSIM con las diferentes bases de datos y un modelo de optimización de flujo eficiente. Las funciones objetivo y restricciones del modelo se editan automáticamente utilizando los parámetros especificados a través de la interfaz sin requerimiento de conocimientos en optimización o en programación de parte del usuario.

La optimización de las funciones objetivos es una forma eficiente de satisfacer demandas de la cuenca en función de prioridades deseadas, asegurando al mismo tiempo que el agua se distribuya conforme a diferentes aspectos (físico, hidrológico y administrativo) de la cuenca.

MODSIM no está diseñado para la gestión de situaciones de emergencia (crecidas, contaminación), para lo cual se necesitan modelos hidráulicos y de transporte de contaminantes, detallados con un paso de tiempo inferior a una hora.

Más antecedentes en www.modsim.engr.colostate.edu/index.shtml

3.2.2 Modelos semi-distribuidos

a) Modelo SWAT (United States Department of Agriculture)

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo semi-distribuido de base física. Fue desarrollado por el Departmento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en el agua, los sedimentos y la producción de sustancias químicas provenientes de la agricultura en cuencas extensas y complejas con gran variedad de suelos, uso de la tierra y condiciones de manejo, en un periodo prolongado de tiempo.

Requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de los suelos, topografía, vegetación y prácticas de tierra y agua que acontecen en las cuencas. Los procesos asociados a la circulación del agua y de los sedimentos, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes entre otros son modelados directamente con el modelo SWAT.

Por la forma en que se desarrolló, el modelo SWAT es más un modelo de manejo de suelos que un modelo hidrológico, ya que tiene un enfoque más específico. Por lo mismo, y por requerir mucha información no necesariamente ligada a procesos hidrológicos, no es directamente aplicable a estudios hidrológicos, ya que no es su objetivo principal. En este sentido, no es apto para optimizar la distribución del agua entre diferentes usos, por ejemplo.

Uno de los grandes atractivos del modelo SWAT es la forma en que se ha desarrollado, con acceso libre y código abierto, para permitir el acceso al modelo a un gran número de

usuarios alrededor del mundo, especialmente en los países en vías de desarrollo. Por ello se implementaron las interfaces para el usuario compatibles con programas libres.

Más antecedentes en www.swat.tamu.edu/ o www.waterbase.org(interfaz SIG libre)

b) Modelo MIKE BASIN (Danish Hydraulic Institute)

MIKE BASIN es un modelo distribuido de base conceptual, desarrollado por **Danish Hydraulic Institute (**DHI).

Es una herramienta multi-propósito para la gestión y la planificación de cuencas. Corresponde a una extensión de los programas ArcView o ArcGIS (Esri Inc.), por lo que su interfaz gráfica está implementada en un ambiente SIG, integrando sus funcionalidades.

El propósito de este modelo es la simulación de caudales naturales, operación de embalses multi-propósitos y asignación de derechos de agua en cuencas hidrográficas tomando en cuenta la priorización de los usos. Así mismo, permite la evaluación conjunta de las aguas superficiales y subterráneas (enfoque integrado). Además, mediante una extensión del módulo básico, se puede modelar el efecto de fuentes concentradas y difusas de contaminantes en la calidad de las aguas.
El modelo se puede aplicar en cuencas de cualquier tamaño y puede incorporar diferentes cuencas para evaluar trasvases de agua de una cuenca a la otra.

Los principales procesos representados en este modelo son: generación de escorrentía, aguas superficiales (con o sin enrutamiento), aguas subterráneas (embalse lineal), balances de agua en embalses, calidad de aguas.

Es necesaria la obtención de una licencia para su uso y las condiciones comerciales se tienen que consultar vía la página del programa.

Más antecedentes en www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKEBASIN.aspx

3.2.3 Otros modelos

a) SOURCE (eWater)

En Australia, desde el año 2005, el Murray-Darling Basin Authority (MDBA), junto con el gobierno australiano y otras instituciones, han encargado a eWater el desarrollo de una plataforma de modelación integrada de agua a nivel de cuenca para la modelación hidrológica de Australia en el año 2015. eWater junto con el gobierno australiano y socios del ámbito industrial, han llevado a cabo más de 100 modelos a través de Australia a la fecha.

MDBA es una agencia gubernamental australiana encargada de la gestión del recurso hídrico a nivel de la macro-cuenca de los ríos Murray y Darling, de más de 1 millón de

kilómetros cuadrados de superficie, la más grande de Australia y una de las más áridas del mundo.

eWater es una organización pública de investigación aplicada, sin fines de lucro, cuya misión principal es la elaboración de la plataforma de modelos Source, su difusión y la capacitación de sus usuarios.

El modelo Source está desarrollado como una plataforma abierta, flexible y totalmente adaptable, que permite a sus usuarios construir nuevos modelos rápidamente, desarrollar extensiones e integrar, en vez de reemplazar, modelos existentes.

Esta plataforma se presta tanto para contextos con una pequeña o una gran cantidad de datos. Source permite a organizaciones diseñar, optimizar y tomar decisiones acerca de un rango de objetivos operativos como por ejemplo:

- riego, hidroelectricidad, usos industriales y medioambientales del agua
- cambio climático y seguridad de aprovisionamiento en agua
- derechos y mercado del agua
- caudales ecológicos
- planificación estratégica de infraestructuras
- protección contra sequía y planes de sequía
- uso del suelo y calidad de aguas

Un ejemplo de implementación del modelo Source en Australia es el modelo de la cuenca Murray-Darling por el MDBA, con el objetivo a largo plazo de reemplazar su plataforma de modelación hidrológica actual, MSM-Bigmod, desarrollada en los años 60. Los objetivos del proyecto son la construcción, calibración y validación de un modelo diario de la cuenca para apoyar el MDBA en su responsabilidad de gestión del sistema completo. Actualmente está en la fase de calibración y se espera que la validación se termine en el año 2015.

Para utilizar este modelo es necesaria la inscripción como miembro de la comunidad de modelación de Source o Source Modeling Community (SMC). Hasta hace poco el acceso a esta comunidad estaba limitado sólo a socios australianos del centro de investigación eWater. Desde Julio del 2012, la inscripción está abierta a toda organización, abriendo la posibilidad de compartir conocimientos y participar en las actividades de la SMC.

El acceso a la SMC está condicionado al pago de una cuota anual, proporcional al ingreso anual de la organización que lo solicita, con un mínimo de CLP 2.300.000 anual. También existe la posibilidad de contratar una licencia comercial mensual o anual para usuarios que necesitan la plataforma para un proyecto específico. La inscripción en la SMC permite beneficios como cursos on-line o presenciales por especialistas del área; acceso a la red de usuarios, foros y seminarios especializados; compartir experiencia y conocimientos con profesionales de Australia o de otros países que están implementando el modelo Source; acceso a guías de buenas prácticas en modelación integral, manuales de referencia técnica y de soporte.

eWater provee a todos los usuarios del modelo Source un soporte técnico profesional. Adicionalmente se puede contratar un pack de soporte y mantenimiento de la plataforma, que abre acceso a una línea telefónica de soporte, a las actualizaciones de la plataforma sin costo adicional y a material adicional de soporte.

Más antecedentes en http://www.ewater.com.au/products/ewater-source/

b) GSFLOW (U.S. Geological Survey)

El modelo GSFLOW (Groundwater and Surface-Water Flow) desarrollado por U.S. Geological Survey (USGS), de libre obtención y uso, acopla dos modelos desarrollados por la misma institución, el modelo superficial PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System, Leavesley et al., 1983) y el modelo subterráneo MODFLOW (Modular Groundwater Flow Model, Harbaugh, 2005). Adicionalmente, a los módulos de simulación de estos 2 modelos, se incluyeron otros módulos, que facilitan la integración de ambos modelos.

Este modelo permite una modelación integrada detallada de cualquier cuenca o subcuenca de interés. Sin embargo, su alto grado de complejidad y la gran cantidad de información base necesaria, hace inviable su aplicación en la presente consultoría, por lo que no aparece en el análisis técnico siguiente.

Este modelo ha sido desarrollado para modelar en forma integrada flujos de aguas subterráneas y superficiales de una o más cuencas hidrográficas, a través de la simulación simultánea de la escorrentía superficial en capas subsuperficiales saturada o no saturada, y en cauces y espejos de agua.

El modelo GSFLOW puede ser utilizado por ejemplo para evaluar el efecto de factores como el cambio de uso del suelo, cambio climático, efecto de depresión de un acuífero sobre el escurrimiento superficial o subsuperficial, entre otros. El modelo incluye métodos bien documentados para la simulación de escorrentía e infiltración a partir de las precipitaciones; balance de energía o de masa en vegetación, manto nival y suelo; y simulación de interacción de aguas superficiales y subterráneas para cuenca de unos a cientos de kilómetros cuadrados y para periodos de tiempo de meses a varias décadas.

GSFLOW permite 3 modos de simulación: integrado, PRMS-solo y MODFLOW-solo. La posibilidad de correr de forma independiente los modelos PRMS y MODFLOW incrementa la flexibilidad en la calibración del modelo. El modelo opera con un paso de tiempo diario.

Así como los modelos PRMS y MODFLOW se pueden descargar libremente de la página del U.S.G.S. (www.water.usgs.gov), el modelo GSFLOW también es libre. Junto con el programa se puede descargar un manual del usuario para el modelo GSFLOW así como para los modelos PRMS y MODFLOW. Además existe un soporte técnico de parte del personal del U.S.G.S. para corregir problemas y aportar clarificación sobre el código interno del modelo. Para problemas específicos sólo se entrega un soporte limitado a través del mail gsflowhelp@usgs.gov.

Más antecedentes en www.water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/gsflow/gsflow.html

c) Modelos de la Universidad de Texas A&M

Para completar esta recopilación de modelos de gestión, se menciona el trabajo realizado por la Texas A&M University y el Bureau of Reclamation de Estados Unidos para proveer información acerca de una gran cantidad de modelos existentes para modeladores de los sectores académicos, gubernamentales y privados.

Se recopilaron modelos existentes de diferentes tipos y se solicitó a los desarrolladores de cada uno de los modelos rellenar un formulario con información básica sobre su modelo, incluyendo las posibilidades que ofrece, datos de entrada, resultados obtenidos, supuestos, requisitos en hardware e información de contacto entre otras cosas. Los formularios contestados están consignados en fichas que se pueden visualizar y descargar desde la página www.hydrologicmodels.tamu.edu/.

Los modelos que aparecen como "River and Watershed Managment Model" o Modelo de Gestión de Ríos y Cuencas son:

- Hydrologic River Operations Study System (HYDROSS)
- Interactive River-Aquifer Simulation Program (IRAS)
- Water Demand Management Suite (IWR-MAIN)
- MIKE BASIN
- Generalized River Basin Network Flow Model (MODSIM)
- NETSTORM
- Model for Analysis of Sportfishery Management Policy (RIOFISH)
- River Ware
- Water Rights Analysis Package (WRAP)

3.3 Análisis comparativo detallado

En este análisis se comparan en detalle algunos de los modelos previamente presentados para evaluar su posible aplicación en alguna cuenca chilena. Se descartaron los programas cuyo costo era elevado (modelos Source y Mike Basin) o cuyas características básicas no correspondían con los objetivos específicos de esta consultoría (modelos SWAT y GSFLOW).

3.3.1 Criterio económico

Obviamente el factor económico es relevante en el momento de elegir un programa para modelar una cuenca, ya que puede ser limitante dado los precios elevados de las licencias de los programas comerciales. Sin embargo, como reacción a esta situación existe una tendencia a la generación de programas libres, algunos de código abierto, permanentemente actualizados y mejorados a través de la estrecha interacción entre los usuarios y el equipo desarrollador. En este sentido hay que destacar el trabajo de diferentes instituciones de los Estados Unidos, gubernamentales o académicas, que ponen a

disposición programas competitivos, periódicamente actualizados, con todo el material pedagógico necesario para interiorizarse, disponible en forma totalmente gratuita. Dentro de estos destacan; United States Geological Survey, United States Department of Agriculture, Environmental Protection Agency, Hydrologic Engineering Center del United States Army Corps of Engineers, entre otros.

Siguiendo esta filosofía, el programa SWAT se ha beneficiado del proyecto Water Base de la United Nations University (www.waterbase.org) el cual busca promover las prácticas de gestión integrada del agua en países en desarrollo entre otros, buscando solucionar los problemas que limitan la difusión y el uso de modelos de simulación y de decisión para la gestión del agua en dichos países, como falta de recursos, falta de pericia, falta de capacitación, dependencia de expertos de otros países. El proyecto Waterbase provee gratuitamente las siguientes herramientas de modelación y soporte: interfaz para el modelo SWAT para el programa SIG libre Map Window, herramientas de visualización de resultados para el programa SWAT entre otros; tutoriales, manuales, datos globales de elevación, suelo, cuencas y clima; integración a una comunidad de modeladores que participa en la mejora de las herramientas y aporta soporte técnico a los menos experimentados.

En el momento actual, los programas MAGIC, SWAT y MODSIM son de libre acceso, el segundo además de código abierto, lo que permite a cualquier usuario experimentado hacer sus propias modificaciones.

En cambio los programas AQUATOOL y WEAP necesitan una licencia para su obtención y uso, la cual es gratuita sólo en el caso de organizaciones gubernamentales o sin fines de lucro, para países que no están en la OCDE. AQUATOOL tiene un costo de CLP 8.000.000 (€ 12.000) mínimo anual, y WEAP tiene un costo de US$ 3.000 bianual. Las licencias gratuitas tienen que renovarse cada año mientras que las licencias pagadas tienen una vigencia de 2 años.

3.3.2 Criterios operativos

a) Soporte técnico

El tema del soporte técnico, también relevante, está vinculado a la naturaleza del programa, libre o comercial, ya que por lo general los programas libres carecen de un soporte técnico formal, y los usuarios tienen que acudir a foros para resolver sus problemas. Al contrario los programas comerciales tienen incluido en el precio de la licencia un servicio de soporte técnico que permite al usuario solucionar rápidamente los problemas encontrados.

En este sentido una de las grandes desventajas del modelo MAGIC, que es libre, es la falta total de soporte técnico. En cambio el programa SWAT que también es libre, propone al usuario un soporte técnico mínimo a través del intercambio de mail con el equipo desarrollador del programa y la participación en el foro que une usuarios de todo el mundo.

Para el soporte del modelo MODSIM, sólo existe un mail de contacto de la Universidad de Colorado para hacer preguntas.

En el caso de AQUATOOL, sólo las licencias pagadas disponen de un soporte técnico por teléfono y por mail durante la vigencia de la licencia.

El programa WEAP dispone de un soporte técnico limitado, por mail al equipo desarrollador (para licencias gratuitas y pagadas) y ofrece un foro de usuarios y la posibilidad de solicitar un apoyo adicional personalizado por el equipo del SEI-US (costo a cotizar).

b) Manuales e instancias de capacitación

Para entender cómo funciona un programa y familiarizarse con su uso, es importante que el nuevo usuario tenga a su disposición por lo menos un manual de referencia técnica, un manual de usuario y tutoriales que son ejercicios de aplicación del programa para casos simplificados. Además es muy provechoso poder participar de una capacitación presencial por lo que también se analizó este punto.

El programa MAGIC sólo dispone de los 2 manuales, ambos disponibles en la DGA, pero que no han sido actualizados y por lo tanto no reflejan los cambios de las últimas de versiones del programa. No dispone de tutoriales ni tampoco existen instancias de capacitación para el uso del programa.

En contraste, los otros programas evaluados ofrecen manuales y tutoriales, disponibles en internet, en formato de texto o video. En el caso de los programas SWAT y MODSIM, todo el material está en inglés. También existe un manual de referencia técnica de SWAT traducido al castellano, que, sin embargo, no corresponde a la última versión del programa. Todo el material de AQUATOOL está en castellano. En el caso de WEAP existen varios documentos traducidos al castellano y se puede mencionar la "Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP" editada por el Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile en colaboración con el Stockholm Environment Institute el año 2009.

En el caso de SWAT y WEAP existen varias instancias de capacitación en diferentes partes del mundo. En el caso de AQUATOOL la posibilidad de capacitarse es mucho más limitada. Consiste en algunos cursos esporádicos para el público general y una formación de una semana en la UPV para una persona por licencia pagada, con el viaje costeado por el usuario.

Los modelos MAGIC y MODSIM carecen de instancias de capacitación.

Una gran ventaja del SWAT es la posibilidad de participar en las conferencias organizadas anualmente en distintos sitios del mundo, que reúnen tanto a los desarrolladores como a los usuarios del programa, donde se presentan trabajos llevados a cabo con el programa. Las

presentaciones (video y powerpoint) de la última edición están disponibles en la página del programa.

c) Aplicación en Chile

También es importante conocer qué aplicaciones ha tenido o está teniendo cada uno de estos modelos en Chile para dar cuenta de su adecuación a la realidad de las cuencas del país.

En la actualidad, el programa MAGIC es el modelo más ampliamente utilizado en Chile, lo que demuestra que ha dado respuestas satisfactorias a algunos aspectos de interés. Las cuencas modeladas con MAGIC por parte de la DGA y CAZALAC son las de los ríos Huasco (está siendo desarrollando en este momento), Los Choros, Elqui, Limarí, Choapa, Pupío, Quilimarí, Aconcagua, Maipo, Maule. Sin embargo, la ausencia de una institución que dé continuidad a su desarrollo y ofrezca un soporte técnico a sus usuarios ha llevado a que otros modelos hayan sido elegidos para ser implementados en Chile, como el WEAP en la cuenca de los ríos Huasco (CAZALAC) y Limarí y en subcuencas nivales desde la IV hasta la VIII Región (CCGUC) y el SWAT en las cuencas de los ríos Limarí y Cachapoal (INIA), y en las cuencas Vergara, Lonquimay, Itata y ahora Rapel (EULA). En cuanto al modelo AQUATOOL, ha sido utilizado en el valle del río Copiapó por parte de la DGA a través de una empresa consultora, y actualmente está siendo actualizado para la DGA, en la misma cuenca, por otra consultora.

El modelo MODSIM al parecer no ha sido implementado en ninguna cuenca chilena hasta ahora.

d) Operación de modelos

En cuanto a la operación de modelos, el análisis que aquí se presenta tomó en cuenta la existencia de pre y post-procesadores, y de una interfaz SIG para facilitar la implementación del modelo y la representación de los resultados.

El modelo MAGIC carece de pre-procesador de datos y no se sabe de qué forma se puede obtener la interfaz SIG desarrollada para las cuencas de Maipo y Aconcagua (CNR y DGA, 2004), ni tampoco si está actualizada para funcionar con las últimas versiones del programa. El post procesador del modelo MAGIC es básico y sirve para desplegar visualmente algunos de los resultados de la simulación.

Los otros programas cuentan con pre-procesador, post-procesador e interfaz SIG, integrada en el caso de los programas AQUATOOL, WEAP y MODSIM, externa (extensión de ArcGIS (comercial) o Map Window (libre)) en el caso del programa SWAT. Cabe mencionar que el modelo MODSIM se puede implementar en ambiente SIG, usando una extensión libre del programa SIG comercial ArcGIS.

3.3.3 Criterios técnicos

Se han determinado algunos aspectos técnicos relevantes para evaluar la adecuación de los modelos a la representación de los fenómenos que se busca analizar.

a) Modelación de la hidrología de aportes de cuencas de cabecera e intermedias

Esta modelación pueden hacerla internamente algunos modelos, en otra debe hacerse externamente. Los modelos SWAT y WEAP incluyen un modelo de precipitación-escorrentía mientras que en el caso de los modelos MAGIC, AQUATOOL y MODSIM, las series temporales de caudales de las cuencas de cabecera e intermedias constituyen datos de entrada.

b) Grado de complejidad de la modelación de acuíferos

Sin entrar en mayor detalle, se puede decir que la forma de modelar los acuíferos en los modelos MAGIC y SWAT es bastante básica, mientras que los programas AQUATOOL y WEAP permiten elegir desde una modelación básica hasta una modelación sofisticada, en función del tipo de problema, del nivel de detalle que se está buscando y de la información de entrada de la que se disponga.

En el caso del modelo MODSIM, la debilidad principal es la carencia de modelación de acuíferos. Sólo se modelan los flujos de interferencia aguas superficial-subterráneas. Sin embargo existe la posibilidad de calibrar los coeficientes de interacción en base a un modelo MODFLOW calibrado de la zona de interés. También es necesario evaluar la posibilidad de remediar este problema utilizando las extensas posibilidades de personalización que propone este modelo, mediante scripts en ambiente .NET.

En conclusión, una de las grandes fortalezas del programa WEAP, obviamente es la posibilidad de acoplarlo de forma dinámica al modelo de aguas subterráneas MODFLOW que permite representar finamente cualquier tipo de acuífero.

c) Cálculo de la demanda de los cultivos y datos requeridos

En el caso de los modelos MAGIC, SWAT y WEAP, el método de cálculo de la demanda de las zonas cultivadas es interno. En el caso de los modelos AQUATOOL y MODSIM, el cálculo es externo.

El cálculo es básico en el caso del MAGIC, de básico a más sofisticado en el caso de SWAT y WEAP con un mínimo de 3 parámetros: evapotranspiración potencial (ETP), coeficiente de cultivo y precipitación efectiva sobre la zona de riego. En el modelo WEAP se puede sofisticar el cálculo, considerando grado de desarrollo de la planta, y grado de humedad del suelo, entre otros.

d) Prioridad de las fuentes

Se refiere a la forma en que se surte la demanda agrícola (canal, embalse, pozos). Ambos modelos MAGIC y AQUATOOL surten las demandas agrícolas primero con agua superficial y luego con agua de pozos representando así adecuadamente las prácticas reales, mientras que el modelo WEAP admite una priorización de las fuentes que abastecen cada zona de riego, o cada centro de demanda. El modelo MODSIM permite representar de forma muy sofisticada sistemas complejos en términos de administración y gestión del recurso, lo que indudablemente constituye su fortaleza. En cuanto al modelo SWAT sólo admite un tipo de fuente por Unidad Hidrológica Representativa, con lo que es bastante más limitado en este aspecto.

e) Reglas de operación

Se refiere a la posibilidad de modelar reglas de operación de embalses, canales y acuíferos. El modelo MAGIC no permite ingresar reglas de operación de ningún tipo. El modelo SWAT permite la incorporación de reglas de operación de embalses, de forma básica. El modelo AQUATOOL permite la utilización de 5 tipos diferentes de reglas de embalse. Los modelos MODSIM y WEAP permiten la definición de reglas de operación personalizadas por el usuario. En el caso del programa WEAP existe la posibilidad de programar una la regla de operación, aunque también hay acceso a reglas de operación básicas.

En cuanto a los canales, los modelos MAGIC y SWAT no permiten modelar reglas de operación de canales y en cambio los programas AQUATOOL y WEAP sí lo permiten. En el caso del programa WEAP existe la posibilidad de programar una regla de operación especial de un canal o de cualquier otro objeto, por ejemplo el acuífero. El modelo MODSIM permite la definición de reglas de operación personalizadas por el usuario.

f) Otras características que se desprenden de la revisión

Todos los modelos analizados pueden integrar un modelo de calidad de aguas salvo el modelo MAGIC.

Además los modelos AQUATOOL, WEAP y MODSIM permiten evaluar económicamente cada escenario corrido.

El modelo SWAT está más enfocado al tema suelo y permite cuantificar la erosión, analizar problemas de transporte de sedimentos y de contaminación complejos.

El modelo MODSIM está enfocado al tema de la administración de los recursos hídricos y la optimización de su entrega.

Una de las grandes ventajas de los modelos WEAP y MODSIM, es la posibilidad de personalizarlos con la edición de scripts y la posibilidad de acoplarlos a otros programas como MODFLOW (modelo de aguas subterráneas) y PEST (calibración) entre otros.

A continuación se presenta una tabla resumen de este análisis comparativo detallado, en la Tabla 3.2, con las abreviaciones de la Tabla 3.1 adjunta.

Tabla 3.1
Abreviaciones con que se presenta el análisis

INSTITUCION	
DGA	Dirección General de Aguas
USDA	United States Department of Agriculture
IIAMA	Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
UPV	Universidad Politécnica de Valencia
DHI	Danish Hydraulic Institute
USGS	United States Geological Survey
SEI	Stockolm Environment Institute
CCGUC	Centro Cambio Global Universidad Católica
CAZALAC	Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe
CSU	Colorado State University
MODELO	
MAGIC	Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SHETRAN	Système Hydrologique Européen TRANsport
HSPF	Hydrological Simulation Program-Fortran
GSFLOW	coupled Ground water and Surface-water FLOW
WEAP	Water Evaluation And Planning

Tabla 3.2 a)
Análisis comparativo de modelos

MODELO		MAGIC	SWAT	AQUATOOL
Desarrollado por		DGA-Chile	USDA-USA	IIAMA-UPV-España
Aspecto	Característica			
Económico	Tipo de licencia	Libre	Libre	Gratuito para instituciones de carácter público que hagan utilización del sistema para fines no lucrativos
	Costo asociado			Para consultoras: CLP 8000000 1er módulo y CLP 4000000 siguientes módulos cada 2 años para consultoras
Operativo	Tipo de modelo	Modelo semi-espacializado a base física	Modelo semi-distribuido a base física	Modelo semi-espacializado conceptual
	Paso de tiempo	Mensual	Sub-diario, diario o mensual	Mensual
	Código abierto/lenguaje	NO/Delphi	SI / Fortran	NO
	Interfaz SIG	SI, no se sabe si está disponible y probablemente esté desactualizada	SI, ArcSWAT con ArcGIS (comercial) y MWSWAT con MapWindow (libre)	SI, básica
	Pre-procesador	NO	SI	SI
	Post-procesador	Básico	SI	SI
	Manuales	No actualizados	SI en inglés, manual de referencia técnica de la versión 2005 en castellano	SI
	Tutoriales	NO	Videos en línea en inglés	SI, disponibles en la página
	Capacitación	NO	Videos en línea, cursos presenciales, conferencia anual: las charlas de la última conferencia se pueden visionar en línea y se pueden bajar las presentaciones powerpoint	SI, en el IIAMA, por una persona y una semana a costo del usuario en el caso de licencia pagada solamente
	Soporte técnico	NO	SI a través de mail con el equipo desarrollador e integrando los foros de usuarios	Sólo para licencias comerciales por mail y teléfono
	Cuenca chilena modelada	Huasco, Los Choros, Elqui, Limarí, Choapa, Pupío, Aconcagua, Maipo, Maule	Limarí, Cachapoal, Bío-Bío (Vergara y Lonquimay)	Copiapó
	Institución a cargo	DGA	INIA, EULA	DGA

Tabla 3.2 a) (Continuación)
Análisis comparativo de modelos

MODELO		**WEAP**	**MODSIM-DSS**
Desarrollado por		**SEI-Suecia**	**CSU-USA**
Aspecto	**Característica**		
Económico	Tipo de licencia	Gratuito para organizaciones governamentales o sin fines de lucro	Libre
	Costo asociado	Para consultoras: mín USD 3000 cada 2 años	
Operativo	Tipo de modelo	Modelo semi-espacializado a base física	Modelo semi-espacializado a base física
	Paso de tiempo	Mensual	Mensual, semanal y diario o personalizado
	Código abierto/lenguaje	NO, pero altamente personalizable	NO, pero altamente personalizable mediante programación en .NET Framework
	Interfaz SIG	Básica	SI, GeoMODSIM bajo ArcGIS (comercial)
	Pre-procesador	SI	SI
	Post-procesador	SI	SI, animación de resultados
	Manuales	SI en inglés y castellano	SI en inglés
	Tutoriales	SI	SI en inglés
	Capacitación	Cursos presenciales en diferentes países incluido o no en marco universitario	NO
	Soporte técnico	Limitado, por mail y foro de usuarios	Limitado, por mail con una persona de la CSU
	Cuenca chilena modelada	Huasco, Limarí, varias subcuencas nivales desde la IV hasta la VIII	No hay
	Institución a cargo	CAZALAC, CCGUC	-

Tabla 3.2 b)
Análisis comparativo de modelos

MODELO		**MAGIC**	**SWAT**
Desarrollado por		**DGA-Chile**	**USDA-USA**
Aspecto	**Característica**		
Técnico	Modela hidrología cabecera?	NO	SI
	Aguas subterráneas (simple, mediano, complejo)	Modelo básico	Modelo Mediano
	Cálculo de demanda en zona de riego	Interno	Interno
	Cálculo de demanda en zona de riego (datos requeridos)	ETP del cultivo de referencia definida por usuario y ETP de cada cultivo calculado usando un coeficiente de cultivo. Demanda se calcula restando a la ETP de cada cultivo la lluvia efectiva.	ETP del cultivo de referencia definida por usuario o calculada con datos de Tº aérea y/o radiación solar, humedad relativa y/o velocidad viento según método elegido (Hargreaves, Priestley-Taylor o Penman-Monteith respectivamente). Demanda cualculada como la suma de la evaporación de las precipitaciones interceptadas por canopea + transpiración + evaporación desde el suelo y sublimación desde manto de nieve
	Como se surte la demanda de riego (canales vs pozos)?	Canal, luego pozo	Sólo una fuente por Unidad de Respuesta Hidrológica: demanda especificada por usuario o por déficit de humeda del suelo o déficit de agua de la planta
	Reglas de operación de canales	NO	NO
	Reglas de operación de embalses	NO	Básico
	Otras características que se desprenden de la revisión		Modela calidad de aguas, erosión, transporte de sedimentos entre otros

Tabla 3.2 b) (Continuación)
Análisis comparativo de modelos

MODELO		AQUATOOL	WEAP	MODSIM-DSS
Desarrollado por		IIAMA-UPV-España	SEI-Suecia	CSU-USA
Aspecto	Característica			
Técnico	Modela hidrología cabecera?	NO	SI	NO
	Aguas subterráneas (simple, mediano, complejo)	De básico a más complejo	De simple a complejo, incluye la posibilidad de acoplar el modelo WEAP con un modelo MODFLOW	NO, sólo modela flujos de interaccíon superficial-subterránea. Posibilidad de afinar los coeficientes de interacción con el uso de los resultados de un modelo MODFLOW calibrado.
	Cálculo de demanda en zona de riego	Externo	Interno o externo	Externo
	Cálculo de demanda en zona de riego (datos requeridos)	No calculada / Definida por usuario	De simple a más sofisticado: estándar, 3 métodos FAO, Soil Moisture Method o especificado por usuario. Los parámetros mínimos son Kc, ETP, Pp, %Pp_efectiva. Puede ser definida por el usuario también.	No calculada / Definida por usuario
	Como se surte la demanda de riego (canales vs pozos)?	Canal, luego pozo	Se asocia un órden de prioridad a cada fuente.	Se asocia un órden de prioridad a cada fuente.
	Reglas de operación de canales	SI, en función de estado de llenado de embalses	Básico. Posibilidad de implementar una subrutina.	SI
	Reglas de operación de embalses	SI	Básico. Posibilidad de implementar una subrutina.	SI, además el usuario puede editar reglas especiales
	Otras características que se desprenden de la revisión	Interfaz amigable, documentación en castellano, interfaz permite acoplar diferentes módulos incluyendo el módulo SIMCAL de calidad de aguas. Alto costo, cada módulo se tiene que comprar separadamente	Modela calidad de aguas e integra evaluación económica. Posibilidad de editar escriptos para generar subrutinas del WEAP o automatizar generación de escenarios en diferentes lenguajes (Virtual Basic, Java, Perl, Python, Ruby, PHP). Conexión dinámica con MODFLOW (aguas subterráneas) y PEST (calibración) entre otros	Sistema de Soporte para Decisión (DSS) enfocado a la evaluación de escenarios de gestión de sistemas hídricos con reglas de operación complejas. Integra un módulo de evaluación económica de escenarios. La redacción de subrutinas en .NET Framework permite personalizar el programa y integrar modelos de calidad de agua o de aguas subterráneas como MODFLOW.

3.4 Resultado del análisis de modelos estudio "Modelo para la gestión de la cuenca de Huasco"

En este estudio se hace una descripción conceptual de todos los tipos de modelos que existen con aplicación en hidrología. Para la planificación hidrológica, existirían básicamente dos tipos de modelos: los de simulación y los de optimización. En el estudio se describen someramente muchos modelos de simulación, entre ellos el WEAP, sin hacer un análisis comparativo de ellos, ni evaluar cuál se adecua mejor al caso chileno, ni a la cuenca y la casuística a enfrentar. A continuación se presenta un resumen de los modelos que también surgieron en la investigación presentada en los acápites anteriores, a modo de comparación.

3.4.1 Modelos de simulación

Los modelos de simulación se describen como modelos de balance, diseñados específicamente con el fin de predecir la respuesta hidrológica de una cuenca en base a una conceptualización determinada de su sistema hídrico y de sus particularidades.

Entre ellos, se encuentra el modelo AQUATOOL, con todos sus módulos específicos, útiles en la etapa de planificación del sistema hídrico.

También está el modelo AQUARIUS, que distribuye el agua con un criterio de eficiencia económica operacional, hasta llegar al óptimo de Pareto. Este modelo no permitiría simular reglas de distribución existentes, ni prioridades de uso. Es un modelo de simulación hídrico con optimización económica.

El modelo MODSIM aparece como un modelo muy poderoso para cumplir con los objetivos hidrológicos y administrativos (derechos de agua) del manejo de una cuenca. Permite el uso de SIG; el acoplamiento con MODFLOW, admite restricciones legales y administrativas, y se pueden simular impactos ambientales y ecológicos. Su debilidad es que requiere mucha información acerca de la cuenca, la que a veces puede no estar disponible.

El modelo RIBASIM (Delft Hydraulic Software), desarrollado para el manejo conjunto de aguas superficiales y subterráneos, ha tenido gran aplicación en todo el mundo desde hace más de 20 años. Tiene interface con SIG.

WEAP aparece como una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, cuyo objetivo es asistir al planificador experimentado. Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas. Funciona en base al balance de masa, pudiendo simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos, como flujo base, escorrentía por precipitación, recarga de aguas subterráneas, análisis de demandas sectoriales, derechos de agua y prioridades de asignación, operación de embalses, generación de hidroelectricidad, seguimiento de la contaminación y calidad del agua, evaluación de la vulnerabilidad, requisitos de

ecosistemas y el análisis económico de costo-beneficio de los diversos proyectos simulados.

WRAP se describe como un modelo que simula la gestión de aguas superficiales y operación de embalses, asignando el recurso en forma secuencial entre los usuarios, con prioridades definidas por el modelador. Se puede modelar el impacto de diversas prácticas de gestión sobre los recursos hídricos de la cuenca.

3.4.2 Modelos de optimización

Los modelos de optimización buscan una solución óptima al problema de asignación y distribución del recurso hídrico. Un algoritmo formal busca el óptimo de un conjunto de variables de control, las cuales maximizan o minimizan una función objetivo que plantea el modelador, sujeta a un conjunto de restricciones operacionales preestablecidas. La función objetivo y las restricciones son expresiones matemáticas, expresadas en función de las variables de control.

3.5 Comentario final

De todo lo señalado, teniendo en consideración los elementos de adecuación a los requerimientos de la presente consultoría, y en especial, debido a la semejanza conceptual del modelo WEAP con el modelo MAGIC, se decidió adquirir una licencia y trabajar con el modelo WEAP. Este modelo también fue aplicado en la cuenca del Huasco, y está siendo estudiado, ampliado y aplicado en las cuencas del Limarí y Maipo por la Universidad Católica de Chile.

4. Campañas de terreno

Durante el presente estudio se realizaron 5 campañas de terreno, que fueron las siguientes:

Campaña 1
3-8 marzo 2014

Esta campaña inicial tuvo los siguientes objetivos:

- cumplir con la reunión inicial de presentación del estudio a la CRDP, reunión que fue ampliada con la participación de otras instituciones y usuarios interesados,
- visitar los salones para la realización de los talleres de participación ciudadana en La Serena, Ovalle y Salamanca,
- actualizar la información técnica relacionada con el recurso hídrico, requeridos para la construcción del modelo WEAP Elqui. La información base fue recabada con mucho detalle el año 2005/2006 en el estudio de CAZALAC / RODHOS, y actualizada en 2012 para el estudio del Plan Maestro de Recursos Hídricos de CONIC-BF, con participación de RODHOS. Sin embargo, había aspectos que era necesario revisar, para lo cual se programó esta campaña.

Los objetivos de la campaña se cumplieron en su totalidad, quedando establecido el contacto especialmente con la Junta de Vigilancia del río Elqui, para posteriores reuniones por Skype.

El acta de la campaña de terreno con el detalle del contenido de las reuniones y de los viajes, se adjunta en Anexo Capítulo 4.

Campaña 2
21 – 24 abril 2014

A mediados de la primera etapa, se efectuaron los talleres de participación ciudadana para usuarios y representantes de instituciones públicas y privadas, para las tres cuencas, en las ciudades de La Serena, Ovalle y Salamanca sucesivamente. En estos talleres se socializó el contenido del estudio y se recibió las inquietudes y expectativas de todos los invitados. El detalle del contenido de los tres talleres, y la metodología de facilitación empleada, se encuentran explicados en el Capítulo 5, y el resultado de los mismos está documentado en el Anexo Capítulo 16.

Campaña 3
8-11 julio 2014

Una vez finalizada y aprobada la Etapa I, de la cuenca del Elqui, se realizó un segundo viaje a terreno, en el cual se presentó el contenido de la etapa a la CRDP en reunión ampliada con otras instituciones y usuarios interesados. El archivo powerpoint con la presentación se encuentra en Anexo Digital.

El objetivo principal de este viaje, sin embargo, fue el traspaso del modelo WEAP-Elqui y la capacitación correspondiente, a todos los usuarios interesados en el uso y aplicación del modelo a futuro. El detalle y contenido de la capacitación se encuentra en el Capítulo 12 y en el Anexo Digital.

Campaña 4
16-18 octubre 2014

El objetivo específico de este viaje fue el reconocimiento y verificación de la información de terreno para la cuenca del río Choapa. Específicamente, se trató de recoger información directamente desde las juntas de vigilancia, de modo de conocer la forma en que determinan los desmarques, y la forma en que se operan o se operarán los embalses, para desprender de ahí las reglas de operación. Se visitaron las Juntas de Vigilancia del río Choapa, Illapel y Chalinga. Además, se realizó la medición de nivel estático en un pozo de observación que la DGA ha dejado de medir hace algunos años. El contenido de las reuniones mantenidas se informa en el documento llamado Acta de Terreno Nº 2 del Anexo Capítulo 4, Anexo Digital.

Campaña 5
17-21 Noviembre 2014

Esta campaña final tuvo dos objetivos:

- por un lado, efectuar la capacitación y el traspaso del modelo a todos los usuarios interesados de las cuencas Limarí y Choapa. El detalle y contenido de la capacitación se encuentra en el Capítulo 12 y en el Anexo Digital.

- la ceremonia de cierre del estudio en las tres cuencas, que se llevó a cabo en las ciudades de Salamanca, Ovalle y La Serena. Se presentó el modelo WEAP en cuanto a lo que significa como herramienta y sus potencialidades, a continuación se presentó el trabajo realizado en la cuenca correspondiente, y se finalizó la ceremonia con la presentación de un video sobre la región. Este material se entrega en el Anexo Digital.

5. Talleres de participación de actores y usuarios

5.1 Objetivo de los talleres

De acuerdo con lo que se solicitaba en las Bases Técnicas, los días 22, 23 y 24 de abril de 2014 se efectuaron talleres de participación de actores y usuarios, separados por cuenca, en las localidades de La Serena, Ovalle y Salamanca, con el objetivo de incorporar el enfoque territorial relacionado con cada cuenca. En especial, interesó conocer las medidas y acciones que los actores quisieran explorar a través de las posibilidades que abre un modelo de simulación como el WEAP, y en particular, los escenarios a explorar en el presente estudio.

Específicamente, los objetivos de los talleres iniciales de participación fueron los siguientes:

- dar a conocer el proyecto, el mandante y el ejecutor
- juntar a la mayor cantidad de actores y usuarios posibles
- suscitar interés en participar, que la gente se involucre y se sienta comprometida
- generar una instancia de contacto (mails, teléfonos)
- conocer las expectativas sobre el desarrollo de la cuenca
- conocer la prioridad de las actividades que se realizan o se desea realizar con el agua en la cuenca
- concretamente, recoger información base para formulación de escenarios en adecuación con la realidad de cada una de las cuencas modeladas
- hacer visible el proyecto, como parte del Plan de Visibilidad

Cada taller tuvo una duración de una mañana. El hecho de trabajar por cuenca en forma independiente, fue muy útil para establecer un clima de trabajo propio de cada caso.

5.2 Metodología de facilitación grupal

La metodología aplicada fue la del “espacio abierto”. Esta metodología genera un proceso emergente, que invita a todos los participantes de un sistema dado (equipo, organización, comunidad) a construir y organizar su propia agenda, en torno a un tema central (o pregunta) que a todos convoca e interesa. Se fomenta un diálogo creativo, en que cada uno participa con libertad y con responsabilidad. Todo ocurre en una gran “plaza de mercado”, abierta y transparente, en la que libremente se negocian los subtemas y se conforman los distintos grupos que los llevarán adelante. Cada una de estas reuniones es luego reportada, publicándose sus principales conclusiones y sugerencias en un panel central especialmente montado. Al final, las acciones sugeridas por cada grupo pueden ser votadas en plenario, y en base a las prioridades allí establecidas, se logra crear una lista concordada de acciones con seguimiento programado.

Es un proceso de aventura, de energía positiva, conducido por la pasión y la responsabilidad, en el cual todos tienen ganas de participar, y todos los puntos de vista son

escuchados. El objetivo es levantar la sabiduría colectiva, al mismo tiempo de dejar a todos comprometidos con las respuestas a la pregunta.

Se trata de una metodología de carácter participativo, apreciativo y auto-organizado que ha sido utilizada en los 5 continentes en miles de casos para generar cambios alrededor de temas claves a nivel de empresa, gobierno y comunidad con resultados realmente asombrosos.

La realidad territorial dentro de cada cuenca, las actividades que la componen, y la temática que inquieta a los usuarios dentro de cada territorio, se reflejaron en los pensamientos que manifestaron sus actores, como respuesta a la pregunta formulada. A partir de dichos pensamientos se están recogiendo los elementos más característicos, para ser incorporados en el establecimiento de los escenarios.

Es necesario hacer notar que la ley a través de sus derechos de agua, no prioriza el uso de ninguna actividad sobre otra. Sin embargo, en épocas de sequía, el artículo 210 posibilita que los propios usuarios temporalmente puedan priorizar el uso del agua de modo distinto al que indican los derechos, de modo de aliviar los apremios de la escasez. También existe el recurso de la declaración de zona de escasez, en que la DGA puede permitir extracciones sin necesidad de que existan derechos. Por ello, en los escenarios futuros se pueden eliminar algunas restricciones que imponen los derechos, para evaluar los efectos de dicha acción sobre el sistema hídrico.

5.3 Generación de la lista de invitados

Los invitados a estos talleres fueron todos los actores relacionados con el tema de recursos hídricos. Es así como se cursaron invitaciones a las autoridades políticas, autoridades públicas y privadas de la Región y de cada provincia, dirigentes o ejecutivos de las organizaciones de usuarios, empresas de servicios y usuarios mineros, industrias relacionadas con el uso del agua y usuarios interesados en general.

El listado de invitados, validado con el mandante, se adjunta en el Anexo Capítulo 13.

5.4 Resultados de los talleres

Los talleres se estructuraron en torno a tres momentos principales:

- Apertura y construcción de la agenda.
- Sesiones de trabajo de grupo
- Círculo de cierre con los próximos pasos de cada uno.

En el Anexo Digital se entrega un reporte con todo el material que se generó en cada uno de los talleres. El reporte contiene:

a) una ficha técnica con las características del taller
b) la pregunta formulada

c) las actividades por temas, que incluyen las respuestas de los partícipes (preguntas convocantes), ordenadas según los temas que ellos mismos identificaron en el taller, y las conclusiones de las sesiones de trabajo en grupo
d) el listado de participantes.

6. Habilitación del modelo WEAP

6.1 Obtención del modelo

El modelo WEAP se puede descargar en forma gratuita desde el sitio www.weap21.org. Sin embargo, la versión que se descarga, sólo permite trabajar con sistemas muy pequeños, de un máximo de 3 nodos y 6 tramos, de manera de guardar los resultados para una siguiente sesión. Para modelos mayores, es posible abrirlos, trabajar con ellos, ver los resultados, pero, no se pueden guardar los cambios.

Por lo señalado, para esta consultoría fue necesario comprar la licencia de modelación, lo cual permite desarrollar un modelo, trabajar sobre él y guardar los cambios. Para uso comercial, el modelo tiene un costo de US$ 3.000. Para otro tipo de usos, por ejemplo académicos, el costo es más bajo.

El modelo WEAP trae tutoriales para su aprendizaje, que se encuentran en el mismo sitio web www.weap21.org. Además, trae un modelo de muestra, llamado Weaping River Basin, el cual sirve para aprender los aspectos más importantes de manera sencilla y didáctica.

6.2 Estructura del modelo

WEAP consta de cinco vistas principales, que se describen a continuación.

6.2.1 Esquema

Las herramientas de la vista esquemática tipo SIG permiten configurar fácil y rápidamente, la cuenca, mediante la capacidad de “arrastrar y soltar” para crear y posicionar los elementos del sistema. Se pueden agregar coberturas ArcView y otros archivos de tipo “vector” o “raster”, como capas de fondo. Pinchando cada uno de los elementos, se puede tener acceso rápido a los datos y a los resultados para cualquier elemento en el sistema.

Los elementos disponibles para configurar el sistema son los siguientes:

- Tramos de río (River)
- Canales (Diversion)
- Embalses (Reservoir)
- Acuíferos (Groundwater)
- Otras fuentes de agua (OtherSupply)
- Sitio de demanda puntual (DemandSite)
- Zona de riego o subcuenca (Catchment)
- Enlace de transmisión de Infiltración y Derrame (Runoff and Infiltration)
- Enlace de transmisión de caudal (Transmision Link)
- Planta de tratamiento de aguas servidas (WastewaterTreatmentPlant)
- Flujo de retorno (ReturnFlow)

- Central de pasada (Run-of-riverHydropower)
- Punto de requerimiento de caudal (FlowRequirement)
- Punto de control de caudal (estación fluviométrica) (Streamflow Gauge)

Adicionalmente, se puede tener acceso a todas las coberturas que se desee, incluyéndolas en una carpeta adjunta llamada SIG y cargándolas en la vista esquemática.

6.2.2 Datos

Se ingresan los datos dentro de una estructura que tiene los siguientes temas:

- Supuestos clave (Key Assumptions)
- Sitios de demanda y subcuencas (Catchments)
- Hidrología (Hydrology)
- Entregas y recursos (Supply and Resources)
- Calidad de aguas (WaterQuality)
- Otros supuestos (Otherassumptions)

El modelo cuenta con herramientas de construcción que permiten crear variables y establecer relaciones, usando expresiones matemáticas, y permiten el enlace dinámico con Excel para la importación y exportación de datos.

En el siguiente capítulo se detallan los datos de entrada con que se alimentó el modelo WEAP Elqui.

6.2.3 Resultados

El modelo tiene tres formas de desplegar resultados: en gráficos, tablas o en un mapa. Los formatos del gráfico y mapas permiten una visualización animada de los resultados a través del tiempo. Los resultados de las tablas pueden ser exportados a Excel. Los gráficos pueden ser guardados como favoritos. Desde los favoritos, se puede armar un conjunto de gráficos en el explotador de escenarios, que se describe a continuación.

6.2.4 Explorador de Escenarios

El explorador de escenarios permite agrupar una serie de gráficos representativos para revisar en forma rápida el comportamiento de algunas variables clave de un escenario corrido, o de varios escenarios juntos para compararlos. De esta forma, permite evaluar muy fácilmente los efectos que los cambios introducidos en la corrida, producen en los resultados.

6.2.5 Notas

Para cada variable es posible acceder a una pestaña que se llama Notas, en la cual el operador tiene la posibilidad de agregar comentarios, documentar los datos ingresados, establecer los supuestos asumidos, etc. Esta posibilidad es muy atractiva para el traspaso del modelo desde el modelador a los usuarios, pues se informan directamente de todos los supuestos y aspectos que el modelador estimó conveniente traspasar. La versión del modelo WEAP que se entrega con este informe, incluye las notas.

6.3 Apoyo externo al modelo

El modelo WEAP es capaz de buscar los elementos que requiere para los cálculos, desde cualquier ubicación dentro del computador que se le indique mediante una ruta. Puede buscar archivos de datos, y también puede buscar archivos de coberturas SIG, las que despliega en conjunto con el mapa topológico. De hecho, el mapa topológico se puede construir a partir de una cobertura SIG, para representar fielmente el drenaje y la ubicación relativa de los elementos modelados.

En el modelo Elqui hay dos carpetas de apoyo, que se han dejado dentro del área de trabajo llamada WEAP Areas /WEAP_Elqui_CRDP_2014, que se llaman Datos y SIG.

7. Extracción de resultados del modelo WEAP

7.1 Tipos de resultados del WEAP

El modelo WEAP entrega resultados, en este caso mensuales, de todas las variables que calcula. Los resultados también podrían ser diarios o anuales, dependiendo de los datos de entrada.

Los resultados se despliegan de tres formas diferentes, que son:

- Tablas (vienen los resultados de cada variable ordenados por filas)
- Gráficos (los resultados se grafican)
- Mapas (vienen los resultados mostrados directamente sobre el mapa de la cuenca, asociados al elemento correspondiente).

Todos los resultados son directamente exportables a planillas excel (Microsoft Inc.). Sin embargo, también se pueden previamente ordenar por tema, utilizando los favoritos de WEAP, luego estructurar un explorador de escenario con varios favoritos, y luego exportar los resultados, agrupados por tema, a planillas excel. En el próximo acápite se detalla la forma en que se exportaron los resultados para ser utilizados con el programa excel.

Los tipos de resultados están ordenados, interiormente, de acuerdo con los siguientes temas:

- Demanda
- Oferta (Supply and Resources)
- Catchments (subcuencas)

Los principales resultados disponibles se presentan en la Tabla 7.1 a continuación. Para mayor información sobre la herramienta de visualización de variables se puede consultar el manual de usuario del programa.

Tabla 7.1
Resultados que el modelo WEAP entrega por defecto

Categoría	Subcategoría	Variable	Elemento
Demanda		Demanda neta	Sitio de demanda
		Demanda bruta	Sitio de demanda
		Demanda suplida	Sitio de demanda
		Demanda no suplida	Sitio de demanda
		Cobertura de demanda (%)	Sitio de demanda
		Seguridad en cobertura de demanda (%)	Sitio de demanda
		Balance (entradas y salidas)	Sitio de demanda

		Requerimiento superficial (por ej caudal ecológico)	Tramo de río o canal
		Requerimiento superficial suplido	Tramo de río o canal
		Requerimiento superficial no suplido	Tramo de río o canal
		Cobertura de requerimiento superficial (%)	Tramo de río o canal
		Seguridad en cobertura requerimiento superficial (%)	Tramo de río o canal
Oferta y distribución		Entradas	Todos
		Salidas	Todos
	Sistema superficial	Caudal	Tramo de río o canal
		Diferencia con caudal observado	Estación fluviométrica
		Diferencia con caudal observado (%)	Estación fluviométrica
		Altura (opcional)	Tramo de río o canal
		Velocidad (opcional)	Tramo de río o canal
		Salida hacia sistema subterráneo	Tramo de río o canal
	Sistema subterráneo	Volumen almacenado	Acuífero
		Balance (entradas y salidas)	Acuífero
		Afloramientos	Acuífero
		Altura sobre nivel de equilibrio con sist. Superficial	Acuífero
		Salida hacia sistema superficial	Acuífero
		Resultados MODFLOW (opcional)	Acuífero
		Resultados MODPATH (opcional)	Acuífero
	Embalse	Volumen almacenado	Embalse
		Cota espejo de agua	Embalse
		Balance (entradas y salidas)	Embalse
		Evaporación	Embalse
		Coeficiente de rellenado	Embalse
		Generación hidroeléctrica (potencia, caudal)	Nodo
		Demanda hidroeléctrica (energía, caudal)	Nodo
		Demanda hidroeléctrica	Nodo

		suplida	
		Demanda hidroeléctrica no suplida	Nodo
		Cobertura de demanda hidroeléctrica (%)	Nodo
		Seguridad en cobertura de la demanda hidroeléctrica (%)	Nodo
	Conectores	Pasante	Conectores
		Entradas y salidas (considerando pérdidas)	Conectores
Cuencas y zonas de riego	Método FAO	Escorrentía	Cuencas o zonas de riego
		Precipitación observada	Cuencas o zonas de riego
		Salidas hacia sistema superficial y subterráneo	Cuencas o zonas de riego
		Evapotranspiración potencial	Cuencas o zonas de riego
		Evapotranspiración real (considera riego)	Cuencas o zonas de riego
		Déficit de evapotranspiración	Cuencas o zonas de riego
		Crecimiento de cultivo	Cuencas o zonas de riego
		Valor de mercado de cultivo	Cuencas o zonas de riego
	Método de humedad del suelo (SoilMoisture Method)	Balance (entradas y salidas) por tipo de cobertura de suelo	Cuencas o zonas de riego
		Nieve acumulada (equivalente en agua)	Cuencas o zonas de riego
		Nieve acumulada observada	Ruta de nieve
		Comparación nieve simulada y observada	Ruta de nieve
		Altura de sumersión (para riego sumergido: arroz)	Cuencas o zonas de riego
		Precipitación efectiva disponible para evapotranspiración (incluye derretimiento de nieve)	Cuencas o zonas de riego
		Área, temperatura, albedo, radiación máxima y neta	Cuencas o zonas de riego
		Humedad del suelo	Cuencas o zonas de riego
		Salida hacia sistema superficial (con o sin riego)	Cuencas o zonas de riego
		Salida hacia sistema subterráneo (con o sin riego)	Cuencas o zonas de riego
		Fracción de retornos de riego hacia sistema superficial	Cuencas o zonas de riego
		Fracción de retornos de riego hacia sistema subterráneo	Cuencas o zonas de riego

7.2 Preparación de los resultados y exportación a Excel

WEAP ofrece diferente formas de visualizar resultados.
La primera forma y la más directa consiste en utilizar la interfaz de visualización de resultados integrada en el modelo WEAP, disponible desde la pestaña "Results". A través de ésta, es posible visualizar resultados para todas las variables y para todos los objetos modelados. Al respecto, cabe hacer notar que se pueden obtener todos los resultados de cada elemento de modelación a lo largo del tiempo, y también, por otro lado, los resultados de todos los elementos en un determinado momento, por ejemplo, el caudal a lo largo de un río en un momento dado.

Por otro lado, el programa WEAP permite también exportar fácilmente resultados numéricos a formato .xls o .csv. Esto permite al usuario agrupar los resultados por tema en sets de resultados, y luego procesarlos con otro software, ya sea para graficarlos o para llevar a cabo cualquier tipo de análisis sobre las series temporales de valores generadas por el modelo.

Si bien la primera opción permite una visualización rápida de resultados específicos, en el presente estudio se eligió la segunda opción, porque permite verificar el efecto del cambio del valor de algún parámetro sobre un set de resultados en forma rápida, sintética y muy visual. Esta opción se ha utilizado para graficar en Excel todos los resultados más relevantes de un escenario, en forma automática, exportando desde WEAP la base de datos con todos los resultados, especialmente agrupados para tal efecto.

Los pasos a seguir para el traspaso de los resultados desde WEAP a Excel es el siguiente:

- el primer paso es generar los gráficos "Favoritos" dentro de la interfaz de resultados WEAP, ya que sólo se pueden exportar resultados que corresponden a algún gráfico favorito. Un gráfico favorito es un gráfico personalizado configurado por el usuario. Los favoritos se guardan utilizando la opción "Save Chart as Favorite…" del menú "Favorites" disponible en la pestaña "Results".

- el segundo paso consiste en juntar todos los gráficos favoritos que se quieren exportar, en uno o más exploradores de escenarios. En la pestaña "Scenario Explorer", menú "Explorer/Overview/Create Overview", se agregan los favoritos deseados haciendo click derecho en la ventana principal y "Add Chart". Con esta última acción se despliega el listado de todos los gráficos favoritos creados, los cuales se podrán seleccionar uno por uno. Cada explorador genera una planilla de resultados en Excel, por lo que se decidió armar 5 exploradores principales que corresponden a las 5 temáticas de visualización de resultados:

  Balance_AC: Balance de acuíferos
  Balance_ZR: Balance de zonas de riego
  Balance_CA: Balance de canales
  Calib_SUP: Calibración superficial
  Calib_SUB: Calibración subterránea

- luego de haber armado los exploradores de escenarios requeridos, se pueden cargar uno a uno y exportar a formato .xls o .csv utilizando los botones correspondientes disponibles en la barra a la derecha del explorador de escenarios.

- otra forma de exportar los resultados, pero en grupo, es llamando una rutina en Visual Basic: esta rutina se puede editar y ejecutar desde el editor de rutinas integrado a WEAP y disponible en el menú "Advanced/Scripting/Edit Script". Una vez guardada la rutina se puede llamar y activar sin abrir el editor desde el menú "Advanced/Scripting/Run". A continuación se muestra como ejemplo la rutina que exporta los resultados correspondientes al explorador de escenarios "Balance_AC" al archivo Excel Esc1_Balance_AC_Datos.xls

  Verbose = 0 'Desactiva los comentarios'
  Escenario="Esc1"
  RUTA="C:\Users\Damaris\Documents\WEAP Areas\Resultados\WEAP_Elqui_2014\" &Escenario& "\" &Escenario& "_Balance_AC_Datos.xls"
  LoadOverview("Balance_AC")
  ExportResults(RUTA)
  Verbose = 4 'Reactiva los comentarios'

  En este ejemplo y a continuación, consideraremos que Esc1 es el nombre del escenario.

  Los archivos Excel generados se guardan en un carpeta que lleva el mismo nombre, previamente generada por el usuario en la ubicación …/WEAP_Areas/Resultados/WEAP_Elqui_CRDP_2014/.

  Para fines de este estudio se generó una rutina única que exporta uno a uno los 5 exploradores de escenario. Esta rutina se llama WEAP2EXCEL. Para correrla es necesario abrir el editor de rutinas ("Advanced/Scripting/Edit Script"), luego abrir la rutina ("Open/Area Scripts/WEAP2EXCEL.vbs), actualizar la ruta correspondiente a la ubicación de la carpeta WEAP Areas, y verificar que el nombre del escenario esté bien puesto y que la carpeta que tenga que recibir los archivos, exista. Luego apretar el botón Run. Para evitar que la exportación se ponga muy lenta se aconseja cerrar el programa Excel durante este proceso.

- Después de haber corrido la rutina, se dispone de los 5 archivos siguientes en la carpeta de resultados:
  Esc1_Balance_AC_Datos.xls
  Esc1_Balance_ZR_Datos.xls
  Esc1_Balance_CA_Datos.xls
  Esc1_Calib_SUP_Datos.xls
  Esc1_Calib_SUB_Datos.xls

Estos archivos contienen los datos que alimentan las planillas con los resultados graficados. Estas planillas de gráficos deben ser copiadas y pegadas desde cualquier otra carpeta de resultados en la carpeta del escenario vigente, en nuestro caso …/WEAP_Areas/Resultados/WEAP_Elqui_CRDP_2014/Esc1:

Esc1_Balance_AC_Graficos.xls
Esc1_Balance_ZR_Graficos.xls
Esc1_Balance_CA_Graficos.xls
Esc1_Calib_SUP_Graficos.xls
Esc1_Calib_SUB_ Graficos.xls

- Para actualizar los gráficos de estas planillas, sólo es necesario abrir simultáneamente los archivos
  Esc1_Balance_AC_Datos.xls y
  Esc1_Balance_AC_Graficos.xls
  y copiar las columnas correspondientes al período que debe ser graficado, desde la única hoja del archivo Esc1_Balance_AC_Datos.xls, hacia la hoja DATOS del archivo Esc1_Balance_AC_Graficos.xls, luego se debe guardar el archivo Esc1_Balance_AC_Graficos.xls.

  Se repiten estos pasos para los otros 4 tipos de planillas.

Es importante mencionar aquí que cualquier cambio de topología puede eventualmente afectar el número de variables exportado por WEAP. Por lo tanto se podrían generar algunos problemas en los gráficos de resultados. En este caso, es necesario verificar la coherencia de la correspondencia entre los nombres de las variables WEAP y de las variables graficadas en la hoja LINK como primera cosa. Luego si el problema persiste, hay que evaluar la necesidad de actualizar algunos de los gráficos favoritos en WEAP para adecuarlos al cambio de topología.

Por esta razón es que se ha dejado en planillas en formato .csv en la carpeta Datos todos las variables más importantes para que el usuario pueda efectuar allí los cambios necesarios a la generación de nuevos sin afectar la topología del modelo y por lo tanto el traspaso de los resultados a Excel.

Por otra parte, una buena práctica consiste en verificar, en el momento de la exportación, que esté seleccionado el escenario deseado. Cabe mencionar éste aparecerá en la celda A1 de todas las planillas exportadas con la rutina WEAP2EXCEL y luego en la misma celda de la hoja Datos de todas las planillas de gráficos. Así es posible verificar fácilmente que la hoja Datos de todas las planillas de gráficos de un mismo escenario contenga los valores del escenario estudiado y no de un escenario anterior.

7.3 Metodología de análisis de resultados

Como ya se ha visto, el modelo entrega una gran cantidad de resultados como producto de los balances hídricos que realiza para cada elemento del sistema.

Es muy importante, por lo tanto, contar con una metodología de análisis de resultados. Por esta razón, en el estudio CAZALAC / RODHOS 2006 se desarrolló una forma de agrupar la gran cantidad de resultados que entregaba el modelo MAGIC, en grupos de variables relacionadas, para luego visualizarlas gráficamente, en diferentes planillas de análisis. Dichas planillas se perfeccionaron en el estudio del Plan Maestro para la gestión de recursos hídricos, Región de Coquimbo, 2013, donde nuevamente se aplicó el modelo MAGIC. Para el presente estudio, dichas planillas se completaron con los resultados adicionales que es posible obtener con WEAP, se agregaron algunas variables útiles de visualizar, y se reordenaron los resultados para permitir una mejor comprensión del sistema a través de la visualización de todas las variables.

De este modo, los diferentes grupos de resultados se asociaron en las planillas que se describen a continuación. Para cada escenario, se obtiene un set de planillas.
El primer escenario que se presenta, es el escenario de calibración. Para el análisis de este escenario se desarrolló un set de 5 planillas, que son las siguientes:

- Calib_SUP: Calibración superficial. Contiene todas las comparaciones entre los valores simulados y los observados, para el recurso superficial, vale decir, estaciones fluviométricas y embalses.
- Calib_SUB: Calibración subterránea. Contiene las comparaciones entre volumen simulado traducido a nivel estático, y el nivel medido en los acuíferos con control de niveles.
- Balance_ZR: Contiene todos los flujos relacionados con todas las zonas de riego, resultantes para un escenario.
- Balance_AC: Contiene todas las variables relacionadas con todos los acuíferos, resultantes para un escenario.
- Balance_CA: Contiene todos los flujos relacionados con todos los canales definidos, resultantes de un escenario.

Para identificar el escenario, a cada una de las planillas se le antepone el nombre del escenario corrido.

7.3.1 Planilla Calib_SUP

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración superficial, esto es, los datos observados en las estaciones existentes y los datos simulados en los mismos puntos, dentro de un mismo gráfico para cada estación o punto de control. Como se ha señalado, esta planilla se alimenta a partir de un set de datos que es exportado desde WEAP hacia la planilla Calib_SUP_Datos.Dentro de la planilla, automáticamente se generan los gráficos en función de los nuevos datos que recibe.

Los gráficos se presentan en el análisis del escenario de calibración.

7.3.2 Planilla Calib_SUB

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración subterránea. Se alimenta a partir de un set de datos que es exportado desde WEAP hacia la planilla Calib_SUB_Datos, que contiene todos los resultados de niveles observados y niveles simulados. En la planilla Calib_SUB_Gráficos, los volúmenes simulados son transformados a nivel estático, para poder ser comparados con los niveles observados en los acuíferos en los cuales hay algún pozo de observación de la red de la DGA.

Los gráficos se presentan en el análisis del escenario de calibración.

7.3.3 Planilla Balance_ZR

Esta planilla contiene una hoja para cada zona de riego, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo. Para cada zona de riego se encuentra la siguiente información:

- Caudal demandado a nivel raíz
- Caudal demandado a nivel de zona de riego (incluye las ineficiencias del método de riego)
- Caudal entregado a la zona de riego por canales
- Caudal entregado a la zona de riego por pozos
- Caudal entregado a la zona de riego por precipitaciones
- Caudal efectivamente recibido por la zona de riego
- Caudal efectivamente evapotranspirado a nivel raíz
- Caudal percolado hacia el acuífero subyacente
- Caudal derramado o de retorno hacia el río
- Porcentaje de demanda suplida, entendido como el caudal efectivamente recibido por cada zona de riego, sobre el caudal demandado por la zona de riego, expresado como %.

Una vez que estos resultados han sido introducidos en la planilla, automáticamente se despliegan seis tipos de gráficos:

a) Demanda y entrega

En este gráfico se compara visualmente los siguientes caudales, para todo el período de análisis:

- Demanda a nivel raíz
- Demanda de la zona de riego
- Caudal recibido total por la zona de riego
- Evapotranspiración efectiva

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

b) Detalle de las fuentes

En este gráfico se muestra:
- El caudal total recibido por la zona de riego
- La parte correspondiente a la precipitación
- La parte proveniente de canales
- La parte proveniente de pozos (aguas subterráneas)

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

c) Detalle de la entrega por canales

En este gráfico se muestra:
- El caudal demandado por la zona de riego
- El caudal total recibido por la zona de riego
- El caudal recibido sólo por canales
- El caudal recibido individualmente desde cada canal aportante

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

d) Distribución de los caudales entregados

En este gráfico se muestra el destino del agua recibida en cada zona de riego.
- El caudal total recibido
- El caudal evapotranspirado
- El caudal devuelto al río por derrames
- El caudal percolado hacia el acuífero subyacente

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

e) Porcentaje de demanda suplida

En este gráfico, se muestra para cada zona de riego:
- La demanda total de la zona de riego
- La demanda suplida de la zona de riego
- La demanda suplida expresada como porcentaje.

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

f) Porcentaje de demanda suplida en cada subzona de riego

Finalmente, en este gráfico se muestra el porcentaje de demanda suplida para los sectores de cultivos anuales y frutales de cada zona de riego, por separado. El gráfico contiene:

- La demanda suplida expresada como porcentaje, de cada subzona ANU
- La demanda suplida expresada como porcentaje, de cada subzona FRU.

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

De esta forma, se configura un set de 6 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con una determinada zona de riego. Los gráficos resultantes más representativos de cada situación, se presentan en el análisis de cada escenario, tanto de calibración como de operación futura.

7.3.4 Planilla Balance_AC

Esta planilla contiene una hoja para cada acuífero, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, relacionados con el acuífero. Para cada acuífero se encuentra la siguiente información:

- Caudal percolado desde canales
- Caudal percolado desde cauces
- Caudal percolado desde zonas de riego
- Total de recarga disponible
- Caudal de afloramiento
- Total de recarga neta
- Caudal extraído por la vegetación ripariana
- Caudal efectivo bombeado para riego (resultado de la simulación)
- Caudal efectivo bombeado para agua potable (dato)
- Caudal efectivo bombeado para uso minero (dato)
- Caudal efectivo bombeado para uso industrial (dato)
- Caudal efectivo bombeado para restitucvión al río (dato, sólo Choapa)
- Caudal efectivo bombeado para entrega a los canales (resultado, sólo Choapa)
- Evolución del volumen del acuífero en el tiempo

Una vez que estos resultados han sido introducidos en la planilla, automáticamente se despliegan 4 tipos de gráficos:

a) Percolaciones y recarga disponible

En este gráfico se compara visualmente los siguientes caudales, para todo el período de análisis:

- Percolaciones desde canales
- Percolaciones desde cauces
- Percolaciones desde zonas de riego
- Percolación Total o Recarga disponible

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

b) Recarga disponible y recarga neta

En este gráfico se muestra:
- Recarga disponible
- Caudal de afloramiento
- Recarga neta

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

c) Bombeos

En este gráfico se muestran los bombeos para los diferentes usos. Al respecto, es necesario señalar que el bombeo de todos los usos salvo riego, es el caudal efectivo demandado, el cual no tiene otra fuente para suplirse que el bombeo. Por esa razón, el bombeo coincide con la demanda efectiva ingresada como dato. Para el caso del riego, la fuente subterránea es de prioridad secundaria en relación con el agua superficial aportada por los canales, por lo que el bombeo de riego es el resultado del balance entre requerimientos y aportes desde otras fuentes.

El gráfico muestra:
- Caudal extraído por vegetación ripariana
- Bombeo para riego
- Bombeo para agua potable
- Bombeo para uso minero
- Bombeo para uso industrial
- Bombeo para restitución al río por pozos Minera Los Pelambres (dato)
- Bombeo para entrega a canales cuando no se cumple desmarque deseado (resultado)
- Cantidad total bombeada

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

d) Evolución del volumen almacenado

En este gráfico se muestra el volumen almacenado dentro del acuífero a lo largo del período de análisis. En la leyenda se incluye el valor promedio del período.

De esta forma, se configura un set de 4 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado acuífero. Los gráficos resultantes, o los más representativos de cada situación, se muestran en el análisis de cada escenario, ya sea de calibración como escenario de operación futura.

7.3.5 Planilla Balance_CA

Esta planilla contiene todos los resultados que el WEAP genera en relación con los canales de riego, además de algunas variables calculadas a partir de dichos datos. Para cada canal se encuentra en la planilla la siguiente información:

- Caudal que le corresponde por desmarque
- Caudal efectivamente captado (puede haber restricción por capacidad, o falla por falta de recurso)
- Caudal de pérdida según porcentaje de eficiencia ingresado
- Caudal entregado a cada zona de riego
- Caudal sobrante o de devolución (que existe debido a que lo que el canal capta no es estrictamente la demanda, sino que el desmarque)
- Porcentaje de cumplimiento del desmarque
- Porcentaje de cumplimiento del desmarque, dada la restricción de la capacidad.

Una vez que los resultados del WEAP han sido introducidos en la planilla, automáticamente se despliegan los siguientes 3 tipos de gráficos.

a) Desmarque y caudales conducidos

Este gráfico muestra el detalle de los caudales a lo largo del canal:
- Caudal que le corresponde al canal por desmarque
- Caudal efectivamente captado
- Caudal después de la o las pérdidas
- Caudal después de la o las entregas para riego
- Caudal sobrante o de devolución al río
- Porcentaje de cumplimiento del desmarque
- Porcentaje de cumplimiento del desmarque dada la limitación de capacidad

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

b) Balance global del canal

Este gráfico muestra:
- Caudal captado por el canal
- Caudal de pérdidas
- Caudal entregado a zona(s) de riego
- Caudal de devolución

En la leyenda de cada variable, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

c) Caudales entregados por zona de riego

Este gráfico muestra el caudal entregado a cada una de las zonas de riego que este canal surte. En la leyenda de cada entrega, además, se ha incluido el promedio para el período de análisis.

De esta forma, se configura un set de 3 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado canal. Los gráficos resultantes, o los más representativos de cada situación, se muestran en el análisis de cada escenario, ya sea de calibración como escenario de operación futura.

8. Modelo WEAP_Elqui_CRDP_2014

En la primera etapa del estudio se desarrolló el modelo WEAP_Elqui_CRDP_2014 o WEAP-Elqui. Éste se configuró a partir de la información generada para el modelo MAGIC-Elqui, desarrollado en el estudio CAZALAC/RODHOS de 2006, y aplicado nuevamente en el estudio del Plan Maestro de Recursos Hídricos de 2013.

El modelo MAGIC-Elqui fue el primer modelo MAGIC completo que se desarrolló en Chile, y como tal, contenía diversos aspectos que desde un punto de vista de modelamiento podían ser mejorados, en especial al usar una herramienta más versátil como el modelo WEAP, los que se detallan a continuación.

8.1 Datos de entrada Modelo WEAP-Elqui

8.1.1 Topología

Lo primero que fue ingresado al modelo fue la topología. Ésta se basó preliminarmente en el modelo MAGIC, desarrollado en 2006 por CAZALAC / RODHOS, en el estudio "Aplicación de metodologías para la determinación de la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso: Región de Coquimbo".

No obstante lo señalado, se revisó integralmente la topología del MAGIC, y se mejoraron diversos aspectos, que habían mostrado no ser óptimos en el modelo anterior. Entre ellos, se revisó la sectorización de las zonas de riego, la agregación de canales y la definición de acuíferos. Además, se volvió a actualizar la información de las zonas de cultivo y de los canales, quedando pendiente la actualización de las características de los acuíferos, a la espera de la información del estudio hidrogeológico de la CORFO.

Es importante señalar que en la topología se mantuvo una total coherencia en la nomenclatura de zonas de riego y acuíferos. El nombre indica la ubicación y el subsector de cada zona de riego y acuífero. La numeración es coincidente.

En cuanto a los canales, la nomenclatura incluye el sector donde se ubica la bocatoma del canal. La numeración va desde aguas arriba hacia aguas abajo.

A continuación se detallan los aspectos relativos a los elementos topológicos del modelo.

- **Tramos de río**

Se trazó la red de drenaje principal de la cuenca, sobre una base SIG, marcando el río Elqui y los afluentes más importantes a ser modelados. Las cuencas de cabecera o intermedias aportantes en general se representan por aportes de caudal que van generando nodos en las confluencias. Los tramos de río se generan automáticamente al insertar nodos de entrada o de salida sobre el río.

- **Zona de riego**

Se identificaron zonas de riego de acuerdo con un criterio de ubicación, y de fuentes desde las que son abastecidas. Se partió de las zonas de riego definidas en el modelo MAGIC, mejoradas en función de la experiencia obtenida con dicho modelo. En general, se subdividieron las zonas grandes, obteniéndose más zonas de riego que en el MAGIC. También se modificó la nomenclatura, de modo que el nombre indicara claramente la ubicación de las zonas de riego. Para facilitar la asignación del recurso hídrico, en algunos sectores donde la prioridad la tienen los cultivos permanentes, se separó cada zona de riego en una parte frutal (FRU) y otra parte anual (ANU). Las zonas de riego definidas en el presente estudio se presentan en la Tabla 8.1 adjunta. Es necesario precisar que cada zona de riego tiene una componente con cultivos anuales y otra con cultivos frutales.

Tabla 8.1
Zonas de riego y su ubicación

ZR WEAP	Ubicación
ZR_TUR_01	Huanta-Calvario
ZR_CAL_01	Afluente al Turbio
ZR_TUR_02	Calvario-Chapilca
ZR_TUR_03	Las Mercedes-Varillar-Rivadavia
ZR_COC_01	Cochiguaz sobre Estación El Peñón
ZR_COC_02	Cochiguaz bajo Estación El Peñón
ZR_EDE_01	Estero Derecho sobre Alcohuaz
ZR_EDE_02	Estero Derecho bajo Alcohuaz
ZR_CLA_01	Claro sobre Paihuano
ZR_PAI_01	Quebrada Paihuano
ZR_CLA_02	Claro bajo Paihuano
ZR_ELQ_01	Elqui sobre Andacollito
ZR_ELQ_02	Andacollito-Diaguitas-El Arenal-Calingasta-San Isidro-Vicuña-Peralillo-La Compañía
ZR_ELQ_03	El Tambo-San Carlos
ZR_ELQ_04	Puclaro-Elqui en Almendral
ZR_ELQ_05	El Molle-Polla Alta
ZR_ELQ_06	Marquesa-Pelícana-Quebrada de Talca-Las Rojas-Punta Piedra
ZR_ELQ_07	El Hinojal-El Rosario-Gabriela Mistral-Altovalsol
ZR_GRA_01	Santa Gracia
ZR_ELQ_08	Monardes-Bellavista-Ceres-Coquimbito-Islón
ZR_COS_01	Elqui en La Serena-Desembocadura
ZR_COS_02	Vegas Norte
ZR_COS_03	Vegas Sur
ZR_CUL_01	Culebrón

En la Figura 8.1 se muestra la ubicación de las zonas de riego definidas. Se observa que hay tres tipos de zonas de riego:

- zonas definidas por CIREN en su Catastro de Frutales 2011, y que corresponden a frutales, excluyendo vid vinícola y vid de pisco (ZR_ciren_2011)
- zonas definidas en el estudio CAZALAC/RODHOS 2006, que corresponden a cultivos anuales, incluyendo vid vinícola y vid de pisco (ZR_no_ciren)
- zonas aparecidas recientemente, identificadas en el presente estudio, que en general son cultivos frutales ubicados desde el embalse Puclaro hacia aguas arriba, y cultivos anuales hacia aguas abajo (ZR_no_ciren_nueva_2014).

En la siguiente Figura 8.2 se muestra la división en zonas de riego.

Figura 8.1
Ubicación de zonas de riego modeladas cuenca Elqui

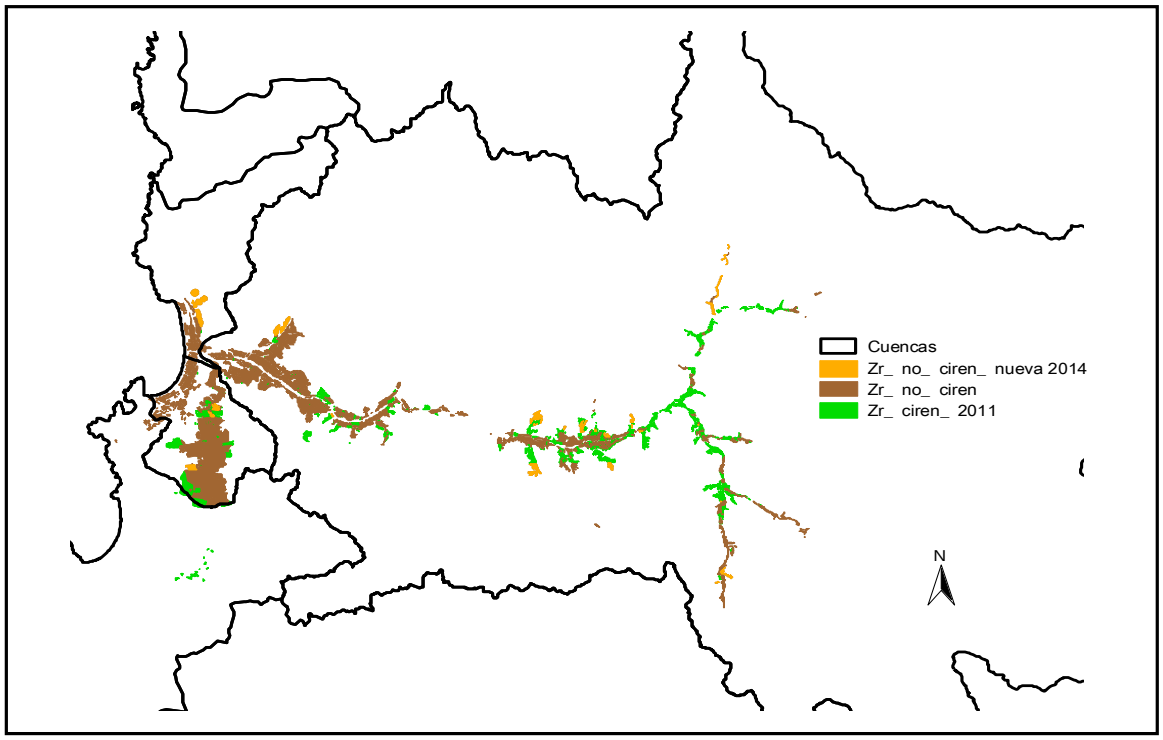
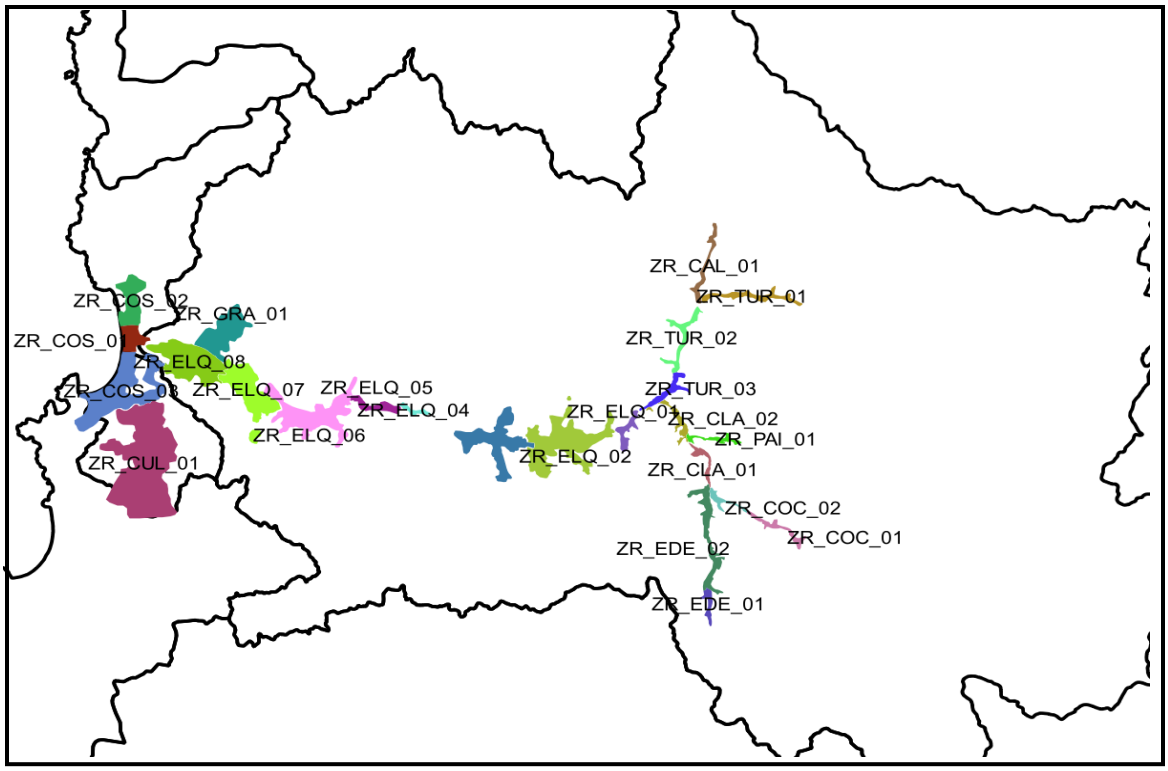


Figura 8.2
Identificación de zonas de riego



- **Canales**

Para la identificación de los canales a modelar con WEAP, se partió del listado de canales individuales de la Junta de Vigilancia del río Elqui, donde cada canal aparece con sus acciones brutas y acciones netas (que son las que realmente se reparten).

Los canales se agregaron en función de su recorrido y de las zonas que riegan. Algunos canales tienen derivados, los cuales también quedaron representados en la modelación.

En la siguiente Tabla 8.2 se presentan todos los canales modelados, y la forma en que fueron agregados para la modelación, con sus acciones y capacidades. Esta forma de agregar los canales es diferente a la que se usó en el MAGIC, debido fundamentalmente a la diferente definición de zonas de riego, y a la posibilidad de definir más nodos que tiene el WEAP en relación con el MAGIC.

Vale señalar que las capacidades se obtuvieron del estudio de Catastro de Bocatomas Conic-BF 2002, en que es una tónica el hecho de que las capacidades sean inferiores al derecho, representado por el total de acciones desmarcadas al 100%. Excepciones son los canales Bellavista y Herradura, que tienen capacidad de porteo del total de sus acciones desmarcadas al 100%.

Tabla 8.2
Canales para modelación con WEAP

Sector Río	Código Canal	Nombre Canal	Acciones Netas	Acciones Brutas	Trasladado	Acciones WEAP	Capacidad	Eficiencia
							m^3/s	
Turbio	CA_TUR_01	ANDREA SEGUNDO	13	13		13	0.010	0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION AGRELQUI	35.33	35.33		35.33		0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION ALTAMIRA	44.19	44.19		44.19		0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION CALIFORNIA	9	9		9	0.005	0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION LAS PAPAS	15	15		15	0.010	0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION SAN FRANCISCO	11	11		11	0.011	0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION SANTA MARIA	19.77	19.77		19.77		0.85
Turbio	CA_TUR_01	CAPTACION VALLE ALTO	43.23	43.23		43.23		0.85
Turbio	CA_TUR_01	JACOBA CORTES	46.54	46.54		46.54	0.077	0.85
Turbio	CA_TUR_01	LA DE LOS PINTO	46.56	46.56		46.56	0.037	0.85
Turbio	CA_TUR_01	LECHUZA PRIMERO	38.18	38.18	-38.18	0		0.85
Turbio	CA_TUR_01	LECHUZA SEGUNDO	22.75	22.75	-22.75	0	0.023	0.85
Turbio	CA_TUR_01	LECHUZA TERCERO	9.77	9.77		9.77	0.010	0.85
Turbio	CA_TUR_01	SAMUEL RODRIGUEZ	12.01	12.01		12.01	0.020	0.85
Turbio	CA_TUR_02	BARRAZA	52.3	52.3		52.3	0.052	0.8
Turbio	CA_TUR_02	CAPTACION LA PLATA	43	43		43	0.067	0.8
Turbio	CA_TUR_02	CAPTACION LOS HORNOS	51.18	51.18		51.18	0.199	0.8
Turbio	CA_TUR_02	CHAPILCA	212.15	212.15		212.15	0.162	0.8
Turbio	CA_TUR_02	LAS MERCEDES	139.73	139.73		139.73	0.122	0.8
Turbio	CA_TUR_02	TAPALCA	77.3	77.3		77.3	**0.062**	0.8
Turbio	CA_TUR_02	TOTORALILLO	190.01	190.01		190.01	**0.153**	0.8
Turbio	CA_TUR_03	MOLINO	37.8	37.8		37.8	**0.021**	0.77
Turbio	CA_TUR_03	VARILLAR ALTO	275.38	275.38		275.38	0.140	0.77
Turbio	CA_TUR_03	VARILLAR BAJO	161.25	161.25		161.25	**0.090**	0.77
Turbio	CA_TUR_04	CAPTACION CASA ROSADA	**69.28**	**75**	-69.28	0	0.069	0.77
Turbio	CA_TUR_04	SAN JOSE	299.86	299.86		299.86	0.240	0.77
Turbio	CA_TUR_04	TOMA DE IGLESIAS	169.58	169.58	-169.58	0	0.140	0.77
Cochiguaz	CA_COC_01	ALFALFA ALTO, CORTADERA	43.72	43.72		43.72	0.020	0.73

Cochiguaz	CA_COC_01	ALFALFA BAJO - CHURCAL	43.72	43.72		43.72		0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	CORDILLERITA, ZANJEADO	64.49	64.49		64.49	0.032	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	CORTADERA ALTA - CORTADERAL	48.51	48.51		48.51	0.115	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	CORTADERA BAJA, VEGA HUERTA	48.51	48.51		48.51	0.024	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	EMPEDRADO, CUESTA	68.18	68.18		68.18	0.034	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	ÑIPAS, TRANCA	87.42	87.42		87.42	0.044	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	PANGUE	130.15	130.15		130.15	0.039	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	PEÑON, ALGARROBAL	52.46	52.46		52.46	0.032	0.73
Cochiguaz	CA_COC_01	TRAPICHE	21.86	21.86		21.86	0.018	0.73
Cochiguaz	CA_COC_02	AJIAL BAJO, MOLINO	87.42	87.42		87.42	0.052	0.73
Cochiguaz	CA_COC_02	FRAILE - CHAÑARES, TEMBLADOR, PLAYAS, RODRIGONES	150.75	150.75		150.75	0.090	0.73
Cochiguaz	CA_COC_02	HIGUERAS	37.1	37.1		37.1	0.015	0.73
Cochiguaz	CA_COC_02	HUECUDO, AJIAL ALTO	87.42	87.42	39.13	126.55	0.053	0.73
Cochiguaz	CA_COC_02	JUNTA, MAL PASO	65.57	65.57	-65.57	0		0.73
Estero Derecho	CA_EDE_01	HUALTATA	73.24	73.24		73.24	73.24	0.7
Estero Derecho	CA_EDE_01	PANGUE	262.46	262.46		262.46	262.46	0.7
Estero Derecho	CA_EDE_01	SAN JUAN	76.30	76.30		76.30	76.30	0.7
Estero Derecho	CA_EDE_01	ARENAL	134.30	134.30		134.30	134.30	0.7
Estero Derecho	CA_EDE_02	PABELLÓN	309.22	309.22		309.22	309.22	0.95
Estero Derecho	CA_EDE_03	MAQUI	54.92	54.92		54.92	54.92	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	ORTIGA	56.46	56.46		56.46	56.46	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	MANGA	eventual	eventual				0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	HORCÓN	9.16	9.16		9.16	9.16	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	PLACETAS	236.52	236.52		236.52	236.52	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	VIGUITA	18.30	18.30		18.30	18.30	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	VIGA	115.96	115.96		115.96	115.96	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	CUESTA	421.14	421.14		421.14	421.14	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	GREDA	268.56	268.56		268.56	268.56	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	EL MEDIO	85.44	85.44		85.44	85.44	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	MOLINO	144.56	144.56		144.56	144.56	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	JARILLA	335.70	335.70		335.70	335.70	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	ROJAS PINTO	77.38	77.38		77.38	77.38	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	POZO	163.26	163.26		163.26	163.26	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	CIENAGA	eventual	eventual				0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	FINCA	51.76	51.76		51.76	51.76	0.85
Estero Derecho	CA_EDE_03	ASIENTO	148.78	148.78		148.78	148.78	0.85
Claro Montegrande	CA_CLA_01	ALAMO, LUCUMO, VIÑA	280.34	280.34		280.34	0.424	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	BUENA VISTA	89.26	89.26		89.26	0.045	0.68

Claro Montegrande	CA_CLA_01	CARMEN RODRIGUEZ	79.48	79.48		79.48	0.048	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	ESTRECHURA	51.78	51.78		51.78	0.031	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	FRANCISCO ROJAS	89.26	89.26		89.26	0.036	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	LA PALMA	116.19	116.19		116.19	0.046	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	LOS PONCES	97.31	97.31		97.31	0.049	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	MANANTIAL	51.78	51.78		51.78	0.067	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	QUE HABITA EL MONTE	16.37	16.37		16.37	0.016	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	RAMON MERIÑO	22.19	22.19	-22.19	0		0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	SAN FRANCISCO	89.26	89.26		89.26	0.132	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	SAN GUILLERMO ALTO Y BAJO; QUINTA DE OLEGARIO ALBA	179.58	179.58		179.58	0.319	0.68
Claro Montegrande	CA_CLA_01	TOTORAL	39.13	39.13	-39.13	0	0.039	0.68
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	GRILLOS	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	CEPILLO	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	VARILLAR	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	DEL MEDIO ALTO	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	PARCAL	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	MUSUCO	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	LA VEGA REDONDA	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	LAS MOLLACAS	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	MAJADA	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	DEL MEDIO BAJO	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	STA ELENA	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	ESTANQUE ELQUI	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	LO VARGAS	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	PERALTA	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Quebrada Paihuano	CA_PAI_01	RiNCONADA	S/I	S/I		S/I	S/I	0.8
Claro Paihuano	CA_CLA_02	LOS AGUIRRE LAS YEGUAS	344.17	344.17		344.17	0.172	0.73
Claro Paihuano	CA_CLA_03	BAJADA, LA BAJADA	25	25		25	0.010	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	CHAÑARES	68.7	68.7	4.67	73.37	0.056	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	CULEBRON	88.23	88.23		88.23	0.035	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	EL OLIVO	53.59	53.59		53.59	0.047	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	LAS CAÑAS	198.71	198.71		198.71	0.099	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	LAS JUNTAS	22.26	22.26		22.26	0.009	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	MANZANO	4.67	4.67	-4.67	0	0.112	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	MOLINO	222.46	222.46		222.46	0.117	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	PUENTE	77.87	77.87		77.87	0.107	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	PUENTE DE PIEDRA	79.49	79.49		79.49		0.77

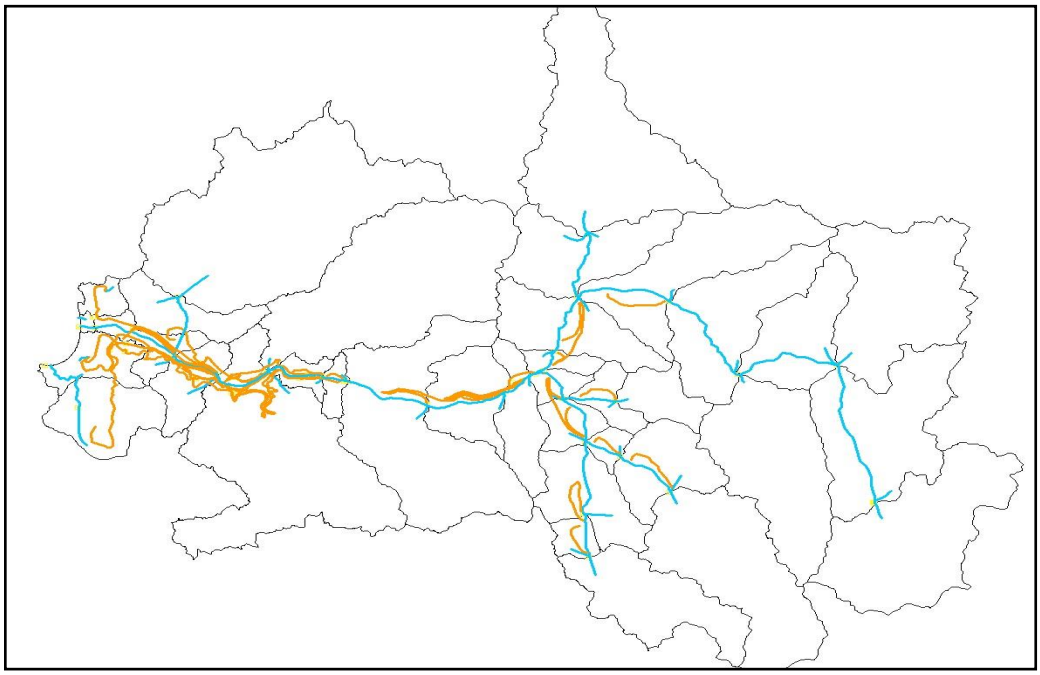
Claro Paihuano	CA_CLA_03	RIO CLARO	49.16	49.16		49.16	0.025	0.77
Claro Paihuano	CA_CLA_03	SANTA GESTRUDIS PRIMERO	**191.3**	**201.79**		191.3	0.057	0.77
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_01	ALGARROBAL	75	75		75	0.052	0.71
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_01	CAPTACION LAS CUEVAS	18.5	18.5		18.5	0.004	0.71
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_01	PEDRO CERDA	123.12	123.12		123.12	0.074	0.71
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_02	MIRAFLORES	498.09	498.09		498.09	0.249	0.75
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_03	ALTO CAMPANA	79.22	79.22		79.22	0.048	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_03	PIEDRA AZUL	76.22	76.22		76.22	0.046	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_04	ALTO PERALILLO	**821.28**	**983.14**	69.28	890.56	0.541	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_04	PUYALLES	97.13	97.13		97.13	0.061	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	BARRANCA	**306.7**	**341.8**		306.7	0.205	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	CAÑAS	40.56	40.56		40.56	0.041	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	CAPTACION LOS LOROS	216.66	216.66		216.66		0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	CAPTACION SANTA ELENA	43.32	43.32		43.32		0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	COMPAÑIA	**416.69**	**479.53**		416.69	0.293	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	DIAGUITAS	95.45	95.45		95.45	0.076	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	DIAGUITAS - SAN ISIDRO	314.97	314.97	38.18	353.15	0.189	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	ESPANTA	160.83	160.83		160.83	0.097	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	MOLINO	57.27	57.27		57.27	0.057	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	OLIVO	38.18	38.18	-38.18	0		0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	PENCAS	187.07	187.07		187.07	0.187	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	PUENTE DE CHULO	31.97	31.97		31.97	0.032	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	PUNTILLA	87.22	87.22		87.22	0.080	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_05	RINCON	125.99	125.99		125.99	0.063	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_06	HIERRO VIEJO, HUANCARA	**144.85**	**148.35**		144.8489	**0.081**	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_06	MOLINO DE MIRANDA	**88.77**	**90.92**		88.77429	**0.050**	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_06	MOLINO DE RIVERA	**64.12**	**65.67**		64.12019	**0.036**	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_06	VILLA O PARTERA	**264.23**	**270.62**		264.2334	**0.148**	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	CAPTACION SAN ISIDRO	196.47	196.47		196.47	0.189	0.72

Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	EL TAMBITO	9	9		9		0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	LA CAMPANA	118.83	118.83		118.83	0.143	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	LOS ROMEROS	207.59	207.59		207.59	0.125	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	LUCAS MORAN	31.97	31.97		31.97	0.032	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	PROHENS	46.49	46.49		46.49	0.256	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	SAN CARLOS, LA HIGUERA	264.52	264.52		264.52	0.238	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	TOMA DEL MEDIO	161.3	161.3		161.3	0.161	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	TOMA DEL TAMBO	205.21	205.21		205.21	0.123	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_07	YUNGAY	**66.54**	**113.07**		66.54	0.165	0.72
Elqui Alto o Vicuña	CA_ELQ_08	AGUA DE PANGUE	36.34	36.34		36.34	0.036	0.79
Elqui 2ª Sección	NO	GUALLIGUAICA	92.6	92.6	-92.6	0		
Elqui 2ª Sección	NO	MANCHIGÜE	62.92	62.92	-62.92	0		
Elqui 2ª Sección	NO	POLVADA	8.71	8.71	-8.71	0		
Elqui 2ª Sección	NO	PUNTA AZUL	44.28	44.28	-44.28	0		
Elqui 2ª Sección	CA_ELQ_08	POROTAL	26.3	26.3		26.3	0.026	0.79
Elqui 2ª Sección	CA_ELQ_08	PUCLARO I Y II	38.39	38.39		38.39		0.79
Elqui 2ª Sección	CA_ELQ_10	QUISCAL	34.6	34.6		34.6	0.021	0.75
Elqui 2ª Sección	CA_ELQ_09	MAITEN ALTO O DELIRIO	**520.61**	**529.05**		520.61	0.361	0.8
Elqui 2ª Sección	CA_ELQ_11	CASUTO	26.3	26.3		26.3	0.026	0.8
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_11	MARQUESA	**353.19**	**365.42**		353.19	0.212	0.8
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_12	LA CALERA	**702.38**	**704.98**		702.38	0.469	0.75
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_13	CUTUN Y ROJAS	399.03	399.03		399.03	0.239	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_13	SAN JOSE DE BELLAVISTA	34.76	34.76		34.76	0.037	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_13	TITON	175.65	175.65		175.65	0.141	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_14	HINOJAL	294.37	294.37		294.37	0.177	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_15	EL ROMERO	1115.86	1115.86		1115.86	0.680	0.75
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_15	SAN PEDRO NOLASCO	816.84	816.84		816.84	0.826	0.75
Elqui 3ª Sección	CP08_ESSCO	Canal ESSCO S.A Capt Puntual	899.16	899.16		1047	1.000	1
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_16	BELLAVISTA	**3677.04**	**3888.45**		3677.04	**4.000**	0.8
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_17	ALGARROBITO, QUILACAN, ARACENA	177.64	177.64	-177.64	0	0.474	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_17	SATURNO	348.28	348.28		348.28	0.226	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_18	ALTOVALSOL	392.03	392.03		392.03	0.200	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_19	LA PAMPA	583.48	583.48		583.48	0.292	0.8
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_20	COQUIMBITO	399.03	399.03		399.03	0.239	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_20	CULCATAN	200.07	200.07		200.07	0.130	0.72
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_21	HERRADURA	**1064.06**	**1072.31**	177.64	1241.7	**1.400**	0.8
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_22	TEJAR	165.17	165.17	-165.17	0	0.193	no

		PRIMERO, TEJAR SEGUNDO						existe
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_23	CALLEJAS	212.01	212.01	-212.01	0	0.212	no existe
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_24	CRUZ DEL MOLINO	134.76	134.76		134.76	1.196	no existe
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_24	LAMBERT	134.76	134.76	-134.76	0	0.253	no existe
Elqui 3ª Sección	CA_ELQ_26	JUAN SOLDADO O JARAMILLO	360			360	0.360	0.7
		ACCIONES TRASLADAS A OTRO CANAL	JV_ELQUI_2005	JV_ELQUI_2014			CATASTRO_BT_CONIC_2002	
		ACCIONES DEVUELTAS AL RIO, BENEFICIAN EL SISTEMA					**Calculado**	
		NO RIEGAN MAS, CAPTABAN RECUPERACIONES					**Modificado**	

En la siguiente Figura 8.3 se muestran los canales modelados con WEAP. Los canales que convergen al final de su trayecto, llegan a una misma zona de riego.

Figura 8.3
Canales modelados



- **Embalses**

Se agregaron los dos embalses, La Laguna y Puclaro, los cuales se describen dentro del modelo WEAP.

- **Acuíferos**

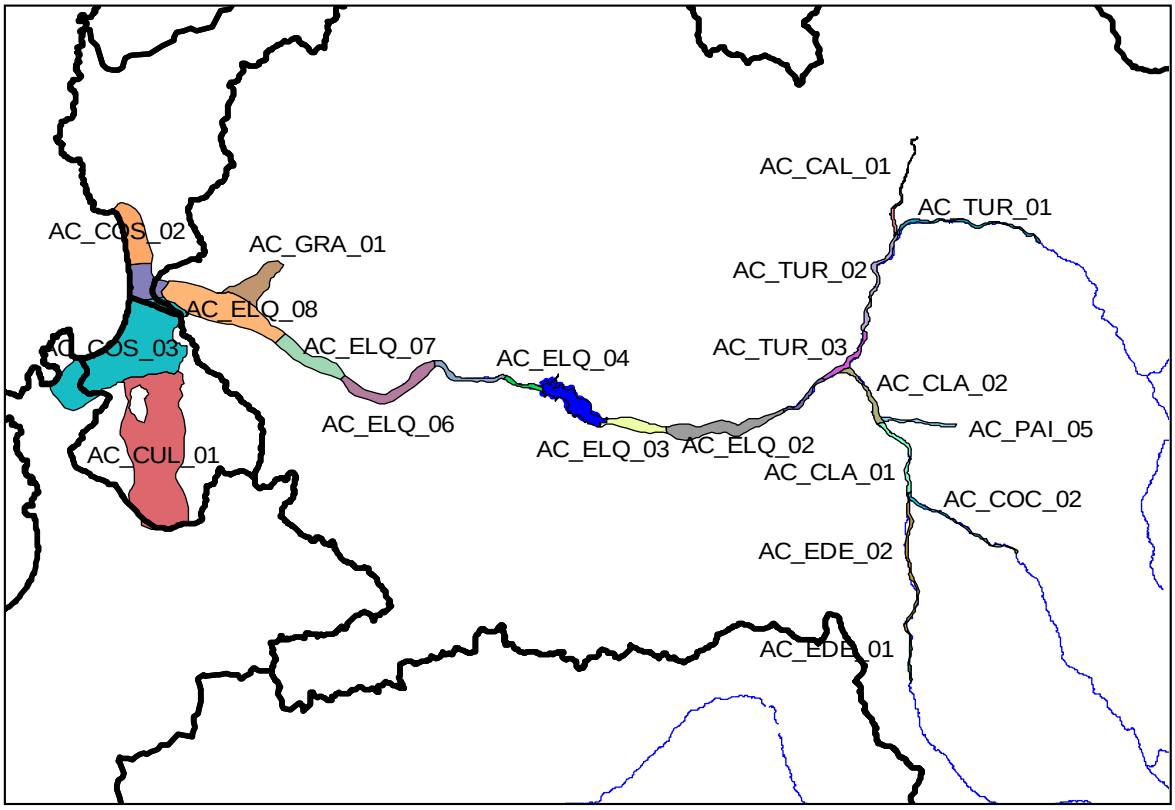
La definición de acuíferos se efectuó en función de los nuevos sectores de riego. Los acuíferos definidos son los que se muestran en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3
Acuíferos definidos para la modelación WEAP

Acuífero	Vol Máx	Coef S	Área Superf.
	millones **m^3**		Km^2
AC_TUR_01	1.8	0.02	3.5
AC_TUR_02	2	0.02	3.9
AC_TUR_03	1.6	0.02	3
AC_CAL_01	1	0.07	1.8
AC_EDE_01	0.2	0.01	1
AC_EDE_02	0.7	0.01	3.4
AC_CLA_01	1	0.015	2.7
AC_PAI_01	1	0.05	1.9
AC_CLA_02	1.5	0.02	3
AC_ELQ_01	2.2	0.065	1.4
AC_ELQ_02	19	0.065	12.1
AC_ELQ_03	16.9	0.065	10.8
AC_ELQ_04	3.3	0.1	1.6
AC_ELQ_05	6.5	0.1	3.2
AC_ELQ_06	29.3	0.1	10.4
AC_ELQ_07	26.8	0.1	9.5
AC_ELQ_08	84.9	0.1	30.1
AC_GRA_01	8	0.03	10.5
AC_CUL_01	186	0.07	77.6
AC_COS_01	6.3	0.05	9.9
AC_COS_02	8.2	0.05	13.1
AC_COS_03	43.5	0.05	69.1

Los acuíferos modelados se muestran en la Figura 8.4.

Figura 8.4
Acuíferos modelados con WEAP



- **Sitio de demanda puntual**

Los sitios de demanda puntual son sitios que consumen agua tanto superficial como subterránea. Se refieren a la demanda de agua por parte de la vegetación ripariana, agua potable, industria y minería.

Los elementos considerados son los que se presentan en la Tabla 8.4 y están identificados con puntos rojos en la Figura 8.5.

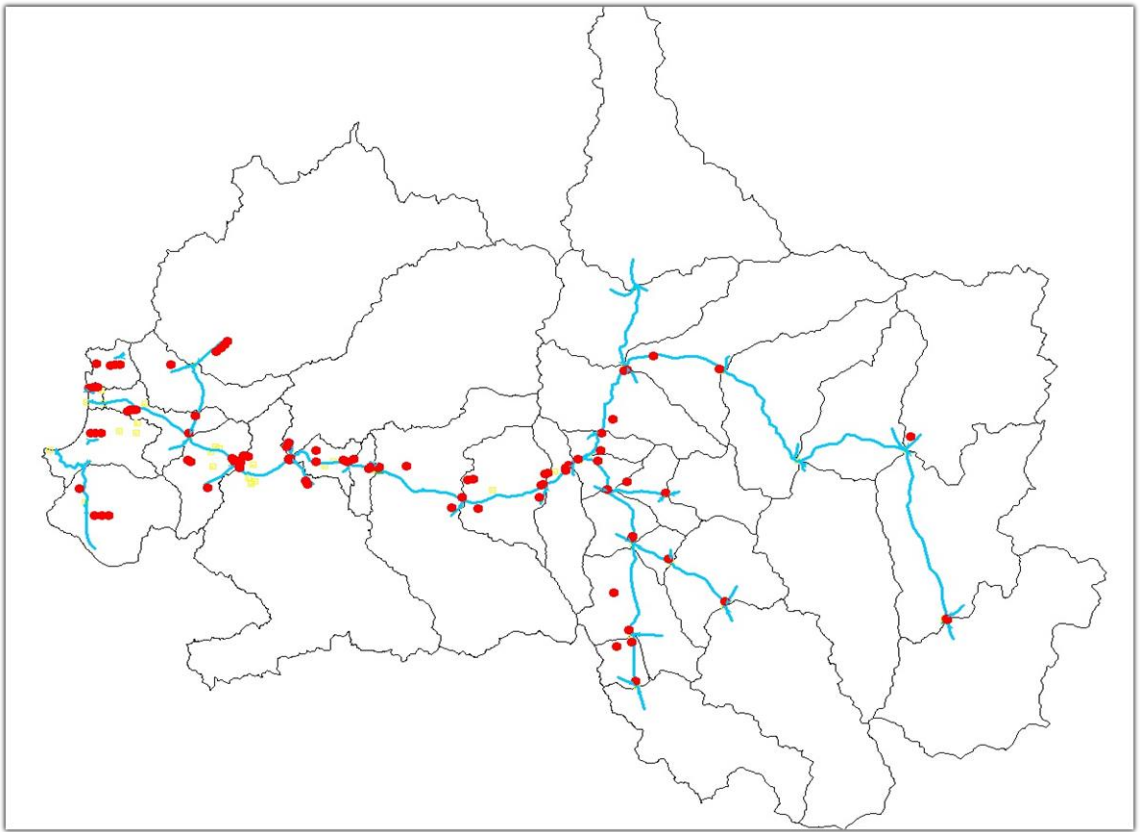
Tabla 8.4
Captaciones puntuales de caudal

Nombre captación	Concepto
AP_AC_COS_01	Extracción Acuífero Costa 01 para Uso Agua Potable
AP_AC_COS_02	Extracción Acuífero Costa 02 para Uso Agua Potable
AP_AC_COS_03	Extracción Acuífero Costa 03 para Uso Agua Potable
AP_AC_CUL_01	Extracción Acuífero Culebrón 01 para Uso Agua Potable
AP_AC_EDE_01	Extracción Acuífero Estero Derecho 01 para Uso Agua Potable
AP_AC_EDE_02	Extracción Acuífero Estero Derecho 02 para Uso Agua Potable
AP_AC_ELQ_02	Extracción Acuífero Elqui 02 para Uso Agua Potable
AP_AC_ELQ_03	Extracción Acuífero Elqui 03 para Uso Agua Potable
AP_AC_ELQ_05	Extracción Acuífero Elqui 05 para Uso Agua Potable

AP_AC_ELQ_06	Extracción Acuífero Elqui 06 para Uso Agua Potable
AP_AC_ELQ_07	Extracción Acuífero Elqui 07 para Uso Agua Potable
AP_AC_ELQ_08	Extracción Acuífero Elqui 08 para Uso Agua Potable
AP_AC_GRA_01	Extracción Acuífero Santa Gracia 01 para Uso Agua Potable
AP_AC_PAI_01	Extracción Acuífero Paihuano 02 para Uso Agua Potable
AP_AC_TUR_02	Extracción Acuífero Turbio 02 para Uso Agua Potable
AP_AC_TUR_03	Extracción Acuífero Turbio 03 para Uso Agua Potable
AP_AN_GRA_01	Extracción Aporte Natural cuenca Santa Gracia 01 para Uso Agua Potable
ET_AC_TUR_01	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_CLA_02	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_ELQ_03	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_ELQ_04	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_ELQ_05	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_ELQ_06	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CS_ECONSSA	Captación Superficial para Agua Potable La Serena
ET_AC_ELQ_07	Captación Puntual para Agua Potable La Serena
ET_AC_ELQ_08	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_COS_01	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
ET_AC_CUL_01	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
EVAP_EMB_LA_LAGUNA	Evaporación Embalse La Laguna
CP01_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP02_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP03_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP04_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP05_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP06_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP07_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP08_ECONSSA	Captación Puntual para Agua Potable La Serena
CP09_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
CP10_ET	Captación Puntual para ET de vegetación ripariana
EVAP_EMB_PUCLARO	Evaporación Embalse Puclaro
M_AC_COS_01	Extracción Acuífero Costa 01 para Uso Minería
M_AC_COS_02	Extracción Acuífero Costa 02 para Uso Minería
M_AC_COS_03	Extracción Acuífero Costa 03 para Uso Minería
M_AC_CUL_01	Extracción Acuífero Culebrón 01 para Uso Minería
M_AC_ELQ_01	Extracción Acuífero Elqui 01 para Uso Minería
M_AC_ELQ_06	Extracción Acuífero Elqui 06 para Uso Minería
M_AC_ELQ_08	Extracción Acuífero Elqui 08 para Uso Minería
M_AN_ELQ_06	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 06 para Uso Minería
M_AN_ELQ_07	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 07 para Uso Minería
M_AN_GRA_01	Extracción Aporte Natural cuenca Santa Gracia 01 para Uso Minería
M_AN_TUR_01	Extracción Aporte Natural cuenca Turbio 01 para Uso Minería
I_AC_COS_01	Extracción Acuífero Costa 01 para Uso Industrial
I_AC_COS_02	Extracción Acuífero Costa 02 para Uso industrial
I_AC_COS_03	Extracción Acuífero Costa 03 para Uso industrial
I_AC_CUL_01	Extracción Acuífero Culebrón 01 para Uso industrial
I_AC_ELQ_02	Extracción Acuífero Elqui 02 para Uso industrial
I_AC_ELQ_06	Extracción Acuífero Elqui 06 para Uso industrial
I_AC_ELQ_07	Extracción Acuífero Elqui 07 para Uso industrial
I_AC_ELQ_08	Extracción Acuífero Elqui 08 para Uso industrial
I_AN_GRA_01	Extracción Aporte Natural cuenca Santa Gracia 01 para Uso industrial
R_AN_ELQ_02	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 02 para Uso Riego

R_AN_ELQ_03	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 03 para Uso Riego
R_AN_ELQ_06	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 06 para Uso Riego
R_AN_ELQ_07	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 07 para Uso Riego
R_AN_ELQ_08	Extracción Aporte Natural cuenca Elqui 08 para Uso Riego
R_AN_GRA_01	Extracción Aporte Natural cuenca Santa Gracia 01 para Uso Riego
R_AN_GRA_02	Extracción Aporte Natural cuenca Santa Gracia 02 para Uso Riego
RQ_SAL_EMB_LA_LAGUNA	Salida impuesta embalse La Laguna
RQ_SAL_EMB_PUCLARO	Salida impuesta embalse Puclaro

Figura 8.5
Sitios de demanda puntual



- **Infiltración**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia del método de riego, cada zona de riego puede infiltrar recurso hacia el acuífero. Por esta razón, donde hay acuíferos, se ha definido una infiltración desde la zona de riego correspondiente.

- **Derrames**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia de riego, cada zona de riego puede generar derrames o flujos de retorno hacia el río. De esta forma, se define un flujo de retorno desde cada una de las zonas de riego, de retorno al río.

- **Enlace de transmisión de caudal (Transmission Link)**

Se definen estos enlaces para unir e indicar la dirección del flujo entre los siguientes elementos:

i) Desde acuíferos hacia sitios de demanda puntual que abastecen
ii) Desde tramo de río en cuencas laterales aportantes hacia demandas de riego en cuencas laterales aportantes
iii) En cada una de las bocatomas de canales, hacia el punto llamado requerimiento de caudal puesto al inicio de cada canal
iv) Desde acuíferos hacia las zonas de riego que tienen un pozo en dicho acuífero
v) Desde canales hacia las zonas de riego que abastecen

- **Flujo de retorno**

Se usaron de tres formas:

i) Para entregar al río un caudal de salida exigido a un embalse
ii) Para entregar al inicio del canal, en su punto de captación (Capt-canal-tur-01) el caudal requerido al río a través del punto de requerimiento de caudal.
iii) Para devolver las pérdidas desde la red de agua potable de La Serena-Coquimbo al acuífero.

- **Punto de control de caudal**

Los puntos de control sirven para contrastar los resultados del modelo con cualquier tipo de dato con el que se cuente. De este modo, los datos de contraste pueden ser caudales observados en una estación fluviométrica, caudales calculados por fuera del modelo, u otro tipo de datos independientes de la modelación, con los que se desee contrastar los resultados en dicho punto.

8.1.2 Key Assumptions

Los datos de entrada correspondientes a la topología con que se representó la cuenca, están todos contenidos en la sección Key Assumptions, la cual, además de admitir entrada directa de la información, puede alimentarse de datos externos, en este caso, datos contenidos en la carpeta Datos, generalmente en formato .csv.

A continuación se presentan todos los datos, criterios y fórmulas que configuran la información de entrada del modelo WEAP Elqui.

a) **Regla canales**

Esta primera entrada de Key Assumptions contiene la regla de los canales del Estero Derecho y del río Elqui. La regla está basada en la entrega de la cantidad de acciones que tiene cada canal.

En el caso del Estero Derecho, la regla contiene el valor del caudal de 1 acción, que se obtiene dividiendo el aporte natural del río en el punto de control, por la cantidad total de acciones. El caudal a repartir es el afluente de las subcuencas de cabecera AN_EDE_01 y AN_EDE_02, y el número total de acciones es 3043.

En el caso del río Elqui, la regla consiste en el desmarque. Para el período de calibración, el desmarque es un dato, entregado por la Junta de Vigilancia del río Elqui, y se lee directamente desde el archivo externo DESMARQUES_MAGIC.csv contenido en la carpeta Datos. Este archivo contiene varias columnas, una para cada sector de la cuenca, con los desmarques históricos. El número después de la extensión del archivo indica el número de la columna en la cual están los datos.

b) Coeficiente de cultivo

Los coeficientes de cultivos (kc) están ordenados en tres grupos de cultivos:

- Cultivos anuales
- Cultivos frutales
- Otros (se refiere a bosques de eucaliptus)

Por lo tanto, bajo este parámetro se encuentra el listado completo de todos los cultivos presentes en la cuenca. Para cada uno de los cultivos, de todas las categorías, se ingresaron directamente los valores mensuales, precedidos por la glosa Monthly Values para ingreso directo de datos, utilizando la herramienta de importación “Monthly Time Values Wizard”.

La fuente de esta información fue fundamentalmente el estudio CAZALAC/RODHOS 2006, en el cual se hizo una recopilación exhaustiva de valores de kc de la Región, y además se analizó la distribución de los valores a lo largo del año, adaptando la distribución anual del coeficiente de algunos cultivos, al clima de la Región. Las fuentes específicas consultadas en dicho estudio, fueron las siguientes:

- Manual de Producción de Hortalizas. Prodecop IVª Región, FIDA, INIA, INDAP, 1998

- Fichas técnicas y de costos de establecimiento de frutales en el valle del Choapa, CNR y Gobierno Regional de Coquimbo, PROVALTT Choapa, IVª Región, Oficina técnica INIA Illapel, Abril 2003

- Manual de fichas agroeconómicas de cultivos de hortalizas para el área del proyecto PROMM canal Buzeta. Francisco Meza, Oscar Campusano, Alfonso Osorio, OPEPA, INIA Intihuasi. Noviembre 1999
- Fichas técnicas y económicas de cultivos establecidos en el valle del Choapa, PROVALTT Choapa, IVª Región, Abril 2003

- Conversación personal con Ing. Agrónomo Francisco Meza, INIA Illapel

- Conversación personal con Ing. Agrónomo Leoncio Martínez, INIA La Serena

- Conversación personal con Ing. Agrónomo Katrin Stehr, Walmaster, productor de Fertipellets

c) Evapotranspiración potencial

Este parámetro tiene una distribución mensual, y se asigna a cada una de las zonas de riego. De este modo, bajo este parámetro se encuentra el listado completo de las zonas de riego.
Los valores de la evapotranspiración potencial mensual se ingresaron directamente para cada zona de riego, precedidos por la glosa Monthly Values, utilizando la herramienta de importación "Monthly Time Values Wizard".

La evapotranspiración potencial de cada zona de riego se obtuvo a partir del estudio CAZALAC/RODHOS 2006. En dicho estudio, los valores se obtuvieron del estudio "Atlas Agroclimático de Chile, Regiones IV a IX", CIREN, Marzo 1990. Los valores de ese estudio están agregados para la temporada diciembre-febrero, y se presentan por cuenca. Estos valores se distribuyeron en forma proporcional a las mediciones de evaporación de bandeja, y se completaron todo el año de la misma forma.

Las estaciones de evaporación utilizadas como base para la distribución mensual son indicadas en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5
Estaciones de evaporación asociadas a cada sector de riego

Sector	Estación
Estero Derecho	La Ortiga
Río Cochiguaz	La Ortiga
Río Claro	La Ortiga
Río Turbio	Rivadavia
Elqui Alto	Rivadavia
Elqui Bajo	Almendral
Costa	La Serena
Culebrón	Pan de Azúcar

d) Precipitación agronómica efectiva

La precipitación efectiva se asocia a cada una de las zonas de riego, de modo que bajo este parámetro se despliegan todas las zonas de riego. Los valores mensuales del parámetro se ingresaron directamente, precedidos por la glosa Monthly Value.

Las precipitaciones efectivas mensuales desde el punto de vista agronómico (PpEf), son las que reducen la necesidad de riego. Para la determinación de las precipitaciones efectivas se trabajó con las precipitaciones asociadas al año con probabilidad de excedencia de 85%, de la estadística de la estación representativa de la zona de riego. Aquellas menores que 12 mm/mes se consideraron nulas. Las mayores se redujeron a un 60%. Las estaciones asociadas a cada zona de riego son señaladas en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6
Estaciones pluviométricas asociadas a cada sector de riego

Zona de riego	Estación
Turbio	Rivadavia
Estero Derecho	Monte Grande
Río Cochiguaz	Monte Grande
Río Claro	Monte Grande
Elqui Alto	Vicuña
Elqui Bajo	Almendral
Costa	La Serena
Culebrón	La Serena

e) Eficiencia de riego

Se refiere a la eficiencia de riego asociada a los métodos de riego que se utilizan en cada zona de riego. De acuerdo con la eficiencia, los métodos de riego se agruparon en tres categorías:

- Tecnificado, con eficiencia de 85%. Esta categoría representa los métodos de riego de goteo, aspersión, microaspersión y cintas.
- No tecnificado, con una eficiencia de 50%. Representa los métodos de surco, taza y curva de nivel
- Tendido, con una eficiencia de 30%.

f) Acuíferos

En este acápite del modelo se caracterizan todos los acuíferos que se incluyeron en la topología, de modo que aquí se encuentra el listado completo de acuíferos. Preliminarmente, se ha trabajado con los valores determinados en el estudio CAZALAC / RODHOS para su uso en el modelo MAGIC. No se alcanzó a incluir en el presente estudio los valores en base a los resultados de los estudios hidrogeológicos que la CORFO está realizando simultáneamente en las tres cuencas mayores de la región.

Los parámetros que representan los acuíferos son los siguientes:

- Volumen máximo en millones de m^3. Se obtuvieron de las estimaciones realizadas en el estudio CAZALAC / RODHOS, y equivalen a los usados con el modelo MAGIC.
- Coeficiente de almacenamiento S. Se obtuvieron del mismo estudio.
- Área superficial en km^2. Se obtuvieron del mismo estudio.

g) Canales

Los canales se caracterizan desde varios puntos de vista, de modo que el modelo tenga todas las variables que se requieren para representar adecuadamente el sistema. Para caracterizar todos los canales, de cada canal se introduce en el modelo las pérdidas (valor complementario a la eficiencia), las capacidades, las acciones, las acciones relativas (siendo éstas la proporción de acciones en relación con el total sobre el cual esas acciones se desmarcan) y la pérdida por evaporación que se asume desde cada canal (que es una variable opcional, y puede servir para la calibración), según lo presentado en el acápite Topología. En la siguiente Tabla 8.7 se presentan los canales modelados con WEAP y las características asumidas para ellos.

Tabla 8.7
Canales modelados y sus características

Código Canal WEAP	% Pérdidas	Capacidad canal	Acciones	Total acciones	Acciones relativas	% Evaporación
CA_EDE_01	30	0.66	547.3		0.180	0
CA_EDE_02	5	0.168	309.22		0.102	0
CA_EDE_03	15	3.64	2187.9		0.719	0
TOTAL EDE				**3044.42**		
CA_PAI_01	20	0.25			1.000	0
CA_COC_01	27	0.357	609.02		0.027	0
CA_COC_02	27	0.21	401.82		0.018	0
CA_CLA_01	32	1.739	1140.61		0.050	0
CA_CLA_02	27	0.172	344.17		0.015	0
CA_CLA_03	23	0.675	1081.44		0.047	0
CA_TUR_01	15	0.435	305.4		0.013	0
CA_TUR_02	20	1.012	765.67		0.034	0
CA_TUR_03	23	0.667	474.43		0.021	0
CA_TUR_04	23	0.345	299.86		0.013	0
CA_ELQ_01	29	0.126	216.62		0.009	0
CA_ELQ_03	28	0.093	155.44		0.007	0
CA_ELQ_02	25	0.249	498.09		0.022	0
CA_ELQ_04	28	0.602	987.69		0.043	0
CA_ELQ_06	28	0.316	561.98		0.025	0
CA_ELQ_05	28	1.352	2122.88		0.093	0
CA_ELQ_07	28	1.211	1307.92		0.057	0
CA_ELQ_08	21	0.063	101.03		0.004	0
CA_ELQ_09	20	0.361	520.61		0.023	0
CA_ELQ_10	25	0.047	34.6		0.002	0
CA_ELQ_11	20	0.212	379.49		0.017	0
CA_ELQ_12	25	0.469	702.38		0.031	0
CA_ELQ_13	28	0.417	609.44		0.027	0
CA_ELQ_14	28	0.177	294.37		0.013	0

CA_ELQ_15	45	1.506	1932.7		0.085	0
CA_ELQ_16	46	4	3677.04		0.161	0
CA_ELQ_17	28	0.701	348.28		0.015	0
CA_ELQ_18	28	0.2	392.03		0.017	0
CA_ELQ_19	20	0.292	583.48		0.026	0
CA_ELQ_20	28	0.37	599.1		0.026	0
CA_ELQ_21	20	1.4	1241.7		0.054	0
CA_ELQ_22		0.266				
CA_ELQ_23		0.212				
CA_ELQ_24	30	1.551	134.76		0.006	0
CA_ELQ_25		0.3				
CA_ELQ_26	30	0.36				
TOTAL ELQ				**22824.05**		

h) Parámetros de calibración

Bajo este rubro, se consideraron cuatro variables, que son variables de calibración:

- Percolación desde las zonas de riego hacia los acuíferos
- Percolación desde los cauces hacia los acuíferos
- Factor hidrológico de sequía, que multiplica la hidrología normal cuando comienza a rendir menos en años de sequía.
- Factor Kc de sequía, que va reduciendo el valor de los coeficientes de cultivos de todos los cultivos de la cuenca desde el año 2009 hasta el año 2014, simulando la disminución de la demanda agrícola efectiva por efecto de la sequía: disminución de área regada y cambio de hábitos de riego (riego deficitario).
- Factor de desmarque, que multiplica el desmarque estimado con la regla, en épocas de sequía profunda, en que la estimación puede ser excesiva.

Es necesario señalar que éstas no son las únicas variables de calibración. Las demás variables se encuentran listadas bajo otros temas, y se señala su calidad de variable de calibración de cada caso.

Los valores calibrados son indicados en la Tabla 8.8, 8.9, 8.10 y 8.11, respectivamente.

Tabla 8.8
Valores calibrados de las percolaciones desde ZR

Código Zona de riego	% de la ineficiencia de riego que percola
ZR_EDE_01	83
ZR_EDE_02	83
ZR_COC_01	74
ZR_COC_02	74
ZR_PAI_01	75
ZR_CLA_01	70
ZR_CLA_02	76
ZR_TUR_01	72

ZR_TUR_02	10
ZR_TUR_03	72
ZR_ELQ_01	75
ZR_ELQ_02	75
ZR_ELQ_03	75
ZR_ELQ_04	76
ZR_ELQ_05	76
ZR_ELQ_06	79
ZR_ELQ_07	79
ZR_ELQ_08	79
ZR_GRA_01	70
ZR_COS_01	100
ZR_COS_02	100
ZR_COS_03	90
ZR_CUL_01	90
ZR_CAL_01	100

Tabla 8.9
Valores calibrados de la percolación desde cauces

Acuífero que recibe la percolación	% del caudal que percola
AC_EDE_01	1
AC_EDE_02	1
AC_PAI_01	1
AC_CLA_01	1
AC_CLA_02	1
AC_TUR_01	1
AC_TUR_02	1
AC_TUR_03	1
AC_ELQ_01	1
AC_ELQ_02	1
AC_ELQ_03	1
AC_ELQ_04	1
AC_ELQ_05	1
AC_ELQ_06	1
AC_ELQ_07	1
AC_ELQ_08	5
AC_GRA_01	1
AC_CAL_01	1
AC_COS_01	5
AC_CUL_01	1
AC_COS_03	1

Tabla 8.10
Factor de sequía

Sector de la cuenca	Factor de sequía
ELQUI_ARR_PUCLARO	0.5
CLARO_PAIHUANO	0.5
COSTA	1
ELQUI_AB_PUCLARO	1

Tabla 8.11
Factor de desmarque

Período	Factor
1999-2014	1
2014-2017	0.7

i) Factor de uso

Hay algunos derechos que no entran en el sistema de reparto de la cuenca, por encontrarse en algún lugar de la subcuenca aportante, pero lejos de cauces y acuíferos modelados. Sin embargo, son usos que por su ubicación, disminuyen los aportes desde las subcuencas aportantes.

No obstante, el uso efectivo de los derechos tanto de riego como de agua potable rural, es por lo general muy bajo (artículos 4ºT y 6ºT), por lo que para ellos se ha asumido un factor de uso igual a 0,1.

Por otro lado, para los usos minero e industrial que se encuentran en la misma situación (dentro de las cuencas aportantes pero lejos de acuíferos y cauces modelados), se ha asumido un factor de uso igual a 1, lo que significa que se espera que ellos sí sean intensivamente utilizados. En el caso de los usos industriales, la suposición es conservadora.

El factor de uso se aplica para determinar los caudales efectivos que se restan de los aportes desde las subcuencas aportantes, antes de su ingreso al sistema.

j) Embalses

En esta sección se ingresa una curva de área superficial en función del volumen almacenado, para ambos embalses, que el modelo usa como herramienta para el cálculo de la evaporación. La función entrega un área para un volumen determinando, y el modelo calcula un caudal (o volumen) de evaporación en función de dicha área, la evaporación ingresada, y el factor de embalse (0,7).

8.1.3 Demand Sites and Catchments

Esta sección define las demandas que genera cada centro de demandas. En esta sección se asocia a cada centro de demanda, tanto puntual como areal (zonas de riego), todos los datos que permiten calcular la demanda efectiva mes a mes.

Se ingresa en esta sección los datos que se señalan a continuación.

a) Demandas de las zonas de riego

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia una eficiencia de riego en función del método de riego (tecnificado, no tecnificado o tendido), la cual se encuentra definida en los Key Assumptions.

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia un valor de kc de acuerdo con lo ingresado en los Key Assumptions.

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia una evapotranspiración potencial, la cual se encuentra definida para cada zona de riego en los Key Assumptions.

- Cada tipo de cultivo de cada zona de riego se asocia a un subsector de riego, ANU (cultivos anuales) o FRU (cultivos frutales).

- A cada tipo de cultivo de cada subsector de riego, ANU y FRU, se le asocia un método de riego.

- A cada subsector de riego, por lo tanto, le quedan asociados sus métodos de riego, y dentro de cada método de riego, los cultivos y las áreas de cada cultivo.

- A cada subsector de riego, ANU y FRU, se le asigna una precipitación efectiva de acuerdo con lo ingresado en los Key Assumptions.

El resumen de las áreas de cultivo por zona de riego, por método de riego y por tipo de cultivo se muestra en la Tabla 8.12.

Tabla 8.12
Resumen de las áreas cultivadas por zona de riego (ha)

ZR / FRU-ANU / Tipo Cult	Suma de MR TECN	Suma de MR NO TECN	Suma de MR TEND	TOTAL
ZR_CAL_01				
FRUTALES				
VID DE MESA	174.81	0	0	174.81
ZR_CLA_01				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	28	0	28
FRUTALES				
CAROZOS	0	1.22	0	1.22
GRANADO	0.36	0	0	0.36
HIGUERA	3.98	0	0	3.98
PALTO	53.77	1.5	0	55.27
VID DE MESA	127.64	0.9	0	128.54
VID DE PISCO	0	53.58	0	53.58
ZR_CLA_02				

ANUALES				
HORTALIZAS	0	35.39	0	35.39
FRUTALES				
CITRICOS	24.88	0.14	0	25.02
PALTO	7.03	0	0	7.03
VID DE MESA	275.78	1.81	0	277.59
VID DE PISCO	7.7	11.5	0	19.2
ZR_COC_01				
FRUTALES				
VID DE MESA	53.51	1.7	0	55.21
VID DE PISCO	0	168.12	0	168.12
ZR_COC_02				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	28.31	0	28.31
FRUTALES				
CAROZOS	4.5	0	0	4.5
NISPERO	0.32	0	0	0.32
VID DE MESA	147.35	0	0	147.35
VID DE PISCO	18.27	0	0	18.27
ZR_COS_01				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	466.52	0	466.52
ZR_COS_02				
ANUALES				
HORTALIZAS	220.56	497.95	0	718.51
FRUTALES				
CHIRIMOYO	15.08	0	0	15.08
CITRICOS	0	0	0.54	0.54
ZR_COS_03				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	1976.27	0	1976.27
FRUTALES				
CHIRIMOYO	42.94	58.56	0	101.5
CITRICOS	66.89	14.88	0	81.77
KIWI	3.66	0	0	3.66
LUCUMO	2.16	0.03	0	2.19
OLIVO	0	3.85	0	3.85
PALTO	10.26	4.5	0	14.76
PAPAYO	11.32	0.33	0	11.65
ZR_CUL_01				
ANUALES				
HORTALIZAS	827.43	4951.9	0	5779.33
BOSQUE				
EUCALIPTUS	0	53.17	0	53.17
FRUTALES				
ARANDANO	1.75	0	0	1.75
CHIRIMOYO	141.71	25.55	0	167.26
CITRICOS	754.78	20.62	0	775.4
FRUTILLA	2.55	0	0	2.55
HIGUERA	13.05	0	0	13.05
LUCUMO	0	4.84	0	4.84
OLIVO	777.12	0	0	777.12

PALTO	15.9	2.6	0	18.5
PAPAYO	93.44	3.52	0	96.96
ZR_EDE_01				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	152.04	0	152.04
FRUTALES				
ALMENDRO	3.02	0	0	3.02
CIRUELO	0.7	0	0	0.7
CITRICOS	1.16	0	0	1.16
NISPERO	0.62	0	0	0.62
NOGAL	5.73	0	0	5.73
PALTO	6.54	0	0	6.54
ZR_EDE_02				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	15.02	0	15.02
FRUTALES				
CAROZOS	1.08	1.68	0	2.76
NOGAL	3.61	2.43	0	6.04
PALTO	30.17	2.78	0	32.95
TUNA	0	0.75	0	0.75
VID DE MESA	327.53	4.47	0	332
VID DE PISCO	266.32	125.91	0	392.23
ZR_ELQ_01				
FRUTALES				
CHIRIMOYO	0	0.14	0	0.14
CITRICOS	83.95	0.39	0	84.34
GRANADO	5.06	0	0	5.06
PALTO	53.53	2.53	0	56.06
VID DE MESA	127.35	0	0	127.35
VID DE PISCO	0	21.15	0	21.15
ZR_ELQ_02				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	239.94	0	239.94
FRUTALES				
ARANDANO	49.13	0	0	49.13
CAQUI	0.7	0	0	0.7
CAROZOS	2.89	4.95	0	7.84
CHIRIMOYO	0	1.08	0	1.08
CITRICOS	139.98	2.44	0	142.42
GRANADO	118.45	0	0	118.45
NOGAL	40.32	0	0	40.32
OLIVO	0	0.05	0	0.05
PALTO	191.18	9.19	0	200.37
TUNA	0.99	4.07	0	5.06
VID DE MESA	1017.31	42.02	0	1059.33
VID DE PISCO	248.25	145.66	0	393.91
ZR_ELQ_03				
ANUALES				
HORTALIZAS	0	1.84	0	1.84
FRUTALES				
CEREZO	49.28	0	0	49.28
CITRICOS	228.86	0	0	228.86

GRANADO	78.52	0	0	78.52
PALTO	135.24	0.27	0	135.51
VID DE MESA	381.44	5.9	0	387.34
VID DE PISCO	216.37	305.16	0	521.53
VID VINIFERA	79.66	0	0	79.66
ZR_ELQ_04				
FRUTALES				
CHIRIMOYO	0	15.34	0	15.34
CITRICOS	0	1.28	0	1.28
LUCUMO	0	0.17	0	0.17
PALTO	0	0.81	0	0.81
VID DE PISCO	0	55.45	0	55.45
VID VINIFERA	0	32.36	0	32.36
ZR_ELQ_05				
ANUALES				
ALFALFA Y PRADERA	0	0	25.27	25.27
HORTALIZAS	0	18.9	0	18.9
PARCELA DE AGRADO	0	29.73	0	29.73
FRUTALES				
ALMENDRO	0.08	0	0	0.08
CHIRIMOYO	4.46	0.42	0	4.88
CITRICOS	11.89	0.9	0	12.79
GRANADO	19.95	0	0	19.95
NOGAL	3.13	0.07	0	3.2
PALTO	16.96	1.7	0	18.66
PAPAYO	0	12.78	0	12.78
VID DE MESA	0	1.98	0	1.98
VID VINIFERA	60.6	0	0	60.6
ZR_ELQ_06				
ANUALES				
HORTALIZAS	84.52	876.62	0	961.14
FRUTALES				
ARANDANO	1.15	0	0	1.15
CHIRIMOYO	20.97	3.6	0	24.57
CITRICOS	287.88	0.34	0	288.22
GRANADO	5.25	0	0	5.25
NOGAL	45.85	39.6	0	85.45
OLIVO	0.3	0	0	0.3
PALTO	140.76	9.22	0	149.98
PAPAYO	67.38	0	0	67.38
TUNA	208.51	16.24	0	224.75
VID DE MESA	75.45	12.9	0	88.35
VID DE PISCO	51.69	0	0	51.69
VID VINIFERA	79.57	0	0	79.57
ZR_ELQ_07				
ANUALES				
HORTALIZAS	371.44	1328.39	0	1699.83
FRUTALES				
ARANDANO	1.54	0	0	1.54
CHIRIMOYO	33.93	14.32	0	48.25
CITRICOS	2.63	12.96	0	15.59

GRANADO	29.15	0	0	29.15
JOJOBA	77.43	0	0	77.43
LUCUMO	0.49	2.74	0	3.23
MEMBRILLO	0	4.22	0	4.22
NOGAL	0.94	2.12	0	3.06
OLIVO	3.24	0	0	3.24
PALTO	0.77	12.19	0	12.96
PAPAYO	63.92	23.62	0	87.54
TUNA	89.93	23.87	0	113.8
ZR_ELQ_08				
ANUALES				
HORTALIZAS	346.39	1821.53	0	2167.92
FRUTALES				
ARANDANO	3.27	0	0	3.27
CHIRIMOYO	33.22	23.91	0	57.13
CITRICOS	0.02	0.46	0	0.48
GRANADO	5.4	0	0	5.4
LUCUMO	0	0.72	0	0.72
MANGO	0.01	0	0	0.01
OLIVO	0	1.76	0	1.76
PALTO	0.66	1.31	0	1.97
PAPAYO	80	15.62	0	95.62
ZR_GRA_01				
ANUALES				
HORTALIZAS	152.41	1128.55	0	1280.96
FRUTALES				
CHIRIMOYO	28.58	3.84	0	32.42
CITRICOS	178.8	0	0	178.8
NOGAL	0	1.46	0	1.46
PALTO	23.19	0	0	23.19
PAPAYO	0	2.9	0	2.9
ZR_PAI_01				
ANUALES				
ALFALFA Y PRADERA	0	0	52.32	52.32
HORTALIZAS	0	14.53	0	14.53
FRUTALES				
CAROZOS	0	2.73	0	2.73
CITRICOS	0	0.77	0	0.77
PALTO	89.78	13.65	0	103.43
VID DE MESA	25.41	2.6	0	28.01
VID DE PISCO	0	14.2	0	14.2
ZR_TUR_01				
FRUTALES				
CITRICOS	0	0.33	0	0.33
PALTO	0	1	0	1
VID DE MESA	219.04	1.35	0	220.39
VID DE PISCO	25.41	0	0	25.41
ZR_TUR_02				
ANUALES				
ALFALFA Y PRADERA	0	0	29.93	29.93
FRUTALES				

VID DE MESA	294.61	0	0	294.61
VID DE PISCO	0	11.61	0	11.61
ZR_TUR_03				
FRUTALES				
PALTO	15.26	0	0	15.26
TUNA	0	5.2	0	5.2
VID DE MESA	254.72	4.21	0	258.93
Total general	**11433.38**	**15138.2**	**108.06**	**26679.64**

b) Demandas de los canales

Por defecto, el algoritmo de resolución de WEAP sólo permite que los canales capten un caudal inferior o igual a la demanda agregada de todos los sitios de demanda conectados a él. Para "forzar" la entrega desde el río hacia los canales, independientemente de las demandas asociadas al canal, es necesario utilizar un artificio de modelación, un sitio de demanda de consumo nulo que pide al río el caudal que le corresponde por desmarque, al que se llamó "requerimiento de caudal" o RQ y lo devuelve al canal en su totalidad.

A los requerimientos de caudal desde cada uno de los canales, se le asigna el mínimo entre la capacidad definida en los Key Assumptions, y el caudal que le corresponde por derecho, que es el porcentaje de desmarque por el número de acciones del canal, ambos definidos en los Key Assumptions. Finalmente el caudal se transforma en un volumen mensual.

c) Captación superficial ECONSSA

Para la demanda superficial para agua potable (canal ECONSSA), se aplicó el caudal informado por la empresa sanitaria. La estadística de caudales correspondientes se encuentra en la planilla CP_Q.csv en la carpeta Datos. Finalmente el caudal se transforma en volumen mensual.

d) Demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana

Para modelar la demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana, también se utilizaron "Demand sites" conectados a los acuíferos según muestra la siguiente tabla. A cada una de las demandas se le asocia una estadística de caudales que se encuentra en la planilla CP_Q.csv en la carpeta Datos. Finalmente el caudal se transforma en un volumen mensual.

Tabla 8.13
Caudales de demanda evapotranspirativa

NOMBRE	Q_PROM (m^3/s)
ET_AC_TUR_01	0.017
ET_AC_CLA_02	0.026
ET_AC_ELQ_03	0.010
ET_AC_ELQ_04	0.010
ET_AC_ELQ_05	0.070
ET_AC_ELQ_06	0.012

ET_AC_ELQ_07	0.020
ET_AC_ELQ_08	0.025
ET_AC_COS_01	0.006
ET_AC_CUL_01	0.056

e) Demandas de las captaciones individuales para agua potable

Todas las demás demandas para agua potable, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se asocian a una estadística de caudales mensuales que se encuentra en la planilla POZOS_Q_AP.csv en la carpeta Datos. Los datos de esta estadística corresponden a demandas efectivas, cuya ubicación se obtuvo a partir de los derechos, y cuyo valor se obtuvo a partir de la población abastecida, la cual se estima que tiene un crecimiento vegetativo del 2% anual. En el caso específico del agua potable para La Serena y Coquimbo, la estadística de caudales se obtuvo a partir de datos de producción de la empresa Aguas del Valle. Finalmente, todos los valores se transforman en volumen mensual.

Se contó con las siguientes fuentes de información de base:

i) Uso efectivo (caudal efectivamente consumido) en el año 2003, recopilado por única vez en el estudio CAZALAC/RODHOS 2006, en todas las localidades con agua potable rural. En ese momento, casi no había derechos constituidos, posteriormente se constituyeron los derechos con el artículo 6ºT.
ii) Uso efectivo en meses de punta, a partir de entrevistas y averiguaciones en terreno
iii) Derechos en la localidades rurales (prácticamente todas tienen derechos hoy en día), a partir del listado de derechos de la DGA.
iv) Uso efectivo promedio anual en las localidades urbanas, a partir de datos de caudal medio de producción obtenidos de los Planes de Desarrollo de la SISS, año 2006. Se usó el dato de proyección al año 5, que corresponde al año 2011.
v) Caudal máximo diario obtenido de los Planes de Desarrollo de la SISS, corroborado con los valores de demanda máxima obtenidos del estudio de ECONSSA. Coinciden completamente.
vi) Derechos en las localidades urbanas, a partir del listado de derechos de la DGA.

Se determinaron los valores de bombeo mensual para WEAP, de la siguiente manera: se ejecutó una tabla dinámica, en que se muestran los derechos para los diferentes usos, en cada uno de los acuíferos.

Para los derechos de agua potable, se distinguió entre los de agua potable urbana y rural. De acuerdo con la información recopilada, se asoció un uso efectivo a cada derecho. Para las aguas potables rurales se contó con la información de 2003, para las aguas potables urbanas, con la información de 2011, de acuerdo con las producciones de la empresa sanitaria.

Una vez realizado esto, se aplicó un factor de crecimiento anual de 2%, tanto a localidades rurales como urbanas, y se llevó todo al año 2014, año para el que se sumaron ambas demandas.

Donde hay demanda urbana, con peaks de verano, el caudal de demanda media anual de 2014 se transforma en volumen total anual de 2014, y luego se mensualiza el caudal, aplicando en los meses de enero y febrero el caudal de demanda máxima diaria, calculando el volumen de los meses de demanda máxima y luego repartiendo el resto del volumen entre los 10 meses no peak. De esta forma, se obtiene una estadística mensual de caudal y de volumen, para cada acuífero.

Finalmente, el volumen de 2014 se transforma en volumen de años anteriores y posteriores, aplicando un factor de crecimiento anual de 2%.

f) Demandas de las captaciones individuales para minería

Las demandas para la minería, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se asocian a una estadística de caudales mensuales que se encuentra en una planilla en la carpeta Datos. Los datos de esta estadística corresponden a derechos de agua, cuyo uso (ubicación y monto) se estableció en base a lo investigado en la Región, y lo informado por Corminco con oportunidad del Plan Maestro. Salvo por los derechos de la minera Teck, que cambiaron de ubicación trasladándose desde el Culebrón hacia el Elqui Bajo, los demás usos mineros informados por Corminco se refieren a un uso más intensivo de los propios derechos.

g) Demandas de las captaciones individuales para uso industrial

Las demandas de tipo industrial, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se obtuvieron a partir de los derechos (CPA de la DGA). Al monto de caudal se le asocia un factor de uso de acuerdo con lo definido en los Key Assumptions. La ubicación es la que resulta de la información del CPA. Finalmente los caudales se transforman en volumen mensual.

h) Demandas de riego menores en subcuencas aportantes

A las demandas de riego que se encuentran en las cuencas aportantes y fuera del sistema de reparto (4ºT) se les asocia un caudal igual al derecho, disponible en la planilla POZOS_DDAA_R.csv que se encuentra en la carpeta Datos. El caudal se afecta por el factor de uso definido para este efecto en las Key Assumptions.

i) Demanda evaporativa de los embalses Puclaro y La Laguna

A los embalses Puclaro y La Laguna, se le asocia una demanda evaporativa en base a una estadística de evaporación en mm que se encuentra en una planilla de la carpeta Datos, y un área que se obtiene en base a la función área vs volumen definida en los Key Assumptions. El valor resultante se transforma en volumen mensual.

j) Requerimiento de caudal a la salida de los embalses La Laguna y Puclaro

Por defecto, el algoritmo de resolución de WEAP sólo permite que los embalses entreguen un caudal inferior o igual a la demanda agregada de todos los sitios de demanda ubicados bajo él. Para "forzar" la entrega desde el embalse hacia el río, independientemente de las demandas ubicadas bajo él, es necesario utilizar un artificio, un sitio de demanda de consumo nulo o "requerimiento de caudal" que pide al embalse el caudal de salida y la devuelve al río en su totalidad. A los embalses La Laguna y Puclaro se les asocia un requerimiento de caudal a la salida. En el caso del embalse La Laguna, el caudal de salida está registrado tanto por la DGA como por la Junta de Vigilancia, y se impone al modelo en su operación. En el caso del embalse Puclaro, el requerimiento de caudal a la salida es el resultado del balance del embalse, calculado en base a la estadística de entrada simulada y el volumen observado del embalse.

k) Asignación de prioridad de cada uno de los sitios de demanda

A cada una de las demandas se le asocia una prioridad con la que debe ser abastecida. De este modo, adquieren prioridad de abastecimiento los requerimientos de caudal por parte de los canales, AP, MIN, IND, las captaciones puntuales de caudal (vegetación ripariana y canal ESSCO), los requerimientos de caudal por parte de los embalses, la evaporación desde los embalses, y cada uno de los subsectores de riego ANU y FRU, teniendo siempre una mayor prioridad la subzona FRU que la subzona ANU. En general, las prioridades son mayores para las demandas que siempre se abastecen, sin reglas ni consideraciones, como la captación desde la vegetación ripariana, y la evaporación desde los embalses. La prioridad de los canales decrece desde aguas arriba hacia aguas abajo, de acuerdo con el sector de la cuenca al que pertenecen. La prioridad más alta la tienen los sectores Estero Derecho y Paihuano, que no tributan. A continuación vienen los canales de los sectores Cochiguaz y Claro, que deben igualar sus desmarques. Luego están los canales del Turbio y Elqui sobre Puclaro, que igualan sus desmarques en base a los aportes del embalse La Laguna. Luego están las demandas evaporativas del embalse Puclaro, luego sus requerimientos de entrega, y finalmente todos los canales aguas abajo del embalse Puclaro, de los cuales el canal ESSCO tiene la mayor prioridad. También las zonas de riego tienen una prioridad. En el caso que un mismo canal abastezca a varias zonas de riego, la prioridad desciende desde aguas arriba hacia aguas abajo, y siempre es mayor para el subsector FRU que para el subsector ANU.

8.1.4 Supply and Resources

Esta sección contiene toda la información acerca de la oferta hídrica. La oferta se ingresa, a su vez, por subsecciones, que son las siguientes:

a) Ríos

En la subsección ríos se encuentra información de tres tipos:

- Hidrología aportada por las cuencas aportantes (AN, aporte natural)
- Canales
- Ríos

i) Aportes naturales

Estos aportes de caudal se han calculado externamente al modelo WEAP. Básicamente, se han tomado las mismas estadísticas del moldeo MAGIC, revisadas y adaptadas a la nueva topología, y extendidas hasta marzo de 2014.

Los puntos de entrada de los caudales aportados desde las subcuencas generan nodos sobre los cauces, y con ello definen tramos (reaches).

Otros elementos que definen nodos y por lo tanto tramos en los cauces, son los puntos de extracción de caudal mediante canales, y los puntos de retorno desde las zonas de riego o desde otros usos.

ii) Canales

En el modelo WEAP, los canales se llaman "diversions", y son tratados como ríos. En la modelación del Elqui, los canales están representados por un nodo de salida desde el río correspondiente, que se llama BT (bocatoma). Inmediatamente a continuación hay un sitio de demanda, llamado RQ (requerimiento de caudal), el cual tiene un requerimiento de caudal definido por el desmarque y limitado a la capacidad física del canal. Inmediatamente después viene un nodo llamado CAPT (captación del caudal), que representa realmente el punto de inicio del canal, es decir, lo que el canal ha captado. Por último, se ha definido un punto de control PC, en el cual se evalúa lo que el canal está captando realmente, en comparación con lo que le corresponde como desmarque.

A medida que el canal se va desarrollando, aparecen los nodos de entrega hacia las zonas de riego, que generan nuevos tramos o reaches sobre el canal. Las entregas están determinadas por las prioridades de los sitios de demanda que son abastecidas por cada canal.

Por otro lado, dentro de los tramos definidos por estos nodos, se producen las pérdidas. Las pérdidas totales del canal, ingresadas en la Key Assumptions, se reparten en los tramos definidos, de acuerdo a ciertos porcentajes que se ingresan en esta sección.

iii) Ríos

Los ríos aparecen por su propio nombre, y sobre ellos en esta sección aparecen todos los nodos que han sido generados a partir de

- entradas de aportes naturales
- entradas de aportes de ríos afluentes
- extracciones mediante bocatomas de canales
- retornos desde el riego por derrames
- extracción para demandas puntuales.

También aparecen las estaciones fluviométricas que han sido ubicadas en algún tramo. Cuando se ingresa una estación fluviométrica, se debe señalar dónde se encuentra la

estadística correspondiente, de modo de que le modelo pueda desplegar ambas estadísticas, la simulada y la observada, en el mismo tramo. En el caso del modelo Elqui, la estadística de la estación se lee desde la planilla OBS_Q.csv que se ubica en la carpeta Datos. Las estadísticas que allí se encuentran, son fundamentalmente las de la DGA, pero también hay algunas de la Junta de Vigilancia del Elqui, lo que se indica en su nombre en cada caso.

b) Acuíferos

En esta sección se ingresan los datos de volumen máximo que aceptarán los acuíferos a lo largo del período de trabajo. El valor del volumen máximo se busca en los Key Assumptions.

En el caso de trabajar con acuíferos interrelacionados con el nivel del río, además se ingresan aquí los datos de extracción máxima, recarga natural y método de cálculo seleccionado para representar el comportamiento del acuífero.

En el caso del Elqui, dada la escasa interacción de los acuíferos entre ellos, se les definió directamente ligados al río, con posibilidad de intercambio en el sentido de que hay infiltración desde el cauce, para lo cual se indica un porcentaje de infiltración, y afloramientos hacia el cauce, los que el modelo calcula, y los cuales se devuelven al sistema superficial.

c) Transmission Links

En esta sección, netamente topológica, se encuentran todos los enlaces que transmiten agua, esto es:

- Desde los acuíferos hacia los sitios de demanda puntual (agua potable, minería, industria, riego fuera del sistema de reparto)
- Desde los acuíferos hacia las zonas de riego que tienen acceso a ellos, por medio de derechos de agua subterránea.
- Desde los acuíferos hacia los sitios de captación puntual (evaporación de vegetación ripariana,
- Desde el río hacia una captación superficial (canal ECONSSA)
- Desde bocatomas de canales hacia los puntos de requerimiento de caudal respectivos ubicados sobre cada canal
- Desde los embalses hacia los requerimientos de caudal impuestos en la salida
  Desde los canales hacia las zonas de riego que son abastecidas por ellos.

Todos los transmission links pueden recibir una prioridad de suministro en relación con cada sitio de demanda suplido.

En el caso de las zonas de riego que son abastecidas desde las dos fuentes, canales y acuíferos, se indica la prioridad con la que se usan las fuentes. Siempre la fuente superficial tiene la primera prioridad frente al bombeo, debido a los costos.

d) Runoff and Infiltration (Derrames y percolaciones)

En esta sección se define el destino de la ineficiencia de riego. Por un lado, se generan derrames (que se devuelven al río), y por otro lado, percolaciones que alimentan el acuífero subyacente.

Se ingresa, para cada zona de riego, el porcentaje de la ineficiencia que vuelve al río, y el porcentaje que va hacia el acuífero. Entre ambos, suman 100%.

e) Return Flows (flujos de retorno)

Este objeto conduce el caudal no consumido por un "Demand Site" hacia otro objeto del sistema que lo puede recibir. Esta variable también es netamente topológica, e indica el porcentaje del flujo que retorna al río o canal después de su extracción. Se distinguen dos tipos de flujos de retorno:

- El caudal que retorna al río desde el requerimiento de caudal a la salida de los embalses La Laguna y Puclaro. El porcentaje de retorno es del 100%.
- El caudal que retorna al canal después del requerimiento de caudal a la entrada de cada uno de los canales. El porcentaje de retorno también es del 100% en este caso.
- El caudal que retorna al acuífero después del requerimiento de caudal de la captación superficial de ECONSSA. El porcentaje de retorno también es del 20% en este caso correspondiente a las pérdidas del sistema de agua potable de La Serena.

8.1.5 Carpeta Datos

Como se ha señalado antes, el complemento a la información de entrada ingresada directamente al modelo a través de la interface, es la información contenida en la carpeta Datos, a la que el programa tiene acceso para la realización de los cálculos. En la carpeta Datos quedaron los datos que pueden ser modificados externamente por el operador, para el análisis de diversos escenarios, sin afectar la topología ni la lógica de operación del modelo.

En la carpeta Datos se encuentra la siguiente información:

- Una subcarpeta llamada AREAS_CULTIVOS, la cual contiene una carpeta para cada zona de riego, con información de cultivos, separados por métodos de riego: tecnificado, no tecnificado, tendido.

- Un archivo AN_Q.csv, que contiene las estadísticas de caudales de las cuencas aportantes o aportes naturales. El archivo AN_Q_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBaseExt2 y FuturoOperacion4 y 5.

- Un archivo CP_Q.csv, que contiene las estadísticas de las captaciones puntuales, entre las cuales hay 7 que corresponden a captaciones de agua por parte de la vegetación ripariana, y una a la captación de agua potable del canal ECONSSA en Las Rojas.

- Un archivo DESMARQUES_MAGIC.csv, que contiene la estadística de desmarques histórica, con la cual se ha calibrado el modelo, coincidente a la estadística utilizada en el modelo MAGIC. El archivo DESMARQUES_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBaseExt2 y FuturoOperacion4 y 5.

- Un archivo OBS_EMB.csv, que contiene las observaciones relacionadas con los dos embalses Puclaro y La Laguna (caudal de salida, volumen observado y evaporación en mm básicamente). El archivo OBS_EMB_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBaseExt2 y FuturoOperacion4 y 5.

- Un archivo OBS_Q.csv, que contiene las estadísticas de todas las estaciones fluviométricas.

- Un archivo POZOS_DDAA_AP.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso de agua potable, por acuífero. Esta estadística opera como un límite a la explotación efectiva de agua potable.
- Un archivo POZOS_Q_AP.csv, que contiene la información de explotación efectiva para el uso de agua potable que se realiza en los acuíferos que cuentan con derechos.
- Un archivo POZOS_DDAA_M.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso de minería, por acuífero. Esta estadística opera como un límite a la explotación efectiva para minería.

- Un archivo POZOS_Q_M.csv, que contiene la información de la explotación efectiva para el uso de minería que se realiza en los acuíferos que cuentan con derechos.

- Un archivo POZOS_DDAA_I.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso identificado como industrial, por acuífero. El uso efectivo se basa en esta misma estadística, afectada por un factor de uso definido en los Key Assumptions.

- Un archivo POZOS_DDAA_R.csv, que contiene todos los derechos de riego, entre ellos los derechos que se asumieron para riego correspondientes al artículo 4ºT, que se encuentran fuera del sistema de reparto, y cuyo uso efectivo se resta de los caudales aportados por las subcuencas de cabecera y laterales. El archivo POZOS_DDAA_R_FutOp1.csv corresponde al escenario FuturoOperacion1.

En la presente entrega, la carpeta Datos se encuentra dentro del archivo llamado WEAP_ Elqui_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

8.1.6 Carpeta SIG

El modelo WEAP puede desplegar cualquier cobertura de SIG, por ejemplo en formato .shp, como apoyo para la presentación del esquema topológico.

Para que el modelo, al trasladarse a otro computador, pueda contar con todas las coberturas SIG con que se ha trabajado, se ha configurado una carpeta SIG dentro de la carpeta de resultados del modelo WEAP. La carpeta contiene las coberturas que se listan en la Tabla 8.14.

Tabla 8.14
Coberturas SIG que acompañan el modelo WEAP Elqui

NOMBRE COBERTURA	CONTENIDO
ACUIFEROS	acuíferos modelados
CANALES	canales reales
EMBALSES	embalses modelados
FONDO_ELQUI	imagen de fondo de la cuenca
POZOS_ELQUI_2014	pozos del CPA 2014
SUBCUENCAS	subcencas modeladas
ZR_CIREN_2011	áreas cultivadas según catastro frutícola CIREN 2011
ZR_NO_CIREN	áreas cultivas complementarias al catastro CIREN (fuente modelo MAGIC 2011)
ZR_NO_CIREN_NUEVA2014	áreas cultivas nuevas complementarias al catastro CIREN según imágenes satelitales 2014

En la presente entrega, la carpeta SIG se encuentra dentro del archivo llamado WEAP_Elqui_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

8.2 Regla de operación del sistema Elqui

Para cumplir con el objetivo de simular escenarios futuros, tanto un escenario base como los escenarios de operación futura, es necesario conocer alguna regla de operación del sistema hídrico. Para ello, fue necesario interiorizarse de la manera en que la Junta de Vigilancia determina los desmarques, que son los que finalmente definen la forma en que se opera el sistema.

Los datos que la Junta de Vigilancia entregó al respecto, fueron fundamentalmente los siguientes:

- Los criterios en base a los cuales se determinan los desmarques:
    - Altura de nieve del año y del año anterior
    - Volumen esperado de escorrentía en Elqui en Algarrobal
    - Volumen esperado de escorrentía en el río La Laguna en entrada embalse La Laguna
    - Castigo de los volúmenes esperados de escorrentía en función del año anterior respecto al actual

- La estadística de desmarques, tanto anuales como promedio mensual, históricos, individualizados para cada sector de la cuenca (Turbio, Cochiguaz, Claro, Elqui sobre Puclaro, Elqui en Puclaro bajo embalse, Elqui Bajo y Cuenca Elqui), desde el año 2000 hasta el año 2014.

- Una estadística de altura de nieve, desde agosto 1992 hasta 2014, sólo falta el año 2002.

- La estadística completa de operación de los embalses La Laguna y Puclaro, desde el año 2000 hasta el año 2014.

Además, se contó con información de desmarques entregada por la Junta de Vigilancia el año 2011, y con la estadística de desmarques publicada en el estudio de modelación de Luis Arrau (2003), de modo que se dispuso de esta información desde 1956 hasta agosto de 2014.

El trabajo que se presenta a continuación, fue llevado a efecto con el apoyo de la Junta de Vigilancia, entregado en reuniones tanto presenciales como por videoconferencia en Skype.

8.2.1 Consideraciones previas

a) Correlaciones entre altura de nieve y escorrentía observada

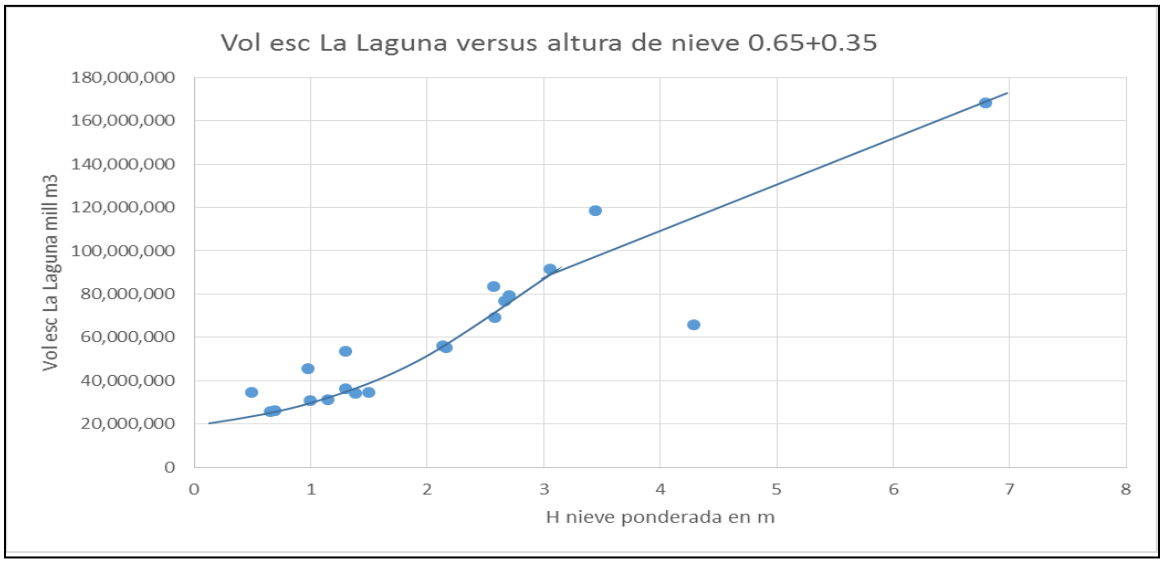
En base a los datos recibidos por la JV y las estadísticas de volumen escurrido en Elqui en Algarrobal obtenida de la DGA, en primer lugar se buscó correlaciones entre la altura de nieve y la escorrentía. El análisis de correlaciones mostró lo siguiente:

- **Volumen de escorrentía río La Laguna sobre embalse La Laguna, con la altura de nieve**

Para la escorrentía calculada a la entrada del embalse La Laguna, la mejor correlación entre volumen de escorrentía observado del año venidero y altura de nieve se obtiene considerando la altura de nieve del año actual ponderada por un factor de 0,65 y la altura del año anterior ponderada por un factor de 0,35. Sin embargo, hay un proceso importante de histéresis.

La relación que se configuró entre ambas variables, que se muestra en la Figura 8.1, fue la siguiente: exponencial para valores bajos, y lineal para valores altos. La relación exponencial para valores bajos busca no sobreestimar el volumen esperado de escorrentía, dado el fuerte proceso de histéresis.

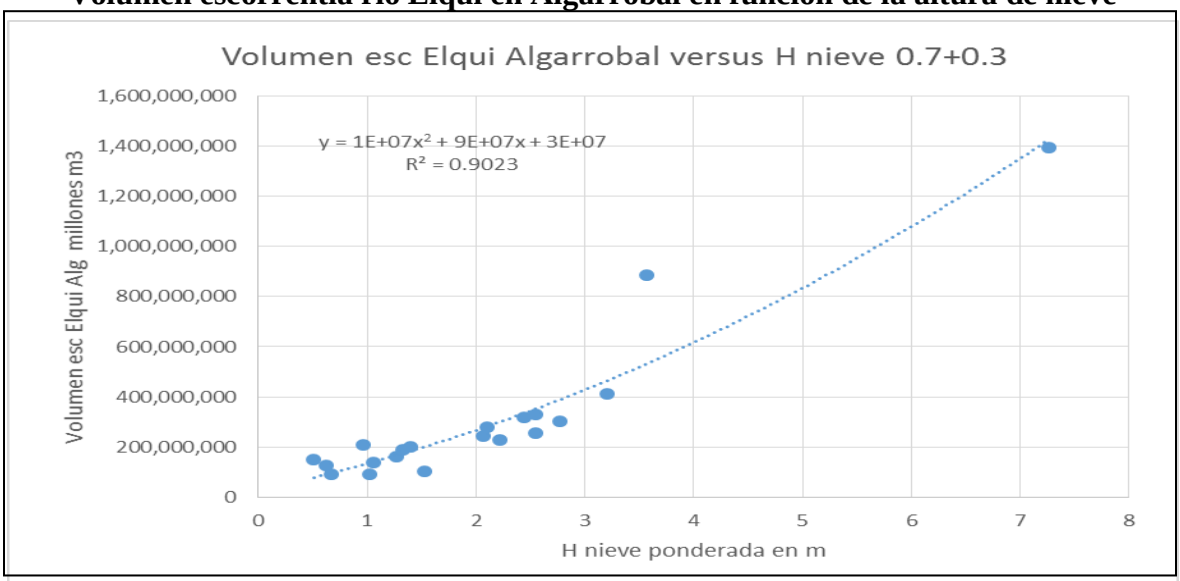
Figura 8.6
Relación entre volumen de escorrentía río La Laguna y altura de nieve



- **Volumen de escorrentía Elqui en Algarrobal, con la altura de nieve**

Para la escorrentía observada en Elqui en Algarrobal, la mejor correlación entre volumen observado de escorrentía del año venidero y altura de nieve, se obtiene considerando la altura de nieve del año actual ponderada por 0,7 más la del año anterior por 0,3. Sin embargo, también se observa un proceso de histéresis. Además, se puede decir que la escorrentía en este punto está alterada por el riego de aguas arriba, e incluye el aporte del río Claro, también alterado, por lo que se esperaba que la nieve medida en el embalse La Laguna no fuera un buen predictor del volumen de escorrentía en este punto.

Figura 8.7
Volumen escorrentía río Elqui en Algarrobal en función de la altura de nieve



- **Comentario acerca del análisis**

En las figuras arriba mostradas, se puede apreciar que hay una relación entre el volumen de escorrentía medido y la altura de nieve ponderada del año y año anterior.

Sin embargo, también se observa que la relación entre desmarque y volumen de escorrentía es precaria (ver figuras 8.8, 8.9, 8.10, 8.12, 8.13), seguramente porque la altura de nieve del año y del año anterior aún no es suficiente para explicar fenómenos de histéresis que se producen en la cuenca, y que se manifiestan durante largos períodos de sequía o de humedad. La relación resulta mejor para La Laguna sobre embalse (cabecera) que para Elqui en Algarrobal.

b) Correlaciones entre volumen de desmarque y escorrentía esperada

A continuación, se efectuaron correlaciones entre los desmarques anuales, calculados en base a un promedio ponderado de los desmarques por sectores, y el volumen esperado de escorrentía, obtenido a partir de las curvas definidas en el acápite anterior. Las correlaciones intentadas fueron las siguientes:

- **Volumen desmarque en función de la escorrentía esperada en Elqui en Algarrobal**

La escorrentía esperada de Elqui en Algarrobal se obtuvo de la relación anterior. Se observó que no hay una correlación satisfactoria entre desmarques y la escorrentía esperada para el río Elqui en Algarrobal. La correlación con la escorrentía medida es mejor, sin embargo, al inicio de la temporada, sólo se puede contar con una escorrentía esperada. Lo señalado no cambia al considerar por separado los períodos sin y con embalse Puclaro, como se puede apreciar en los gráficos a continuación. Además, se observa que para volúmenes reducidos de escorrentía (épocas de sequía), la relación está indeterminada.

Figura 8.8
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en Elqui en Algarrobal, período 1992-2013

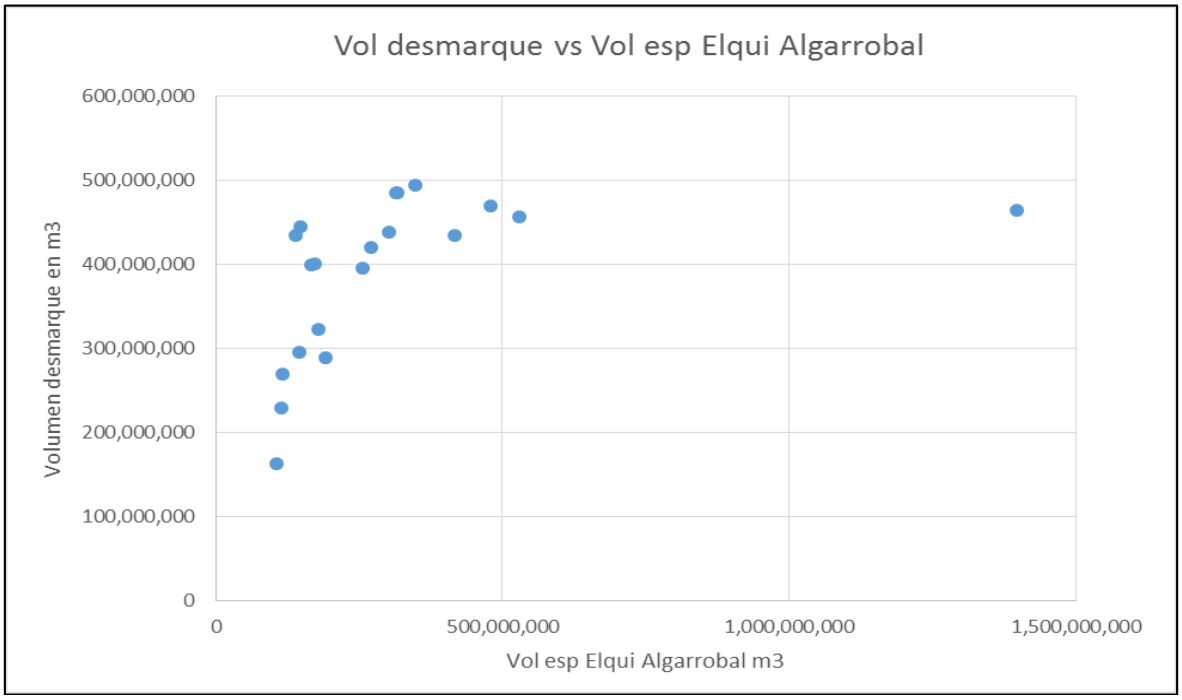


Figura 8.9
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en Elqui en Algarrobal, período 1992-1999 sin Puclaro

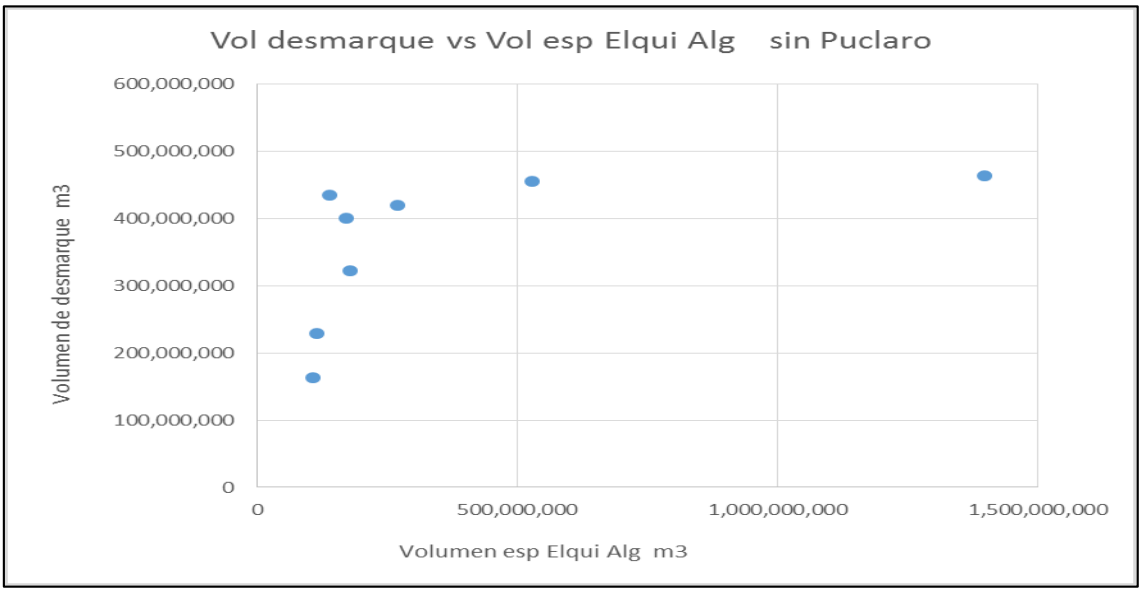
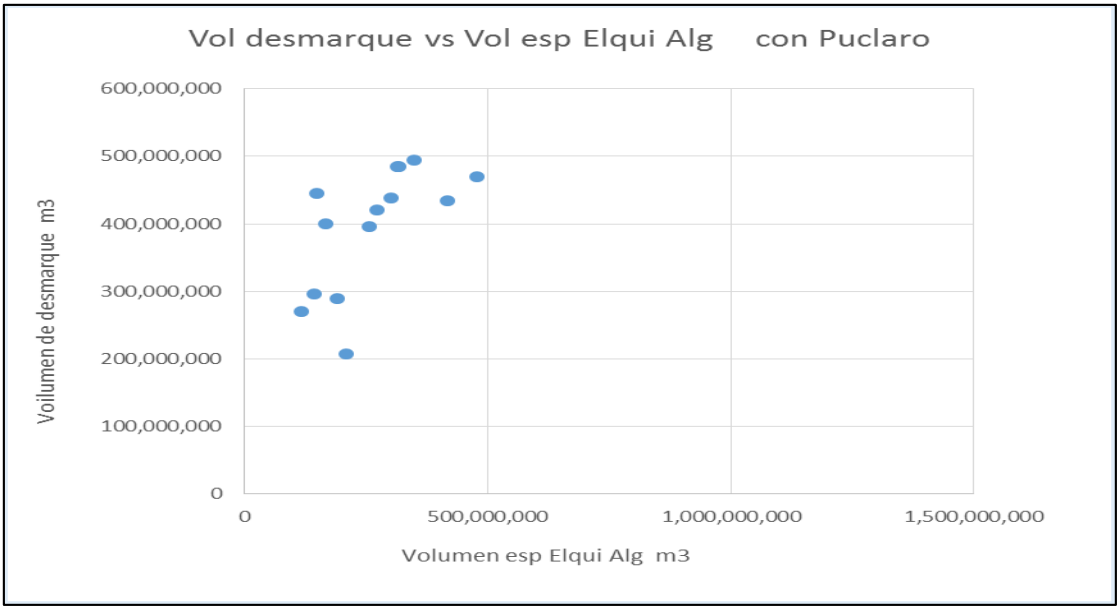


Figura 8.10
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en Elqui en Algarrobal, período 1999-2013 con Puclaro



- **Volumen desmarque en función de la escorrentía esperada en el río La Laguna**

De acuerdo con los gráficos a continuación, se puede observar que la correlación entre desmarques y la escorrentía esperada para el río La Laguna a la entrada del embalse La Laguna, es mejor que la que se presenta para Elqui en Algarrobal. Sin embargo, se mantiene la misma indefinición de la relación en la zona de desmarques bajos.

Figura 8.11
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en La Laguna, período 1992-2013

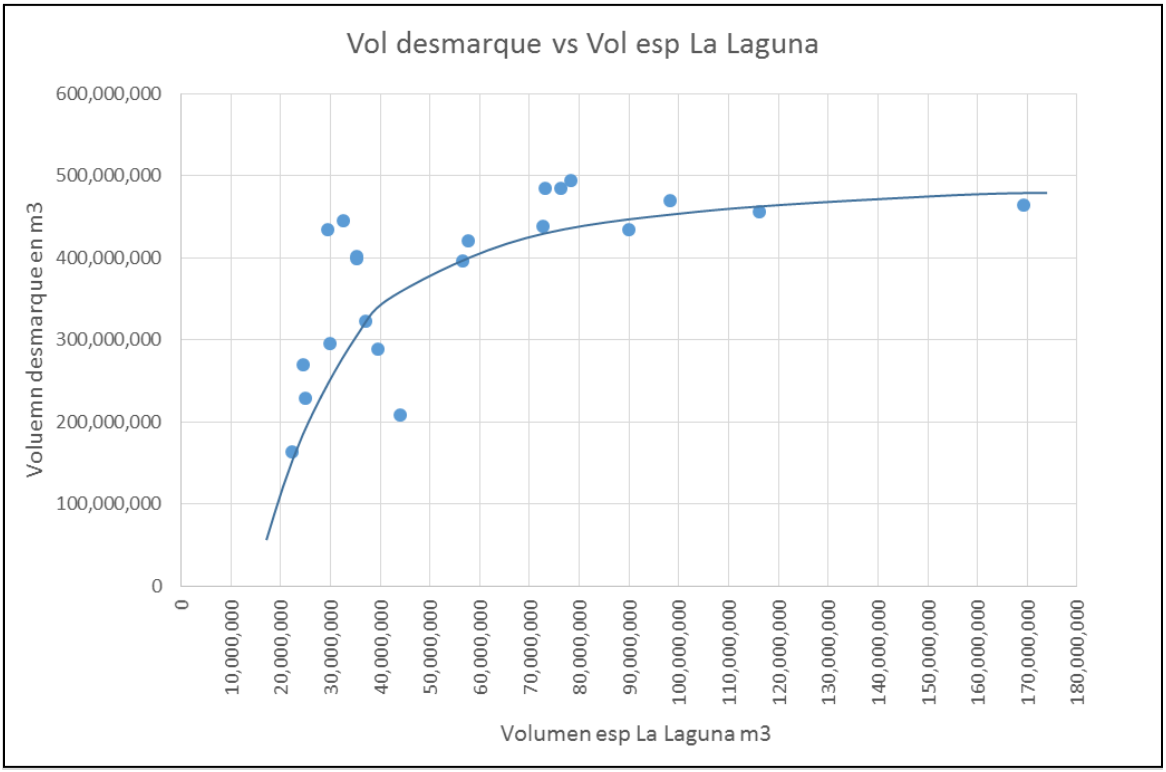


Figura 8.12
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en La Laguna, período 1992-1999, sin Puclaro

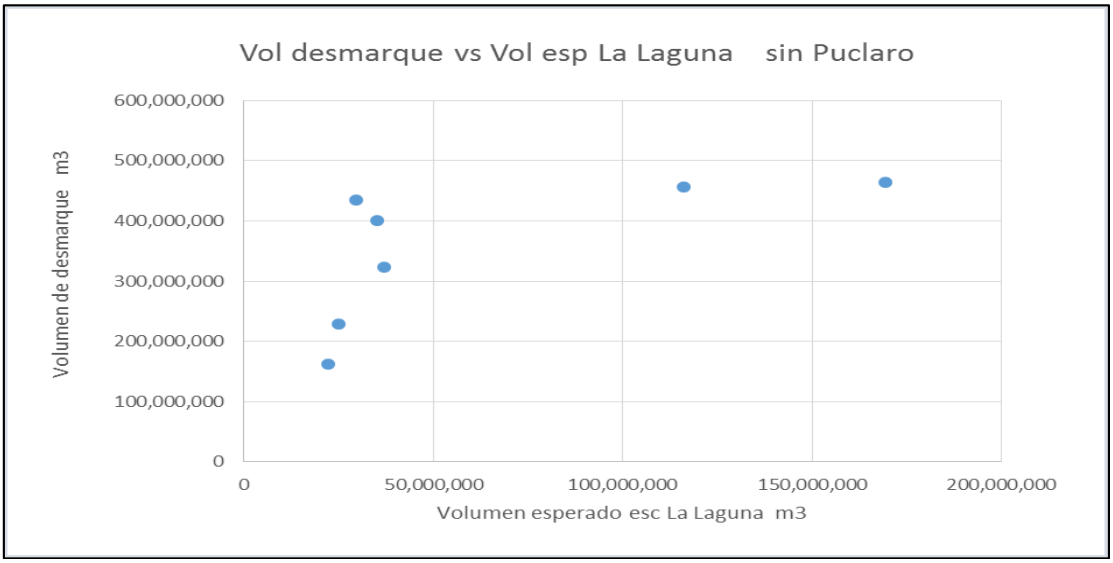
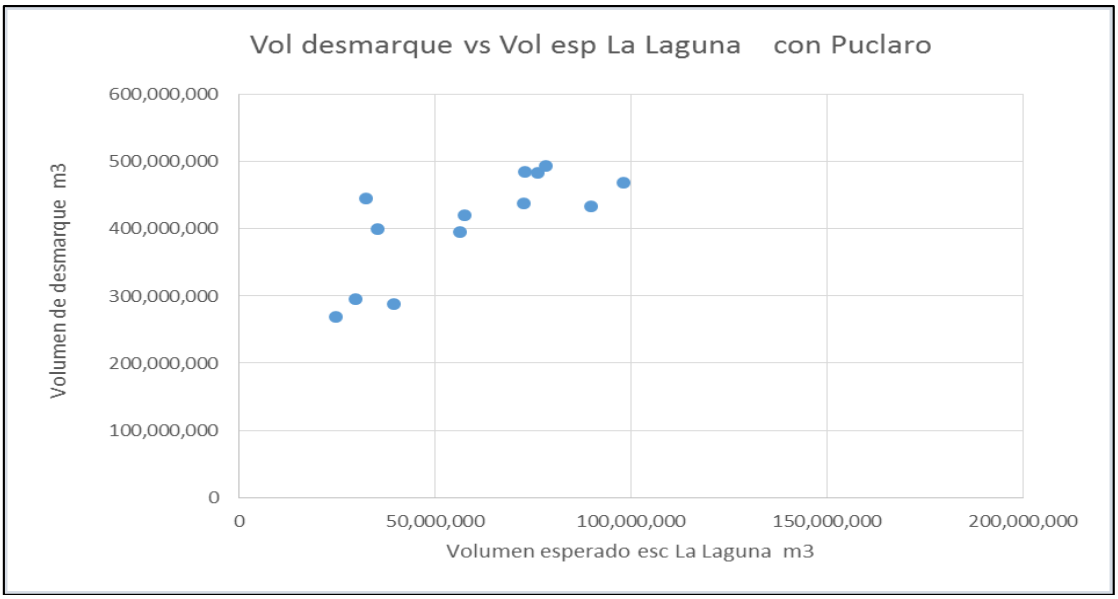


Figura 8.13
Volumen de desmarque en función del volumen esperado de escorrentía en La Laguna, período 1999-2013, con Puclaro



- **Comentario acerca del análisis**

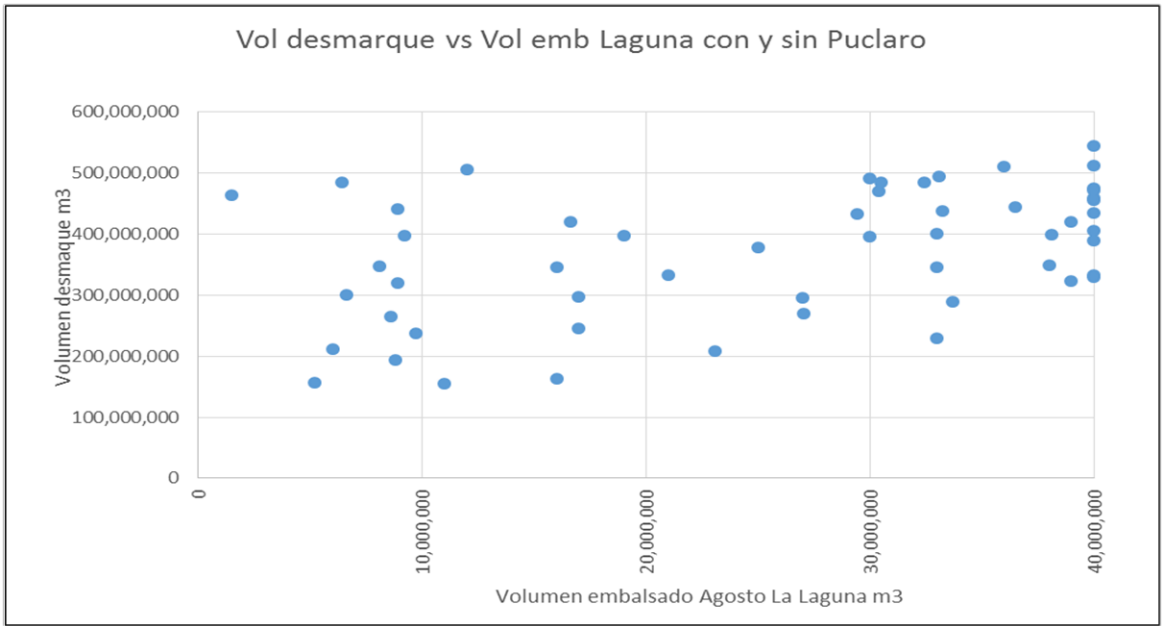
Según se puede observar en las figuras, hay una relación, aunque relativamente precaria, entre el volumen de desmarque y el volumen de escorrentía esperada en La Laguna. La relación con Elqui en Algarrobal es más precaria aún, pues es inespecífica en el rango de valores bajos.

c) Correlaciones entre volumen de desmarque y volumen embalsado

- **Volumen de desmarque en función del volumen embalsado a fines de agosto en embalse La Laguna**

No se encontró ninguna relación entre ambas variables, lo que muestra que el volumen embalsado en el embalse La Laguna escasamente es un criterio para la determinación del desmarque.

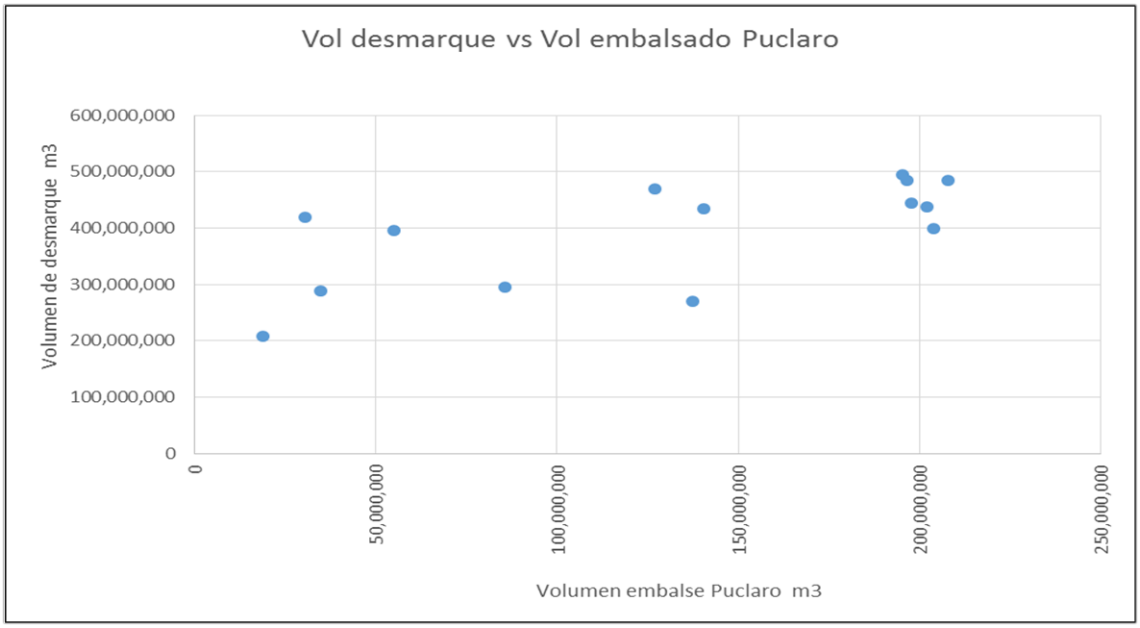
Figura 8.14
Volumen de desmarque en función del volumen embalsado en agosto en Embalse La Laguna



- **Volumen de desmarque en función del volumen embalsado a fines de agosto en embalse Puclaro**

La relación entre ambas variables, si bien no es inexistente, tampoco presenta un criterio claro en base al cual se las pueda asociar. Se observa que el desmarque ha sido grande con volúmenes embalsados relativamente pequeños (lo que muestra que se espera una buena escorrentía anual), y al revés, a veces ha sido pequeño con volúmenes embalsados relativamente grandes. De todas formas, la relación es inexistente para volúmenes de desmarque bajo 300 millones de m^3 (37,5%). También muestra que con el embalse lleno, nunca se desmarcó menos que 400 millones de m^3 (50%).

Figura 8.15
Volumen de desmarque en función del volumen embalsado en agosto en Embalse La Laguna



- **Comentario acerca del análisis**

Finalmente se estableció que no hay una relación clara entre el desmarque y el volumen embalsado en los embalses al inicio de la temporada. Esto muestra que el desmarque de cada año en realidad se basa principalmente en el volumen de escorrentía esperado natural del sistema, el cual se castiga en base a los efectos esperados de años anteriores, más que en el volumen embalsado en el sistema de embalses. Sin embargo, en los últimos años de sequía, el volumen del embalse Puclaro ha sido clave para complementar la escorrentía natural del sistema, y, de hecho, ha cumplido una importante función de regulación interanual.

En la curva de la figura 8.16, se observa que hay un punto de cambio de tendencia alrededor de los 2,5 m de nieve. Esta altura de nieve es considerada por la Junta de Vigilancia como característica de un año normal. En los gráficos, en efecto, esta altura de nieve constituye una especie de límite entre los desmarques menores que dependen de la altura de nieve, y los mayores que dependen mucho menos de la altura de nieve.

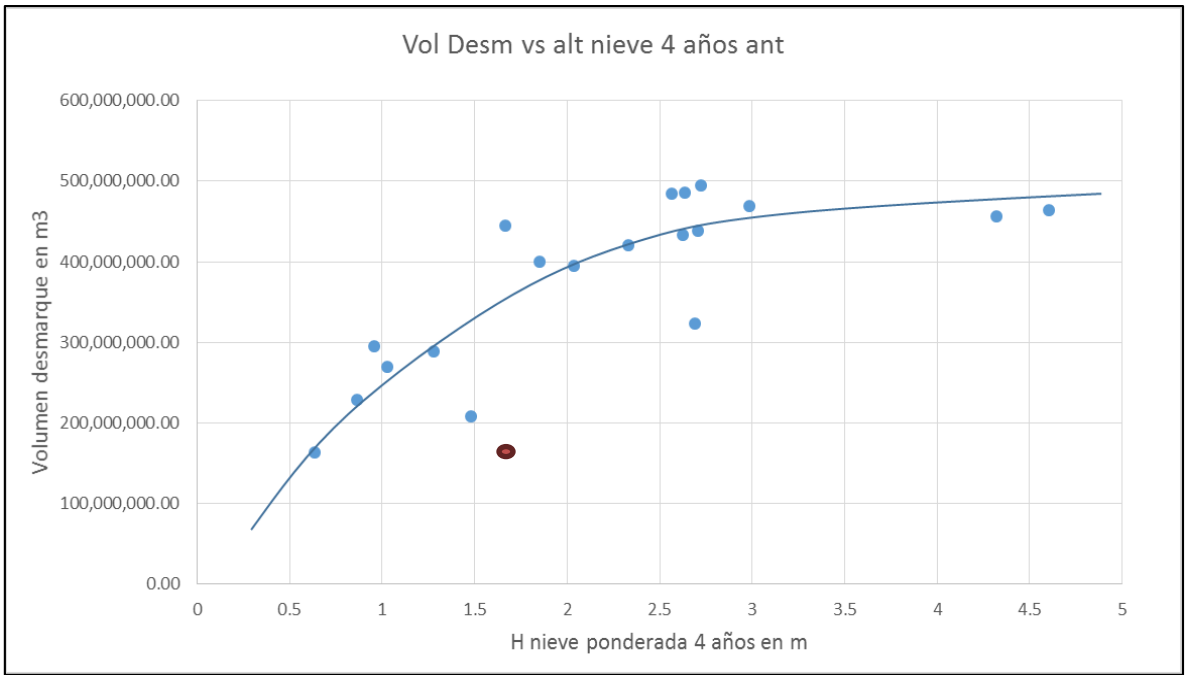
d) Correlación directa entre altura de nieve y desmarque

Por lo señalado, se decidió explorar la relación directa entre los desmarques y la altura de nieve, tanto del año actual como combinaciones con los años anteriores.

La mejor relación se encontró con una combinación de 4 años anteriores, con ponderaciones respectivas de 0.42 para el año actual, y 0.37,0.16 y 0.05 para los años sucesivamente anteriores.

Esta exploración dio el resultado de la Figura 8.16 adjunta.

Figura 8.16
Volumen de desmarque en función de la altura de nieve ponderada de 4 años



Se observa que, salvo por dos puntos de desmarque muy bajo que no siguen esta tendencia, los demás puntos muestran una relación que queda representada en forma segura por la curva trazada en el gráfico. No obstante lo señalado, tampoco hay experiencia previa para períodos de prolongada sequía, durante el período de análisis. El punto rojo corresponde al desmarque actual, 2013/2014, en que el embalse Puclaro está a punto de secarse (18 millones de m^3), y no está claro si dicho desmarque responde a un exceso de precaución, o si en efecto es una muestra más de la histéresis del sistema.

8.2.2 Regla de operación del sistema

a) Obtención del desmarque preliminar

En base al análisis precedente, se ha desprendido la siguiente regla de operación, que fue necesario establecer para poder simular escenarios futuros:

i) Estimar el volumen esperado de escorrentía del río La Laguna en función de la nieve del año (*0.65) y año anterior (*0.35), y luego estimar el

desmarque anual a partir del volumen esperado de escorrentía en La Laguna, en base a la curva de la Figura 8.11.

ii) Estimar el desmarque anual a partir de la altura de nieve ponderada de los últimos 4 años, de acuerdo con la curva de la Figura 8.16.

iii) Tomar el promedio entre ambos. Este valor entrega un valor preliminar de desmarque.

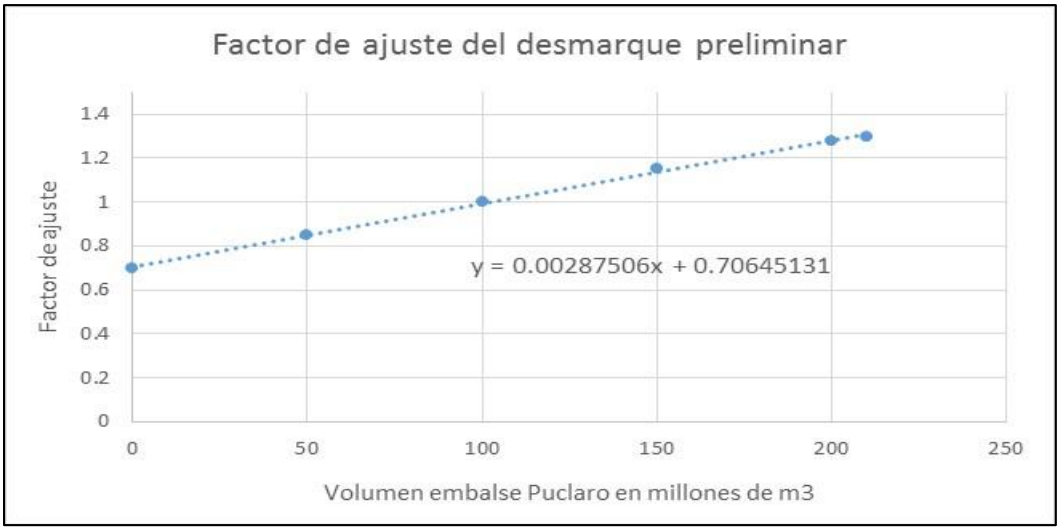
Este factor de desmarque preliminar da cuenta de la escorrentía del año, en función de las condiciones anteriores, pero no toma en cuenta el estado y el aporte que puede hacer el embalse Puclaro.

b) Ajuste por influencia del estado del embalse Puclaro

Observando el cumplimiento del desmarque preliminar en los canales de aguas arriba y aguas abajo del embalse Puclaro en años posteriores a 2014, que se simularon como de sequía, hubo necesidad de ajustar el desmarque (disminuirlo a un valor menor que 1), para dejar suplidos ambos sectores en forma relativamente pareja, similar a la histórica.

Se observó entonces, que el estado del embalse Puclaro también tiene un efecto sobre el desmarque, aportando volumen cuando está alto, y castigando el desmarque cuando está bajo. El hecho de que el embalse Puclaro esté bajo, necesariamente señala la existencia de un período de sequía, con lo cual se requiere un ajuste hacia abajo del desmarque preliminar (que refleja la escorrentía). Por otro lado, un volumen alto del Puclaro es consecuencia de algunos años húmedos, y permite complementar el desmarque con una parte del volumen de aguas embalsadas. De ello se desprende un factor de ajuste del desmarque preliminar, que se obtiene en función del estado del embalse Puclaro. Se obtuvo así una curva de ajuste, la que se calibró contra lo que la Junta de Vigilancia entregaría como desmarque en cada situación. Se llegó, finalmente, a la curva de ajuste de la Figura 8.17.

Figura 8.17
Curva de ajuste del desmarque preliminar



c) Distribución espacial del desmarque entre sectores

De acuerdo con lo que aplica la Junta de Vigilancia del Elqui desde el inicio de la sequía, el desmarque se ha mantenido exactamente igual en todos los sectores de la cuenca del Elqui (lo que no ha sido así históricamente, pero a futuro sí se mantendría este criterio). Por esa razón, para todos los escenarios futuros, se ha adoptado este mismo criterio.

d) Distribución temporal del desmarque entre los meses del año

La distribución del desmarque anual antes determinado, entre los diferentes meses del año, se ha establecido en función de la variación estacional de la demanda agregada de cada uno de los sectores de administración: Turbio, Cochiguaz, Claro, Elqui Alto, Elqui Puclaro y Elqui Bajo. Se obtuvieron los factores de distribución mensual del desmarque que se presentan en la Tabla 8.15. Se observa que bajo el embalse Puclaro, la distribución se ha mantenido pareja a lo largo de todo el año, de acuerdo con lo informado por la Junta de Vigilancia.

Tabla 8.15
Distribución temporal del desmarque

Mes	Turbio	Cochiguaz	Claro	Elqui Alto	Puclaro	Elqui Bajo
Sep	102.96	99.78	95.91	99.63	100	100
Oct	159.49	158.46	149.40	154.23	100	100
Nov	182.06	181.37	170.71	176.10	100	100
Dic	208.70	207.90	196.08	202.73	100	100
Ene	202.17	196.92	182.83	191.79	100	100
Feb	155.85	158.05	151.77	151.83	100	100
Mar	91.91	106.27	114.89	100.50	100	100
Abr	16.55	35.61	56.60	35.42	100	100
May	10.87	3.38	12.60	14.59	100	100
Jun	7.13	2.65	9.45	8.11	100	100
Jul	10.05	2.73	10.84	12.96	100	100
Ago	52.27	46.89	48.92	52.11	100	100
Promedio	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

e) Planilla para obtención de desmarque

En el Anexo Digital del Capítulo 8.2 se entrega una planilla llamada Desmarques para JV.xlsx, en la cual están todas las instrucciones para generar un valor de desmarque y distribuirlo espacial y temporalmente, de acuerdo con la regla de operación del sistema aquí descrita.

8.3 Calibración, validación y proyección del modelo

8.3.1 Calibración del modelo

El modelo se calibró para el período 1999-2011, que es el mismo período para el cual había datos de entrada para el modelo MAGIC en el estudio del Plan Maestro.

Para calibrar el modelo se corrió una gran cantidad de escenarios, en que se fueron ajustando los siguientes aspectos:

- Entrega de las pérdidas del agua potable al acuífero AC_COS_01
- Ajustes de coeficientes de percolación de cauces hacia acuíferos
- Contracción del área cultivada hacia atrás en la historia, basada en censos 2007 y 1997, y actualización MAGIC 2011
- Restricción de entregas de caudal a canales derivados basada en las áreas cultivadas y en el caudal efectivamente captado
- Caudal de salida impuesto
- Uso efectivo de los derechos industriales todos al 10%
- Disminución del área de riego ZR_COS_01 al 20% del área original por aumento urbanización
- Disminución del área de riego ZR_COS_03ANU (sólo cultivos anuales) al 50% del área original, por aumento urbanización
- Valor de kc de los cultivos anuales del sector de Culebrón, promedio temporada 0,5.
- Distribución de las pérdidas del canal Bellavista proporcional a las zonas que riega.
- Ajuste de prioridades de zonas de riego para entregas de agua desde canales
- Ajuste de preferencias de suministro desde fuentes (canales y pozos) a zonas de riego
- Entrega de caudales no utilizados por los canales (caudales de devolución), hacia el río en forma indirecta, para evitar que el agua sobrante abandone el sistema y se pierda
- Introducción de un factor de sequía en subcuencas aportantes del río Claro, Quebrada Paihuano y Elqui sobre Puclaro, desde 2010 en adelante.
- Ajustes a la hidrología de entrada: Las subcuencas aportantes a Elqui Bajo y Costa se recalcularon en base a subcuenca Culebrón.
- Se ajustó Kc Vid de pisco para la vid de mesa en ZR_CLA_01 y 02.
- Se ajustó la demanda de la vegetación ripariana.
- Cambio de estadística de desmarques entregada por la JV en 2014, por la estadística de desmarques entregada por la JV en 2011, con ocasión del Plan Maestro. Son diferentes. Para todos los efectos, se trabajó con la estadística recibida en 2011, cuyos valores son coherentes con las mediciones existentes.
- La salida del embalse Puclaro se calcula, para poder respetar el volumen almacenado. Con los desmarques entregados por la Junta de Vigilancia el año 2011, el volumen se reproduce razonablemente bien, incluso al dejar el embalse con entrega libre solamente en función del desmarque establecido.

De esta forma, el proceso de calibración sirvió para comprender el funcionamiento del sistema.

Los gráficos del período de calibración, correspondientes a los cinco tipos de planillas, se presentan en conjunto con los gráficos de validación y del escenario Futuro Base 3, en el Subcapítulo 8.3.4, y en el Anexo Capítulo 8.3.

8.3.2 Validación del modelo

La validación del modelo consistió en continuar con la operación en el período abril 2011 hasta marzo 2014, completando la hidrología y actualizando todos los demás datos de entrada requeridos, y observando si el comportamiento seguía adecuándose al comportamiento del sistema observado en la realidad.

La validación exigió modificar los siguientes aspectos:

- Ajuste en el área de riego de las zonas ZR_COS_01 y ZR_COS_03, debido al aumento de la urbanización.
- Ajustes de la eficiencia de los canales en el sector Elqui Alto (sobre Puclaro), para representar el comportamiento de los acuíferos.
- Ajustes de la hidrología para representar adecuadamente la escorrentía en tiempos de sequía prolongada.
- Ajustes del valor de kc, asumiendo menos riego, por un lado, y riego deficitario, por otro lado, en tiempos de sequía prolongada.

Se obtuvieron los mismos cinco tipos de planillas antes descritos, con todos sus gráficos incorporados, para el período 2011-2014. Los gráficos se presentan en conjunto con el escenario Futuro Base 3, base para la evaluación de los escenarios de operación.

8.3.3 Extensión del modelo: Escenario Futuro Base 3

De común acuerdo con el mandante y con la Junta de Vigilancia, se decidió explorar como primer escenario futuro, el escenario en que después del año 2014 se agregan 3 años secos, y se libera el uso de los acuíferos.

Para realizar dicho análisis, fue necesario previamente generar un escenario base, llamado Futuro Base 3, en el cual se extendió la hidrología de entrada en base a tres años secos. Esto se ha hecho aplicando la nieve acumulada hasta agosto y la hidrología de entrada de los años 2010, 2011 y 2012. En el escenario base, el sistema se opera tal como opera en la actualidad, sin cambios. Los cambios se introducen posteriormente en los escenarios futuros de operación, donde su efecto se evalúa a través de la comparación de resultados con el escenario base.

Para correr el escenario Futuro Base 3, se incorporó la regla de operación preliminar con que se contaba hasta ese momento, que consistía en utilizar el valor mínimo del desmarque obtenido por los dos métodos descritos en el capítulo 8, y luego afectarlo por un factor de

sequía que igualara el porcentaje de cumplimiento en canales de aguas arriba y aguas abajo de Puclaro, factor que resultó de 0,7. En base a dicha regla preliminar, se estimó un desmarque para los siguientes tres años asumidos como secos.

De este modo, el escenario base tiene las siguientes características:

- hidrología de un período de sequía (2010-2013)
- aplicación del factor de sequía hidrológico que se aplica desde el año 2010
- aplicación del factor de sequía kc o reducción de la demanda agrícola que se aplica desde el año 2010, y
- factor de reducción de desmarques para lograr que el desmarque cubra por igual las demandas de los canales arriba y abajo de Puclaro.
- demandas no agrícolas con proyección de crecimiento vegetativo

Los resultados gráficos para el período de calibración, validación y futuro base se presentan en el set de gráficos de los cinco tipos de planillas antes descritos. Los gráficos más relevantes se presentan adjuntos en el texto. Las planillas completas se adjuntan en el Anexo Capítulo 8.3, y se llaman Futuro Base 3.

8.3.4 Resultados gráficos de los escenarios de calibración, validación y FuturoBase3

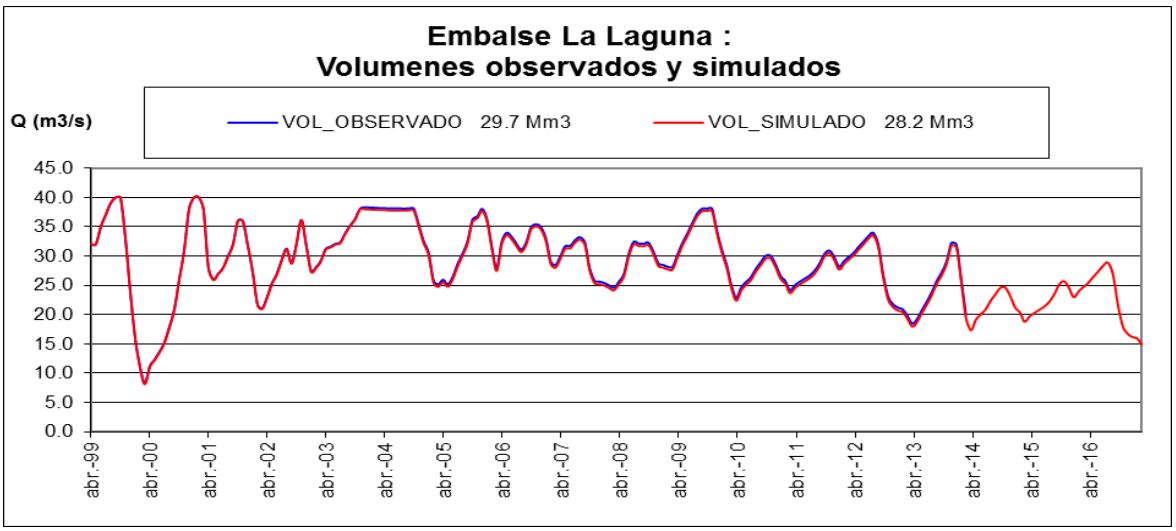
a) Planilla FuturoBase3_Calib_SUP

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración y validación superficial, vale decir, los caudales observados y simulados en los puntos de control. A continuación se presenta el comportamiento de los caudales simulados por el modelo WEAP en tales puntos.

- **Volumen del embalse La Laguna**

Durante el período de calibración y validación, el volumen simulado es comparado con el registro de la Junta de Vigilancia, con el que se hace coincidir totalmente, para obtener el caudal de entrada en forma calculada. En los tres años adicionales simulados, el volumen es el resultado de aplicar la hidrología asumida para dicho período.

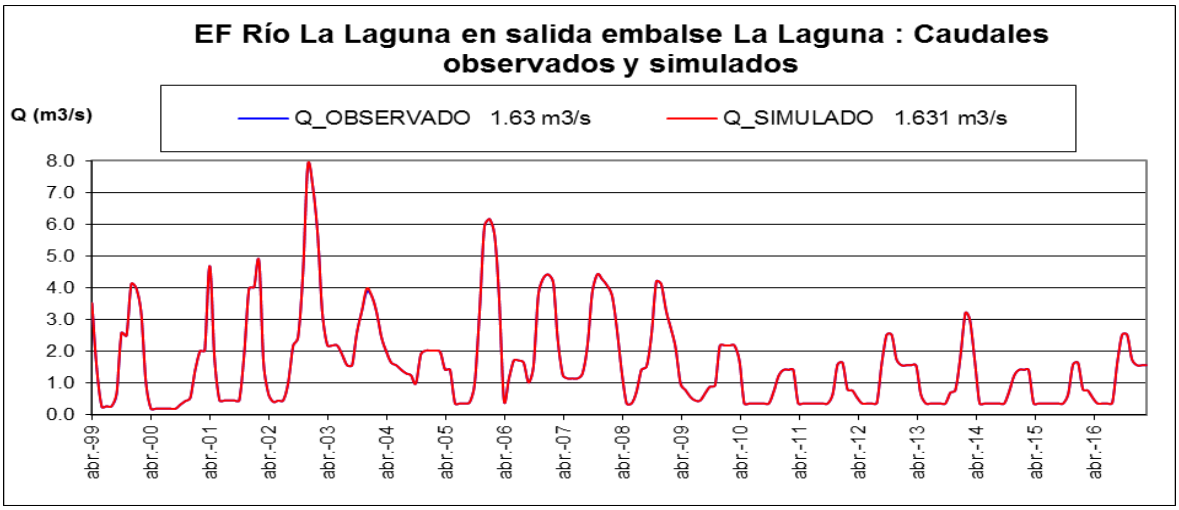
Figura 8.18
Embalse La Laguna



- **Río La Laguna a la salida embalse La Laguna**

En este punto, tanto la DGA como la Junta de Vigilancia llevan un registro fluviométrico. En el modelo se impone la salida del embalse, de acuerdo con el registro de la Junta de Vigilancia, rellenado con la estadística de la DGA, y se calcula la entrada al embalse a partir del dato del volumen. Por ello, la estadística observada de salida del embalse coincide completamente con la estadística modelada. En los tres años adicionales se repite la estadística de los últimos tres años registrados.

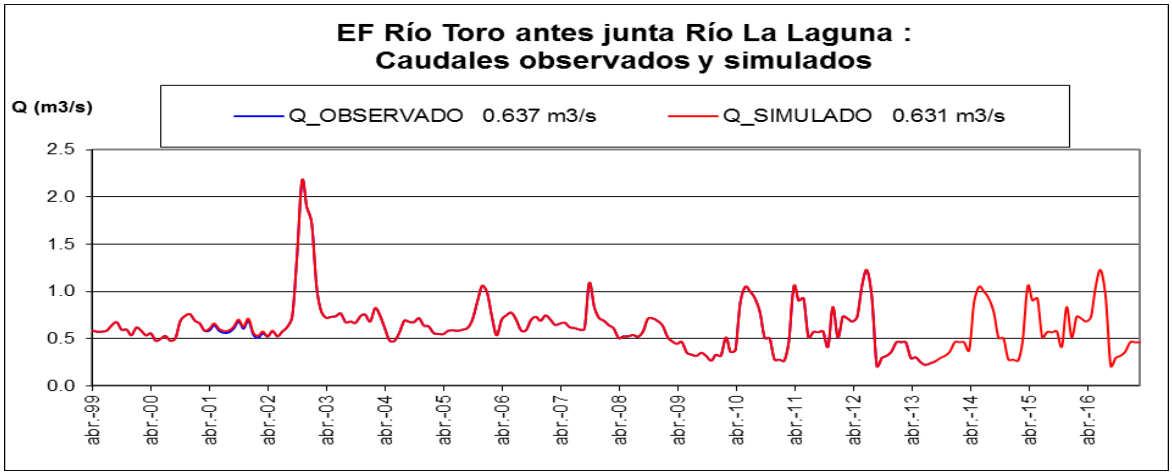
Figura 8.19
Salida embalse La Laguna



- **Río El Toro antes junta La Laguna**

En este punto de cabecera, se cuenta con un registro fluviométrico de la DGA. La estadística es impuesta como estadística de entrada o de cabecera. En los tres años adicionales se repite la estadística de los últimos tres años registrados.

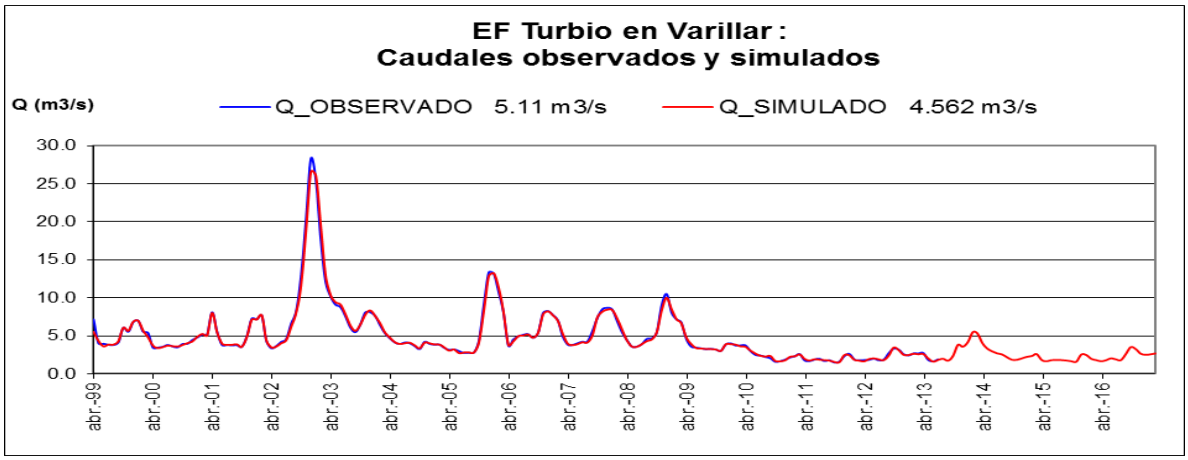
Figura 8.20
Río Toro antes Junta La Laguna



- **Río Turbio en Varillar**

En este punto, hay una estación fluviométrica de la DGA, cuyos valores son impuestos como valores resultantes de la entrada de cabecera y la demanda intermedia. Así, la estadística del aporte intermedio entre la estación río Toro antes Junta La Laguna y Varillar es calculada como ingreso al modelo. En los tres años adicionales se ha reproducido la estadística de los tres últimos años.

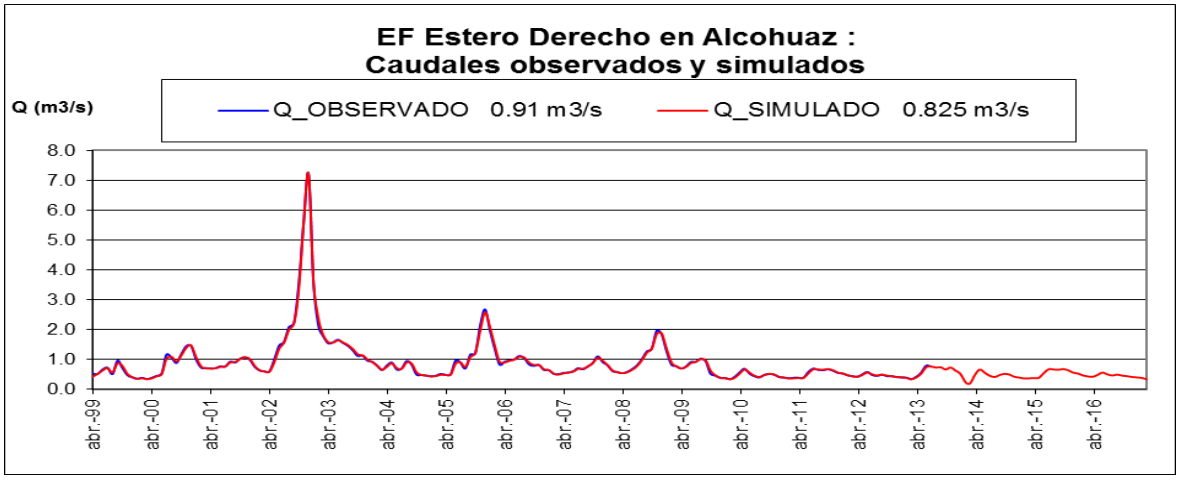
Figura 8.21
Río Turbio en Varillar



- **Estero Derecho en Alcohuaz**

En este punto hay una estación fluviométrica de cabecera de la DGA, cuya estadística es impuesta como caudal resultante de la entrada de cabecera y la demanda de aguas arriba. En los tres años adicionales se ha reproducido la estadística de los tres últimos años.

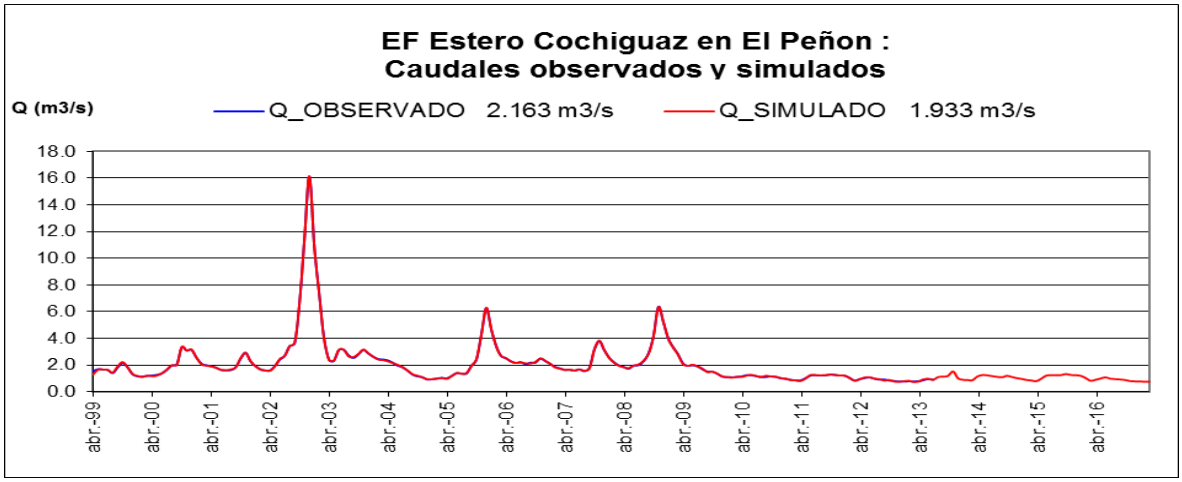
Figura 8.22
Estero Derecho en Alcohuaz



- **Río Cochiguaz en el Peñón**

En este punto hay una estación fluviométrica de la DGA, cuyos caudales son impuestos como resultantes de la entrada de cabecera y la demanda de aguas arriba. En los tres años adicionales se ha reproducido la estadística de los tres últimos años.

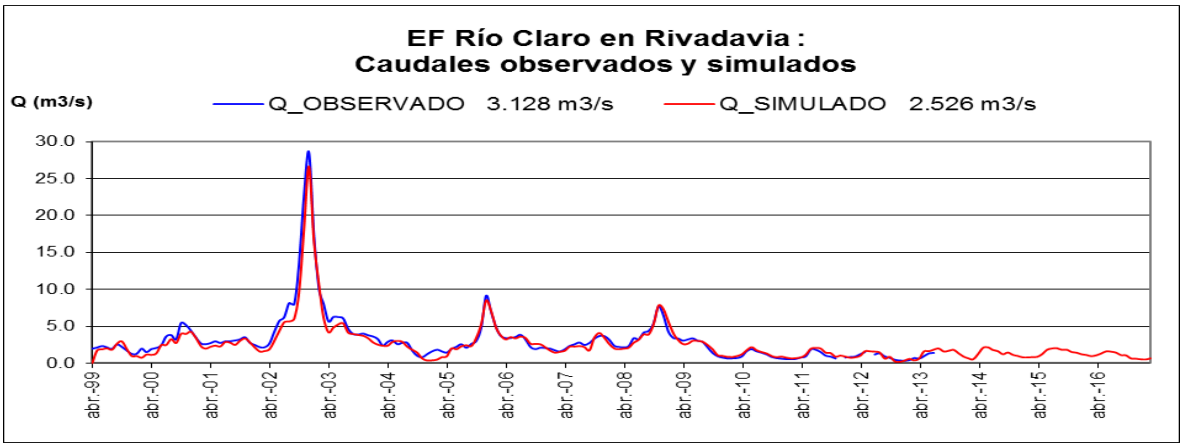
Figura 8.23
Estero Cochiguaz en el Peñón



- **Río Claro en Rivadavia**

Es la primera estación del sistema que es generada libremente por el modelo. Se compara la estadística de la estación fluviométrica de la DGA con la estadística simulada. Se obtiene un valor de Nash-Sutcliffe promedio de 0,95. Los tres años adicionales se obtienen manteniendo las condiciones de operación del modelo.

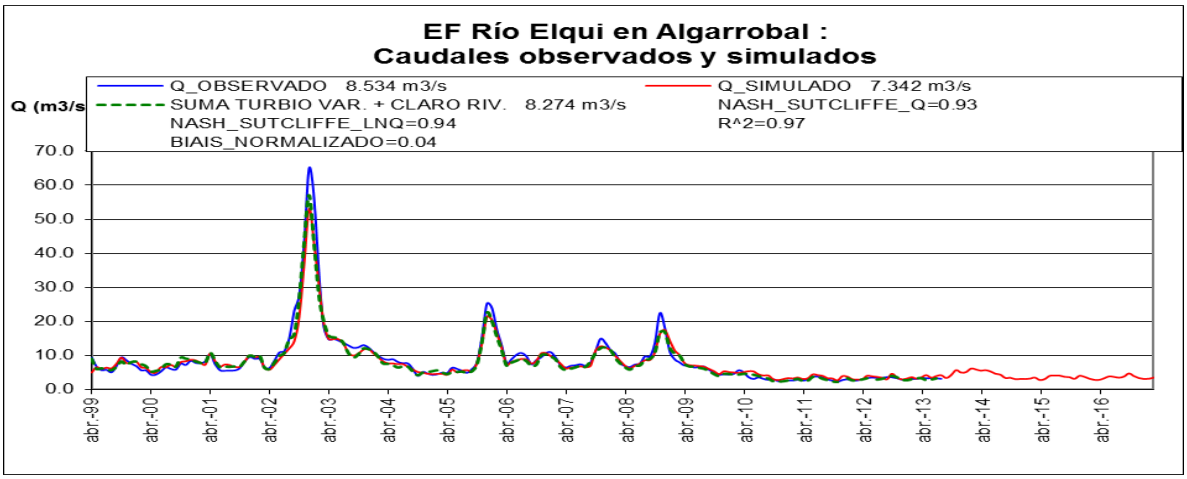
Figura 8.24
Río Claro en Rivadavia



- **Río Elqui en Algarrobal**

En este punto hay una estación fluviométrica de la DGA. Se compara la suma de las estadísticas de la DGA, de Turbio en Varillar y Claro en Rivadavia, con la estadística Elqui en Algarrobal de la DGA, y con la estadística simulada. Ésta presenta un índice de Nash-Sutcliffe de 0,94. Para los tres años adicionales, el modelo opera bajo las mismas condiciones de antes.

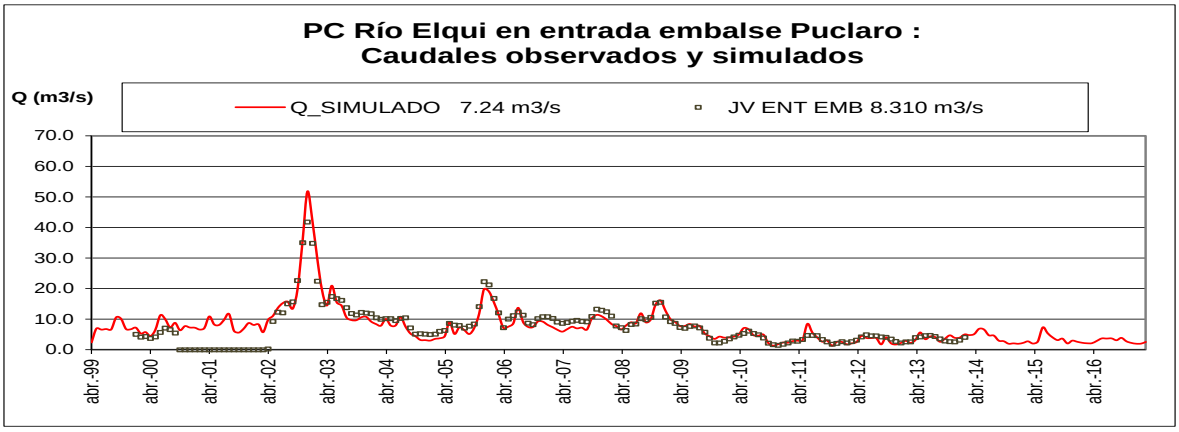
Figura 8.25
Río Elqui en Algarrobal



- **Punto de control río Elqui entrada Embalse Puclaro**

En este punto se compara el caudal que genera el modelo WEAP con la entrada que calcula la Junta de Vigilancia, en base a un balance del embalse a partir del caudal de salida y del volumen almacenado. Se observa que en el período 2003 a 2008, el caudal de entrada calculado por la Junta de Vigilancia es mayor que el caudal de entrada simulado por WEAP. Ello podría deberse a vertientes existentes en el trayecto, de las cuales no hay registros ciertos, por locual se trabajó con los caudales del WEAP. Los últimos 3 años (futuros) resultan de la modelación.

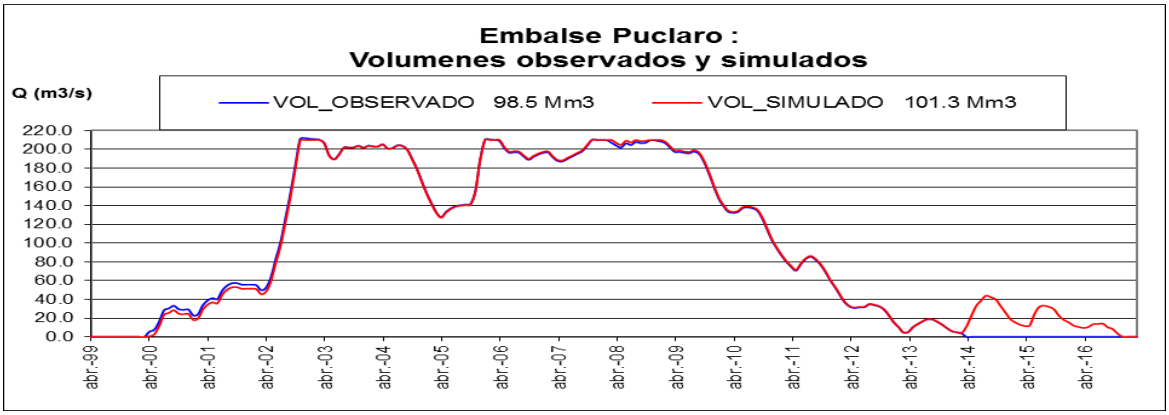
Figura 8.26
Entrada embalse Puclaro



- **Volumen del embalse Puclaro.**

En este embalse, se compara el volumen registrado por la Junta de Vigilanciacon el volumen simulado por WEAP. Sin embargo, es necesario señalar que el volumen del embalse en la modelación fue impuesto, debido a que esta variable se consideró más segura que el caudal de salida y el caudal de entrada que calcula la Junta de Vigilancia. En los últimos 3 años, el volumen del embalse resulta de aplicar a la salida un caudal similar al que la Junta de Vigilancia ha indicado que extrae, en los últimos 3 años.

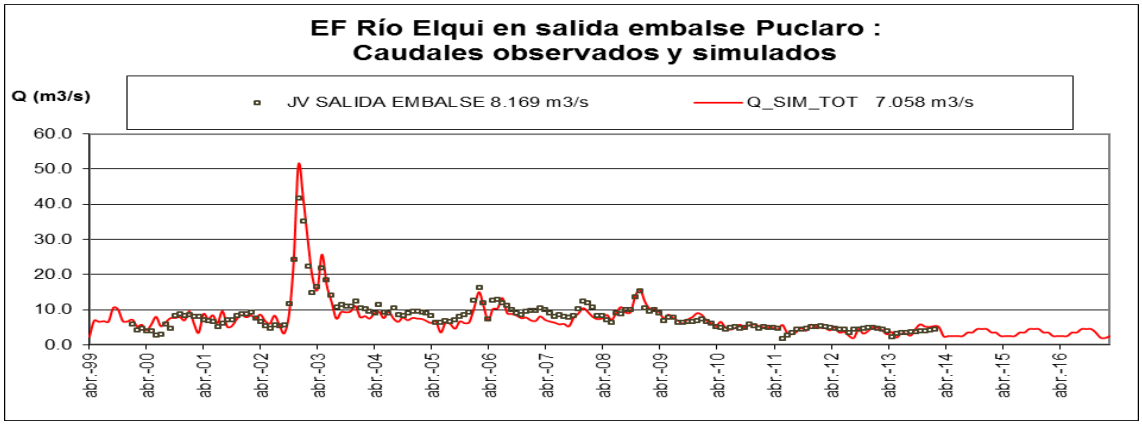
Figura 8.27
Volumen embalse Puclaro



- **Estación fluviométrica salida embalse Puclaro**

Esta estación es controlada por la Junta de Vigilancia. Los caudales registrados en esta estación se presentan en el siguiente gráfico como referencia. En el período 2003-2008, el caudal simulado, sin embargo, resultó menor que el caudal registrado por la Junta de Vigilancia, lo que concuerda con entradas al embalse también menores que las que calcula la Junta de Vigilancia. En los tres años adicionales se aplicó una salida similar a la de los últimos tres años, informada por la Junta de Vigilancia.

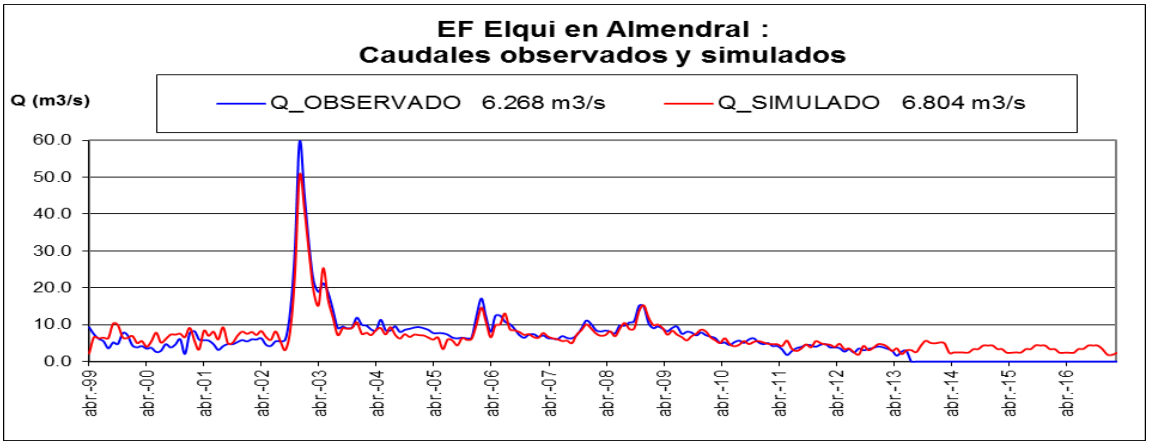
Figura 8.28
Salida embalse Puclaro



- **Río Elqui en Almendral**

En este punto hay una estación fluviométrica de la DGA. El caudal de esta estación siempre fue difícil de calibrar, debido a las grandes fluctuaciones que sufre el caudal a la salida del embalse Puclaro. No obstante lo señalado, el caudal está bastante bien representado, salvo en el período inicial del embalse, y el año 2004-2005. El índice de Nash-Sutcliffe alcanza el valor de 0,89. En los tres años adicionales, el caudal es el resultado de la operación del modelo.

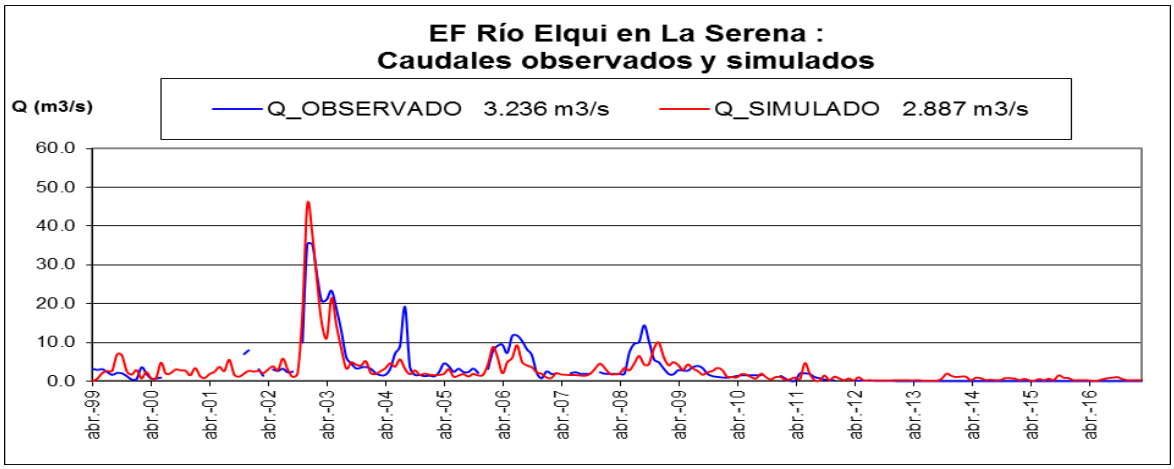
Figura 8.29
Río Elqui en Almendral



- **Río Elqui en La Serena**

En este punto hay una estación fluviométrica de la DGA. El punto representa uno de los cierres de la cuenca del Elqui, y muestra el agua que se escapa al mar. El modelo representa bastante bien la señal, incluso la señal de flujo base que tiene esta estación, y que sólo se extingue, relativamente, con la prolongada sequía. El índice de Nash-Sutliffe resulta de 0,84.

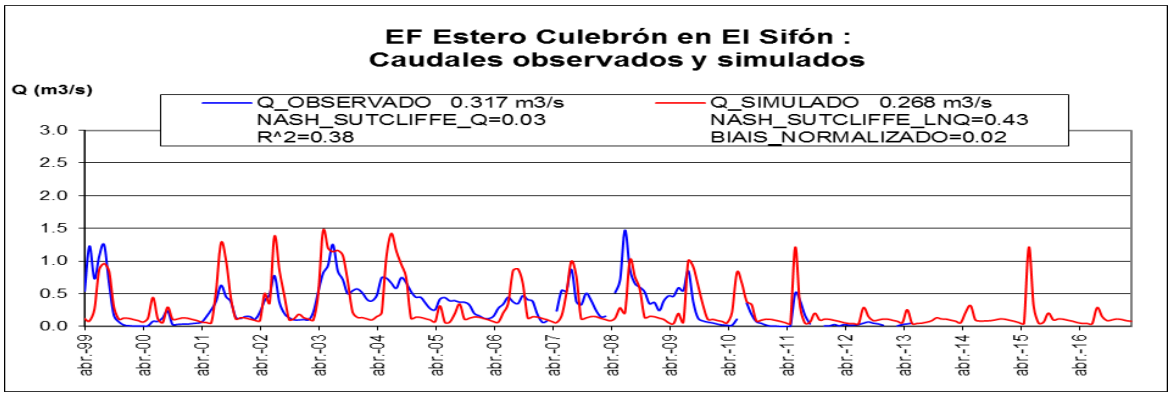
Figura 8.30
Río Elqui en La Serena



- **Estero Culebrón en el Sifón**

En este punto hay una estación de la DGA. El punto representa el otro cierre de la cuenca del Elqui, pues el agua que aquí escurre tiene relación con los aportes desde la cuenca del Elqui por los canales Bellavista y Herradura, con las pérdidas desde ambos canales que alimentan los acuíferos correspondientes, con los aportes desde la subcuenca Pan de Azúcar, los derrames desde la zona de riego Pan de Azúcar y los afloramientos desde el acuífero Culebrón. Se observa que la señal es bastante compleja, y no obstante ello, está relativamente bien reproducida. En los tres años adicionales, los caudales son los que entrega la modelación.

Figura 8.31
Estero Culebrón en El Sifón



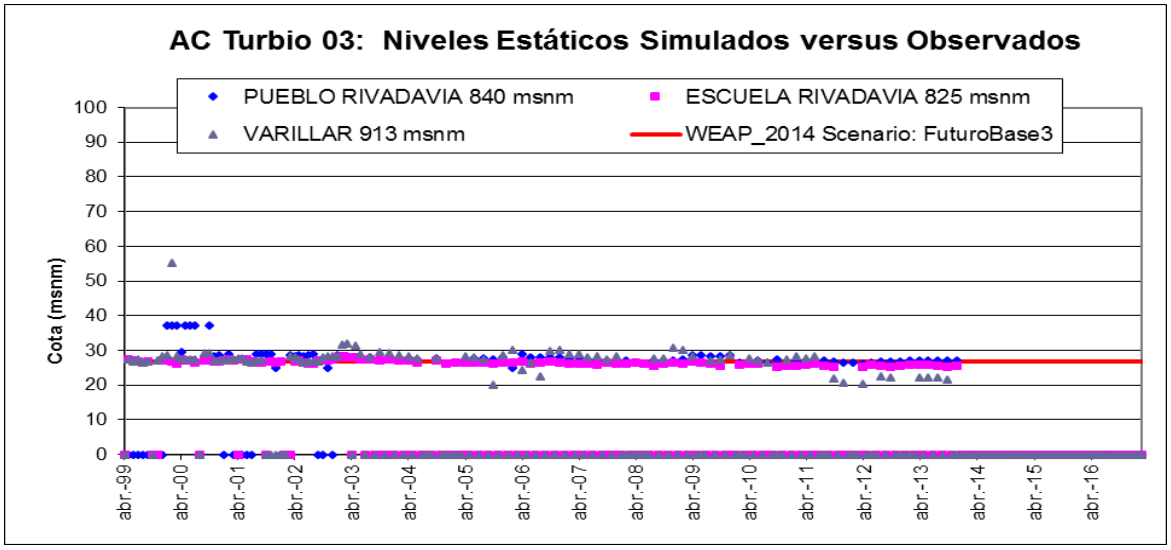
b) Planilla FuturoBase3_Calib_SUB

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración y validación subterránea, vale decir, todos los resultados de niveles observados y niveles simulados en los acuíferos en los cuales hay algún pozo de observación de la red de la DGA. El comportamiento modelado en los acuíferos que tienen control de nivel, se ilustra en las figuras a continuación. El comportamiento de los demás acuíferos, que no tienen control de nivel, también se muestra en esta planilla, y además, los datos de todos los acuíferos se muestran en la planilla Balance_AC.Para los tres años adicionales de sequía, el comportamiento simulado de los acuíferos responde a las condiciones de modelación, prolongadas sin cambios, hacia el futuro.

- **Acuífero del río Turbio**

El acuífero del río Turbio se dividió en 3 partes, Turbio 1, 2 y 3. En todos los tramos, el acuífero está directamente ligado al río Turbio, y es alimentado tanto por el cauce como con las pérdidas desde los canales, como se verá en la planilla Balance_AC. Si bien presenta levesfluctuaciones en el tiempo, su nivel medio es estable, como se muestra en la figura adjunta, y como también lo representa el modelo WEAP. Pozos ubicados a mayor altura o alejados del centro del cauce, presentan fluctuaciones estacionales mayores, pero mantienen una situación estable en el plazo de análisis.

Figura 8.32
Acuífero Río Turbio

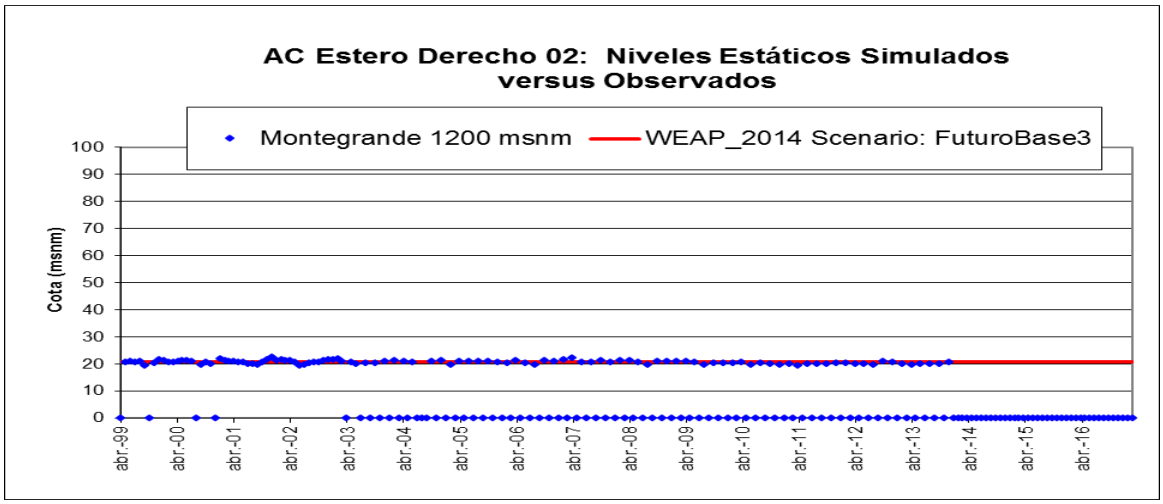


- **Acuífero del Estero Derecho**

A diferencia del río Cochiguaz, para el que no se modeló el acuífero por ser demasiado estrecho, en el Estero Derecho sí se modeló un acuífero. La modelación subterránea sigue la topología superficial, por lo que el acuífero se divide en dos partes, aguas arriba y aguas

abajo de la estación fluviométrica de Alcohuaz. El acuífero no es explotado salvo para el agua potable rural, porque la Junta de Vigilancia del Estero Derecho no lo permite, para evitar afecciones a los recursos superficiales. El único pozo de control es el pozo del agua potable rural, cuyo comportamiento real se compara con el modelado en la siguiente figura. Los valores que aparecen como ceros se refieren a fechas sin dato.

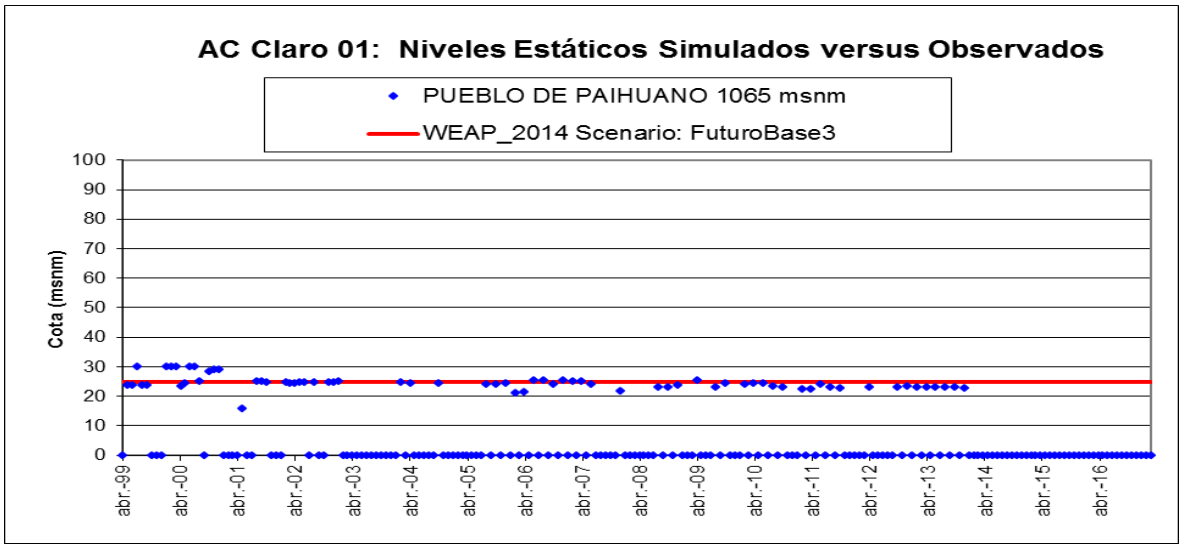
Figura 8.33
Acuífero de Montegrande



- **Acuífero Río Claro**

Este acuífero es muy poco explotado. Solamente se registran dos pozos de uso agrícola en el sector bajo la Quebrada de Paihuano. El nivel se mide en el pueblo de Paihuano, y no muestra ningún efecto de explotación, lo que queda bien representado por el comportamiento modelado.

Figura 8.34
Acuífero Río Claro

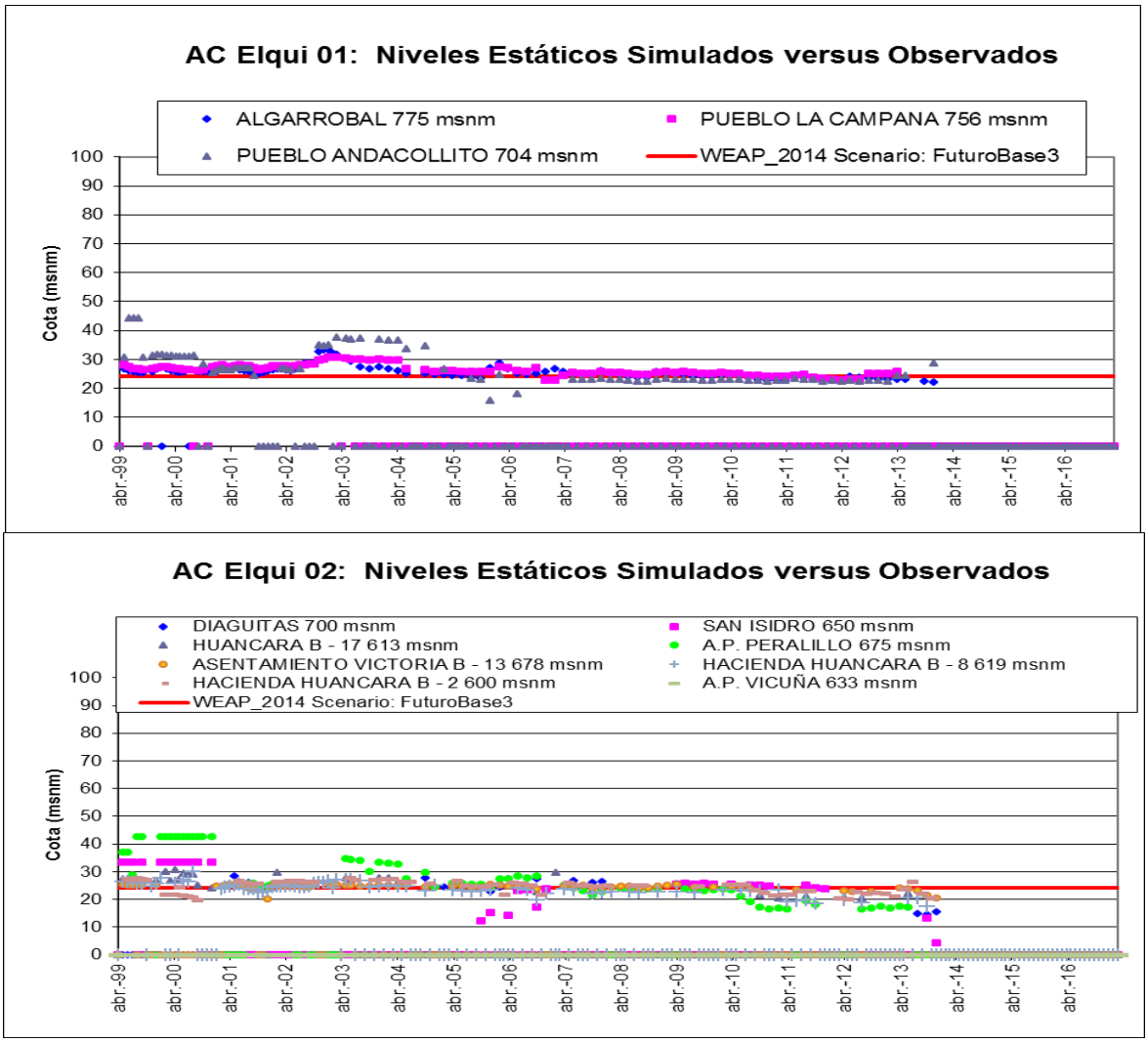


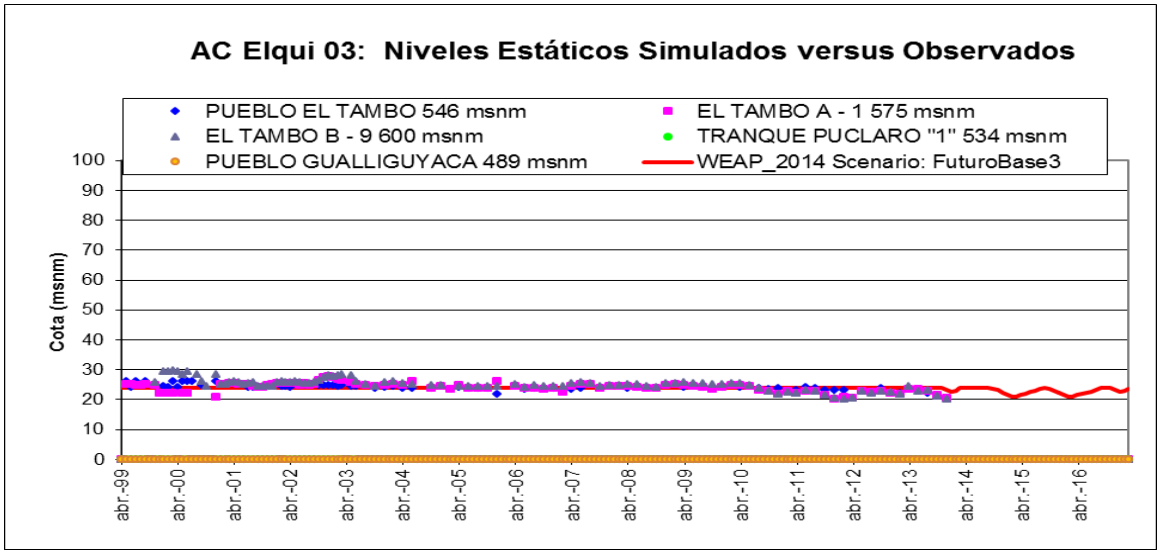
- **Acuífero Río Elqui sobre Puclaro**

Este acuífero está dividido en tres partes para la modelación con WEAP. En todas hay pozos de control. El comportamiento es estable a lo largo del tiempo. Hacia los últimos años hay leves descensos, que sin embargo se recuperan en el tiempo, por lo que las tendencias se mantienen sin cambio. Sólo los pozos más extremos hacia piedemonte (Agua Potable Peralillo, San Isidro) muestran una tendencia a la baja, que el modelo no es capaz de reproducir. Sin embargo, el comportamiento medio está bien representado por el WEAP, como se puede observar en los gráficos adjuntos.

En los años adicionales de sequía, se observa que bajo las condiciones imperantes en la actualidad, el acuífero no bajaría.

Figura 8.35
Acuífero Elqui Alto

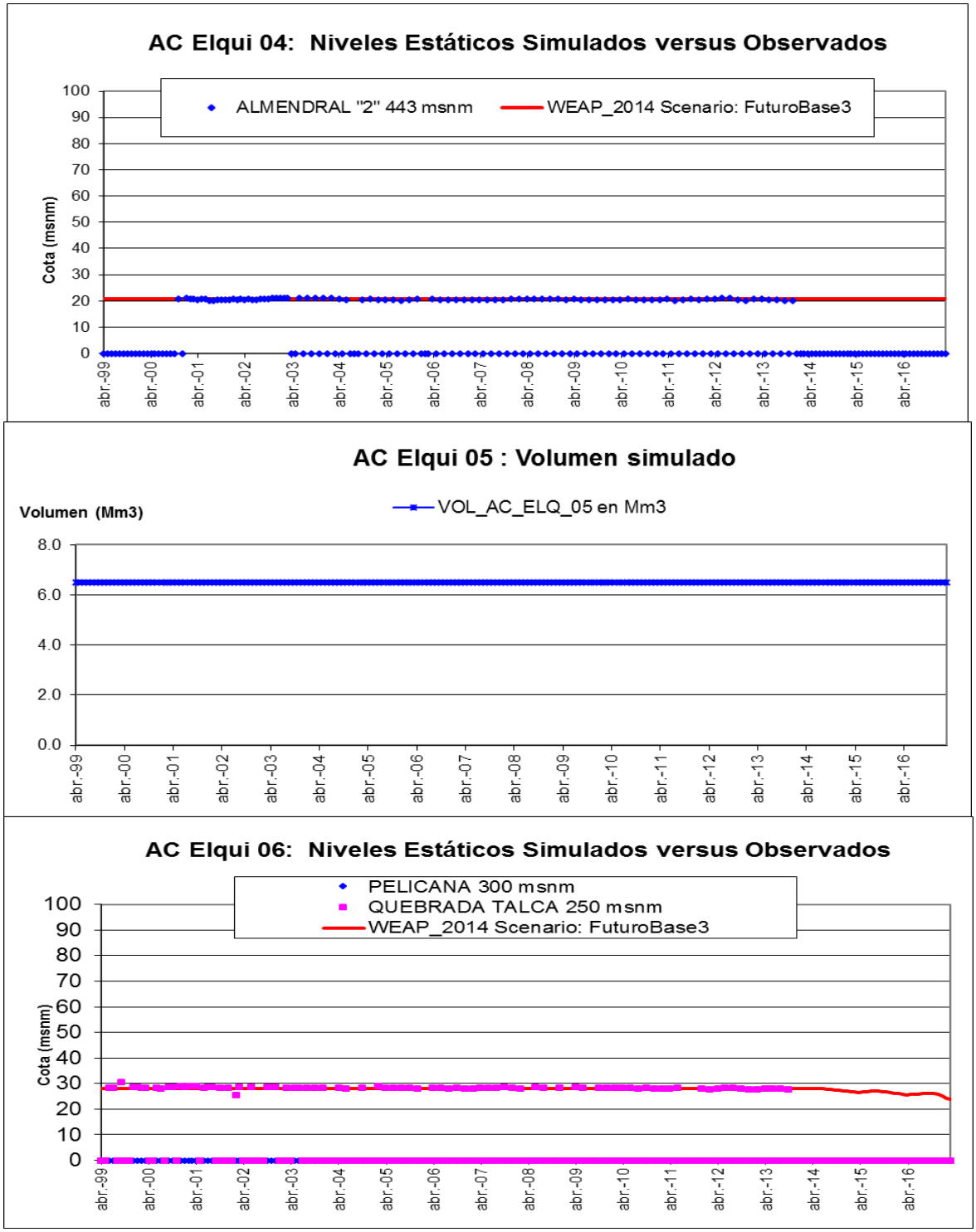


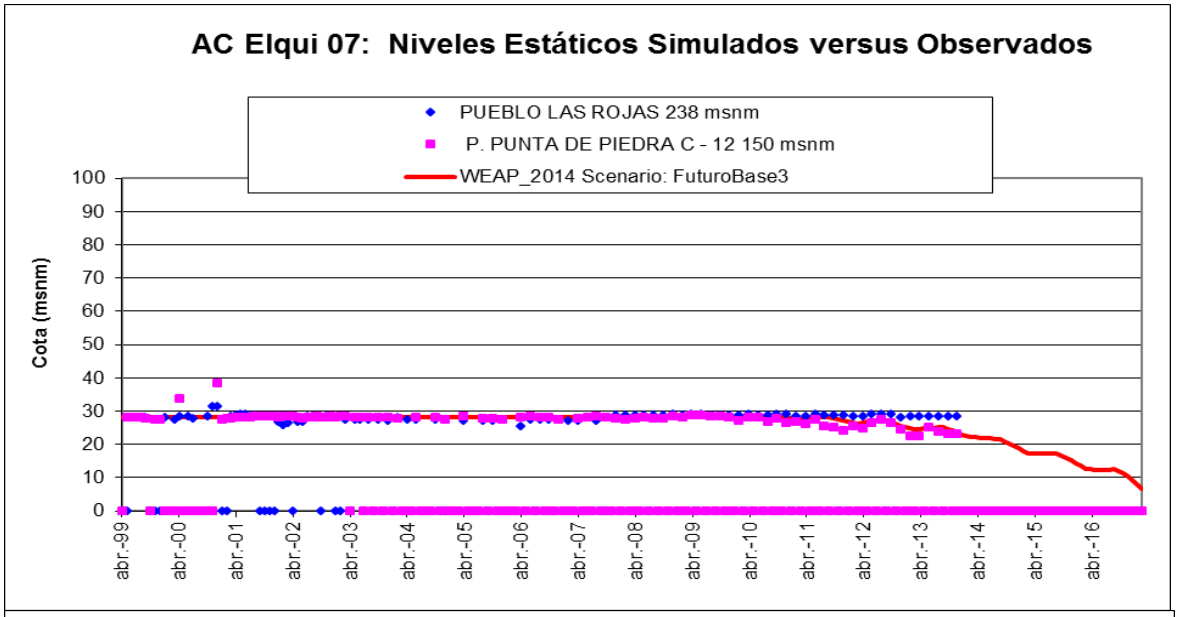


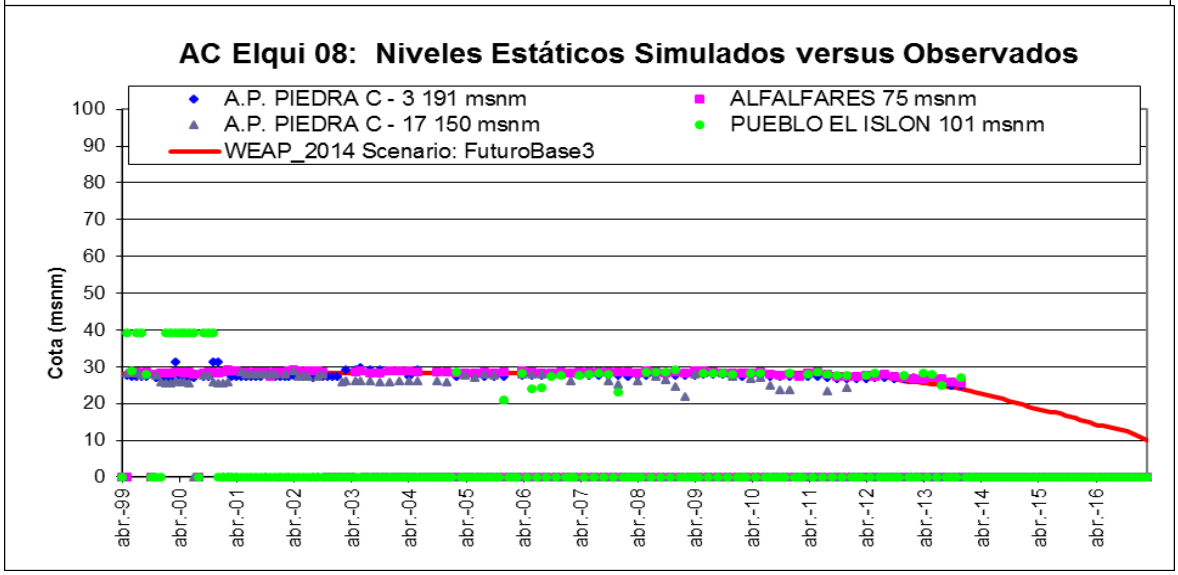
- **Acuífero río Elqui sector Puclaro y Elqui Bajo**

Este acuífero es muy estrecho en su primera parte, inmediatamente aguas abajo del embalse Puclaro, y se va expandiendo hasta llegar a ser muy ancho frente a Santa Gracia. Hacia abajo aumentan los usos cuantitativamente importantes, como agua potable de La Serena y minería (Teck). En todo el tramo desde Puclaro hasta la estación Elqui en La Serena, se definieron 5 sectores acuíferos, AC_ELQ_04 hasta 08. Cerca del embalse, el acuífero se mantiene con niveles muy estables en todo el período, incluso proyectando 3 años secos a futuro. Hacia aguas abajo, hay un efecto de la sequía, que se manifiesta como variaciones de nivel, e incluso como descensos en los últimos años de registro (período de validación). El modelo representa bien esa situación, como se aprecia en la siguiente figura. En los años futuros, si son secos, estos acuíferos podrían abastecer los requerimientos (crecientes por parte del uso de riego pero con tope en los derechos), pero su nivel descendería, especialmente el del acuífero AC_ELQ_08.

Figura 8.36
Acuífero río Elqui bajo Puclaro



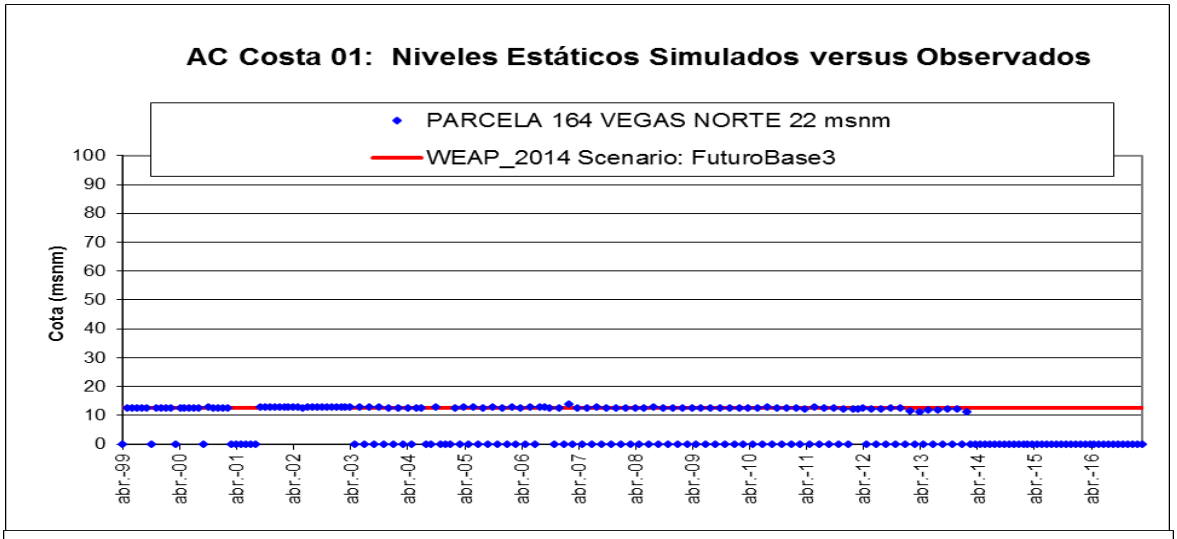


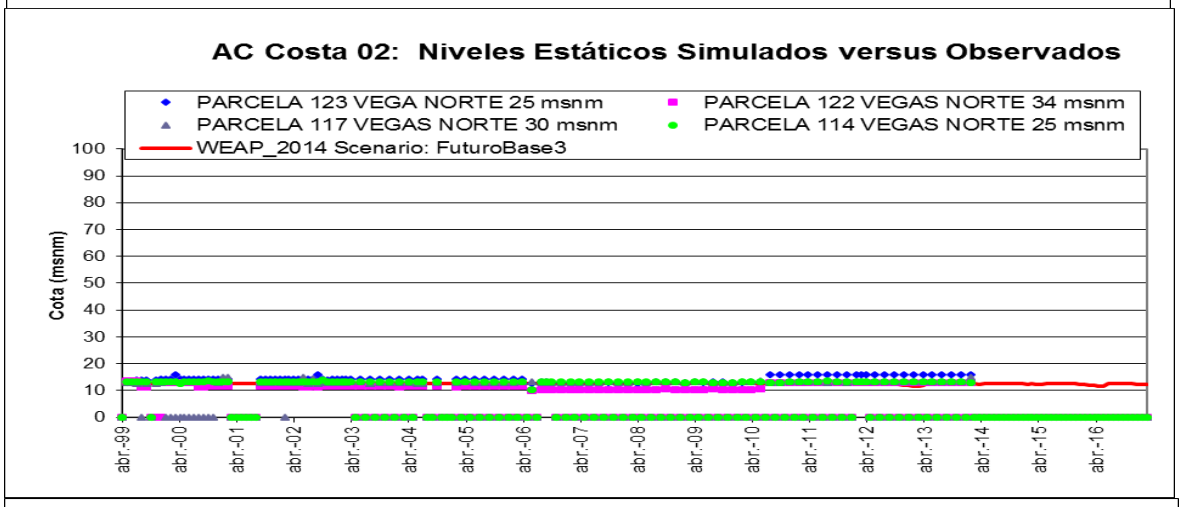


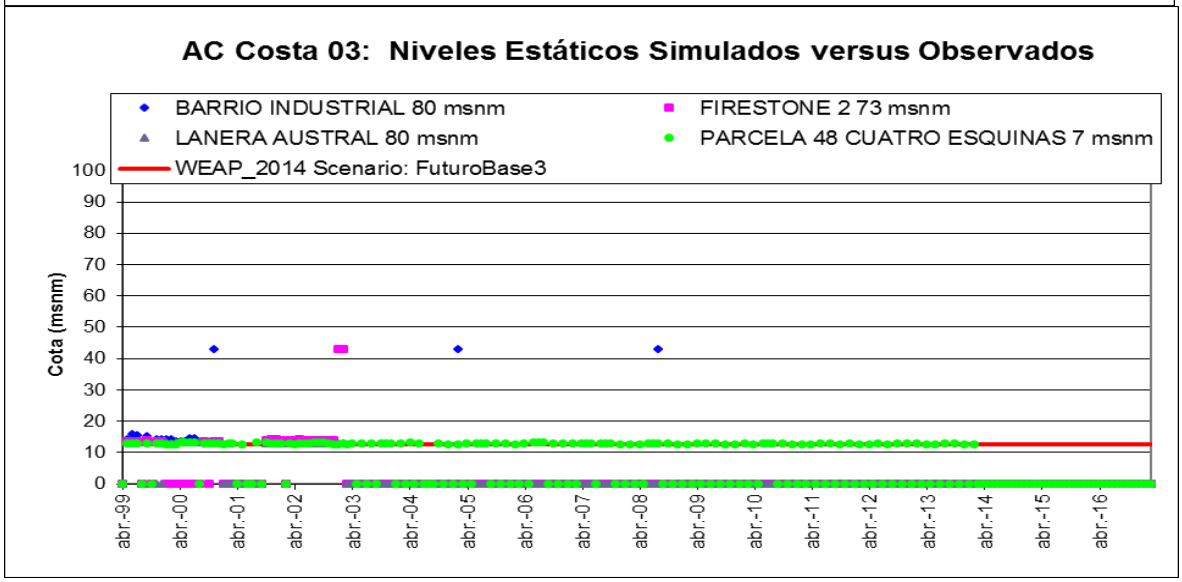
- **Acuíferos de la Costa**

Se definieron 3 acuíferos a lo largo de la costa. AC_COS_01 es el acuífero central, el cual representa el sector de desembocadura del río Elqui. AC_COS_02 es el acuífero Vegas Norte y AC_COS_03 es Vegas Sur. Según se puede observar, en ninguno de ellos los pozos muestran efectos de la sequía de los últimos años. Igualmente, proyectados a futuro, los acuíferos no muestran descenso en tres años más de sequía.

Figura 8.37
Acuífero de la Costa







- **Acuífero Culebrón**

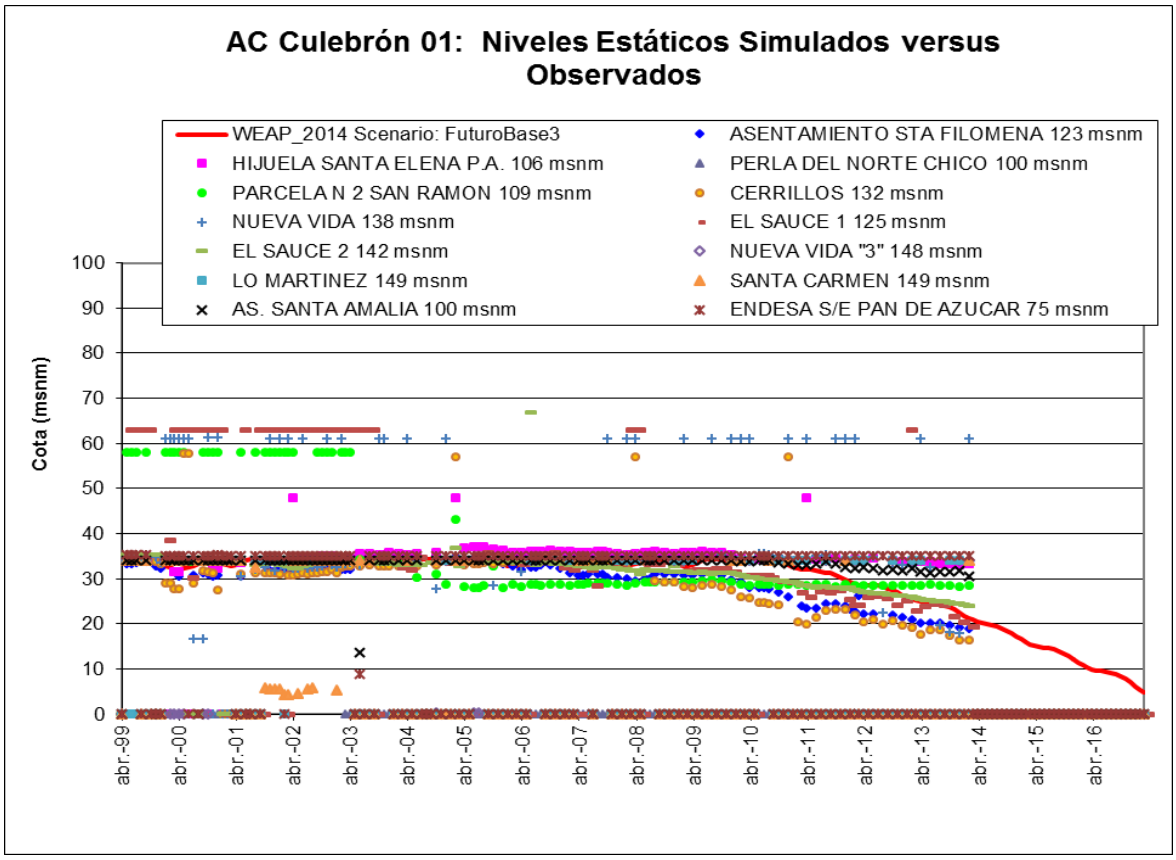
Finalmente, en la modelación se incluyó también el acuífero Culebrón, el cual se alimenta fundamentalmente desde la cuenca del Elqui a través del canal Bellavista, de sus pérdidas y de las percolaciones del riego.

Lo que se puede observar en este acuífero, es que en su parte norte los nivelesse mantienen estables, hasta el día de hoy, mientras que en el sector sur los niveles tienen una tendencia al descenso, que ha disminuido en el último tiempo, pero aún se observa en los sectores más afectados.

A través del proceso de calibración, se ajustó la intensidad de las rotaciones de cultivos del sector Pan de Azúcar (a través del factor kc), hasta lograr, por un lado, una adecuada representación del nivel del acuífero, y por otro lado, una adecuada señal del retorno en la estación Estero Culebrón en el Sifón.

Lo que el modelo muestra, es que, de seguir las condiciones de sequía, la tendencia media del acuífero será de descenso, aunque el modelo, en cuanto a tendencia, parece ser más pesimista que la realidad.

Figura 8.38
Acuífero Culebrón



Es necesario tener presente que la visualización del comportamiento de los acuíferos en esta planilla de calibración, muestra solamente niveles (para compararlos con las mediciones reales), y no muestra la relación que hay entre el nivel y el volumen del acuífero. Los gráficos que muestran la forma en que se van vaciando los acuíferos, en relación con su volumen total, son los gráficos de la planilla Balance_AC.

Por otro lado, también hay que tener presente que en la modelación, el bombeo no se restringe por descenso de nivel. En la realidad, probablemente ocurra en alguna medida que el bombeo se reduce al bajar mucho los niveles, con lo cual el comportamiento real del acuífero se vería favorecido en relación con el comportamiento modelado, pero se reduciría el porcentaje de demanda suplida de las zonas de riego.

c) Planilla Balance_ZR

Esta planilla contiene una hoja para cada zona de riego, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.

De esta forma, se configura un set de 5 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con una determinada zona de riego. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunas zonas de riego representativas de la cuenca del Elqui.

En los gráficos se puede observar que en los últimos años de sequía históricos y proyectados, se ha supuesto, en toda la cuenca, una reducción de la demanda de riego, la que puede haber ocurrido tanto a través de una reducción de área como a través de la aplicación de riego deficitario. La reducción de área es más probable para cultivos anuales como las hortalizas, y el riego deficitario es más probable en cultivos permanentes como son los frutales.

La prioridad para suplir las demandas siempre la tienen las zonas de riego frutales sobre las anuales. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

- **Río Turbio**

Las zonas de riego del río Turbio son representativas de zonas frutales con regulación (embalse La Laguna), en que no se hace uso de pozos, y dados los desmarques históricos, el recurso superficial siempre ha alcanzado para cubrir toda la demanda. Una parte del agua entregada a la zona de riego, derrama y vuelve al río. Percolaciones profundas casi no existen, debido a que los acuíferos están llenos. Ver gráficos de Figura 8.39.

- **Estero Derecho**

Las zonas de riego del Estero Derecho corresponden a zonas sin regulación, en que hay algunas temporadas en que el recurso no alcanza a suplir las demandas. No hay aporte de aguas subterráneas, y los excesos de riego derraman y percolan hacia el acuífero. Éste sólo es explotado para usos no agrícolas. Ver gráficos de Figura 8.40.

- **Río Cochiguaz**

Las demandas son escasas, y siempre son bien surtidas. No hay acuífero definido en el modelo por ser muy pequeño.

- **Río Claro**

Las demandas de riego siempre son bien surtidas, tanto las anuales como frutales. Fundamentalmente se usan las aguas superficiales, pero se suplementan con aguas subterráneas cuando falta el agua. Las ineficiencias de los métodos de riego percolan al acuífero y derraman hacia el río. Ver gráficos de Figura 8.41.

- **Quebrada de Paihuano**

La quebrada de Paihuano es más precaria, no siempre el agua alcanza para suplir la demanda. De acuerdo con los derechos registrados en la DGA, no hay pozos para uso en riego, y el acuífero es usado solamente para agua potable. Las ineficiencias de riego derraman hacia la quebrada y percolan hacia el acuífero.

- **Río Elqui sobre Puclaro**

Las zonas de riego Elqui 01, 02 y 03 han estado siempre bien suplidas. Usan agua superficial, muy escasamente el agua subterránea, sólo en años muy secos, y son suplidas por varios canales. Las ineficiencias de riego constituyen derrames y percolaciones. En los años de prolongación de sequía, se comenzarían a usar los pozos para suplir las demandas, pero como la prioridad la tienen los cultivos frutales, los cultivos anuales no quedarían completamente cubiertos. Ver gráficos de Figura 8.42.

- **Río Elqui bajo Puclaro**

En este sector, una zona representativa es la zona ZR_ELQ_07 del Elqui Bajo. Se observa que se alimenta tanto de canales como del acuífero. Las ineficiencias fundamentalmente percolan hacia el acuífero, pero también derraman hacia el río. Las demandas son bien cubiertas hasta la fecha actual. En los subsiguientes años se sequía comienza a sentirse la escasez, debido a que no hay suficientes derechos de agua subterránea para suplir las fallas del agua superficial. Ver gráficos de Figura 8.43.

- **Santa Gracia**

En el sector de Santa Gracia, la situación sería bastante más precaria. Los canales no alcanzan a suplir la demanda con agua superficial. Los derechos subterráneos son muy escasos, y si bien son intensamente utilizados en la temporada de riego, sólo alcanzan a suplir la demanda de frutales. Los cultivos anuales no cuentan con pozos, y el porcentaje de cobertura de la demanda es precario.

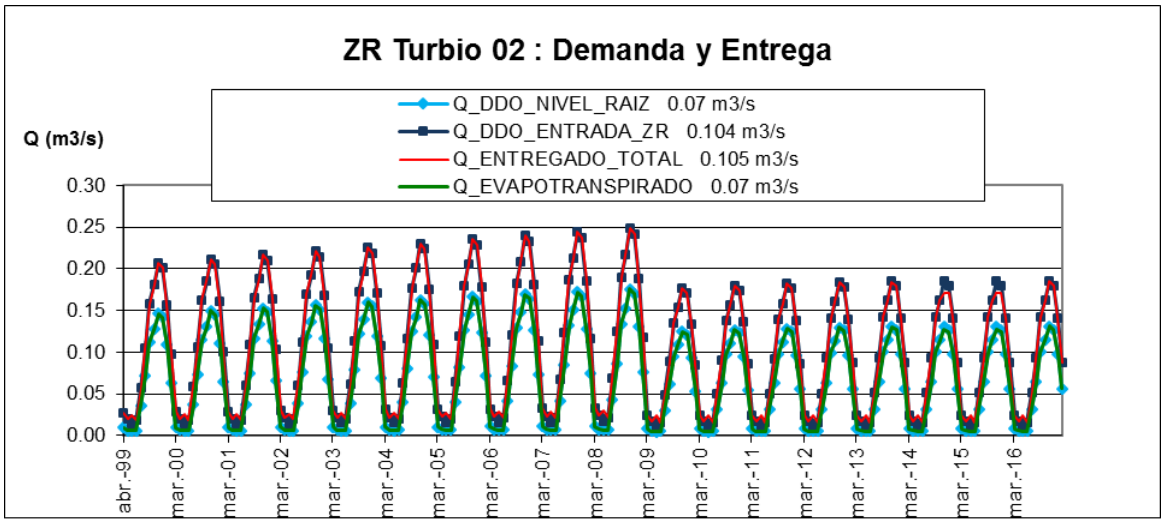
- **Sector Costa**

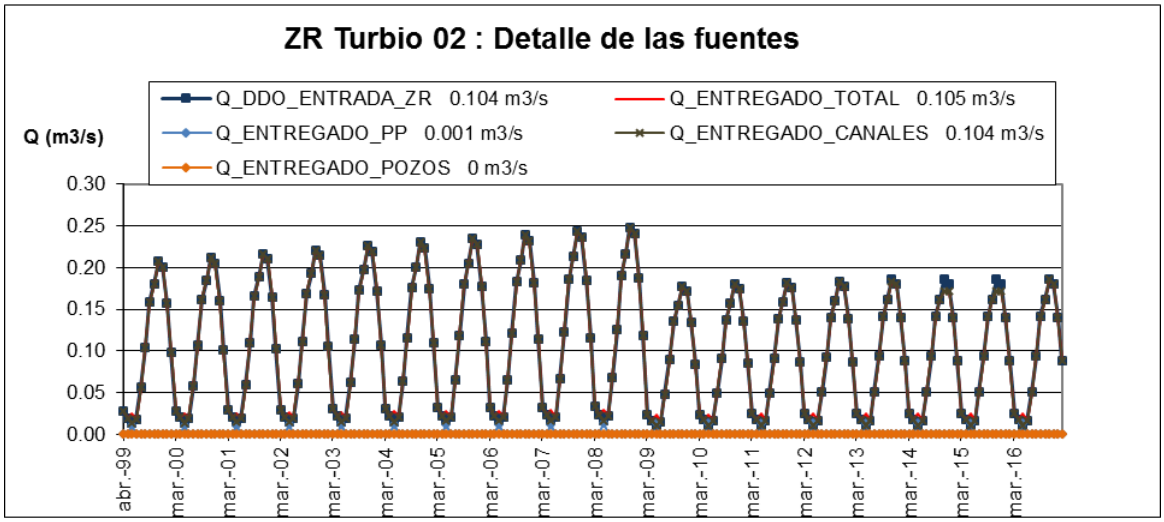
A lo largo de toda la costa, los sectores están bien abastecidos, tanto en la situación histórica como en la situación futura de sequía. El sector más precario sería el sector central, donde la demanda puede haber tenido algunas limitaciones para suplirse, mientras no se aplicó la restricción de la demanda. La limitación más clara es la falta de derechos subterráneos, que se usan, pero son muy escasos.

- **Pan de Azúcar**

Este sector se alimenta tanto de agua superficial (canales derivados del canal Bellavista) como también, en forma importante, con aguas subterráneas, como se aprecia en el segundo gráfico. Prácticamente no hay derrames. Las ineficiencias de riego constituyen percolaciones hacia el acuífero. La zona de riego es suplida casi en su totalidad siempre, durante el período histórico, y también en los tres años secos adicionales. Ver gráficos en Figura 8.44.

Figura 8.39
Río Turbio





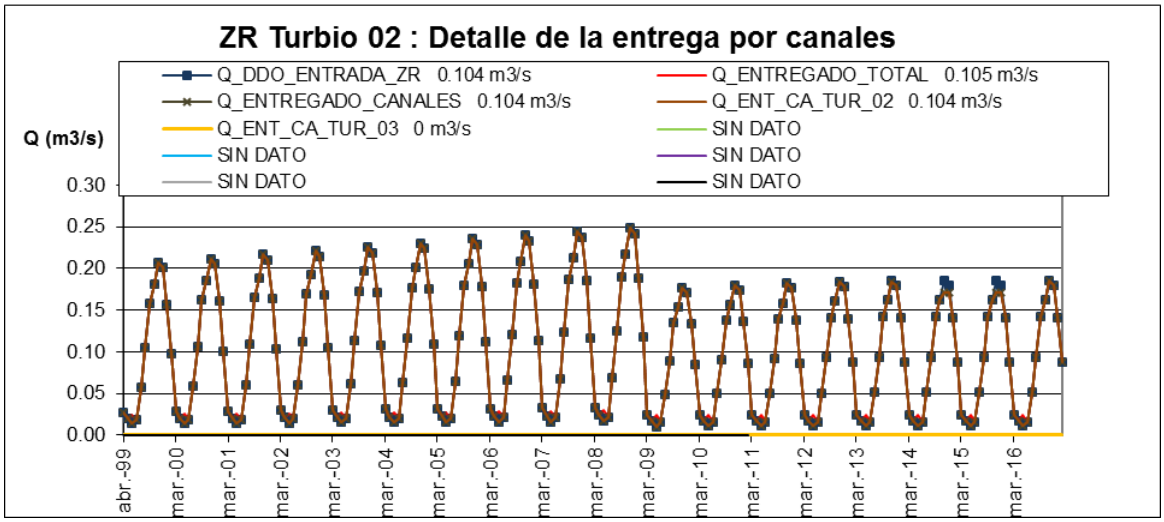
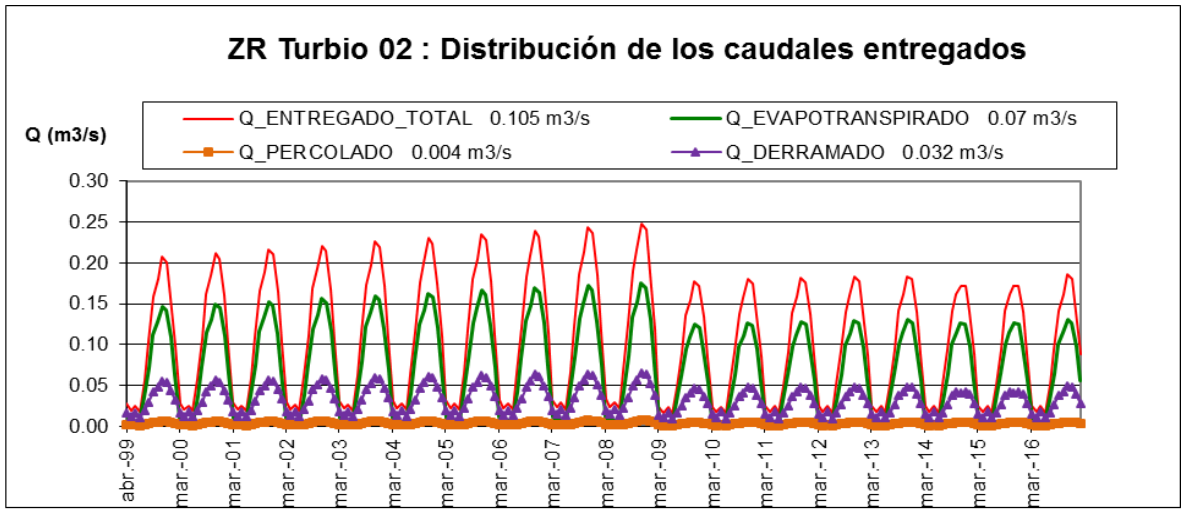
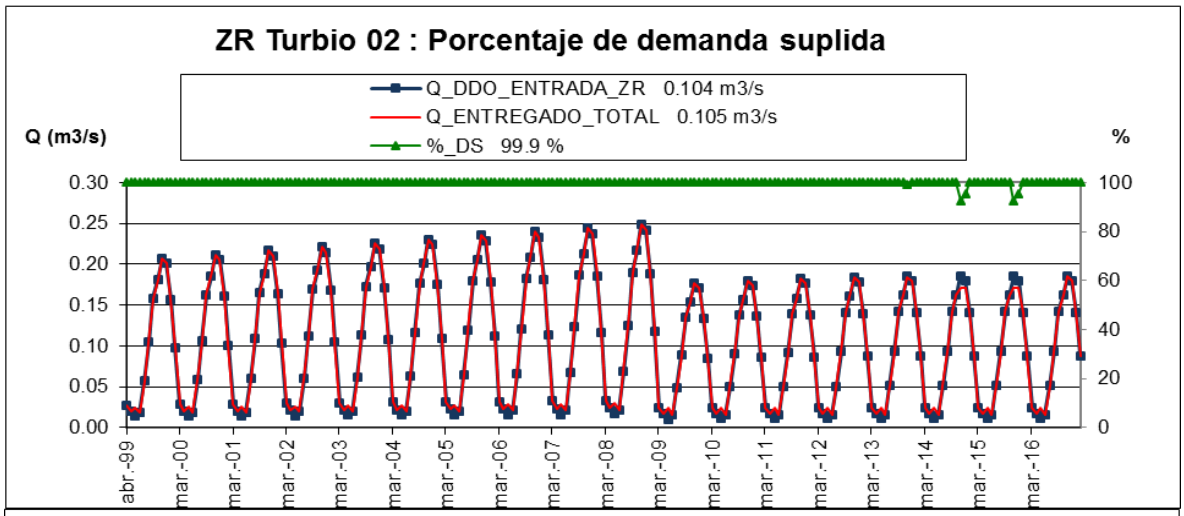


Figura 8.39 (Continuación)
Río Turbio





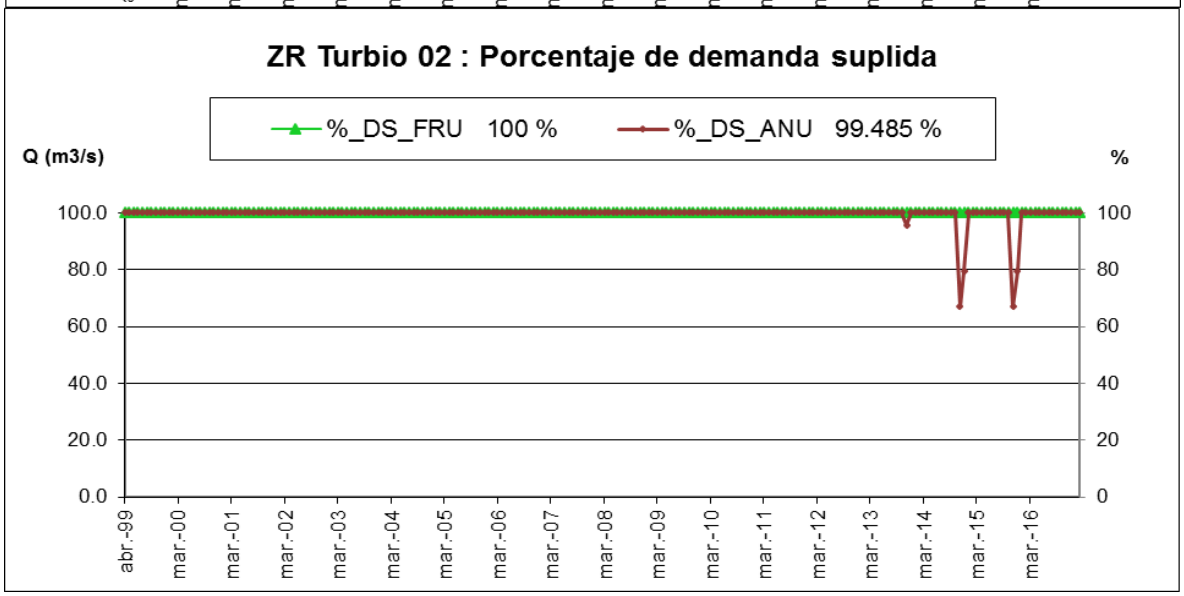
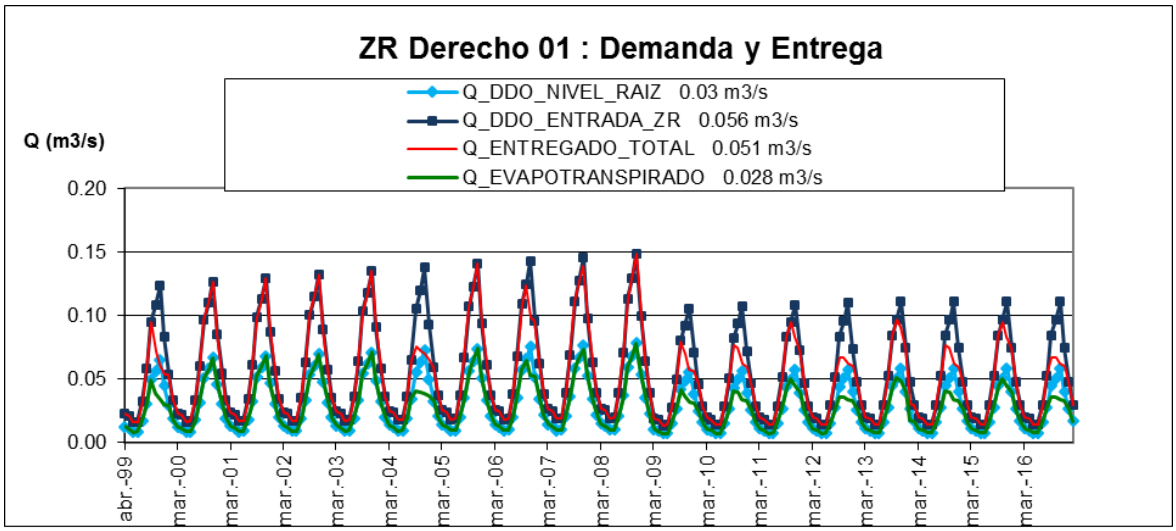
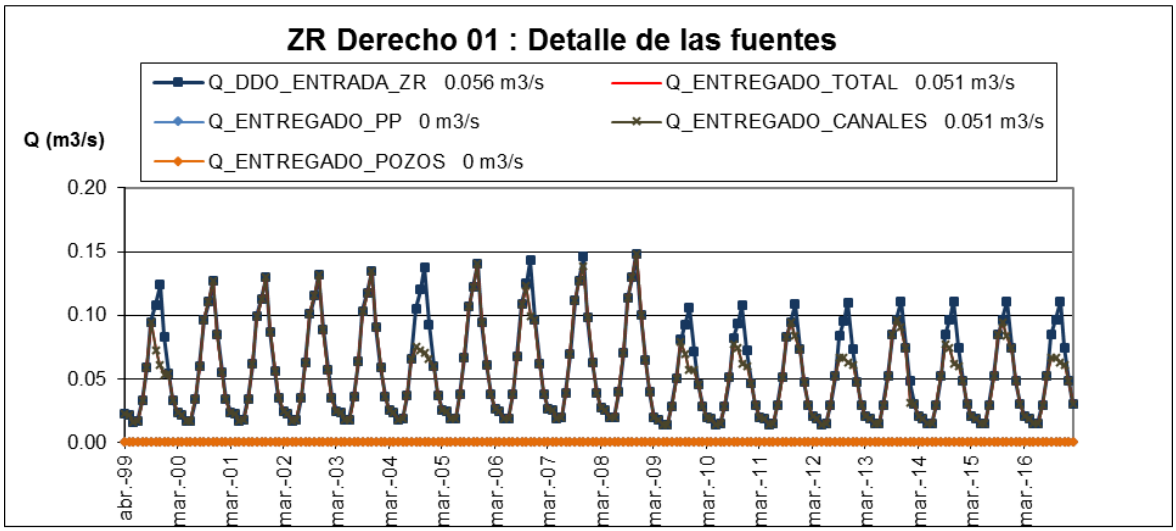


Figura 8.40
Estero Derecho





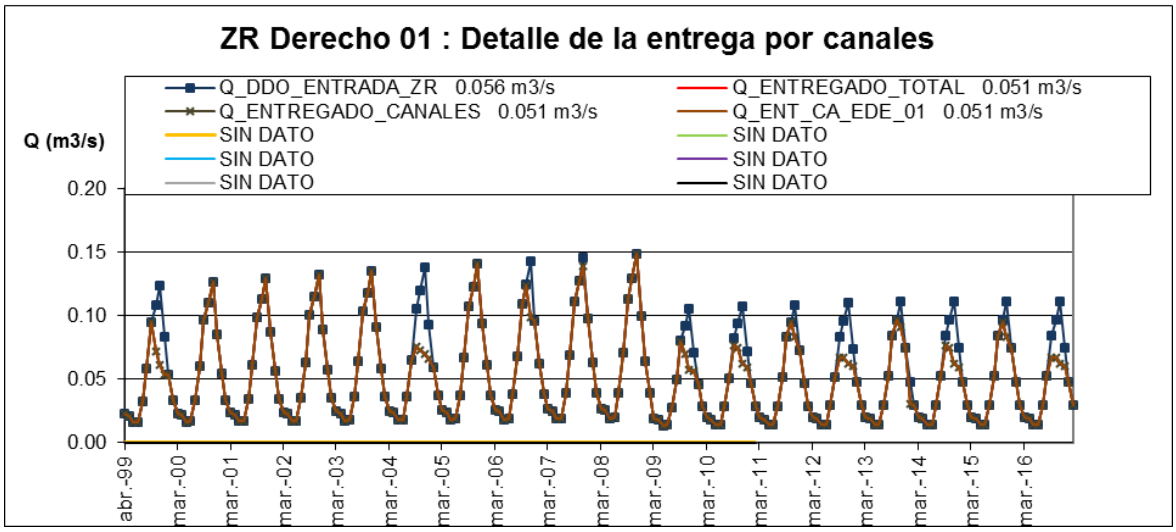
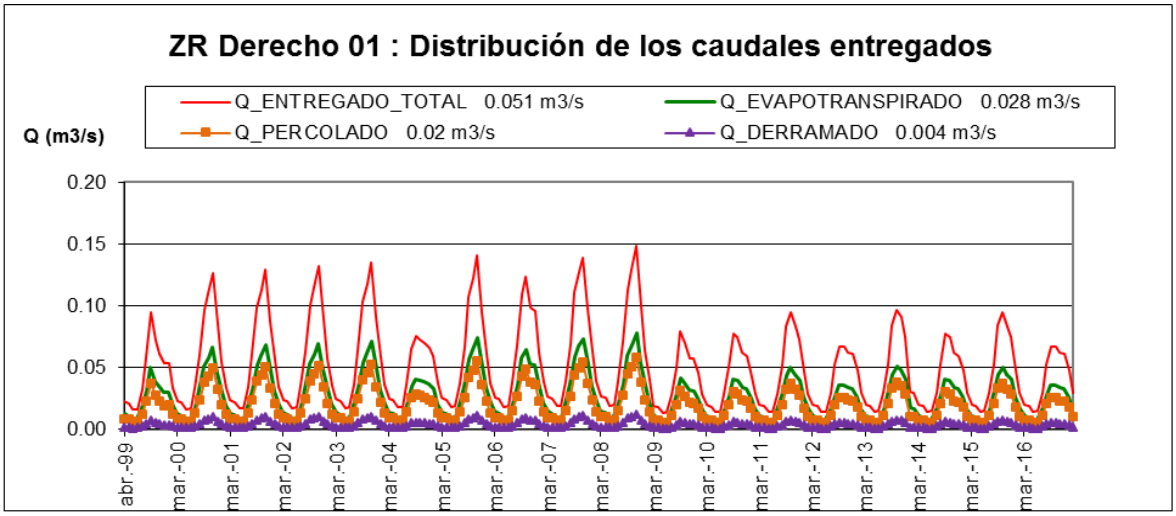
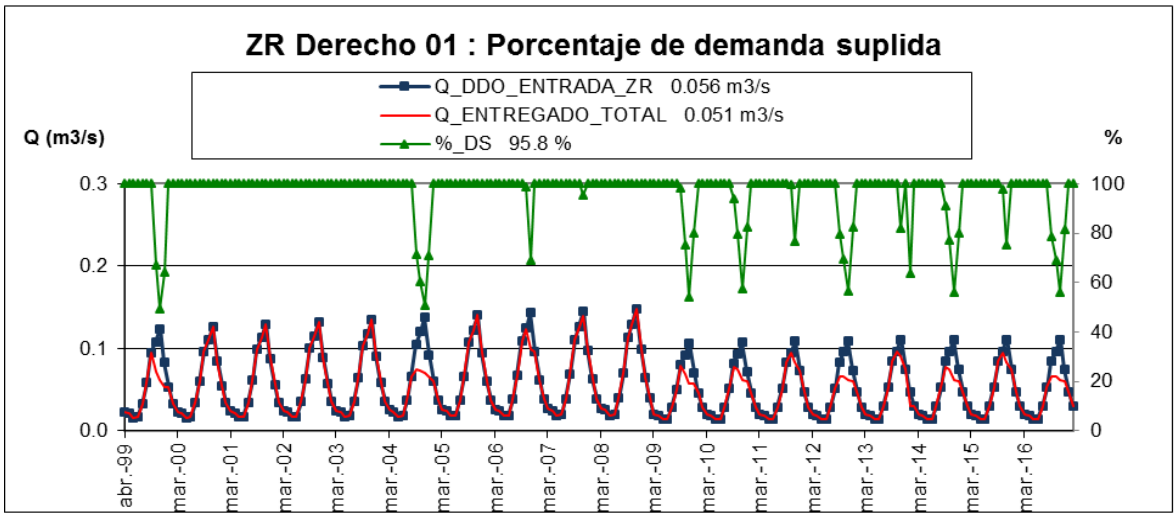


Figura 8.40 (Continuación)
Estero Derecho





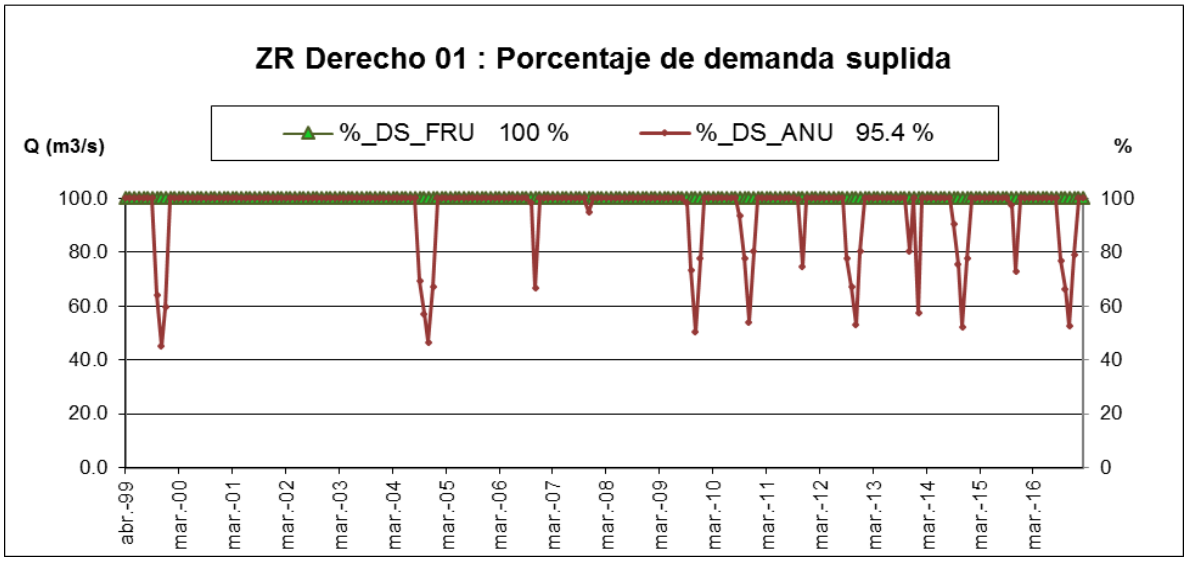
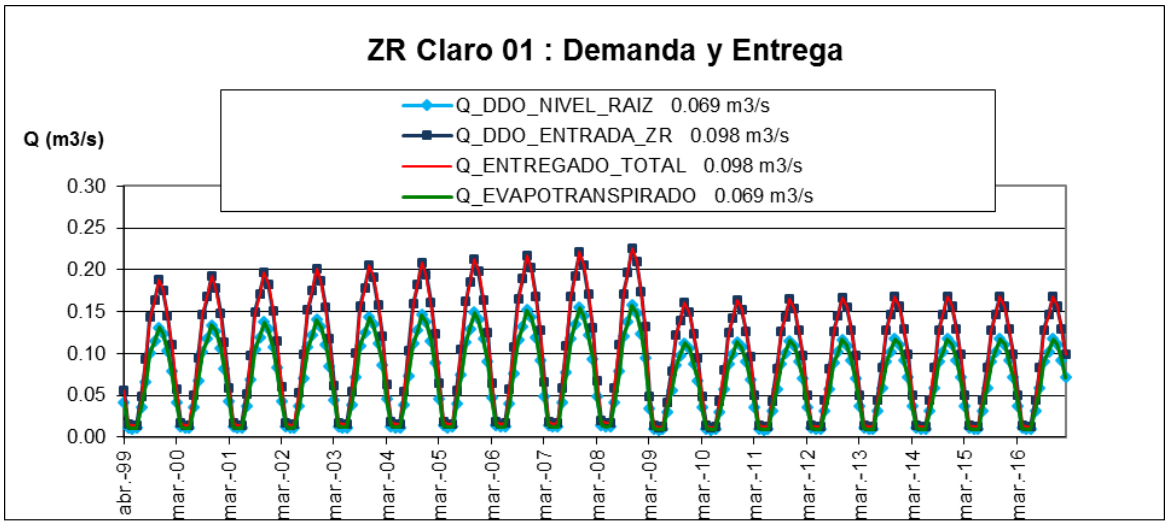
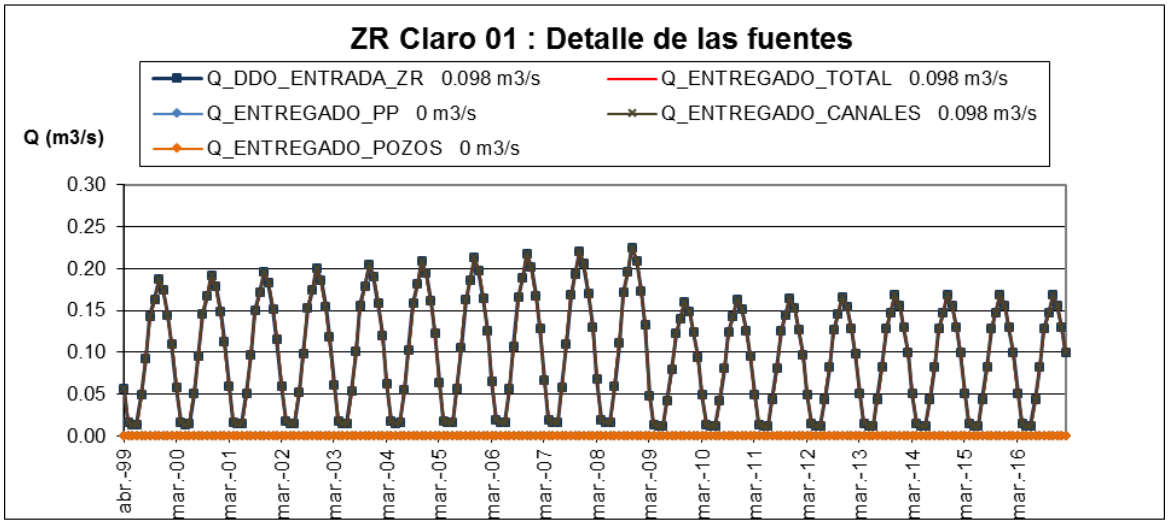


Figura 8.41
Río Claro





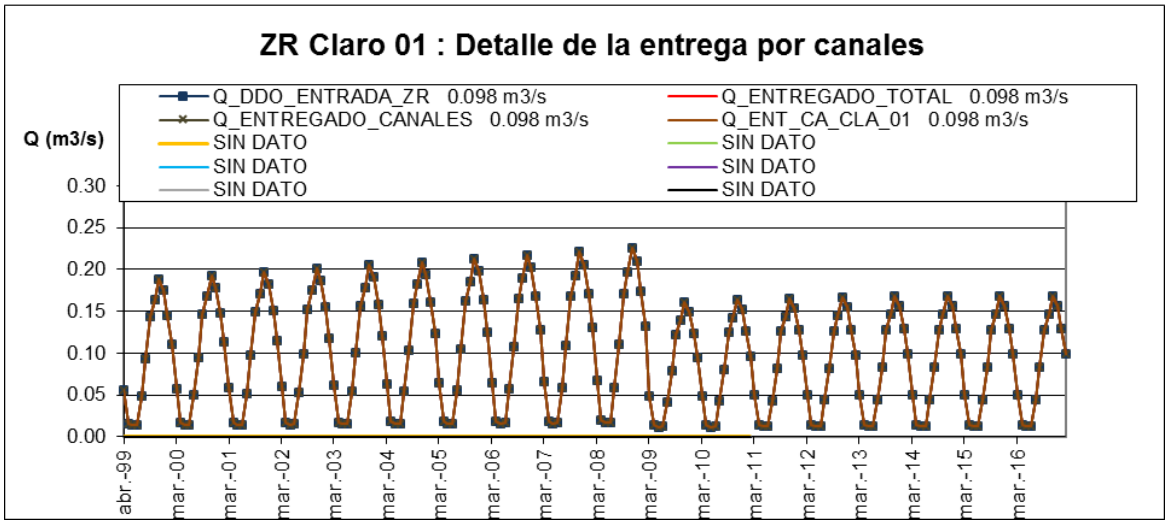
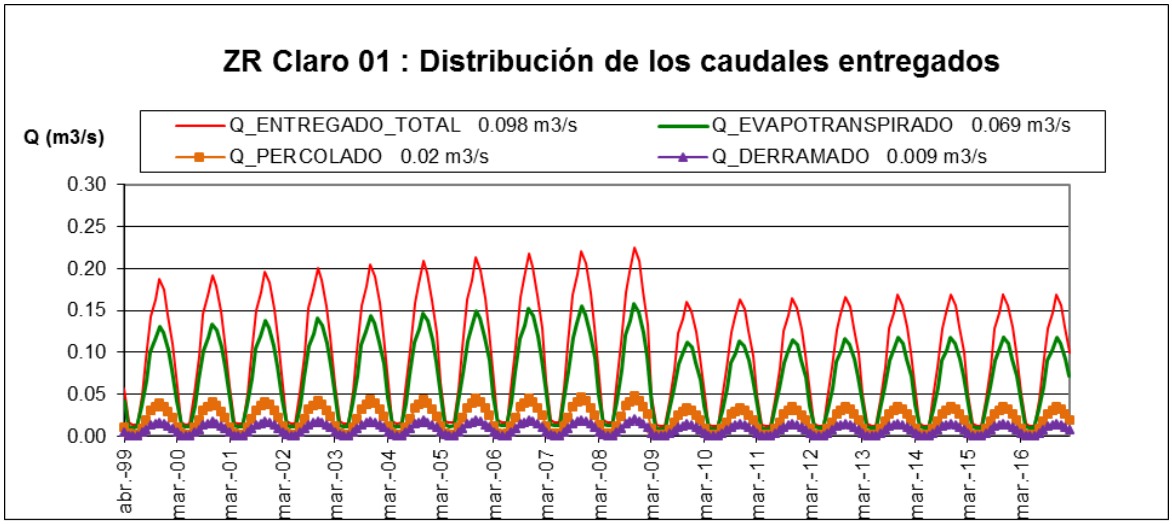
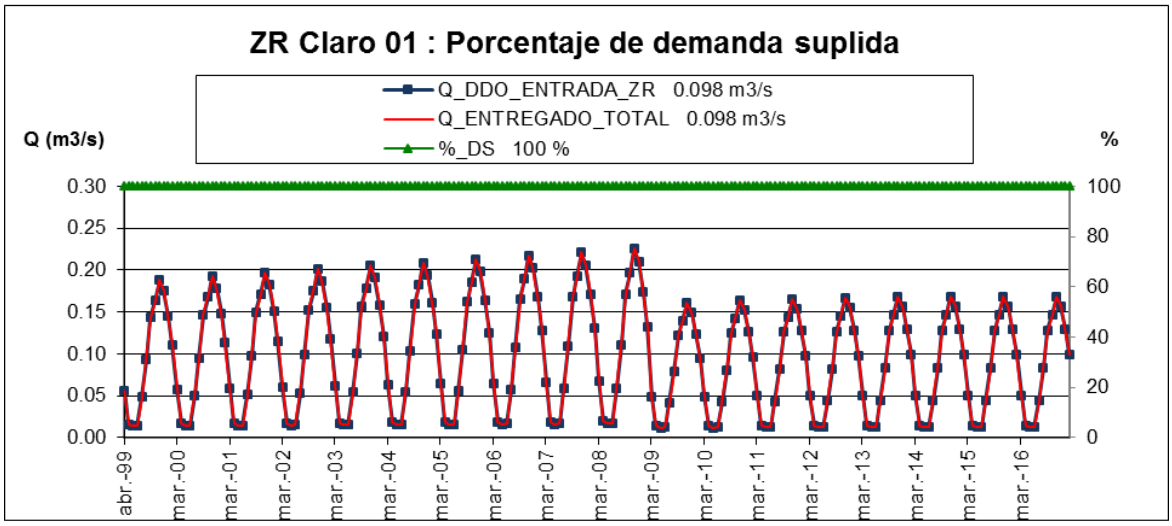


Figura 8.41 (Continuación)
Río Claro





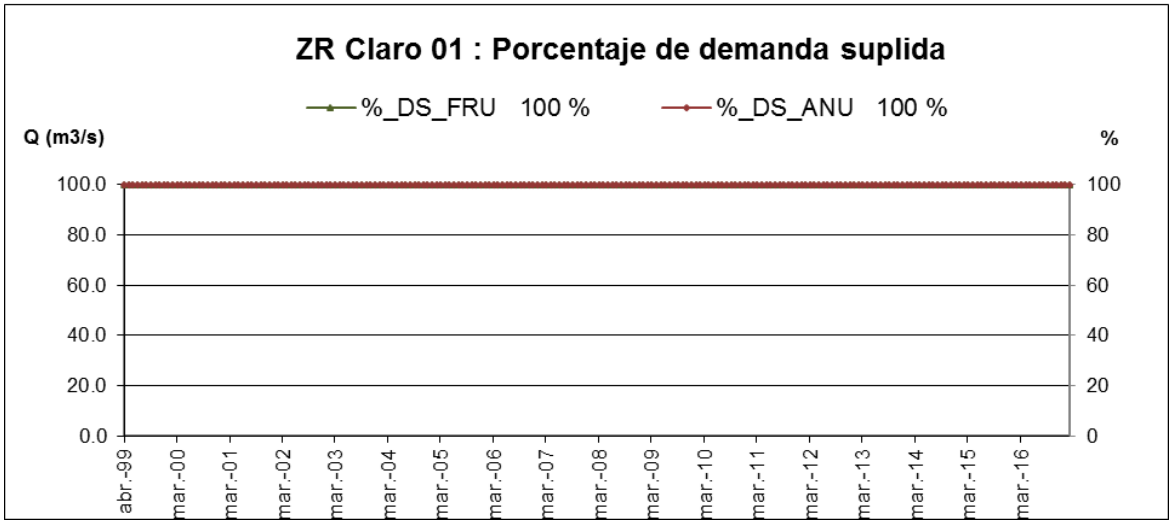
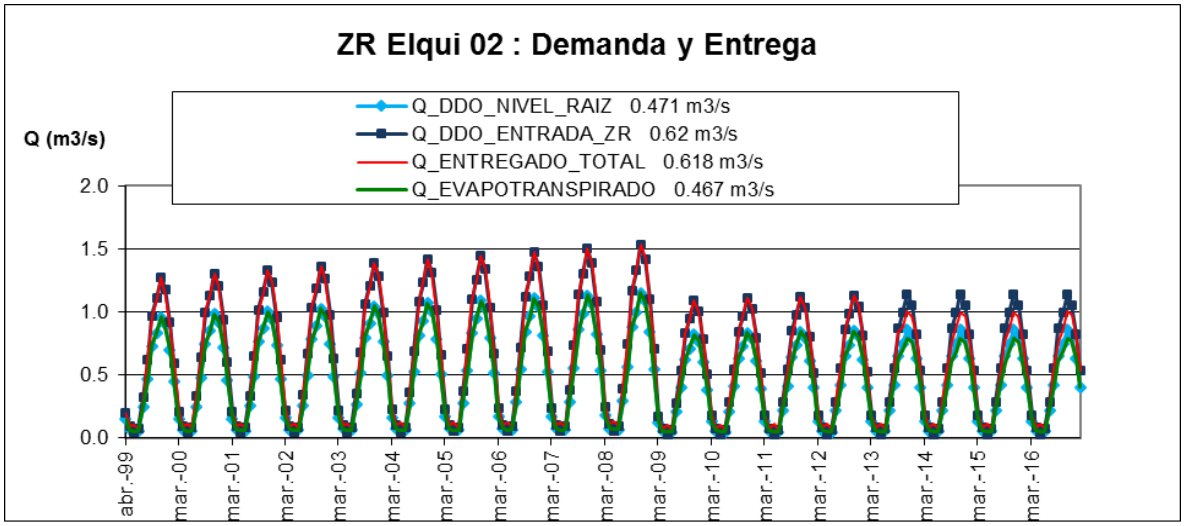
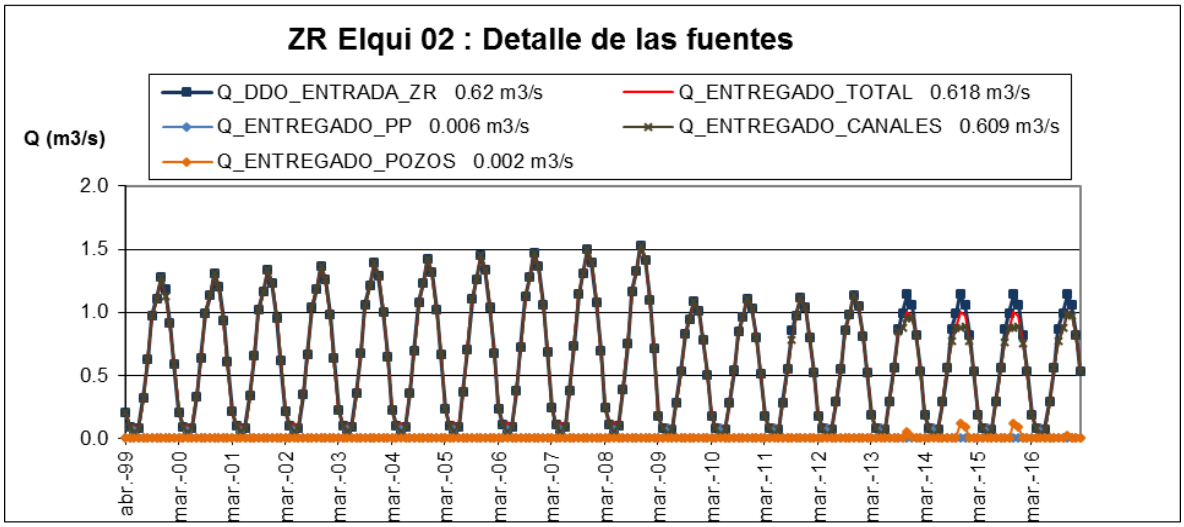


Figura 8.42
Río Elqui Alto





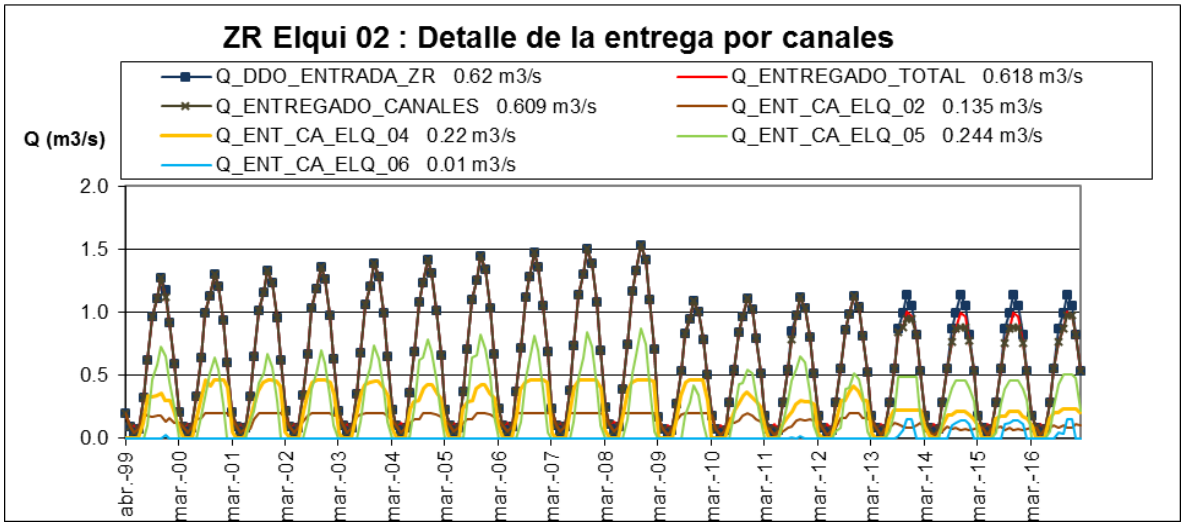
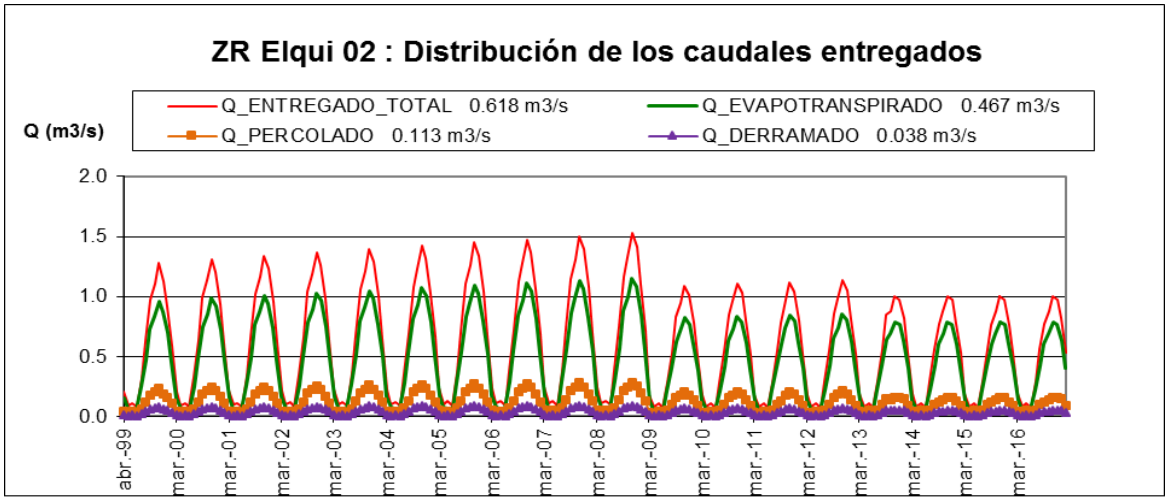
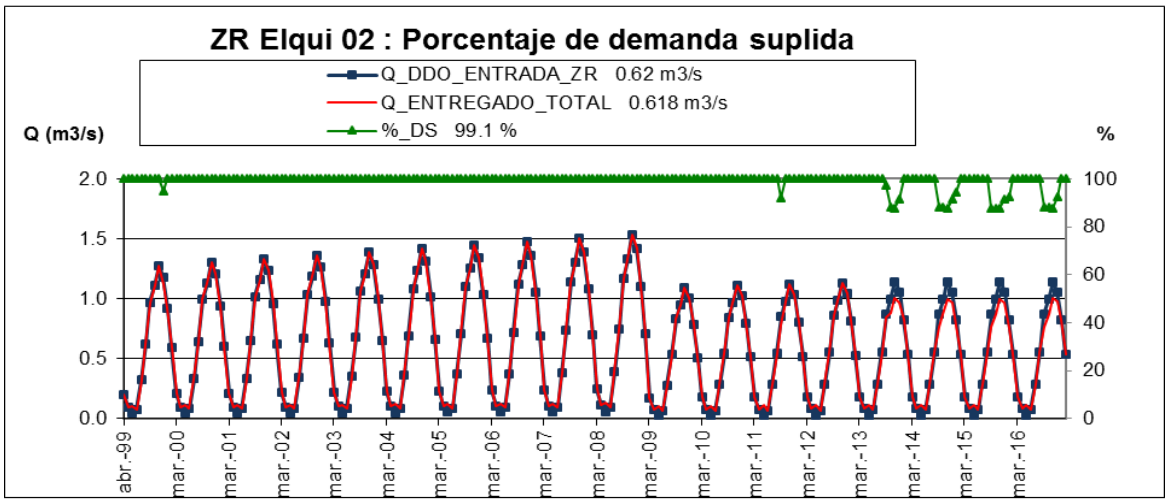


Figura 8.42 (Continuación)
Río Elqui Alto





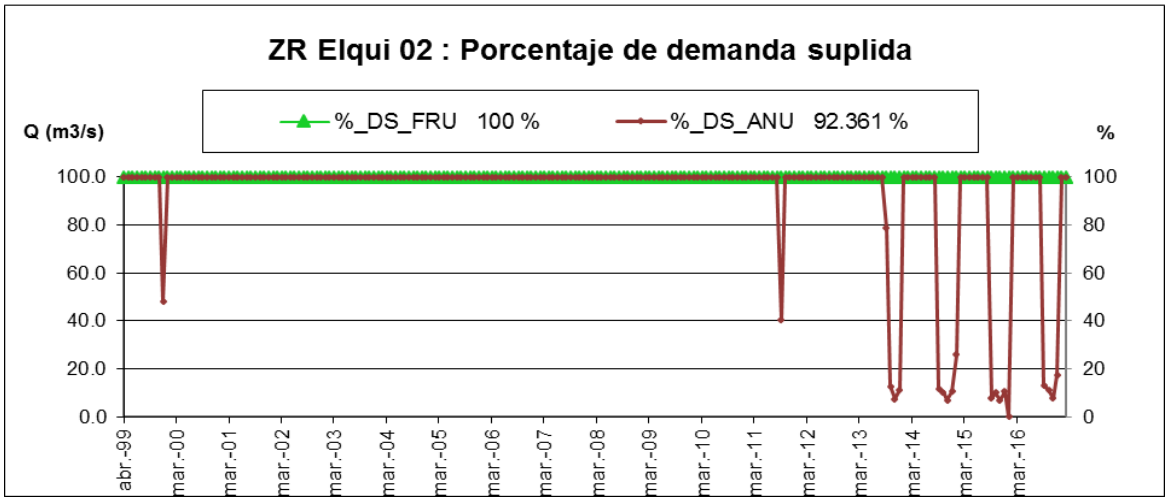
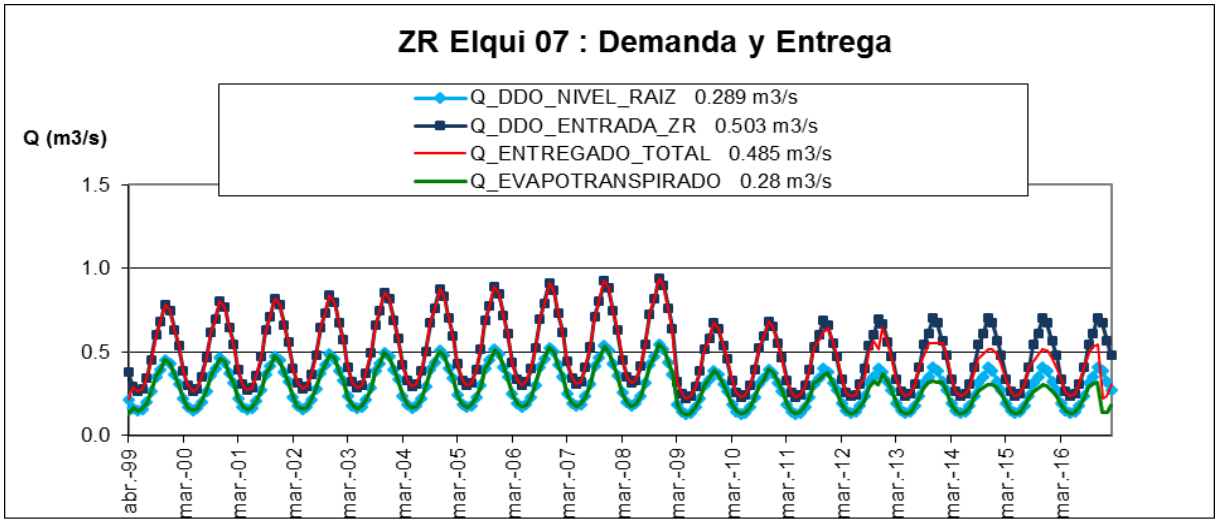
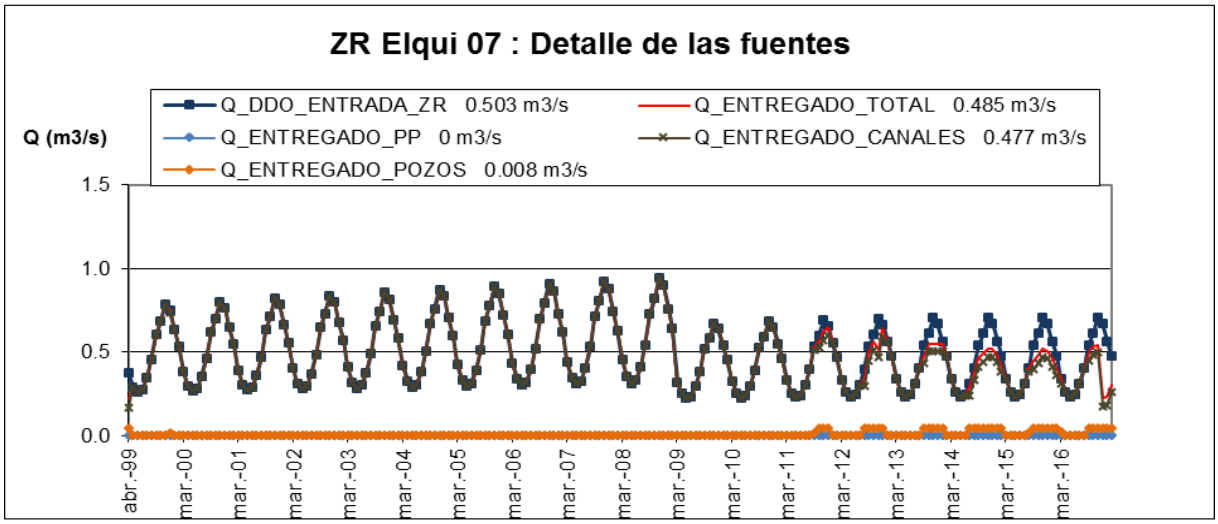


Figura 8.43
Río Elqui bajo Puclaro





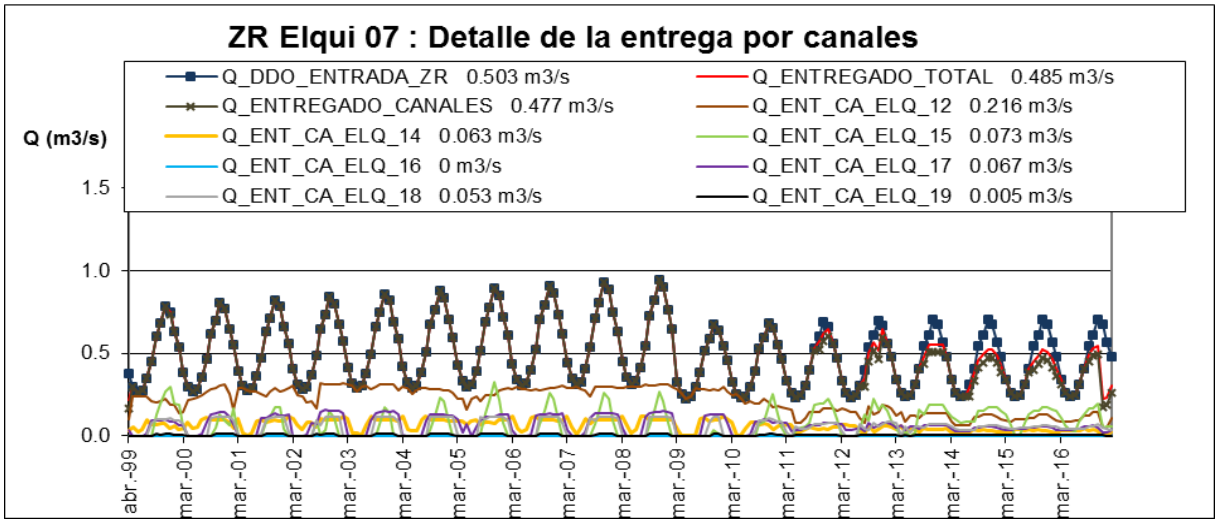
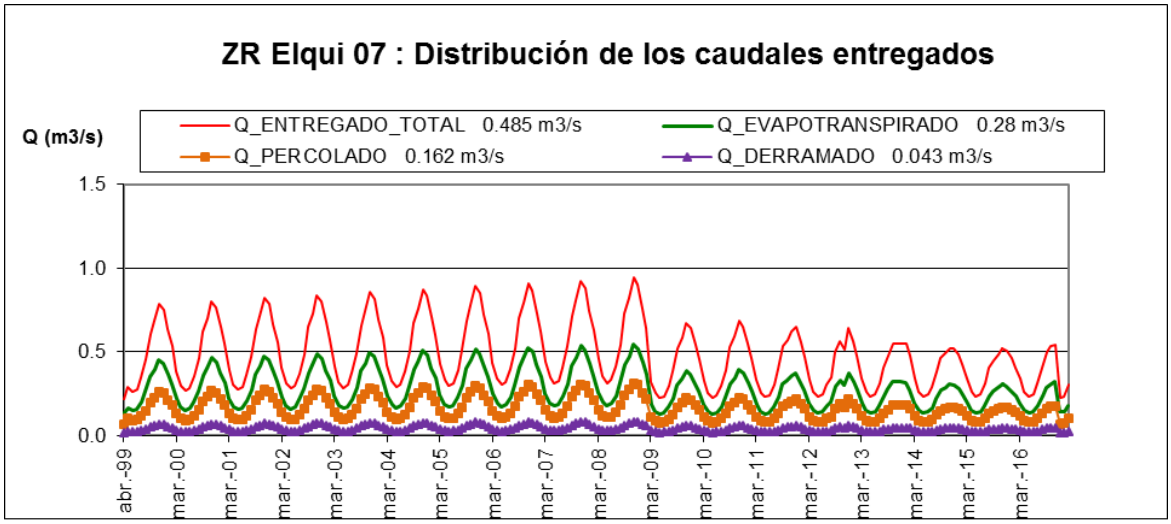
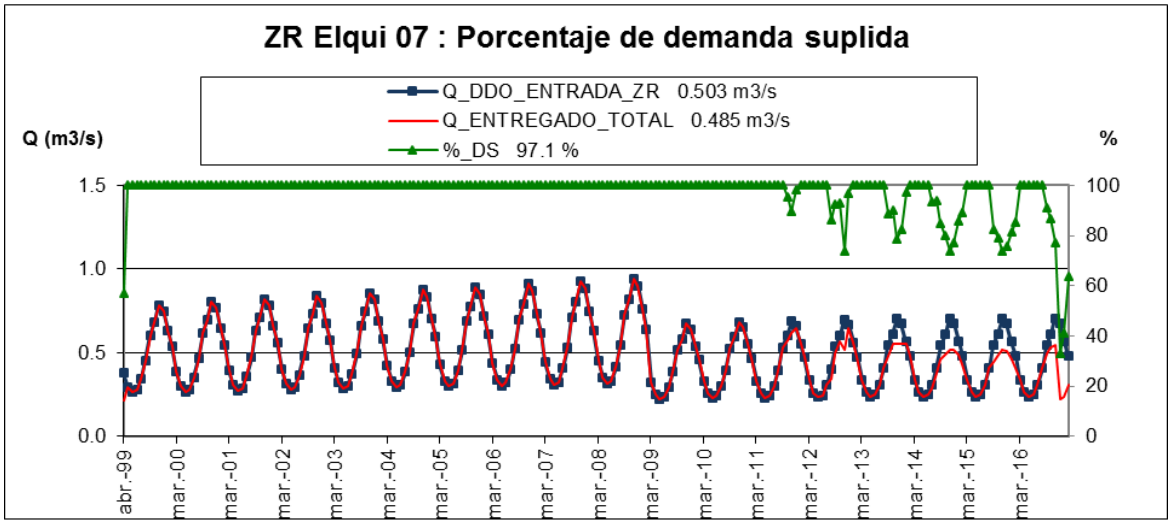


Figura 8.43 (Continuación)
Río Elqui bajo Puclaro





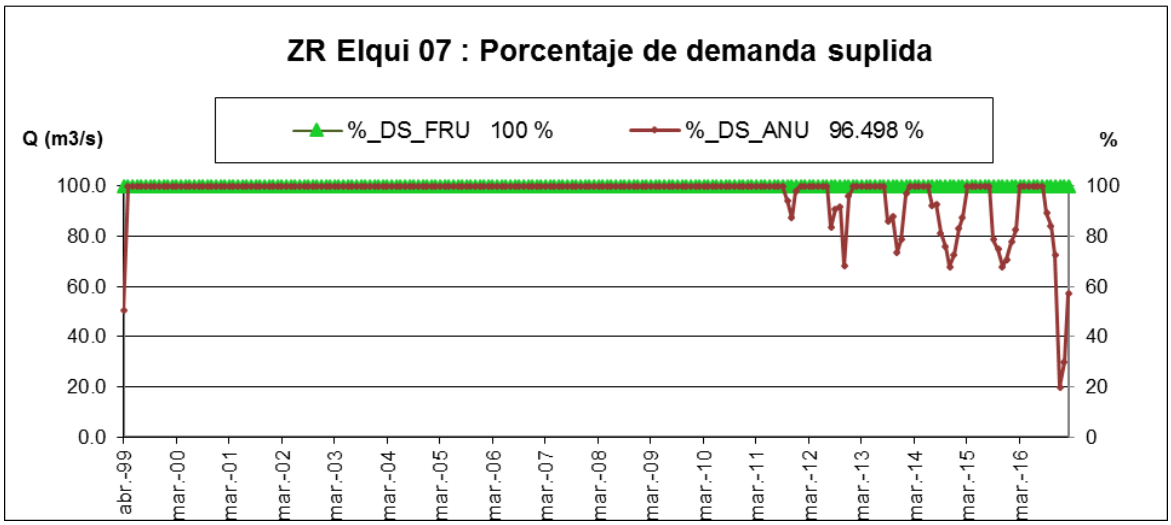
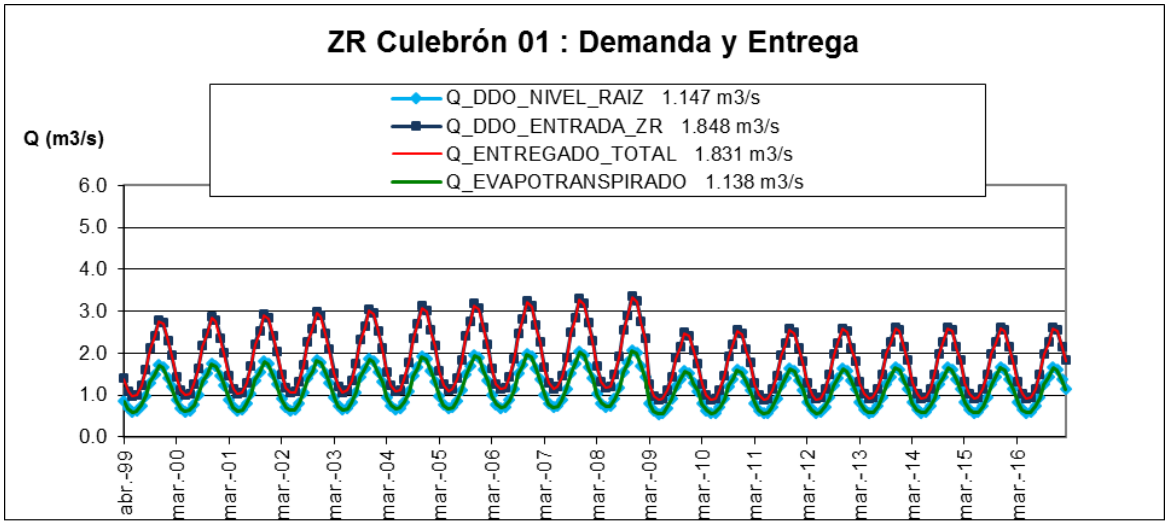
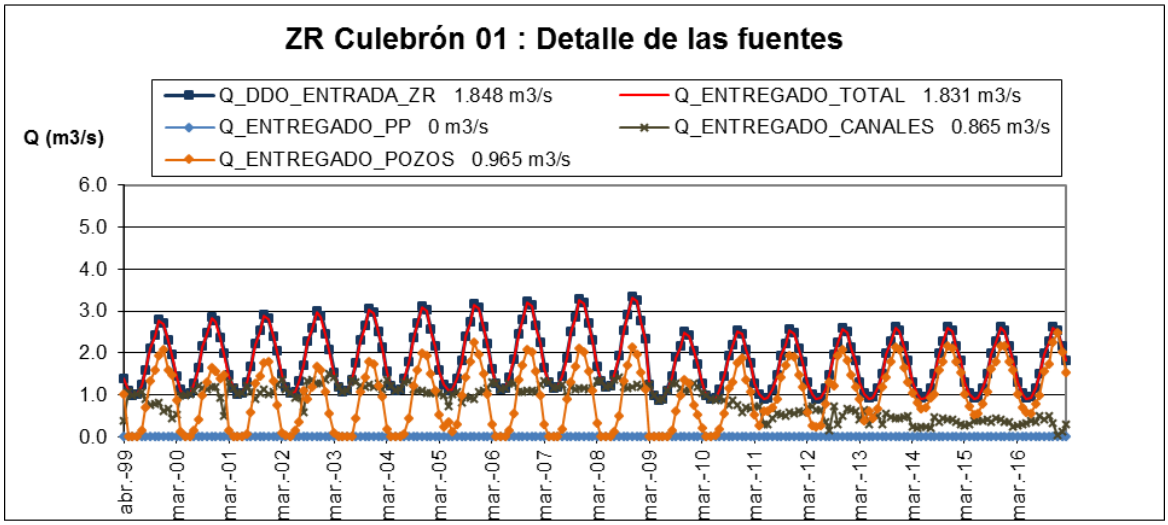


Figura 8.44
Pan de Azúcar





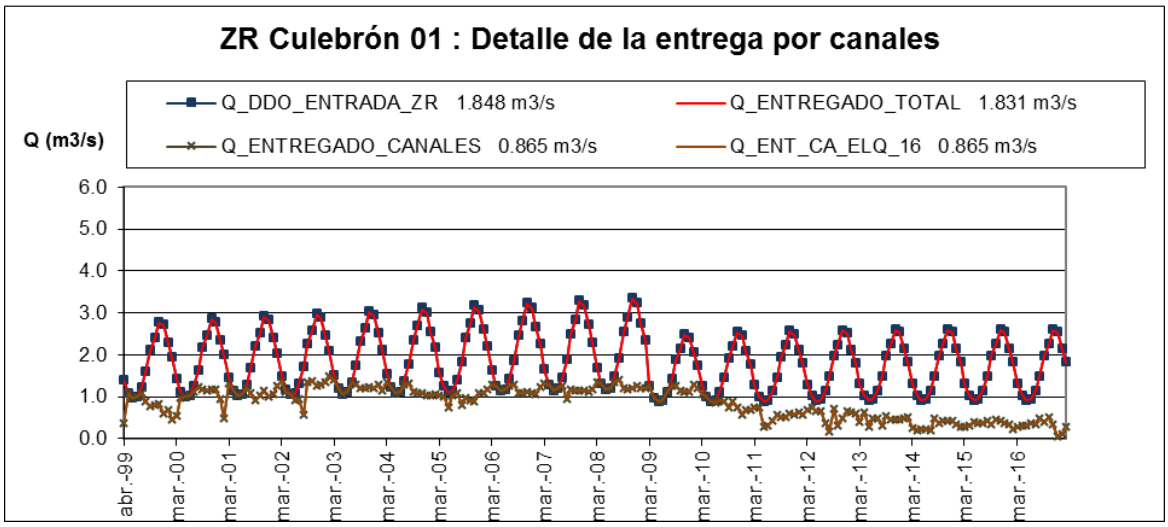
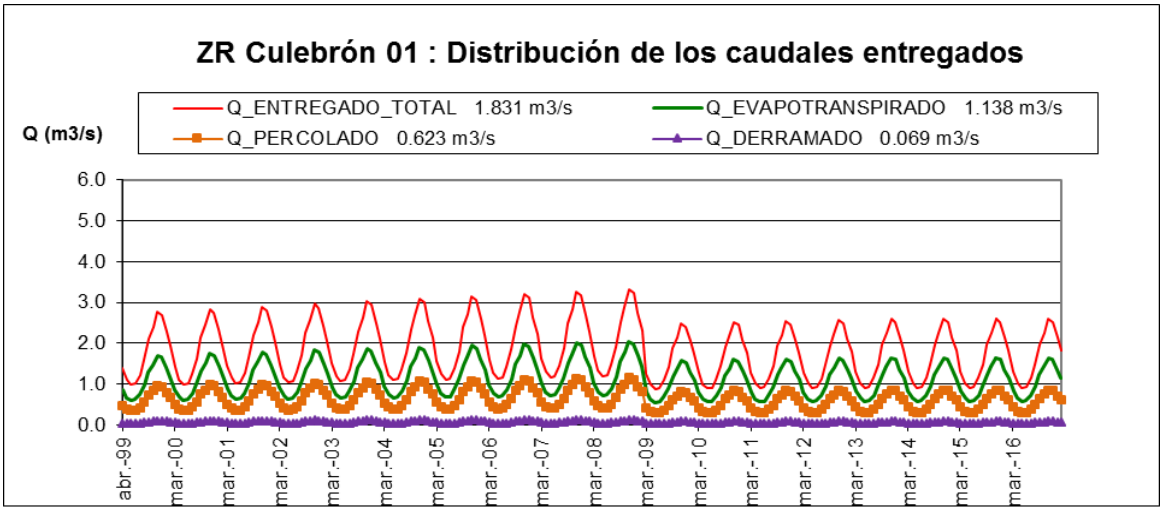
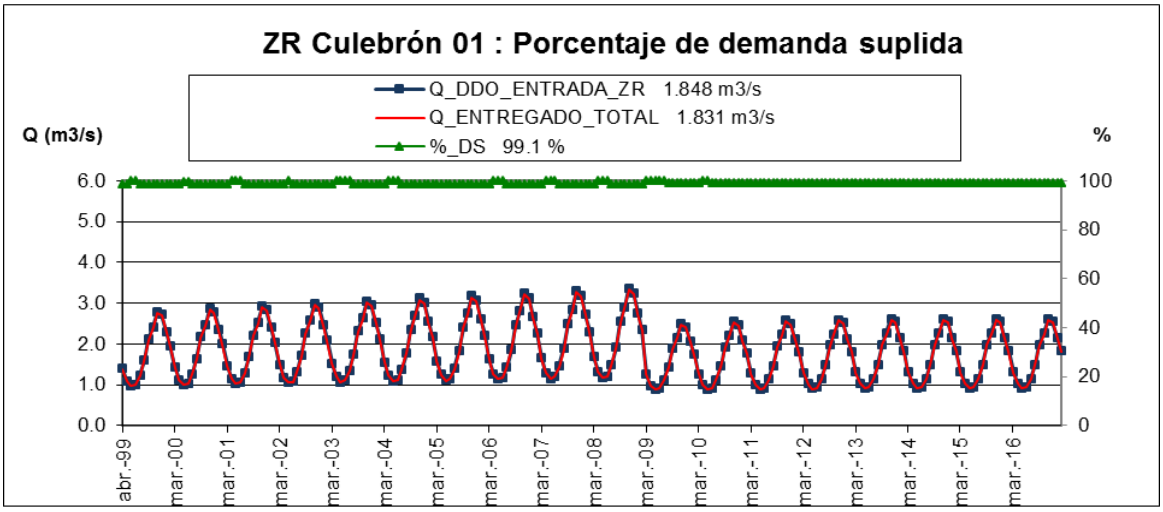
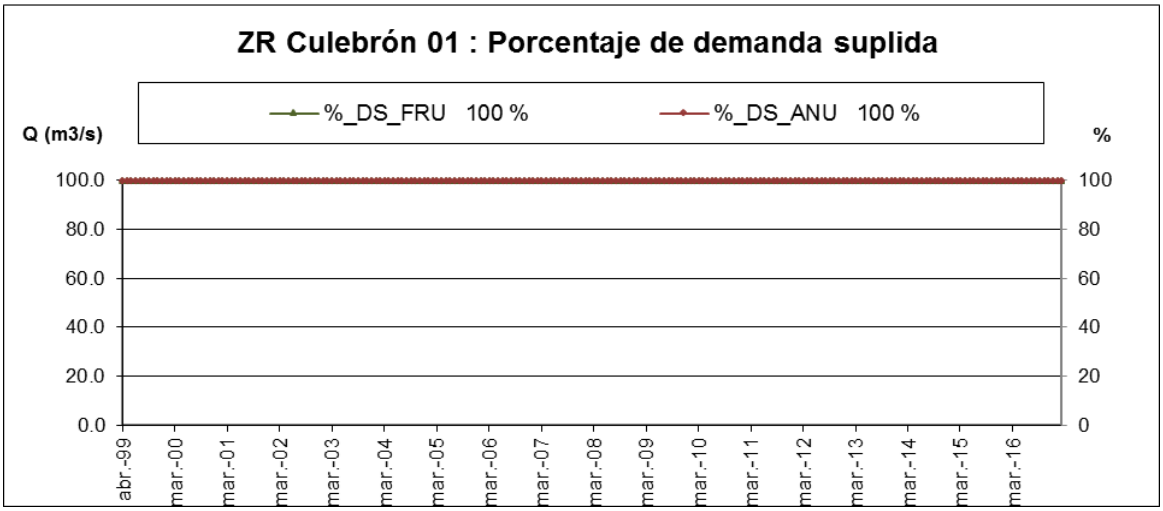


Figura 8.44 (Continuación)
Pan de Azúcar







d) Planilla Balance_CA

Esta planilla contiene una hoja para cada canal modelado, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.

De esta forma, se configura un set de 3 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado canal. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunos canales representativos de la cuenca del Elqui.

La prioridad para suplir las demandas siempre la tienen las zonas de riego frutales sobre las anuales. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

Los canales captan de acuerdo con los desmarques preestablecidos, con tope en su capacidad. Las capacidades a veces no dejan captar el desmarque completo. En los gráficos se observa claramente cuándo se capta menos que el desmarque establecido, y si ello responde o no a limitaciones de la capacidad.

Los canales tienen pérdidas, que van hacia los acuíferos subyacentes, y devoluciones, que se entregan de vuelta al río. Las devoluciones se generan en virtud de que la captación no está relacionada con la demanda, sino que con un porcentaje de desmarque, el cual en ocasiones puede superar la demanda.

La totalidad de canales se puede apreciar en la planilla del Anexo Capítulo 8.

- **Canal Chapilca-Las Mercedes o CA Turbio 02**

En este canal se observa que siempre recibe el desmarque que le corresponde, y que tiene capacidad para hacerlo. El caudal recibido por desmarque es mayor que el demandado por la respectiva zona de riego, en especial durante el período 2006-2010. Esto ocurre por igual en todos los canales del río Turbio. Sin embargo, también se observa que el mayor caudal recibido no se traduce en uso efectivo, sino que genera una mayor devolución hacia el río y hacia el acuífero. Ver gráficos de Figura 8.45.

- **Canales río Cochiguaz aguas arriba de El Peñón o CA Cochiguaz 01**

En este canal se observa claramente que para desmarques mayores que 59%, el canal topa en su capacidad y no es capaz de captar todo el caudal. Esto se observa en los años buenos, en que los desmarques son altos. También se observa la parte del agua que es consumida, las pérdidas hacia el acuífero, y el agua que es devuelta al sistema. Ver gráficos de la Figura 8.46.

- **Canal Miraflores o CA Elqui 02**

En este canal también se aprecia que no hay capacidad para captar todo el desmarque. El límite es de 50%. El canal suple dos zonas de riego, y tiene pérdidas hacia el acuífero a lo

largo de su trayecto, que se pueden visualizar en el gráfico. Tiene devoluciones al río, que se producen al inicio del invierno, al final de la época de riego. En épocas de riego, no hay devolución de agua al sistema. Ver gráficos de Figura 8.47.

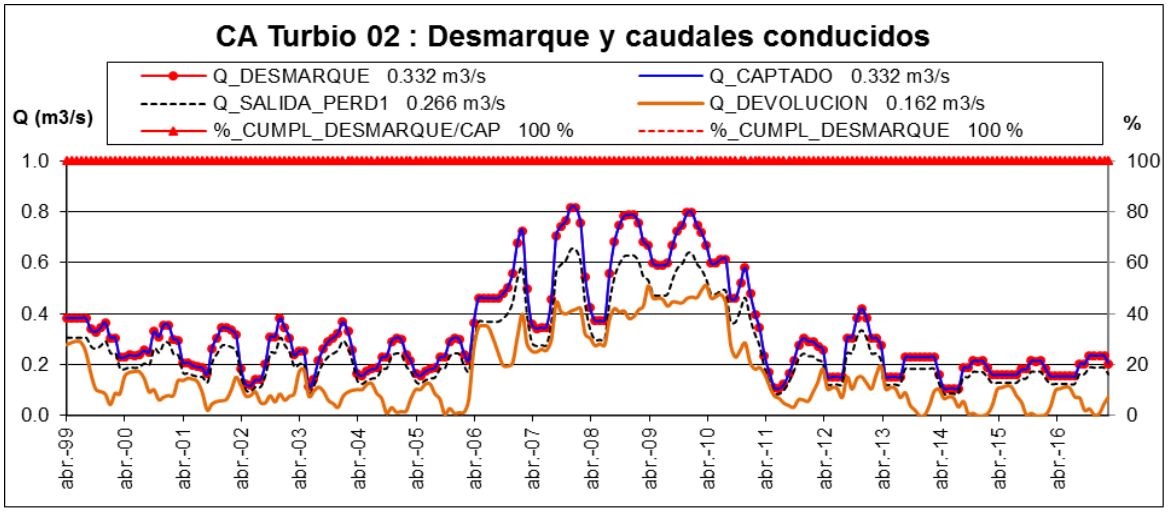
- **Canal Maitén o Delirio o CA Elqui 09**

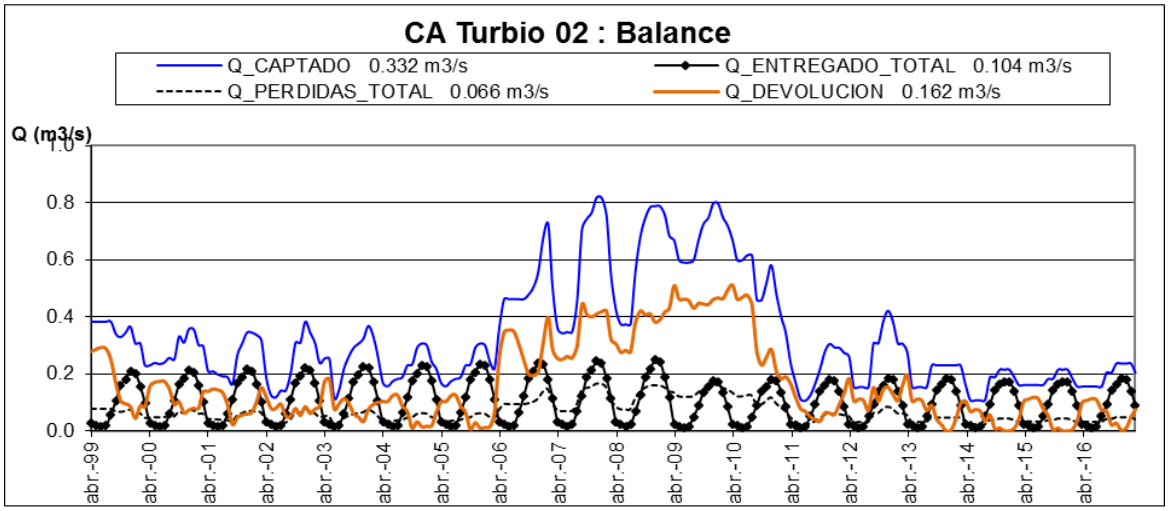
Este canal muestra un comportamiento que se observa en todos los canales aguas abajo de Puclaro, y es que no siempre capta el 100% de lo que le corresponde por desmarque. El agua entregada por el embalse se reparte solidariamente entre los canales de aguas abajo del Puclaro, y hay algunos meses, en especial durante la sequía, en que estos canales no pueden captar el caudal correspondiente al desmarque. Se aprecia claramente el período de sequía, en que los caudales recibidos se han reducido, como también las entregas hacia las zonas de riego. Es necesario recordar que las demandas tuvieron que ser reducidas mediante reducción del kc (con un factor de 0,7), a partir del año 2009, porque el sistema mostró que no era capaz de cubrir las demandas totales. Ver gráficos de Figura 8.48.

- **Canal Bellavista o CA Elqui 16**

Se observa que el canal alimenta 3 zonas de riego, no siempre capta lo que le corresponde por demarque, tiene grandes pérdidas, y prácticamente no tiene devoluciones hacia el sistema superficial. Ver gráfico de Figura 8.49.

Figura 8.45
Canal Chapilca-Las Mercedes (CA Turbio 02)





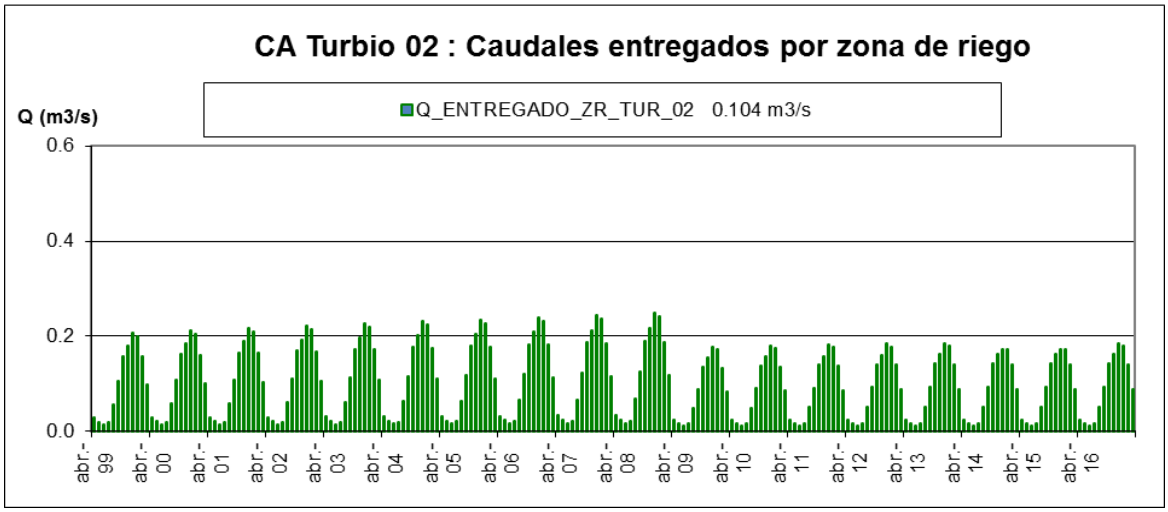
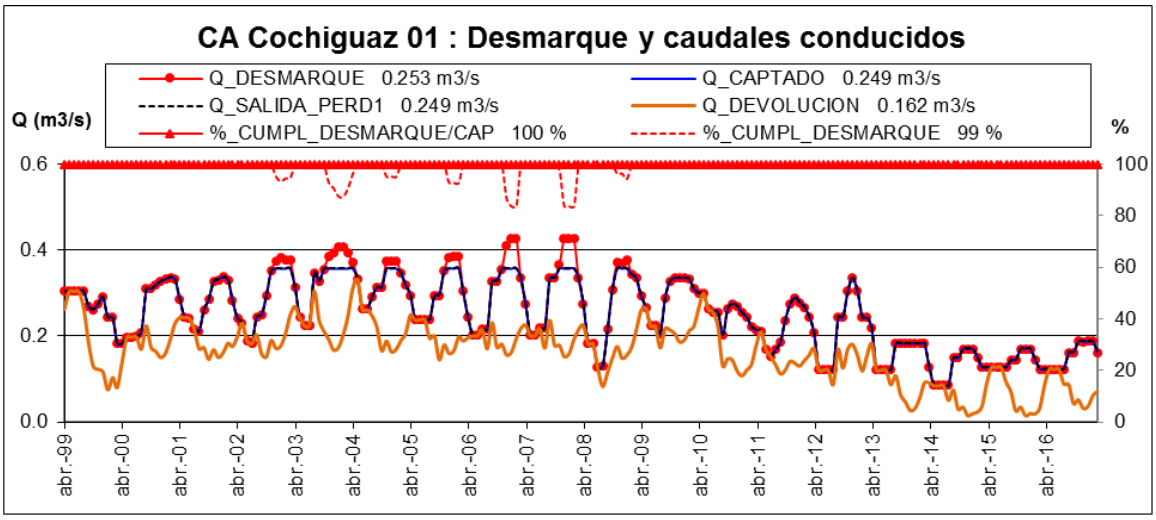
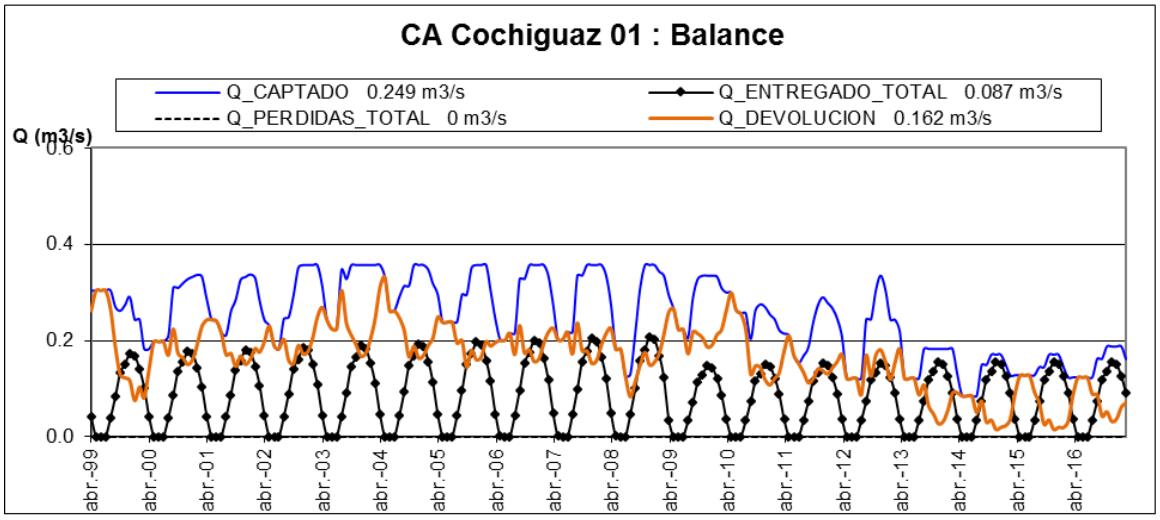


Figura 8.46
Canales de Cochiguaz aguas arriba de El Peñón





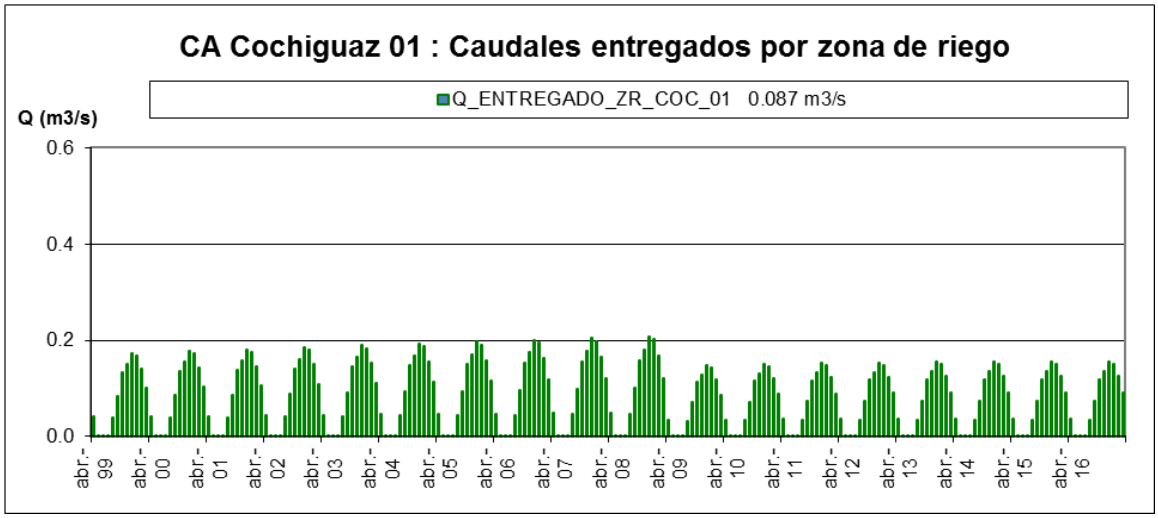
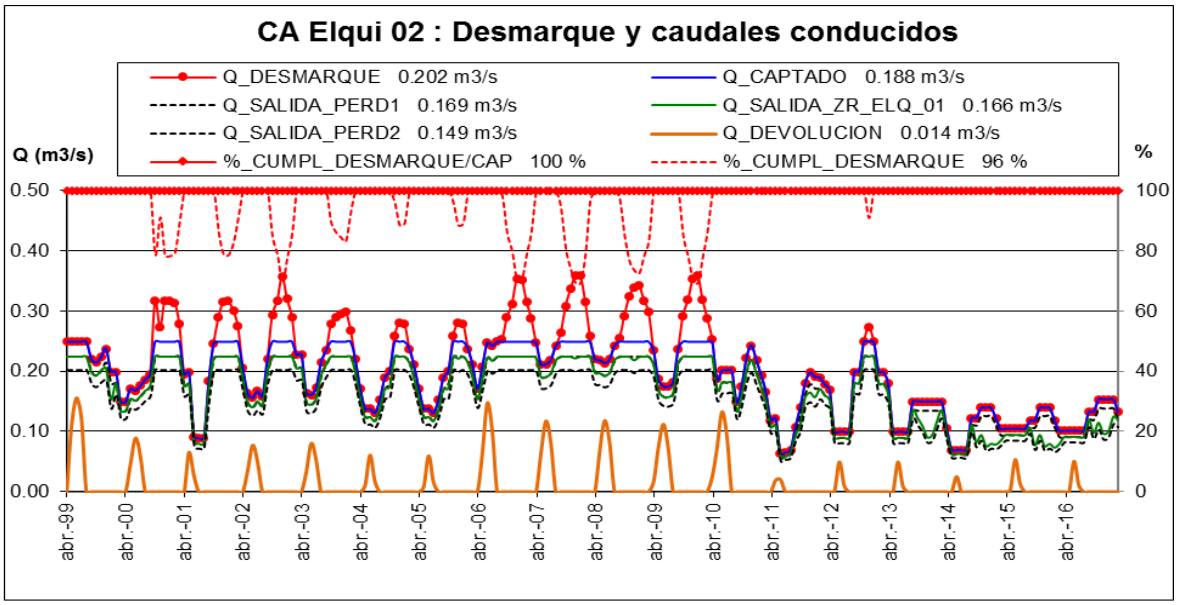
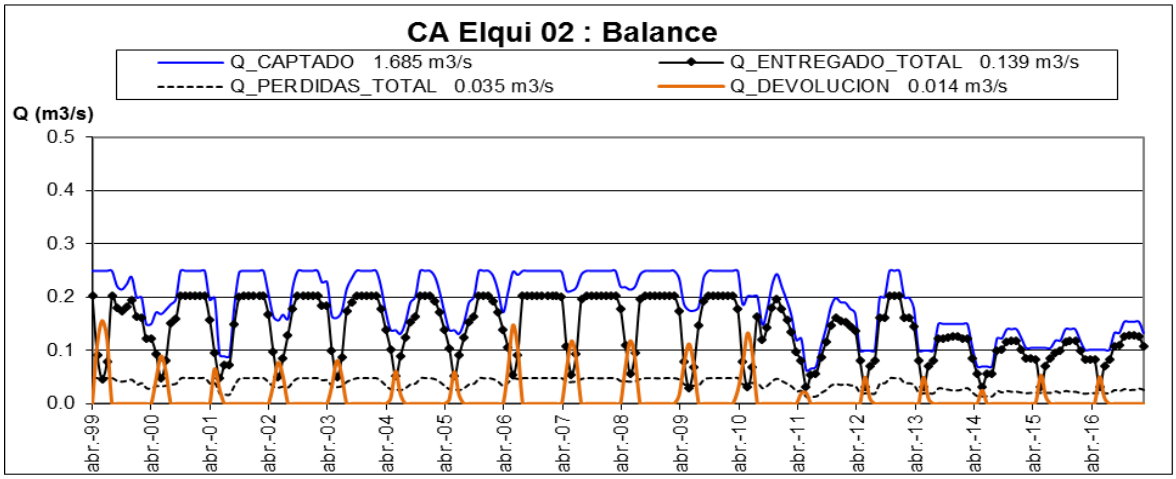


Figura 8.47
Canal Miraflores





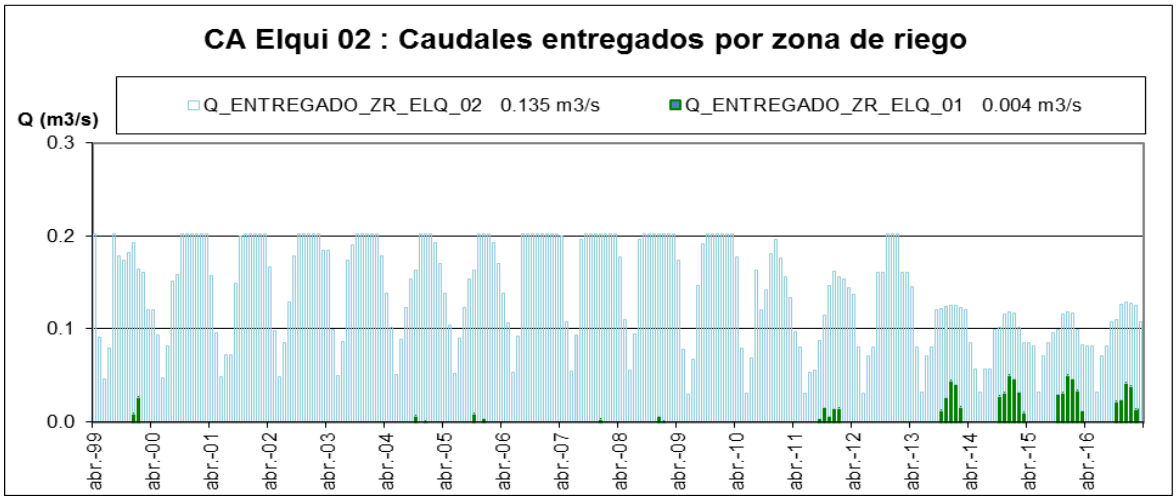
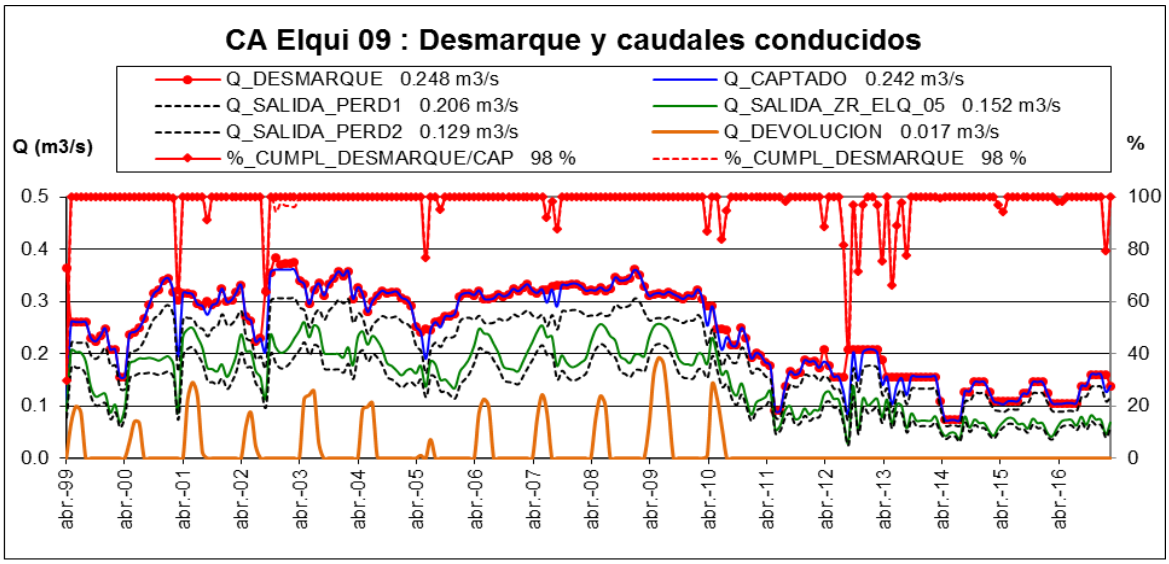
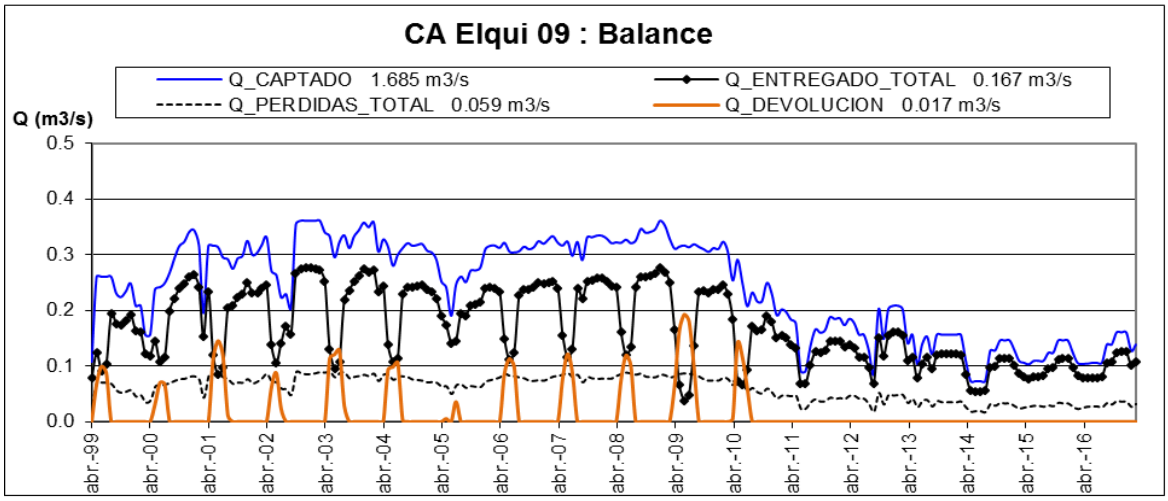


Figura 8.48
Canal Maitén o Delirio





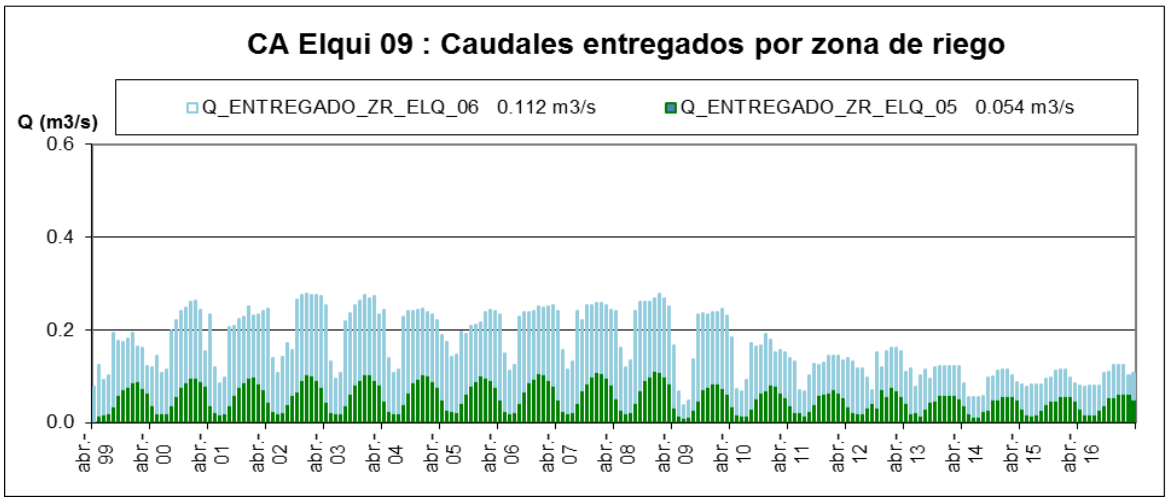
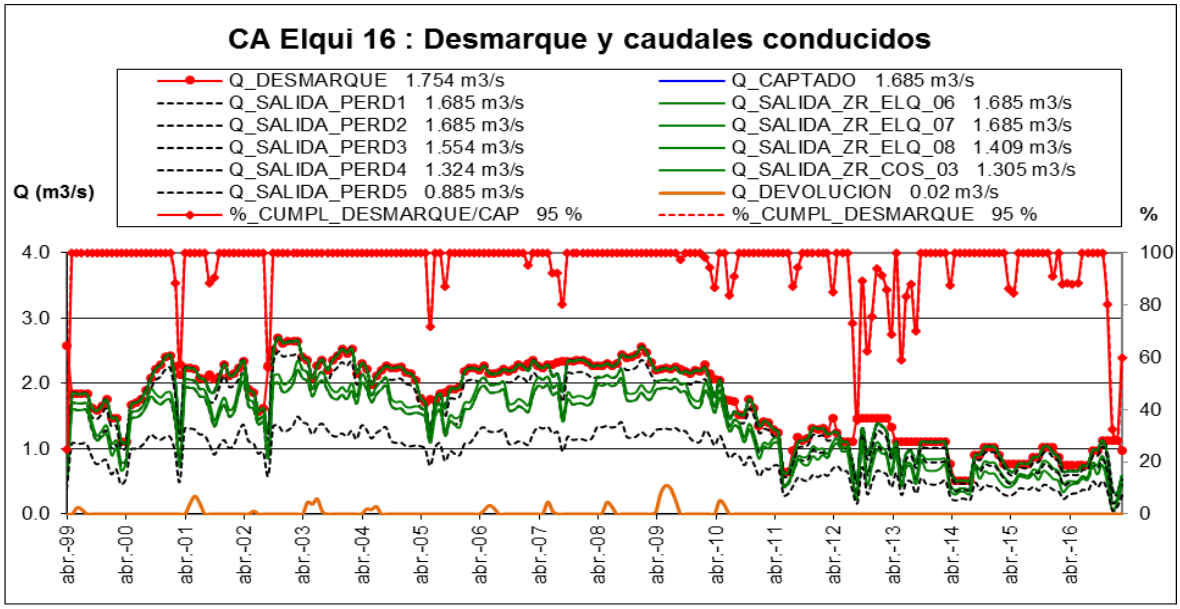
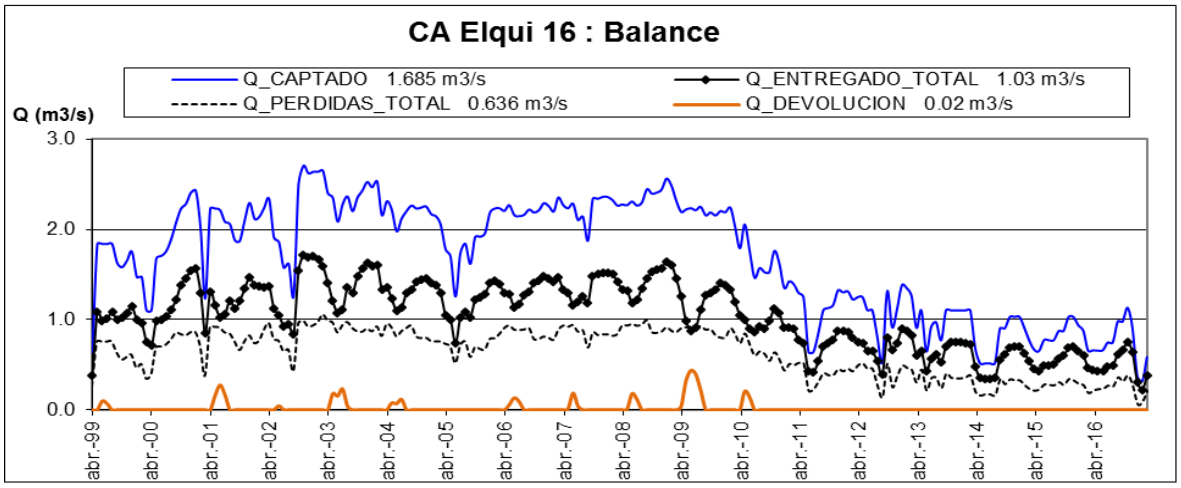
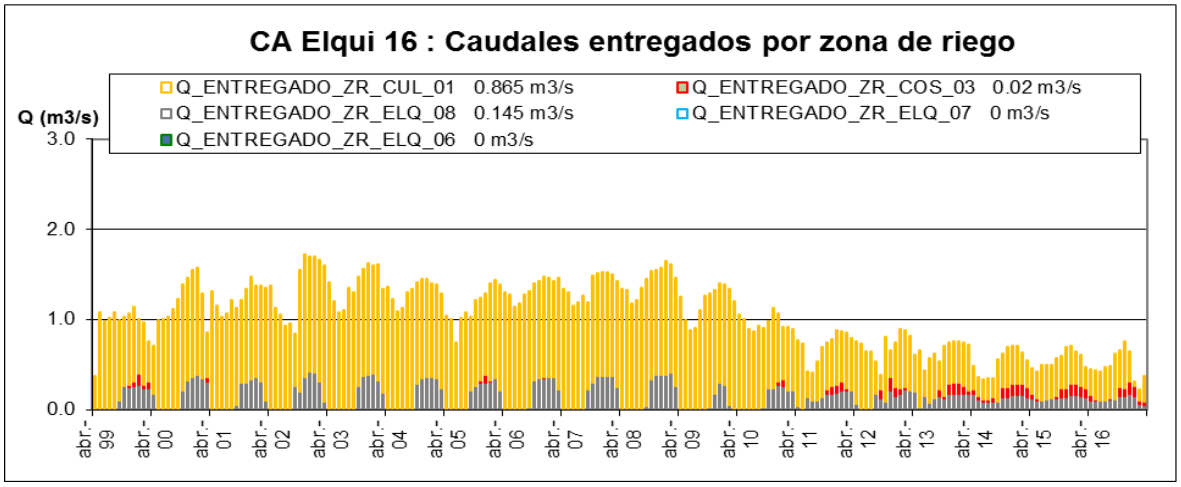


Figura 8.49
Canal Bellavista







e) Planilla Balance_AC

Esta planilla contiene una hoja para cada acuífero modelado, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.

De esta forma, se configura un set de 4 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado acuífero. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunos acuíferos representativos de la cuenca del Elqui.

En los gráficos se puede apreciar el origen de las recargas, los afloramientos y recarga neta, los bombeos que se solicitan al acuífero por uso, y el volumen resultante de la operación. En este caso, los gráficos entregan el volumen de los acuíferos, y no el nivel.

En la modelación se asume que el acuífero es capaz de entregar todo el caudal solicitado, mientras exista algún volumen disponible. Probablemente en la realidad esto no sea así, y el caudal entregado vaya disminuyendo a medida que descienden los niveles.

Cuando se trata del agua superficial provista por los canales, las zonas de riego frutales tienen prioridad sobre las anuales. No es así en el caso de pozos, que suplen ambos tipos de zona con la misma prioridad. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

- **Río Turbio**

En este sector no se hace uso del acuífero, salvo 2 l/s para el agua potable rural. Las recargas potenciales provienen fundamentalmente del cauce y de los canales, y en muy menor grado de las zonas de riego, que están altamente tecnificadas en este sector. Casi todo el caudal disponible para percolar, vuelve a aflorar, debido a que los acuíferos se mantienen prácticamente llenos en este sector. Ver gráficos de Figura 8.50.

- **Río Claro**

En este sector no hay usos del acuífero, salvo por la vegetación freatófita del lecho, que representa una demanda de unos 26 l/s. El uso de pozos para riego es mínimo. La recarga al acuífero está constituida fundamentalmente por las pérdidas de los canales. El cauce tiene una importancia secundaria en este aspecto. El acuífero recibe muy poca recarga (neta), aflorando casi toda la recarga potencial.El acuífero se mantiene lleno. Ver gráficos de Figura 8.51.

- **Río Elqui sobre Puclaro**

Se presenta como ejemplo el acuífero de Vicuña. El uso en este acuífero es para agua potable, y mínimamente para suplir el déficit de riego, exclusivamente durante la sequía. El acuífero está fundamentalmente alimentado por las pérdidas de canales, y en proporción menor, por las aguas del cauce. Casi todo el caudal potencial de recarga aflora, salvo en la

época de sequía proyectada, en que se produce alguna recarga neta positiva. El acuífero se mantiene siempre lleno. Ver gráficos de Figura 8.52.

- **Río Elqui Bajo**

El sector de Elqui bajo Puclaro está representado en el modelo por 5 acuíferos, de los cuales los tres más bajos son actualmente intensamente explotados. La forma en que evolucionan los volúmenes en el tiempo, se muestra en el más crítico de ellos, AC Elqui 08, donde hoy se encuentra la minera Teck y parcialmente el agua potable de La Serena. Lo que se observa en este acuífero, es que la explotación no es sustentable en época de sequía, debido a la reducción de la recarga. Ver gráficos de Figura 8.53.

- **Sector Costa**

En los sectores de la costa no hay efecto de la sequía, aunque los usos de riego se intensifican levemente. Los acuíferos siguen siendo bien recargados, y sus volúmenes no varían, salvo leve y transitoriamente en el acuífero Vegas Norte.

- **Pan de Azúcar**

Este sector se alimenta tanto de agua superficial (canales derivados del canal Bellavista) como también, en forma importante, con aguas subterráneas, como se aprecia en el segundo gráfico. Prácticamente no hay derrames. Las ineficiencias de riego constituyen percolaciones hacia el acuífero. La zona de riego es suplida casi en su totalidad siempre, durante el período histórico, y también en los tres años secos adicionales. Ver gráficos en Figura 8.54.

Figura 8.50
Acuíferos río Turbio

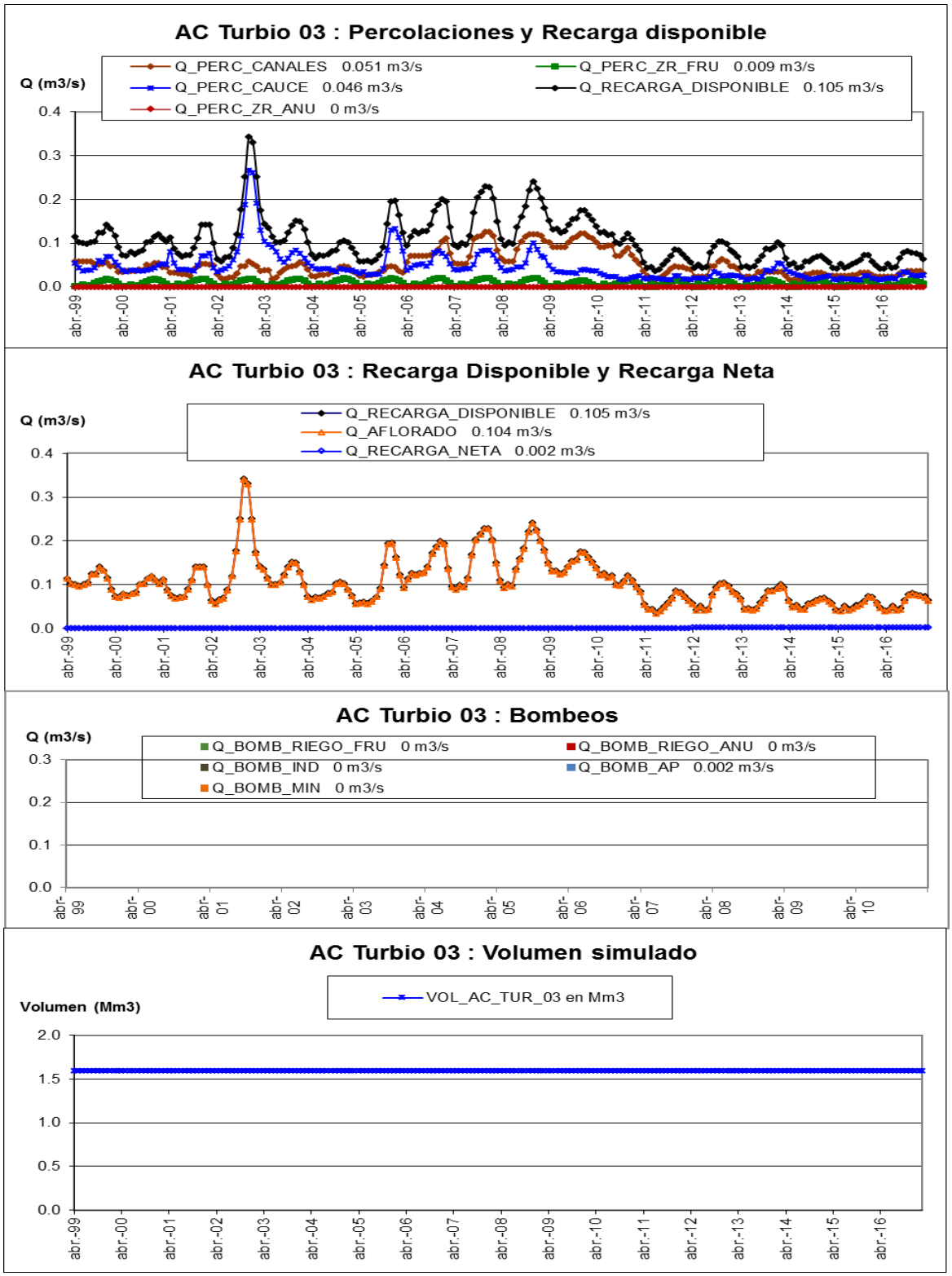


Figura 8.51
Acuífero río Claro

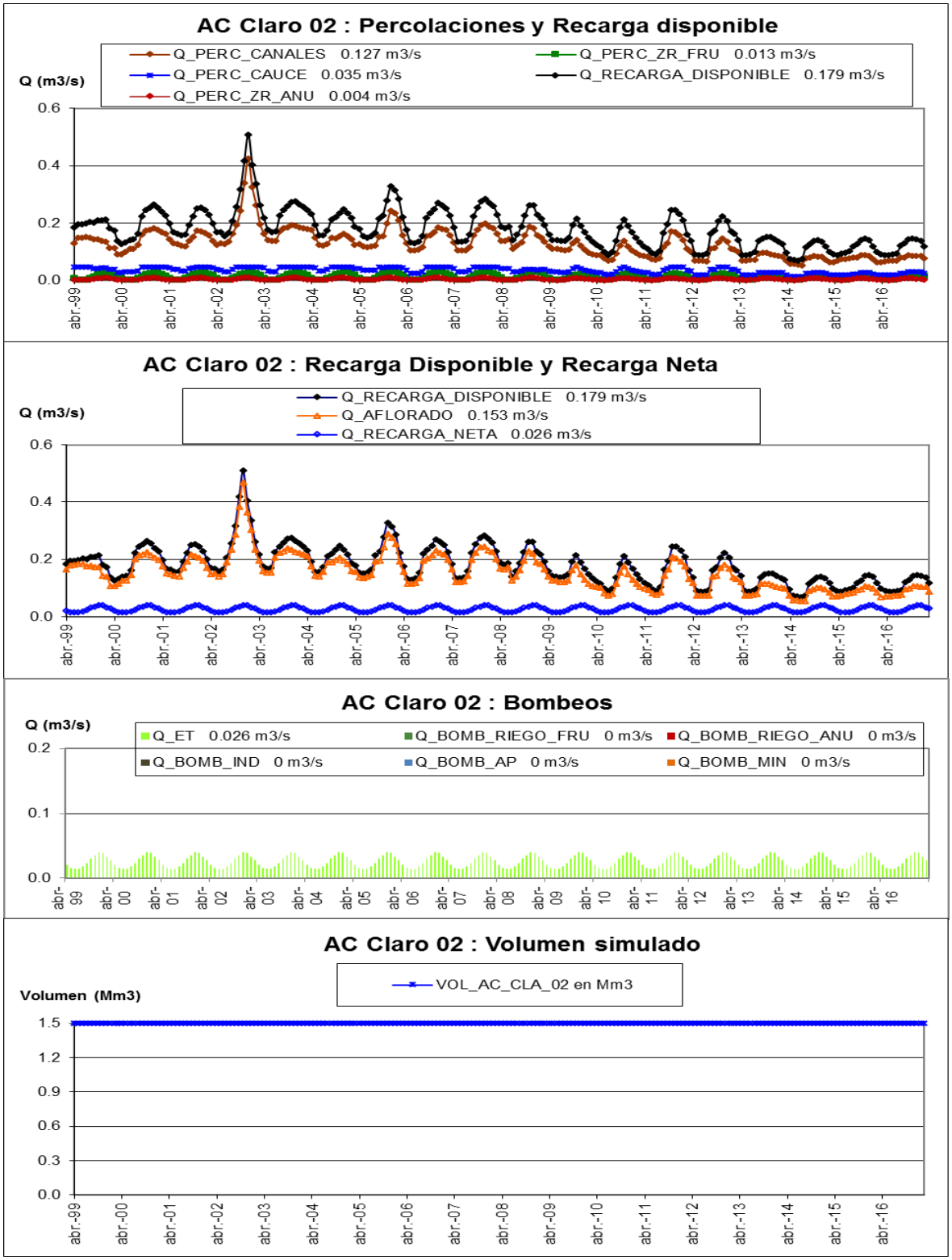


Figura 8.52
Acuífero de Vicuña

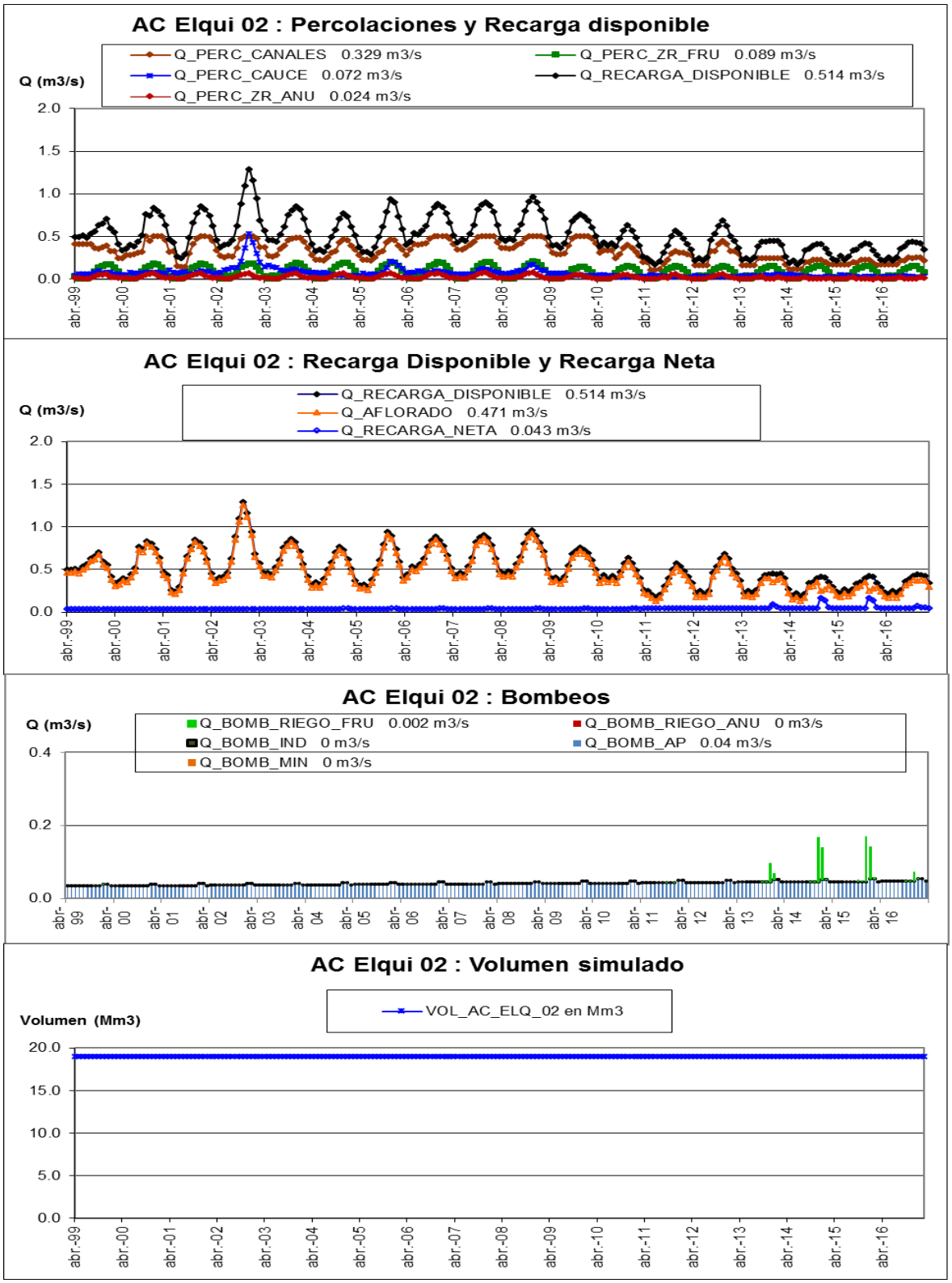


Figura 8.53
Acuífero Alfalfares

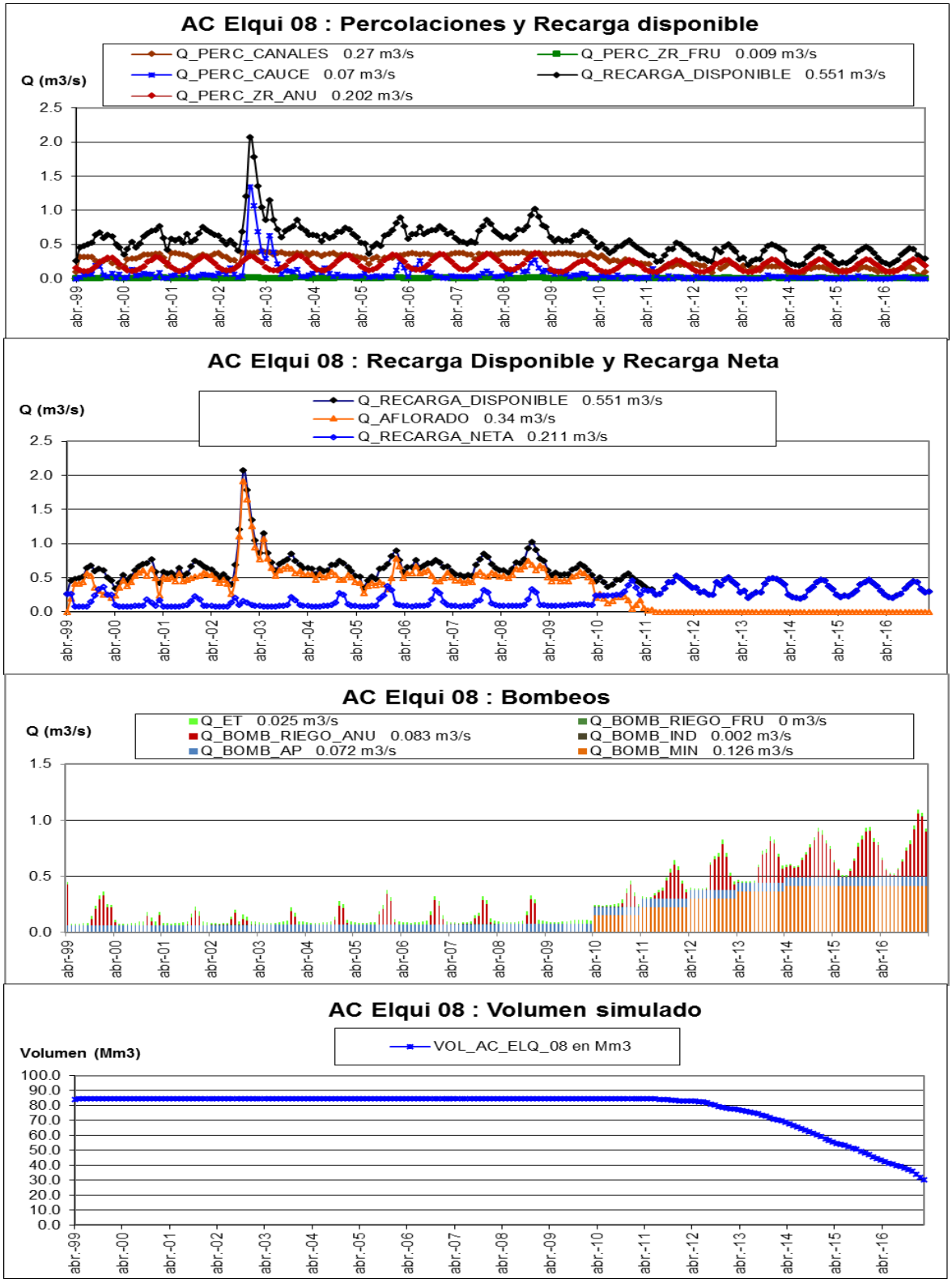
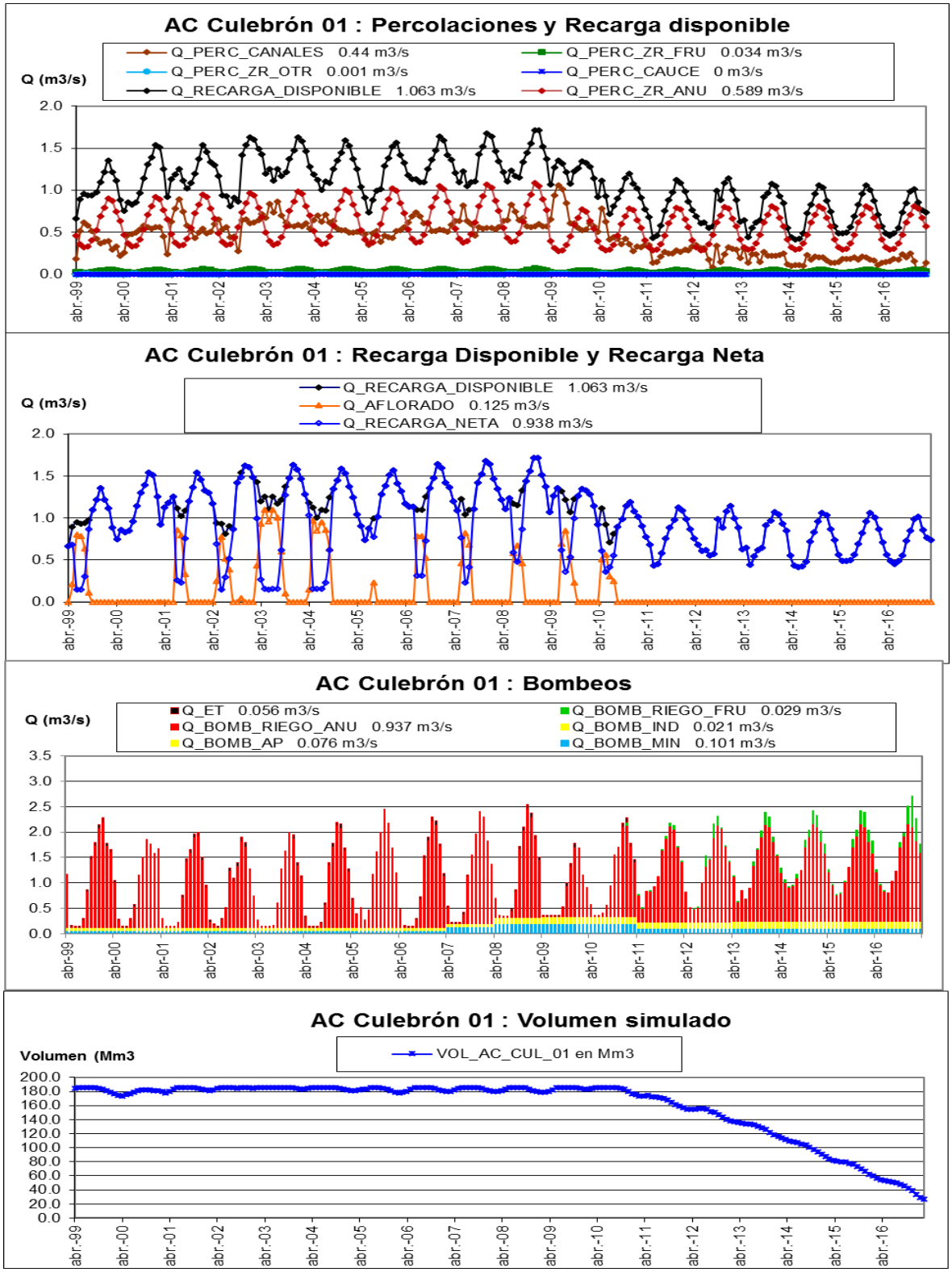


Figura 8.54
Acuífero Culebrón



8.3.5 Resultados globales del escenario de Calibración

Cada variable en cada una de las planillas se ha presentado con su promedio del período 1999-2014.

A continuación se muestra un cuadro resumen obtenido de cada tipo de planilla, con los promedios de todas las variables analizadas. Estos valores promedio constituyen un valor de referencia, y sirven para comparar escenarios entre ellos. La variabilidad temporal de cada variable se aprecia en las series de tiempo, todas graficadas.

Tabla 8.15
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (1999-2014)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.050	0.060	0.055	0.003	0.001	0.059	0.049	0.007	0.003	99
ZR_CAL_01	174.8	0.017	0.020	0.000	0.020	0.000	0.020	0.017	0.003	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.071	0.106	0.105	0.000	0.001	0.106	0.071	0.004	0.032	99
ZR_TUR_03	279.4	0.057	0.068	0.068	0.000	0.001	0.069	0.057	0.009	0.003	100
ZR_EDE_01	169.8	0.030	0.057	0.053	0.000	0.000	0.053	0.028	0.020	0.004	96
ZR_EDE_02	781.8	0.182	0.244	0.235	0.001	0.000	0.236	0.176	0.050	0.010	98
ZR_COC_01	223.3	0.049	0.088	0.088	0.000	0.000	0.088	0.048	0.000	0.040	100
ZR_COC_02	198.8	0.039	0.050	0.050	0.000	0.000	0.050	0.039	0.000	0.011	100
ZR_CLA_01	271.0	0.071	0.100	0.100	0.000	0.000	0.100	0.071	0.020	0.009	100
ZR_PAI_01	216.0	0.054	0.108	0.103	0.000	0.000	0.103	0.053	0.038	0.013	97
ZR_CLA_02	364.2	0.091	0.114	0.114	0.000	0.000	0.114	0.091	0.018	0.006	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.063	0.078	0.078	0.000	0.001	0.079	0.063	0.012	0.004	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.481	0.634	0.624	0.006	0.006	0.636	0.479	0.118	0.039	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.327	0.443	0.413	0.030	0.004	0.447	0.327	0.090	0.030	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.023	0.046	0.025	0.000	0.000	0.025	0.013	0.010	0.003	71
ZR_ELQ_05	208.8	0.045	0.080	0.076	0.000	0.000	0.076	0.044	0.024	0.008	96
ZR_ELQ_06	2027.8	0.320	0.490	0.425	0.063	0.000	0.488	0.319	0.134	0.036	100
ZR_ELQ_07	2099.8	0.296	0.514	0.499	0.004	0.000	0.504	0.290	0.169	0.045	98
ZR_ELQ_08	2334.3	0.331	0.604	0.543	0.061	0.000	0.604	0.331	0.216	0.057	100
ZR_GRA_01	1519.7	0.223	0.395	0.327	0.024	0.000	0.352	0.200	0.106	0.046	91
ZR_COS_01	93.3	0.012	0.024	0.000	0.024	0.000	0.024	0.012	0.012	0.000	100
ZR_COS_02	734.1	0.097	0.168	0.152	0.015	0.000	0.168	0.097	0.071	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.167	0.316	0.312	0.003	0.000	0.315	0.167	0.133	0.015	100
ZR_CUL_01	7689.9	1.162	1.879	0.963	0.899	0.000	1.861	1.154	0.637	0.071	99
TOTAL	**25318**	**4.258**	**6.685**	**5.410**	**1.154**	**0.014**	**6.578**	**4.196**	**1.900**	**0.482**	**98.9**

Tabla 8.16
Promedios de variables asociadas a canales (1999-2014)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.145	0.145	0.022	0.056	0.067	100	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.363	0.363	0.073	0.106	0.184	100	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.225	0.225	0.049	0.067	0.109	100	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.142	0.142	0.033	0.001	0.109	100	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.182	0.176	0.053	0.053	0.070	99	100	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.103	0.091	0.005	0.037	0.050	97	100	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.729	0.716	0.107	0.198	0.411	100	100	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.275	0.270	0.000	0.088	0.182	99	100	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.182	0.173	0.000	0.050	0.123	96	100	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.485	0.485	0.155	0.100	0.230	100	100	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.146	0.138	0.037	0.077	0.024	96	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.460	0.457	0.105	0.037	0.315	100	100	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.321	0.087	0.103	0.132		32		1.000	
CA_ELQ_01	0.095	0.093	0.022	0.057	0.013	98	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.219	0.202	0.038	0.149	0.015	95	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.068	0.067	0.015	0.019	0.032	99	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.434	0.427	0.098	0.236	0.092	99	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.933	0.925	0.213	0.245	0.467	99	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.247	0.238	0.051	0.162	0.024	98	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.575	0.575	0.132	0.259	0.184	100	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.051	0.049	0.015	0.025	0.009	97	97	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.274	0.267	0.065	0.181	0.020	97	97	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.018	0.018	0.006	0.012	0.000	99	99	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.199	0.182	0.049	0.132	0.000	92	97	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.369	0.357	0.113	0.243	0.001	96	97	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.320	0.309	0.117	0.118	0.073	96	96	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.155	0.145	0.048	0.082	0.016	94	96	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	1.016	0.981	0.356	0.441	0.184	96	96	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	1.933	1.867	0.712	1.131	0.023	96	96	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.183	0.177	0.067	0.071	0.038	96	96	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.206	0.175	0.050	0.125	0.000	86	96	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.307	0.256	0.054	0.150	0.052	85	96	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.315	0.299	0.114	0.184	0.002	95	96	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.653	0.630	0.189	0.303	0.139	96	96	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.339	0.136	0.153	0.051		94		0.360	
TOTAL		12.282	3.389	5.452	3.441			3044.420	25.604	
								22689.290		

Tabla 8.17
Promedios de variables asociadas a acuíferos (1999-2014)

Acuíferos	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	millones r	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.022	0.043	0.007	0.052	0.020	0.017	0.003	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.880	0.003	0.864	0.020		0.020	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.098	0.053	0.004	0.154	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.056	0.050	0.009	0.113	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.053	0.010	0.020	0.082	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.112	0.012	0.050	0.169	0.005		0.001	0.004	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.033	0.155	0.020	0.209	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.087	0.003	0.038	0.124	0.004		0.000	0.004	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.138	0.037	0.018	0.167	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.058	0.085	0.012	0.120	0.035		0.000	0.000	0.035	0.000
AC_ELQ_02	19	0.356	0.079	0.118	0.514	0.040		0.006	0.039	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.156	0.082	0.090	0.291	0.036	0.010	0.030	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.015	0.078	0.010	0.093	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.074	0.075	0.024	0.165	0.009	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.402	0.073	0.134	0.365	0.243	0.012	0.063	0.092	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.315	0.039	0.169	0.203	0.322	0.020	0.004	0.309	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.299	0.083	0.216	0.408	0.190	0.025	0.061	0.070	0.069	0.002
AC_GRA_01	8	0.091	0.000	0.106	0.174	0.024		0.024	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.012	0.223	0.077	0.006	0.024	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.186		0.071	0.238	0.045		0.015	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.480		0.133	0.603	0.029		0.003	0.001	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.496	0.000	0.637	0.150	0.983	0.056	0.899	0.067	0.101	0.021
TOTAL	**451.7**	**3.527**	**1.839**	**1.900**	**5.481**	**2.121**	**0.190**	**1.154**	**0.597**	**0.351**	**0.043**

8.3.6 Resultados globales del escenario Futuro Base 3

A continuación se presentan las mismas tablas, con la información promedio de los años de sequía proyectados para este escenario, 2014-2017.

Tabla 8.18
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.044	0.052	0.041	0.008	0.001	0.050	0.042	0.006	0.002	98
ZR_CAL_01	174.8	0.031	0.036	0.000	0.036	0.001	0.037	0.031	0.006	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.062	0.093	0.091	0.000	0.001	0.093	0.062	0.003	0.028	99
ZR_TUR_03	279.4	0.050	0.059	0.059	0.000	0.001	0.060	0.050	0.008	0.003	100
ZR_EDE_01	169.8	0.026	0.050	0.043	0.000	0.000	0.043	0.023	0.016	0.003	93
ZR_EDE_02	781.8	0.159	0.213	0.202	0.002	0.000	0.204	0.152	0.043	0.009	98
ZR_COC_01	223.3	0.042	0.077	0.077	0.000	0.000	0.077	0.042	0.000	0.035	100
ZR_COC_02	198.8	0.034	0.043	0.043	0.000	0.000	0.043	0.034	0.000	0.009	100
ZR_CLA_01	271.0	0.062	0.087	0.087	0.000	0.000	0.087	0.062	0.018	0.008	100
ZR_PAI_01	216.0	0.047	0.094	0.082	0.000	0.000	0.082	0.043	0.029	0.010	91
ZR_CLA_02	364.2	0.079	0.099	0.099	0.000	0.000	0.100	0.079	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.055	0.068	0.068	0.000	0.001	0.069	0.055	0.011	0.004	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.420	0.553	0.500	0.013	0.007	0.519	0.400	0.089	0.030	96
ZR_ELQ_03	1482.5	0.286	0.386	0.226	0.160	0.004	0.391	0.286	0.079	0.026	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.020	0.040	0.014	0.000	0.000	0.014	0.007	0.005	0.002	53
ZR_ELQ_05	208.8	0.040	0.070	0.056	0.000	0.000	0.056	0.035	0.017	0.005	84
ZR_ELQ_06	2027.8	0.279	0.428	0.263	0.161	0.000	0.424	0.277	0.116	0.031	99
ZR_ELQ_07	2099.8	0.258	0.448	0.346	0.028	0.000	0.375	0.218	0.124	0.033	88
ZR_ELQ_08	2334.3	0.289	0.528	0.308	0.219	0.000	0.528	0.289	0.189	0.050	100
ZR_GRA_01	1519.7	0.194	0.345	0.109	0.070	0.000	0.178	0.106	0.050	0.022	60
ZR_COS_01	93.3	0.011	0.021	0.000	0.021	0.000	0.021	0.011	0.011	0.000	100
ZR_COS_02	734.1	0.085	0.147	0.105	0.041	0.000	0.146	0.084	0.061	0.000	99
ZR_COS_03	1207.6	0.146	0.276	0.248	0.021	0.000	0.270	0.143	0.114	0.013	98
ZR_CUL_01	7689.9	1.068	1.694	0.337	1.340	0.000	1.676	1.059	0.555	0.062	99
TOTAL	**25318**	**3.787**	**5.907**	**3.405**	**2.121**	**0.016**	**5.542**	**3.589**	**1.565**	**0.388**	**96**

Tabla 8.19
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.071	0.071	0.011	0.041	0.020	100	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.179	0.179	0.036	0.091	0.052	100	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.111	0.111	0.024	0.055	0.032	100	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.070	0.070	0.016	0.004	0.050	100	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.103	0.103	0.031	0.043	0.029	100	100	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.058	0.058	0.003	0.031	0.024	100	100	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.410	0.410	0.062	0.172	0.177	100	100	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.142	0.142	0.000	0.077	0.065	100	100	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.094	0.094	0.000	0.043	0.050	100	100	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.266	0.266	0.085	0.087	0.094	100	100	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.080	0.080	0.022	0.049	0.010	100	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.253	0.253	0.058	0.051	0.144	100	100	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.164	0.044	0.082	0.038		16		1.000	
CA_ELQ_01	0.051	0.051	0.012	0.034	0.004	100	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.116	0.116	0.021	0.091	0.004	100	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.036	0.036	0.008	0.019	0.009	100	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.231	0.231	0.053	0.139	0.039	100	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.496	0.496	0.114	0.239	0.143	100	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.131	0.131	0.023	0.098	0.010	100	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.305	0.305	0.070	0.173	0.062	100	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.024	0.023	0.007	0.014	0.002	98	98	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.122	0.120	0.027	0.093	0.000	99	99	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.008	0.008	0.003	0.005	0.000	100	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.089	0.087	0.022	0.065	0.000	98	98	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.164	0.153	0.049	0.105	0.000	95	95	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.142	0.130	0.049	0.080	0.000	93	93	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.069	0.062	0.019	0.044	0.000	92	92	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.451	0.409	0.124	0.281	0.004	92	92	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	0.859	0.776	0.255	0.522	0.000	92	92	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.081	0.074	0.028	0.046	0.000	92	92	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.092	0.085	0.020	0.065	0.000	93	93	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.136	0.123	0.023	0.099	0.001	92	92	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.140	0.127	0.048	0.078	0.000	92	92	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.290	0.262	0.079	0.181	0.003	92	92	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.252	0.101	0.107	0.045		70		0.360	
TOTAL		6.059	1.547	3.402	1.110			3044.420	25.604	
								22689.290		

Tabla 8.20
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuíferos	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	Mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.011	0.022	0.006	0.013	0.025	0.017	0.008	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.287	0.006	0.257	0.036		0.036	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.049	0.024	0.003	0.075	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.027	0.023	0.008	0.056	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.031	0.006	0.016	0.051	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.064	0.007	0.043	0.107	0.007		0.002	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.016	0.085	0.018	0.119	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.044	0.002	0.029	0.070	0.004		0.000	0.004	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.074	0.022	0.015	0.084	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.032	0.039	0.011	0.016	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.191	0.035	0.089	0.256	0.059		0.013	0.046	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.078	0.035	0.079	0.022	0.170	0.010	0.160	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.007	0.033	0.005	0.035	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.034	0.031	0.017	0.073	0.009	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.168	0.030	0.116	0.000	0.314	0.012	0.161	0.109	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.128	0.011	0.124	0.000	0.263	0.020	0.028	0.368	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.123	0.009	0.189	0.000	0.320	0.025	0.219	0.083	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.020	0.000	0.050	0.005	0.066		0.070	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.011	0.174	0.074	0.006	0.021	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.146		0.061	0.171	0.067		0.041	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.118		0.114	0.204	0.051		0.021	0.001	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.159	0.000	0.555	0.000	0.714	0.056	1.340	0.118	0.100	0.021
TOTAL	**451.7**	**1.520**	**0.701**	**1.565**	**1.791**	**2.286**	**0.190**	**2.121**	**0.748**	**0.722**	**0.043**

8.3.7 Comentario sobre los escenarios de Calibración y Futuro Base 3

El escenario de Calibración muestra los promedios del período 1999-2014. Para este período, se observa que los canales captan un caudal de 12,3 m3/s, de los cuales sólo 5,4 se entregan en las zonas de riego, a suplir una demanda de 6,7 m3/s. La demanda no suplida por canales, se solicita a los acuíferos, que aportan 1,15 m3/s. Entre todas las fuentes, la demanda finalmente se ve muy bien suplida, como promedio en un 98,9%, considerando que desde abril de 2009 se redujo la demanda de riego al 70%, para poder ser bien suplida.

Las devoluciones desde los canales son importantes, de 3,4 m3/s, como también lo son los afloramientos, de 5,5 m3/s. La recarga neta hacia los acuíferos llega hasta 2,1 m3/s.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 2,3 m3/s.

Una variable que permite comparar escenarios en cuanto al uso del agua que se hace dentro de la cuenca, o en cuanto al agua que se logra retener dentro de la cuenca, es la salida al mar. En el caso de la cuenca del Elqui, la salida al mar está compuesta por las salidas desde el río Elqui, desde el estero Culebrón, y las salidas subterráneas desde los acuíferos Costa 1, 2 y 3. Las salidas al mar llegan a 4,6 m3/s como promedio en este escenario.

El escenario Futuro Base 3 es un escenario que explora el comportamiento de la cuenca en una situación futura de sequía, bajo las condiciones y restricciones vigentes. En este escenario se observa que los canales captan mucho menos agua, sólo 6,0 m3/s en promedio, de los cuales 3,4 se entregan en las zonas de riego, a suplir la demanda reducida de 5,9 m3/s. Los acuíferos, en esta situación, aportan 2,1 m3/s, topando en sus respectivos derechos. Entre todas las fuentes, la demanda reducida al 70%, en esta situación de sequía de todas formas se ve bastante bien suplida, con un porcentaje de demanda suplida de 96%.

Las devoluciones desde los canales se reducen fuertemente, a 1,1 m3/s, como también los afloramientos desde acuíferos, a 1,8 m3/s. La recarga neta hacia los acuíferos crece levemente debido a la mayor explotación de ellos, llegando a 2,2 m3/s.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 3,8 m3/s.

Las salidas al mar se reducen a 1 m3/s en este escenario.

En el escenario Futuro Base 3 se observa la tendencia al descenso de algunos acuíferos, con los derechos actualmente constituidos, específicamente en Elqui Bajo (aguas abajo de la Quebrada Marquesa) y Culebrón.

Los demás acuíferos no presentarían descensos con tres años más de sequía, y con el uso de los derechos vigentes, como son los del Turbio, Derecho, Claro, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro y Costa.

Para estos acuíferos, tiene sentido pensar que se podrían explotar más intensamente, en momentos de escasez de recursos superficiales. A esto obedece el escenario Futuro Operación 1, en que se libera el uso de los acuíferos.

8.4 Escenario Futuro Operación 1: Liberación de acuíferos con 70% demanda

El objetivo del primer escenario de operación futura es hacer una evaluación de lo que sucedería si se liberaran todos los acuíferos para la demanda que no puede ser cubierta por el recurso superficial en situación de sequía. Se trata de explorar en qué medida las demandas asumidas para el período 2011-2014 (demandas reducidas al 70% de la demanda potencial) generarían un aumento de uso de los acuíferos, si se eliminara la restricción de los derechos y se colocaran pozos en todo los acuíferos. También se busca evaluar cuánto tiempo pueden durar como fuente alternativa de recurso hídrico, si se prolongara la sequía más allá de la situación actual.

Al respecto cabe señalar que se trabaja con valores preliminares de volúmenes y capacidades de acuíferos, los que se deberán confirmar o actualizar en base a los resultados que se obtengan del estudio hidrogeológico que está realizando la CORFO para la cuenca del Elqui en la actualidad.

8.4.1 Estimación del desmarque

De acuerdo con lo señalado en el capítulo anterior, en primer lugar se definió un desmarque para los siguientes tres años, aplicando la regla allí establecida.

Metodología a)

Año a simular	Año modelo	H nieve acum agosto	H nieve ponderada	Volesp LL	Vol desmarque a)
		m	m	m3	mill m3
2014-2015	2010-2011	0.72	1	29,853,736	270
2015-2016	2011-2012	1.15	1	29,845,305	270
2016-2017	2012-2013	1.69	1.5	39,620,356	345

Metodología b)

Año a simular	Año modelo	H nieve acum agosto	H nieve ponderada	Vol desmarque b)
		m	**4 años (m)**	**mill m3**
2014-2015	2010-2011	0.72	1.19	283
2015-2016	2011-2012	1.15	1.08	264
2016-2017	2012-2013	1.69	1.33	305

Selección del desmarque

Año a simular	Año modelo	Vol desmarque a)	Vol desmarque b)	Vol desmarque	% desmarque
		mill m3	**mill m3**	**seleccmill m3**	
2014-2015	2010-2011	270	283	270	33.8
2015-2016	2011-2012	270	264	264	33.0
2016-2017	2012-2013	345	305	305	38.2

Los desmarques preliminares así obtenidos, de 33,8%, 33,0% y 38,2% para los 3 años adicionales, se afectaron con un factor de sequía, el cual surge de un análisis iterativo para lograr una relativa igualdad entre el cumplimiento de los desmarques aguas arriba y aguas abajo del embalse Puclaro.

El factor de desmarques finalmente utilizado, fue de 0.7, vale decir, se aplicaron desmarques de 23,7%, 23,1% y 26,7%.

8.4.2 Configuración del escenario

Para hacer operativo el cambio en los acuíferos, en el WEAP se eliminó la restricción de derechos para el uso en riego en todos ellos, y se incorporaron pozos con derechos ilimitados en los acuíferos en que a la fecha actual no hay pozos, a partir de abril de 2014, por el período 2014-2017.

Es necesario recordar en este punto, que las demandas de riego se afectaron por un factor de sequía de 0,7, el cual se aplicó al coeficiente kc, apartir de 2011. Como se ha señalado antes, este factor responde a una reducción del área de riego, en el caso de los cultivos anuales, o a la aplicación del riego deficitario, en el caso de los cultivos permanentes. El factor es un parámetro de calibración, y fue necesario introducirlo para validar el modelo en el período de sequía 2011-2014.

8.4.3 Presentación de resultados relevantes

Los resultados de este primer escenario de operación futura se presentan de la misma forma que los del escenario de calibración-validación-futuro base. En el Anexo Capítulo 10 se entregan todas las planillas elaboradas. En el presente capítulo se comentan los efectos que tuvo la liberación de acuíferos en cada uno de los sectores modelados.

a) Planilla Futuro Operación 1_Calib_SUP

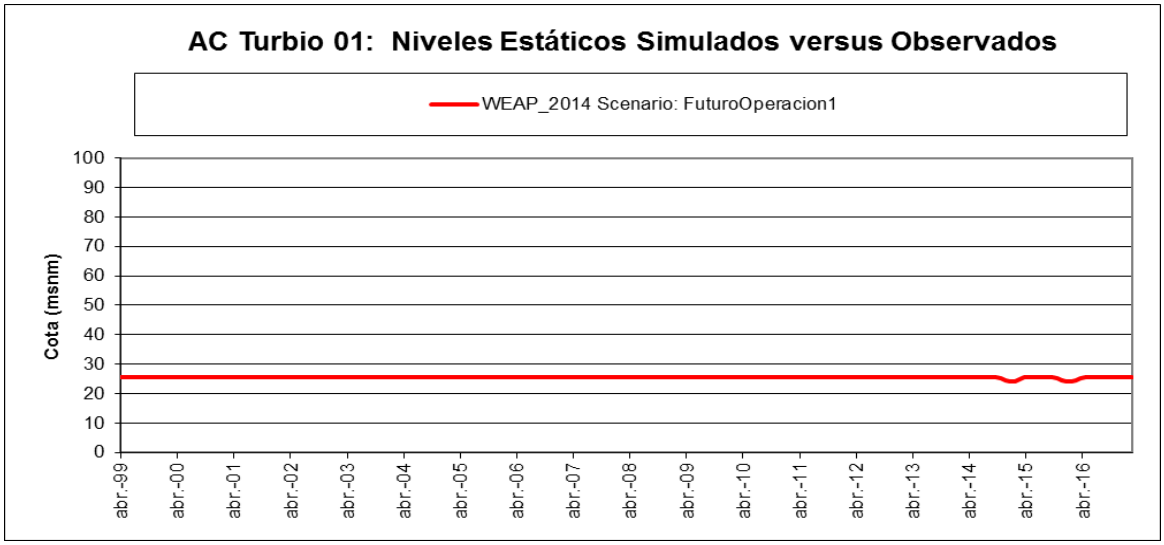
Esta planilla muestra, igual que antes, los caudales en las estaciones fluviométricas y puntos de control. En ninguno de estos puntos se registran cambios respecto del escenario base.

b) Planilla Futuro Operación 1_Calib_SUB

- **Río Turbio**

En la simulación del escenario base los acuíferos del río Turbio no sufren ningún tipo de efecto. En cambio, en el escenario de operación 1, liberando el acuífero para su uso en riego, el acuífero más alto (Turbio 1) comienza a mostrar una leve variación estacional de sus niveles, que sin embargo se recupera completamente cada año, como se aprecia en la Figura 8.55.

Figura 8.55
Acuífero río Turbio



- **Estero Derecho**

El Estero Derecho no muestra ninguna variación en el comportamiento de los acuíferos.

- **Río Cochiguaz**

No se modelaron acuíferos.

- **Río Claro**

Los acuíferos no bajan de nivel, es decir, presentan el mismo comportamiento que en el escenario base.

- **Estero Paihuano**

El acuífero no baja de nivel, igual que en el escenario base.

- **Río Elqui Alto**

Los acuíferos mantienen su comportamiento igual que en el escenario base. El acuífero AC_ELQ_03 (llegando al embalse Pulcaro) muestra, en ambos escenarios, una variación estacional leve al final del período de análisis (2011-2014).

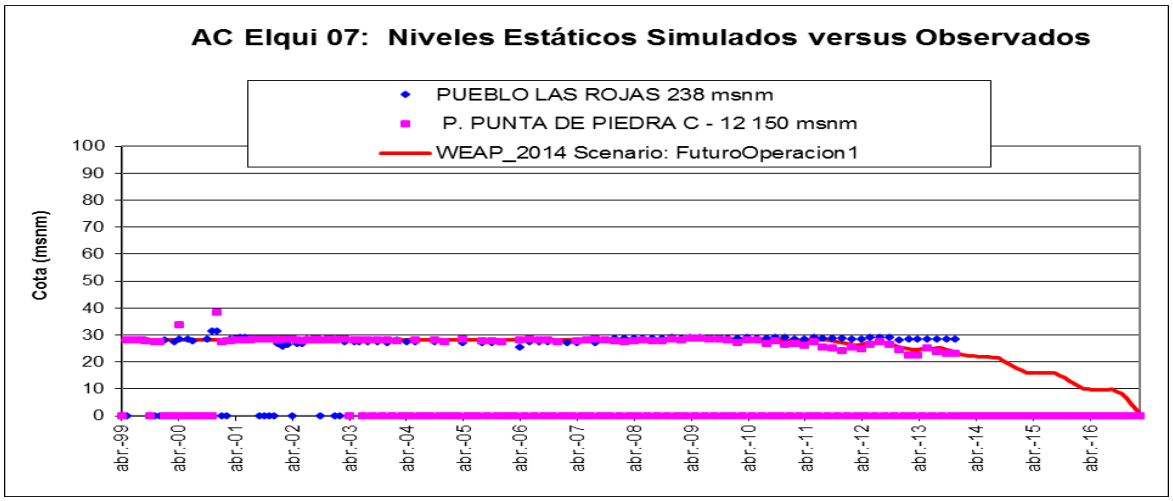
- **Río Elqui sectorPuclaro**

Inmediatamente bajo el embalse, hasta la confluencia con la Quebrada de Marquesa, no hay efecto sobre los acuíferos AC_ELQ_04 y 05, que siguen siempre llenos.

- **Río Elqui Bajo**

Desde dicha confluencia hasta la estación Elqui en La Serena, los acuíferos AC_ELQ_06, 07 y 08 sufren descensos importantes en ambos escenarios. Los acuíferos 6 y 8 mantienen el mismo descenso que en el escenario base, pero el acuífero AC_ELQ_07, Punta de Piedra-Altovalsol, acelera su descenso durante los tres últimos años, como se aprecia en la Figura 8.56.

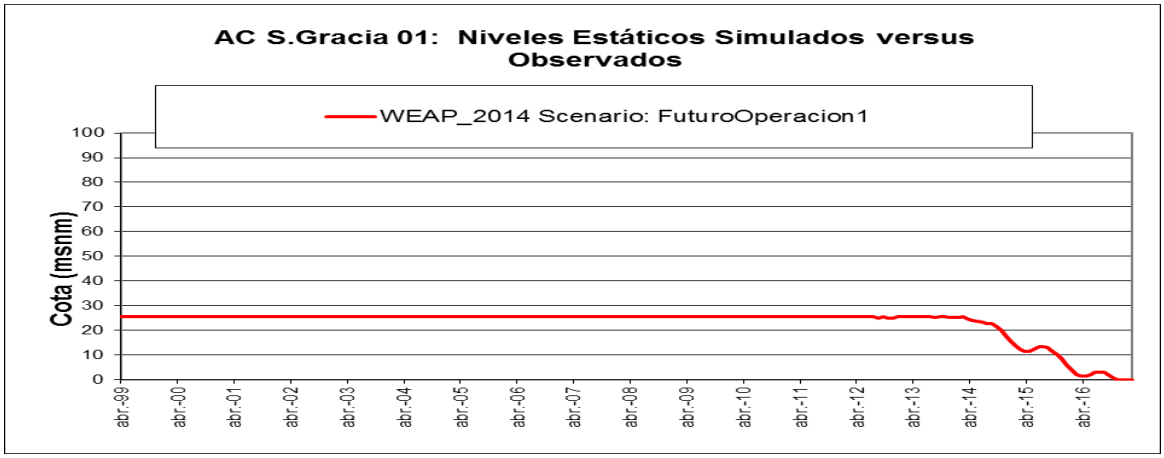
Figura 8.56
Acuífero Punta-Piedra-Altovalsol



- **Santa Gracia**

Este acuífero pasa de tener algunas leves variaciones estacionales al final del período, a colapsar completamente ya en el segundo año de explotación intensiva (2016), si se permite su explotación ilimitada. No tiene la posibilidad de suplir las demandas no cubiertas por el sistema superficial. Ver Figura 8.57.

Figura 8.57
Acuífero Santa Gracia



- **Costa**

Todos los acuíferos de costa, norte, centro y sur, no presentan descensos en los escenarios base ni futuro operación 1. El acuífero AC_COS_02, Vegas Norte, solamente tiene una leve variación interestacional, que se manifiesta en ambos escenarios.

- **Culebrón**

En el escenario de liberación de acuíferos, el acuífero de Culebrón presenta la misma tendencia de descenso y el mismo descenso que en el escenario base.

c) Planilla Futuro Operación 1_Balance_ZR y Balance_AC

A continuación se compara el grado de cobertura de la demanda, a través del parámetro % de demanda suplida, en los diferentes sectores de la cuenca. Se realiza el análisis conjunto con el comportamiento de los acuíferos asociados a las zonas de riego, debido a que interactúan directamente.

- **Río Turbio**

Las zonas de riego del río Turbio, levemente afectadas por la sequía en el período 2014-2017, mejoran completamente su situación al permitirse el uso de los acuíferos. El acuífero, como se vio, comienza a mostrar leves variaciones interestacionales en este mismo sector.

- **Estero Derecho**

El estero Derecho mejora su situación de escasez del período 2014-2017, al permitirse el uso de los acuíferos. Para este nivel bajo de explotación, los acuíferos no muestran síntomas de descenso, como se señaló antes.

- **Río Cochiguaz**

No afecta, el sector se mantiene suplido al 100% igual que en el escenario base, porque no tiene acuíferos definidos en la modelación.

- **Río Claro**

En el río Claro, el porcentaje de demanda suplida es de 100% en el escenario base, por lo que no requiere usar los pozos en el escenario de operación futura 1.

- **Quebrada Paihuano**

Al liberar los acuíferos, la quebrada Paihuano soluciona completamente su requerimiento de agua, supliendo la demanda al 100%. Esto ocurre sin afectar el acuífero, debido a que se

le ha asignado una gran caudal de recarga, en virtud de que el escurrimiento hacia la cuenca del río Claro es despreciable, y se percibe solamente en días de lluvia, según se informó en la zona.

- **Elqui Alto**

En este sector, sólo la ZR_ELQ_02 comienza a tener problemas en el escenario base, los cuales se solucionan completamente al permitir el mayor uso del acuífero en el nuevo escenario. En este sector, el acuífero comienza a mostrar una leve variación interestacional que antes no mostraba, pero no se ve mayormente afectado.

- **Elqui sector Puclaro**

En este sector, conformado por las zonas de riego ZR_ELQ_04 y 05, ambas zonas están muy deficientemente suplidas en el escenario base, durante todo el período. Al permitirse el uso de los acuíferos, en ambos sectores la demanda se suple al 100%. Como consecuencia de ello, ni siquiera hay un efecto perceptible sobre los acuíferos, porque las demandas de estos sectores son reducidas.

- **Elqui Bajo**

Este sector está compuesto por las zonas de riego ZR_ELQ_06, 07 y 08. En el escenario base, la zona 06 tiene déficit leve, mientras que la zona 07 tiene déficit fuerte en los años 2014-2017. Al permitirse el uso de los acuíferos, en ambas zonas el déficit se elimina completamente, quedando las tres zonas suplidas al 100% de su demanda. Esto ocurre con afección del acuífero AC_ELQ_07, donde comienza una fuerte tendencia de descenso. Los otros dos acuíferos mantienen el mismo descenso que en el escenario base.

- **Santa Gracia**

En este sector de riego, deficientemente suplido en el escenario base, al liberar el acuífero se suple la totalidad de la demanda, pero a costa del acuífero, que en dos años colapsa. El tercer año, no es posible suplir la demanda de la temporada alta, como se observa en los gráficos adjuntos.

Figura 8.58
Porcentaje demanda suplida zona de riego Santa Gracia

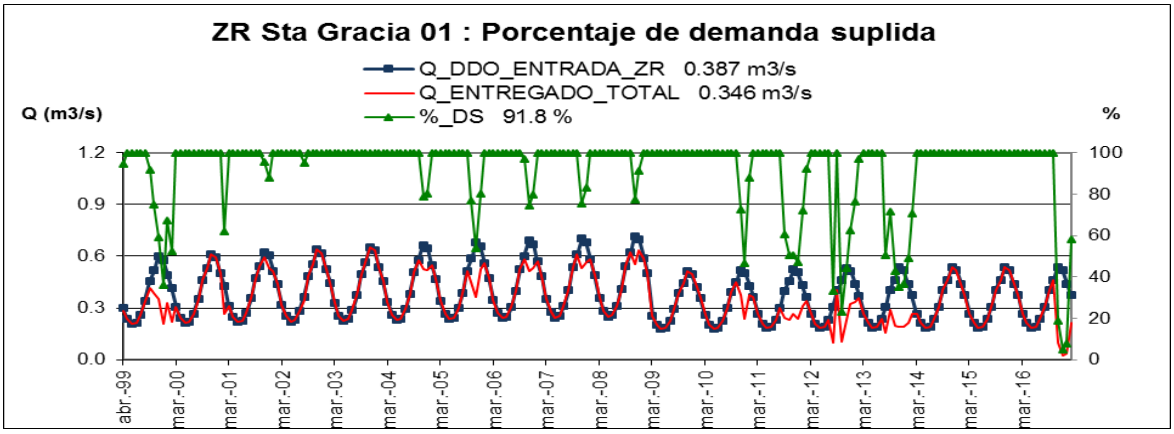
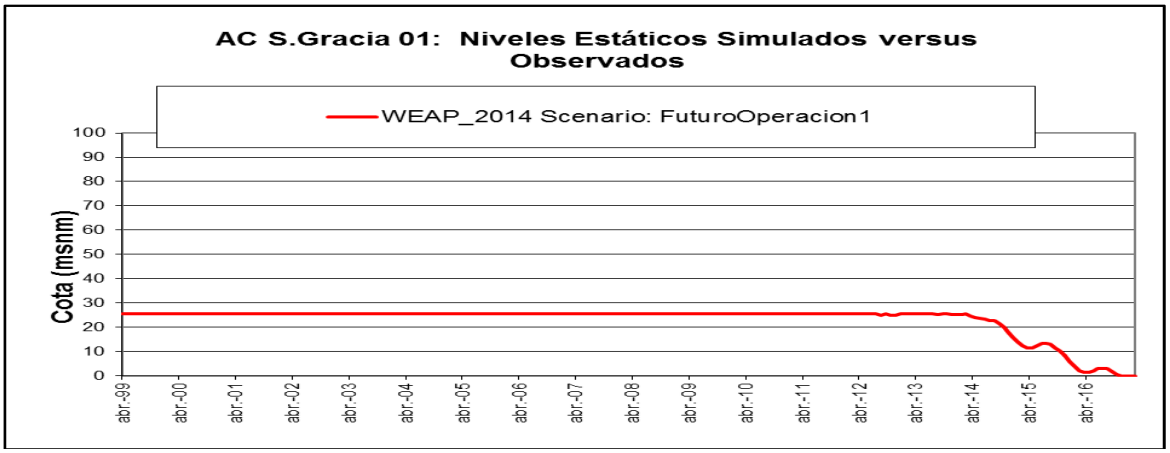


Figura 8.59
Comportamiento del acuífero Santa Gracia



- **Costa**

De los tres sectores del acuífero de costa, sólo dos muestran muy leves déficits en el período 2011-2014 en el escenario base. Permitiendo el uso de los acuíferos, estas leves fallas quedan completamente suplidas, sin que los acuíferos se vean ni mínimamente comprometidos.

- **Pan de Azúcar**

En esta zona, la liberación de acuíferos no surte ningún efecto, porque la cantidad de derechos de agua existente permite la explotación de toda el agua necesaria ya en el escenario base. La tendencia es fuertemente descendente, mientras que la demanda de la zona de riego queda completamente suplida.

d) Planilla Futuro Operación 1_Balance_CA

Se revisó esta planilla comparando los valores con los del escenario base, y se observó que no hay cambios sensibles en los caudales captados por los canales. Una afección menor se produce desde el embalse Puclaro hacia aguas abajo, y en promedio (de todo el período) significa alrededor de un 0,2% del cumplimiento del desmarque (podría ser algo mayor considerando sólo el período de los últimos 3 años).

Entre los canales más afectados estaría el canal Bellavista, para el cual la situación comparada se muestra en las figuras siguientes. Se aprecia que la afección del porcentaje de cumplimiento de desmarque se percibe sólo al final del período adicional de sequía.

Figura 8.60
Balance Canal Bellavista en escenario base

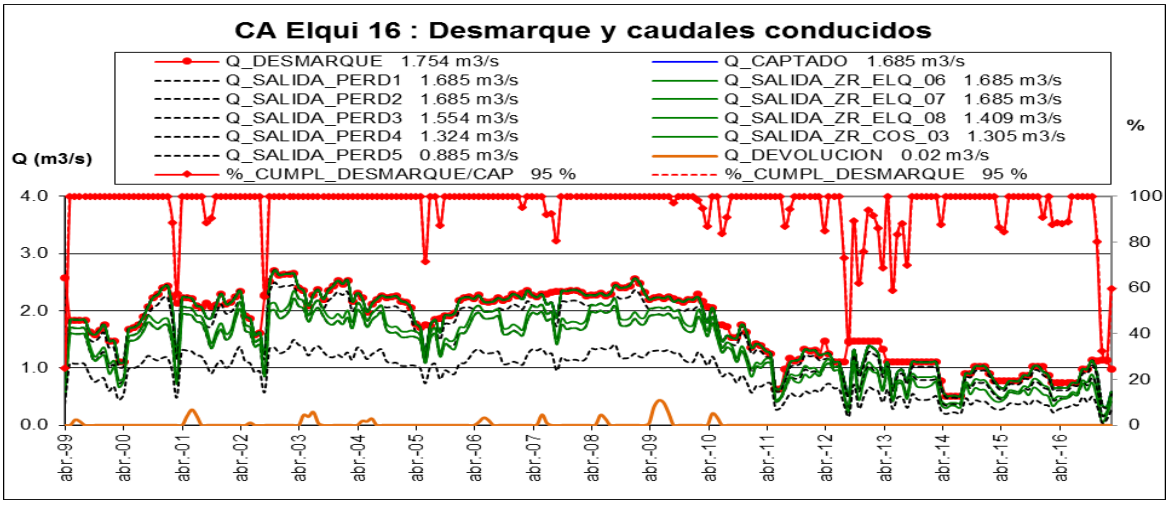
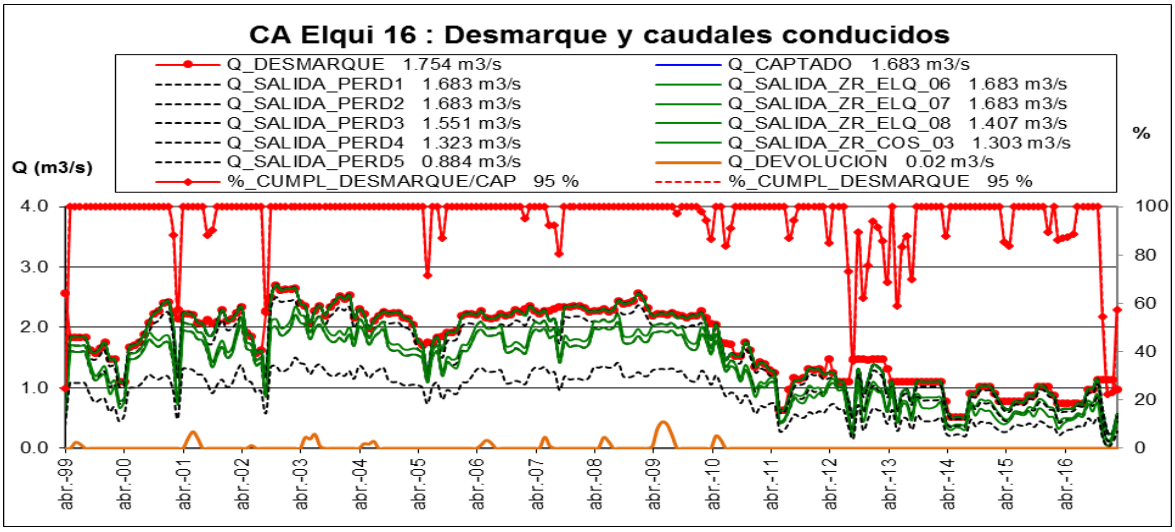


Figura 8.61
Balance Canal Bellavista en escenario futuro Operación 1



8.4.4 Resultados globales del escenario Futuro Operación 1

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del período de análisis 2014-2017, de todas las variables analizadas, en el escenario de permitir el acceso ilimitado a los acuíferos para suplir las necesidades de riego en un 70%. Las demás necesidades que se suplen con aguas subterráneas, como los usos en minería, agua potable e industria, siempre se surten al 100% en la modelación, mientras haya agua en los acuíferos.

Tabla 8.21
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.044	0.052	0.041	0.011	0.001	0.053	0.044	0.006	0.003	100
ZR_CAL_01	174.8	0.031	0.036	0.000	0.036	0.001	0.037	0.031	0.006	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.062	0.093	0.091	0.001	0.001	0.094	0.062	0.003	0.028	100
ZR_TUR_03	279.4	0.050	0.059	0.059	0.000	0.001	0.060	0.050	0.008	0.003	100
ZR_EDE_01	169.8	0.026	0.050	0.043	0.006	0.000	0.050	0.026	0.019	0.004	100
ZR_EDE_02	781.8	0.159	0.213	0.202	0.010	0.000	0.213	0.159	0.045	0.009	100
ZR_COC_01	223.3	0.042	0.077	0.077	0.000	0.000	0.077	0.042	0.000	0.035	100
ZR_COC_02	198.8	0.034	0.043	0.043	0.000	0.000	0.043	0.034	0.000	0.009	100
ZR_CLA_01	271.0	0.062	0.087	0.087	0.000	0.000	0.087	0.062	0.018	0.008	100
ZR_PAI_01	216.0	0.047	0.094	0.082	0.000	0.000	0.082	0.047	0.035	0.012	91
ZR_CLA_02	364.2	0.079	0.099	0.099	0.000	0.000	0.100	0.079	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.055	0.068	0.068	0.000	0.001	0.069	0.055	0.011	0.004	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.420	0.553	0.500	0.053	0.007	0.560	0.420	0.105	0.035	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.286	0.386	0.226	0.161	0.004	0.391	0.286	0.079	0.026	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.020	0.040	0.014	0.026	0.000	0.040	0.020	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_05	208.8	0.040	0.070	0.056	0.014	0.000	0.070	0.040	0.023	0.007	100
ZR_ELQ_06	2027.8	0.279	0.428	0.259	0.168	0.000	0.428	0.279	0.117	0.031	100
ZR_ELQ_07	2099.8	0.258	0.448	0.341	0.107	0.000	0.448	0.258	0.150	0.040	100
ZR_ELQ_08	2334.3	0.289	0.528	0.303	0.225	0.000	0.528	0.289	0.189	0.050	100
ZR_GRA_01	1519.7	0.194	0.345	0.107	0.190	0.000	0.298	0.168	0.090	0.039	90
ZR_COS_01	93.3	0.011	0.021	0.000	0.021	0.000	0.021	0.011	0.011	0.000	100
ZR_COS_02	734.1	0.085	0.147	0.109	0.038	0.000	0.147	0.085	0.062	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.146	0.276	0.243	0.032	0.000	0.276	0.146	0.117	0.013	100
ZR_CUL_01	7689.9	1.068	1.694	0.330	1.347	0.000	1.676	1.059	0.555	0.062	99
TOTAL	**25318**	**3.787**	**5.907**	**3.382**	**2.449**	**0.016**	**5.846**	**3.753**	**1.680**	**0.427**	**99.3**

Tabla 8.22
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	Mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.011	0.022	0.006	0.011	0.028	0.017	0.011	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.287	0.006	0.257	0.036		0.036	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.049	0.024	0.003	0.074	0.002		0.001	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.027	0.023	0.008	0.056	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.031	0.006	0.019	0.048	0.008		0.006	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.064	0.007	0.045	0.100	0.015		0.010	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.016	0.085	0.018	0.119	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.044	0.002	0.035	0.064	0.017		0.000	0.004	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.073	0.022	0.015	0.084	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.032	0.039	0.011	0.016	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.191	0.035	0.105	0.231	0.100		0.053	0.046	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.078	0.035	0.079	0.022	0.170	0.010	0.161	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.007	0.033	0.015	0.019	0.036	0.010	0.026	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.034	0.031	0.023	0.065	0.023	0.007	0.014	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.166	0.030	0.117	0.000	0.313	0.012	0.168	0.109	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.127	0.011	0.150	0.000	0.288	0.020	0.107	0.368	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.121	0.009	0.189	0.000	0.318	0.025	0.225	0.083	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.020	0.000	0.090	0.000	0.112		0.190	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.011	0.174	0.074	0.006	0.021	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.148		0.062	0.175	0.066		0.038	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.116		0.117	0.197	0.059		0.032	0.001	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.156	0.000	0.555	0.000	0.711	0.056	1.347	0.118	0.100	0.021
TOTAL	**451.7**	**1.510**	**0.699**	**1.680**	**1.712**	**2.470**	**0.190**	**2.449**	**0.748**	**0.722**	**0.043**

Tabla 8.23
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.071	0.071	0.011	0.041	0.020	100	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.179	0.179	0.036	0.091	0.052	100	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.111	0.111	0.024	0.055	0.032	100	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.070	0.070	0.016	0.004	0.050	100	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.103	0.103	0.031	0.043	0.029	100	100	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.058	0.058	0.003	0.031	0.024	100	100	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.410	0.410	0.062	0.172	0.177	100	100	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.142	0.142	0.000	0.077	0.065	100	100	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.094	0.094	0.000	0.043	0.050	100	100	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.266	0.266	0.085	0.087	0.094	100	100	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.080	0.080	0.022	0.049	0.010	100	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.253	0.253	0.058	0.051	0.144	100	100	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.164	0.044	0.082	0.038		16		1.000	
CA_ELQ_01	0.051	0.051	0.012	0.034	0.004	100	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.116	0.116	0.021	0.091	0.004	100	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.036	0.036	0.008	0.019	0.009	100	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.231	0.231	0.053	0.139	0.039	100	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.496	0.496	0.114	0.239	0.143	100	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.131	0.131	0.023	0.098	0.010	100	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.305	0.305	0.070	0.173	0.062	100	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.024	0.023	0.007	0.014	0.002	98	98	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.122	0.119	0.027	0.091	0.000	98	98	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.008	0.008	0.003	0.005	0.000	100	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.089	0.087	0.022	0.065	0.000	99	99	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.164	0.152	0.048	0.104	0.000	94	94	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.142	0.128	0.049	0.079	0.000	92	92	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.069	0.061	0.018	0.043	0.000	91	91	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.451	0.401	0.122	0.275	0.004	91	91	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	0.859	0.761	0.250	0.511	0.000	90	90	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.081	0.072	0.027	0.045	0.000	90	90	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.092	0.086	0.020	0.066	0.000	94	94	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.136	0.121	0.023	0.097	0.001	90	90	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.140	0.124	0.047	0.077	0.000	90	90	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.290	0.257	0.077	0.177	0.003	90	90	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.257	0.103	0.110	0.045		71		0.360	
TOTAL		**6.025**	**1.537**	**3.378**	**1.110**			**3044.420**	**25.604**	
								22689.290		

8.4.5 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 1

El escenario de Futuro Operación 1 muestra los promedios del período 2014-2017. Para este período, se observa que los canales captan un caudal de 6.0 m3/s, de los cuales sólo 3,4 se entregan en las zonas de riego, a suplir una demanda de 5,9 m3/s. La demanda no suplida por canales, se solicita a los acuíferos, que aportan 2,4 m3/s. Entre todas las fuentes, la demanda finalmente se ve muy bien suplida, como promedio en un 99,3%,

mayor que en el escenario Futuro Base 3, donde era de 98,9%, siempre considerando que desde abril de 2009, en ambos escenarios se trabaja con una demanda agrícola reducida al 70. El aumento de demanda suplida de debe al aporte de los pozos.

Las devoluciones desde los canales se mantienen similares al escenario Futuro Base 3, en 1,1 m3/s, como también los afloramientos desde acuíferos, en 1,7 m3/s. La recarga neta hacia los acuíferos crece algo, debido a la mayor explotación de ellos, llegando a 2,5 m3/s.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 4,2 m3/s.

Las salidas al mar prácticamente no se modifican este escenario, quedando en 1 m3/s. La leve intensificación del bombeo no genera efectos en esta variable.

En este escenario, en el caso del río Claro, se aprecia que no se requiere el agua adicional que se podría obtener teniendo más derechos subterráneos, pues aparecen como suficientes los recursos superficiales a los que dicho sector tiene acceso.

Tampoco cambia la situación del acuífero de Culebrón, el cual tiene suficientes derechos subterráneos como para cubrir su demanda, aunque esto ocurre claramente a costa del acuífero, que presenta la misma baja sostenida de nivel en ambos escenarios.

Por lo tanto, los acuíferos de los sectores Claro y Culebrón se comportan igual en ambos escenarios, base y liberación de acuíferos, aunque por razones diferentes.

Los sectores que se beneficiarían de la liberación de los acuíferos, sin que éstos se vieran afectados, serían el río Turbio, Estero Derecho, Paihuano, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro y todo el acuífero de la Costa, porque las demandas no suplidas en las condiciones del escenario base, son reducidas.

Los sectores que presentarían mejora en las demandas suplidas, aunque con afección severa del acuífero subyacente, serían Elqui Bajo y Santa Gracia.

Se concluye de lo observado en ambos escenarios, que bajo la condición de que las áreas de riego mantengan un factor de reducción de 0,7, y se mantengan las condiciones actuales para la explotación, la cuenca sería capaz de suplir el recurso necesario durante la época de sequía, si ésta se prolongara otros tres años.

Liberar los acuíferos podría ser beneficioso en los sectores del Turbio, Derecho, Paihuano, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro y Costa. Como las necesidades de recurso adicional en esos sectores no son muy altas, se esperaría que los acuíferos no se vieran afectados.

Los sectores más necesitados del recurso subterráneo son Santa Gracia, Elqui Bajo y Culebrón, justamente las zonas donde los acuíferos ya presentan tendencias de descenso con tres años más de sequía y la condición de derechos actuales, por lo que no sería conveniente permitir mayor extracción de aguas subterráneas en estos sectores.

8.5 Escenario Futuro Operación 2: Liberación de acuíferos con 100% demanda

8.5.1 Configuración del escenario

El otro escenario futuro que se ha explorado, sobre una base de tres años más de sequía, es un escenario llamado Futuro Operación 2, en el cual se ha asumido que la demanda agrícola no se restringe al 70% de su valor potencial, sino que el año 2014 aumenta de nuevo al 100%. Todos los demás aspectos se mantienen como en el escenario Futuro Operación 2, con acceso libre a los acuíferos.

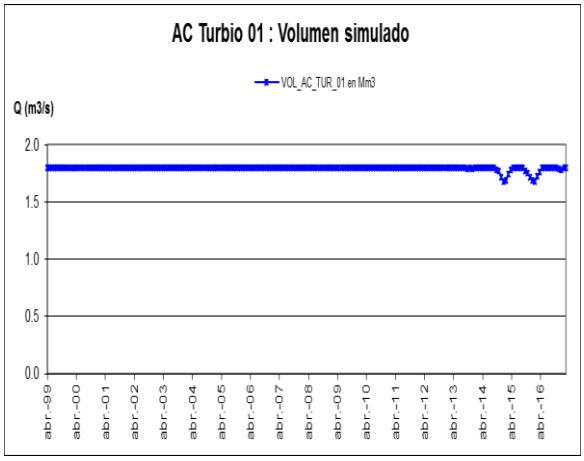
Todos los resultados de este escenario, presentados en los cinco tipos de planillas, se incluyen en el Anexo Digital, Anexo Capítulo 8.5.

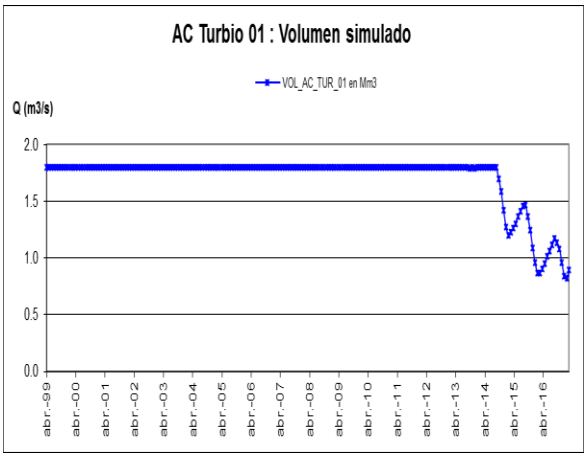
8.5.2 Presentación de resultados relevantes

En este escenario, no hay grandes cambios respecto del anterior, en lo que se refiere a la escorrentía superficial.

Sin embargo, al ser mayores las demandas, no haber más agua superficial disponible y estar libres los acuíferos, hay varios que son más intensamente explotados que en el escenario anterior. En las figuras siguientes se comparan los acuíferos con mayores diferencias entre los escenarios Futuro Operación 1 y 2.

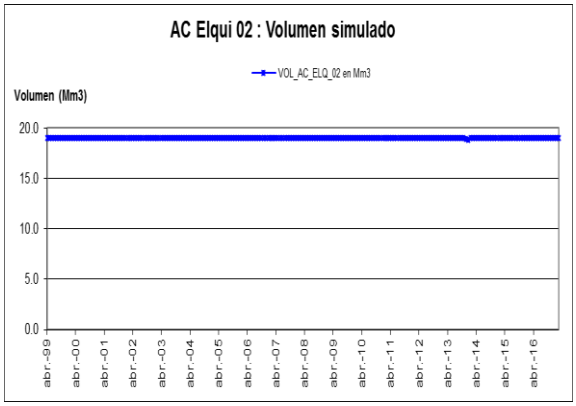
Figura 8.62
Acuífero Turbio 01 en escenarios Futuro Operación 1 y 2





En la siguiente Figura 8.63, se presenta la situación del acuífero Elqui 02 (Vicuña), que es representativa de lo que ocurre en los acuíferos del río Claro, Estero Derecho, Elqui Alto y Elqui sector Puclaro.

Figura 8.63
Acuífero Elqui 02 en escenarios Futuro Operación 1 y 2



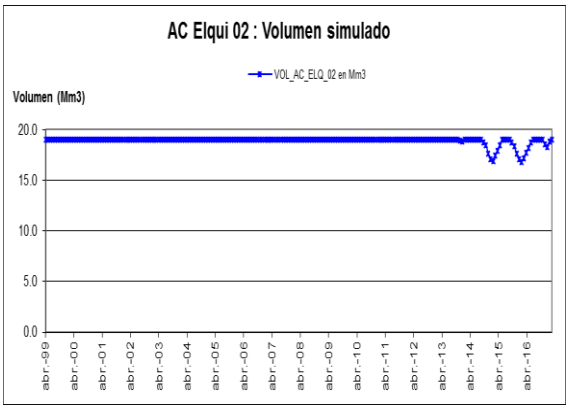
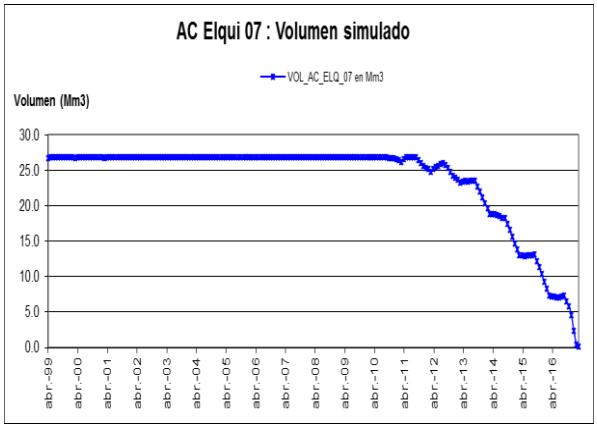


Figura 8.64
Acuífero Elqui 07 (Elqui Bajo) en escenarios Futuro Operación 1 y 2



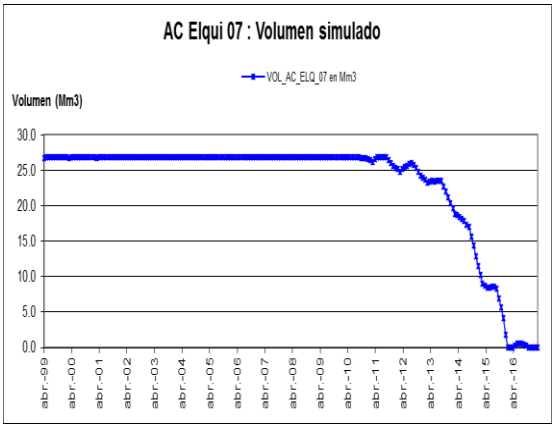
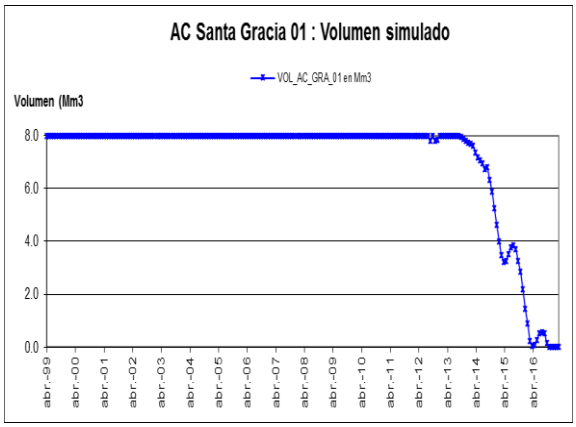


Figura 8.65
Acuífero Santa Gracia en escenarios Futuro Operación 1 y 2



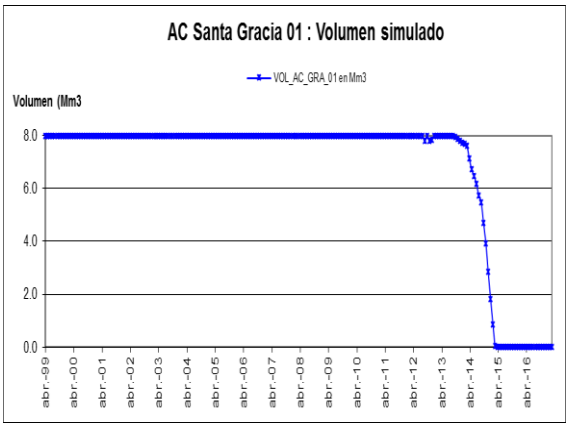
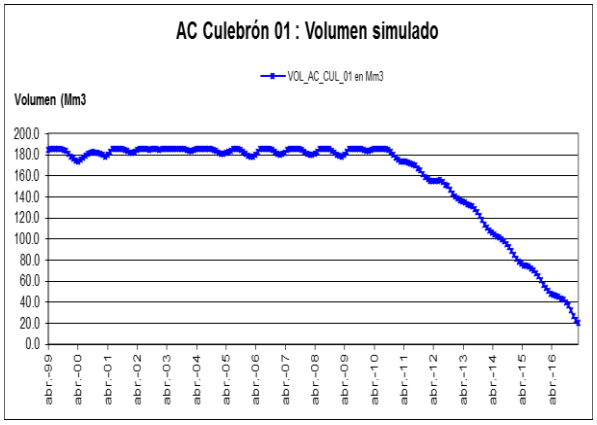
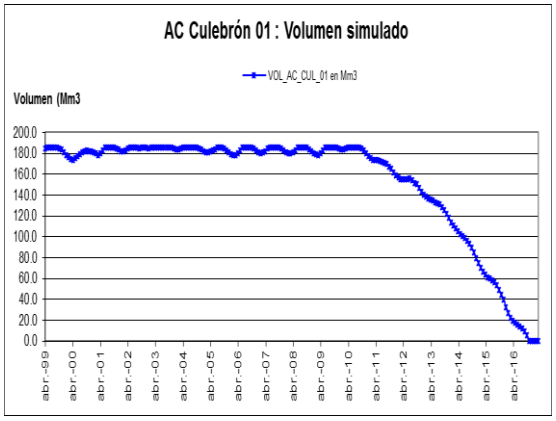


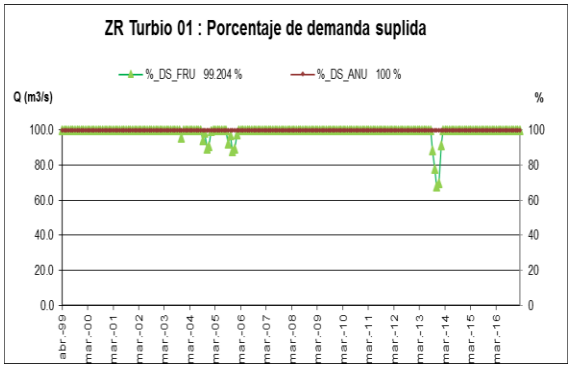
Figura 8.66
Acuífero Culebrón en escenarios Futuro Operación 1 y 2





En las siguientes figuras se observa cómo aumenta el porcentaje de satisfacción de la demanda, al 100%, mientras duran los acuíferos, y cómo cae abruptamente cuando éstos se agotan.

Figura 8.67
Porcentaje demanda suplida ZR Turbio 01 en escenarios Futuro Operación 1 y 2



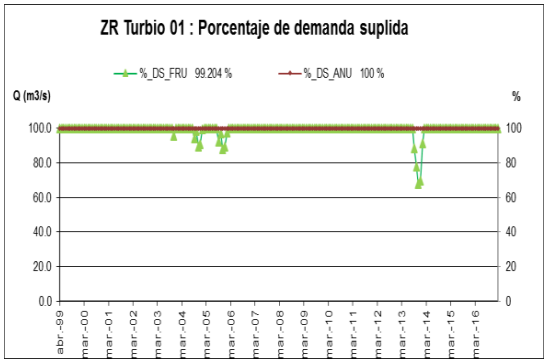
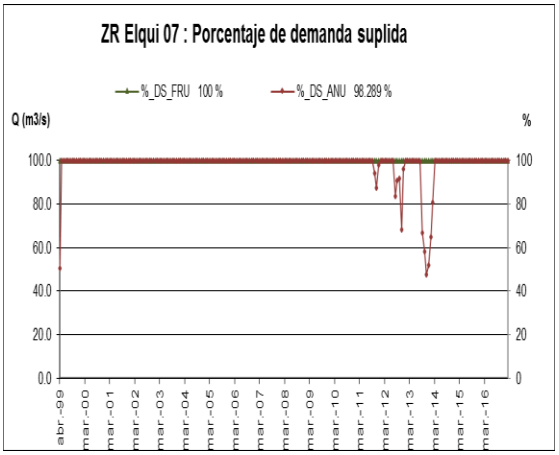


Figura 8.68
Porcentaje demanda suplida ZR en escenarios Futuro Operación 1 y 2



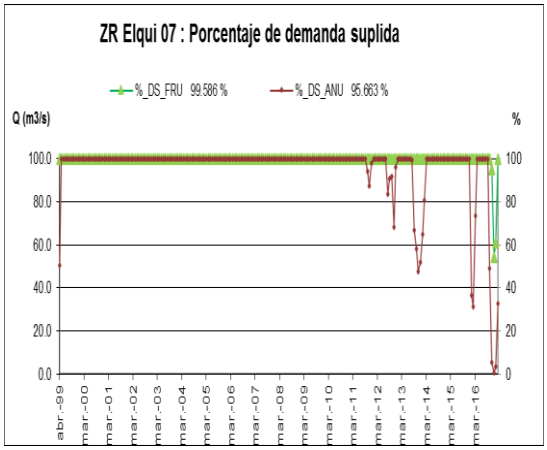
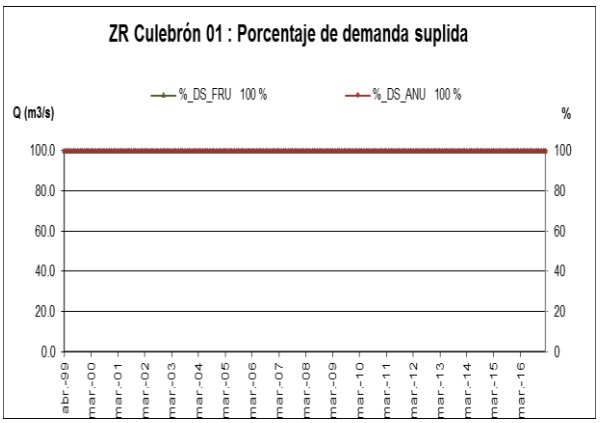
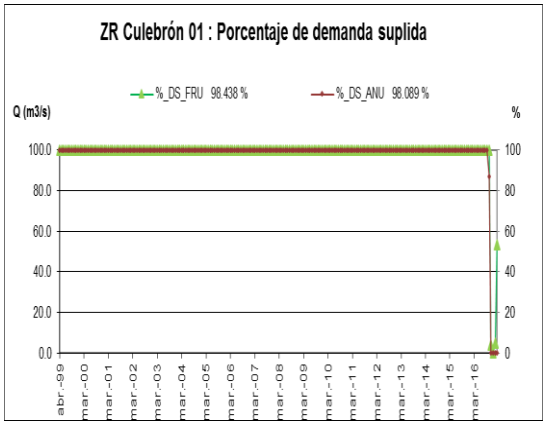


Figura 8.69
Porcentaje demanda suplida ZR en escenarios Futuro Operación 1 y 2





8.5.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 2

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del período de análisis, de todas las variables analizadas, en el escenario Futuro Operación 2, al permitir el acceso ilimitado a los acuíferos para suplir las necesidades de riego en un 100%. Las demás necesidades que se suplen con aguas subterráneas, siempre lo hacen al 100% en la modelación, mientras haya agua en los acuíferos.

Tabla 8.24
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.063	0.074	0.044	0.030	0.001	0.075	0.063	0.009	0.003	100
ZR_CAL_01	174.8	0.044	0.052	0.000	0.052	0.001	0.052	0.044	0.008	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.089	0.133	0.107	0.026	0.001	0.134	0.089	0.004	0.040	100
ZR_TUR_03	279.4	0.071	0.085	0.084	0.001	0.001	0.086	0.071	0.011	0.004	100
ZR_EDE_01	169.8	0.038	0.071	0.051	0.020	0.000	0.071	0.038	0.027	0.006	100
ZR_EDE_02	781.8	0.227	0.304	0.240	0.064	0.000	0.304	0.227	0.064	0.013	100
ZR_COC_01	223.3	0.061	0.110	0.098	0.000	0.000	0.098	0.054	0.000	0.044	94
ZR_COC_02	198.8	0.049	0.062	0.059	0.000	0.000	0.059	0.047	0.000	0.012	98
ZR_CLA_01	271.0	0.088	0.125	0.123	0.002	0.000	0.125	0.088	0.025	0.011	100
ZR_PAI_01	216.0	0.068	0.135	0.095	0.000	0.000	0.095	0.068	0.050	0.017	79
ZR_CLA_02	364.2	0.113	0.142	0.142	0.000	0.000	0.142	0.113	0.022	0.007	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.078	0.097	0.097	0.000	0.001	0.098	0.078	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.600	0.791	0.542	0.249	0.007	0.798	0.600	0.148	0.049	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.408	0.553	0.225	0.328	0.004	0.557	0.408	0.112	0.037	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.029	0.058	0.014	0.043	0.000	0.058	0.029	0.022	0.007	100
ZR_ELQ_05	208.8	0.057	0.100	0.063	0.036	0.000	0.100	0.057	0.033	0.010	100
ZR_ELQ_06	2027.8	0.399	0.611	0.246	0.364	0.000	0.611	0.399	0.167	0.045	100
ZR_ELQ_07	2099.8	0.369	0.641	0.305	0.223	0.000	0.528	0.306	0.175	0.046	86
ZR_ELQ_08	2334.3	0.412	0.754	0.261	0.493	0.000	0.754	0.412	0.270	0.072	100
ZR_GRA_01	1519.7	0.278	0.493	0.082	0.168	0.000	0.249	0.146	0.073	0.031	56
ZR_COS_01	93.3	0.015	0.031	0.000	0.031	0.000	0.031	0.015	0.015	0.000	100
ZR_COS_02	734.1	0.121	0.210	0.125	0.084	0.000	0.210	0.121	0.089	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.209	0.394	0.235	0.159	0.000	0.394	0.209	0.167	0.019	100
ZR_CUL_01	7689.9	1.420	2.313	0.267	1.679	0.000	1.946	1.200	0.672	0.075	88
TOTAL	**25318**	**5.305**	**8.336**	**3.504**	**4.053**	**0.016**	**7.573**	**4.882**	**2.178**	**0.553**	**93.9**

Tabla 8.25
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	Mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.011	0.022	0.009	0.004	0.038	0.017	0.030	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.287	0.008	0.244	0.052		0.052	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.049	0.024	0.004	0.050	0.027		0.026	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.027	0.023	0.011	0.058	0.003		0.001	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.031	0.006	0.027	0.043	0.021		0.020	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.064	0.006	0.064	0.069	0.066		0.064	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.015	0.085	0.025	0.124	0.002		0.002	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.044	0.002	0.050	0.053	0.044		0.040	0.004	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.072	0.022	0.022	0.090	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.032	0.036	0.015	0.018	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.189	0.033	0.148	0.074	0.296		0.249	0.046	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.076	0.031	0.112	0.015	0.203	0.010	0.328	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.007	0.029	0.022	0.008	0.049	0.010	0.043	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.034	0.027	0.033	0.048	0.045	0.007	0.036	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.147	0.026	0.167	0.000	0.341	0.012	0.365	0.109	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.109	0.009	0.156	0.000	0.297	0.015	0.235	0.269	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.103	0.007	0.270	0.000	0.380	0.025	0.494	0.083	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.014	0.000	0.073	0.000	0.088		0.172	0.000	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.015	0.148	0.083	0.006	0.031	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.121		0.089	0.130	0.111		0.084	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.096		0.167	0.126	0.159		0.160	0.001	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.125	0.000	0.694	0.000	0.818	0.050	1.753	0.108	0.092	0.019
TOTAL	**451.7**	**1.366**	**0.675**	**2.182**	**1.301**	**3.215**	**0.178**	**4.184**	**0.638**	**0.714**	**0.041**

Tabla 8.26
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.071	0.071	0.011	0.044	0.017	100	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.179	0.179	0.036	0.107	0.036	100	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.111	0.111	0.024	0.062	0.025	100	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.070	0.070	0.016	0.022	0.032	100	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.103	0.103	0.031	0.051	0.021	100	100	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.058	0.058	0.003	0.035	0.020	100	100	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.410	0.410	0.062	0.205	0.143	100	100	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.142	0.142	0.000	0.098	0.044	100	100	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.094	0.094	0.000	0.059	0.035	100	100	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.266	0.266	0.085	0.123	0.058	100	100	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.080	0.080	0.022	0.050	0.009	100	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.253	0.253	0.058	0.092	0.102	100	100	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.164	0.044	0.095	0.025		16		1.000	
CA_ELQ_01	0.051	0.051	0.012	0.036	0.002	100	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.116	0.116	0.018	0.097	0.001	100	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.036	0.036	0.008	0.021	0.007	100	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.231	0.231	0.053	0.148	0.029	100	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.496	0.496	0.114	0.271	0.111	100	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.131	0.131	0.021	0.105	0.005	100	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.305	0.305	0.070	0.185	0.050	100	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.024	0.023	0.007	0.014	0.002	98	98	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.122	0.119	0.027	0.092	0.000	98	98	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.008	0.008	0.003	0.005	0.000	100	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.089	0.088	0.022	0.066	0.000	99	99	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.164	0.138	0.044	0.094	0.000	86	86	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.142	0.116	0.044	0.072	0.000	84	84	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.069	0.052	0.015	0.037	0.000	79	79	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.451	0.342	0.100	0.242	0.000	79	79	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	0.859	0.649	0.205	0.444	0.000	78	78	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.081	0.065	0.025	0.040	0.000	82	82	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.092	0.073	0.017	0.056	0.000	82	82	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.136	0.103	0.020	0.083	0.000	78	78	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.140	0.106	0.040	0.066	0.000	78	78	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.290	0.219	0.066	0.153	0.000	78	78	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.247	0.099	0.126	0.022		69		0.360	
TOTAL		5.715	1.422	3.497	0.797			3044	25.604	2870.999
								22689		

8.5.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2

En este escenario se trata de suplir la demanda agrícola máxima potencial, usando los acuíferos sin restricciones.

Las tablas muestran los promedios del período 2014-2017. Para este período, se observa que los canales captan un caudal de 5,7 m3/s, de los cuales 3,5 se entregan en las zonas de

riego, a suplir una demanda de 8,3 m3/s. La demanda no suplida por canales, se solicita a los acuíferos, que aportan 4,2 m3/s. Entre todas las fuentes, la demanda finalmente se ve suplida, como promedio, en un 93,6%, bastante menor que en el escenario Operación 1, porque el 100% del área demanda agua en este escenario.

Las devoluciones desde los canales se reducen, llegando hasta 0,8 m3/s, como también los afloramientos desde acuíferos, a 1,3 m3/s. La recarga neta hacia los acuíferos sigue aumentando, debido a la mayor explotación de ellos, llegando a 3,2 m3/s.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 5,8 m3/s.

En este escenario se comienza a observar una reducción en las salidas al mar, debido esencialmente al aumento de recargas hacia los acuíferos, que están más explotados en este escenario. Las salidas al mar se reducen a 0,9 m3/s.

Sobre el embalse Puclaro, las demandas potenciales o 100% podrían ser suplidas por el sistema hídrico, en base a las aguas superficiales complementadas con el agua de los acuíferos. Estos resistirían tres años más de sequía, con descensos tolerables en los acuíferos de los ríos Turbio, Claro, Estero Derecho, Elqui Alto y Elqui sector Puclaro. La explotación en estas condiciones no resultaría sustentable para los acuíferos Elqui Bajo, Santa Gracia ni Culebrón, que colapsarían y dejarían sin sustento las zonas de riego y los demás usos que alimentan.

Observando el porcentaje de satisfacción de la demanda, éste se mantendría en el 100% en todas las zonas donde no colapsan los acuíferos. En los sectores sobreexplotados de Elqui Bajo, Santa Gracia y Culebrón, este porcentaje se logra a costa de los acuíferos, que en poco tiempo colapsarían completamente, dejando de dar sustento a los usos que dependen de ellos.

8.5.5 Conclusión final sobre el set de escenarios

Como conclusión final de este análisis, se puede decir que en las condiciones actuales de derechos subterráneos, la demanda reducida al 70% de la demanda potencial, sería sustentable en la condición de sequía, aunque ésta durara tres años más. Los acuíferos Elqui Bajo (Elqui 07 y 08) y Culebrón presentarían una tendencia fuerte de descenso, pero no alcanzarían a colapsar en el plazo de tres años. Los demás acuíferos se mantendrían estables.

Si se liberara el acceso a los acuíferos para suplir la misma demanda del 70% de la demanda potencial, esto no afectaría los acuíferos del Turbio, Claro, Estero Derecho, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro (Elqui 04 y 05) ni Costa, debido a que la demanda en esos sectores no es muy elevada. La afección se comenzaría a notar en el acuífero Elqui 06, y sería intensa en los acuíferos Elqui 07 y 08 (Elqui Bajo) y Culebrón, donde se pronunciaría más la tendencia de descenso ya observada en el escenario base.

Finalmente, si se pretendiera suplir la demanda potencial del 100% con una política de acuíferos sin restricciones, los efectos serían los siguientes: Los acuíferos con tendencia actual de descenso, colapsarían, y algunos otros, como los del Turbio, Elqui sobre Puclaro (Vicuña) y Elqui 06 (Marquesa), comenzarían a mostrar señales de descenso. El acuífero del Estero Derecho mostraría señales de inestabilidad. Los acuíferos del Claro, Paihuano, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro (Elqui 04 y 05) y Costa, por ser poco solicitados, no presentarían problemas, ni siquiera en este escenario muy exigido.

8.6 Escenario Futuro Base Ext 2

Como su nombre lo indica, este escenario es un escenario extendido en base a la repetición de la hidrología histórica, que sirve de base para la comparación y la evaluación de los escenarios futuros de operación siguientes:

- Embalse de Cabecera en Estero Derecho
- Mejoramiento de algunos canales importantes del río Elqui

8.6.1 Configuración del escenario

En este escenario base, la extensión tiene las siguientes características:

- hidrología del período 1999-2014 para el período 2014-2029
- factor de sequía hidrológico en el período 2025-2029 (equivalente al período 2010-2014 de calibración-validación)
- sin factor de reducción de demanda agrícola
- desmarque obtenido según la regla antes descrita, con factor de ajuste de desmarque
- demanda agrícola actual sin proyección de crecimiento, igual a la máxima o potencial
- demandas de agua potable con proyección de crecimiento vegetativo
- otras demandas no agrícolas no crecen
- extensión de estadística de desmarques según regla de operación, como se explica en el acápite siguiente

Además, en este escenario se prepara la implementación de un embalse de cabecera en el Estero Derecho, para lo cual se realiza un cambio en la forma en que se reparte el agua entre sus canales.

- antes de 2014, el agua del río se reparte proporcionalmente a las acciones de cada canal con un tope en su capacidad
- después de 2014 y debido a la presencia de un embalse, el caudal a repartir puede ser mayor que el agua disponible en el río. Por lo tanto se elimina la dependencia al caudal disponible en el río, restringiendo el caudal entregado al mínimo entre el caudal que le corresponde al canal por derechos (acciones), y la capacidad.

En apoyo a lo anterior, se establece la captación en la bocatoma del canal en base a la demanda de los cultivos de las zonas de riego correspondientes a partir del año 2014. Antes

del año 2014, la distribución hacia los canales se hace proporcionalmente a las acciones de cada canal y al agua disponible en el río, independiente de la demanda agrícola.

Con este cambio se logra que en el siguiente escenario Futuro Operación 4, el embalse pueda cumplir su función reguladora, apoyando el riego cuando la demanda agrícola es mayor al agua disponible en el río.

8.6.2 Estimación del desmarque

De acuerdo con lo señalado, se definió un desmarque para los siguientes 15 años, aplicando la regla establecida en el Capítulo 8.2.

Los desmarques obtenidos por ambos métodos, a partir de la altura de nieve de los últimos 2 y 4 años respectivamente, y el desmarque promedio resultante, se presentan en la Tabla siguiente. Cabe señalar que estos valores son los datos de entrada al modelo WEAP, y aún no tienen aplicado el factor de ajuste por estado del embalse Puclaro. Este factor lo calcula internamente el modelo en base a la recta de la Figura 8.17, y lo aplica en función del volumen que el embalse alcanza a fines de agosto de cada año.

Tabla 8.27
Desmarque obtenido según metodología de la regla de operación

Temporada	Desmarque método 1	Desmarque método 2	Desmarque promedio
2014-2015	40.04	55.06	47.55
2015-2016	50.05	52.43	51.24
2016-2017	49.43	49.30	49.36
2017-2018	56.31	56.43	56.37
2018-2019	53.80	55.18	54.49
2019-2020	37.54	46.92	42.23
2020-2021	55.68	54.56	55.12
2021-2022	54.43	54.18	54.31
2022-2023	54.81	55.31	55.06
2023-2024	53.80	54.68	54.24
2024-2025	33.78	43.92	38.85
2025-2026	23.77	31.66	27.72
2026-2027	30.66	30.03	30.34
2027-2028	42.54	37.04	39.79
2028-2029	43.79	40.67	42.23

8.6.3 Presentación de resultados relevantes

En este escenario no hay planillas de calibración, debido a que se simula un comportamiento futuro, el cual no se compara con lo ocurrido en el período histórico.

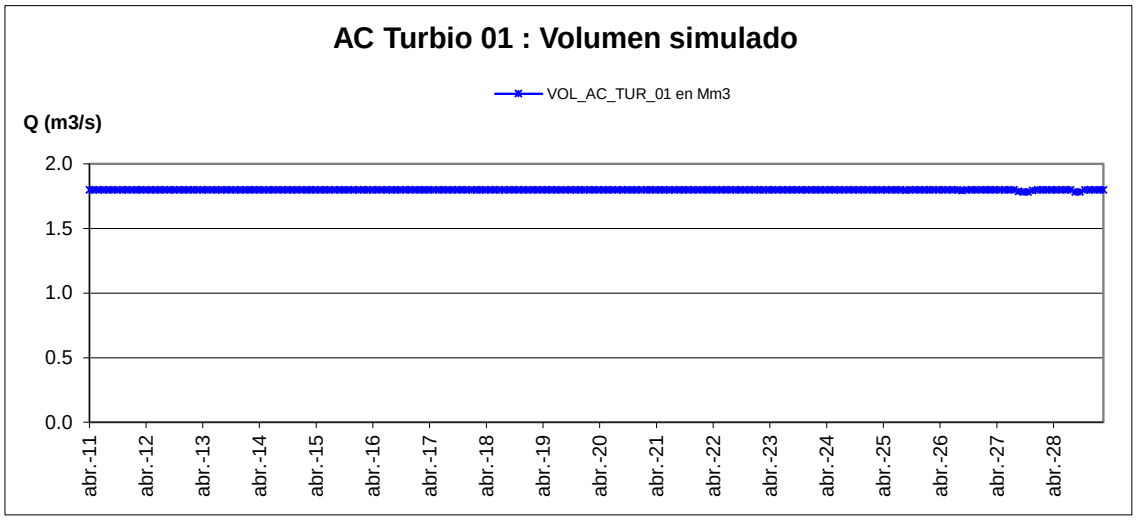
Se grafican los resultados desde 2011en adelante, para mostrar la conexión con la situación actual.

En el Anexo Capítulo 12 se entregan todas las planillas elaboradas. En el presente capítulo se comentan los aspectos más relevantes del escenario.

a) Planilla Futuro Base Ext 2_Balance_AC

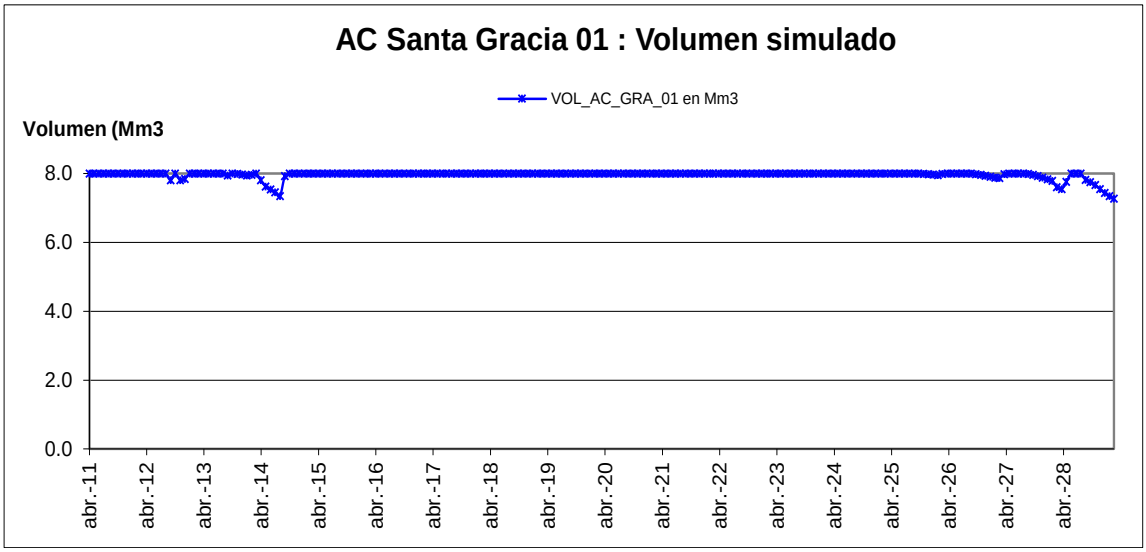
En este escenario extendido, todos los acuíferos altos, esto es, Turbio, Derecho, Claro, Paihuano Elqui en Algarrobal (Elqui 01), Elqui sector Puclaro (Elqui 04 y 05), como también el sector Costa, no presentan señales de explotación. La Figura 8.70 adjunta muestra el comportamiento representativo de este sector.

Figura8.70
Acuíferos río Turbio, Claro, E.Derecho, Elqui Alto, Elqui Puclaro, Costa



El acuífero de Santa Gracia también se mantiene estable en todo el período, como se observa en la Figura 8.71, lo que se debe a que tiene pocos derechos subterráneos de explotación. Sólo hay leves descensos en las épocas de sequía.

Figura8.71
Acuífero Santa Gracia



Por otro lado, los sectores de Vicuña (Elqui 02 y 03), como también Elqui Bajo y Culebrón, muestran efectos profundos de la sequía, especialmente de la segunda, porque se trata de regar el 100% del área en este escenario. No obstante ello, los acuíferos se recuperarían con una hidrología normal, incluso el acuífero de Culebrón, aunque muy lentamente.

Figura8.72
Acuífero Elqui sobre Puclaro

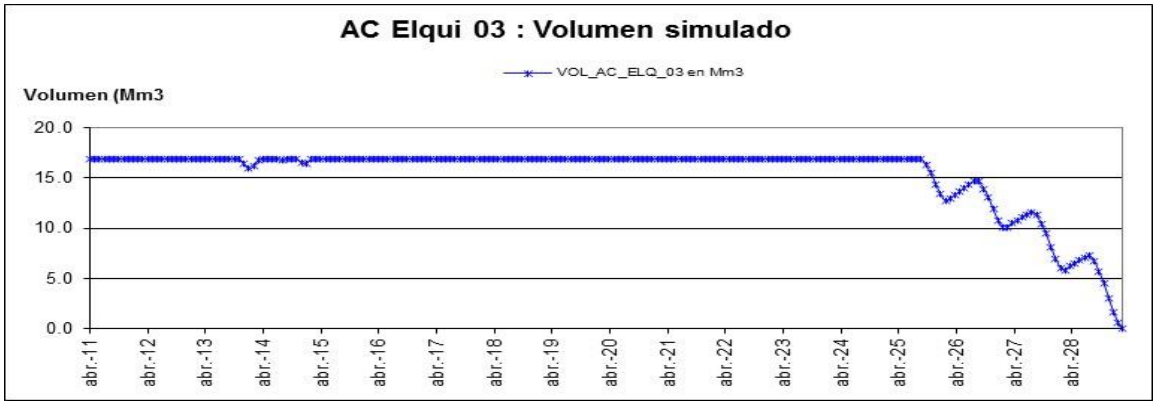
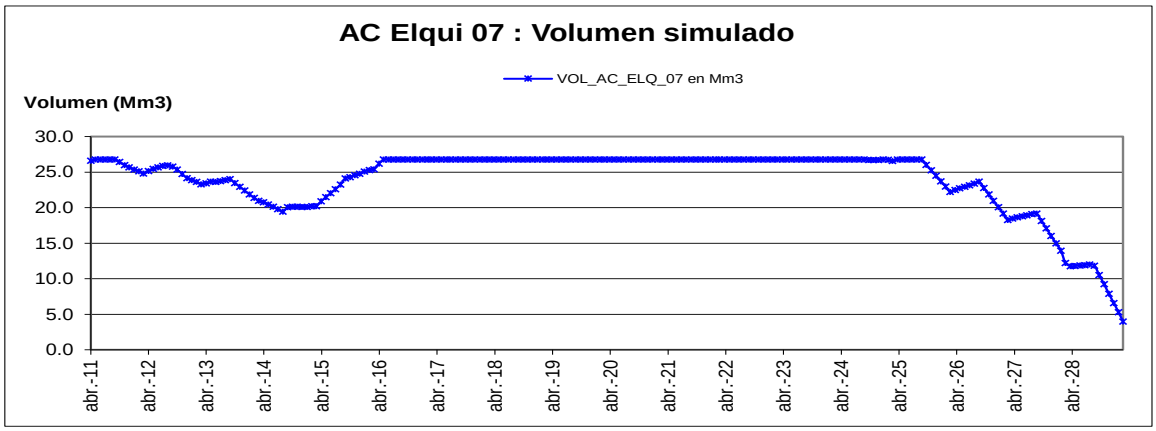


Figura8.73
Acuífero Elqui Bajo



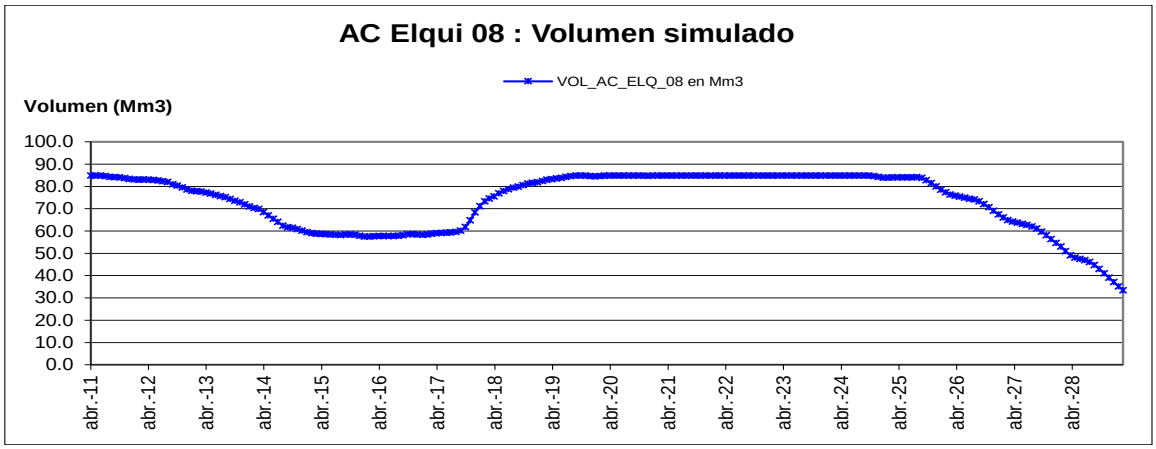
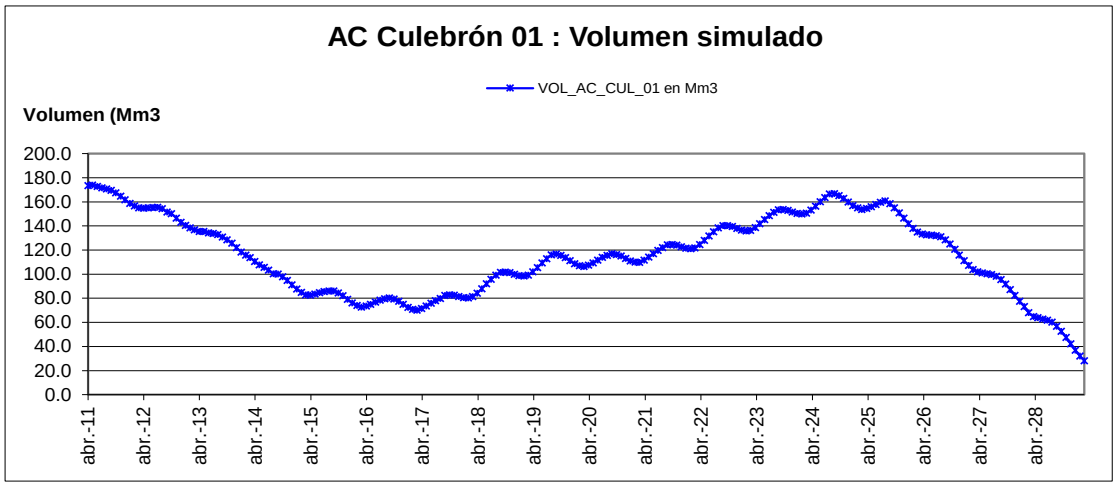


Figura8.74
Acuífero Culebrón



b) Planilla Futuro Base Ext 2_Balance_ZR

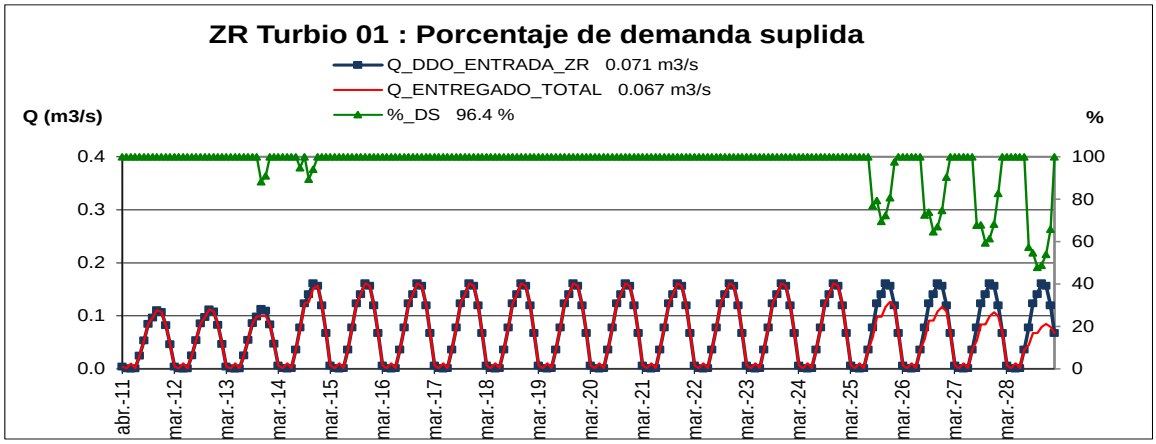
A continuación se muestra el grado de cobertura de la demanda, a través del parámetro % de demanda suplida, en los diferentes sectores de la cuenca.

- **Río Turbio**

Las zonas de riego del río Turbio, levemente afectadas por la sequía en el período 2014-2017, se ven mucho más afectadas con la sequía futura, debido a que se supone que la demanda es del 100%. Esto se aprecia en la Figura 8.75. El acceso al acuífero sería una solución, porque, como se ha visto, no muestra descensos al liberar su uso, especialmente para una demanda reducida.

Una situación similar se observa en las zonas del Cochiguaz.

Figura8.75
Zona de riego Turbio

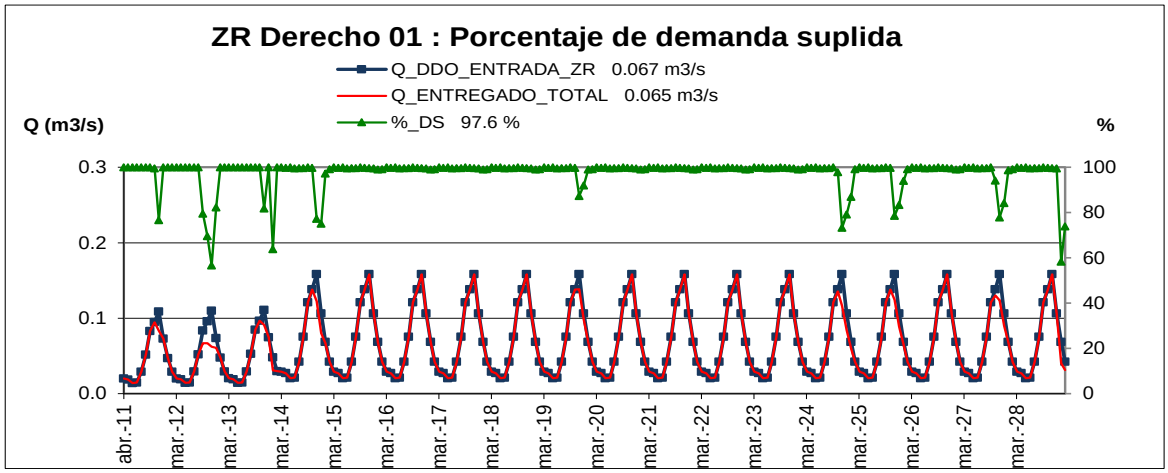


- **Estero Derecho**

La demanda del Estero Derecho se ve afectada en la sequía, tanto en la actualidad como en el futuro. Un mayor acceso al acuífero podría aliviar esta situación en dichos períodos, sin desestabilizar el acuífero, siempre que la demanda siga reducida.

En este caso específico, en preparación del escenario para el embalse de Cabecera en el Estero Derecho, se ha debido modificar someramente la forma de captación de los canales, en el período futuro respecto del período anterior. Este hecho hace que la demanda suplida sea similar en la primera sequía y en la segunda, cuando en realidad en la segunda debiera ser menor, porque la demanda es mayor.

Figura8.76
Zona de riego Estero Derecho



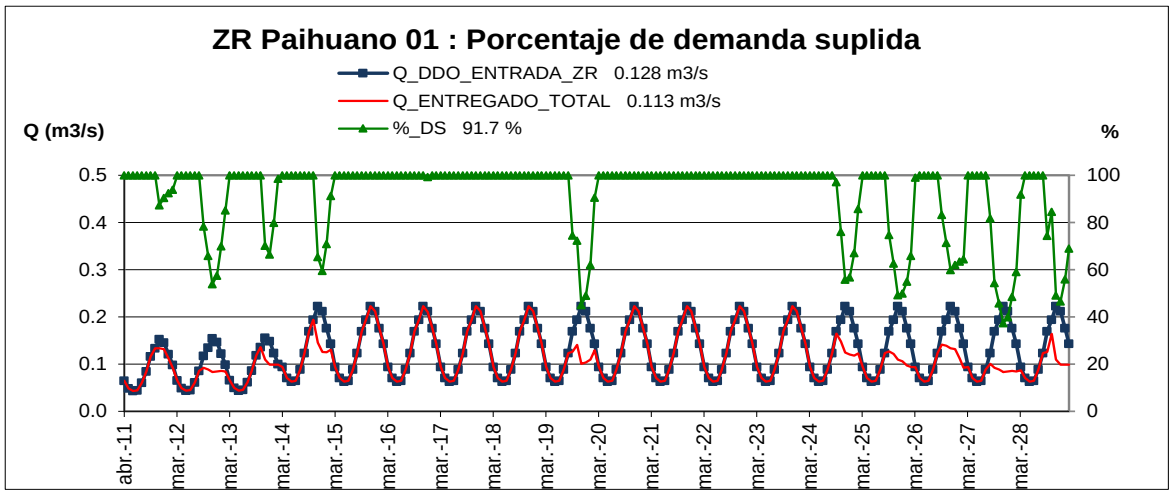
- **Río Claro**

En el río Claro, el efecto de la primera sequía sobre la demanda suplida es imperceptible (demanda reducida), mientras que en la segunda sequía se percibe algún efecto, aunque menor, porque la demanda se consideró completa.

- **Quebrada Paihuano**

La primera sequía afecta fuertemente a este sector, y la segunda, aún más.

Figura8.77
Zona de riego Paihuano



- **Elqui Alto**

En este sector, sólo la ZR_ELQ_02 tiene leves problemas en la segunda sequía. Los demás sectores no tienen problema para suplir sus demandas.

- **Elqui sector Puclaro y Elqui Bajo**

En este sector, conformado por las zonas de riego ZR_ELQ_04, 05, 06, 07 y 08, las primeras zonas están muy deficientemente suplidas durante todo el período, mientras que las de más abajo se surten mejor, salvo en períodos de sequía, como se aprecia en las figuras siguientes. El sector Elqui 08 no presenta déficits.

Figura8.78
Zona de riego Elqui sector Puclaro

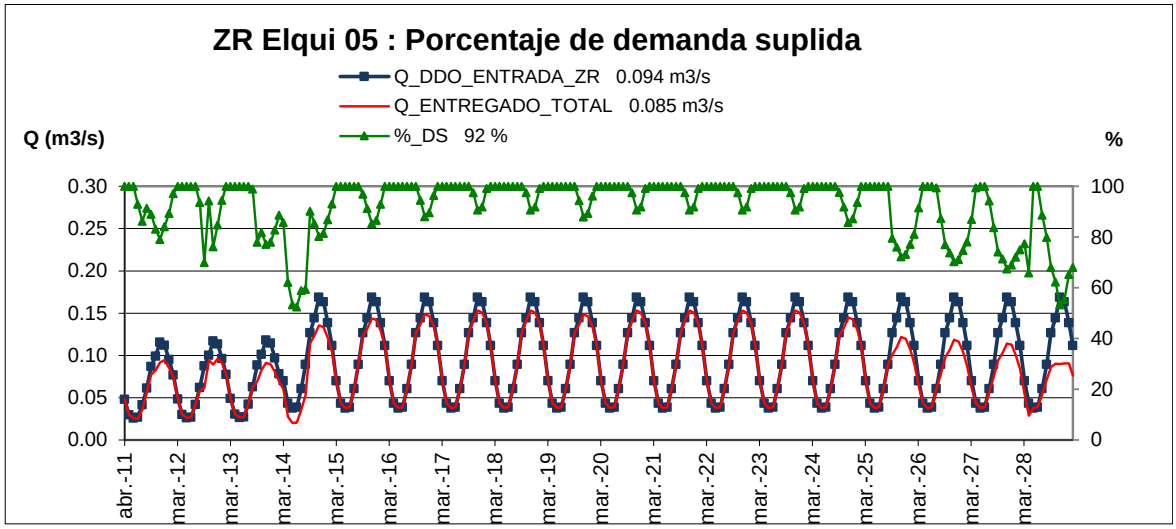
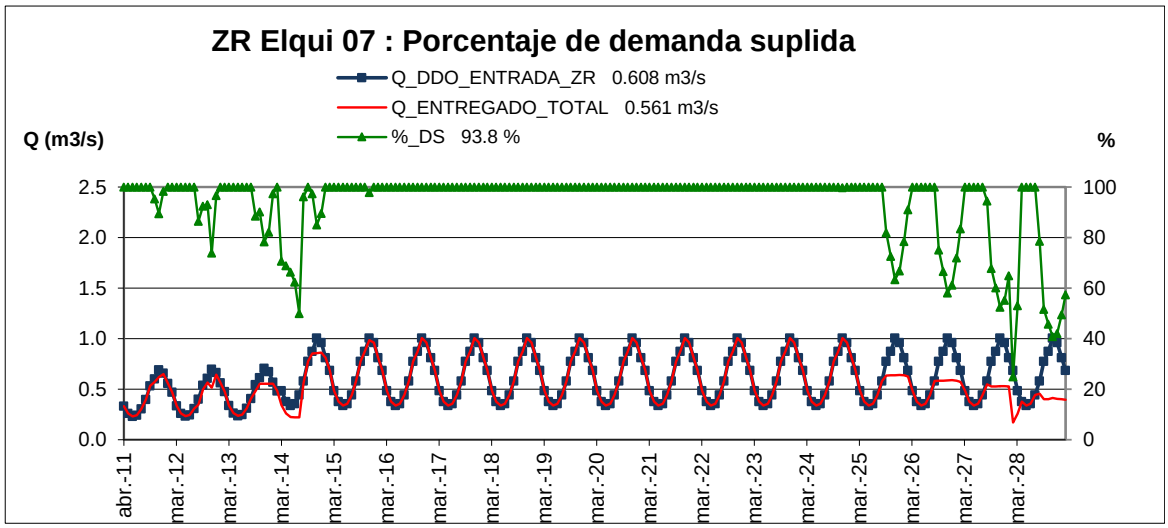


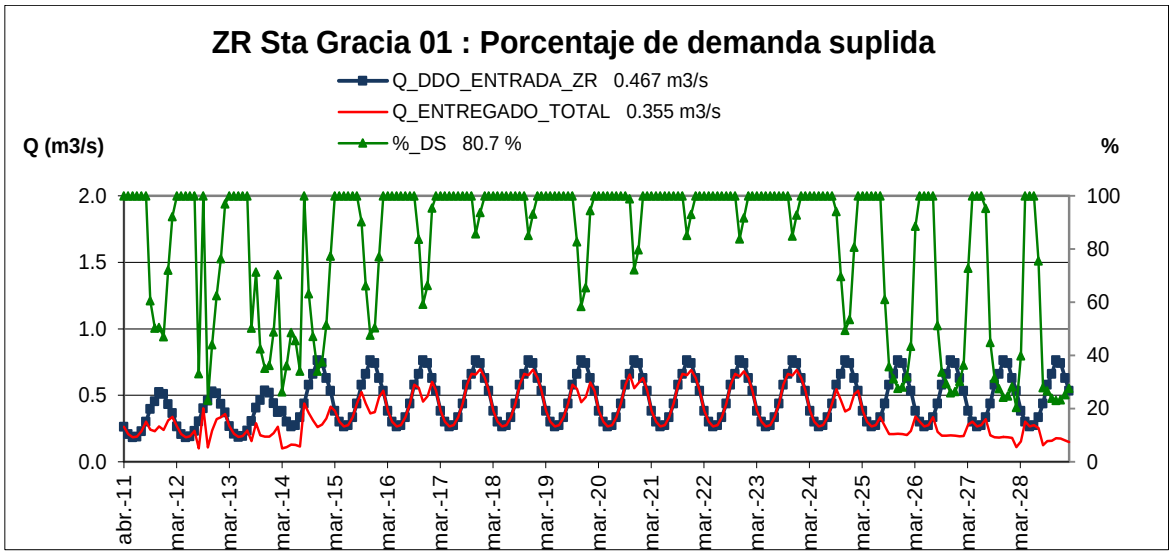
Figura8.79
Zona de riego Elqui Bajo



- **Santa Gracia**

Este sector de riego se aprecia deficientemente suplido. Como se ha visto, no puede ser apoyado por el acuífero, que está en una situación límite de estabilidad.

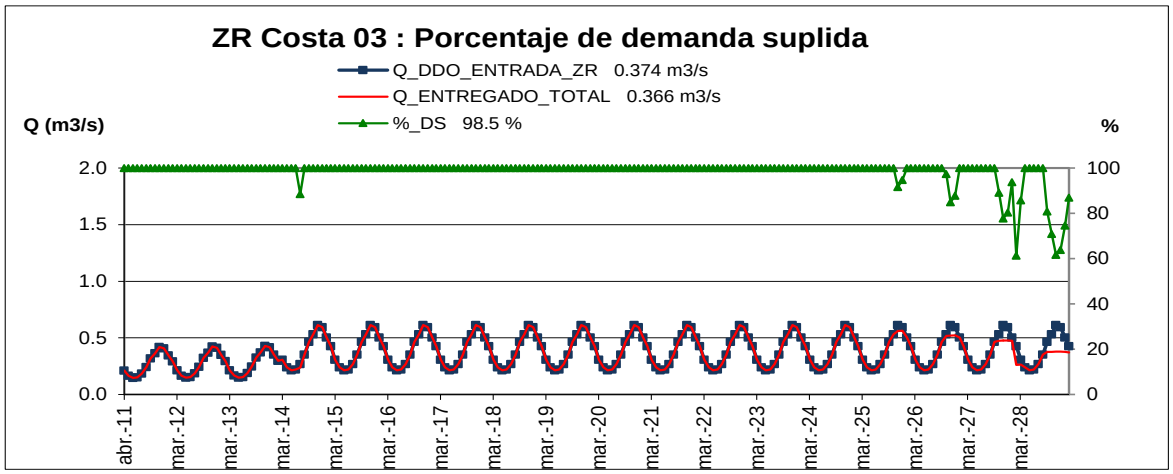
Figura 8.80
Zona de riego Santa Gracia



- **Costa**

De los tres sectores del acuífero de costa, sólo Vegas Sur presenta déficits en la segunda sequía, debido al aumento de áreas de riego en relación con la primera sequía. Las demás zonas aparecen bien suplidas durante todo el período.

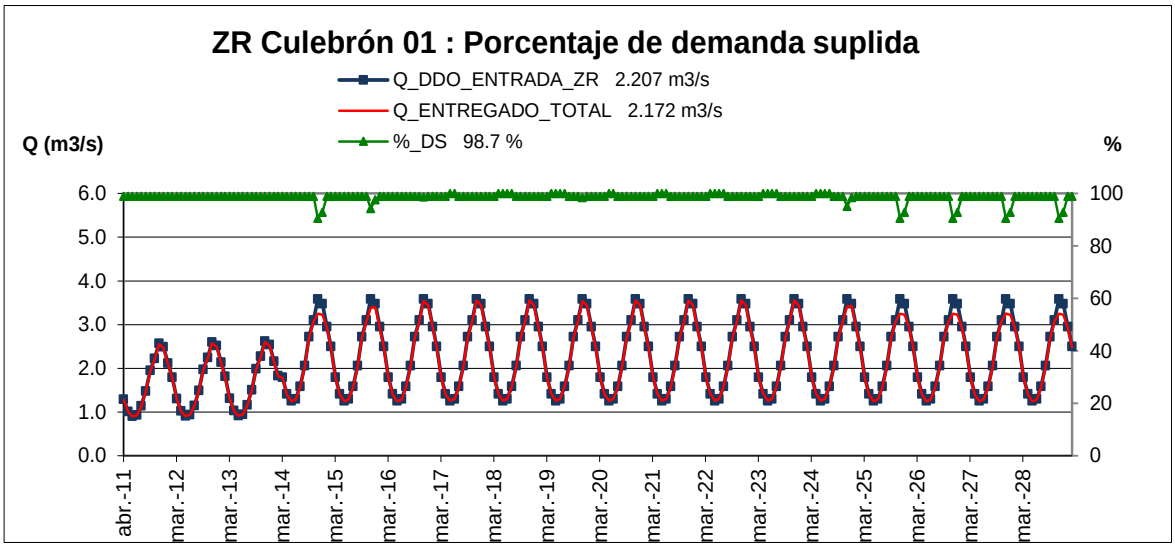
Figura 8.81
Zona de riego Costa 03



- **Pan de Azúcar**

En esta zona, la cantidad de derechos de agua existente permite la explotación de toda el agua necesaria en este escenario baseextendido. Aunque el acuífero Culebrón tiene una fuerte tendencia de descenso, la demanda de la zona de riego queda completamente suplida.

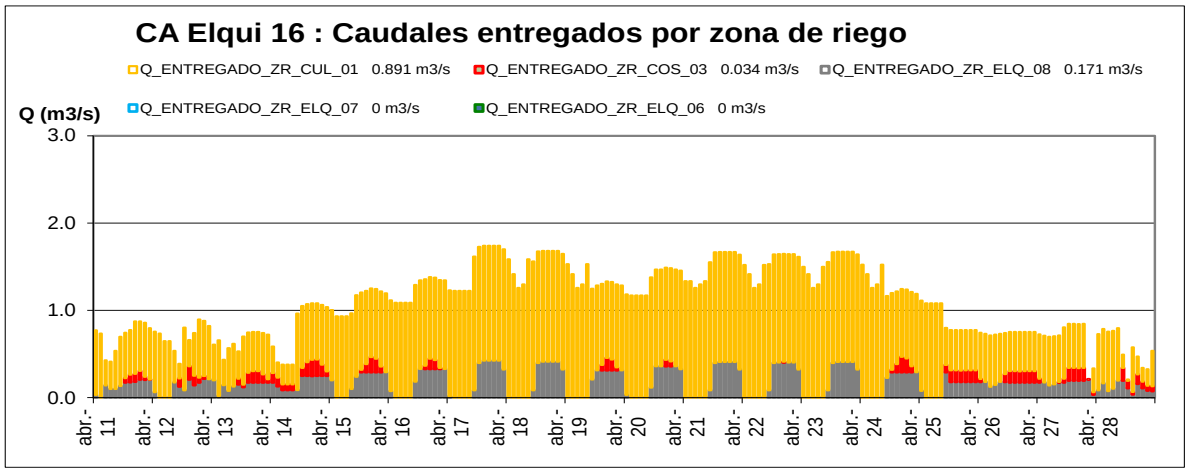
Figura 8.82
Zona de riego Pan de Azúcar



c) Planilla Futuro Base Ext 2_Balance_CA

Se revisó esta planilla observando los porcentajes de cumplimiento de desmarque. Se observa que todos ellos son parecidos a lo largo de toda la cuenca del Elqui. A modo de ejemplo, se muestra cómo riega el canal Bellavista en este escenario.

Figura8.83
Canal Bellavista en escenario Futuro Base Ext 2



8.6.4 Resultados globales del escenario Futuro Base Ext 2

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del período de análisis 2014-2029, de todas las variables analizadas, en el escenario Futuro Base Ext 2, que sirve de base a los escenarios de operación que se presentan a continuación.

Tabla 8.28
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2029)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.063	0.074	0.074	0.000	0.001	0.075	0.063	0.009	0.003	100
ZR_CAL_01	174.8	0.044	0.052	0.000	0.052	0.001	0.052	0.044	0.008	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.089	0.133	0.132	0.000	0.001	0.134	0.089	0.004	0.040	99
ZR_TUR_03	279.4	0.071	0.085	0.085	0.000	0.001	0.086	0.071	0.011	0.004	100
ZR_EDE_01	169.8	0.038	0.071	0.069	0.000	0.000	0.069	0.037	0.027	0.005	98
ZR_EDE_02	781.8	0.227	0.304	0.296	0.001	0.000	0.297	0.222	0.062	0.013	99
ZR_COC_01	223.3	0.061	0.110	0.110	0.000	0.000	0.110	0.061	0.000	0.050	100
ZR_COC_02	198.8	0.049	0.062	0.062	0.000	0.000	0.062	0.049	0.000	0.013	99
ZR_CLA_01	271.0	0.088	0.125	0.125	0.000	0.000	0.125	0.088	0.025	0.011	100
ZR_PAI_01	216.0	0.068	0.135	0.119	0.000	0.000	0.119	0.063	0.042	0.014	92
ZR_CLA_02	364.2	0.113	0.142	0.142	0.000	0.000	0.142	0.113	0.022	0.007	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.078	0.097	0.097	0.000	0.001	0.098	0.078	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.600	0.791	0.791	0.000	0.007	0.798	0.600	0.148	0.049	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.408	0.553	0.525	0.028	0.004	0.557	0.408	0.111	0.037	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.029	0.058	0.026	0.000	0.000	0.026	0.013	0.010	0.003	64
ZR_ELQ_05	208.8	0.057	0.100	0.088	0.001	0.000	0.089	0.053	0.028	0.009	92
ZR_ELQ_06	2027.8	0.399	0.611	0.460	0.124	0.000	0.584	0.385	0.157	0.042	97
ZR_ELQ_07	2099.8	0.369	0.641	0.571	0.013	0.000	0.584	0.337	0.194	0.052	93
ZR_ELQ_08	2334.3	0.412	0.754	0.588	0.160	0.000	0.748	0.409	0.268	0.071	99
ZR_GRA_01	1519.7	0.278	0.493	0.322	0.037	0.000	0.359	0.207	0.106	0.046	79
ZR_COS_01	93.3	0.015	0.031	0.000	0.029	0.000	0.029	0.015	0.015	0.000	97
ZR_COS_02	734.1	0.121	0.210	0.174	0.036	0.000	0.210	0.121	0.089	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.209	0.394	0.368	0.014	0.000	0.382	0.203	0.161	0.018	98
ZR_CUL_01	7689.9	1.420	2.313	0.965	1.176	0.000	2.142	1.323	0.737	0.082	94
TOTAL	**25318**	**5.305**	**8.336**	**6.190**	**1.670**	**0.016**	**7.876**	**5.051**	**2.251**	**0.574**	**96.5**

Tabla 8.29
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2029)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.024	0.043	0.009	0.060	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.880	0.008	0.837	0.052		0.052	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.109	0.053	0.004	0.165	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.061	0.050	0.011	0.119	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.030	0.010	0.027	0.064	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.050	0.013	0.062	0.119	0.006		0.001	0.006	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.191	0.032	0.025	0.249	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.090	0.004	0.042	0.131	0.005		0.000	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.131	0.032	0.022	0.158	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.050	0.083	0.015	0.083	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.319	0.078	0.148	0.493	0.053		0.000	0.052	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.165	0.079	0.111	0.314	0.041	0.010	0.028	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.015	0.074	0.010	0.089	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.074	0.071	0.028	0.162	0.011	0.007	0.001	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.405	0.068	0.157	0.306	0.325	0.012	0.124	0.123	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.315	0.032	0.194	0.130	0.412	0.020	0.013	0.416	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.297	0.058	0.268	0.017	0.605	0.025	0.160	0.094	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.084	0.000	0.106	0.155	0.037		0.037	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.015	0.248	0.082	0.006	0.029	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.176		0.089	0.224	0.067		0.036	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.437		0.161	0.575	0.043		0.014	0.002	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.485	0.000	0.737	0.000	1.222	0.052	1.176	0.122	0.093	0.019
TOTAL	**451.7**	**3.509**	**1.660**	**2.251**	**4.698**	**3.083**	**0.185**	**1.670**	**0.835**	**0.715**	**0.042**

Tabla 8.30
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2029)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.143	0.162	0.024	0.074	0.064	112	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.360	0.402	0.080	0.132	0.189	112	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.223	0.251	0.055	0.085	0.112	112	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.141	0.154	0.035	0.000	0.118	111	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.101	0.098	0.030	0.069	0.000	98	98	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.047	0.045	0.002	0.043	0.000	98	98	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.333	0.320	0.048	0.253	0.019	98	98	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.286	0.220	0.000	0.110	0.109	93	99	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.189	0.133	0.000	0.062	0.071	90	99	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.535	0.598	0.191	0.125	0.282	111	99	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.161	0.118	0.032	0.083	0.003	90	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.507	0.429	0.099	0.059	0.271	97	99	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.334	0.090	0.119	0.125		33		1.000	
CA_ELQ_01	0.102	0.083	0.020	0.063	0.000	96	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.234	0.169	0.032	0.137	0.000	90	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.073	0.058	0.013	0.030	0.015	95	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.463	0.380	0.087	0.290	0.003	96	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.996	0.840	0.193	0.369	0.278	97	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.264	0.208	0.045	0.163	0.000	94	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.613	0.625	0.144	0.362	0.119	107	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.047	0.049	0.015	0.026	0.008	105	100	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.240	0.271	0.065	0.193	0.012	111	100	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.016	0.018	0.006	0.012	0.000	112	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.175	0.177	0.048	0.130	0.000	102	100	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.323	0.356	0.113	0.243	0.000	109	98	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.281	0.313	0.119	0.132	0.062	110	98	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.135	0.143	0.046	0.088	0.008	105	98	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.889	1.003	0.354	0.493	0.157	111	98	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	1.692	1.906	0.711	1.178	0.018	111	97	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.160	0.181	0.069	0.081	0.031	110	98	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.181	0.173	0.048	0.125	0.000	96	98	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.269	0.252	0.051	0.172	0.029	94	98	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.276	0.293	0.111	0.181	0.000	105	98	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.571	0.644	0.193	0.333	0.118	111	98	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.350	0.140	0.174	0.036		97		0.360	
TOTAL		11.758	3.309	6.190	2.259			3044	25.604	
								22689		

8.6.5 Comentario sobre el escenario Futuro Base Ext 2

En este escenario se ha explorado el comportamiento del sistema en la eventualidad de que se repitiera la hidrología 1999-2014. La demanda agrícola corresponde al 100% de la demanda potencial.

Las tablas muestran los promedios del período 2014-2029. Para este período, se observa que los canales captan un caudal de 11,8 m3/s, similar al escenario de calibración.

Entregan a las zonas de riego un caudal de 6,2 m3/s, para suplir una demanda de 8,3 m3/s. La demanda no suplida por canales, se solicita a los acuíferos, que aportan 1,7 m3/s. Entre todas las fuentes, la demanda finalmente se ve bastante bien suplida, como promedio en un 96,5%, algo menor que en el escenario de calibración, porque en este escenario el área es siempre el 100%.

Las devoluciones desde los canales no llegan a lo que ocurría en el escenario de calibración, pero son mayores que en los escenarios de sequía, 2,3 m3/s. Los afloramientos llegan a 4,7 m3/s, y las recargas netas a 3,1 m3/s.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 3,4 m3/s, mayor que en el escenario de calibración, pero sustancialmente menor que en los escenarios de sequía con acuíferos libres.

En este escenario las salidas al mar son significativamente menores que en el escenario de calibración, llegando a 3,2 m3/s, en vez de 4,6 m3/s, debido a que la demanda es permanentemente mayor.

Se observa que, como en los escenarios anteriores, hay acuíferos muy estables, que no varían en el período, ni siquiera con la sequía, y otros que se ven muy afectados con la sequía actual, y volverán a verse afectados en una sequía similar futura, como son Elqui sobre Puclaro, Elqui Bajo y Culebrón. Es notable, eso sí, observar que todos ellos tendrían una tendencia a la recuperación si volviera a haber períodos húmedos.

En cuanto a las zonas de riego, casi todas muestran los efectos de la segunda sequía, debido al aumento de demanda que se consideró en este escenario. Hay zonas que también muestran afección en la actual sequía, para la que se consideró un 70% de demanda, ellas son Paihuano, Elqui sector Vicuña, Elqui sector Puclaro y Elqui Bajo salvo Elqui 08. Algunos sectores de riego no sólo muestran efectos de la sequía, sino que se ven permanentemente mal suplidas al 100% de la demanda potencial. Ellas son Elqui en el sector de Puclaro (Elqui 04 y 05), Santa Gracia y sector Costa en desembocadura. Los sectores que no muestran déficit ni en la sequía actual ni en la futura, son el sector bajo del Turbio (Turbio 03), el Claro en ambos sectores sólo presenta déficits muy pequeños, Elqui Alto sector Almendral, Vegas Norte y Vegas Sur.

8.7 Escenario Futuro Operación 4: Embalse Cabecera Estero Derecho 2 millones m3

8.7.1 Configuración del escenario

Este escenario se formuló para evaluar el efecto de un embalse de riego en la cabecera del Estero Derecho, de 2 millones de m3, el cual se hace operativo desde el año 2014. Se espera un beneficio para las zonas de riego del Estero Derecho, y se desea evaluar el efecto sobre los canales de aguas abajo y embalse Puclaro.

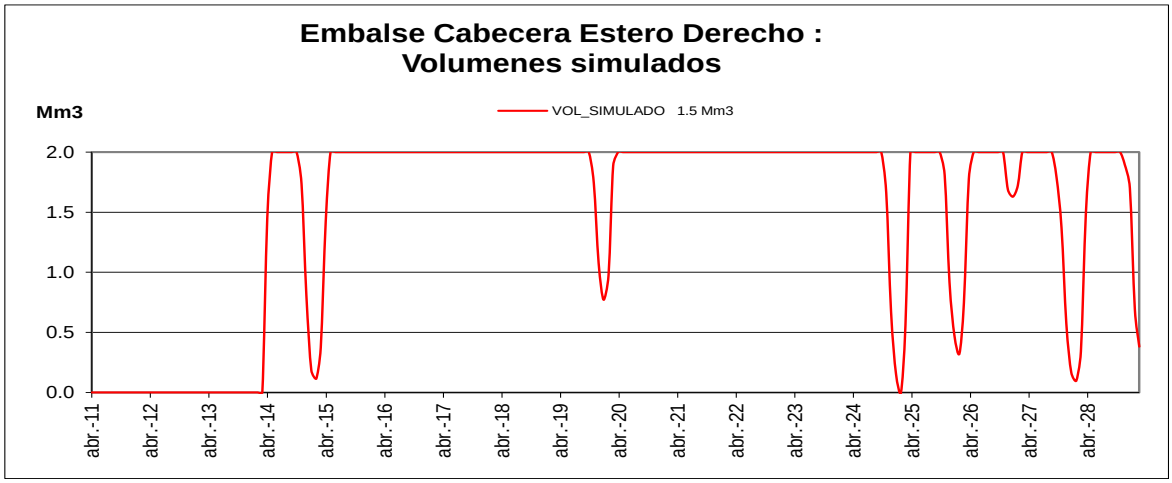
El escenario se estructura igual que el escenario Futuro Base Ext 2, salvo que se agrega un embalse en la cabecera del Estero Derecho, ubicado sobre los sectores de riego.

Las planillas de resultados se adjuntan en el Anexo Capítulo 8.7.

8.7.2 Presentación de resultados relevantes

El primer resultado relevante de este escenario es la aparición del embalse en el Estero Derecho. La siguiente Figura 8.84 muestra su comportamiento en el período futuro analizado. Se observa que el embalse se mantiene lleno en épocas normales, siendo utilizado intensivamente como embalse interestacional en períodos más secos.

Figura 8.84
Comportamiento embalse Estero Derecho



El efecto del embalse sobre las zonas de riego ZR_EDE_01 y 02 se puede observar en las Figuras 8.85 y 8.86 adjuntas, en que se compara el comportamiento de dichas zonas con el del escenario Futuro Base Ext 2. Se aprecia que en ambas zonas se acabarían los déficits que genera la sequía.

Figura 8.85
Demanda suplida en ZR_EDE_01 en escenarios Futuro Base Ext 2 y Operación 4

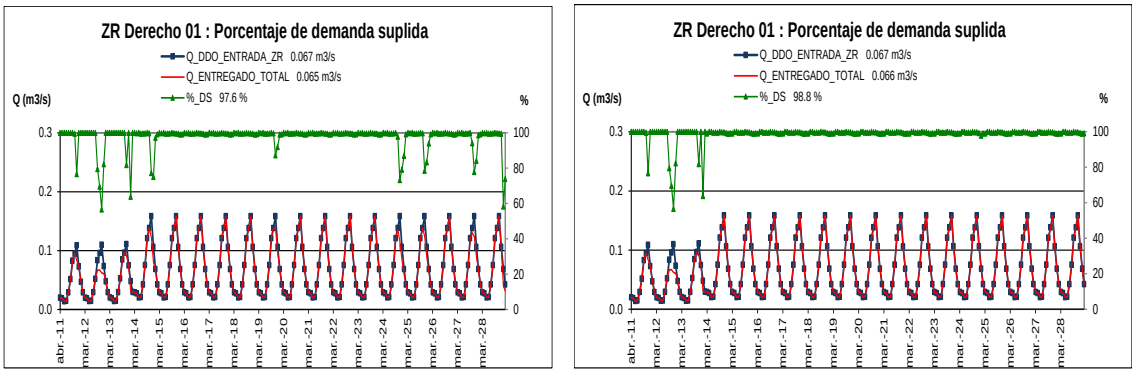
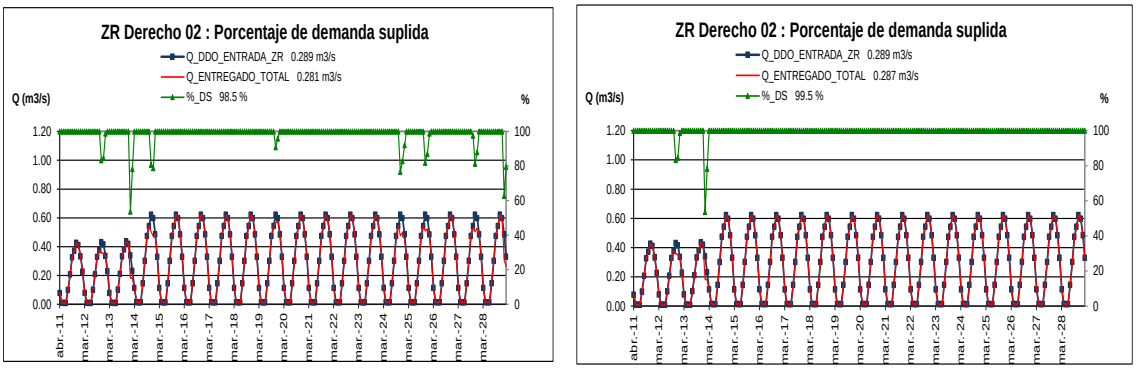


Figura 8.86
Demanda suplida en ZR_EDE_02 en escenarios Futuro Base Ext 2 y Operación 4



En las planillas del Anexo Capítulo 8.6 se puede observar que los acuíferos, antes no afectados en ningún período, tampoco lo son en este escenario.

También interesa comparar el efecto de este embalse sobre el volumen embalsado en Puclaro.

Las siguientes Figuras 8.87 y 8.88 muestran esta comparación.

Lo que se aprecia en las figuras, es que el embalse del Estero Derecho tiene un efecto de disminución de 0,9 millones de m3 en el volumen embalsado promedio de Puclaro. Sin embargo, este hecho no tiene una manifestación sensible en el caudal captado por los canales, ni en la cobertura de demanda de las zonas de riego, ni aguas arriba ni aguas abajo de Puclaro, como se puede verificar en las tablas del acápite 8.7.3.

Figura 8.87
Volumen embalsado en Puclaro en escenario Futuro Base Ext 2

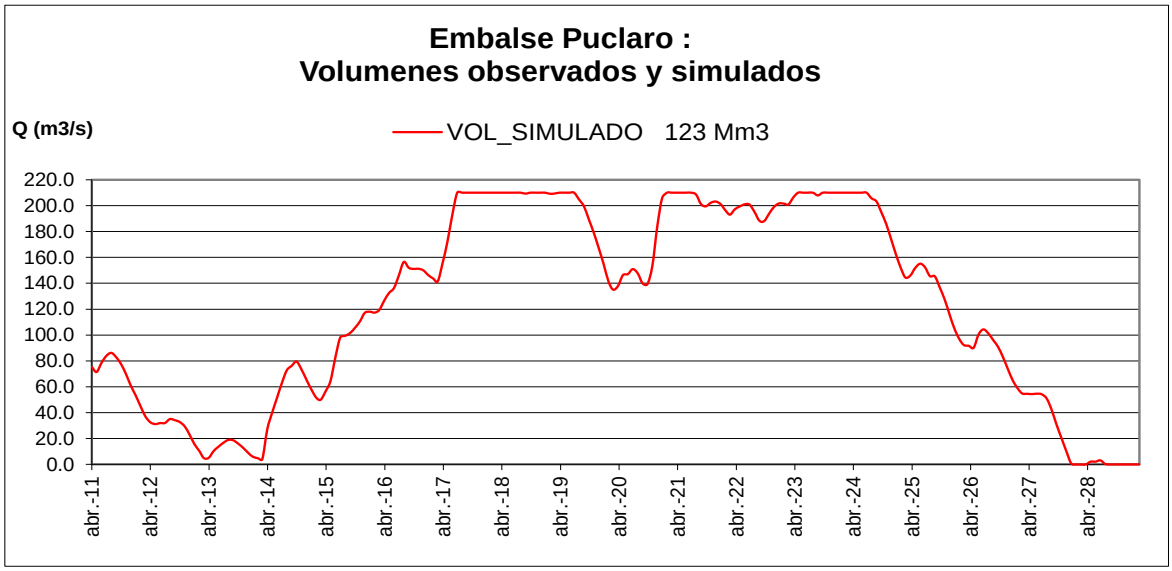
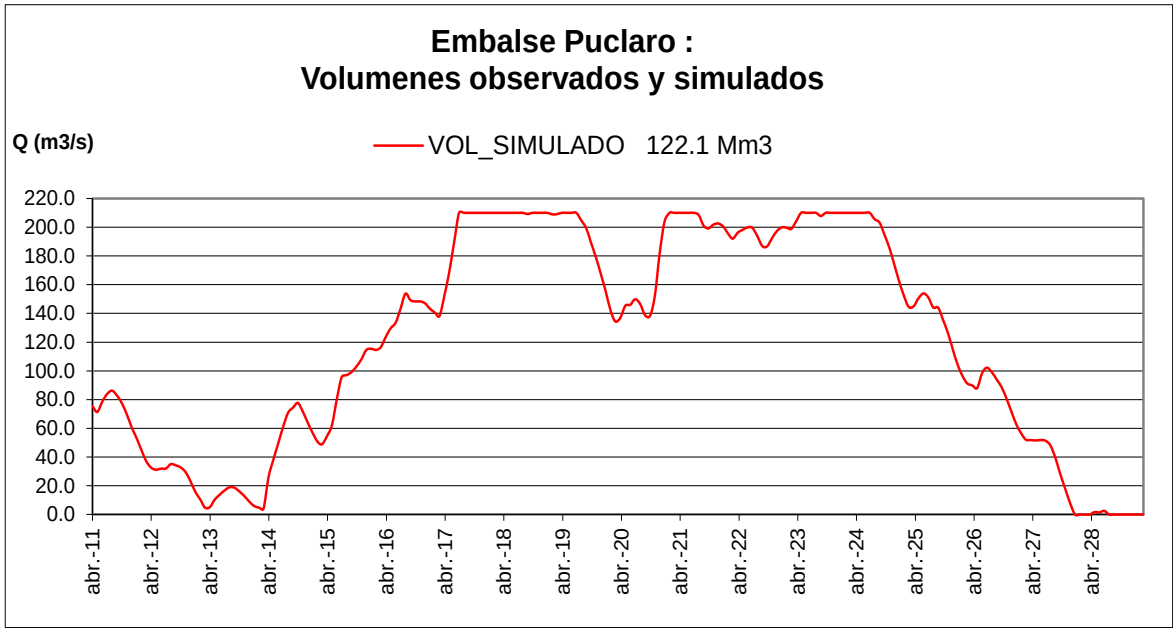


Figura 8.88
Volumen embalsado en Puclaro en escenario Futuro Operación 4



8.7.3 Resultados globales del escenario Operación 4

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del período de análisis 2014-2029, de todas las variables analizadas, en el escenario con embalse de cabecera en el Estero Derecho, con capacidad de 2 millones de m3.

Tabla 8.31
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2029)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.063	0.074	0.074	0.000	0.001	0.075	0.063	0.009	0.003	100
ZR_CAL_01	174.8	0.044	0.052	0.000	0.052	0.001	0.052	0.044	0.008	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.089	0.133	0.132	0.000	0.001	0.134	0.089	0.004	0.040	99
ZR_TUR_03	279.4	0.071	0.085	0.085	0.000	0.001	0.086	0.071	0.011	0.004	100
ZR_EDE_01	169.8	0.038	0.071	0.071	0.000	0.000	0.071	0.038	0.027	0.006	100
ZR_EDE_02	781.8	0.227	0.304	0.304	0.000	0.000	0.304	0.227	0.064	0.013	100
ZR_COC_01	223.3	0.061	0.110	0.110	0.000	0.000	0.110	0.061	0.000	0.050	100
ZR_COC_02	198.8	0.049	0.062	0.062	0.000	0.000	0.062	0.049	0.000	0.013	99
ZR_CLA_01	271.0	0.088	0.125	0.125	0.000	0.000	0.125	0.088	0.025	0.011	100
ZR_PAI_01	216.0	0.068	0.135	0.119	0.000	0.000	0.119	0.063	0.042	0.014	92
ZR_CLA_02	364.2	0.113	0.142	0.142	0.000	0.000	0.142	0.113	0.022	0.007	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.078	0.097	0.097	0.000	0.001	0.098	0.078	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.600	0.791	0.791	0.000	0.007	0.798	0.600	0.148	0.049	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.408	0.553	0.524	0.029	0.004	0.557	0.408	0.111	0.037	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.029	0.058	0.026	0.000	0.000	0.026	0.013	0.010	0.003	64
ZR_ELQ_05	208.8	0.057	0.100	0.088	0.001	0.000	0.089	0.053	0.028	0.009	92
ZR_ELQ_06	2027.8	0.399	0.611	0.459	0.124	0.000	0.584	0.385	0.157	0.042	97
ZR_ELQ_07	2099.8	0.369	0.641	0.570	0.013	0.000	0.582	0.337	0.194	0.052	93
ZR_ELQ_08	2334.3	0.412	0.754	0.586	0.161	0.000	0.747	0.409	0.267	0.071	99
ZR_GRA_01	1519.7	0.278	0.493	0.320	0.038	0.000	0.358	0.206	0.106	0.045	79
ZR_COS_01	93.3	0.015	0.031	0.000	0.029	0.000	0.029	0.015	0.015	0.000	97
ZR_COS_02	734.1	0.121	0.210	0.174	0.036	0.000	0.210	0.121	0.089	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.209	0.394	0.367	0.014	0.000	0.381	0.202	0.161	0.018	98
ZR_CUL_01	7689.9	1.420	2.313	0.961	1.170	0.000	2.131	1.317	0.732	0.081	94
TOTAL	**25318**	**5.305**	**8.336**	**6.187**	**1.666**	**0.016**	**7.869**	**5.049**	**2.247**	**0.574**	**96.4**

Tabla 8.32
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2029)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q aflora m	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.024	0.043	0.009	0.060	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.880	0.008	0.837	0.052		0.052	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.109	0.053	0.004	0.165	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.061	0.050	0.011	0.119	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.030	0.010	0.027	0.066	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.052	0.012	0.064	0.123	0.006		0.000	0.006	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.192	0.032	0.025	0.249	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.090	0.004	0.042	0.131	0.005		0.000	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.131	0.031	0.022	0.158	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.050	0.083	0.015	0.082	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.319	0.078	0.148	0.492	0.053		0.000	0.052	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.165	0.078	0.111	0.312	0.042	0.010	0.029	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.015	0.074	0.010	0.089	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.073	0.071	0.028	0.161	0.011	0.007	0.001	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.403	0.068	0.157	0.304	0.324	0.012	0.124	0.123	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.314	0.032	0.194	0.129	0.411	0.020	0.013	0.416	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.296	0.057	0.267	0.015	0.604	0.025	0.161	0.094	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.084	0.000	0.106	0.153	0.037		0.038	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.015	0.247	0.082	0.006	0.029	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.176		0.089	0.224	0.067		0.036	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.435		0.161	0.572	0.043		0.014	0.002	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.483	0.000	0.732	0.000	1.215	0.052	1.170	0.122	0.093	0.019
TOTAL	**451.7**	**3.502**	**1.654**	**2.247**	**4.689**	**3.074**	**0.185**	**1.666**	**0.835**	**0.715**	**0.042**

Tabla 8.33
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2029)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.143	0.162	0.024	0.074	0.063	112	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.360	0.401	0.080	0.132	0.189	112	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.223	0.251	0.054	0.085	0.112	112	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.141	0.153	0.035	0.000	0.118	110	100	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.101	0.101	0.030	0.071	0.000	100	100	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.047	0.047	0.002	0.045	0.000	100	100	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.333	0.333	0.050	0.259	0.023	100	100	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.286	0.220	0.000	0.110	0.110	93	99	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.189	0.133	0.000	0.062	0.071	90	99	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.535	0.599	0.192	0.125	0.282	111	99	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.161	0.118	0.032	0.083	0.003	89	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.507	0.429	0.099	0.059	0.271	97	100	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.334	0.090	0.119	0.125		33		1.000	
CA_ELQ_01	0.102	0.083	0.020	0.062	0.000	95	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.234	0.169	0.032	0.137	0.000	90	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.073	0.058	0.013	0.030	0.015	94	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.463	0.380	0.087	0.289	0.003	96	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.996	0.839	0.193	0.369	0.277	97	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.264	0.207	0.045	0.162	0.000	94	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.613	0.624	0.144	0.362	0.119	107	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.047	0.049	0.015	0.026	0.008	105	100	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.240	0.270	0.065	0.193	0.012	111	100	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.016	0.018	0.006	0.012	0.000	112	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.175	0.177	0.047	0.130	0.000	101	100	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.323	0.355	0.113	0.243	0.000	108	98	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.281	0.312	0.119	0.132	0.062	109	98	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.135	0.143	0.046	0.088	0.008	104	98	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.889	0.999	0.352	0.491	0.156	110	97	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	1.692	1.898	0.707	1.173	0.018	110	97	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.160	0.180	0.068	0.081	0.031	110	98	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.181	0.173	0.047	0.125	0.000	96	98	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.269	0.251	0.050	0.172	0.028	94	97	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.276	0.291	0.111	0.181	0.000	105	97	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.571	0.641	0.192	0.332	0.117	110	97	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.350	0.140	0.174	0.036		97		0.360	
TOTAL		11.748	3.303	6.187	2.258			3044	25.604	2870.999
								22689		

8.7.4 Comentarios sobre el escenario Futuro Operación 4

Las tablas muestran los promedios del período 2014-2029. Para este período, se observa que los canales captan un caudal de 11,7 m3/s, muy similar al escenario de Futuro Base Ext2 con el que se compara. Entregan a las zonas de riego un caudal de 6,2 m3/s, para suplir una demanda de 8,3 m3/s, igual que en el escenario base. La demanda no suplida por

canales, se solicita a los acuíferos, que aportan 1,7 m3/s, levemente menor que en el escenario base. Entre todas las fuentes, la demanda finalmente se ve bastante bien suplida, como promedio en un 96,4%. En el escenario Futuro Base Ext 2, el porcentaje de demanda suplida es de 96,5%. Esta muy leve reducción se debe a que el embalse Puclaro queda en promedio con un volumen 0,9 millones de m3 menor en el presente escenario, lo que afectaría la regla de operación del sistema. Sin embargo, se verifica que este efecto es insignificante.

Las devoluciones desde los canales son iguales al escenario base, de 2,3 m3/s. Los afloramientos y recargas netas también son iguales, de 4,7 m3/s y 3,1 m3/s, respectivamente.

El total de extracciones para bombeo alcanza los 3,4 m3/s, levemente inferior al escenario base, lo que se explica porque con el nuevo embalse habría más agua superficial.

En este escenario las salidas al mar promedio del período son levemente menores que en el escenario base, de 3,1 m3/s, lo que también se explica con el embalsamiento.

Por lo tanto, se comprueba que un embalse de cabecera en el Estero Derecho, de 2 millones de m3, tiene un efecto positivo sobre la seguridad de riego de las zonas de riego de dicha Junta de Vigilancia, y no afecta en forma sensible la disponibilidad hacia aguas abajo. Este mismo resultado se obtuvo en el estudio del Plan Maestro, en base al modelo MAGIC.

8.8 Escenario Futuro Operación 5: Mejoramiento de canales

8.8.1 Configuración del escenario

Este escenario se formuló para evaluar el efecto del mejoramiento de diversos canales, sobre los acuíferos y las zonas de riego. Se espera, por un lado, disminución de las recargas de algunos acuíferos por concepto de pérdidas desde canales, y por otro lado, aumento de la recarga en acuíferos asociados a sectores que, con los canales revestidos, reciben más riego.

El mejoramiento analizado consistió en disminuir a la mitad la ineficiencia o porcentaje de pérdida. Los canales a mejorar, fueron consultados con la Junta de Vigilancia del Elqui, y son los que se presentan en la Tabla 8.31.

Tabla 8.34
Canales cuya ineficiencia se redujo a la mitad

Código Canal	Nombre Canal	nuevo % de ineficiencia
CA_COC_02	Ajial Bajo hasta Junta Mal Paso	21.2
CA_CLA_01	Alamo, Lúcumo, Viña hasta Totoral (acciones trasladadas)	25.9
CA_CLA_02	Los Aguirre, Las Yeguas	13.5

CA_CLA_03	Bajada hasta Santa Gertrudis Primero	19.1
CA_TUR_02	Barraza hasta Totoralillo	18.0
CA_TUR_03	Molino hasta Varillar Bajo	16.6
CA_TUR_04	Captación Casa Rosada hasta Toma de Iglesias	11.5
CA_ELQ_02	Miraflores	10.0
CA_ELQ_05	Barranca hasta Rincón	12.7
CA_ELQ_07	Captación San Isidro hasta Yungay	17.0
CA_ELQ_09	Maitén Alto o Delirio	15.0
CA_ELQ_11	Casuto-Marquesa	16.7
CA_ELQ_13	Cutín y Rojas hasta Titón	27.2
CA_ELQ_14	Hinojal	19.0
CA_ELQ_15	El Romero -San Pedro Nolasco	22.5
CA_ELQ_16	Bellavista	23.0

El escenario se estructura sobre el escenario Futuro Base Ext 2, introduciendo los cambios señalados.

Las planillas de resultados se adjuntan en el Anexo Capítulo 8.8.

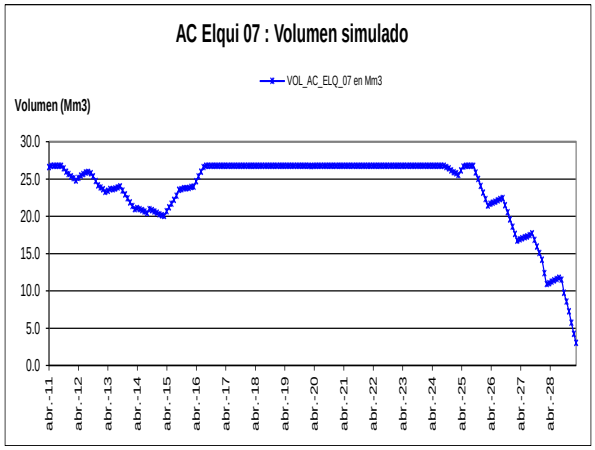
8.8.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planillas Futuro_Operacion_5_Balance_AC

En estas planillas se puede observar el resultado del aumento de eficiencia de los canales, sobre los acuíferos. Los cambios más notables se presentan en los acuíferos.

Comparando la evolución del volumen almacenado de los escenarios Futuro Base Ext 2 y Futuro Operación 5, no hay efectos sensibles salvo en los acuíferos Elqui 07, 08 y Culebrón, que se presentan en las figuras adjuntas.

Figura 8.89
Volumen embalsado en acuífero Elqui 07 (Elqui Bajo)



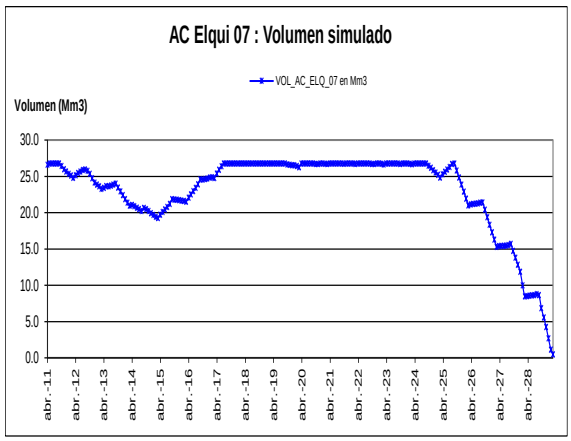
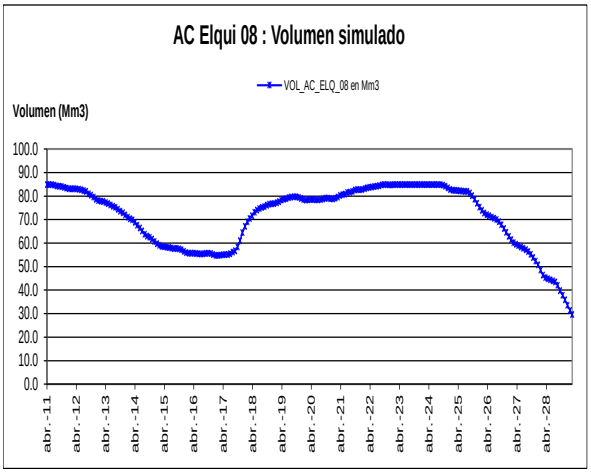


Figura 8.90
Volumen embalsado en acuífero Elqui 08 (Elqui Bajo)



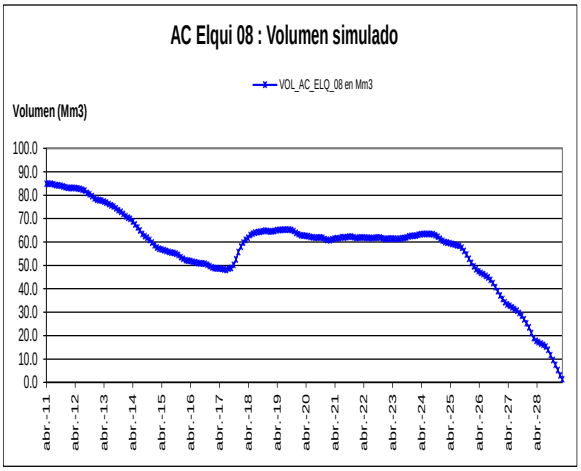
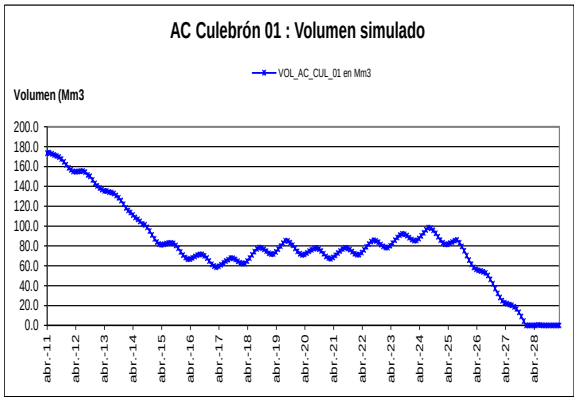
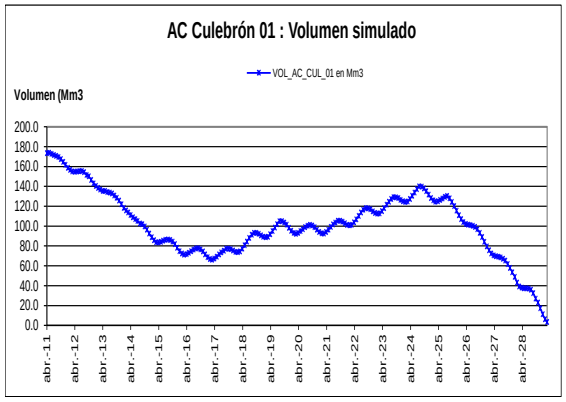


Figura 8.91
Volumen embalsado en acuífero Culebrón





Según se puede observar, en los dos primeros casos, es decir, Elqui Bajo, el mejoramiento de los canales afecta a los acuíferos en la forma de disminución de recarga, con lo que el acuífero 07 tarda más en recuperarse de la sequía, mientras que el acuífero 08 no se recupera.

Por el contrario, el agua de canales que deja de infiltrar en el acuífero Elqui Bajo, en parte llega a la subcuenca Pan de Azúcar, donde aumenta la infiltración, tanto desde canales como desde el riego, con el efecto de que este acuífero tiene una mejor recuperación después de la sequía que sin mejoramiento de canales.

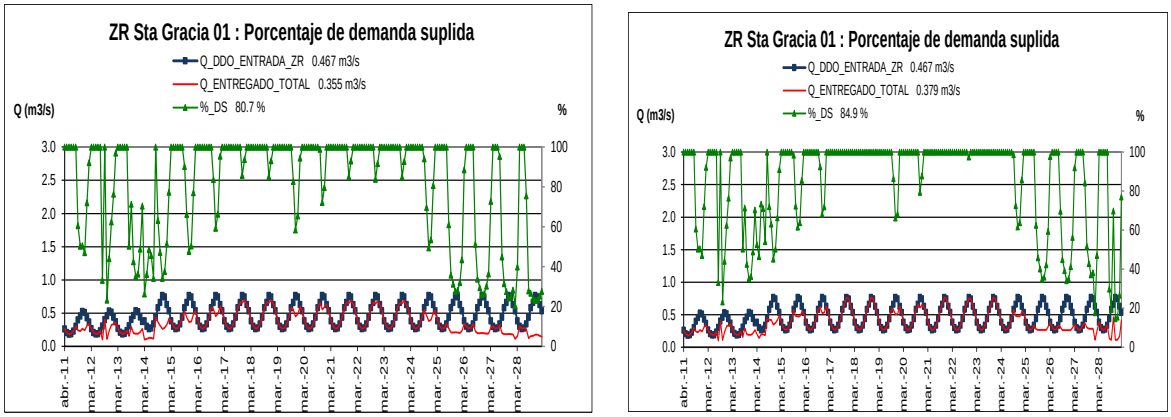
b) Planilla Futuro_Operación_5_Balance_ZR

Observando ahora el efecto en las zonas de riego, se espera, sin excepción, una mayor cobertura de la demanda. Esta se observa, perceptiblemente, en los sectores de riego

Turbio 01 y 02, Cochiguaz 01 y 02, Claro 01 y 02, Elqui 01 y Santa Gracia. En los demás sectores, si bien en la mayoría de los casos el efecto existe, es imperceptible en la práctica.

A modo de ejemplo, se presenta el caso de Santa Gracia, en la Figura 8.92.

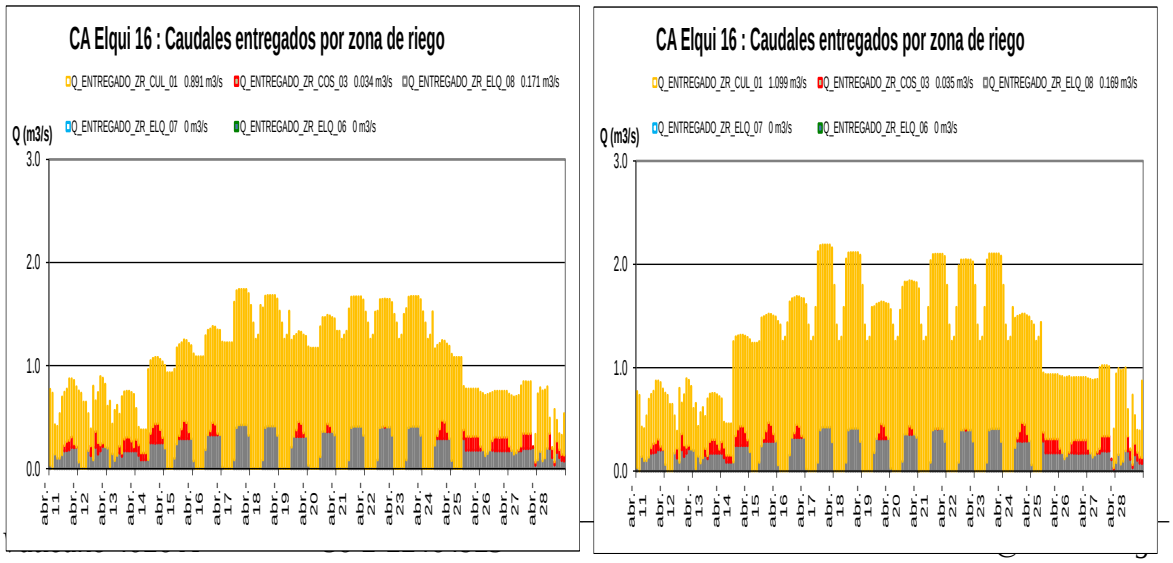
Figura 8.92
Efecto del aumento de eficiencia de conducción en la ZR Santa Gracia



c) Planilla Futuro_Operación_5_Balance_CA

Finalmente será interesante observar el efecto del mejoramiento en el canal Bellavista, que al mismo tiempo desfavorece al Acuífero de Elqui Bajo, y favorece el de Culebrón, como se ha visto antes. El agua entregada por el canal a cada zona de riego, se presenta en la Figura 8.93 adjunta. Lo que se puede ver claramente, es que en virtud del aumento de eficiencia, aumenta el caudal entregado a la ZR Pan de Azúcar (no así a las zonas de riego anteriores, que se suplen igual con eficiencias menores del canal). Este aumento de entrega a la ZR Pan de Azúcar es la causa directa de la mejor recuperación del acuífero Culebrón.

Figura 8.93
Efecto del aumento de eficiencia de conducción del canal Bellavista



8.8.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 5

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del período de análisis, 2014-2029, de todas las variables analizadas, en el escenario con mejoramiento de canales.

Tabla 8.35
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2029)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_TUR_01	247.1	0.063	0.074	0.074	0.000	0.001	0.075	0.063	0.009	0.003	100
ZR_CAL_01	174.8	0.044	0.052	0.000	0.052	0.001	0.052	0.044	0.008	0.000	100
ZR_TUR_02	336.2	0.089	0.133	0.132	0.000	0.001	0.134	0.089	0.004	0.040	99
ZR_TUR_03	279.4	0.071	0.085	0.085	0.000	0.001	0.086	0.071	0.011	0.004	100
ZR_EDE_01	169.8	0.038	0.071	0.069	0.000	0.000	0.069	0.037	0.027	0.005	98
ZR_EDE_02	781.8	0.227	0.304	0.296	0.001	0.000	0.297	0.222	0.062	0.013	99
ZR_COC_01	223.3	0.061	0.110	0.110	0.000	0.000	0.110	0.061	0.000	0.050	100
ZR_COC_02	198.8	0.049	0.062	0.062	0.000	0.000	0.062	0.049	0.000	0.013	99
ZR_CLA_01	271.0	0.088	0.125	0.125	0.000	0.000	0.125	0.088	0.025	0.011	100
ZR_PAI_01	216.0	0.068	0.135	0.124	0.000	0.000	0.124	0.064	0.045	0.015	94
ZR_CLA_02	364.2	0.113	0.142	0.142	0.000	0.000	0.142	0.113	0.022	0.007	100
ZR_ELQ_01	294.1	0.078	0.097	0.097	0.000	0.001	0.098	0.078	0.015	0.005	100
ZR_ELQ_02	2258.6	0.600	0.791	0.791	0.000	0.007	0.798	0.600	0.148	0.049	100
ZR_ELQ_03	1482.5	0.408	0.553	0.526	0.026	0.004	0.557	0.408	0.111	0.037	100
ZR_ELQ_04	105.4	0.029	0.058	0.026	0.000	0.000	0.026	0.013	0.010	0.003	64
ZR_ELQ_05	208.8	0.057	0.100	0.088	0.001	0.000	0.089	0.053	0.028	0.009	92
ZR_ELQ_06	2027.8	0.399	0.611	0.492	0.097	0.000	0.589	0.387	0.159	0.042	98
ZR_ELQ_07	2099.8	0.369	0.641	0.575	0.012	0.000	0.587	0.339	0.196	0.052	94
ZR_ELQ_08	2334.3	0.412	0.754	0.587	0.160	0.000	0.747	0.409	0.267	0.071	99
ZR_GRA_01	1519.7	0.278	0.493	0.379	0.028	0.000	0.407	0.232	0.122	0.052	87
ZR_COS_01	93.3	0.015	0.031	0.000	0.029	0.000	0.029	0.015	0.015	0.000	97
ZR_COS_02	734.1	0.121	0.210	0.175	0.035	0.000	0.210	0.121	0.089	0.000	100
ZR_COS_03	1207.6	0.209	0.394	0.368	0.014	0.000	0.382	0.202	0.161	0.018	98
ZR_CUL_01	7689.9	1.420	2.313	1.215	1.064	0.000	2.279	1.402	0.789	0.088	99
TOTAL	**25318**	**5.305**	**8.336**	**6.539**	**1.518**	**0.016**	**8.073**	**5.161**	**2.324**	**0.588**	**98.1**

Tabla 8.36
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2029)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind
	mill m3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_TUR_01	1.8	0.024	0.043	0.009	0.060	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_CAL_01	1	0.000	0.880	0.008	0.837	0.052		0.052	0.000	0.000	0.000
AC_TUR_02	2	0.093	0.053	0.004	0.149	0.001		0.000	0.001	0.000	0.000
AC_TUR_03	1.6	0.037	0.050	0.011	0.095	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_01	0.2	0.029	0.010	0.027	0.064	0.002		0.000	0.002	0.000	0.000
AC_EDE_02	0.7	0.050	0.013	0.062	0.119	0.006		0.001	0.006	0.000	0.000
AC_CLA_01	1	0.154	0.032	0.025	0.212	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
AC_PAI_01	1	0.045	0.004	0.045	0.089	0.005		0.000	0.005	0.000	0.000
AC_CLA_02	1.5	0.097	0.032	0.022	0.125	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_01	2.2	0.042	0.083	0.015	0.074	0.065		0.000	0.000	0.065	0.000
AC_ELQ_02	19	0.222	0.078	0.148	0.395	0.053		0.000	0.052	0.000	0.000
AC_ELQ_03	16.9	0.152	0.078	0.111	0.303	0.040	0.010	0.026	0.003	0.000	0.000
AC_ELQ_04	3.3	0.015	0.074	0.010	0.089	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
AC_ELQ_05	6.5	0.041	0.071	0.028	0.129	0.011	0.007	0.001	0.002	0.000	0.000
AC_ELQ_06	29.3	0.262	0.068	0.159	0.203	0.286	0.012	0.097	0.123	0.074	0.006
AC_ELQ_07	26.8	0.253	0.031	0.196	0.076	0.405	0.020	0.012	0.415	0.000	0.001
AC_ELQ_08	84.9	0.223	0.056	0.267	0.000	0.546	0.025	0.160	0.094	0.410	0.002
AC_GRA_01	8	0.053	0.000	0.122	0.148	0.028		0.028	0.001	0.000	0.000
AC_COS_01	6.3	0.000		0.015	0.246	0.082	0.006	0.029	0.001	0.045	0.000
AC_COS_02	8.2	0.177		0.089	0.226	0.066		0.035	0.001	0.010	0.004
AC_COS_03	43.5	0.390		0.161	0.528	0.042		0.014	0.002	0.018	0.009
AC_CUL_01	186	0.351	0.000	0.789	0.000	1.141	0.056	1.064	0.133	0.100	0.021
TOTAL	**451.7**	**2.712**	**1.655**	**2.324**	**4.164**	**2.885**	**0.189**	**1.518**	**0.845**	**0.722**	**0.043**

Tabla 8.37
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2029)

Canal	Q desmarque	Q captado	Q pérdida	Q entregado ZR	Q devolución	% Cumpl desmarque	% cumpl.desmarque/Cap.	Acciones	Capacidad	Desmarque máx. / Cap.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_TUR_01	0.143	0.162	0.024	0.074	0.063	112	100	305.4	0.435	142
CA_TUR_02	0.360	0.401	0.072	0.132	0.196	111	100	765.7	1.012	132
CA_TUR_03	0.223	0.250	0.040	0.085	0.126	112	100	474.4	0.667	141
CA_TUR_04	0.141	0.153	0.018	0.000	0.135	110	99	299.9	0.345	115
CA_EDE_01	0.101	0.098	0.029	0.069	0.000	98	98	547.3	0.660	121
CA_EDE_02	0.047	0.045	0.002	0.043	0.000	98	98	309.2	0.168	54
CA_EDE_03	0.333	0.320	0.048	0.253	0.019	98	98	2187.9	3.640	166
CA_COC_01	0.286	0.219	0.000	0.110	0.109	93	99	609.0	0.357	59
CA_COC_02	0.189	0.132	0.000	0.062	0.070	90	99	401.8	0.210	52
CA_CLA_01	0.535	0.594	0.154	0.125	0.316	111	99	1140.6	1.739	152
CA_CLA_02	0.161	0.118	0.016	0.096	0.006	89	100	344.2	0.172	50
CA_CLA_03	0.507	0.427	0.081	0.046	0.299	96	99	1081.4	0.675	62
CA_PAI_01		0.334	0.045	0.124	0.165		33		1.000	
CA_ELQ_01	0.102	0.083	0.020	0.062	0.000	95	100	216.6	0.126	58
CA_ELQ_02	0.234	0.169	0.016	0.152	0.000	90	100	498.1	0.249	50
CA_ELQ_03	0.073	0.058	0.013	0.030	0.015	94	100	155.4	0.093	60
CA_ELQ_04	0.463	0.380	0.048	0.324	0.007	96	100	987.7	0.602	61
CA_ELQ_05	0.996	0.838	0.143	0.319	0.376	97	100	2122.9	1.352	64
CA_ELQ_06	0.264	0.207	0.045	0.162	0.000	94	100	562.0	0.316	56
CA_ELQ_07	0.613	0.624	0.131	0.364	0.129	107	100	1307.9	1.211	93
CA_ELQ_08	0.047	0.049	0.015	0.026	0.008	105	100	101.0	0.063	62
CA_ELQ_09	0.240	0.270	0.034	0.211	0.025	111	100	520.6	0.361	69
CA_ELQ_10	0.016	0.018	0.006	0.012	0.000	112	100	34.6	0.047	136
CA_ELQ_11	0.175	0.177	0.027	0.150	0.000	101	100	379.5	0.212	56
CA_ELQ_12	0.323	0.355	0.113	0.242	0.000	108	98	702.4	0.469	67
CA_ELQ_13	0.281	0.312	0.085	0.140	0.087	110	98	609.4	0.417	68
CA_ELQ_14	0.135	0.143	0.025	0.106	0.013	105	99	294.4	0.177	60
CA_ELQ_15	0.889	1.000	0.193	0.533	0.274	110	98	1932.7	1.506	78
CA_ELQ_16	1.692	1.899	0.376	1.425	0.099	110	98	3677.0	4.000	109
CA_ELQ_17	0.160	0.180	0.068	0.077	0.035	110	98	348.3	0.701	201
CA_ELQ_18	0.181	0.172	0.048	0.124	0.000	96	98	392.0	0.200	51
CA_ELQ_19	0.269	0.252	0.051	0.172	0.029	94	98	583.5	0.292	50
CA_ELQ_20	0.276	0.292	0.111	0.181	0.000	105	98	599.1	0.370	62
CA_ELQ_21	0.571	0.642	0.193	0.333	0.116	110	98	1241.7	1.400	113
CA_ELQ_26		0.351	0.141	0.175	0.036		98		0.360	
TOTAL		11.724	2.431	6.539	2.753			3044	25.604	
								22689		

8.8.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 5

Lo que se observa respecto del escenario base (Futuro Base Ext 2), es que si bien no cambia el caudal captado en bocatoma, se reducen fuertemente las pérdidas (en unos 0,7 m3/s), con lo cual el caudal entregado a zonas de riego aumenta en 0,3 m3/s, lo que reduce directamente la demanda hacia los acuíferos.

También aumenta la devolución de los canales,

En este escenario se reducen significativamente las pérdidas desde canales, en unos 700 l/s. Ello impacta de forma diferente los diferentes sectores acuíferos y zonas de riego. Todas las zonas de riego mejoran, en mayor o menor medida, aumentando en total unos 300 l/s la entrega desde los canales a nivel de zona de riego. Esto significa, a su vez, que los acuíferos reciben menos agua por filtraciones desde canales, y más por ineficiencias de riego, al regarse con más agua. El efecto conjunto de ambos aspectos es negativo en el acuífero de Elqui Bajo, y positivo en el acuífero de Culebrón.

8.9 Conclusiones y recomendaciones cuenca del Elqui

8.9.1 Algunos resultados relevantes

- La cuenca presenta actualmente un total de 25.318 ha cultivadas, 29% de ellas sobre el embalse Puclaro y 71% bajo él. Bajo el embalse La Laguna se encuentra el 91% del área total cultivada, de modo que sólo la subcuenca del Claro, con 9% del área cultivada, no está regulada.

- Se estimó que el 56% de los cultivos corresponde a hortalizas, de las cuales el 98% se cultiva bajo el embalse Puclaro, y sólo el 2% sobre el embalse. Por otro lado, el 43% de los cultivos corresponde a frutales, de los cuales el 61% se encuentra sobre Puclaro, y el 39% bajo Puclaro.

- Con un 45% de su superficie tecnificada en lo referente al riego, esta cuenca se percibe como altamente tecnificada, en especial los sectores que se ubican sobre el embalse Puclaro. Los sectores menos tecnificados corresponden a los sectores hortaliceros, Elqui bajo Puclaro, Santa Gracia y también los cultivos frutales del valle de Cochiguaz.

- La cuenca total del Elqui tiene una demanda agrícola promedio neta a nivel raíz, de 4,18 m3/s, equivalentes a 132 millones de m3. A nivel de zona de riego, tomando en cuenta la ineficiencia delos métodos de riego, se requieren 6,55 m3/s.

- El caudal que efectivamente reciben las zonas de riego, totaliza 6,467 m3/s. De este caudal, 5,106 m3/s provienen de canales, 1,347 m3/s provienen de los acuíferos y 0,014 m3/s de la lluvia.

- Del total de caudal recibido, 4,127 m3/s llegan al nivel raíz, 1,866 m3/s percolan a los acuíferos, y 0,474 m3/s derraman, es decir, vuelven al sistema superficial.

- De este modo, las aguas no consumidas en los sectores altos vuelven al sistema, para ser entregadas nuevamente más abajo.

- El largo período de sequía ha exigido replantear algunos procesos y algunos parámetros en base a los cuales se describe y se modela la hidrología de la cuenca.

- Los valores observados de caudales y niveles en la cuenca se reproducen bien asumiendo que a contar de 2011 en adelante, se ha reducido el uso de agua en riego, ya sea por una reducción del área cultivada, como por la aplicación del riego deficitario.

- Bajo ese supuesto, la oferta que genera la cuenca es capaz de mantener el sistema de demandas razonablemente bien suplido, mostrando eso sí, algunos efectos fuertes de descenso de acuíferos en los sectores de Elqui Bajo, Santa Gracia y Culebrón.

- Los acuíferos Elqui 07 y 08, de Elqui Bajo, si bien estables hasta 2013, comienzan a insinuar una tendencia de descenso. Son los acuíferos donde se ubica gran parte de las extracciones de agua potable para La Serena, y la minera Teck. Hasta la actualidad no se registran grandes descensos.

- De acuerdo con las estimaciones que se pueden realizar hasta el momento, los acuíferos del río Elqui y afluentes totalizan un volumen (conservador) de unos 264millones de m3, y el de Pan de Azúcar, de unos 186 millones de m3. El Elqui bajo tiene unos 151 millones de m3, el sector costa, unos 58 millones de m3 y Elqui Alto, unos 38 millones de m3. Todos los restantes acuíferos son muy pequeños (menores o del orden de 1 millón de m3, hasta 2 millones de m3).

- Estos valores serán revisados una vez que se cuente con la información hidrogeológica que generará el estudio de Corfo.

- En la cuenca del Elqui hay 11425,5 l/s de derechos subterráneos constituidos, de los cuales 7442 l/s se estima que serían para riego, 1660 l/s están constituidos para agua potable, 1853 l/s para la minería y 433,6 l/s para fines industriales. Esta cantidad de derechos incluye 563 l/s entregados por concepto del artículo 4ºT, que se ubican dentro de las subcuencas aportantes pero fuera de los acuíferos modelados, para los cuales se ha asumido un porcentaje de uso efectivo.

- Para los acuíferos se ha estimado una recarga potencial y una recarga neta o efectiva. La recarga potencial está compuesta por todas las aguas disponibles para infiltrar, que son las pérdidas desde canales, las percolaciones desde zonas de riego y las percolaciones desde el cauce. La recarga neta es la parte que realmente logra infiltrar, la que en muchos acuíferos es nula, debido a que se encuentran llenos y sin uso.

- Los acuíferos de los ríos Turbio, Claro y Derecho, aunque están subutilizados, no representan un aporte significativo al sistema hídrico, por ser muy pequeños. Debieran mantenerse para suplir las demandas del agua potable rural, y constituir una reserva para épocas de sequía.

- El sector de Pan de Azúcar tiene suficientes derechos subterráneos, y también un acuífero suficientemente grande, como para suplir las falencias que deja el agua

superficial, en la situación normal. Sin embargo, en épocas de sequía, la recarga, que proviene fundamentalmente de los canales y el riego, es más escasa, se produce un desbalance, y comienzan a descender los niveles.

- Las salidas al mar desde la cuenca del Elqui no son despreciables. Abarcan tanto las salidas superficiales desde el río, como del estero Culebrón, como también las salidas subterráneas desde las vegas norte, centro y sur. En épocas normales, alcanzan un promedio de 4,6 m3/s. En épocas de sequía, como la actual, este promedio se reduce significativamente, llegando a 1 m3/s.

8.9.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios

En la Tabla 8.38 adjunta, se presentan los resultados más importantes de cada escenario, que muestran en cifras lo que se ha descrito en los acápites anteriores.

Tabla 8.38
Visión sinóptica resultados escenarios estudiados (m3/s)

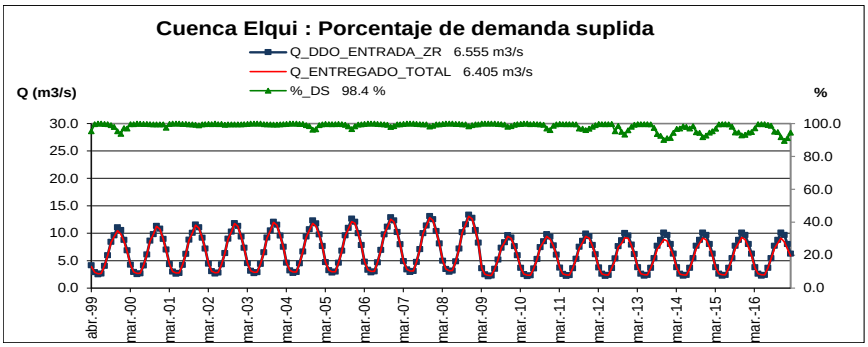
Cuenca Elqui							
Escenario	**Calibración**	**Futuro Base 3**	**Operación 1**	**Operación 2**	**Futuro Base Ext 2**	**Operación 4**	**Operación 5**
Período	1999-2014	2014-2017	2014-2017	2014-2017	2014-2029	2014-2029	2014-2029
Área de riego há	25318-17723	17723	17723	25318	25318	25318	25318
Caudal captado por canales	12.3	6.0	6.0	5.7	11.8	11.8	11.7
Caudal entrada ZR	5.4	3.4	3.4	3.5	6.2	6.2	6.5
Caudal demanda ZR	6.7	5.9	5.9	8.3	8.3	8.3	8.3
Caudal aporte acuíferos	1.1	2.1	2.4	4.2	1.7	1.7	1.5
Devolución canales	3.4	1.1	1.1	0.8	2.3	2.3	2.8
Afloramiento subt	5.5	1.8	1.7	1.3	4.7	4.7	4.2
Recarga Neta	2.1	2.2	2.5	3.2	3.1	3.1	2.9
Total extracción bombeo	2.3	3.8	4.2	5.8	3.4	3.4	3.3
% Demanda Suplida	98.9	96.0	99.3	93.6	96.5	96.4	98.1
Salidas al mar	4.6	1.0	1.0	0.9	3.2	3.1	3.1

Finalmente, en la Figura 8.94 siguiente se presenta en forma gráfica el porcentaje de demanda suplida a nivel de la cuenca completa, como serie de tiempo, para cada escenario estudiado, donde se aprecia visualmente todo lo anteriormente señalado. En especial, se aprecia la mejora que introduce el acceso a los pozos en el escenario futuro de demanda restringida, Futuro Operación 1, y el efecto de bombeo irrestricto, con agotamiento de algunos acuíferos, en el escenario Futuro Operación 2, de demanda agrícola al 100%.

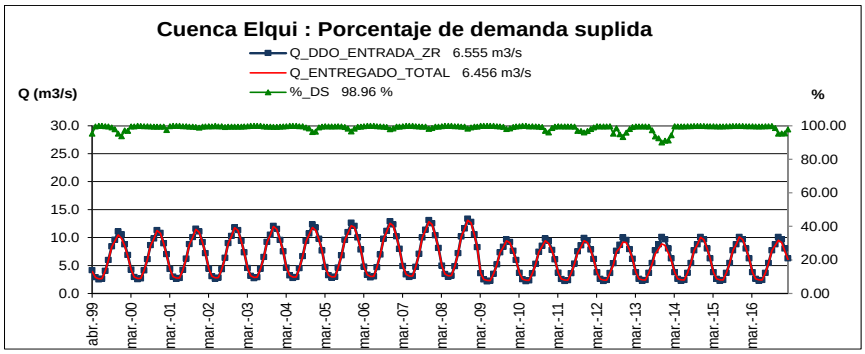
También se aprecia el efecto de una nueva sequía sobre la demanda 100%, en el escenario Futuro Base Ext 2, así como el efecto no significativo del embalse Estero Derecho en el escenario Futuro Operación 4, y finalmente el efecto positivo del mejoramiento de canales en el escenario Futuro Operación 5.

Figura 8.94
Porcentaje de demanda suplida en escenarios estudiados

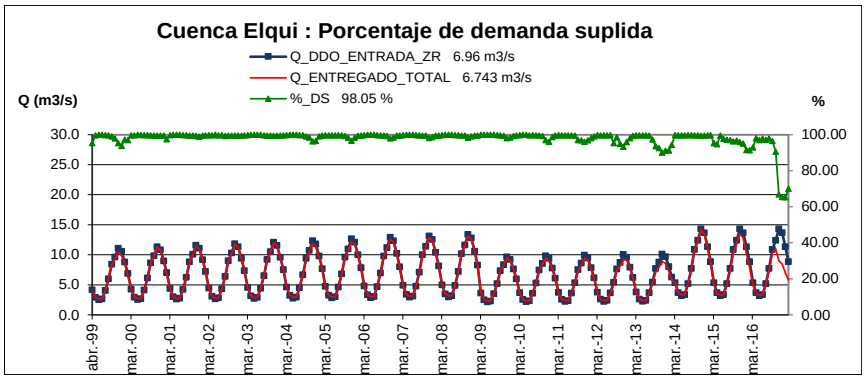
Calibración y Futuro Base 3



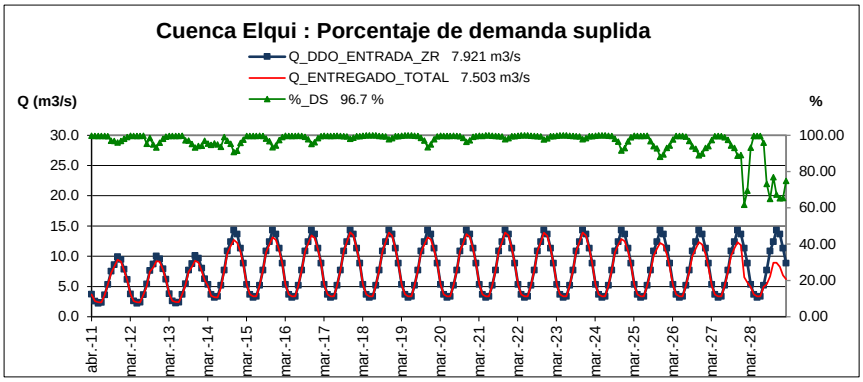
Futuro Operación 1



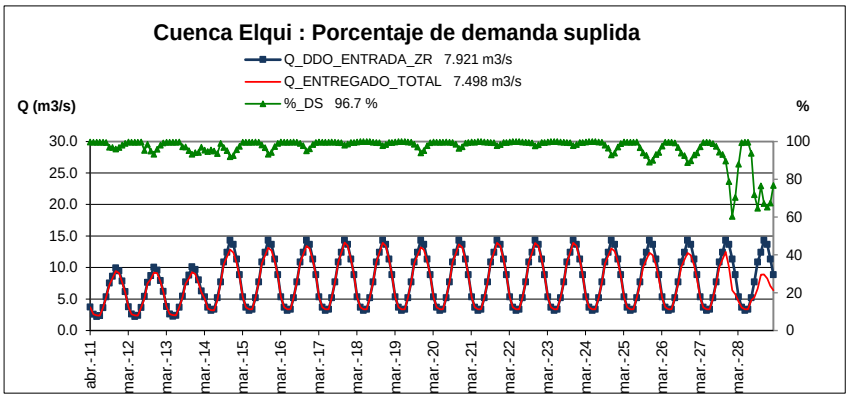
Futuro Operación 2



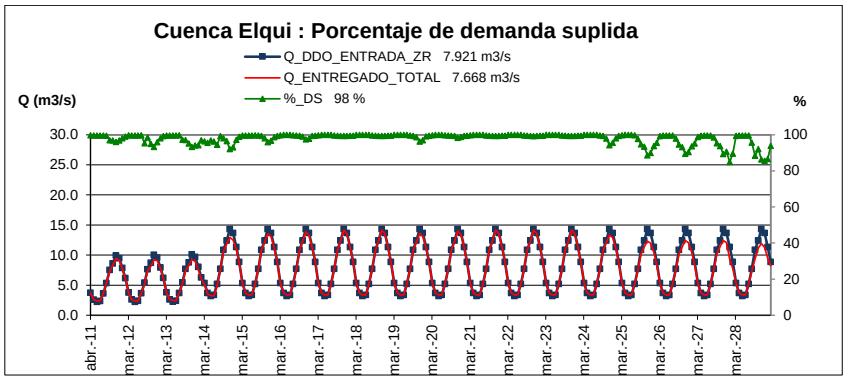
Futuro Base Ext 2



Futuro Operación 4



Futuro Operación 5



8.9.3 Recomendaciones a partir del análisis de los escenarios Futuro Base 3, Operación 1 y Operación 2

La calibración del modelo ha servido para entender el funcionamiento del sistema, en un tiempo hidrológico de años normales.

La validación del modelo sirvió para ajustar el modelo a una situación de sequía prolongada y bastante profunda, en la que hubo que introducir algunos parámetros de ajuste para que el modelo representara esta situación hidrológicamente diferente.

La diferencia proviene de que en el mediano plazo, con una sequía prolongada, cesan algunos flujos que alimentan la cuenca con un desfase de años.

De este modo, la validación sirvió para adaptar el modelo a una situación de sequía. La simulación delos escenarios Futuro Base 3, Operación 1 y Operación 2 se realizó dentro de este mismo entorno de sequía, prolongándola por otros tres años. Dichos tres escenarios constituyen el primer set de escenarios analizados en el presente estudio.

Los escenarios Operación 1 y 2, que difieren en cuanto a su demanda agrícola (70% y 100% respectivamente), mostraron que el sistema hídrico daría abasto para suplir una demanda reducida, incluso con 3 años más de sequía.

El escenario Operación 1 muestra que hay algunos sectores bien suplidos con aguas superficiales, y que por lo tanto requerirían poca agua adicional desde los acuíferos, si el acceso se liberara. Estos sectores son el Turbio, Claro, Elqui Alto y Costa.

Por otro lado, hay sectores como el Culebrón, que tienen gran cantidad de derechos subterráneos, con los que cubren su demanda, aunque esto ocurre claramente a costa del acuífero.

Los sectores que, accediendo a los acuíferos, presentarían mejora en las demandas suplidas, aunque con afección del acuífero subyacente, son Estero Derecho, Elqui Bajo y Santa Gracia.

Se concluye de lo observado en los escenarios Operación 1 y 2, que bajo la condición de que las áreas de riego mantuvieran un factor de reducción de 0,7, la cuenca sería capaz de suplir el recurso necesario durante la época de sequía, si ésta se prolongara otros tres años.

Liberar los acuíferos podría ser beneficioso en los sectores del Turbio, Derecho, Paihuano, Elqui Alto, Elqui sector Puclaro y Costa, porque las necesidades de recurso adicional en esos sectores no son muy altas, con lo que se esperaría que no se vieran muy afectados los acuíferos.

Los acuíferos de los ríos Turbio, Claro y Derecho, aunque están subutilizados, no representan un aporte significativo al sistema hídrico, por ser muy pequeños. Sin embargo, constituyen una reserva para suplir usos menores, como agua potable rural y otros, en épocas de sequía como la actual.

Los sectores más necesitados de recurso subterráneo son Santa Gracia, Elqui Bajo y Culebrón, justamente las zonas donde los acuíferos ya presentan tendencias de descenso con tres años más de sequía y la condición de derechos actuales, por lo que no sería conveniente admitir mayor acceso a los acuíferos en estos sectores.

En resumen, las principales recomendaciones que se pueden desprender del análisis realizado con los escenarios de Operación 1 y 2, son las siguientes:

En vista de la prolongación de la sequía, conviene mantener una reducción de la demanda agrícola, similar a la que ha operado en los últimos años, ya sea por reducción de área cultivada como por aplicación de riego deficitario. Un factor de 0,7 afectando el área máxima, entrega un área viable de mantener con tres años más de sequía.

Los acuíferos Culebrón y Elqui bajo Quebrada Marquesa son vulnerables en la condición actual, porque los derechos existentes permiten una explotación muy fuerte, que eventualmente podría llevar a una situación de sobreexplotación temporal en épocas de sequía. En estos acuíferos no se recomienda permitir el aumento de explotación en condiciones de sequía, pero sí, controlar las extracciones y niveles.

Los demás acuíferos, aunque pequeños, si bien no se recomienda constituir derechos permanentes, pueden aliviar en algo la escasez de una sequía como la actual.

El acuífero Costa, en ninguno de sus tres sectores norte, centro y sur, pareciera verse afectado aún por la sequía. Ello hace pensar que tal vez sería adecuado trasladar hacia este acuífero, en su sector sur (AC_COS_03), los derechos que la minera Teck hoy explota en el Elqui Bajo. El análisis de la viabilidad de esta propuesta podría realizarse con el modelo WEAP-Elqui, en un escenario futuro.

Es necesario señalar que todo el análisis precedente se basa en la hipótesis de que los acuíferos pueden ser explotados hasta un volumen muy cercano al volumen máximo, lo que probablemente no sea realista.

También es necesario confirmar los volúmenes de los acuíferos, en base al estudio Corfo actualmente en desarrollo.

8.9.4 Recomendaciones a partir de los escenarios Futuro Base Ext 2, Operación 4 y Operación 5

El segundo set de escenarios se simuló sobre un escenario de base con hidrología extendida, repetida desde el año 1999 hasta el año 2014.

Se analizó el efecto de un embalse de cabecera en el Estero Derecho. El análisis mostró que este embalse no genera efectos negativos sobre el sistema. Al mismo tiempo de favorecer al sector de riego del Estero Derecho, no genera efectos perceptibles sobre el sistema de aguas abajo. Lo más claro es que el volumen almacenado en el embalse Puclaro se reduce en 0,9 millones de m3 como promedio del período 2014-2029. A través de la regla de operación, que depende de este volumen, la afección que se genera en el desmarque es imperceptible. Por lo señalado, la implementación de este embalse es técnicamente justificable.

También se analizó el efecto del revestimiento de canales. Se observa que este hecho tiene efectos tanto positivos, sobre las zonas de riego y acuíferos a los que favorece directamente aumentando la demanda suplida, derrames y percolaciones, como negativos, en especial sobre los sectores acuíferos que dejan de percibir la recarga por concepto de pérdidas. En el primer caso se encuentra por ejemplo la zona de riego y acuífero del Culebrón, y en el segundo caso, el Elqui Bajo.

8.9.5 Regla de operación del sistema hídrico

Se considera un logro, obtenido en conjunto con la Junta de Vigilancia, el hecho de haber podido establecer una regla de operación para el sistema hídrico de la cuenca del Elqui. Con los años de estadística disponible en la Junta de Vigilancia, y la experiencia en el manejo del recurso, se ha podido entender y expresar matemáticamente la forma en que se establece el desmarque de la cuenca, en función de las características hidrológicas del período antecedente, y del estado del embalse Puclaro en agosto de cada año. Ello significa un avance técnico importante para la Junta de Vigilancia.

9. Modelo WEAP Limarí CRDP 2014

La segunda etapa del estudio se refiere al modelo de la cuenca del río Limarí. De acuerdo con lo ofrecido en la propuesta técnica, el trabajo realizado se inició a partir del modelo WEAP-Limarí en desarrollo por parte de la Universidad Católica-Universidad La Serena, el cual, a su vez, fue elaborado con apoyo en el modelo MAGIC-Limarí del estudio CAZALAC / RODHOS 2006.

El modelo WEAP-Limarí UC-ULS es hoy un modelo de investigación del Centro de Cambio Climático de la Universidad Católica de Chile, y también de la Universidad La Serena, que tiene diversos aspectos desarrollados en gran profundidad. Entre éstos se cuentan la hidrología de las subcuencas aportantes de cabecera en base a estadísticas de precipitación, evaporación y temperatura; la forma en que demanda agua la vegetación cultivada a través de un modelo de crecimiento de las plantas o PGM, y una interfaz Excel que permite efectuar simulaciones sin entrar al modelo WEAP mismo, sino que solamente desde Excel. Ha sido usado para estimar los aportes desde las subcuencas de cabecera en escenarios de cambio climático, para evaluar el efecto del embalse Valle Hermoso sobre el sistema de riego del embalse Cogotí, y para hacer un pronóstico de corto plazo para las dos últimas temporadas de riego en las cabeceras de los ríos Grande y Limarí. No obstante lo anterior, hasta la fecha el modelo no ha sido usado ni calibrado a nivel de la cuenca completa, incorporando todos los usos.

Para hacer del modelo WEAP-Limarí un modelo operativo, poderlo calibrar y posteriormente usar en la simulación de algunos escenarios de interés para la cuenca, se realizaron diversos ajustes. Estos ajustes se refirieron, en lo fundamental, a incorporar los elementos topológicos del mismo tipo que los incorporados en el modelo WEAP-Elqui, a modelar procesos en forma similar al modelo MAGIC-Limarí, y a entregar resultados en forma similar al WEAP-Elqui, de modo que se pueda evaluar la calidad de la calibración, y tener una visión completa sobre los resultados de cada escenario corrido.

9.1 Adaptación del modelo WEAP-Limarí UC

De acuerdo con lo señalado, el modelo WEAP-Limarí en la versión recibida de la UC, no estaba calibrado. Por ser un modelo de investigación, tiene algunos aspectos muy desarrollados, mientras que otros aún no estaban afinados, y el trabajo de calibración general aún no se había efectuado.

Para adaptar dicho modelo a los requerimientos de la presente consultoría, se realizaron los cambios que a continuación se detallan, y en base a los cuales se buscó obtener un modelo conceptualmente más sencillo, lógico, posible de calibrar y fácil de operar.

Es necesario señalar que uno de los aspectos de mayor importancia modelados en el modelo WEAP-Limarí UC, es la regla de operación del sistema, que es compleja y representa las posibilidades de cuentas de agua que se manejan a partir del volumen que

cada año puede entregar la Junta de Vigilancia, en base al volumen embalsado en el Sistema Paloma.

Otro aspecto de importancia que contiene este modelo, es la composición de cultivos por sector de riego, si bien es cierto que las áreas totales potenciales fueron afinadas en base a la actualización realizada en el estudio Plan Maestro de Gestión de Recursos Hídricos, CONIC_BF, 2013.

Para evaluar los cambios introducidos al modelo UC, se habilitó una planilla de calibración de caudales superficiales llamada *Nombre_Escenario*_CALIB_SUP_Gráficos.xls, mediante la cual se observó el efecto de cada uno de los cambios.

A continuación se presenta una reseña de todas las modificaciones que se fueron introduciendo al modelo, los que finalmente permitieron obtener un modelo calibrado, el que se llamó WEAP_Limarí_CRDP_2014.

9.1.1 Reemplazo de la hidrología de entrada

El modelo WEAP-Limarí UC genera su propia hidrología de caudales de entrada en las cabeceras de cuenca, y en todas las cuencas aportantes hacia aguas abajo, en base a datos de entrada que son estadísticas tanto de precipitaciones como de temperaturas y evaporación. Esta forma interna de obtener caudales de entrada, si bien tiene gran interés para evaluar los cambios de caudales atribuibles al Cambio Climático, hasta la fecha no ha sido lo suficientemente bien calibrada en todas las cuencas de entrada, lo que afecta directamente la calibración en los embalses y en las estaciones alteradas de aguas abajo.

Por lo señalado, la primera adaptación del modelo fue entregarle la estadística de caudales de entrada, observada por la DGA en las estaciones de cabecera, o generada a partir del modelo precipitación-escorrentía llamado MPL en cuencas pluviales no controladas, o a partir de un modelo simple de transposición en función de áreas y alturas, para cuencas nivales no controladas.

Todas las estadísticas se consideraron hasta marzo de 2014, para lo cual fue necesario extender en todos los nodos de entrada las estadísticas observadas y generadas sintéticamente en las cuencas no controladas, hasta marzo de 2011 en el estudio del Plan Maestro de 2013.

Para habilitar la entrada de caudales representativos de cuencas aportantes, en los puntos establecidos como nodos en el modelo MAGIC, fue necesario, primero, deshabilitar todos los aportes distribuidos no agrícolas que contenía el modelo WEAP-Limarí UC. Ello se logró dejando en cero el área de la cuenca aportante, cuando ésta no contenía una demanda agrícola, o dejando en cero todas las áreas no agrícolas de las cuencas aportantes, en caso de que sí contuvieran un área con demanda agrícola.

La estadística de entrada finalmente utilizada en el modelo WEAP-Limarí CRDP 2014, se encuentra en el archivo AN_Q.csv de la carpeta Datos, en el cual se reproducen todas las

estadísticas observadas de caudales de las cuencas aportantes de cabecera o laterales definidas en el modelo MAGIC.

9.1.2 Definición de acuíferos adicionales

El análisis de la planilla de calibración mostró que en diversos puntos de control (estaciones fluviométricas) el caudal superficial observado no mostraba algunos fuertes peaks que el modelo simulaba. Ello se atribuyó al efecto amortiguador que introducen los acuíferos, el cual se perdía al no estar ellos modelados. Por esa razón, se incluyeron varios acuíferos en la modelación, tomados del modelo MAGIC.

La correspondencia entre los acuíferos que traía el modelo WEAP Limarí UC, los que contenía el modelo MAGIC y los que finalmente contiene el modelo WEAP-Limarí CRDP 2014, se presentan en la Tabla 9.1 adjunta. Entre paréntesis se muestran los acuíferos caracterizados pero desactivados en el modelo WEAP.

Tabla 9.1
Acuíferos en las diferentes modelaciones

Nombre acuífero en modelo MAGIC	Código MAGIC	Código WEAP Limarí UC	Código WEAP Limarí CRDP
R Grande sobre R Mostazal	AC-01		
R Mostazal sobre R Grande	AC-02		AC_MOS_01
R Grande entre R Mostazal y R Rapel	AC-03		AC_GRA_01
Rapel primera seccion	AC-04		AC_RAP_01
Rapel segunda seccion	AC-05		AC_RAP_01
Rapel tercera seccion	AC-06		AC_RAP_01
R Grande entre R Rapel y R Ponio	AC-07		AC_GRA_02
R Ponio	AC-08		
R Grande entre R Ponio y Emb Paloma	AC-09		
Estero Pama	AC-10		AC_PAM_01
R Combarbala	AC-11		(AC_COM_01)
R Cogoti	AC-12		AC_COG_01
R Huatulame sobre BT Canal Cogoti	AC-13		
R Huatulame bajo BT Canal Cogoti	AC-14		AC_HUA_01
El Palqui	AC-15	(Palqui)	AC_PAL_01
R Huatulame ,Tome - Embalse Paloma	AC-16		
R Grande entre Emb Paloma y R Limari	AC-17	Grande	AC_GRA_03
Hurtado tercera seccion	AC-18		(AC_HUR_01)
Hurtado cuarta seccion	AC-19		(AC_HUR_02)
Hurtado quinta seccion sobre Angostura	AC-20		(AC_HUR_03)
Hurtado quinta seccion bajo Angostura	AC-21		AC_HUR_04

Embalse Recoleta	AC-22		
R Limari entre Emb Recoleta y R Grande	AC-23	(Hurtado)	AC_HUR_05
R Limari entre R Grande y Qda El Ingenio	AC-24	Ovalle	AC_LIM_01
Quebrada del Ingenio	AC-25		AC_ING_01
R Limari entre Qda Ingenio y Est Punitaqui	AC-26	Limarí	AC_LIM_02
Punitaqui Alto	AC-27		AC_PUN_01
Graneros	AC-28	Camarico	AC_TER_01
Camarico	AC-29	Camarico	AC_TER_01
La Chimba	AC-30		AC_TER_02

La caracterización de todos los acuíferos se tomó del modelo MAGIC, tanto en relación con su volumen y parámetros elásticos (ver Tabla 9.9 en punto 9.2.1), como en cuanto a los parámetros de interacción con el río.

9.1.3 Cambio de concepto para modelación de acuíferos

Los acuíferos en el modelo WEAP Limarí UC están modelados con la opción de calcular internamente el flujo de intercambio río-acuífero en función de las cotas de ambos. Se encontró que esta forma no es adecuada para representar la interacción río - acuífero, debido a que los flujos de intercambio son proporcionales al déficit de almacenamiento del acuífero cuando éste se vacía, lo que no necesariamente es el caso. A veces, y por tramos, el acuífero se descuelga del río. Por lo señalado, se implementó el método sencillo en que los flujos de intercambio se explicitan externamente, y el acuífero internamente sólo hace el balance. Los caudales de afloramiento son reintegrados hacia el río en el siguiente paso de tiempo.

De esta forma, se implementó una interacción entre los ríos y los acuíferos subyacentes, en función de un porcentaje de infiltración, el cual constituye una variable de calibración.

9.1.4 Cambio de método de cálculo de la demanda de riego

El modelo WEAP ofrece varias opciones para el cálculo de la demanda agrícola. En el modelo WEAP Limarí UC, se aplicó el método de cálculo de la demanda riego según humedad del suelo. Este método, sin embargo, no ha dado buenos resultados, por lo cual el equipo UC en conjunto con el SEI están investigando la aplicación del método PGM (Plant Growth Model) para la determinación de la demanda. Este método ser encuentra en fase de investigación.

Por lo señalado, y por haber dado buenos resultados tanto con el modelo MAGIC en las tres cuencas mayores de la Región, como en el modelo WEAP-Elqui CRDP 2014, se cambió el método de cálculo de la demanda agrícola, al método FAO, que es un método simplificado, pero lógico, y que entrega resultados razonables, coherentes y entendibles de la demanda.

9.1.5 Ajuste de áreas de riego

Comparando las áreas cultivadas del WEAP Limarí UC con las de MAGIC, actualizadas a 2011 en el estudio del Plan Maestro de Recursos Hídricos, 2013, se observó que había diferencias importantes. Las áreas de WEAP Limarí UC son mayores aguas arriba de los embalses, y menores aguas abajo de ellos. Se evaluó el efecto de modificar las áreas totales potenciales aguas arriba de los embalses, empleando los valores usados en MAGIC, lo cual dio buen resultado en todas las estaciones desde el punto de vista de la calibración. Por ello, finalmente se modificaron todas las áreas sobre embalses, dejando el modelo WEAP Limarí CRDP 2014 con las áreas totales potenciales del MAGIC 2011. Bajo los embalses se utilizaron directamente las áreas totales del WEAP Limarí UC, para caracterizar la superficie cultivada de los cultivos frutales y anuales.

9.1.6 Limitación de la entrega embalse Cogotí a 2,0 m3/s

Con todos los cambios señalados arriba, se logró un ajuste bastante razonable no sólo de las estaciones fluviométricas alteradas, sino también del volumen embalsado en los embalses Recoleta y Paloma. Solamente no se logró un buen ajuste en el embalse Cogotí. Observando los datos de salida simulada del embalse, se apreció que ellos exceden el caudal máximo de lo que entrega la Asociación de Canalistas del Embalse Cogotí (ACEC) en la realidad, con cuya estadística se cuenta hasta el año 2011. Aplicando un tope a la extracción que realiza el modelo en base a la regla de operación general, se observa que mejora bastante la calibración del embalse Cogotí.

9.1.7 Extracciones desde acuíferos según derechos

En el modelo WEAP Limarí UC, las extracciones desde los acuíferos (hay sólo cuatro acuíferos definidos) provienen de las demandas de las zonas de riego, existiendo una restricción global para las extracciones desde acuíferos, basada en los derechos. Demandas puntuales como las del agua potable, urbana y rural, no están modeladas. Por lo señalado, en el modelo WEAP Limarí CRDP 2014 se incluyeron las demandas puntuales de agua subterránea de acuerdo con el catastro de derechos constituidos a 2011. Las demandas de agua potable se modelan con un tope en los derechos y un caudal de extracción efectiva que se definió externamente, en base a la información de producción. En el caso de derechos industriales, se aplicó un factor de uso igual a 0,5, salvo en Pama, donde se aplicó 0,3. No hay derechos subterráneos mineros en esta cuenca. Para las demandas de riego se define como tope los derechos, y el modelo calcula la extracción efectiva. Las planillas correspondientes a cada uso se detallan en el punto 4.5.

9.1.8 Demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana

Esta demanda (ET) no está incluida en la demanda de las zonas cultivadas, pero existe y no es menor. Más aún, su presencia permanente incluso en épocas de sequía, muestra que se surte siempre, ya sea desde el río, ya del acuífero. Por ello, se ha hecho una estimación separada de la demanda de este tipo de vegetación, la que se especifica mes a mes, y se encuentra en la carpeta Datos con el nombre de ETP.csv.

9.1.9 Reordenamiento de prioridades de demanda en toda la cuenca

Se encontró algunas prioridades no lógicas en el sistema hídrico del río Hurtado. Se adecuaron las prioridades a lo largo de este río, quedando como se muestra más adelante, en el Capítulo 3, con lo que se lograron significativas mejoras en la calibración. En virtud de ello, se modificaron y adecuaron las prioridades de las demandas de riego en todas las subcuencas de la cuenca del Limarí, ordenándolas desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Para ello, en el reordenamiento se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- desde los acuíferos, todos los usos que sólo se surten de aguas subterráneas, tienen la misma prioridad 1 (ET, AP, Ind)
- Las ET y AP que se surten del río, tienen la primera prioridad para extraer el agua, y tienen una prioridad descendente de aguas arriba a aguas abajo.
- La siguiente prioridad la tienen las zonas de riego agrícola. Las zonas que están dentro de un mismo río (misma Junta de Vigilancia), tienen la misma prioridad.
- Bajo CASEP, las zonas de riego que se riegan con canales acogidos a la regla de operación, tienen la misma prioridad, y dentro de ellas, la subzona de cultivos frutales tiene mayor prioridad que la zona de cultivos anuales.
- Cada zona de riego agrícola se surte primero del agua superficial y luego del agua subterránea.

9.1.10 Ajustes de la topología

Se hizo una revisión y reordenamiento de la topología de derrames, percolaciones, y afloramientos desde las terrazas de Punitaqui hacia el estero Punitaqui y río Limarí. También se hizo una división del área de riego GrandeAMostazal (Grande antes junta Mostazal) en dos partes, una sobre la estación Grande en Cuyano y otra bajo la estación.

9.2 Datos de entrada modelo WEAP-Limarí

9.2.1 Topología

Lo primero que se hizo en el presente estudio, fue revisar la topología, porque el modelo WEAP-Limarí UC, si bien se desarrolló a partir del modelo MAGIC, desarrollado en 2006 por CAZALAC / RODHOS en el estudio "Aplicación de metodologías para la determinación de la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso: Región de Coquimbo", tiene una topología simplificada con respecto a él.

Es importante señalar que en la topología se mantuvo la nomenclatura de base que traía el modelo WEAP-Limarí UC, en lo que se refiere a zonas de riego y canales. Para los acuíferos se aplicó la misma lógica de nomenclatura que en el modelo WEAP-Elqui CRDP.
A continuación se detallan algunos aspectos relativos a los elementos topológicos del modelo.

- **Tramos de río**

Se revisó la hidrología completa de la cuenca, sobre una base SIG, verificando que estuvieran modelados los principales ríos de la cuenca, que son Pama, Combarbalá, Cogotí, Huatulame, Tascadero, Mostazal, Rapel, Ponio, Grande, Hurtado, Limarí y Punitaqui. Las cuencas de cabecera o intermedias aportantes están representadas por aportes de caudal que van generando nodos en las confluencias. Los tramos de río se generan automáticamente al insertar nodos de entrada aportes o de salida (extracciones) sobre el río.

- **Zona de riego en WEAP Limarí UC**

Las zonas de riego están definidas en el modelo WEAP Limarí UC, de la siguiente manera:

+ Aguas arriba de los embalses

Son parte de una subcuenca aportante o Catchment, dentro de la cual se definen diversos tipos de cobertura de suelo. Las zonas de riego corresponden a la cobertura "Uso Agrícola", y contienen los siguientes tipos de cultivos, en porcentajes variables en función del lugar:

- Chacra
- Pasto
- Frutales
- Vid Pisco
- Vid Exportación
- Hortalizas
- Cereales

Los catchments que tienen uso agrícola igual a cero, se desactivaron (ver acápite 3.1).

+ Aguas abajo de los embalses:

Las zonas agrícolas bajo embalses tienen dos partes, una anual y otra frutal. En la zona anual, los cultivos se agrupan de acuerdo con la siguiente clasificación:

- Hortalizas
- Cereales
- Praderas
- Tubérculos
- Barbechos

Los diferentes tipos de cultivos se distribuyen de acuerdo con un porcentaje, que no varía a lo largo del tiempo. Lo que varía es el área de barbecho, y en función de él, el área de los demás cultivos. Entre todos los cultivos anuales, aguas abajo de los embalses suman siempre 19.200 ha.

Las áreas frutales de cada sector varían en el tiempo, concretamente aumentan, en función de lo que han determinado los catastros frutales de CIREN, llegando el año 2011 a 22.980 hectáreas.

- **Zonas de riego en WEAP Limarí CRDP 2014**

En el WEAP Limarí CRDP, revisado, se ha considerado lo siguiente:

+ Aguas arriba de los embalses

Según se explica en el acápite 9.1.1, todos los sectores de riego con área de uso agrícola igual a cero, se desactivaron, debido a que no interesa la hidrología que generan. (Recordar que la hidrología se genera externamente en este nuevo modelo). En todos los sectores con uso agrícola diferente de cero, el uso agrícola quedó activo, mientras que los demás tipos de cobertura de suelo quedaron con un área igual a 0. Sobre las áreas de riego activas actúa la precipitación, generando una hidrología de entrada al modelo que se considera despreciable, debido al área en general muy pequeña correspondiente al uso agrícola, dentro de una subcuenca.

De acuerdo con lo expresado en el acápite 9.1.5, las áreas agrícolas determinadas en el modelo WEAP Limarí UC, se compararon con las áreas utilizadas por el modelo MAGIC, en el estudio del Plan Maestro 2011, y se observó que las áreas MAGIC eran en general menores. Debido a que la determinación de áreas para el estudio de 2011 fue muy acuciosa, y no se conoce la metodología exacta de determinación de áreas en el WEAP Limarí UC, se optó por modificar las áreas del WEAP-UC, y adaptarlas a las áreas cultivadas utilizadas con el MAGIC. Una excepción la constituye el área de riego del río Pama, para la cual se utilizó el área y composición de cultivos establecidos en el estudio de diseño del Embalse Valle Hermoso. En total, todas las zonas de riego agrícola sobre embalse suman 12.454 hectáreas, de las cuales 8534 corresponden a cultivos frutales y 3920 a cultivos anuales y pasto.

+ Aguas abajo de los embalses

Tanto en el MAGIC como en el WEAP-Elqui CRDP 2014, el concepto de áreas de riego se manejó en base a áreas potenciales máximas, que demandan agua, y que son suplidas en la medida de lo posible por las aguas asignadas al riego en un determinado año. En el WEAP Limarí UC, las áreas de cultivos anuales que demandan riego, varían año a año en función de un área variable que se definió como barbecho, que no demanda agua.

Para asimilar el concepto del WEAP-Limarí CRDP 2014 al concepto del WEAP-Elqui CRDP 2014, para los cultivos anuales se definió como 0 el porcentaje de área de barbecho (área no demandante de agua), y se redefinieron los porcentajes de los demás cultivos (anuales) de manera que sumaran 100%. De esta manera, toda el área identificada como de cultivos anuales, queda demandando agua, y el WEAP calcula el porcentaje de demanda efectivamente suplida. El área anual total que demanda agua bajo los embalses, año a año es de 19.200 ha.

En cuanto al área de frutales, ésta se ha mantenido de la misma composición y evolución que en el modelo WEAP Limarí UC. Esta área crece desde 7.090 ha en 1991/92, hasta 22.980 ha en 2011/12.

De esta forma se llega a áreas totales muy similares a las utilizadas en la modelación con MAGIC-Limarí, tanto para el año 2003/4 como para el año 2010/11. Dado que dicho modelo calibró muy bien, se estima que trabajar con las áreas de riego así redefinidas, es adecuado.

En la siguiente Tabla 9.2 se presentan todas las zonas de riego definidas para WEAP-Limarí CRDP 2014, el código correspondiente en la modelación MAGIC, y la descripción de su ubicación. En la penúltima columna se indica SI, cuando el riego se efectúa mediante un canal acogido a la regla de operación de la CASEP (Comunidad de Aguas del Sistema Embalse Paloma), y NO cuando el riego se efectúa captando en forma libre desde el río, en función de la demanda. En la última columna se indica si la zona de riego está subdividida en dos subzonas con diferente prioridad (cultivos Frutales y Anuales), o si todos los cultivos tienen una misma prioridad (global).

Se puede observar que aguas arriba de los embalses, las zonas de riego captan sus requerimientos desde canales no acogidos a la regla de CASEP, salvo el canal Palqui Maurat Semita, que está acogido a la regla, mientras que las zonas de riego aguas abajo de embalses generalmente se alimentan de canales sometidos a dicha regla, salvo excepciones que se alimentan desde el río mediante canales que captan sin restricción de la regla.

Por otro lado, se puede observar que en general, las zonas de riego bajo canales de CASEP tienen dos subzonas con diferente prioridad de demanda (ANU, FRU), mientras que las zonas de aguas arriba de los embalses, que se alimentan directamente del río sin regla, no distinguen prioridades entre los diversos tipos de cultivos, sino que riegan todos los cultivos con una misma prioridad global.

Tabla 9.2
Identificación y caracterización de zonas de riego

Código MAGIC	Nombre ZR_WEAP	Ubicación	CASEP	Sub zona
ZR-01	GrandeAMostazal Riego	Río Grande aguas arriba de Mostazal	no	Global
ZR-02	GrandeAMostazal Riego	Río Grande aguas arriba de Mostazal	no	Global
ZR-03	Mostazal Desembocadura Riego	Río Mostazal hasta Desembocadura	no	Global
ZR-04	GrandePSJuan Riego	Río Grande entre Mostazal y Puntilla San Juan	no	Global
ZR-05	Los Molles Alto 8	Río Los Molles antes río Rapel	no	Global
ZR-06	Rapel Riego	Río Rapel	no	Global
ZR-07	Rapel Riego	Río Rapel	no	Global

ZR-08	Rapel Riego	Río Rapel	no	Global
ZR-09	AfluentePalomaNorte Riego	Río Ponio	no	Global
ZR-10	AfluentePalomaNorte Riego	Río Ponio	no	Global
ZR-11	PamaIntermedio Riego	Río Pama entre Valle Hermoso y Embalse Cogotí	no	Global
ZR-12	Combarbala Riego	Río Combarbalá entre Ramadillas y junta Pama	no	Global
ZR-13	CogotiEmbalse Riego	Río Cogotí entre Fragüita y Embalse Cogotí	no	Global
ZR-14	HuatulameAntesBCC	Río Huatulame sobre Bocatoma Canal Cogotí	no	ANU, FRU
ZR-15	Huatulame	Huatulame bajo Bocatoma Canal Cogotí	no	ANU, FRU
ZR-16	PalomaPoniente	Poniente del embalse Paloma	si	ANU, FRU
ZR-17	Palqui, Cauchil	El Palqui	si	ANU, FRU
ZR-18	Matriz Cogoti	Río Grande bajo embalse Paloma, riego canal Cogotí	si	ANU, FRU
ZR-19	Camarico Hualli	Río Grande bajo embalse Paloma, riego canal Camarico	si	ANU, FRU
ZR-20	GrandeA.Paloma	Tamelcura	no	ANU, FRU
ZR-21	Matriz Paloma	Río Grande bajo embalse Paloma, riego matriz Paloma	si	ANU, FRU
ZR-22	HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	Río Hurtado entre San Agustín y Angostura	no	Global
ZR-23	HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	Río Hurtado entre San Agustín y Angostura	no	Global
ZR-24	HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	Río Hurtado entre San Agustín y Angostura	no	Global
ZR-25	HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	Río Hurtado entre San Agustín y Angostura	no	Global
ZR-26	HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	Río Hurtado entre San Agustín y Angostura	no	Global
ZR-27	HurtadoAntesRecoleta Riego	Río Hurtado entre Angostura y Embalse Recoleta	no	Global
ZR-28	Canal Villaseca (incluido en Talhuen)	Río Hurtado entre Embalse Recoleta y Ovalle	si	ANU, FRU
ZR-29	Hurtado Ovalle	Río Hurtado entre Embalse Recoleta y Ovalle	si	ANU, FRU
ZR-30	Matriz Cogoti Punitaqui	Terraza Sur regada con canal Cogotí	si	ANU, FRU
ZR-31	Der. Cogoti1	Terraza Sur sector nor-oriente	si	ANU, FRU
ZR-32	Der. Cogoti2	Terraza Sur sector sur-oriente	si	ANU, FRU
ZR-33	Camarico Clindo	Quebrada del Ingenio	si	ANU, FRU
ZR-34	Camarico Matriz	Camarico	si	ANU, FRU
ZR-35	Camarico Punitaqui	Punitaqui sur	si	ANU, FRU
ZR-36	Canal Punitaqui	Punitaqui sur	si	ANU, FRU

ZR-37	Tabali	Terraza Sur sector nor-poniente	si	ANU, FRU
ZR-38	Limari Ingenio	Quebrada del Ingenio	no	ANU, FRU
ZR-39	Talhuén	Talhuén	si	ANU, FRU
ZR-40	Villalon Ingenio	Villalón Q Ingenio	si	ANU, FRU
ZR-41	Limari bajo Ingenio	Limarí Bajo Q Ingenio	no	ANU, FRU
ZR-42	Canal Villalon	Quebrada Seca	si	ANU, FRU
ZR-43	Punitaqui Chalinga Riego	Punitaqui alto	no	Global
ZR-44	Punitaqui antes Limari	Punitaqui bajo	no	Global

En la Tabla 9.3 siguiente se presentan los patrones de cultivo, adoptados en el modelo UC, para los sectores sobre embalses, y mantenidos de la misma forma en el WEAP Limarí CRDP 2014.

Tabla 9.3
Patrón de cultivo de áreas sobre embalses

Zona de Riego	Chacras	Pasto	Frutales	VidesPisco	VidesExport	Hortalizas	Cereales	TOTAL
Hurtado	1.3	45.8	31.1	18.2	0	2.6	1	100
Rapel	0.3	7.6	77.2	11.3	0	3.4	0.2	100
Mostazal	0.3	7.6	77.2	11.3	0	3.4	0.2	100
Grande	0.3	7.6	77.2	11.3	0	3.4	0.2	100
Cogoti, Combarbalá	0.2	24.8	68.4	3.3	0	1.5	1.8	100
Pama actual	1.08	89.14	3.98	0.2	4	0.73	0.87	100
Punitaqui	1.6	33.5	32.3	29	0	2.4	1.2	100
Pama futuro	19.1	0	13.73	0	24.01	43.16	0	100

Nota: Para la zona de riego Pama se ha considerado la composición de cultivos actual y futura determinada en el Estudio de Diseño del Embalse Valle Hermoso.

En la Tabla 9.4 se presentan las áreas ocupadas por los diferentes cultivos, en la zona de aguas arriba de los embalses.

Tabla 9.4
Distribución de cultivos en zonas de riego sobre embalses, en hectáreas

Zona de Riego	AREA WEAP_ UC	AREA MAGIC_ 2011	AREA WEAP_Limarí_CRDP_ 2014	PATRON	Chacra	Pasto	Frutales	Vid Pisco	Vid Export	Hortalizas	Cereales
Hurtado Int. San Agustin Angostura	3880	1617	1617	Hurtado	21.0	740.6	502.9	294.3	0.0	42.0	16.2
Hurtado antes Emb. Recoleta	268	198	198	Hurtado	2.6	90.7	61.6	36.0	0.0	5.1	2.0
Los Molles Alto 8	264	88	88	Rapel	0.3	6.7	67.9	9.9	0.0	3.0	0.2
Rapel	2684	1907	1907	Rapel	5.7	144.9	1472.2	215.5	0.0	64.8	3.8
Mostazal antes desemb.	2595	1001	1001	Mostazal	3.0	76.1	772.8	113.1	0.0	34.0	2.0
Grande antes Mostazal	2355	996	996	Grande	3.0	75.7	768.9	112.5	0.0	33.9	2.0
Grande Puntilla San Juan	1157	1054	1054	Grande	3.2	80.1	813.7	119.1	0.0	35.8	2.1
Afluente Paloma Norte	836	939	939	Grande	2.8	71.4	724.9	106.1	0.0	31.9	1.9
Cogoti Embalse	1623	1399	1399	Cogoti	2.8	347.0	956.9	46.2	0.0	21.0	25.2
Combarbalá	963	1353	1353	Cogoti	2.7	335.5	925.5	44.6	0.0	20.3	24.4
Pama Intermedio	927	990	1500	Pama	16.2	1337.1	59.7	3.0	60.0	11.0	13.1
Punitaqui Chalinga	244	234	234	Punitaqui	3.7	78.4	75.6	67.9	0.0	5.6	2.8
Punitaqui antes Limarí	161	168	168	Punitaqui	2.7	56.3	54.3	48.7	0.0	4.0	2.0
TOTAL	**17957**	**11944**	**12454**		**69.7**	**3440.4**	**7256.8**	**1217.0**	**60.0**	**312.6**	**97.5**

Nota: el valor en rojo proviene del estudio de diseño del embalse Valle Hermoso.

En las Tablas 9.5 y 9.6 se presentan las áreas ocupadas por los diferentes cultivos, en la zona de aguas abajo de los embalses. Las zonas bajo embalses se dividen en una subzona ANU de cultivos anuales, y en una subzona FRU de cultivos frutales. Las áreas presentadas en estas tablas, consideradas en la modelación con WEAP, son prácticamente coincidentes con las áreas utilizadas en el modelo MAGIC, el año 2013.

En la Figura 9.1 se muestra la ubicación con nomenclatura MAGIC de todas las zonas de riego. Se usó esta nomenclatura porque es más sucinta y permite ser desplegada en un gráfico.

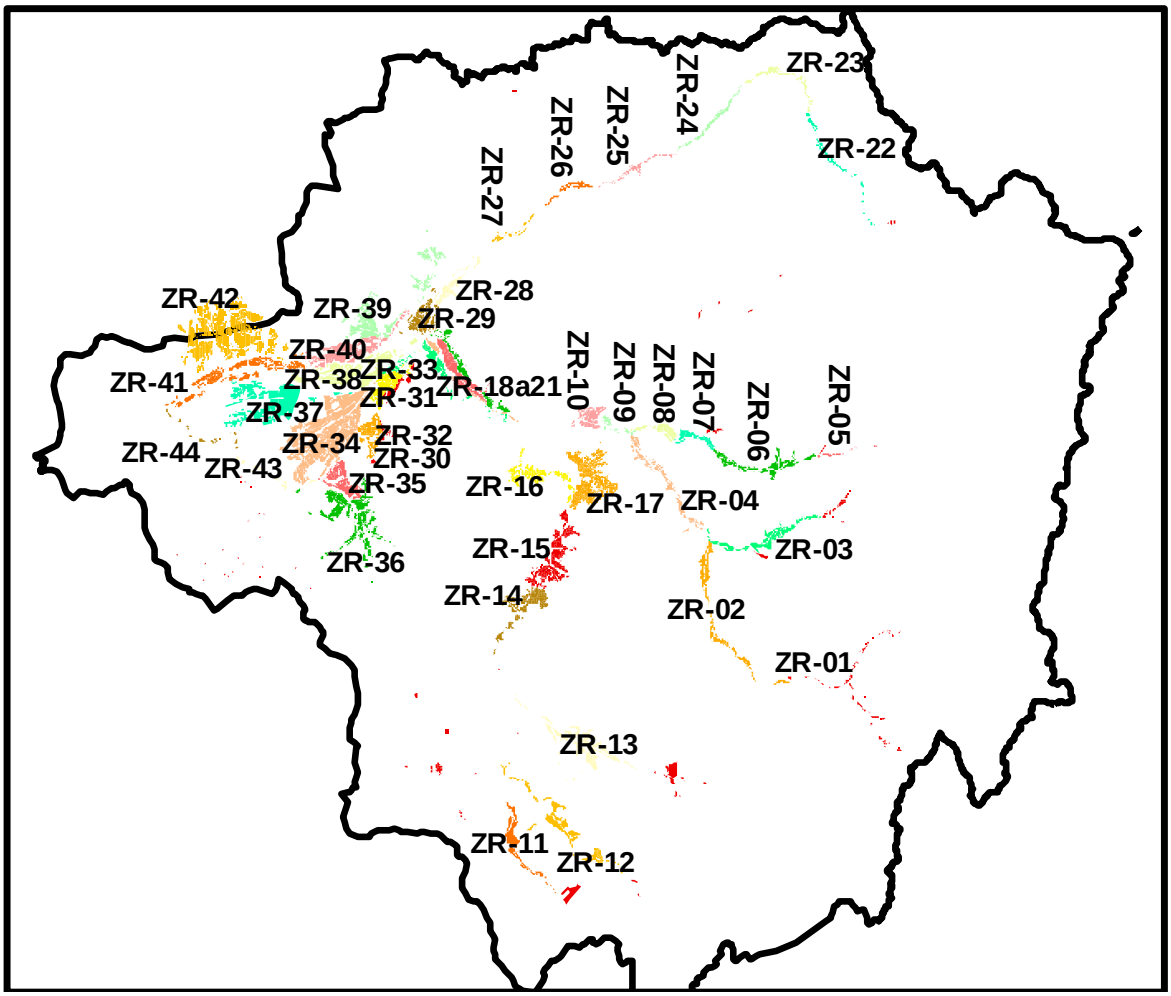
Tabla 9.5
Distribución de cultivos en zonas de riego ANU bajo embalses

ZONA DE RIEGO	Máximo potencial	% HORTALIZAS	HORTALIZAS	% CEREALES	CEREALES	% PRADERAS	PRADERAS	% TUBERCULOS	TUBERCULOS
		%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Camarico Clindo	1391.7	52.0	723.8	8.0	110.8	37.0	514.9	3.0	42.1
Camarico_Hualli	220.3	58.9	129.8	2.9	6.3	36.7	80.8	1.6	3.4
Cam Matriz	1758.4	55.8	981.1	10.2	179.1	29.3	515.2	4.7	82.9
Camarico Punitaqui	434.5	28.8	125.3	13.1	56.9	47.5	206.4	10.6	46.0
Canal Punitaqui	615.4	22.4	138.1	7.8	47.8	64.1	394.4	5.7	35.1
Cauchil	544.2	91.0	495.1	0.7	3.9	2.0	11.0	6.3	34.2
Der Cogoti 1	574.0	61.2	351.4	2.9	16.5	34.7	199.4	1.2	6.7
Der Cogoti 2	291.4	60.9	177.6	3.2	9.3	34.6	100.7	1.3	3.9
Grande A Paloma	473.1	73.9	349.5	1.3	6.3	23.3	110.3	1.5	7.0
Hurtado Ovalle	461.5	62.1	286.8	4.1	18.8	27.3	126.2	6.5	29.8
Limari abajo Ingenio	1680.2	52.8	887.7	10.1	170.2	24.0	403.9	13.0	218.3
Limari_Ingenio	1724.2	65.6	1130.8	1.3	22.3	31.4	541.7	1.7	29.4
M Cogoti	295.0	36.5	107.8	4.3	12.8	59.0	174.2	0.1	0.2
M Cogoti Punitaqui	203.1	61.2	124.3	2.9	5.8	34.7	70.5	1.2	2.4
M Paloma	203.4	78.4	159.5	0.9	1.9	18.3	37.2	2.4	4.8
Paloma Poniente	449.2	100.0	449.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Palqui	564.0	90.9	512.9	0.7	4.1	2.0	11.5	6.3	35.5
Canal Villalon	3034.1	56.5	1713.3	6.8	205.4	26.4	800.7	10.4	314.7
Huatulame	466.0	97.4	453.8	0.0	0.0	2.6	12.1	0.0	0.0
Huatulame antes BCO	193.5	77.0	149.0	4.4	8.5	18.1	35.1	0.4	0.8
Tabali	2146.2	44.5	955.3	12.1	259.9	38.8	833.6	4.5	97.4
Talhuen	332.5	59.4	197.4	6.9	23.0	22.8	75.9	10.9	36.2
Villalon Ingenio	1143.9	69.5	794.9	1.3	14.7	27.4	313.1	1.9	21.2
TOTAL	**19199.6**		**11394.3**		**1184.3**		**5568.9**		**1052.1**

Tabla 9.6
Distribución de cultivos en zonas de riego FRU bajo embalses, en hectáreas

ZONA DE RIEGO	VID DE MESA	CITRICOS	PRUNACEAS	NOGALES	OLIVOS	PALTOS	OTROS	VID DE PISCO	VID VINIFERA	TOTAL
Camarico Clindo	129.3	5.7	0.0	0.1	0.0	30.7	46.8	172.2	114.3	499.2
Camarico_Hualli	84.5	38.0	0.3	0.0	0.0	90.5	16.9	114.0	19.2	363.4
Cam Matriz	164.3	33.4	230.3	11.2	134.0	14.0	0.0	886.3	165.3	1638.7
Camarico Punitaqui	49.1	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	232.5	72.3	371.2
Canal Punitaqui	335.8	49.0	121.3	2.3	0.8	136.9	9.7	428.4	264.2	1348.3
Cauchil	441.9	18.6	0.0	0.0	0.4	5.6	0.4	0.0	0.4	467.3
Der Cogoti 1	1.1	44.4	0.2	12.7	0.8	39.0	0.0	178.2	37.7	314.1
Der Cogoti 2	166.4	59.5	1.5	0.0	0.7	241.4	65.4	203.6	42.9	781.4
Grande A Paloma	220.2	0.0	12.4	3.8	0.0	50.2	21.4	155.0	0.6	463.6
Hurtado Ovalle	136.9	161.0	4.0	7.6	0.3	385.7	148.9	464.7	30.1	1339.3
Limari abajo Ingenio	28.7	78.1	127.3	0.0	0.0	0.0	59.5	115.0	110.7	519.3
Limari_Ingenio	2.8	25.7	0.3	87.6	9.9	126.3	19.2	434.0	304.6	1010.5
M Cogoti	59.1	193.7	46.4	0.0	0.0	153.5	35.8	36.8	0.6	525.9
M Cogoti Punitaqui	35.3	34.2	2.7	15.8	0.0	126.1	8.4	105.6	22.4	350.5
M Paloma	55.0	30.3	1.0	0.0	0.0	300.3	28.6	158.3	0.6	574.2
Paloma Poniente	483.5	186.9	0.0	0.0	0.0	76.1	0.0	0.0	0.0	746.5
Palqui	733.3	317.5	0.0	0.0	0.0	58.7	53.2	0.0	0.6	1163.3
Canal Villalon	96.2	375.1	149.0	19.2	639.4	667.9	150.7	104.1	495.2	2696.7
Huatulame	911.8	54.1	0.0	0.0	0.0	83.6	13.1	0.0	0.0	1062.7
Huatulame antes BCC	711.5	14.4	0.3	0.2	0.3	2.0	0.0	0.0	0.0	728.8
Tabali	100.6	145.1	510.2	0.0	962.9	198.4	36.2	232.7	283.8	2470.0
Talhuen	312.5	49.1	3.0	12.1	427.4	657.8	7.4	482.8	201.8	2154.0
Villalon Ingenio	56.3	111.8	114.3	18.8	0.7	307.7	162.1	317.1	301.1	1390.0
TOTAL	**5316.4**	**2042.8**	**1324.5**	**191.3**	**2177.7**	**3752.4**	**883.9**	**4821.4**	**2468.5**	**22979.9**

Figura 9.1
Ubicación de zonas de riego modeladas cuenca Limarí

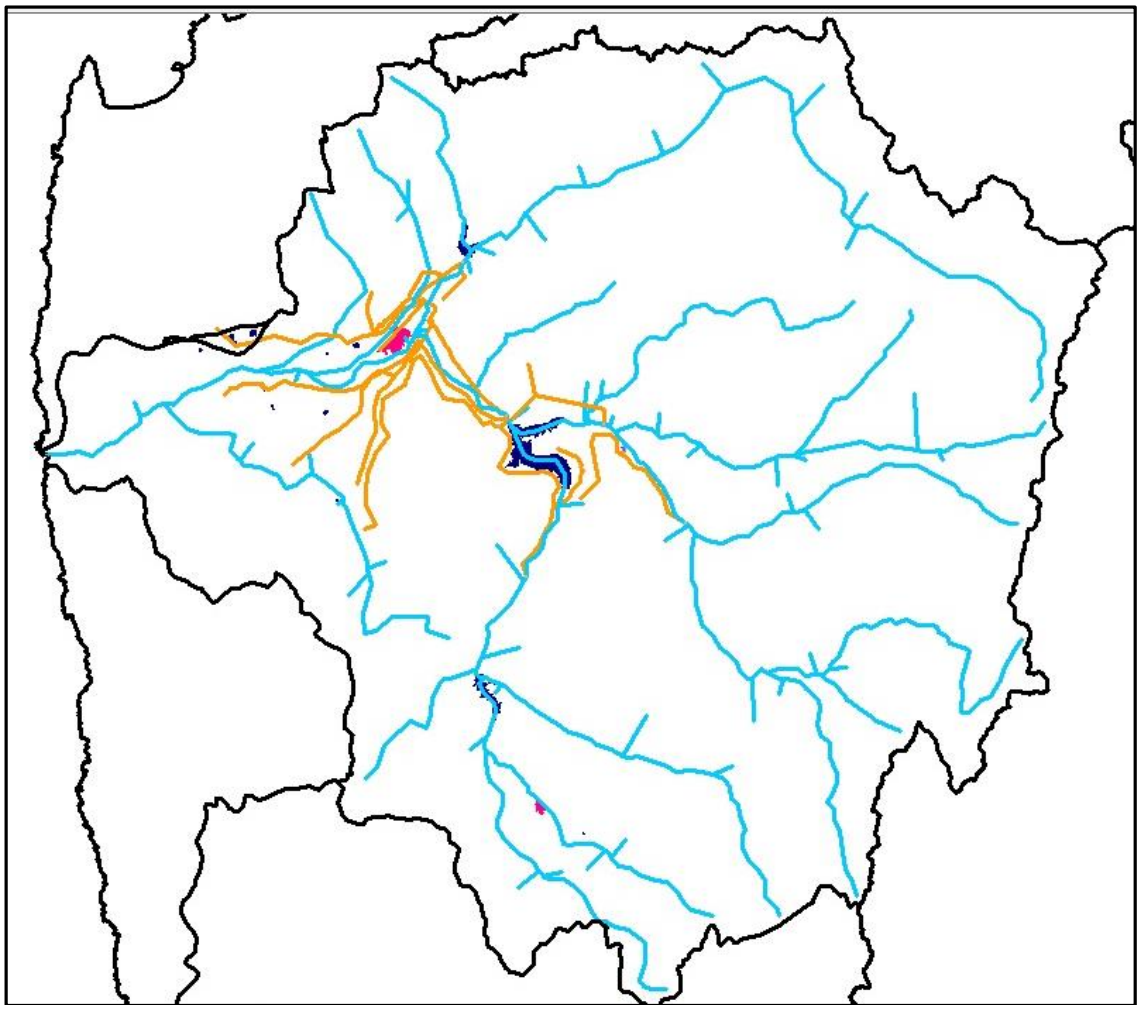


- **Canales**

En el modelo WEAP Limarí UC, hay dos tipos de canales que alimentan zonas de riego. Por un lado, están los canales modelados como Diversions, que son los canales del Sistema Paloma, es decir, todos los canales cuya bocatoma tiene una restricción relacionada con la regla de operación del sistema de embalses. Algunos de estos canales tienen derivados, los cuales también quedaron representados como Diversions en la modelación. El sistema de Diversions se mantuvo de la misma forma en el modelo WEAP Limarí CRDP 2014.

En la siguiente Figura 9.2 se muestra, en naranjo, la ubicación y desarrollo de los canales modelados como Diversions.

Figura 9.2
Canales modelados como Diversions



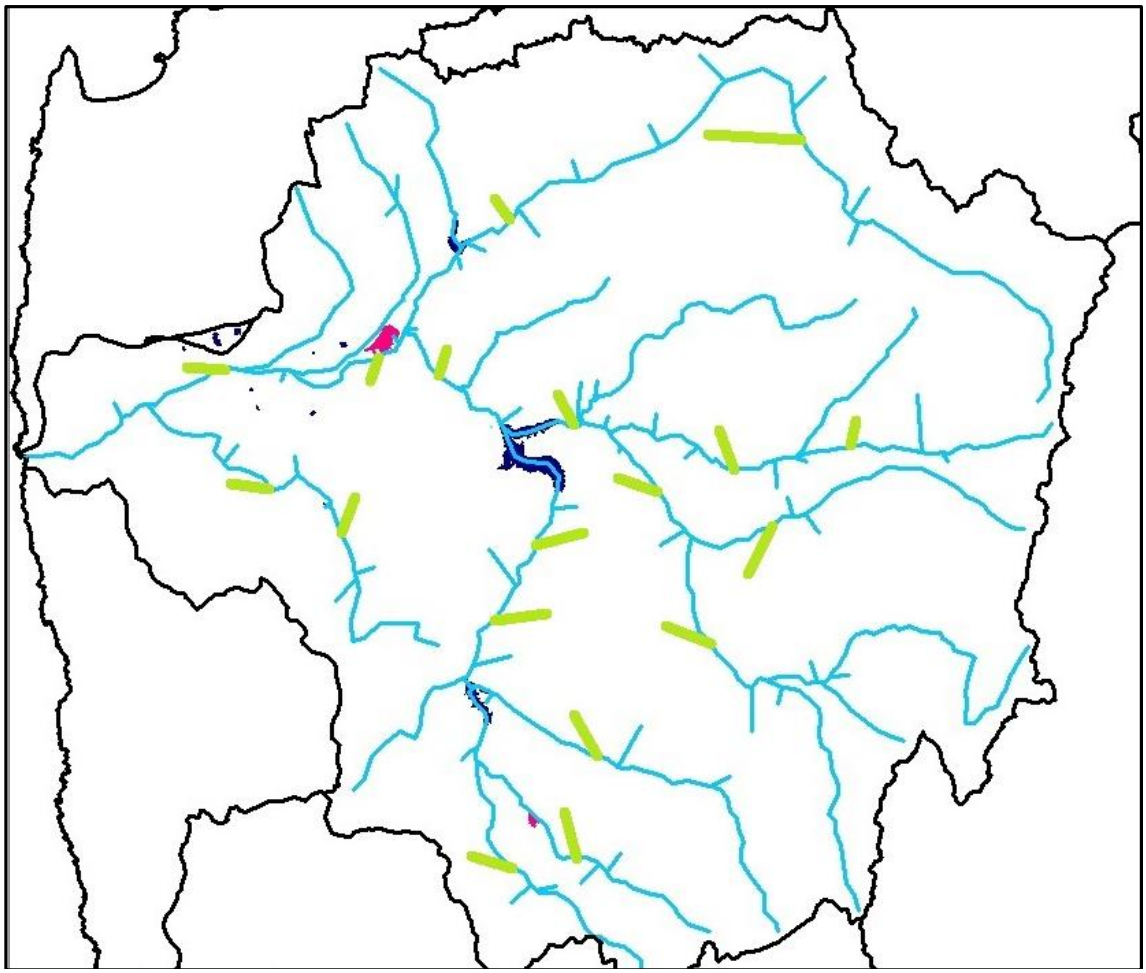
Por otro lado, todos los canales que no están sujetos a la regla de operación del sistema de embalses, están modelados como tomas libres desde el río, o Transmission Links. En esta condición se encuentran todos los canales que alimentan las zonas de riego sobre el sistema de embalses, debido a que los ríos en esa ubicación, en épocas normales, no tributan al sistema. Como excepción también hay algunas tomas libres, aguas abajo de los embalses:

- Huatulame antes BT canal Cogotí
- Huatulame bajo BT canal Cogotí (Huatulame)
- Grande bajo Paloma
- Limarí sobre Q. Ingenio (Limarí Ingenio)
- Limarí bajo Q. Ingenio .

Todas las tomas modeladas como Transmission Links, operan sin restricción de capacidad, pero con pérdidas evaporativas, las que se calibraron.

En la Figura 9.3 se muestran en verde los canales modelados como Transmission Links.

Figura 9.3
Canales modelados como Transmission Links



En la siguiente Tabla 9.7 se muestran todos los canales del tipo Diversion, con sus restricciones de capacidad, pérdidas por filtración y pérdidas evaporativas. Las pérdidas evaporativas deben entenderse como las pérdidas que se producen en todos los canales derivados y subderivados de cada canal matriz, es decir, en todo el sistema de canales.

Los canales del tipo Transmission Link no se presentan en la Tabla. Ellos no tienen ineficiencia de conducción y no tienen restricción de capacidad. Tienen pérdidas por evaporación de 20% los Transmission Links que riegan las zonas de Hurtado, Rapel, Mostazal, Grande Sobre Paloma, Punitaqui. No tienen pérdidas por evaporación los Transmission Links que riegan las zonas de Pama, Combarbalá, Cogotí y Grande bajo Embalse. Esto se explicaría en base a que este parámetro de evaporación en la modelación no tiene un estricto sentido físico, sino que engloba el efecto de muchos procesos. Como resultado, hay algunos sectores y sistemas de riego donde esta pérdida de recurso hídrico es más evidente que en otros.

Tabla 9.7
Canales y sus características de modelación en WEAP

CANAL	CAPACIDAD (m3/s)	PERDIDA 0 (%)	DESTINO PERD 0	PERDIDA 1 (%)	DESTINO PERD 1	PERDID A 2 (%)	DESTINO PERD 2	PERDIDA 3 (%)	DESTINO PERD 3	PERDIDA 4 (%)	DESTINO PERD 4	OBS
Palqui Maurat Semita	1	20	EVAP	10	Río Grande	5	AC_PAL_01					
Alimentador Recoleta	-	20	EVAP									Desactivado
Cogotí Punitaqui	3.7	20	EVAP	15	AC_HUA_01	15	AC_GRA_03	15	AC_TER_02	15	AC_TER_01	
Camarico	2.65	20	EVAP	6	AC_GRA_03	6	AC_TER_02	6	AC_TER_01			
Derivado Cauchil	0.8			10	AC_PAL_01							
Matriz Paloma	8.5	20	EVAP	7	AC_GRA_03							
Derivado Recoleta	4.5			7	AC_HUR_05							
Derivado Cogotí	4.5			16	AC_TER_02	16	AC_TER_01					
Sub-Derivado Tabalí	2.5			5	AC_TER_02							
Matriz Recoleta	7	20	EVAP	7	AC_HUR_05							
Villaseca	0.42			20	AC_HUR_05							Desactivado incluido en canal Talhuen
Talhuen	1.6			13	AC_HUR_05							
Tuqui	0.45			13	AC_LIM_01							
Villalón	7		SIN PERDIDA									

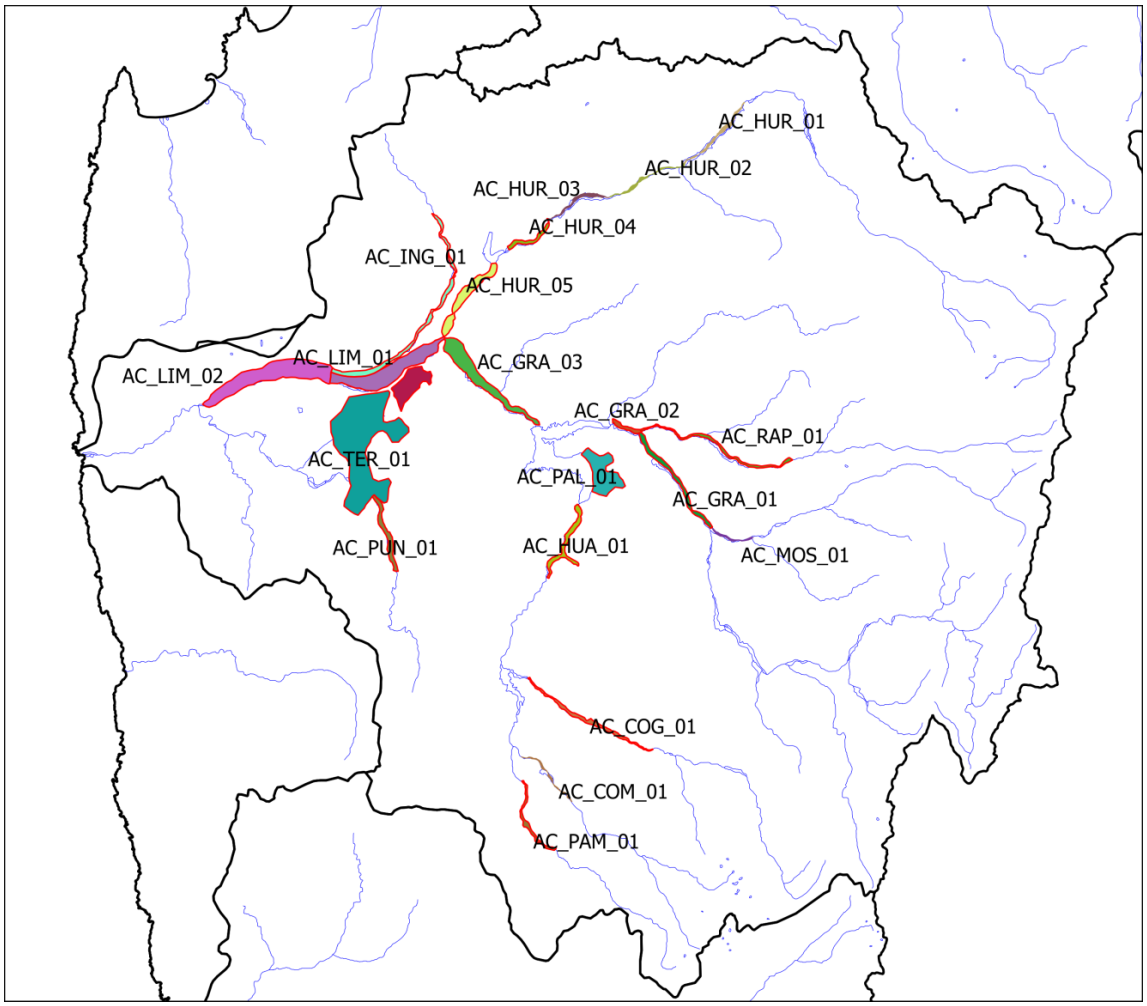
- **Embalses**

El modelo WEAP Limarí UC incluye tres embalses: Cogotí, Paloma y Recoleta, los cuales se describen dentro del modelo.

- **Acuíferos**

La definición de acuíferos se efectuó de acuerdo con lo señalado en el Capítulo 3, agregando todos los que fueron necesarios para la modelación. Los acuíferos definidos son los que se muestran en la Figura 9.4. Sólo se muestran los acuíferos activos en la modelación. Los acuíferos del río Hurtado Alto y río Combarbalá se dejaron como no activos debido a que son muy pequeños.

Figura 9.4
Acuíferos modelados con WEAP Limarí CRDP 2014, activos (con borde rojo)



- **Sitio de demanda puntual**

Los sitios de demanda puntual son sitios que consumen agua tanto superficial como subterránea. Se refieren a la demanda de agua por parte de la vegetación ripariana, agua potable, industria y minería.

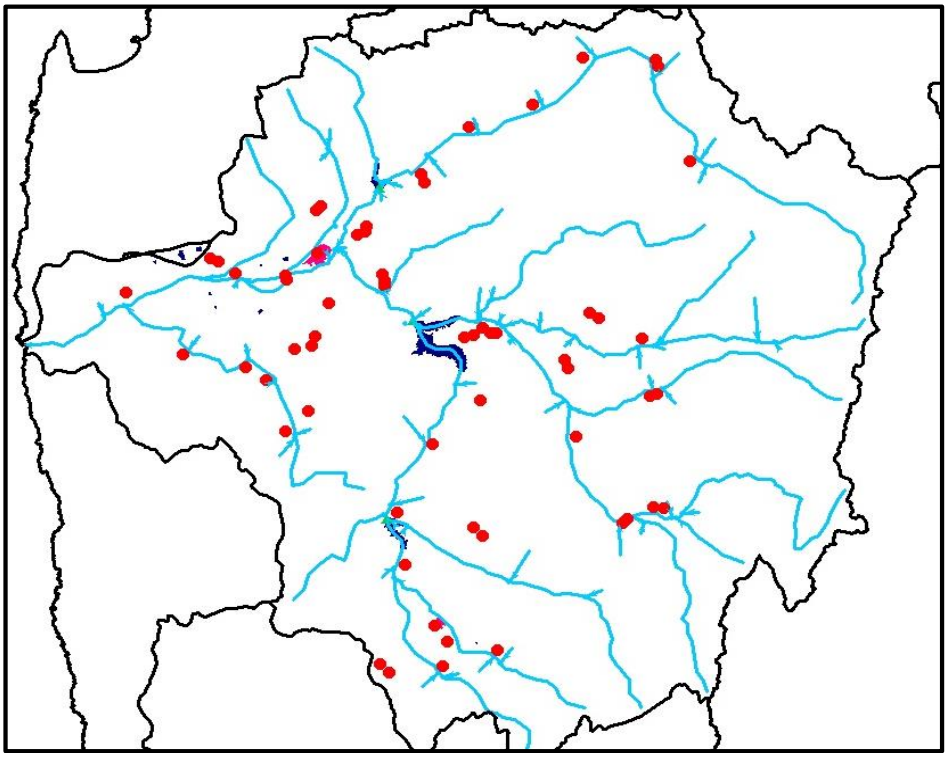
Los elementos considerados son los que se presentan en la Tabla 9.8 y están identificados con puntos rojos en la Figura 9.5.

Tabla 9.8
Captaciones puntuales de caudal

Fuente	Captación puntual	m3/s
AP_AC_COG_01	Extracción para agua potable desde acuífero Cogotí	0.053
AP_AC_COM_01	Extracción para agua potable desde acuífero Combarbalá	0.015
AP_AC_GRA_01	Extracción para agua potable desde acuífero Grande sobre Rapel	0.023
AP_AC_GRA_02	Extracción para agua potable desde acuífero Grande entre Rapel yPaloma	0.035
AP_AC_GRA_03	Extracción para agua potable desde acuífero Grande bajo Paloma	0.044
AP_AC_HUA_01	Extracción para agua potable desde acuífero Huatulame	0.044
AP_AC_HUR_04	Extracción para agua potable desde acuífero Hurtado Medio	0.008
AP_AC_HUR_05	Extracción para agua potable desde acuífero Hurtado entre Angostura y E.Recoleta	0.016
AP_AC_ING_01	Extracción para agua potable desde acuífero Qda. Ingenio	0.016
AP_AC_LIM_02	Extracción para agua potable desde acuífero Limarí bajo Qda. Ingenio	0.046
AP_AC_PAL_01	Extracción para agua potable desde acuífero Palqui	0.046
AP_AC_PUN_01	Extracción para agua potable desde acuífero Punitaqui Alto	0.012
AP_AC_RAP_01	Extracción para agua potable desde acuífero Rapel	0.072
AP_AC_TER_01	Extracción para agua potable desde acuífero Terrazas Sur	0.025
AP_COM01	Extracción para agua potable desde río Combarbalá	0.00081
AP_GRA01	Extracción para agua potable desde río Grande sobre Tascadero	0.00093
AP_GRA02	Extracción para agua potable desde río Grande sector Tascadero	0.00399
AP_HUA01	Extracción para agua potable desde río Huatulame	0.00714
AP_HUR01	Extracción para agua potable desde río Hurtado sector Breas	0.0009
AP_HUR02	Extracción para agua potable desde río Hurtado sector Hurtado	0.0015
AP_LIM01	Extracción para agua potable desde río Limarí entre Ovalle y Q.Ingenio	0.1798
AP_MOS01	Extracción para agua potable desde río Mostazal	0.0027
AP_PAM01	Extracción para agua potable desde río Pama Alto	0.0105
AP_PAM02	Extracción para agua potable desde río Pama Bajo	0.0005
AP_PUN01	Extracción para agua potable desde río Punitaqui Alto	0.001
AP_PUN02	Extracción para agua potable desde río Punitaqui Medio	0.001
AP_PUN03	Extracción para agua potable desde río Punitaqui Bajo	0.00217
ET_AC_COG_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Cogotí	0.0365
ET_AC_COM_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Combarbalá	0.0179
ET_AC_GRA_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Grande sobre Rapel	0.022
ET_AC_GRA_02	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Grande entre Rapel y Paloma	0.0658
ET_AC_GRA_03	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Grande bajo Paloma	0.0341
ET_AC_HUR_04	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Hurtado medio	0.02
ET_AC_HUR_05	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Hurtado entre Angostura y E.Recoleta	0.113
ET_AC_ING_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Q.Ingenio	0.0235
ET_AC_LIM_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Limarí entre Ovalle y Q.Ingenio	0.0554
ET_AC_LIM_02	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Limarí bajo Q.Ingenio	0.043

ET_AC_PAM_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Pama	0.01425
ET_AC_RAP_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Rapel	0.0605
ET_AC_TER_01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde acuífero Terrazas Sur	0.02883
ET_GRA01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Grande sobre Tascadero	0.01467
ET_GRA02	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Grande sector Tascadero	0.02633
ET_GRA03	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Grande entre Mostazal y Rapel	0.01325
ET_HUR01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Hurtado sector Hurtado	0.03158
ET_HUR02	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Hurtado sector Serón	0.03125
ET_HUR03	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Hurtado sector Pichasca	0.028
ET_HUR04	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Hurtado sector Samo Alto	0.0212
ET_MOS01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Mostazal	0.02325
ET_RAP01	Evapotranspiración vegetación ripariana desde río Rapel	0.02725
IND_AC_GRA_02	Extracción para uso industrial desde acuífero Grande entre Rapel y Paloma	0.002
IND_AC_GRA_03	Extracción para uso industrial desde acuífero Grande bajo Paloma	0.001
IND_AC_HUR_05	Extracción para uso industrial desde acuífero Hurtado entre Angostura y E.Recoleta	0.009
IND_AC_LIM_01	Extracción para uso industrial desde acuífero Limarí entre Ovalle y Q.Ingenio	0.001
IND_AC_PAL_01	Extracción para uso industrial desde acuífero Palqui	0.04
IND_AC_PAM_01	Extracción para uso industrial desde acuífero Pama	0.016
IND_AC_TER_01	Extracción para uso industrial desde acuífero Terrazas Sur	0.085
IND_AC_TER_02	Extracción para uso industrial desde acuífero Terrazas Norte	0.02
OTR_LIM01	Extracción de derechos eventuales río Limarí entre Ovalle y Q.Ingenio	0.2275
OTR_LIM02	Extracción de derechos eventuales río Limarí bajo Q.Ingenio	0.7828
OTR_PUN01	Extracción de derechos eventuales río Punitaqui Medio	0.00146
VAC_EMB_COGOTI	Vaciamiento excepcional embalse Cogotí	194 mill m3 en 2002

Figura 9.5
Sitios de demanda puntual



- **Infiltración (Infiltration)**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia del método de riego, cada zona de riego puede infiltrar recurso hacia el acuífero. Por esta razón, donde hay acuíferos, se ha definido una infiltración desde la zona de riego correspondiente.

- **Derrames (Runoff)**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia de riego, cada zona de riego puede generar derrames o flujos de retorno hacia el río. De esta forma, se define un flujo de retorno desde cada una de las zonas de riego, de retorno al río.

- **Enlace de transmisión de caudal (Transmission Link)**

Se definen estos enlaces para unir e indicar la dirección del flujo entre los siguientes elementos:

a) Desde acuíferos hacia los sitios de demanda puntual que abastecen, ya sean de agua potable como industriales o mineros (en esta cuenca no hay demandas de aguas subterráneas para la minería).
b) Desde acuíferos hacia las zonas de riego que tienen un pozo en dicho acuífero.

c) Desde tramos de río hacia demandas de riego, en las subcuencas que no tributan al sistema de embalses, o representando canales que no son restringidos en función de la regla de operación.
d) Desde los canales hacia las zonas de riego que abastecen.

- **Flujo de retorno (return flow)**

Se refiere a la devolución de un caudal no consumido en un sitio de demanda. Se definieron los siguientes flujos de retorno:

a) Desde embalse Cogotí, vaciamiento forzado que se devuelve al río
b) Desde los sitios de demanda con que se modela la tributación de los embalses nuevos, hacia el punto del río aguas abajo del embalse, donde se devuelve este caudal al río.

- **Punto de control de caudal**

Los puntos de control sirven para contrastar los resultados del modelo con cualquier tipo de dato con el que se cuente. De este modo, los datos de contraste pueden ser caudales observados en una estación fluviométrica, caudales calculados por fuera del modelo, u otro tipo de datos independientes de la modelación, con los que se desee contrastar los resultados en dicho punto.

Hay puntos de control de caudal en todas las estaciones fluviométricas. Estos puntos se usaron para la calibración.

- **Puntos de requerimiento de caudal**

Son puntos en los cuales se impone al modelo un determinado requerimiento de caudal. En este modelo, hay un punto de requerimiento de caudal en la pérdida del canal Palqui Maurat Semita hacia el río Grande, que se impone como el 10% del caudal pasante por el canal del mes anterior.

9.2.2 Key Assumptions

Los datos de entrada correspondientes a la topología con que se representó la cuenca, están todos contenidos en la sección Key Assumptions, la cual, además de admitir entrada directa de la información, puede alimentarse de datos externos, en este caso, datos contenidos en la carpeta Datos, generalmente en formato .csv.

Un aspecto central de los Key Assumptions es que incluye las reglas de operación del sistema hídrico, de embalses, canales o lo que se requiera. Las reglas son programadas por el modelador.

a) Reglas de operación Sistema Embalse Paloma

+ Macro Reglas

En la Cuenca del Limarí existen tres embalses de regulación: El Embalse Recoleta, Cogotí y Paloma que operan desde 1934,1939 y1968, respectivamente, con una capacidad de 100 Hm3, 150 Hm3 y 750 Hm3 respectivamente, totalizando una capacidad de almacenamiento máxima de 1.000 Hm3. Gracias al desarrollo de estas obras se crearon y fortalecieron organizaciones de usuarios que quedaron insertas dentro de una metodología operacional que hasta hoy en día se mantiene.

De acuerdo a esto, se han conformado 4 juntas de vigilancias y 5 asociaciones de regantes en un órgano colegiado denominado Comunidad de Aguas del Sistema Embalse Paloma (CASEP), que han mantenido esta metodología de distribución del recurso hídrico utilizando ciertos criterios que han sido elaborados de estudios que datan de la década de 1960.

Las Juntas de Vigilancia y asociaciones de regantes son las siguientes:

- Junta de Vigilancia del Río Grande y Limarí y sus Afluentes
- Junta de Vigilancia del Río Hurtado
- Junta de Vigilancia del Río Cogotí
- Junta de Vigilancia del Río Huatulame
- Asociación de Canalistas del Canal Camarico
- Asociación de Canalistas del Canal Palqui Maurat Semita
- Asociación de Canalistas del Embalse Recoleta
- Asociación de Canalistas del Embalse Cogotí
- Asociación de Canalistas del Canal Derivado Punitaqui

Los criterios que ellos aplican desde la entrada en vigencia del embalse Paloma, consideran la suma total de los volúmenes embalsados (al 1 de mayo y al 30 de septiembre) en cada uno de los embalses, generando con ello un volumen unificado.

Este volumen unificado, de acuerdo a su magnitud, se condiciona a una forma de distribución, y con ello a una categoría de dotación, surgiendo lo que se conoce como

- Dotación Libre, con un volumen total a distribuir igual al máximo posible de conducir
- Dotación Máxima, con un volumen a distribuir de 320 millones de m3
- Dotación Restringida, con un volumen total a distribuir de 50% del total embalsado entre los tres embalses y
- Falla total del Sistema, con un volumen total a distribuir igual a lo que aporta el río solamente, que corresponde a la JVRGYL.

Teniendo entonces definido el volumen de dotación y considerando que los embalses son unidades geográficamente separadas, se adoptó la estrategia de otorgar un 75% del volumen por Paloma, un 12,5% del volumen por Recoleta y un 12,5% del volumen por Cogotí. Tomando como ejemplo una dotación máxima (320 Hm3), correspondería distribuir 240 Hm3 por Paloma, 40 Hm3 por Recoleta y 40 Hm3 por Cogotí.

La regla se puede apreciar en las Figuras 9.6 y 9.7 adjuntas.

Figura 9.6
Base para macro regla Sistema Paloma

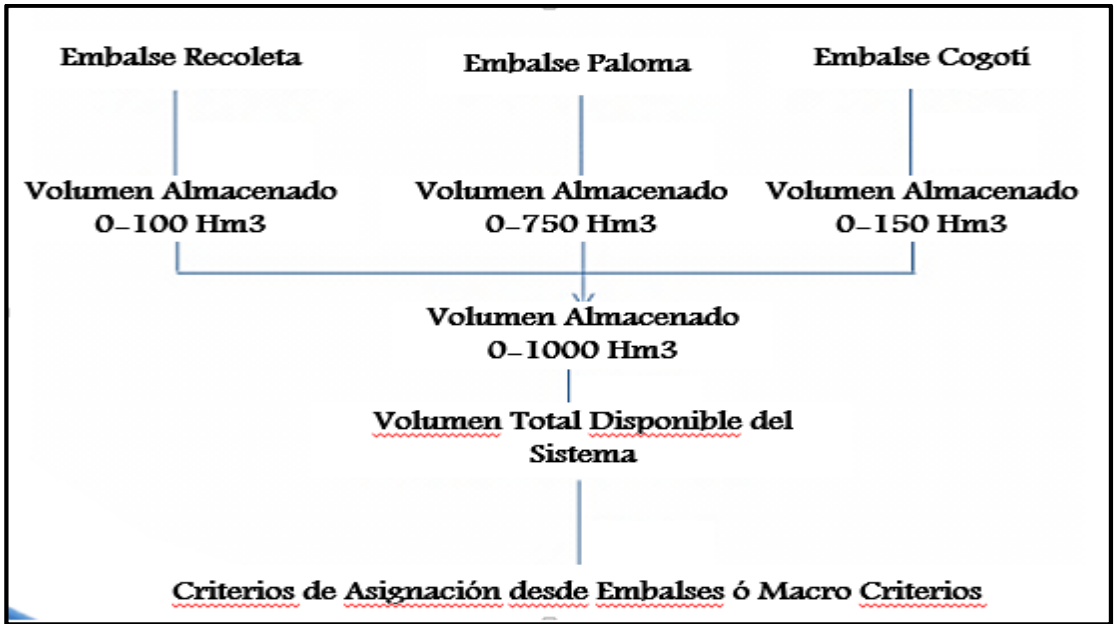
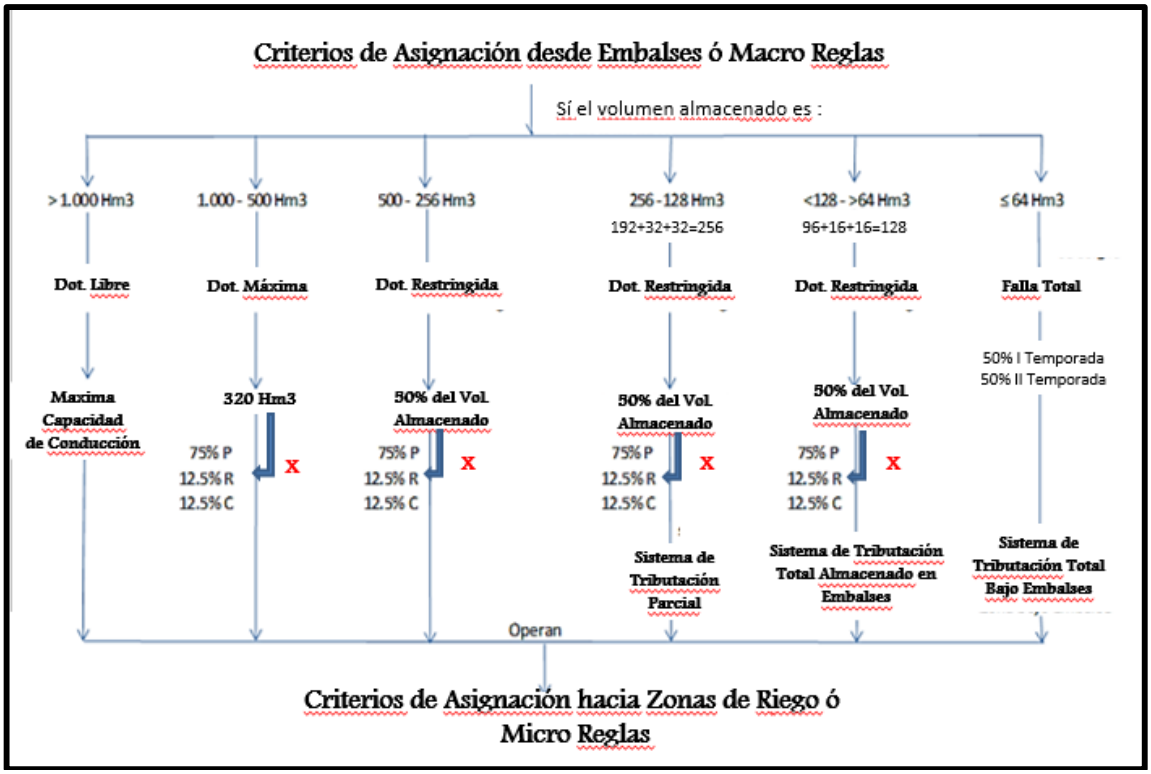


Figura 9.7
Macroregla Sistema Paloma



La distribución del volumen determinado a partir de la macroregla, entre las diferentes organizaciones de usuarios, se efectúa mediante dos canales matrices, como se explica a continuación:

i) Canal Matriz Paloma

Este canal sale del embalse Paloma, y conduce los derechos siguientes:

Dotación de ACER (Asoc. Canales Embalse Recoleta) en embalse Paloma. Dicha dotación se conduce por el canal matriz Paloma hasta el derivado Recoleta que se conecta con el canal Villalón. La forma en la que opera Recoleta es usando la dotación de ACER en Paloma para regar el área de Villalón. Esto equivale aproximadamente al 65 % de las acciones de Recoleta.

ACER cuenta con 22.500 acciones de las cuales el 65 % es abastecido desde Paloma por medio del canal matriz Paloma. El resto (35 %) se alimenta desde el Embalse Recoleta entregando agua al canal Talhuén, Villaseca y Tuquí. Se estima que en condiciones normales, las pérdidas de Recoleta en el canal matriz Paloma son en torno a un 10 %.

Dotación de ACEC (Asoc. Canales Embalse Cogotí) en embalse Paloma. Dicha dotación es conducida desde el río, bajo embalse Paloma hasta el sifón Los Peñones, donde se desvía la parte que le corresponde a Cogotí con aguas de Paloma. Se estima que esta parte del sistema se hace cargo de aproximadamente 7500 acciones de Cogotí.

ACEC tiene 12.000 acciones en total, de las cuales aproximadamente 7500 son atendidas desde Paloma por medio del canal matriz Paloma, y el resto (4.500 acc) son abastecidas desde el embalse Cogotí. Las acciones que se abastecen desde Cogotí sólo riegan hasta el sector aguas arriba de Ovalle.

Dotación de la ACDP (Asoc. Canal Derivado Punitaqui). Estas acciones se abastecen desde el embalse La Paloma exclusivamente. Dicha dotación se conduce por el canal matriz Paloma y se desvía en el sifón Los Peñones (igual que las de ACEC-Paloma). Esta organización cuenta con 1000 acciones.

Dotación de la ACCT (asoc. Canales Tamelcura). Esta organización reúne a los canales que fueron inundados por el embalse Paloma, por lo tanto sus acciones corresponden a una parte de la dotación del rio Limarí. Dicha dotación se conduce por el canal matriz Paloma y se usa en los nodos que riega el canal Matriz. En este caso, las acciones de Tamelcura recibirán la proporción que corresponda a la asignación que se hace a la JVRGLyA (Junta de Vigilancia).

Cuando la dotación es completa la ACCT recibe 560 acciones x 10.000 m3/temporada +70 acciones x 6.000 m3/temporada. Si la dotación fuera un 50 %, entonces recibirán la mitad de la dotación máxima.

ii) Canal Matriz Cogotí

Este canal se encuentra en la cuenca del río Huatulame, bajo el embalse Cogotí. Dicho canal es exclusivamente de la ACEC y se utiliza para conducir las aguas correspondientes a la dotación de la ACEC en el Embalse Cogotí. Las acciones totales de la ACEC son 12.000, pero aproximadamente 4500 de ellas se sirven desde el embalse Cogotí; las otras 7500 acc se abastecen desde el embalse La Paloma.
En consecuencia las acciones de ACEC-Cogotí se usan en el derivado Cauchil (en el sector El Palqui). El derivado Cauchil usa normalmente 800 acciones de Cogotí. Las restantes 3700 acc (4500 acc – 800 acc) se usan en los nodos que se abastecen del canal matriz Cogotí hasta la zona antes de Ovalle. Se debe recordar que aguas abajo del sifón Los Peñones (cerca de Ovalle) el abastecimiento de la zona de riego de la ACEC proviene del embalse Paloma (vía canal Matriz Paloma).

Las pérdidas del canal matriz Cogotí son muy altas y pueden ser del orden de 40 a 60 %.

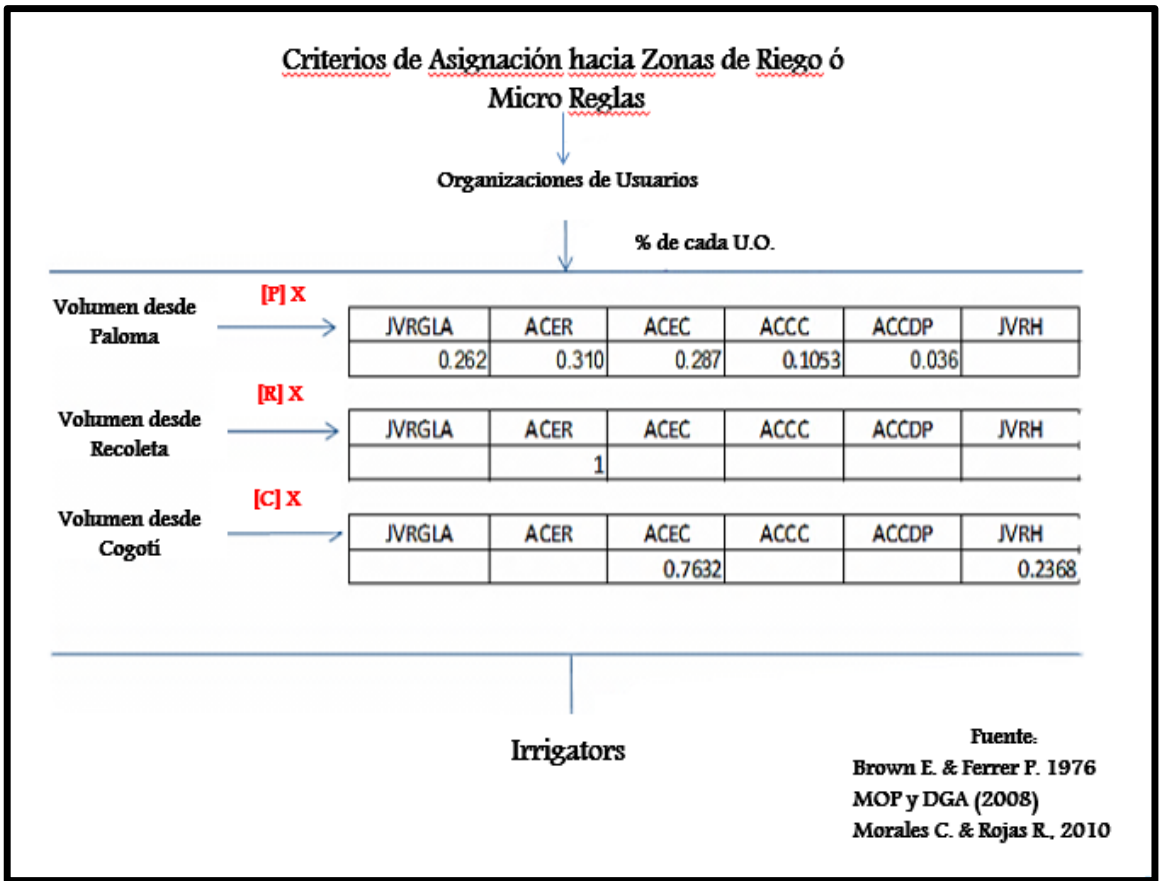
iii) Canal Palqui-Maurat-Semita

Este canal tenía los primeros derechos eventuales del río Grande, en una cantidad de 4000 l/s. Además, tiene en la actualidad 370 acciones permanentes del río. Cuando entró en operación el embalse Paloma, este canal negoció sus acciones eventuales a cambio de una participación de 714 acciones permanentes asociadas al mejoramiento que ofreció el embalse Paloma para los accionistas del río Grande. De este modo, hoy pertenecen al Sistema Paloma, y gozan de las acciones permanentes más las correspondientes al mejoramiento, con sus respectivos desmarques, mientras el sistema no entra en crisis (es decir, mientras el embalse Paloma entrega algún volumen). Cuando el sistema entra en crisis, cesan de captarse las acciones del mejoramiento. En esa condición, el canal adquiere volúmenes por temporadas en el mercado de aguas, en general desde canales de aguas arriba dentro del mismo rio Grande.

+ Micro Reglas

Las micro reglas de asignación del recurso se basan en la participación que tiene cada organización en cada embalse. Son las que se esquematizan en la siguiente Figura 9.8.

Figura 9.8
Microreglas Sistema Paloma



Gracias a este esquema de asignación es posible determinar, por medio de las acciones que posee cada organización de usuarios en cada embalse, el volumen asignado a cada una de ellas desde cada embalse y a nivel global. Esto se estima como el producto entre el volumen asignado en el sistema y el porcentaje de participación de cada organización de acuerdo a sus acciones.

De esta forma, de acuerdo al total de acciones de sus regantes, cada organización de usuarios conoce la dotación que le corresponde en válvulas de embalse y de acuerdo a las características propias de distribución, cuánto es lo que le corresponde a cada regante en compuerta predial.

Esta forma de distribución se ha programado en el modelo WEAP, a través de algoritmos que detallan la toma de decisiones, considerando criterios hídricos de la regla de operación, aplicados desde los embalses hasta las zonas de riego.

A continuación se presentan todos los datos, criterios y fórmulas que configuran la información cuantitativa de entrada del modelo WEAP Limarí.

Todos los parámetros que se encuentran en la sección Key Assumptions del WEAP, no descritos en este capítulo, no están activos en la versión WEAP-Limari CRDP 2014, porque se refieren tanto a los requerimientos del modelo hidrológico de generación de caudales, como a la aplicación del método PGM (Plant Growth Model) para la determinación de la demanda agrícola, ambas metodologías que no se aplicaron en la presente versión.

b) A_Acuíferos

Esta primera entrada de Key Assumptions contiene las características de los acuíferos modelados. En la siguiente Tabla 9.9 se encuentran los valores de volumen máximo, coeficiente de almacenamiento y área superficial de cada uno. La fuente de esta información es el modelo MAGIC del estudio del Plan Maestro de Recursos Hídricos, 2013, no obstante ello es necesario señalar que a la fecha actual está en ejecución un estudio hidrogeológico con exploración geofísica de la cuenca del Limarí, la cual entregará valores en base a los cuales sería conveniente revisar los datos del modelo WEAP-Limarí CRDP 2014.

Tabla 9.9
Acuíferos modelados y sus características

Código en WEAP	Código MAGIC	Volumen Máximo	Área superficial	Coeficiente de almacenamiento S	Activo
		millones m3	km2		
AC_COG_01	AC-12	4.7	7.0	0.056	sí
AC_COM_01	AC-11	0.3	2.3	0.044	no
AC_GRA_01	AC-01	13.9	8.7	0.080	sí
AC_GRA_02	AC-03	3.7	2.3	0.080	sí
AC_GRA_03	AC-09,10	62	23.0	0.060	sí
AC_ING_01	AC-25	38.1	15.4	0.071	sí
AC_HUA_01	AC-13,14	13.4	7.6	0.065	sí
AC_HUR_01	AC-18	6.2	4.4	0.140	no
AC_HUR_02	AC-19	4.9	3.5	0.140	no
AC_HUR_03	AC-20	2.7	3.6	0.088	no
AC_HUR_04	AC-21	2.9	3.6	0.088	sí
AC_HUR_05	AC-22	34.8	12.9	0.060	sí
AC_LIM_01	AC-24	97.2	31.2	0.048	sí
AC_LIM_02	Ac-26	126.5	40.5	0.048	sí
AC_MOS_01	AC-02	2.4	2.0	0.140	sí
AC_PAL_01	AC-15	19.1	20.0	0.037	sí
AC_PAM_01	AC-10	2.9	4.0	0.140	sí
AC_PUN_01	AC-27	4.8	6.8	0.140	sí
AC_RAP_01	AC-04,05,06	9.2	6.8	0.140	sí
AC_TER_01	AC-28,29	70.1	90.3	0.020	sí
AC_TER_02	AC-30	10.3	15.6	0.020	sí

c) A_Calib_Param

Se refiere a los parámetros de calibración. Ellos fueron introducidos en la revisión del WEAP para calibrar el modelo, y poder entregar el modelo WEAP Limarí CRDP 2014 en una versión calibrada. Los parámetros de calibración son los siguientes:

+ PERC_CAUCE: Percolación desde cauces hacia acuíferos

Se expresa en porcentaje, el cual varía de acuerdo con lo que se observa en la Tabla 9.10, donde se encuentran los porcentajes calibrados.

Tabla 9.10
Porcentaje de percolación de cauces a acuíferos

Acuífero receptor	% percolación
AC_COG_01	3
AC_COM_01	15
AC_GRA_01	4
AC_GRA_02	4
AC_GRA_03	0.5
AC_ING_01	1
AC_HUA_01	1
AC_HUR_01	1
AC_HUR_02	1
AC_HUR_03	1
AC_HUR_04	1
AC_HUR_05	1
AC_LIM_01	1
AC_LIM_02	1
AC_MOS_01	1
AC_PAL_01	1
AC_PAM_01	20
AC_PUN_01	15
AC_RAP_01	1
AC_TER_01	1
AC_TER_02	1

+ PERC_ZR: Percolación desde zonas de riego

Las pérdidas desde las zonas de riego corresponden a la ineficiencia de riego. Esta se reparte entre percolaciones profundas hacia los acuíferos subyacentes, y derrames hacia los cauces superficiales. El parámetro que se calibra es la percolación hacia el acuífero. El derrame se recalcula internamente.

La percolación se expresa en porcentaje, dependiendo de la ubicación de la zona de riego. En la Tabla 9.11 adjunta se entregan los porcentajes calibrados.

Tabla 9.11
Porcentaje de percolación desde zonas de riego

Zona de riego origen	% de percolación
Hurtado Ovalle	75
Talhuen	75
Villalon Ingenio	75
Canal Villalon	75
Limari bajo Ingenio	75
Palqui	75
Cauchil	75
Matriz Cogoti	70
Grande A. Paloma	70
Matriz Cogoti Punitaqui	75
Der. Cogoti 1	75
Der. Cogoti 2	85
Canal Punitaqui	75
Camarico Punitaqui	85
Camarico Matriz	85
Camarico Hualli	75
Camarico Lindo	85
Tabali	75
Limari Ingenio	75
Huatulame antes BBC	75
Huatulame	75
Paloma Poniente	75
Matriz Paloma	70
Pama	75
Combarbalá	75
Cogotí	75
Rapel	50
GrandePSDJuan	75
HurtadoAntesRecoleta	75

+ Evaporación desde canales

Este parámetro estaba definido en el WEAP Limarí UC, y fue redefinido y calibrado en el presente trabajo. Responde al hecho de que todo el recorrido del agua desde la fuente hasta su uso, no es completamente eficiente, ni se recuperan todas las pérdidas (de percolación y derrames) de vuelta en el sistema. El porcentaje de agua que se pierde desde el punto de vista del sistema completo, está representado en este parámetro, que se calibró como 20%.

d) A_CORR_AREA_AB_CASEP

Se refiere al factor de corrección de área que se aplicó a las áreas del modelo WEAP Limarí UC en el modelo WEAP Limarí CRDP 2014, para las zonas de riego bajo CASEP. Después de la adaptación de las áreas de acuerdo con lo señalado en el capítulo 9.2.1, este factor no se aplicó, por lo que su valor quedó en 1.

e) A_CORR_AREA_ARR_CASEP

El factor de corrección de área aguas arriba del sistema de embalses de la CASEP, fue un factor de reducción que se aplicó a las áreas del WEAP Limarí UC para volver a las áreas del MAGIC. Por esto, el factor es el cuociente entre ambos, como se aprecia en la Tabla 9.12 adjunta.

Tabla 9.12
Factor de corrección de áreas de riego sobre embalses

Zona de riego	Factor de corrección
HurtadoIntSA_Ang	1617/3880
HurtadoAntesRecoleta	198/268
LosMollesAlto8	88/264
Rapel	1907/2684
MostazalDes	1001/2595
GrandeAntesMostazal	996/2355
GrandePSJuan	1054/1157
AfluentePalomaNorte	939/836
CogotiEmb	1399/1623
Combarbala	1353/963
PamaInt	990/927
PunitaquiCh	234/244
PunitaquiAntesLimari	168/161

f) A_EFICIENCIA_RIEGO

De acuerdo con lo señalado en el capítulo 9.1.4, se redefinió el método de cálculo de la demanda de riego, en base a la metodología FAO. Para ello, fue necesario definir factores de eficiencia para cada método de riego empleado, los cuales fueron los siguientes:

Tabla 9.13
Factor de eficiencia según método de riego

Tipo de riego	Eficiencia
Tecnificado	0.9
No tecnificado	0.5
Tendido	0.3

g) A_HIDOLOGÍA_WEAP

Permite activar (1) o desactivar (0) los catchments que generan la hidrología de cabecera. En el presente estudio CRDP 2014, siempre se consideraron desactivados.

h) kc: Coeficiente de cultivo zonas de riego globales

Los coeficientes de cultivos (kc) que aparecen en los Key Assumptions se refieren a todos los tipos de vegetación que se encuentran en las subcuencas aportantes. Como se ha señalado antes, algunas de estas subcuencas tienen un porcentaje del suelo con uso agrícola. Dentro del uso agrícola hay cultivos de todo tipo, anuales y frutales.

Por lo tanto, bajo este parámetro se encuentra el listado completo de todos los valores de kc de los diferentes tipos de vegetación presente en los catchments. Para vegetación natural y superficies no cultivadas, kc tiene un valor constante. Para los cultivos agrícolas, los valores de kc son mensuales, y van precedidos por la glosa MonthlyValues para ingreso directo de datos. Los valores son los del modelo WEAP Limarí UC, y se presentan en la Tabla 9.14 adjunta.

Tabla 9.14
Valor de kc para cultivos en zonas de riego sobre embalses

Cultivo	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Chacras	0	0	0	0.156	0.421	0.749	0.884	0.893	0.892	0.746	0.457	0
Pasto	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6
Frutales	0.399	0.4	0.4	0.6	0.778	0.813	0.828	0.85	0.85	0.803	0.703	0.518
VidesPisco	0.1	0.05	0.05	0.25	0.402	0.611	0.784	0.85	0.85	0.753	0.675	0.5
VidesExport	0.0491	0.0497	0.0995	0.257	0.397	0.609	0.775	0.857	0.854	0.811	0.606	0.235
Hortalizas	0.302	0.354	0.421	0.583	0.693	0.75	0.855	0.748	0.688	0.586	0.429	0.304
Cereales	0	0.204	0.316	0.415	0.604	0.913	0.998	0	0	0	0	0
VidesVino	0.0987	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.6	0.4	0.3
Citricos	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8	0.753	0.7	0.5	0.4
Paltos	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	0.951	0.9	0.8	0.6	0.4
Olivos	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2
Berries	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3
Carozos	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	0.85	0.852	0.7	0.6	0.361	0.2	0.1

i) Parámetros Cultivos Anuales NO PGM

En esta sección se encuentran los valores mensuales de kc para todos los cultivos anuales de las zonas de riego atendidas por el sistema de embalses. Se encuentra además una gran cantidad de parámetros que se utilizan cuando se aplica el método de la humedad del suelo para determinar la demanda, lo que no es el caso para esta versión.

Los cultivos anuales están agrupados en 5 tipos. Los parámetros kc correspondientes a cada cultivo de cada tipo son los que se muestran en las Tablas adjuntas.

Tabla 9.15
Valor de kc para cultivos anuales bajo embalses

Hortalizas	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Alcachofa	0.9	0.95	1	1	0.95	0.9	0.8	0.7	0.5	0.5	0.7	0.8
Aji	0	0	0	0.2	0.2	0.4	0.5	0.75	1	1	1	0
Pepino dulce	0.5	0	0	0	0.4	0.5	1	1	1	0.9	0.8	0.7
Pimiento	0	0	0	0	0.4	0.6	0.75	0.95	1.1	1	0.8	0
Choclo	0	0	0	0	0.3	0.7	0.9	1.1	0.8	0.5	0	0
Haba	0.8	0.9	0.9	0.5	0	0	0	0	0	0.4	0.5	0.6
Zapallito italiano	0	0	0	0	0.4	0.75	0.9	0.967	0.8	0.7	0.328	0
Lechuga	0.6	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.75	0.7	0.65
Poroto verde	0	0	0	0	0	0.4	0.75	0.95	0.95	0	0	0
Tomate consumo fresco	0	0	0	0.4	0.7	0.8	1	1.1	1.1	0	0	0
Poroto granado	0	0	0	0	0	0.4	0.8	1.2	0.25	0	0	0
Pepino de ensalada	0	0	0	0	0.4	0.75	0.9	1	0.8	0.7	0	0
Melon	0	0	0	0	0.4	0.75	0.9	1	0.8	0.7	0	0
Flores	0.6	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.75	0.7	0.65
Cereales												
Trigo	0	0	0.2	0.4	0.7	1	1	0	0	0	0	0
Maiz	0	0	0	0.3	0.5	0.85	1.2	0.75	0.3	0	0	0
Praderas												
Alfalfa	0.6	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6
Tubérculos												
Papa	0.75	0	0.5	0.8	1.2	1	0.75	0	0.5	0.8	1.2	1

j) Parámetros Frutales NO PGM

En esta sección se encuentran los valores mensuales de kc para todos los cultivos frutales de las zonas de riego atendidas por el sistema de embalses. Se encuentra además una gran cantidad de parámetros que se utilizan cuando se aplica el método de la humedad del suelo para determinar la demanda, lo que no es el caso para esta versión. Los parámetros son los que se muestran en la Tabla 9.16 adjunta.

Tabla 9.16
Valor de kc para cultivos frutales bajo embalses

Frutales	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Vid de mesa	0	0	0.0995	0.257	0.4	0.7	0.8	0.9	0.95	0.811	0.606	0.235
Vid vinifera	0	0	0	0	0.2	0.3	0.4	0.7	0.8	0.6	0.4	0.3
Vid pisquera	0	0	0	0.1	0.35	0.611	0.8	0.85	0.9	0.753	0.675	0.4
Citricos	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6
Prunaceas	0	0	0.1	0.5	0.8	0.85	0.9	0.9	0.9	0.6	0.3	0.1
Nogales	0	0	0	0	0.15	0.6	0.83	0.91	1	1	0.95	0.63
Olivos	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3
Paltos	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6	0.9	0.9	1	1	0.8	0.6	0.4
Otros	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1	0.8	0.6	0.3

k) Patrón Cultivos

Patrón histórico de cultivos usado en zonas altas. Se construyó utilizando información de censo y de estudio de desarrollo de embalse Paloma. Se interpoló áreas entre las obtenidas para 1992 (estudio), 1997 (Censo) y 2007 (Censo).

La composición de cultivos de las zonas sobre embalse se muestra en la Tabla 9.4 para el año 2011. La evolución temporal de los cultivos se ejemplifica para las zonas Hurtado antes embalse Recoleta y Cogotí embalse, en las Figuras 9.9 y 9.10 adjuntas.

Figura 9.9
Evolución cultivos ZR Hurtado antes embalse Recoleta

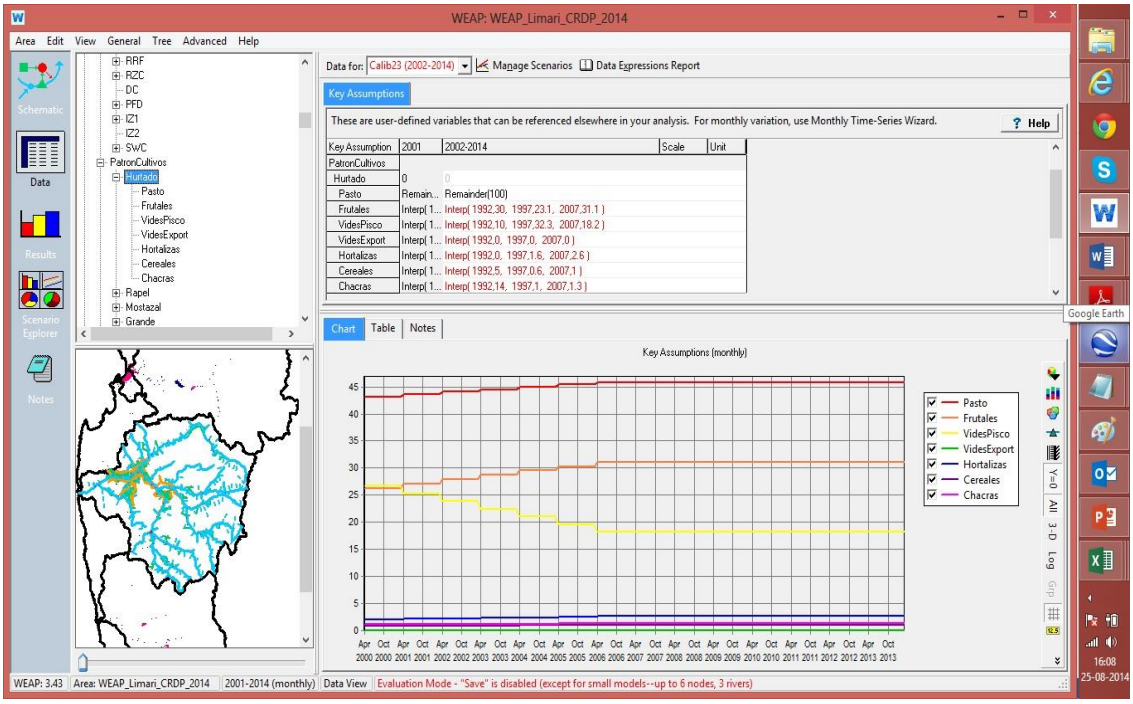
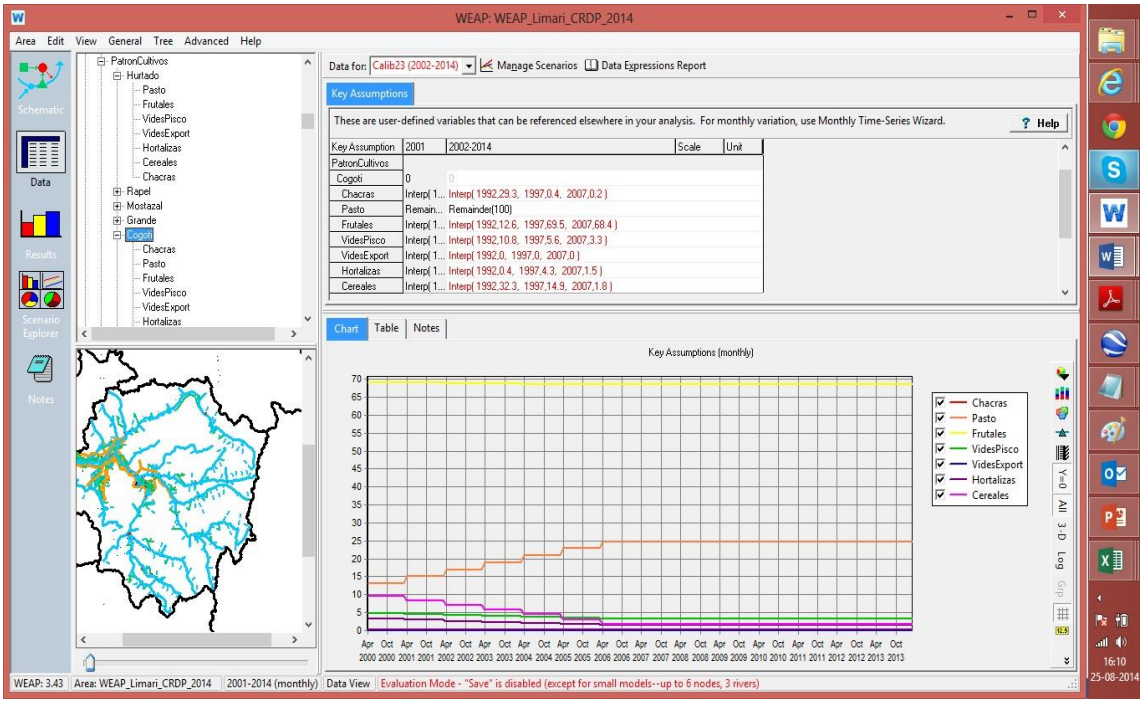


Figura 9.10
Evolución cultivos ZR Cogotí



9.2.3 Demand Sites and Catchments

Los catchments son las subcuencas aportantes de caudal, que pueden o no incluir un sector de riego agrícola. De acuerdo con lo señalado en el capítulo 9.1.1, en esta sección del modelo original se desactivaron todos los catchments que sólo cumplían una función de generación de caudal, y todas las áreas no agrícolas de los catchments que contenían un sector agrícola. De este modo, en la presente versión del WEAP sólo están activas las zonas de riego agrícola de los catchments que las contienen.

a) Catchments

Los catchments activos finalmente incluidos en esta sección, son los que se presentan en la Tabla 9.2 del capítulo 9.2.1 c). Sus características de área, porcentaje dedicado a cada cultivo y evolución en el tiempo, son los que están contenidos en la sección Patrón Cultivos, descrita en el punto 9.2.2 k).

b) Demand Sites

Por otro lado, en esta sección se encuentran todos los sitios de demanda puntual, que se agregaron al modelo WEAP Limarí UC, y que están detallados en la Tabla 9.8 del capítulo 9.2.1 g). Los valores de caudales mensuales de cada tipo de captación, se encuentran en el archivo señalado a continuación, ubicado en la carpeta Datos.

- Agua potable surtida desde acuíferos: POZOS_Q_AP.csv
- Agua potable desde el río (captación superficial): CS-Q.csv
- Evaporación vegetación de cauce desde acuíferos y ríos: ET_Q.csv
- Uso industrial desde acuíferos: POZOS_DDAA_I.csv
- Vaciamiento forzado embalse Cogotí: VAC_EMB_COGOTÍ.csv
- Entrega por tributación embalse Valle Hermoso: Q_TRIB_EMB_PAMA.csv
- Entrega por tributación embalse Rapel: Q_TRIB_EMB_RAPEL.csv

c) Asignación de prioridad de cada uno de los sitios de demanda

A cada una de las demandas se le asocia una prioridad con la que debe ser abastecida. De este modo, adquieren prioridad de abastecimiento los requerimientos de caudal por parte de los canales, AP, MIN, IND, los requerimientos de la vegetación ripariana ET, los embalses para distinguir la prioridad de llenado frente a la de entrega, y cada uno de los subsectores de riego globales, ANU y FRU, de acuerdo con su ubicación dentro del sistema, teniendo siempre una mayor prioridad la subzona FRU que la subzona ANU, y las zonas de riego frente a los embalses que las abastecen.

En general, las prioridades son mayores para las demandas que siempre se abastecen, sin reglas ni consideraciones, como la captación desde la vegetación ripariana, las captaciones de agua potable y las captaciones del tipo Transmission Link desde los ríos. El concepto de la asignación de prioridades se expuso en el acápite 9.1.9.

En la siguiente Tabla 9.17 se presentan las prioridades finalmente asignadas a los elementos del sistema.

Tabla 9.17
Asignación de prioridades a los sitios de demanda

Demand Sites and Catchments	Prioridad asignada
AfluenteCogotiSur	1
AfluentePalomaNorte Riego	15
Cogoti Alto 6	1
CogotiEmbalseRiego	2
Combarbala Intermedio Riego	2
Grande Alto 6	1
GrandeAMostazal Riego ab. GC	15
GrandeAMostazal Riego arr. GC	15
GrandePSJuan Riego	15
HurtadoAlto7	1
HurtadoAlto8	1
HurtadoAntesRecoleta Riego	8
HurtadoIntermedioSanAgustin_Angostura	7
Los Molles Alto 8	1
Mostazal Alto 6	1
MostazalDesembocadura Riego	3

Pama Alto 5	1
Pama Intermedio Riego	2
Punitaqui antes Limari riego	3
Punitaqui S Chalinga riego	3
Qda Higuerillas	1
R. Cam ClindoANU	31
R. Cam ClindoFRU	30
R. Cam MatrizANU	31
R. Cam MatrizFRU	30
R. Camarico _HualliFRU	30
R. Camarico PunitaquiANU	31
R. Camarico PunitaquiFRU	30
R. Camarico_HualliANU	31
R. Canal PunitaquiANU	31
R. Canal PunitaquiFRU	30
R. Canal VillalonANU	31
R. Canal VillalonFRU	30
R. CauchilANU	31
R. CauchilFRU	30
R. Der Cogoti 1ANU	31
R. Der Cogoti 1FRU	30
R. Der Cogoti 2ANU	31
R. Der Cogoti 2FRU	30
R. Grande A. PalomaANU	16
R. Grande A. PalomaFRU	15
R. Huatulame antes BCCANU	12
R. Huatulame antes BCCFRU	11
R. HuatulameANU	12
R. HuatulameFRU	11
R. Hurtado OvalleANU	31
R. Hurtado OvalleFRU	30
R. Limari abajo IngenioANU	16
R. Limari abajo IngenioFRU	15
R. Limari_IngenioANU	16
R. Limari_IngenioFRU	15
R. M. Cogoti Pun.ANU	31
R. M. Cogoti Pun.FRU	30
R. M. CogotiANU	31
R. M. CogotiFRU	30
R. M. PalomaANU	31
R. M. PalomaFRU	30
R. Paloma PonienteANU	31
R. Paloma PonienteFRU	30
R. PalquiANU	31
R. PalquiFRU	30
R. TabaliANU	31
R. TabaliFRU	30
R. TalhuenANU	31

R. TalhuenFRU	30
R. Villalon IngenioANU	31
R. Villalon IngenioFRU	30
Rapel Riego	2
Turbio 5	1
AP_AC_COG_01	1
AP_AC_COM_01	1
AP_AC_GRA_01	1
AP_AC_GRA_02	1
AP_AC_GRA_03	1
AP_AC_HUA_01	1
AP_AC_HUR_04	1
AP_AC_HUR_05	1
AP_AC_ING_01	1
AP_AC_LIM_02	1
AP_AC_PAL_01	1
AP_AC_PUN_01	1
AP_AC_RAP_01	1
AP_AC_TER_01	1
AP_COM01	1
AP_GRA01	2
AP_GRA02	4
AP_HUA01	10
AP_HUR01	1
AP_HUR02	4
AP_LIM01	10
AP_MOS01	2
AP_PAM01	2
AP_PAM02	2
AP_PUN01	1
AP_PUN02	1
AP_PUN03	1
ET_AC_COG_01	1
ET_AC_COM_01	1
ET_AC_GRA_01	1
ET_AC_GRA_02	1
ET_AC_GRA_03	1
ET_AC_HUR_04	1
ET_AC_HUR_05	1
ET_AC_ING_01	1
ET_AC_LIM_01	1
ET_AC_LIM_02	1
ET_AC_PAM_01	1
ET_AC_RAP_01	1
ET_GRA01	1
ET_GRA02	3
ET_GRA03	5
ET_HUR01	3

ET_HUR02	5
ET_HUR03	6
ET_HUR04	7
ET_MOS01	1
ET_RAP01	1
ET_AC_TER_01	1
IND_AC_GRA_02	1
IND_AC_GRA_03	1
IND_AC_HUR_05	1
IND_AC_LIM_01	1
IND_AC_PAL_01	1
IND_AC_PAM_01	1
IND_AC_TER_01	1
IND_AC_TER_02	1
OTR_LIM01	40
OTR_LIM02	1
OTR_PUN01	2
VAC_EMB_COGOTI	5
Q_TRIB_EMB_PAMA	1
Q_TRIB_EMB_RAPEL	2

9.2.4 Supply and Resources

Esta sección contiene toda la información acerca de la oferta hídrica. La oferta se ingresa, a su vez, por subsecciones, que son las siguientes:

a) Ríos

En la subsección ríos se encuentra información de tres tipos:

i) Ríos
ii) Canales
iii) Hidrología aportada por las cuencas aportantes (AN, aporte natural)

- **Ríos**

Los ríos aparecen por su propio nombre, y para ellos en esta sección aparecen todos los nodos que han sido generados a partir de

+ entradas de aportes naturales
+ entradas de aportes de ríos afluentes
+ retornos desde el riego por derrames
+ extracciones mediante bocatomas de canales
+ extracciones para demandas puntuales.
+ estaciones fluviométricas
+ embalses

Cuando se ingresa una estación fluviométrica, se debe señalar dónde se encuentra la estadística correspondiente, de modo de que el modelo pueda desplegar ambas estadísticas, la simulada y la observada, en el mismo tramo. En el caso del modelo Limarí, la estadística de la estación se lee desde la planilla Caudales.csv que se ubica en la carpeta Datos. Las estadísticas que allí se encuentran, se obtuvieron en base a la información actualmente disponible en la DGA, por lo general hasta enero 2014.

Para los embalses, aquí se ingresan todas las características físicas y operacionales que los definen, que son las siguientes:

+ Volumen máximo
+ Volumen Inicial
+ Curva Altura versus Volumen
+ Caudal máximo de salida
+ Evaporación mensual
+ Infiltración al acuífero
+ Prioridad dentro del sistema hídrico modelado

- **Canales**

En el modelo WEAP, los canales se llaman “Diversions”, y son tratados como ríos. En la modelación del Limarí, los canales están representados por un nodo de salida desde el río correspondiente, que se llama Outflow (bocatoma).

El modelo WEAP Limarí opera el sistema de canales a partir de la demanda. La demanda de cada zona de riego se transmite al canal que la alimenta, en los tramos se le suman las pérdidas por infiltración, si corresponde, y por evaporación, si corresponde, y así se llega al caudal requerido en bocatoma. El caudal de demanda en bocatoma es restringido, en este punto, por la capacidad de porteo del canal, que está definida como el mínimo entre la capacidad física y la dotación que le corresponde al canal de acuerdo con la regla de operación.

En la Tabla 9.7 del acápite 9.2.1 d), Canales, se observa la forma en que se han caracterizado todos los canales en cuanto a tramos y pérdidas.

- **Aportes naturales**

Son los aportes que provienen tanto de cuencas de cabecera (AN), como de cuencas laterales (CL) a medida que la cuenca se extiende hacia aguas abajo.

Estos aportes de caudal se han calculado externamente al modelo WEAP. Básicamente, se han tomado las mismas estadísticas del moldeo MAGIC, revisadas y actualizadas hasta el año 2014. Las estadísticas de todos los aportes naturales se encuentran en el archivo AN_Q.csv, ubicado en la carpeta Datos.

Los puntos de entrada de los caudales aportados desde las subcuencas generan nodos sobre los cauces, y con ello definen tramos (reaches).

b) Acuíferos

En esta sección se ingresan los datos de volumen máximo de los acuíferos. El valor del volumen máximo se busca en los Key Assumptions.

En el caso del Limarí, dada la escasa interacción de los acuíferos entre ellos, se consideró que lo más adecuado era definirlos directamente ligados al río, con posibilidad de intercambio en el sentido de que hay infiltración desde el cauce, para lo cual se indica un porcentaje de infiltración, y afloramientos hacia el cauce, los que el modelo calcula en base al volumen máximo, los cuales se devuelven al sistema superficial.

c) Transmission Links

En esta sección, netamente topológica, se encuentran todos los enlaces que transmiten agua, esto es:

- Desde los acuíferos hacia los sitios de demanda puntual (agua potable, minería, industria)
- Desde los acuíferos hacia los sitios de captación puntual(evaporación de vegetación ripariana)
- Desde los embalses hacia los requerimientos de caudal impuestos en la salida (vaciamiento forzado embalse Cogotí en 2002)
- Desde los canales hacia las zonas de riego que son abastecidas por ellos.
- Desde los acuíferos hacia las zonas de riego.
- Desde los ríos hacia las zonas de riego sobre embalses, y hacia algunas zonas de riego bajo embalses que no dependen del sistema de embalses.

Para todas las fuentes de abastecimiento de un mismo centro de demanda, por ejemplo canal y acuífero para una misma zona de riego, se puede indicar el orden de preferencia o prioridad de suministro que se asigna a cada fuente. Siempre la fuente superficial tiene la primera prioridad frente al bombeo, debido a los costos. Desde los acuíferos hacia las zonas de riego, los caudales transmitidos tienen un tope, que son los derechos de agua subterránea.

Respecto de los Transmission Links que alimentan zonas de riego directamente desde el río, lo que es el caso de todas las zonas de riego sobre embalse y de algunas bajo embalse, es necesario señalar que estos Transmission Links no tienen pérdidas ni límite de capacidad. Su eventual ineficiencia se queda en el río.

d) Runoff and Infiltration (Derrames y percolaciones)

Esta variable es meramente topológica, y señala el destino de determinados flujos de agua que se recuperan desde las zonas de riego o desde Catchments. Por ejemplo, en el modelo

WEAP Limarí UC, se señala el punto en el que cada río recibe el caudal generado en sus subcuencas aportantes (desactivado en la presente versión WEAP Limarí CRDP 2014).

También se señala el destino de las ineficiencias de riego, que puede ser el acuífero o el río. Sin embargo, la caracterización cuantitativa, como el porcentaje que corresponde a cada uno, se ingresa en el Key Assumption de cada zona de riego o Catchment.

e) Return Flows (flujos de retorno)

Este elemento también es meramente topológico, y conduce el porcentaje del flujo no consumido en un sitio de demanda puntual, que retorna superficialmente al río o canal después de su extracción. En el caso del modelo Limarí, existen 3 tipos de flujos de retorno, que corresponden a las devoluciones de las extracciones impuestas:

- desde el embalse Cogotí, para devolverla extracción forzada al río aguas abajo del muro
- desde el río Pama, para modelar la tributación del embalse Valle Hermoso en el escenario Futuro Operación 1
- desde el río Rapel, para modelar la tributación del embalse Rapel en el escenario Futuro Operación 1.

9.2.5 Carpeta Datos

Como se ha señalado antes, el complemento a la información de entrada ingresada directamente al modelo a través de la interface, es la información contenida en la carpeta Datos, a la que el programa tiene acceso para la realización de los cálculos. En la carpeta Datos quedaron los datos que pueden ser modificados por el operador, para el análisis de diversos escenarios, sin afectar la topología ni la lógica de operación del modelo.

En la carpeta Datos se encuentra la siguiente información:

a) Un archivo AN_Q.csv, que contiene las estadísticas mensuales de caudales de las cuencas aportantes o aportes naturales.

b) Un archivo AN_Q_EXT.csv, que contiene las estadísticas mensuales extendidas en otros 15 años, para los escenarios futuros.

c) Un archivo CS_Q.csv, que contiene las estadísticas mensuales de las captaciones puntuales superficiales para agua potable rural, y de las captaciones de derechos superficiales eventuales.

d) Un archivo ET_Q.csv, que contiene las estadísticas mensuales de uso consuntivo de la vegetación del río, la que capta tanto en forma superficial como en forma subterránea, dependiendo de su ubicación. Donde hay acuífero, la vegetación se alimenta del acuífero. Donde no hay acuífero, la vegetación se alimenta desde el río.

e) Un archivo ETP.csv, que contiene la evapotranspiración potencial por sectores agroclimáticos, a los cuales se asocian las zonas de riego.

f) Un archivo Caudales.csv, que contiene las estadísticas de todas las estaciones fluviométricas para el período de estudio.

g) Un archivo POZOS_DDAA_AP.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso de agua potable, por acuífero. Esta estadística opera como un límite a la explotación efectiva de agua potable.

h) Un archivo POZOS_DDAA_I.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso identificado como industrial, por acuífero. El uso efectivo se basa en esta misma estadística, aplicando al derecho un factor de uso de 0,5, salvo excepciones. Los factores de uso están incluidos en la caracterización de los Transmission Links.

i) Un archivo POZOS_DDAA_R.csv, que contiene todos los derechos de riego que se ubican dentro de los acuíferos modelados. Los derechos correspondientes al artículo 4ºT, que se encuentran fuera del sistema de reparto, y fuera de los acuíferos modelados, se consideraron restando su uso efectivo de los caudales aportados por las subcuencas de cabecera y laterales. Con fines de calibración, se aplicaron factores de uso a los derechos de los acuíferos AC_Terrazas_01 (factor 0.5), AC_Punitaqui_01 (0.2) y AC_Palqui_01 (0.5), debido a que estos acuíferos no daban abasto en el modelo durante la sequía, mientras que en la realidad sí han permanecido en un relativo equilibrio.

j) Un archivo POZOS_Q_AP.csv, que contiene la información de explotación efectiva para el uso de agua potable que se realiza en los acuíferos que cuentan con derechos.

k) Un archivo PP_EF.csv, que contiene la precipitación efectiva que se resta de las necesidades de agua de los cultivos, en la metodología FAO.

l) Planillas con nombres de cultivos. Todas las planillas se refieren a las 23 zonas de riego bajo embalse, que se subdividen en dos subzonas: ANU y FRU. Los cultivos de las zonas FRU tienen una planilla propia, en que aparece el porcentaje del área de cada zona FRU destinada al cultivo que le da el nombre a la planilla.
Los porcentajes de cobertura de cultivos anuales ANU se presentan en dos niveles:
   - Un primer nivel en que se presenta el porcentaje de área cubierto por cuatro categorías de cultivos: hortalizas, praderas, cereales y tubérculos. La suma de estos porcentajes es 100 para cada zona de riego.
   - Un segundo nivel en que se presenta el porcentaje de área de cada cultivo dentro de cada categoría. La suma de estos porcentajes es 100 para cada categoría de cultivos.

m) Un archivo llamado AreaPotencialAnuales, que contiene el área potencial (o máxima) para cada subzona ANU bajo embalses.

n) Tres archivos llamados Vol_Cogotí, Vol_Recoleta y Vol_La Paloma, que contienen las estadísticas de volumen observado de los embalses.

o) Un archivo llamado VAC_EMB_COGOTI.csv, que contiene un vaciamiento impuesto al embalse Cogotí, en virtud de una fuerte disminución del volumen embalsado que se detectó entre septiembre y diciembre de 2002, que no se explica por el caudal de entrega para riego registrado para este embalse. Para calibrar el embalse, fue necesario imponer una disminución de volumen de aproximadamente 200 millones de m3 en el período señalado.

p) Según los antecedentes recopilados los embalses proyectados Valle Hermoso y Rapel deben tributar al sistema CASEP siempre que el caudal en el río supere 2.034 m3/s y 3.622 m3/s en los ríos Pama y Rapel respectivamente. Para poder modelar esta tributación, y considerando el juego de prioridades posible para cada uno de los embalses y sus respectivas zonas de riego, se modeló la tributación calculando, con una hidrología supuesta y por lo tanto conocida, la estadística de caudales de tributación para cada uno de los embalses. Estos caudales se desvían del cauce arriba del embalse con un sitio de demanda ficticio (artificio de modelación) y se devuelven en su totalidad a la salida del embalse. Las estadísticas de caudales correspondientes se encuentran en los archivos Q_TRIB_EMB_PAMA.csv y Q_TRIB_EMB_RAPEL.csv

Todos los demás archivos subsisten de la versión anterior del modelo WEAP Limarí UC y no se utilizaron en este trabajo. En la presente entrega, la carpeta Datos se encuentra dentro del archivo llamado WEAP_Limarí_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

9.2.6 Carpeta SIG

El modelo WEAP puede desplegar cualquier cobertura de SIG, por ejemplo en formato .shp, como apoyo para la presentación del esquema topológico.

Para que el modelo, al trasladarse a otro computador, pueda contar con todas las coberturas SIG con que se ha trabajado, se ha configurado dos carpetas para SIG dentro de la carpeta WEAP_Limari_CRDP_2014. La carpeta llamada SIG contiene las coberturas nuevas creadas para el trabajo con WEAP durante este estudio, y las coberturas del MAGIC que les sirvieron de base. La carpeta SIG Limarí Mar 2006 contiene algunas coberturas seleccionadas del tipo coberturas de ubicación y coberturas temáticas, generadas con ocasión del estudio CAZALAC / RODHOS el año 2006, y las coberturas que traía el modelo WEAP Limarí UC, de subcuencas cuya hidrología se generó internamente con el modelo, y que no se utilizaron en esta versión.

Las coberturas se listan en la Tabla 9.18.

Tabla 9.18
Coberturas SIG que acompañan el modelo WEAP Limarí

CARPETA	NOMBRE COBERTURA	CONTENIDO
SIG	ACUIFEROS	Acuíferos MAGIC y WEAP
SIG	EMB	Embalses existentes
SIG	EMB_ NUEVOS	Embalses proyectados
SIG	NODOS_ MAGIC	Nodos de la modelación con MAGIC
SIG	SUBCUENCAS_ MAGIC	Subcuencas aportantes MAGIC, utilizadas para WEAP
SIG	Fuentes_nacional	Red de drenaje (fuente: DGA)
SIG Limarí Mar 2006	Agroclima	Sectores según Mapa Agroclimático de Chile, 1971
SIG Limarí Mar 2006	Bocatomas	Según Catastro de Bocatomas, DGA 2002 y 2006
SIG Limarí Mar 2006	Canales	Según Cobertura de CNR
SIG Limarí Mar 2006	Embalses Grandes	Según Cobertura de CNR
SIG Limarí Mar 2006	Ciudades	Según coberturas DGA
SIG Limarí Mar 2006	Cuencas	Según coberturas DGA
SIG Limarí Mar 2006	Drenaje	Según coberturas DGA
SIG Limarí Mar 2006	Región	Según coberturas DGA

En la presente entrega, las carpetas SIG y SIG Limarí Mar 2006 se encuentran dentro del archivo llamado WEAP_Limarí_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

9.3 Calibración y validación del modelo

9.3.1 Calibración del modelo

El modelo se calibró para el período 2000-2011, que es el mismo período para el cual había datos de entrada para el modelo MAGIC en el estudio del Plan Maestro.

El proceso de calibración se llevó a cabo en forma simultánea con el proceso de adaptación del modelo WEAP Limarí UC a las condiciones algo más simplificadas del modelo WEAP Limarí CRDP 2014, éste último descrito en el capítulo 9.1. En el presente capítulo se describen solamente aquellos cambios relacionados con la calibración, que no importan cambios de criterio en la modelación misma.

Para calibrar el modelo WEAP-Limarí CRDP 2104, se corrió una gran cantidad de escenarios, en que se fueron ajustando los siguientes aspectos:

a) Ajuste del parámetro de percolación desde cauces hacia acuíferos
b) Ajuste del parámetro de percolación desde canales hacia acuíferos, que es un parámetro de calibración
c) Ajuste de la demanda de la vegetación ripariana
d) Ajuste de las pérdidas del canal Palqui-Maurat-Semita, de retorno al río Grande, antes de su internación en dirección de El Palqui.

e) Restricción de la entrega máxima desde embalses Recoleta y Cogotí, a lo que fue observado como entrega máxima de acuerdo con las estadísticas de entrega. Los embalses en la realidad no operan cubriendo el total de la demanda, aunque la regla de operación lo permita. Hay un tope.
f) Ajustes de coeficientes de percolación de zonas de riego hacia acuíferos
g) Ajuste de la pérdida evaporativa desde canales
h) Vaciamiento forzado observado en la realidad, del embalse Cogotí entre septiembre y diciembre del año 2002.
i) Ajuste del porcentaje de uso efectivo de los derechos de riego en los acuíferos de Terrazas Sur, Punitaqui y Palqui.
j) Ajuste de los afloramientos de los acuíferos Terrazas Sur y Norte hacia Estero Punitaqui y río Limarí, respectivamente.
k) Ajuste de prioridades de zonas de riego para entregas de agua desde canales
l) Ajuste de preferencias de suministro desde fuentes (canales y pozos) a zonas de riego

De esta forma, el escenario de calibración sirvió para comprender y representar cada vez mejor el funcionamiento del sistema.

Los gráficos del período de calibración, en conjunto con el de validación, correspondientes a los cinco tipos de planillas, se presentan en el capítulo 9.3.3.

9.3.2 Validación del modelo

La validación del modelo consistió en continuar con la operación en el período abril 2011 hasta marzo 2014, completando la hidrología y actualizando todos los demás datos de entrada requeridos, y observando si el comportamiento seguía adecuándose al comportamiento del sistema observado en la realidad.

Respecto del período de validación es necesario señalar lo siguiente:

a) El período de validación se desarrolla en pleno período de sequía.
b) Durante este período, el sistema Paloma no se ciñó a la regla de operación, sino que realizó una operación diferente, más solidaria.
c) La regla de operación programada dentro del WEAP no corresponde, por lo tanto, a la distribución que se efectuó en la realidad.
d) Por lo señalado, el modelo no representa bien la realidad durante el período de validación.
e) La distribución que se efectuó en la realidad, si bien es cierto que se conoce en detalle porque la CASEP lleva todos los registros, no fue posible programarla dentro de los alcances de la presente consultoría.
f) No obstante lo señalado, lo que se requiere para probar escenarios futuros, es tener un modelo capaz de representar bien el comportamiento de la cuenca para una regla de operación dada, y eso justamente es lo que hace el modelo WEAP Limarí CRDP 2014, salvo en épocas de sequía.

De lo señalado se desprende, por un lado, que el modelo calibrado puede ser usado para evaluar escenarios futuros.

También se desprende, por otro lado, que si en la realidad durante una sequía no se aplica la regla de operación, es tiempo de analizar la forma en que el sistema se opera en la realidad durante las sequías, y modificar la regla de operación en ese sentido. Con ello, luego será posible programar la nueva regla en el modelo WEAP, y lograr que ella resulte válida y represente lo que ocurrió en la realidad, en todo período.

Los gráficos del período de validación se presentan en conjunto con el período de calibración, en el capítulo 9.3.3.

9.3.3 Resultados gráficos de los escenarios de calibración y validación

a) Planilla Calib25_Calib_SUP

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración y validación superficial, vale decir, los caudales observados y simulados en los puntos de control. Los puntos de control son los siguientes:

- Río Hurtado en San Agustín (cabecera, estadística observada)
- Río Hurtado en Angostura de Pangue
- Río Hurtado entrada embalse Recoleta
- Embalse Recoleta
- Río Molle en Ojos de Agua (cabecera, estadística observada)
- Río Rapel antes junta río Grande
- Río Mostazal en Cuestecita (cabecera, estadística observada)
- Río Mostazal en Desembocadura
- Río Grande en Las Ramadas (cabecera, estadística observada)
- Río Tascadero en Desembocadura (cabecera, estadística observada)
- Río Grande en Cuyano
- Río Grande en Puntilla San Juan
- Río Cogotí en Fragüita (cabecera, estadística observada)
- Río Cogotí entrada embalse Cogotí
- Río Combarbalá en Ramadillas (cabecera, estadística observada)
- Río Pama en Valle Hermoso
- Embalse Cogotí
- Río Huatulame en El Tome
- Embalse Paloma
- Punitaqui antes junta río Limarí
- Limarí en Panamericana

En los puntos de cabecera donde hay estadística observada, se usó ésta como entrada al modelo, por lo que en esos puntos la estadística observada coincide con la estadística simulada.

A continuación se presenta el comportamiento de los caudales simulados por el WEAP en los puntos de control más importantes, que no sean de cabecera. El comportamiento del modelo en la totalidad de los puntos de control se encuentra en la planilla Calib25_Calib_SUP.xlsx del Anexo Digital Capítulo 9.3.

Figura 9.11
Hurtado en Angostura de Pangue

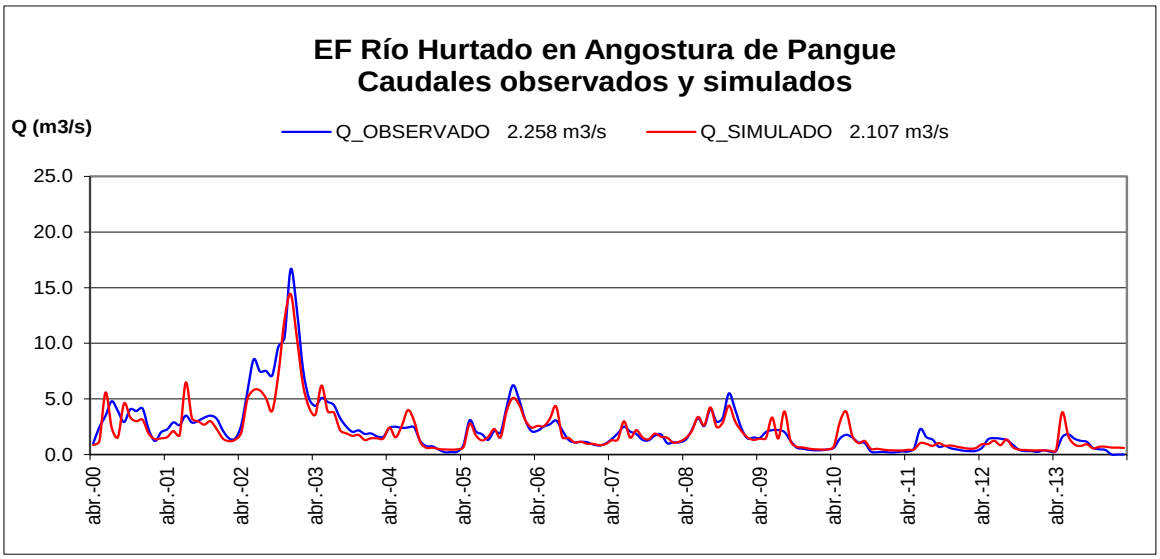


Figura 9.12
Embalse Recoleta

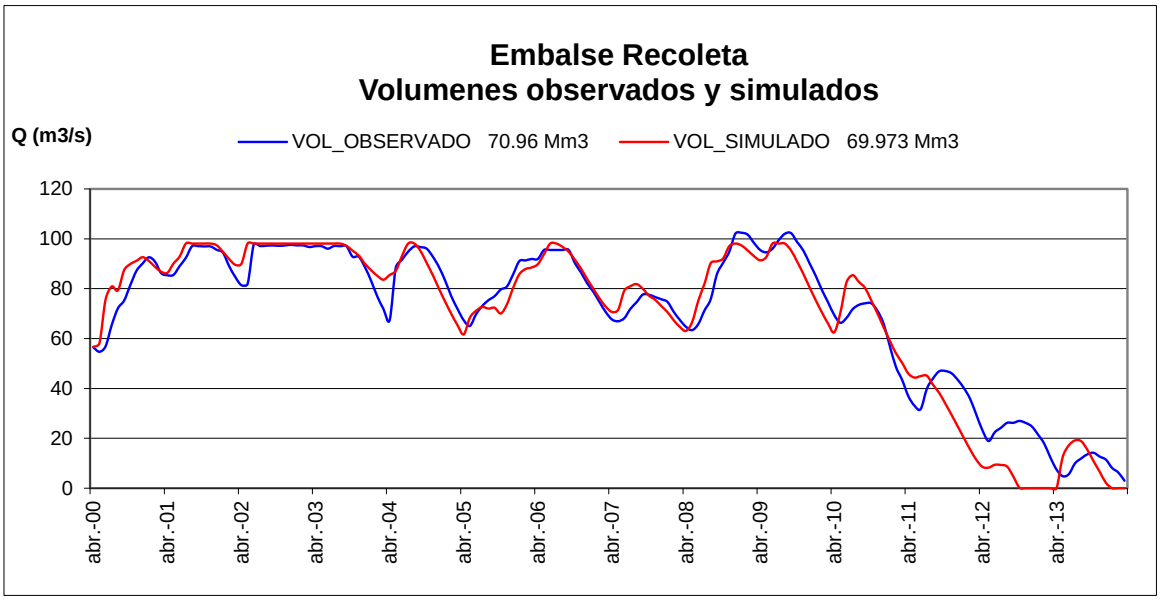


Figura 9.13
Río Rapel antes junta río Grande

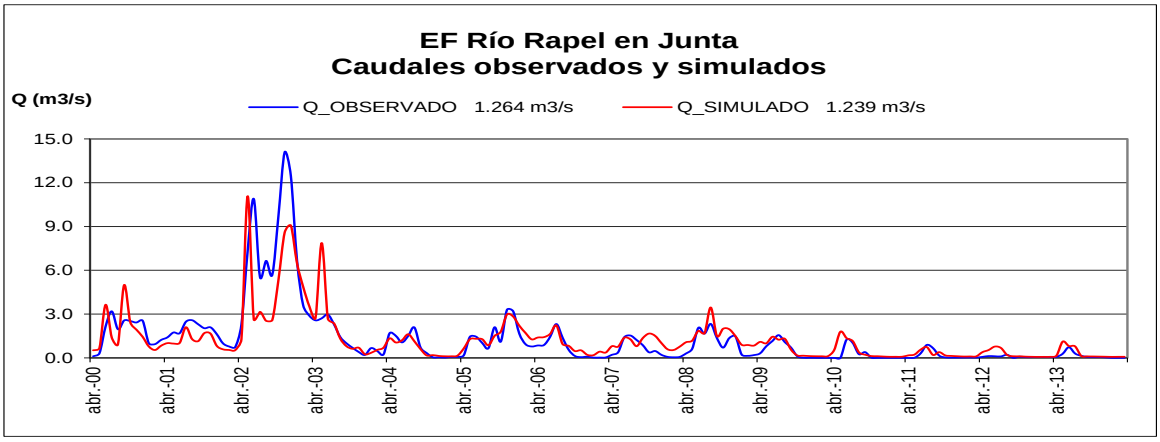


Figura 9.14
Río Mostazal en Desembocadura

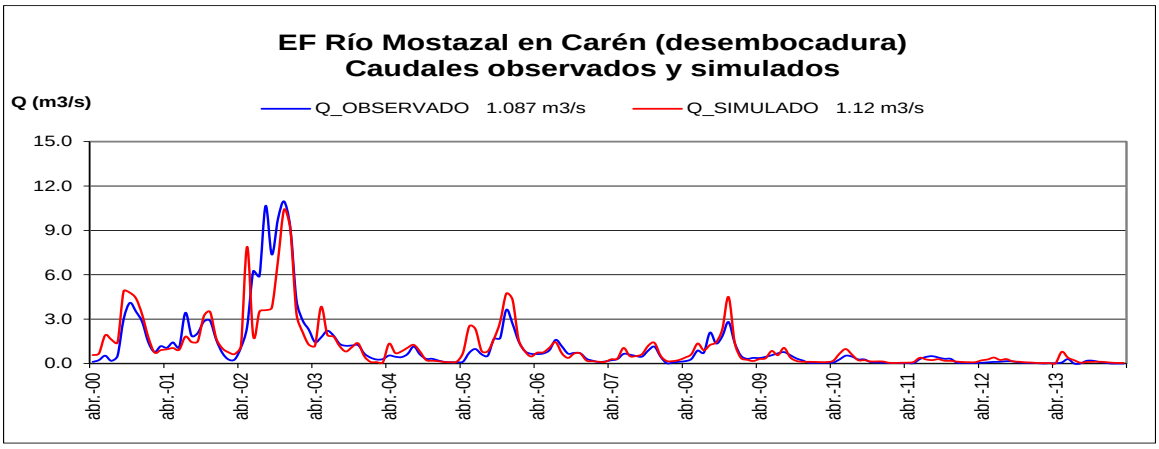


Figura 9.15
Río Grande en Cuyano

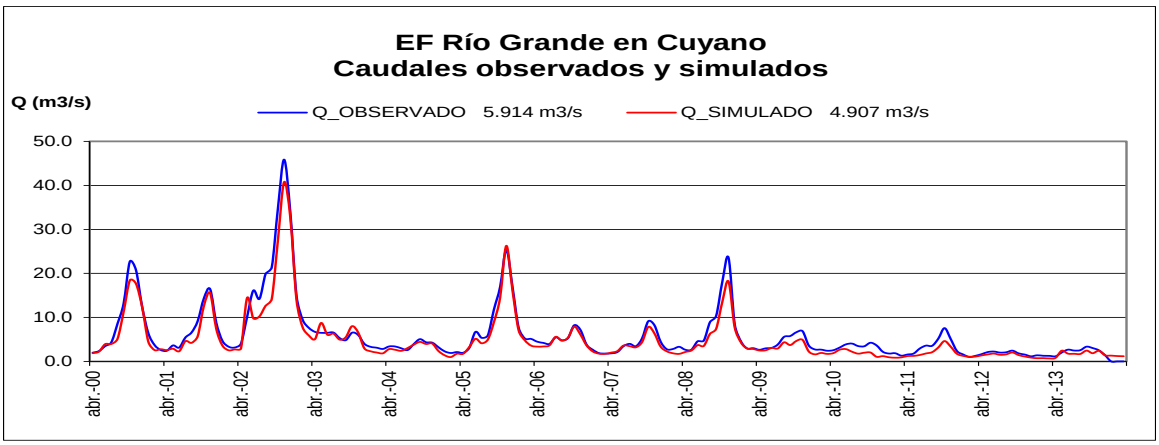


Figura 9.16
Río Grande en Puntilla San Juan

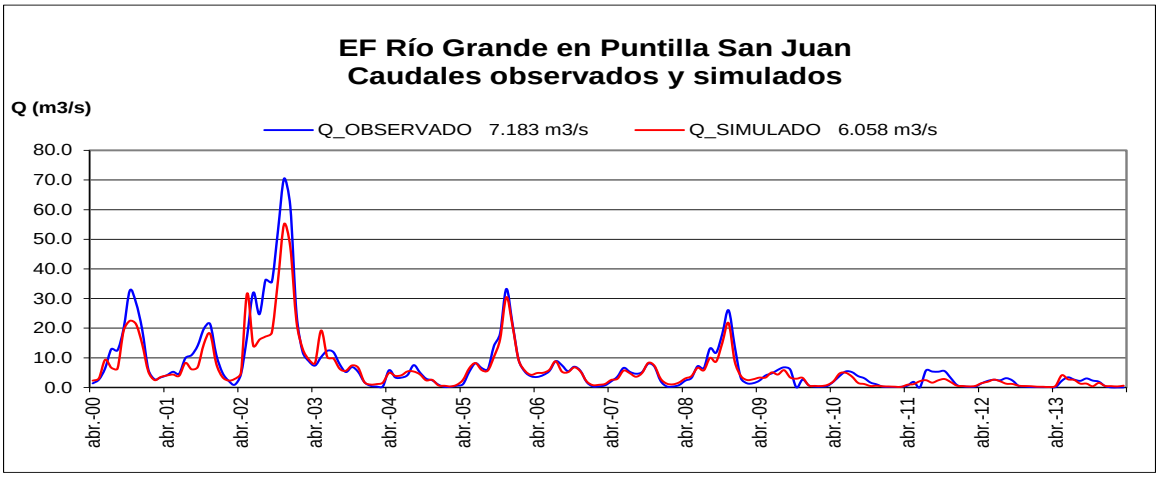


Figura 9.17
Río Cogotí en entrada embalse Cogotí

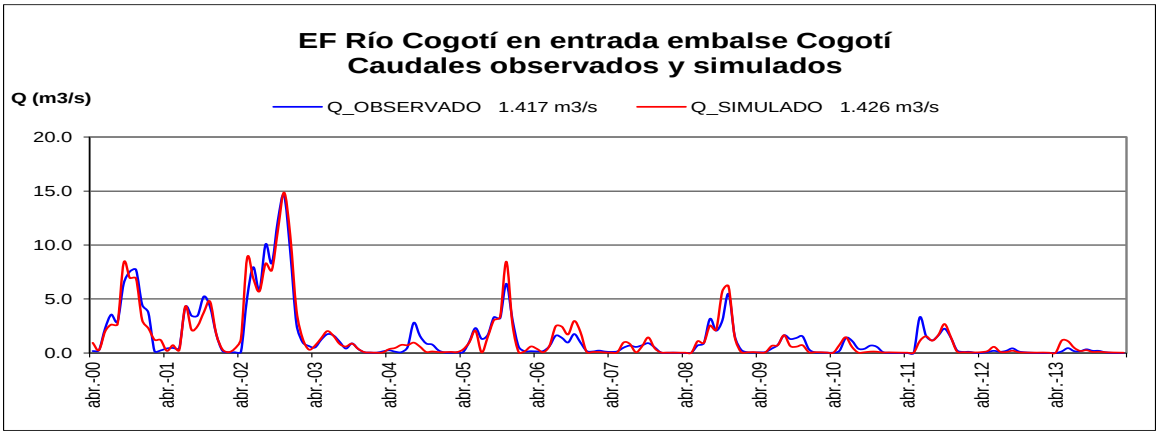


Figura 9.18
Embalse Cogotí

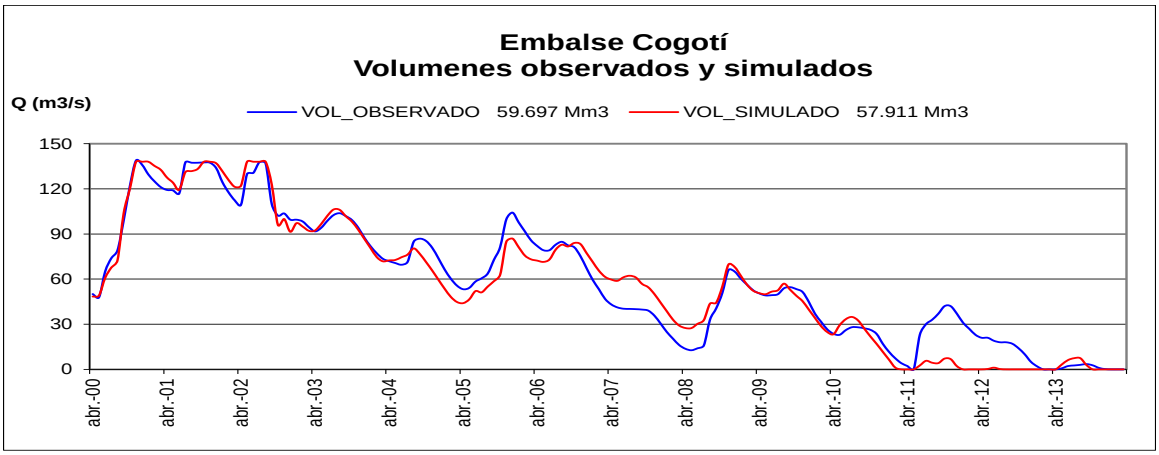


Figura 9.19
Río Huatulame en El Tome

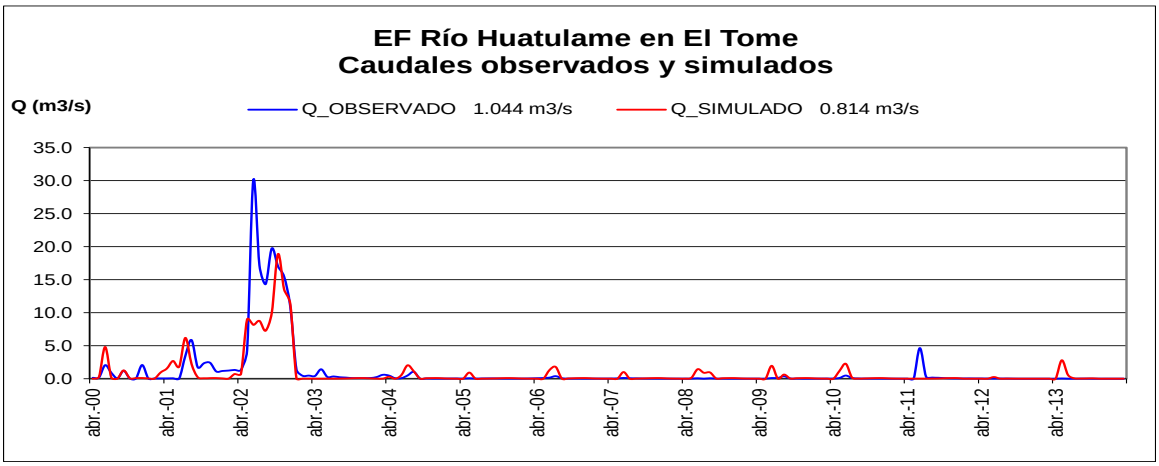


Figura 9.20
Embalse Paloma

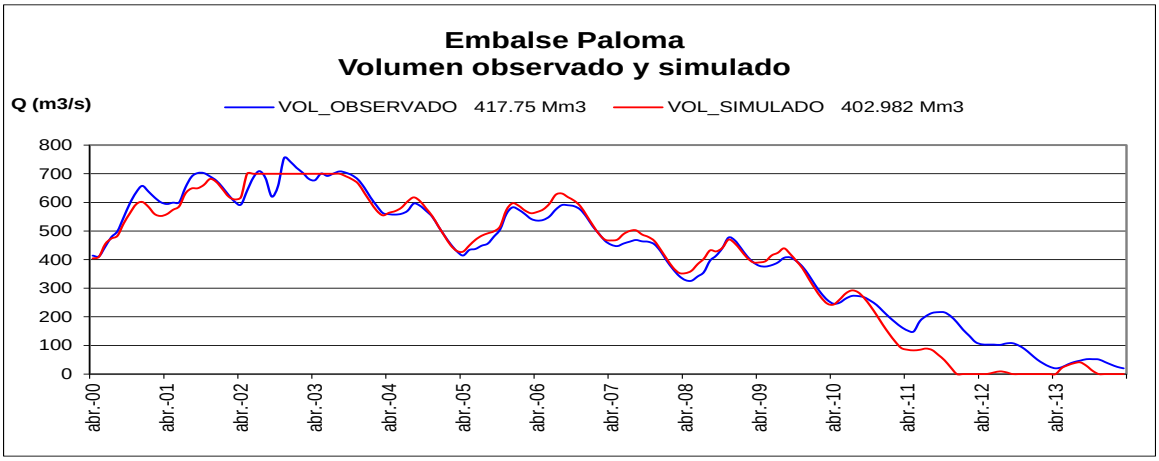


Figura 9.21
Río Punitaqui antes junta Limarí

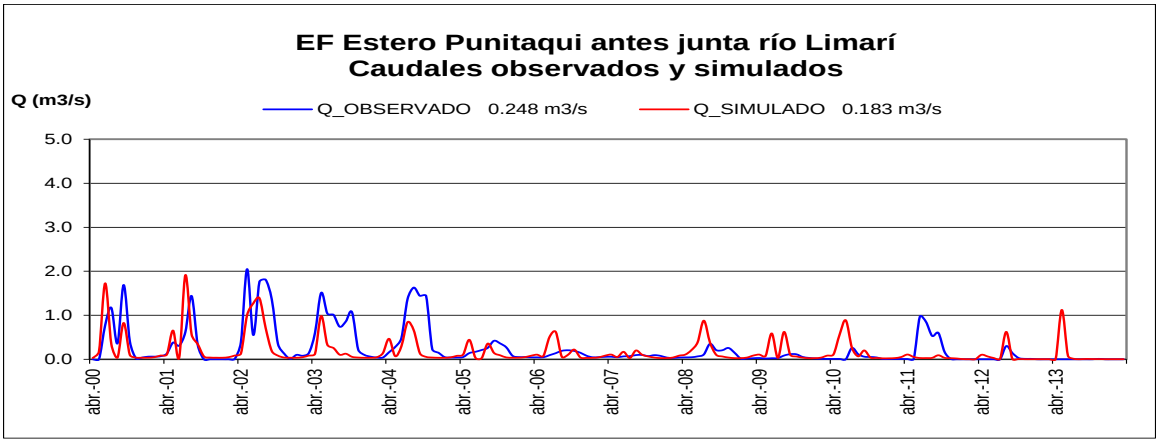
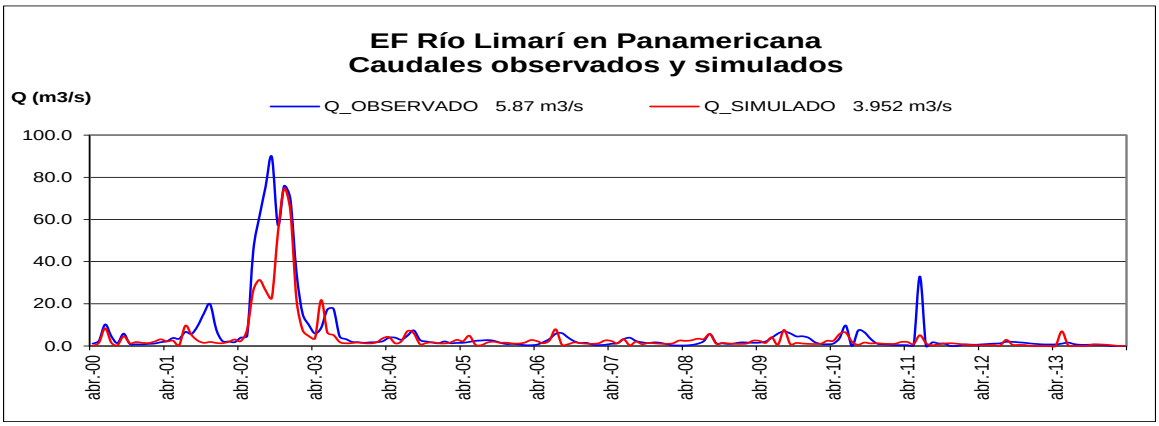


Figura 9.22
Río Limarí en Panamericana



De acuerdo con lo que se puede observar en la calibración superficial, el modelo es capaz de reproducir razonablemente bien la realidad observada, salvo en algunos sectores durante el último período de sequía, porque en dicho período no se aplicaron las reglas de operación que están programadas.

b) Planilla Calib25_Calib_SUB

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración y validación subterránea, vale decir, todos los resultados de niveles observados y niveles simulados en los acuíferos en los cuales hay algún pozo de observación de la red de la DGA. El comportamiento modelado en los acuíferos que tienen control de nivel, se ilustra en las figuras a continuación. El comportamiento de los demás acuíferos, que no tienen control de nivel, también se muestra en esta planilla. Los datos de volumen de todos los acuíferos modelados, así como el balance, se muestran en la planilla Calib25_Balance_AC.

Lo que muestran los datos observados, y lo que reproducen con bastante fidelidad los datos simulados, es que hay algunos acuíferos donde se percibe el descenso de nivel en función de la falta de agua durante años secos. Los descensos son, en general, leves, lo que se atribuye a la escasa cantidad de derechos que existen en ellos, según se aprecia en la Tabla 9.19 adjunta.

Tabla 9.19
Derechos subterráneos en acuíferos cuenca Limarí

Acuífero WEAP	RIEGO	AP	IND	TOTAL
AC_COG_01	0.006	0.053		0.059
AC_COM_01	0.037	0.015		0.052
AC_GRA_01	0.087	0.023		0.11
AC_GRA_02	0.006	0.035	0.002	0.043
AC_GRA_03	0.04	0.044	0.001	0.085

AC_HUA_01	0.11	0.044		0.154
AC_HUR_01				0
AC_HUR_02				0
AC_HUR_03				0
AC_HUR_04		0.008		0.008
AC_HUR_05	0.014	0.016	0.009	0.039
AC_ING_01	0.393	0.016		0.409
AC_LIM_01	0.01		0.001	0.011
AC_LIM_02	0.185	0.046		0.231
AC_MOS_01				0
AC_PAL_01	0.137	0.046	0.04	0.223
AC_PAM_01	0.022		0.016	0.038
AC_PUN_01	0.092	0.012		0.104
AC_RAP_01	0.032	0.072		0.104
AC_TER_01	0.863	0.025	0.085	0.973
AC_TER_02	0.074		0.02	0.094
TOTAL	**2.108**	**0.455**	**0.174**	**2.737**

No todos los acuíferos tienen mediciones, pero los que tienen, se encuentran en la situación siguiente, según se puede apreciar en las figuras a continuación:

- Con tendencia de descenso: Pama, Río Grande bajo embalse Paloma, Terrazas sur del río Limarí, levemente Terrazas norte, y Punitaqui (descenso paulatino de varios años), Levemente Limarí bajo Q. Ingenio
- Sin tendencia de descenso: Rapel, El Palqui, Grande arriba de Rapel, Limarí sobre Q. Ingenio.

No hay mediciones en Cogotí, Combarbalá, Huatulame, Mostazal, Hurtado, Quebrada del Ingenio ni Grande entre Rapel y embalse Paloma.

Figura 9.23
Acuífero Río Rapel

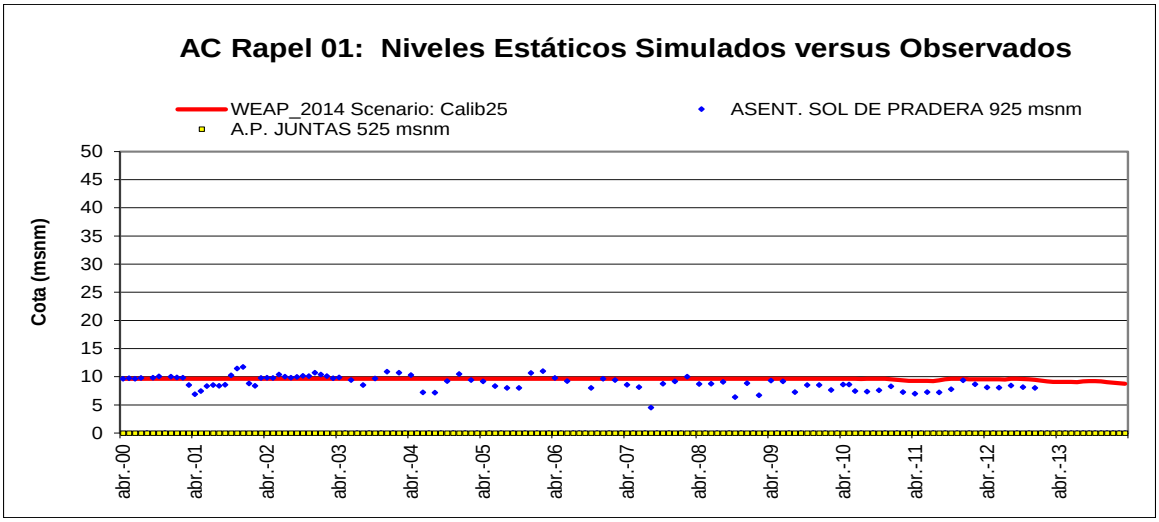


Figura 9.24
Acuífero río Grande entre Mostazal y Rapel

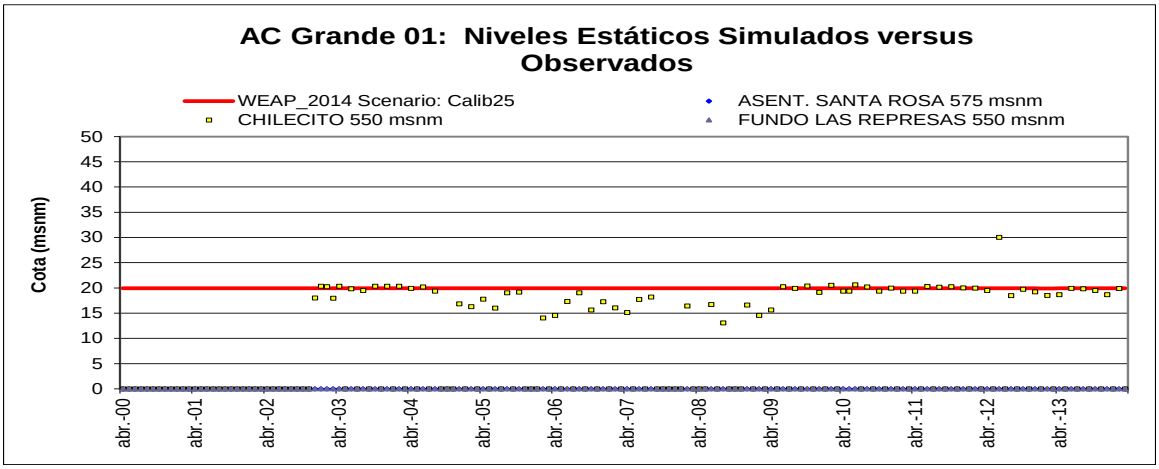


Figura 9.25
Acuífero río Pama

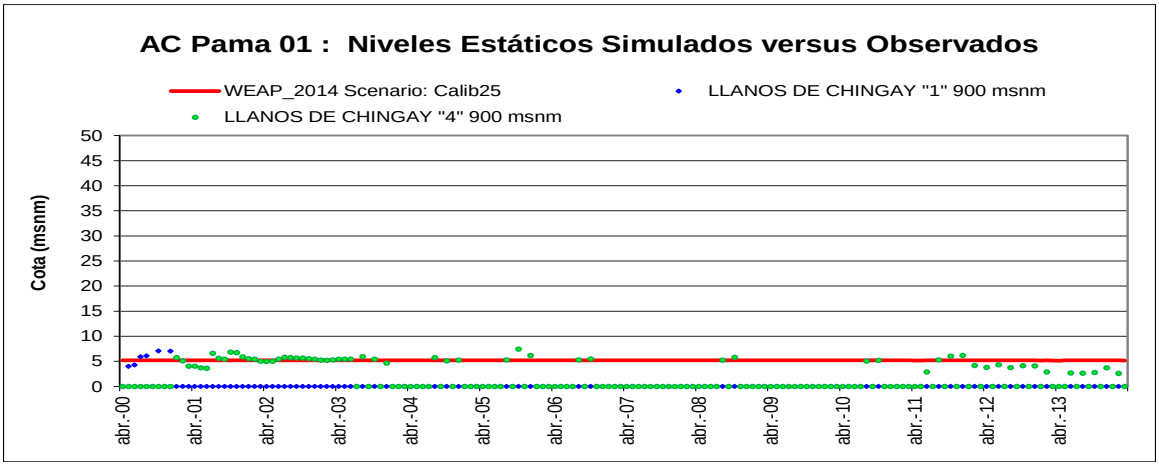


Figura 9.26
Acuífero El Palqui

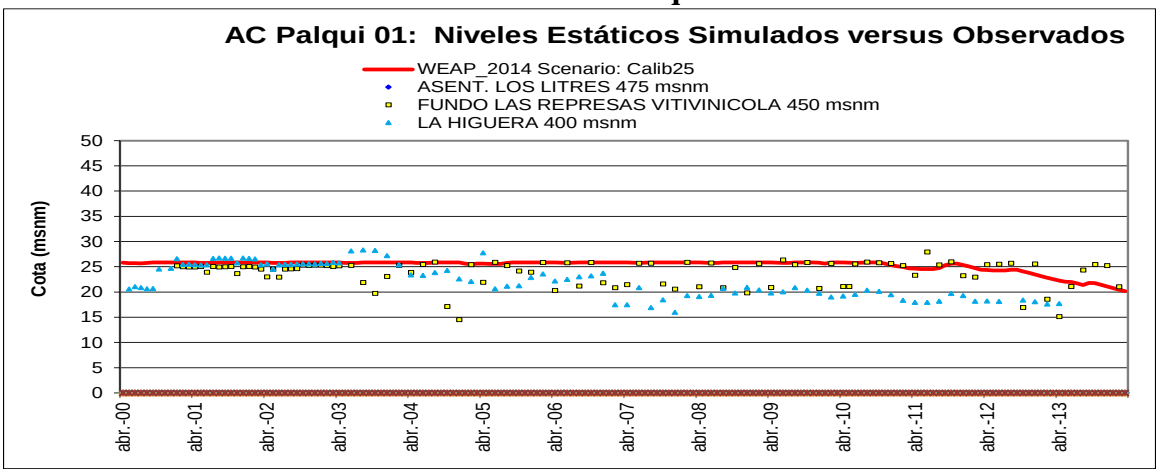


Figura 9.27
Río Grande bajo embalse Paloma

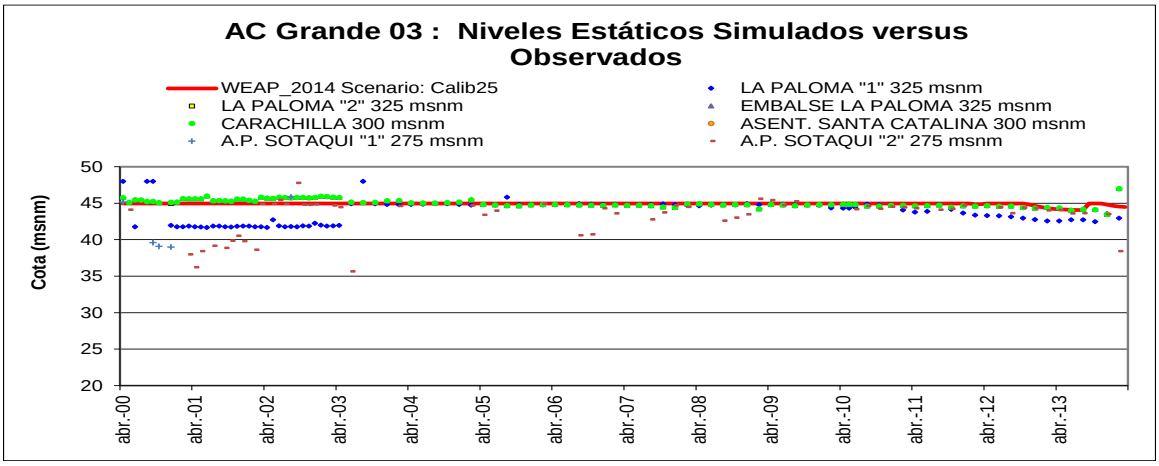


Figura 9.28
Río Limarí entre Ovalle y Q. Ingenio

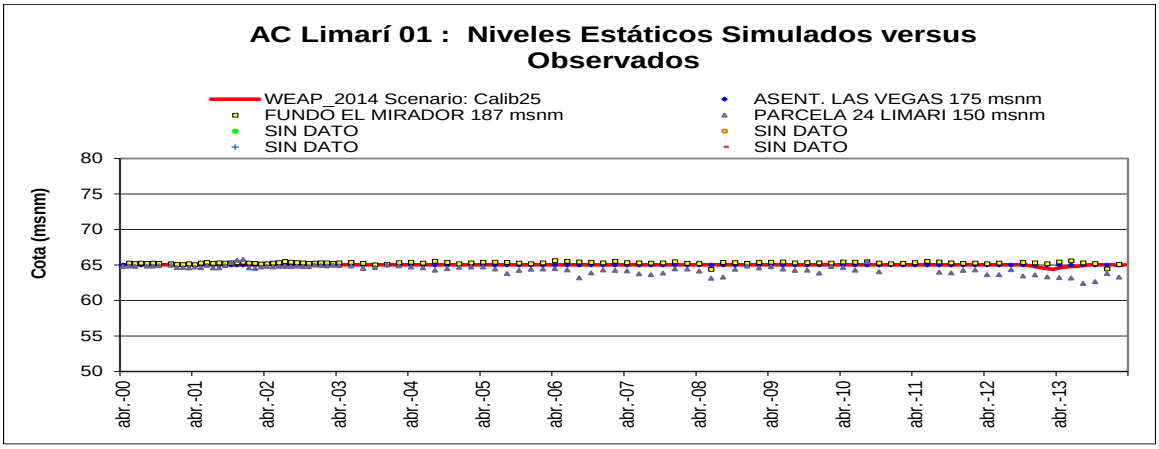


Figura 9.29
Río Limarí entre Q.Ingenio y Panamericana

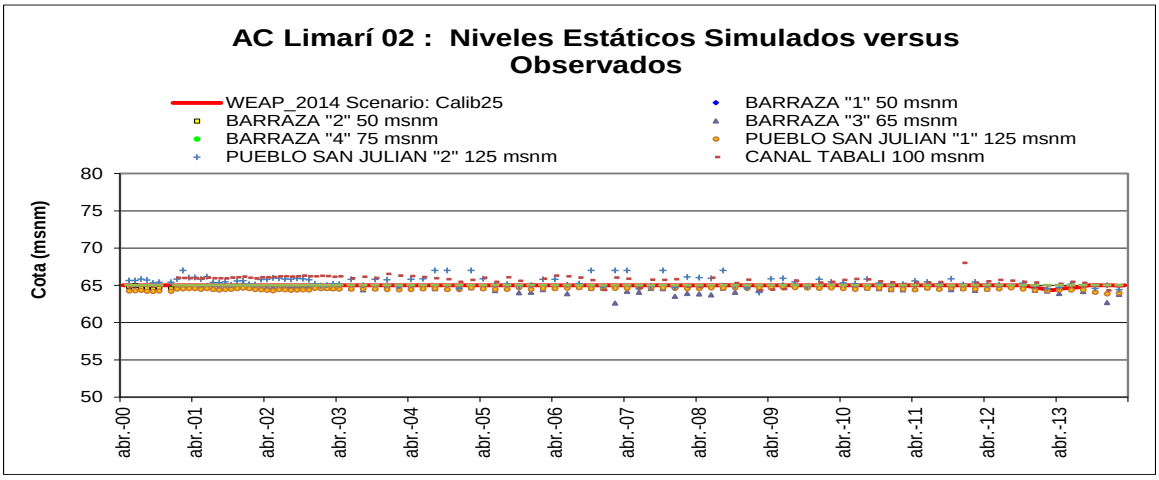


Figura 9.30
Acuífero Terrazas Limarí Sur sector Sur

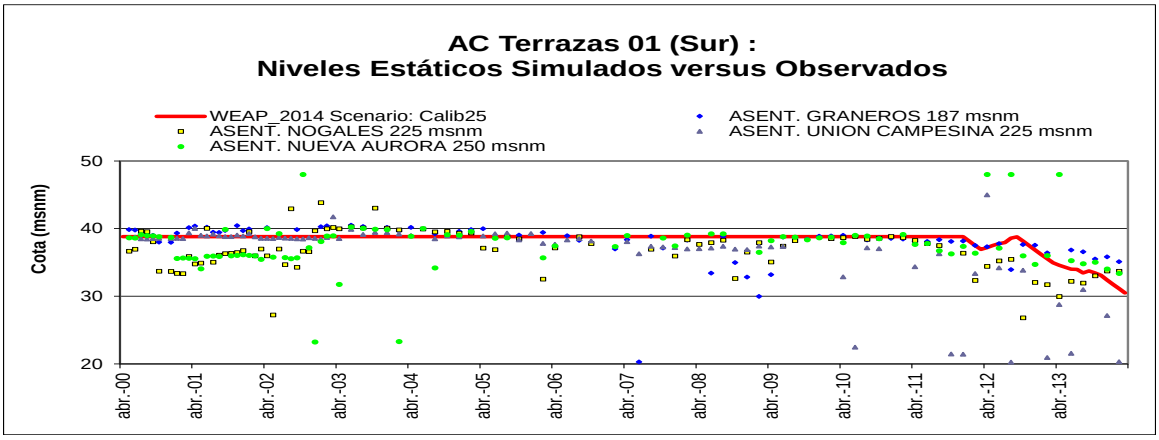


Figura 9.31
Acuífero Terrazas Limarí Sur sector Norte

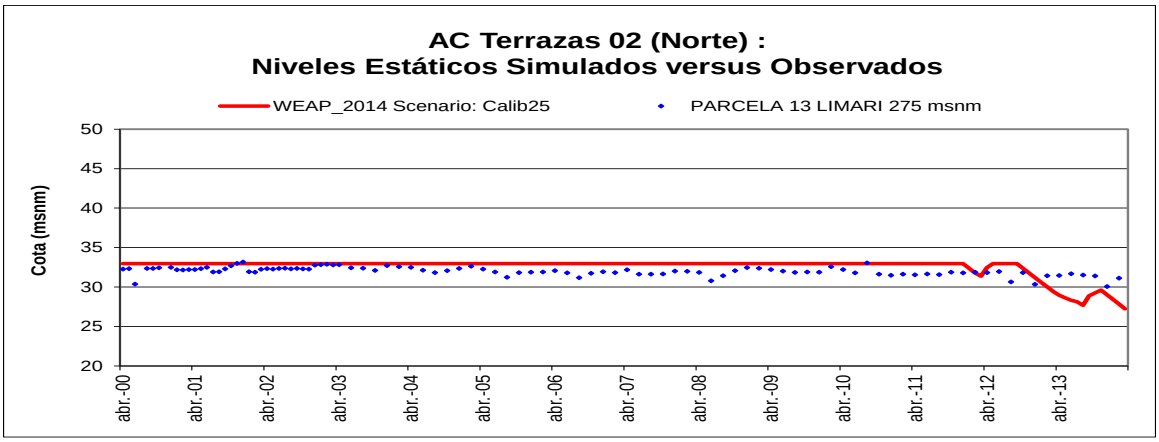
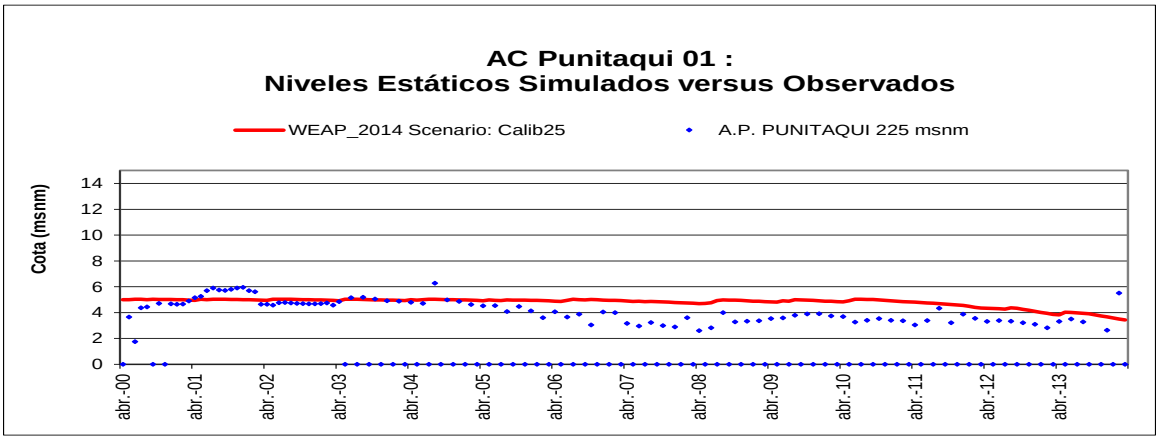


Figura 9.32
Acuífero Punitaqui



Es necesario tener presente que la visualización del comportamiento de los acuíferos en esta planilla de calibración, muestra solamente niveles (para compararlos con las mediciones reales), y no muestra la relación que hay entre el nivel y el volumen del acuífero. Los gráficos que muestran la forma en que se va modificando el volumen de los acuíferos en relación con su volumen total, son los gráficos de la planilla Balance_AC.

Por otro lado, también hay que tener presente que en la modelación, el bombeo no se restringe por descenso de nivel. En la realidad, probablemente ocurra en alguna medida que el bombeo se reduce al bajar mucho los niveles, lo que explicaría el hecho de que en algunos acuíferos el modelo es más pesimista que la realidad, en especial en los últimos años de sequía.

c) Planilla Calib25_Balance_ZR

Esta planilla contiene una hoja para cada zona de riego, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.3. Todas las zonas de riego que comienzan con R son las zonas bajo embalse, que tienen dos subzonas, ANU y FRU. La totalidad de las zonas de riego se puede apreciar en la planilla del Anexo Capítulo 9.3.

De esta forma, se configura un set de 5 gráficos en el caso de las zonas de riego con cultivos globales (predominantemente sobre embalses), y de 6 gráficos para las zonas de riego que tienen cultivos ANU y FRU (predominantemente bajo embalses), que dan cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con una determinada zona de riego. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunas zonas de riego representativas de la cuenca del Limarí.

La prioridad de demanda siempre la tienen las zonas de riego frutales sobre las anuales. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

En los gráficos se presenta, a modo de ejemplo, algunas zonas sobre embalse y algunas bajo embalse. De las zonas sobre embalse se presentan Pama, Rapel, Hurtado y Grande entre Cuyano y Mostazal, mientras que de las zonas bajo embalse, se presentan las zonas de Villalón, Camarico y Limarí bajo Quebrada Ingenio.

Las zonas sobre embalse presentan realidades bien diferentes entre ellas, como se aprecia y se comenta en cada caso, en base a las Figuras 9.33 a 9.36. En las Figuras 9.37 a 9.39 se presenta el análisis del comportamiento de las zonas de riego bajo embalse, las que se comentan a continuación.

Lo que se observa en la zona de riego Villalón-Ingenio es que esta zona ha crecido permanentemente en el tiempo, aumentando su demanda de agua al sistema. No hay aporte desde pozos, y la oferta de agua superficial cubrió bien la demanda hasta aprox. 2005. Después, se observa que el agua superficial ha escaseado, y los cultivos que se dejan de regar son los anuales, mientras que los frutales siguen con una demanda bien suplida. Sin

embargo, a partir de 2012 también hay una afección severa a los cultivos frutales, pues el agua de riego es muy escasa.

Para la zona regada por el canal Camarico se observa que ella está crónicamente mal suplida, aunque la oferta es notablemente constante. La demanda es cubierta aproximadamente hasta la mitad. Hay un aporte desde pozos, que alivia la falta de agua superficial, y que se incrementa en los últimos años de sequía, con la consecuencia de que el acuífero muestra señales de descenso. Los cultivos que se dejan de regar cuando falta el agua, son los cultivos anuales. A partir de 2012, también se ven afectados los cultivos frutales.

En contraste con las zonas de riego antes descritas, las zonas de riego del río Grande bajo Paloma, y Limarí se ven muy bien suplidas, al 100% la mayoría del tiempo, solamente tienen algunas fallas en los últimos años, que, sin embargo, prácticamente no han alcanzado a afectar los cultivos frutales. Esto se debe a que el sistema de reparto les beneficia directamente por pertenecer a la junta de los ríos Grande y Limarí y sus canales no están sujetos a restricción: esto se modeló a través de “Transmission Links” que sacan agua directamente del río sin restricción por concepto de la regla de operación del sistema CASEP, y además estas zonas de riego se modelaron con una prioridad de demanda más alta que las otras zonas de riego regadas por los canales de la CASEP, por pertenecer al río.

Figura 9.33
Zona de riego Pama

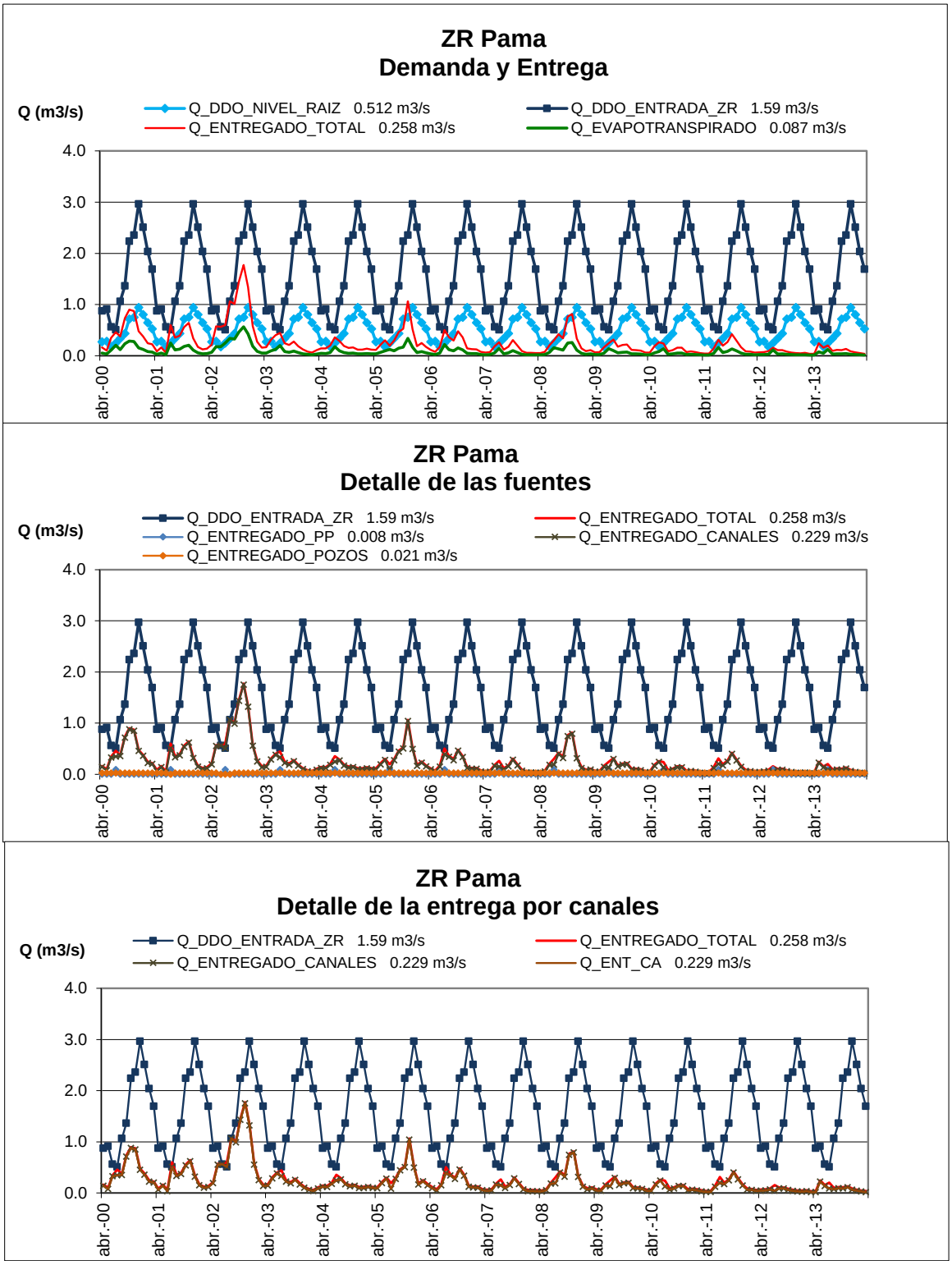
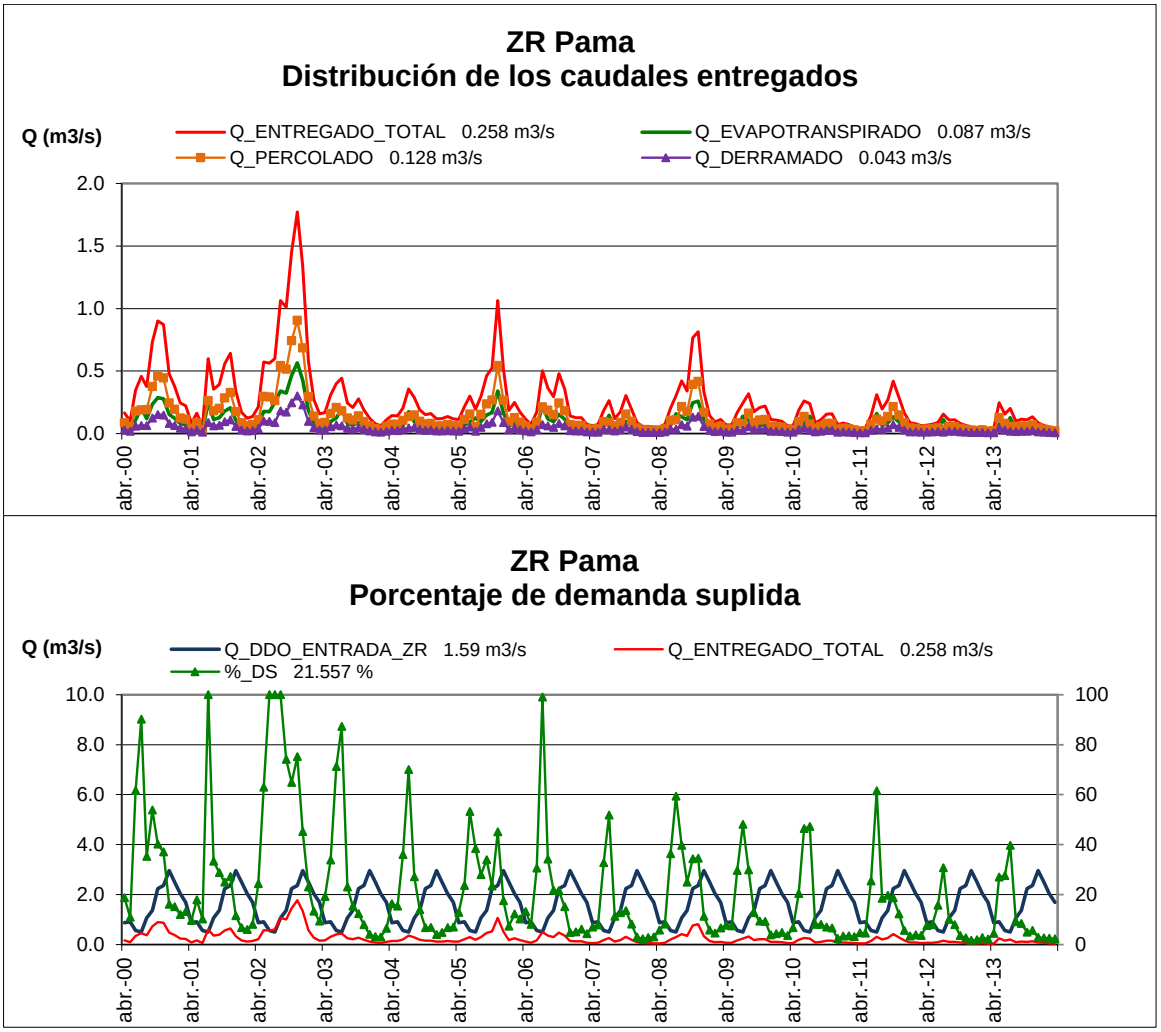


Figura 9.33 (Continuación)
Zona de riego Pama



Según se puede observar en los gráficos, esta zona está crónicamente mal suplida, pero muy especialmente en años secos, a partir de 2004. Tiene escaso acceso al acuífero para fines de riego agrícola. Solamente en años buenos (hasta 2003) los canales han podido suplir adecuadamente la demanda. Por esta razón, las instituciones locales han pensado incorporar el embalse Valle Hermoso en la cabecera de este valle, el cual se analiza en un escenario posterior de operación.

De la ineficiencia de riego, serían más importantes las percolaciones al acuífero que los derrames que retornan al río. De todos modos, las ineficiencias de riego de este sistema no constituyen pérdidas.

La condición crónicamente deficitaria para suplir la demanda es similar a lo que ocurre en las zonas de riego de Combarbalá y, en un grado menor, de Cogotí.

Figura 9.34
Zona de riego Rapel

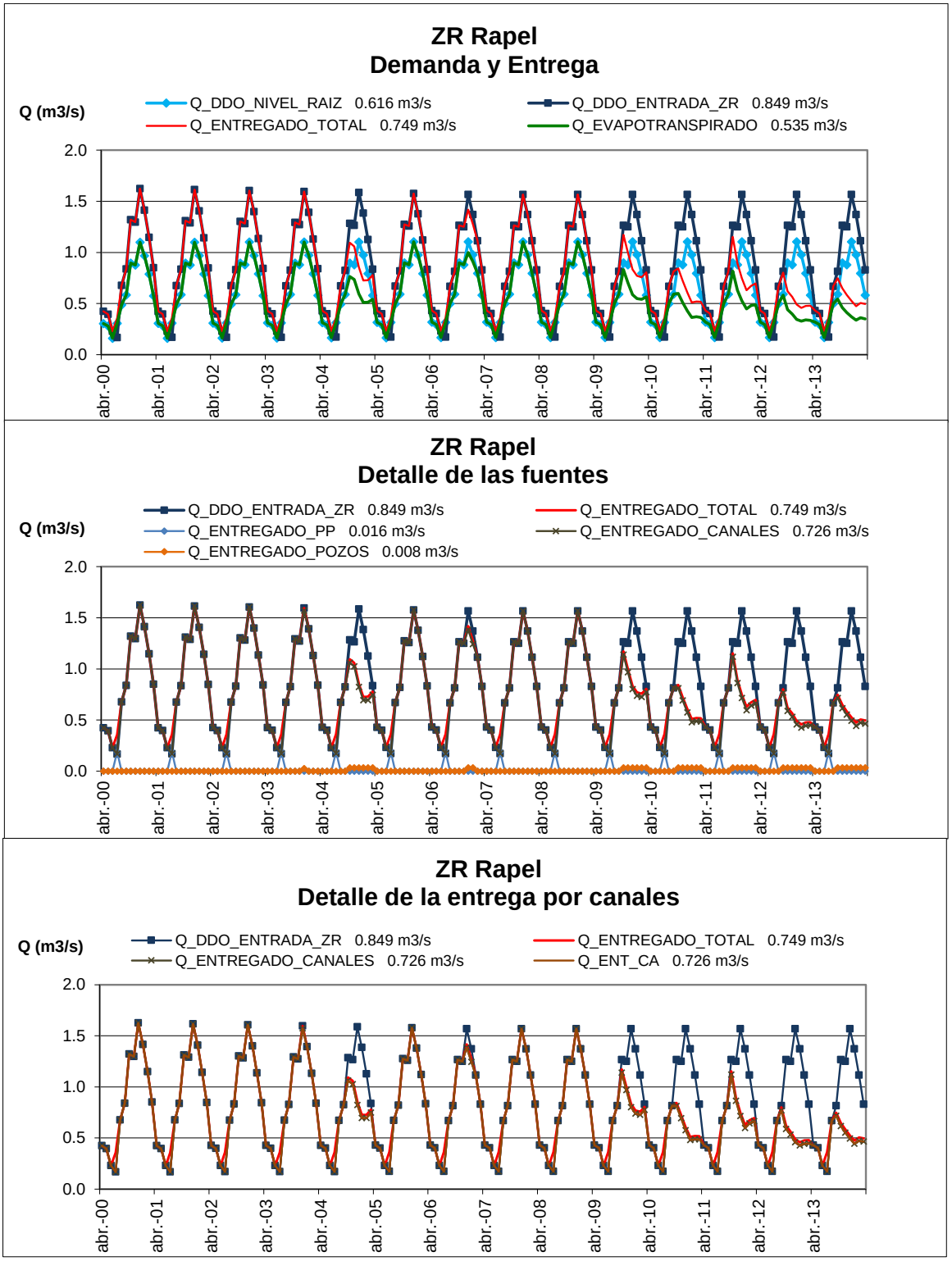
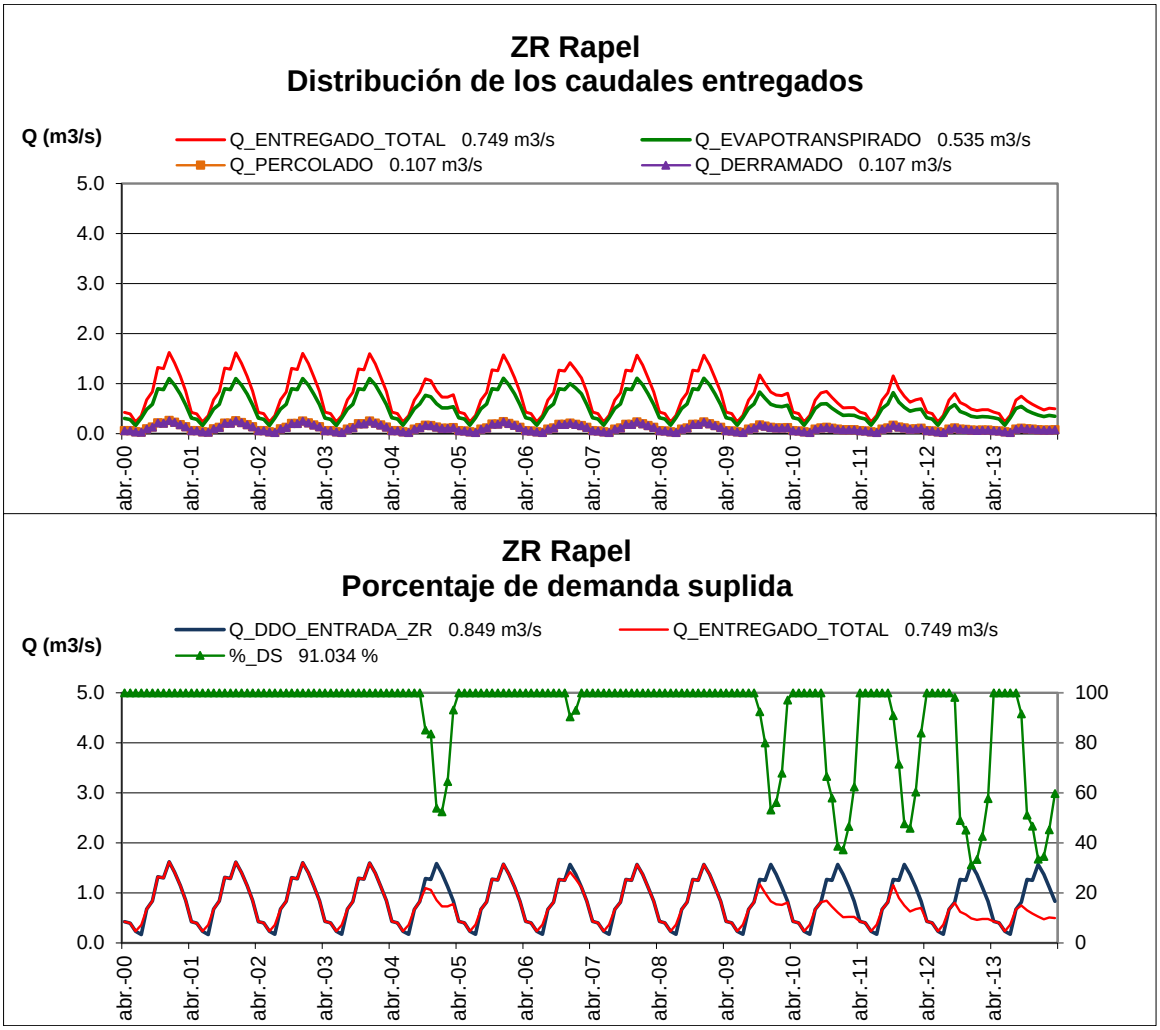


Figura 9.34 (Continuación)
Zona de riego Rapel



Según se puede apreciar en estos gráficos, el sector de riego del río Rapel tiene una realidad muy diferente a la zona de Pama. El agua suele alcanzar para lograr una cobertura razonable de la demanda de riego, en años normales. Solamente a partir de 2010, en los últimos años de sequía, se ha observado una falta de agua que ha significado regar aproximadamente la mitad del área demandante.

En este sector, el uso de pozos es mínimo, el agua se entrega principalmente por canales. Hay derrames de riego importantes que percolan hacia el acuífero, y derrames que retornan al río.

Figura 9.35
Zona de riego Hurtado Alto

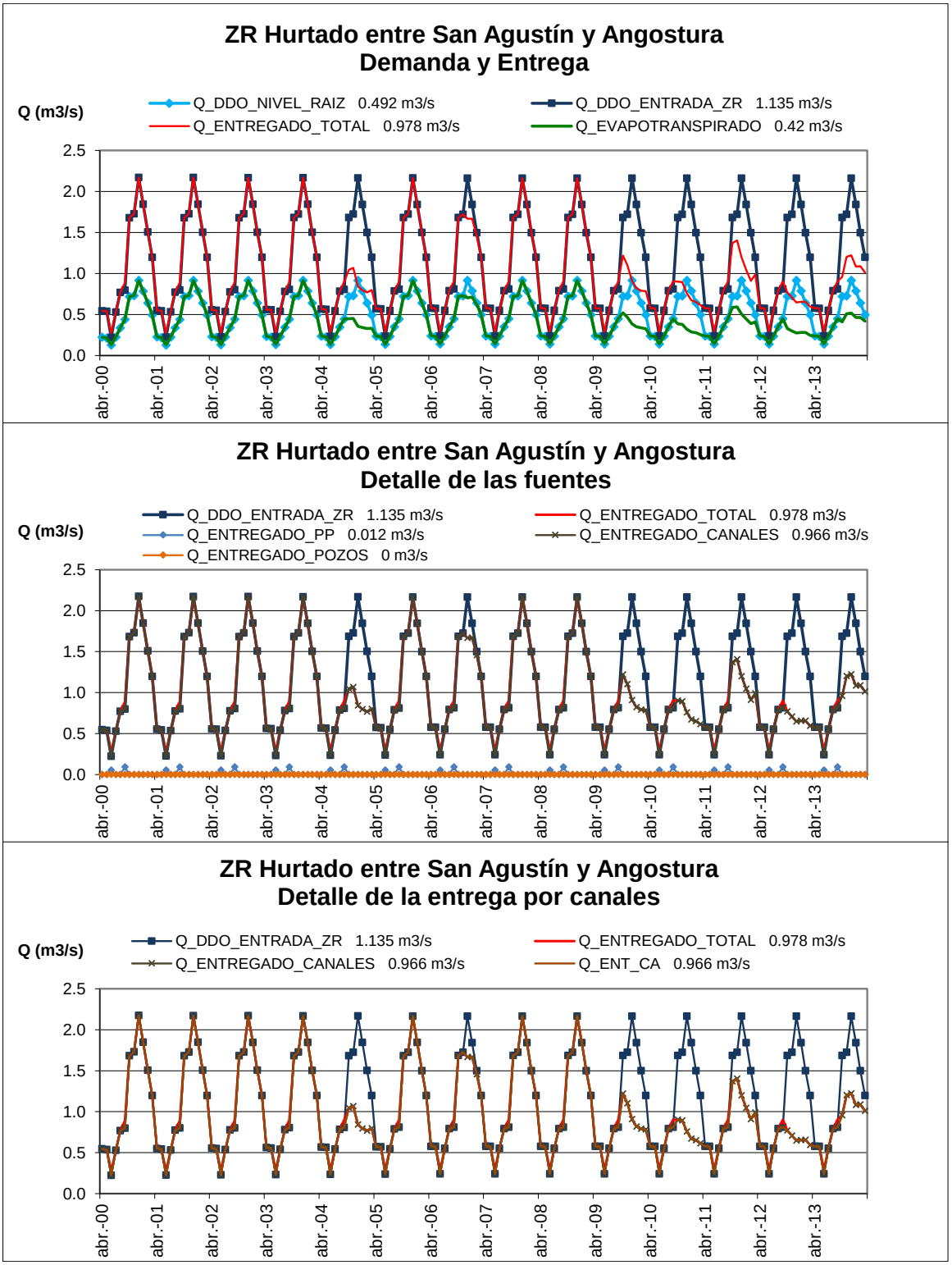
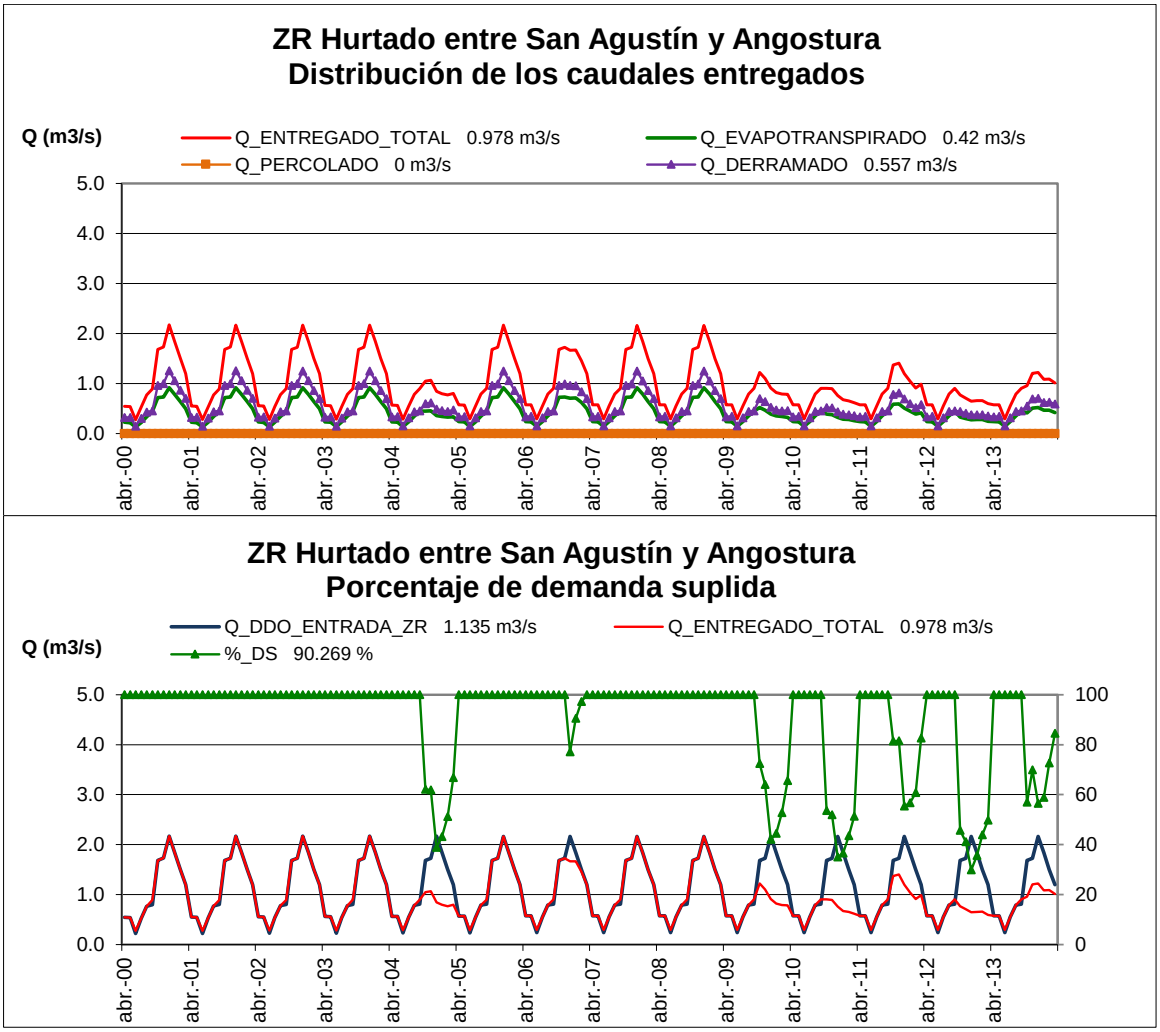


Figura 9.35 (Continuación)
Zona de riego Hurtado Alto



En esta zona se observa algo similar a lo que ocurre en el río Rapel, donde la cobertura de la demanda se logra bien en años normales, pero al no tener regulación, la zona de riego es vulnerable en años secos. En este sector no hay derechos subterráneos para riego (no se modeló el acuífero, por ser muy reducido). El sector tiene baja eficiencia de riego, por lo que los derrames son importantes. Como no se ha definido un sector acuífero, sólo hay retornos al río.

Figura 9.36
Zona de riego Grande entre Cuyano y Rapel

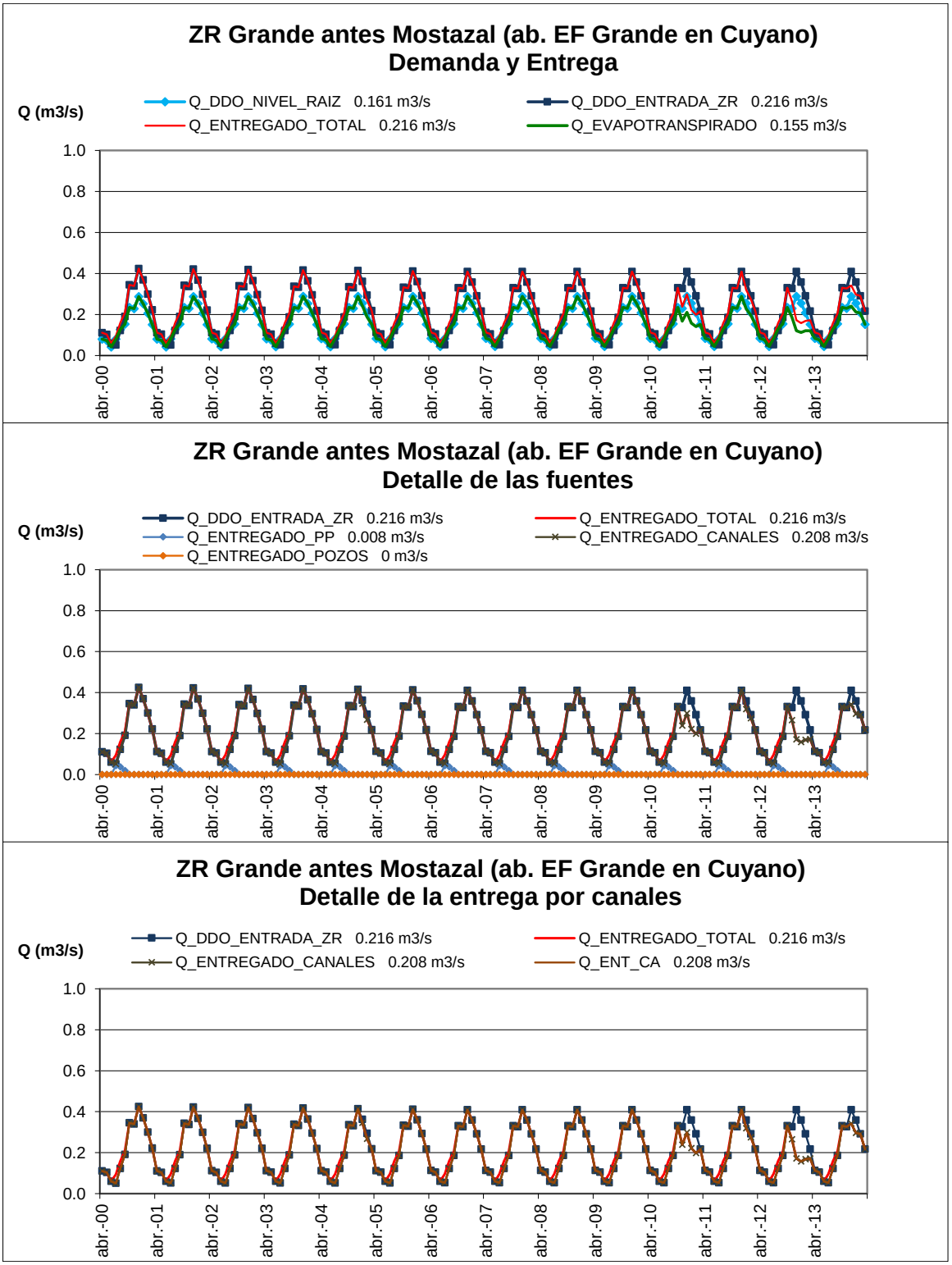
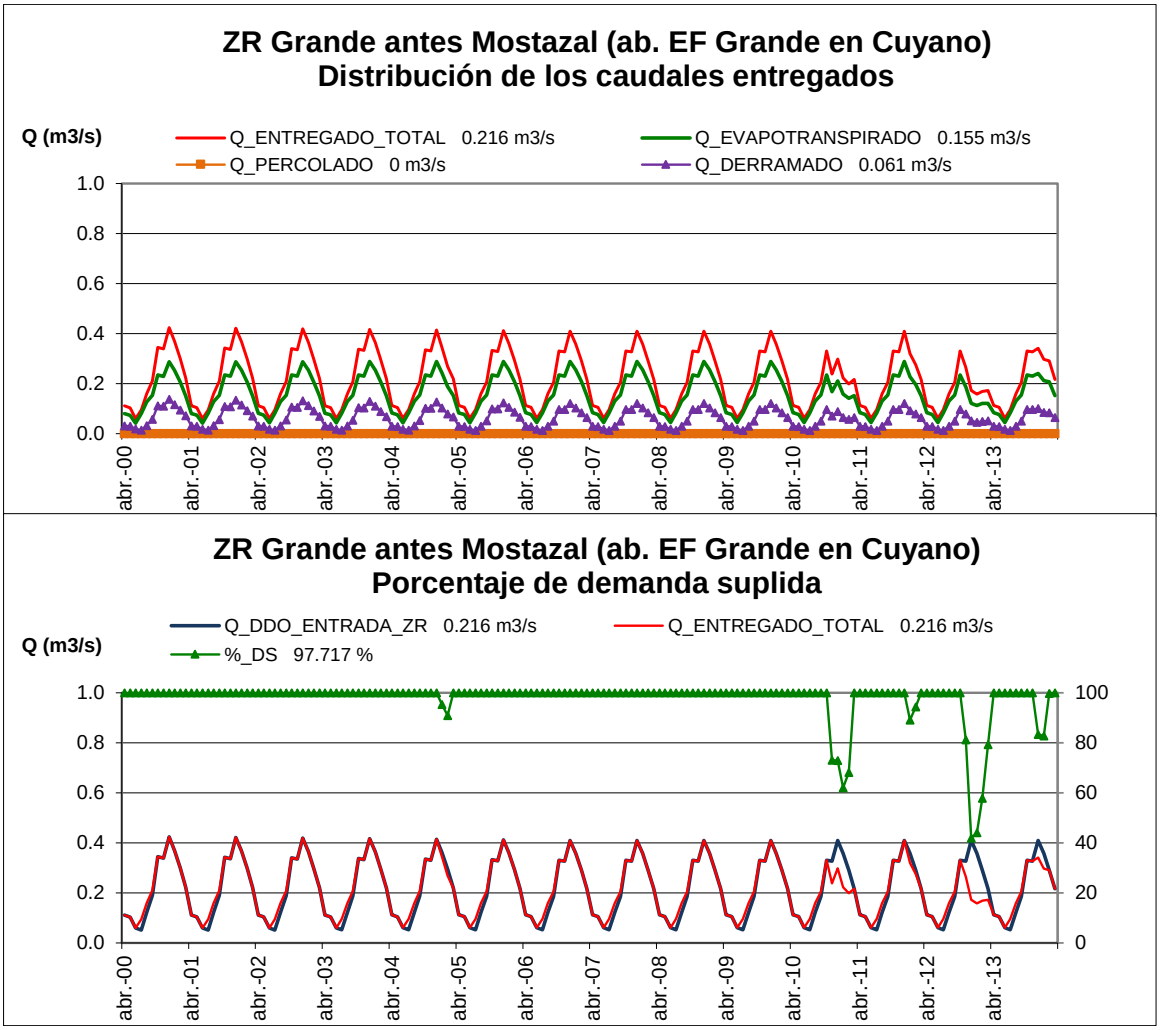


Figura 9.36 (Continuación)
Zona de riego Grande entre Cuyano y Rapel



Se observa que la situación del río Grande sobre embalse Paloma es más favorable que la de los demás ríos tributarios. No presenta problemas de fallas en años normales, e incluso en años de sequía la cobertura de la demanda no es demasiado falente. En este sector, tampoco se ha definido un acuífero, por lo que las ineficiencias de riego constituyen derrames que vuelven al río.

Figura 9.37
Zona de riego Villalón Ingenio

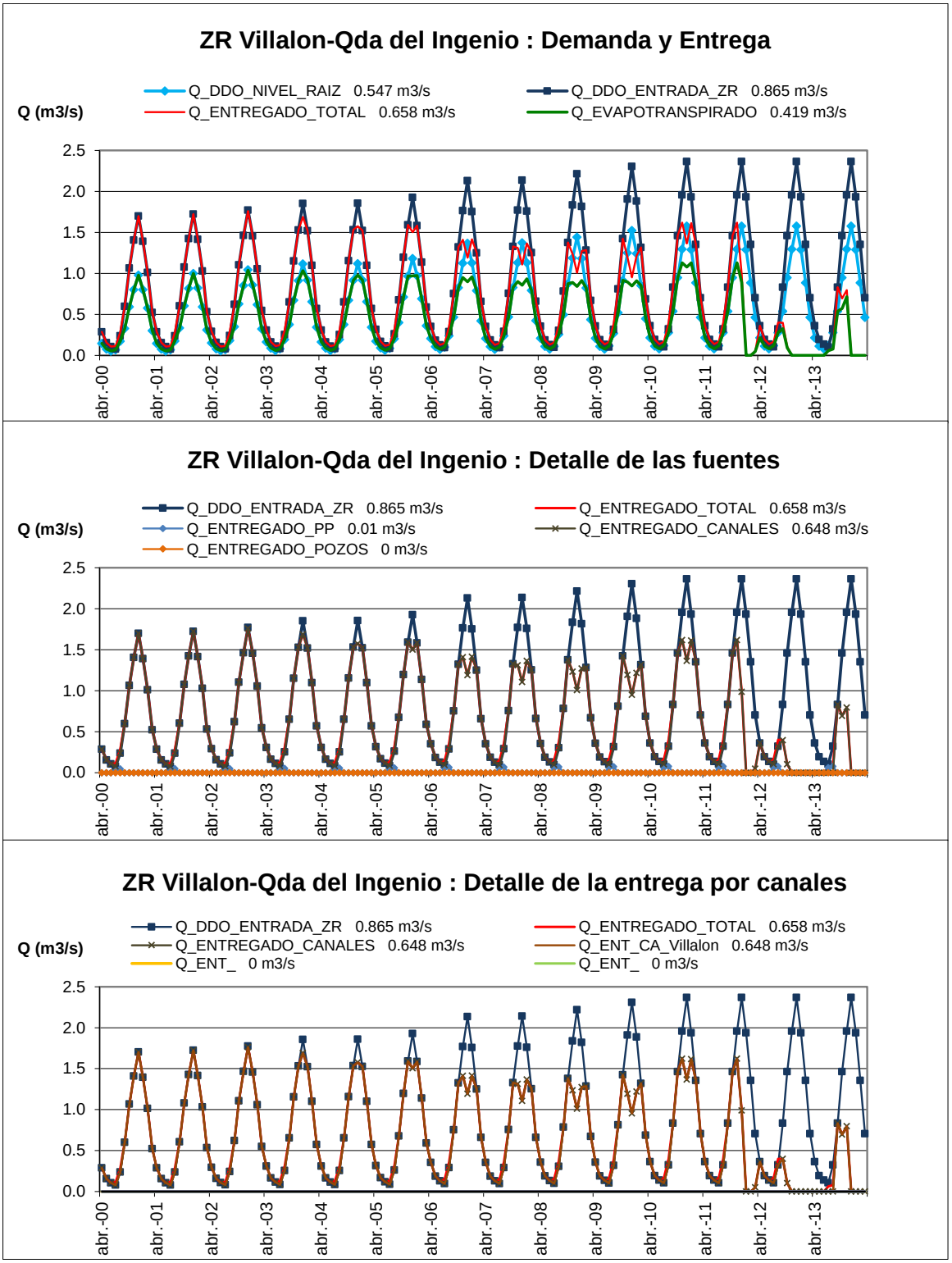


Figura 9.37 (Continuación)
Zona de riego Villalón Ingenio

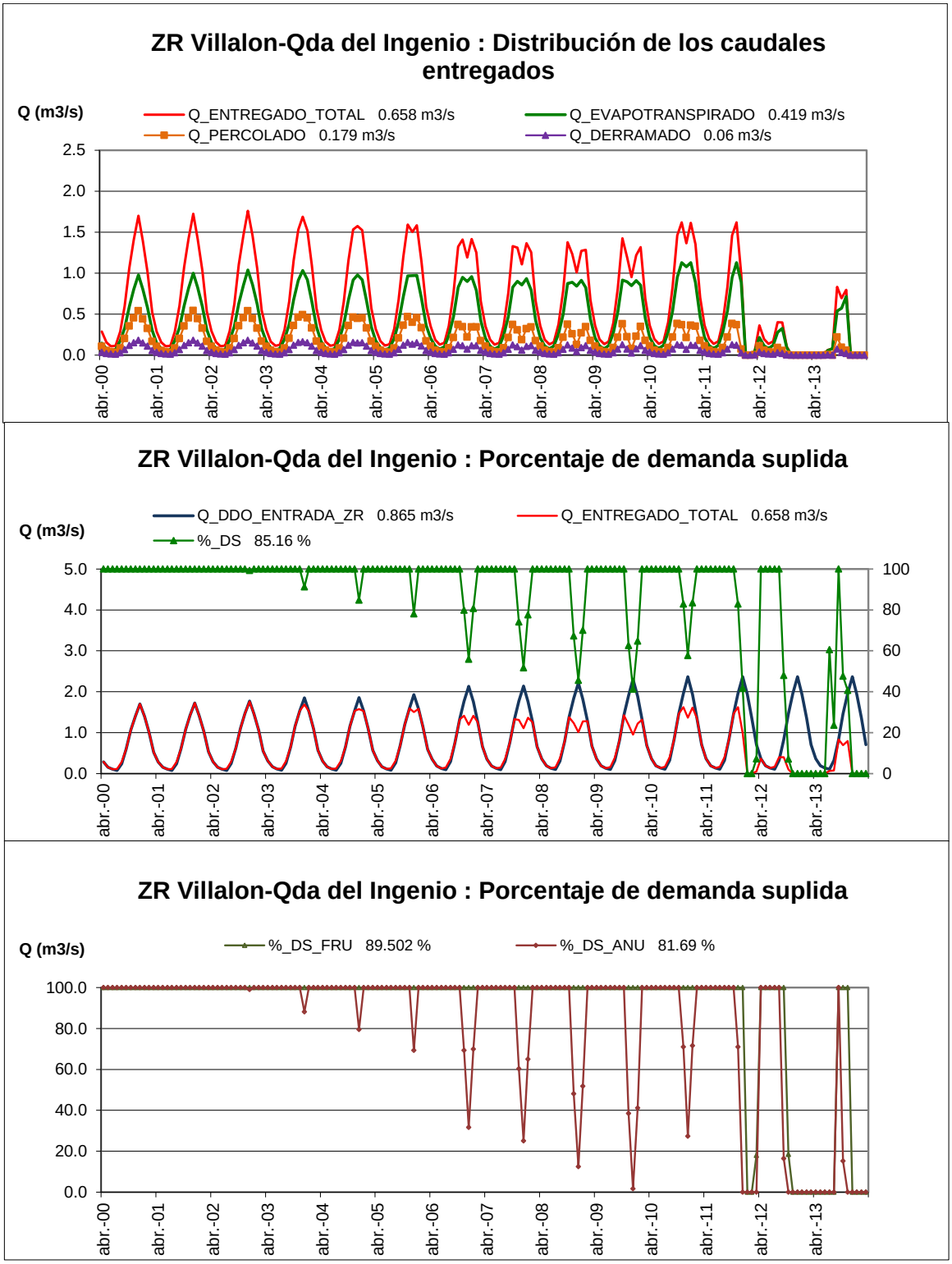


Figura 9.38
Zona de riego Camarico Matriz

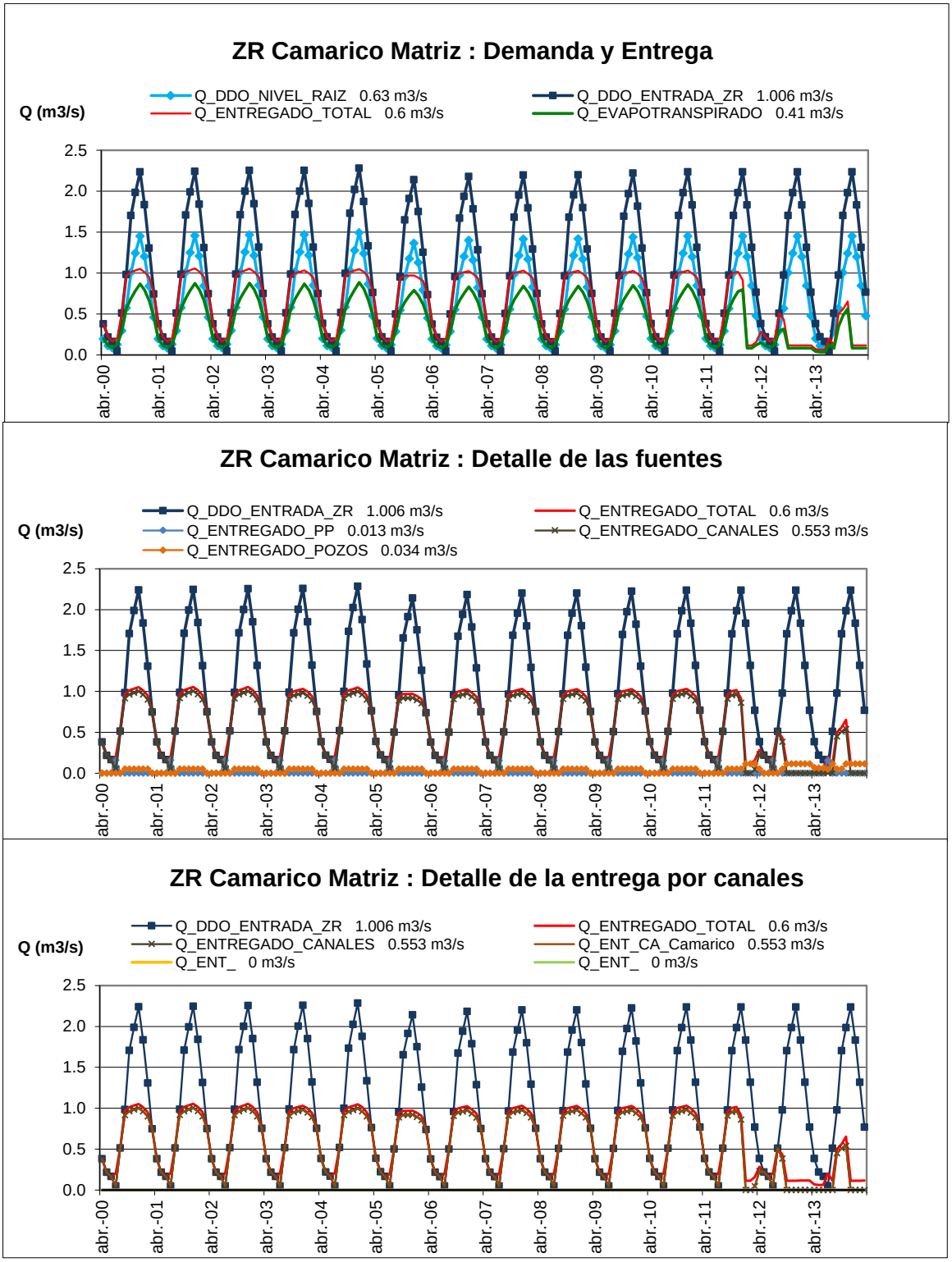


Figura 9.38 (Continuación)
Zona de riego Camarico Matriz

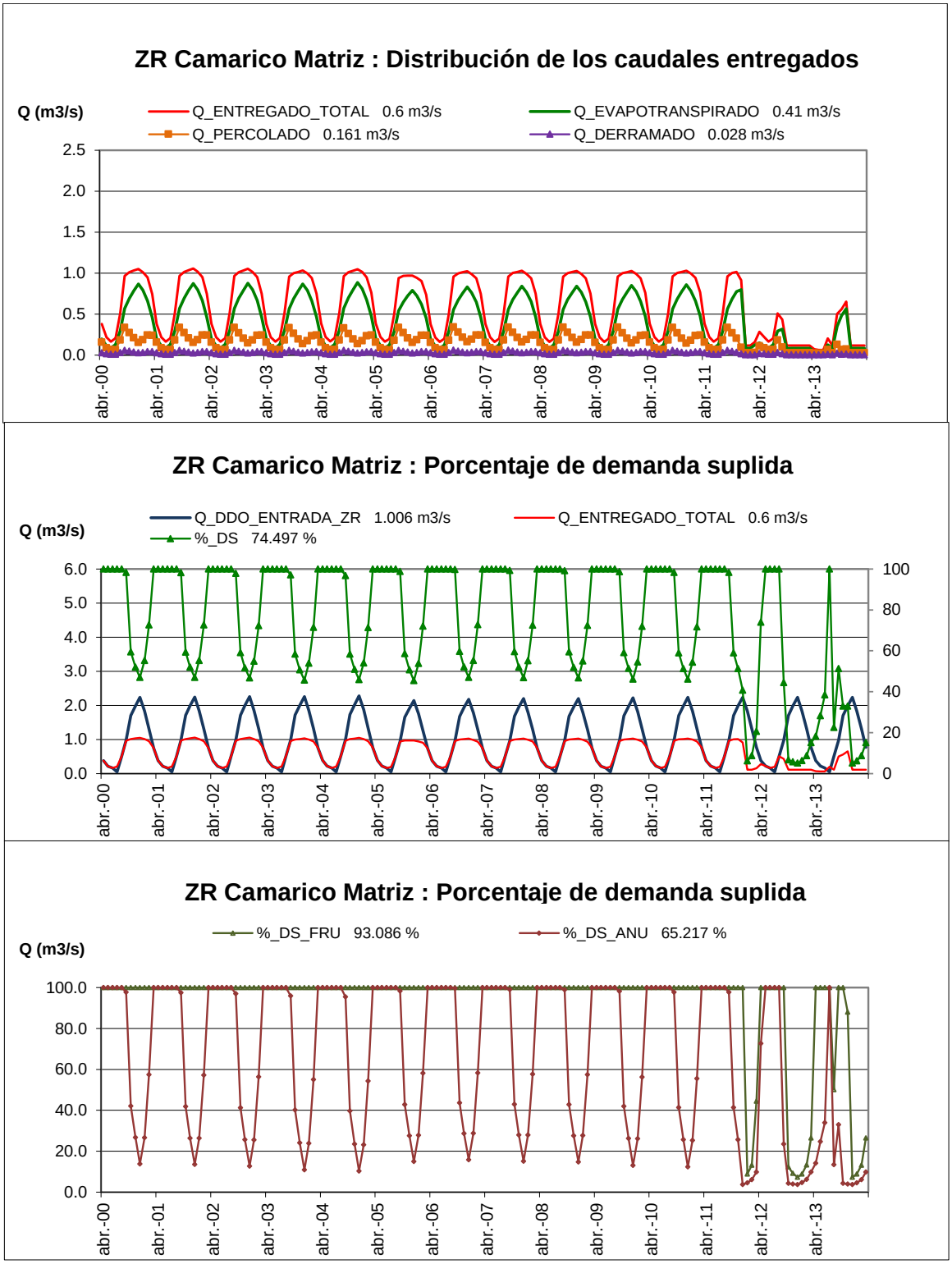


Figura 9.39
Zona de riego Limarí bajo Q. Ingenio

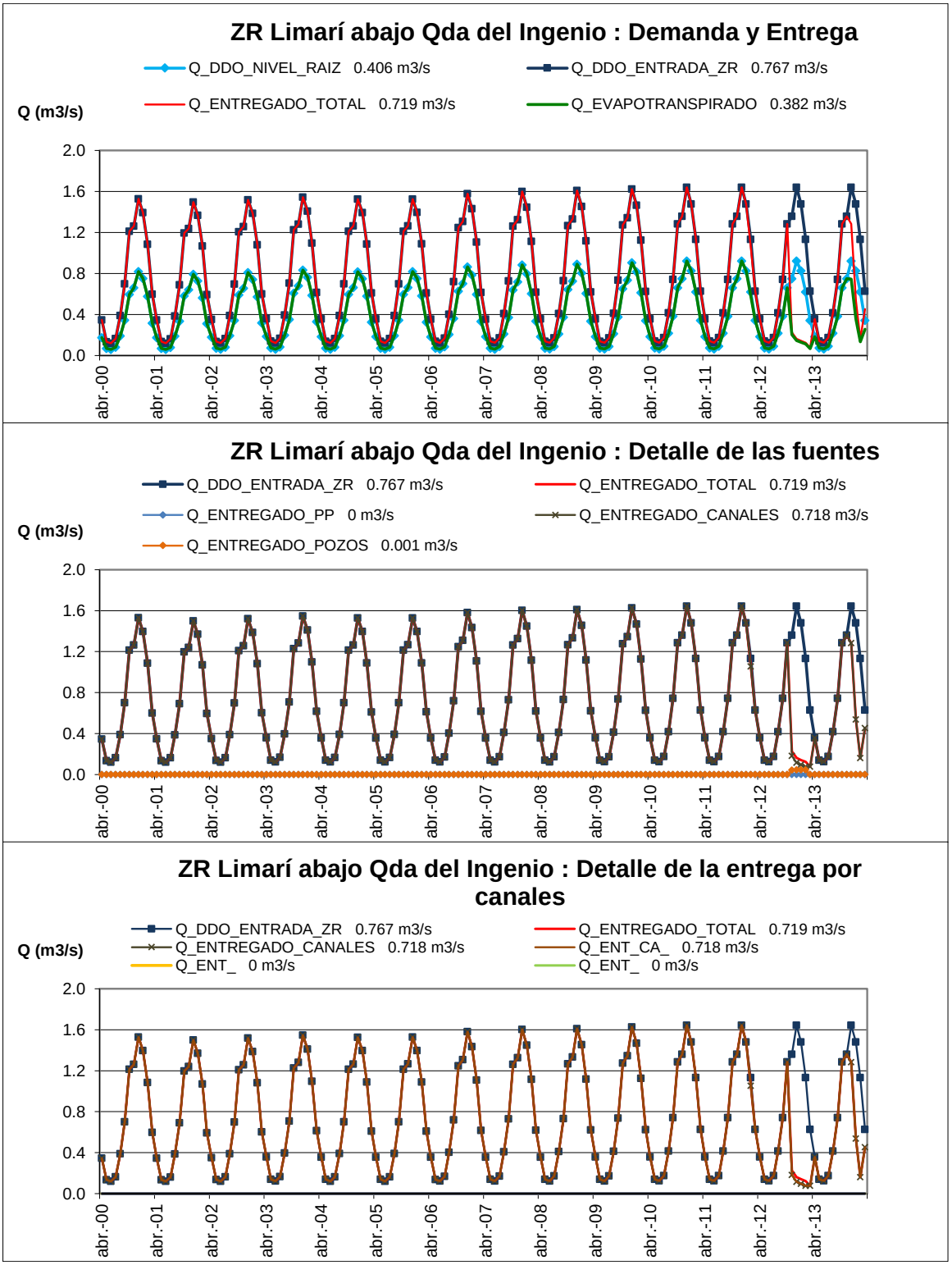
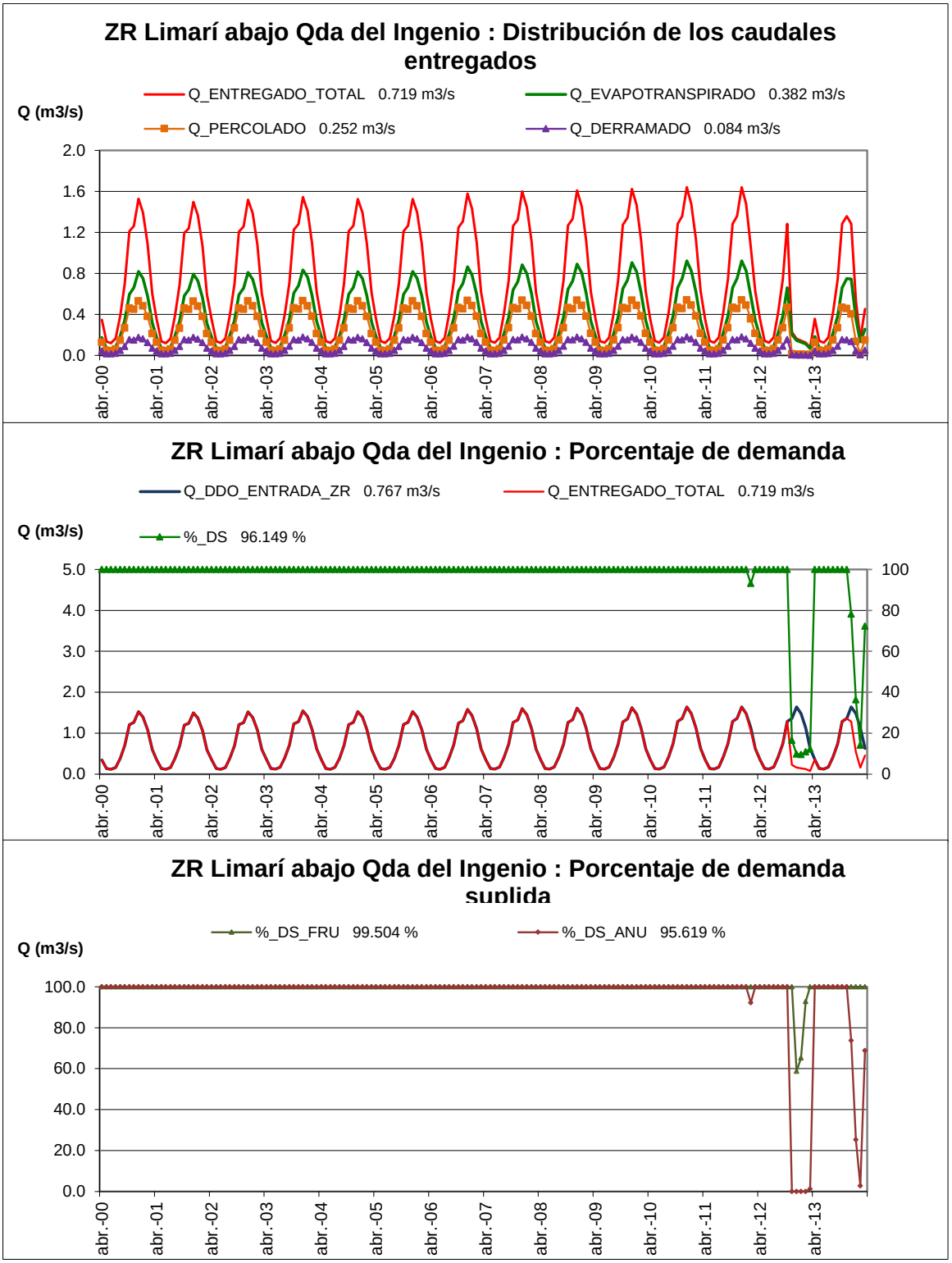


Figura 9.39 (Continuación)
Zona de riego Limarí bajo Q. Ingenio



d) Planilla Calib25_Balance_CA

Esta planilla contiene una hoja para cada canal modelado, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.

De esta forma, se configura un set de 3 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado canal. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunos canales representativos de la cuenca del Limarí.

Desde el punto de vista del suministro desde los canales, las zonas de riego frutales y anuales tienen la misma prioridad 1. En combinación con las prioridades de demanda, las zonas frutales son suplidas antes que las anuales. Cuando una misma zona de riego es abastecida con varios canales, se le da la prioridad de suministro más alta al canal que tiene su bocatoma más aguas arriba, luego al que no tiene más entregas hacia agua abajo, tratando de vaciar primero los canales más pequeños y más cercanos al sector de riego y dejando agua en los canales más grandes que abastecen otros sectores de riego más lejanos aguas abajo.

Todos los canales modelados se encuentran bajo embalse, salvo el canal Palqui-Maurat-Semita. Los canales captan de acuerdo con la rega de operación, con tope en su capacidad. Tienen pérdidas por evaporación, que se han concentrado en el primer tramo de los canales principales, pero que representan pérdidas que se producen a lo largo de todo el sistema, y también pérdidas que van hacia los acuíferos subyacentes.

La totalidad de canales se puede apreciar en la planilla del Anexo Capítulo 9.3. En lo que sigue, Figuras 9.41 a 9.44, se presenta el comportamiento de los canales Cogotí, Camarico, Villalón y Palqui Maurat Semita. En los canales bajo embalse, se puede apreciar la gran constancia de los caudales conducidos, independiente del tipo de año.

Especialmente en el canal Cogotí se puede apreciar esta constancia, salvo en los años 2002, donde se ve claramente la entrega a tope de capacidad, y 2011-2014, donde se aprecia la merma del caudal debido a la sequía, y el estado muy bajo del embalse. También se puede apreciar las grandes pérdidas que tiene este canal, de las cuales la más importante se produce en el primer tramo, debido a que allí se modeló la pérdida por evaporación. Finalmente, se observa la distribución del agua entre las diferentes zonas de riego que el canal surte. Las grandes pérdidas del primer tramo se tratan en un escenario posterior de aumento de eficiencia de conducción.

En el canal Camarico también se aprecian grandes pérdidas, y las entregas a cada una de las zonas de riego. Sólo en los años muy húmedos (2002-2003) en este canal se puede apreciar que el agua entregada al canal es más que la que se requiere para cubrir las demandas y las pérdidas, por lo que hay agua sobrante al final que vuelve al sistema.

El canal Villalón es un caso especial, debido a que recibe las aguas del canal Matriz Recoleta. Esto se aprecia en los gráficos adjuntos, en que el caudal recibido aparece como una entrega negativa. Además, el canal Villalón es el único que se modeló sin pérdidas por

filtración, porque está totalmente revestido. También presenta caudal que exceden la demanda en los años húmedos 2002 y 2003, y que en la modelación vuelve al sistema.

El canal Palqui Maurat Semita no tiene caudales tan constantes, fundamentalmente porque se alimenta desde el río. Pertenece a la Junta de Vigilancia del río Grande, Limarí y Afluentes, pero también tiene acciones de la CASEP. Se observa que tiene una gran cantidad de pérdidas, que fundamentalmente realimentan el río Grande. Alimenta la zona de riego del Palqui.

Se observa que, en forma general, la mayoría de los canales dejan de captar durante varios meses en las temporadas de riego 2012-2013 y 2013-2014 debido a que tienen una restricción por concepto de la regla de operación del sistema. Esta situación, que responde a la aplicación estricta de la regla de operación del sistema, puede no ser totalmente representativa de lo que realmente ha ocurrido, y por lo tanto es posible que represente un cuadro más pesimista que el real. Los volúmenes simulados en estas mismas temporadas en los embalses están por debajo de los realmente observados, lo que se traduce directamente en una restricción más severa de las entregas a los canales del sistema CASEP, en la modelación.

Figura 9.37
Canal Cogotí

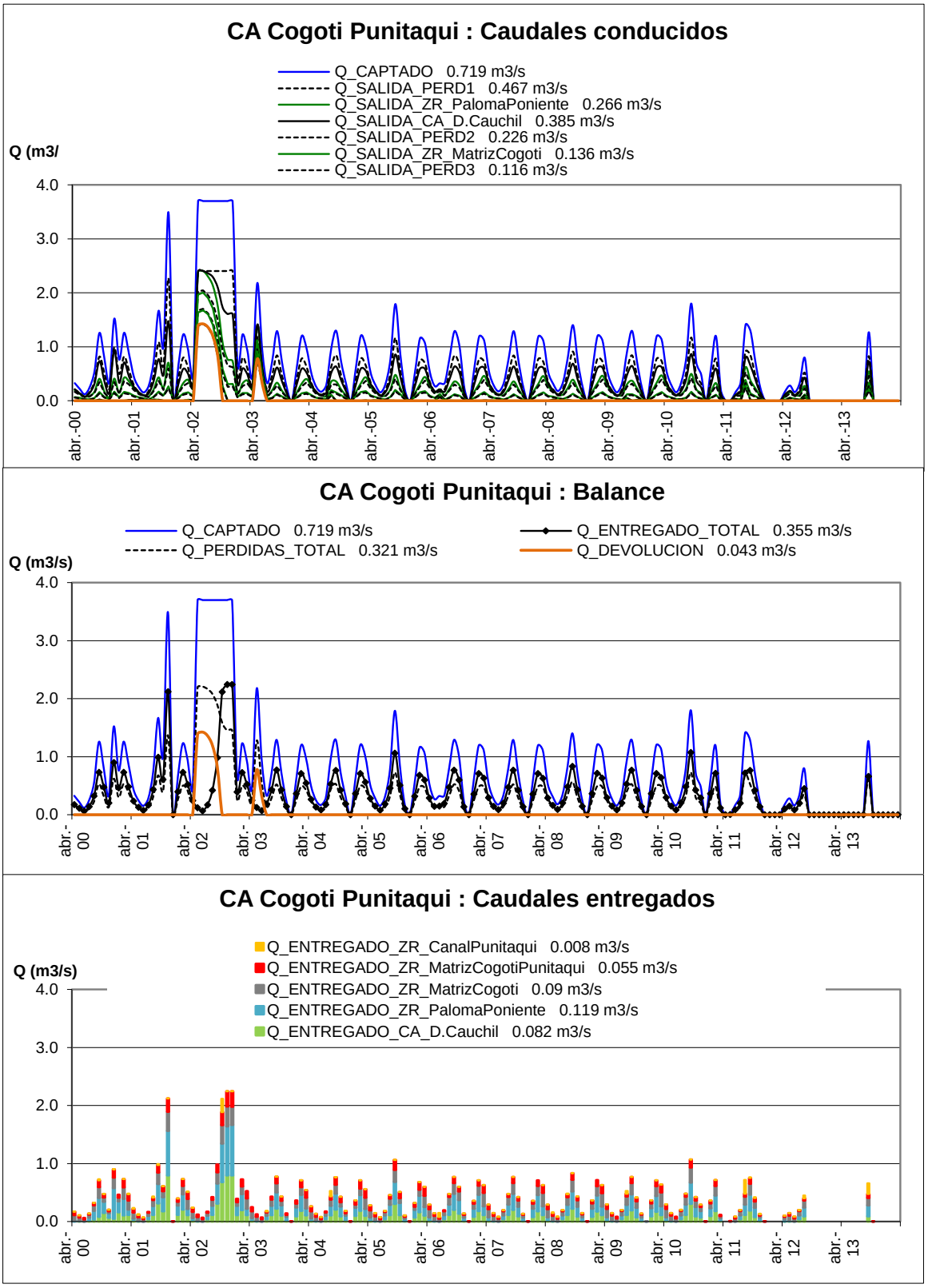


Figura 9.38
Canal Camarico

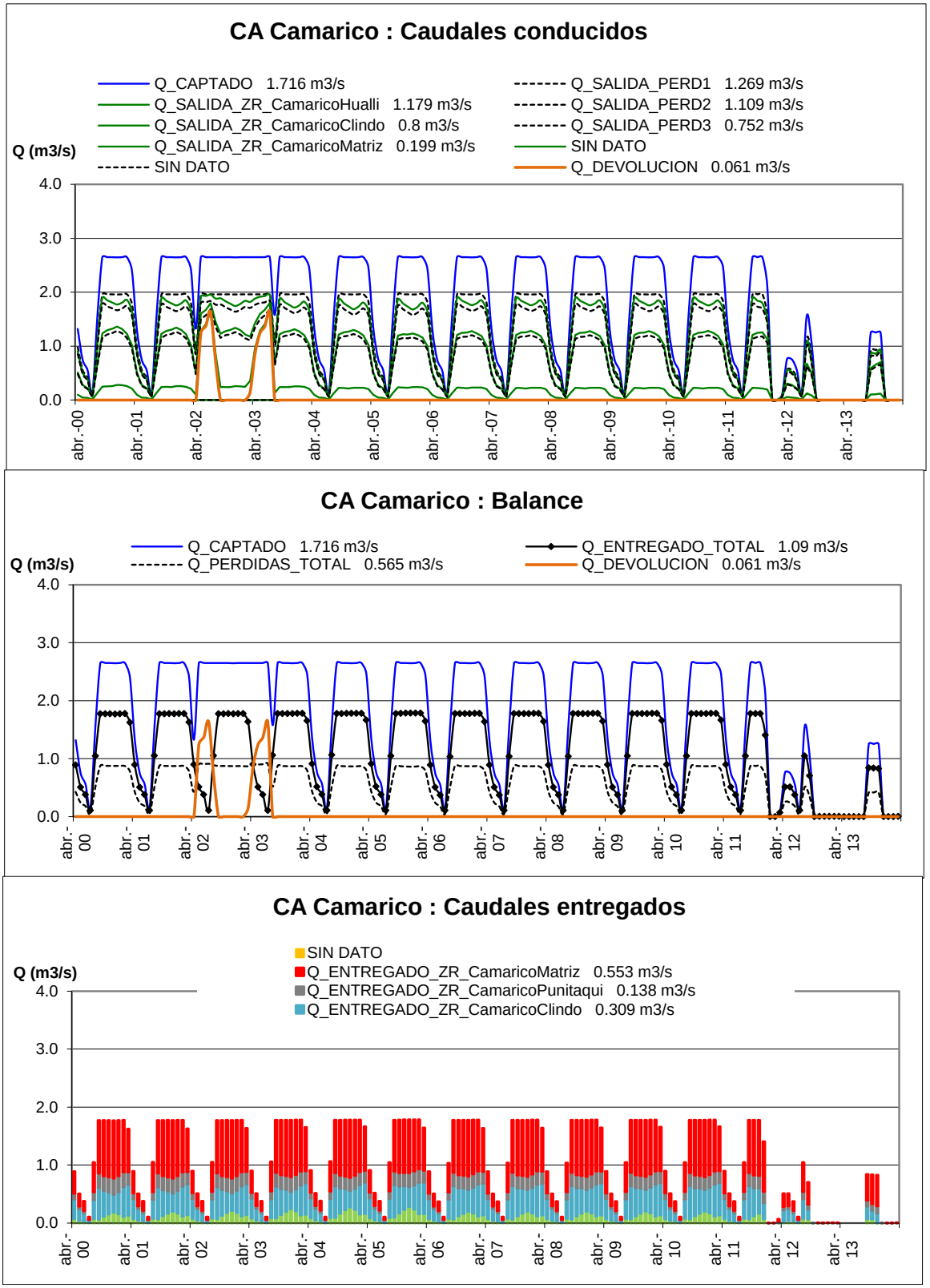


Figura 9.39
Canal Villalón

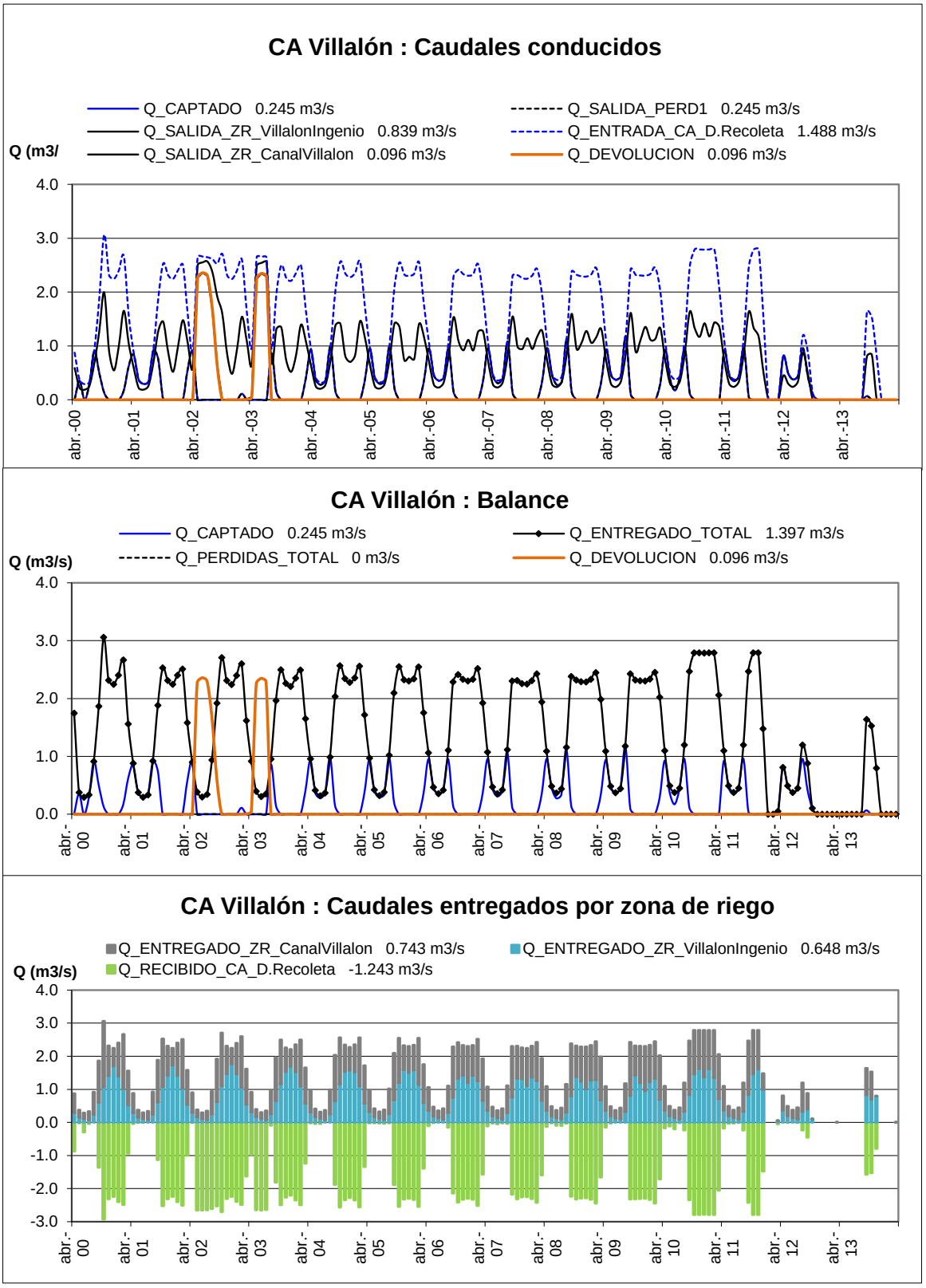
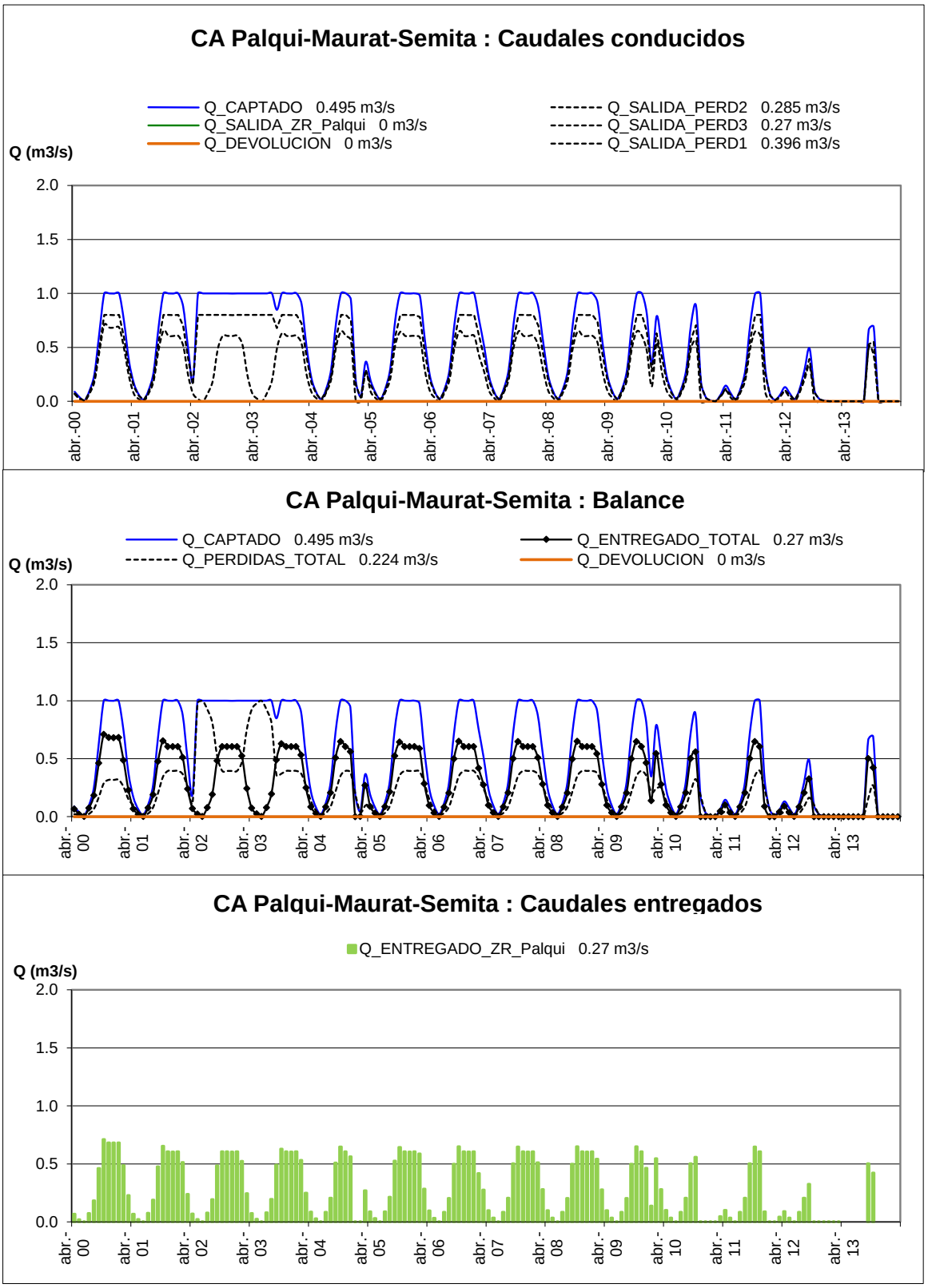


Figura 9.40
Canal Palqui-Maurat-Semita



e) Planilla Calib25_Balance_AC

Esta planilla contiene una hoja para cada acuífero modelado, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.3. La planilla se encuentra en el Anexo Digital Capítulo 9.3.

En la planilla, se configura un set de 4 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian a un determinado acuífero, los que explican la evolución de su volumen, que también se muestra. A continuación, se presenta el set completo de gráficos, para algunos acuíferos representativos de la cuenca del Limarí.

En los gráficos se puede apreciar el origen de las recargas, los afloramientos y recarga neta, los bombeos que se solicitan al acuífero por uso, y el volumen resultante de la operación. En este caso, los gráficos entregan el volumen de los acuíferos, y no el nivel.

En la modelación se asume que el acuífero es capaz de entregar todo el caudal solicitado, mientras exista algún volumen disponible. Probablemente en la realidad esto no sea así, y el caudal entregado vaya disminuyendo a medida que descienden los niveles.

Para la oferta de suministro desde el acuífero, las demandas puntuales como agua potable, industria y evaporación tienen prioridad 1, porque se parte de la base que estas demandas se surten siempre. El riego, tanto de cultivos anuales como frutales, tiene prioridad 2. En combinación con las prioridades de demanda, donde siempre los frutales tienen una prioridad mayor que los cultivos anuales, el agua subterránea destinada al riego surte ambos tipos de cultivos con la misma prioridad de suministro.

En la planilla Calib25_Balance_AC se puede observar que hay diversos acuíferos que tendrían tendencia a bajar en los últimos años de sequía, si la explotación conforme al tope de derechos fuera posible, los cuales serían los siguientes: Quebrada Ingenio, Rapel, El Palqui, Punitaqui y Terrazas Sur del Limarí. Los acuíferos que no marcan tendencia a la baja, ni aun en sequía, son los acuíferos de los ríos Grande sobre Paloma, Huatulame, Cogotí, Pama, Hurtado y Limarí.

Hay que recordar que, según se puede apreciar en la planilla de calibración, en la realidad observada los acuíferos que tienen datos, y muestran una tendencia de descenso, efectivamente son Pama, Grande bajo Paloma, Punitaqui y Terrazas del Limarí. Para los demás, no hay descenso, o no hay datos.

A continuación se muestra el set completo de figuras para dos acuíferos representativos: Pama, representativo del sector con descensos, en la Figura 9.45, y Limarí bajo Quebrada Ingenio, representativo del sector sin descensos, en la Figura 9.46.

En el acuífero del Pama se observa que la recarga disponible potencial proviene tanto desde el cauce como de las ineficiencias de la zona de riego. La recarga disponible en gran medida aflora. Sólo ingresa al acuífero lo que efectivamente es extraído, ya sea por bombeo como por uso evapotranspirativo.

En cuanto a los usos, se observa que hay extracciones de riego y de uso industrial, además de consumo por parte de la vegetación ripariana.

Como resultado de todo lo anterior, el acuífero Pama no presenta una tendencia de descenso en los últimos años, aunque en la realidad comienza a notarse levemente una tendencia al descenso.

En el acuífero de Limarí se aprecia la importancia de las percolaciones desde el riego de cultivos anuales, como fuente potencial principal de recarga del acuífero. Le sigue el riego de frutales. El cauce sólo tiene importancia para la recarga cuando hay crecidas, como en 2002. Lo que se observa en el gráfico siguiente, es que casi todo el caudal disponible para recarga, constituye afloramiento, siendo muy reducido el caudal que efectivamente logra ingresar como recarga al acuífero.

En cuanto a extracciones desde el acuífero, se observa la evapotranspiración de la vegetación ripariana, y algo de bombeo para riego al final del período.

En la Figura 9.46 se observa que el acuífero tiene su nivel invariable, por lo cual no acepta las recargas potenciales disponibles.

Figura 9.41
Acuífero Pama

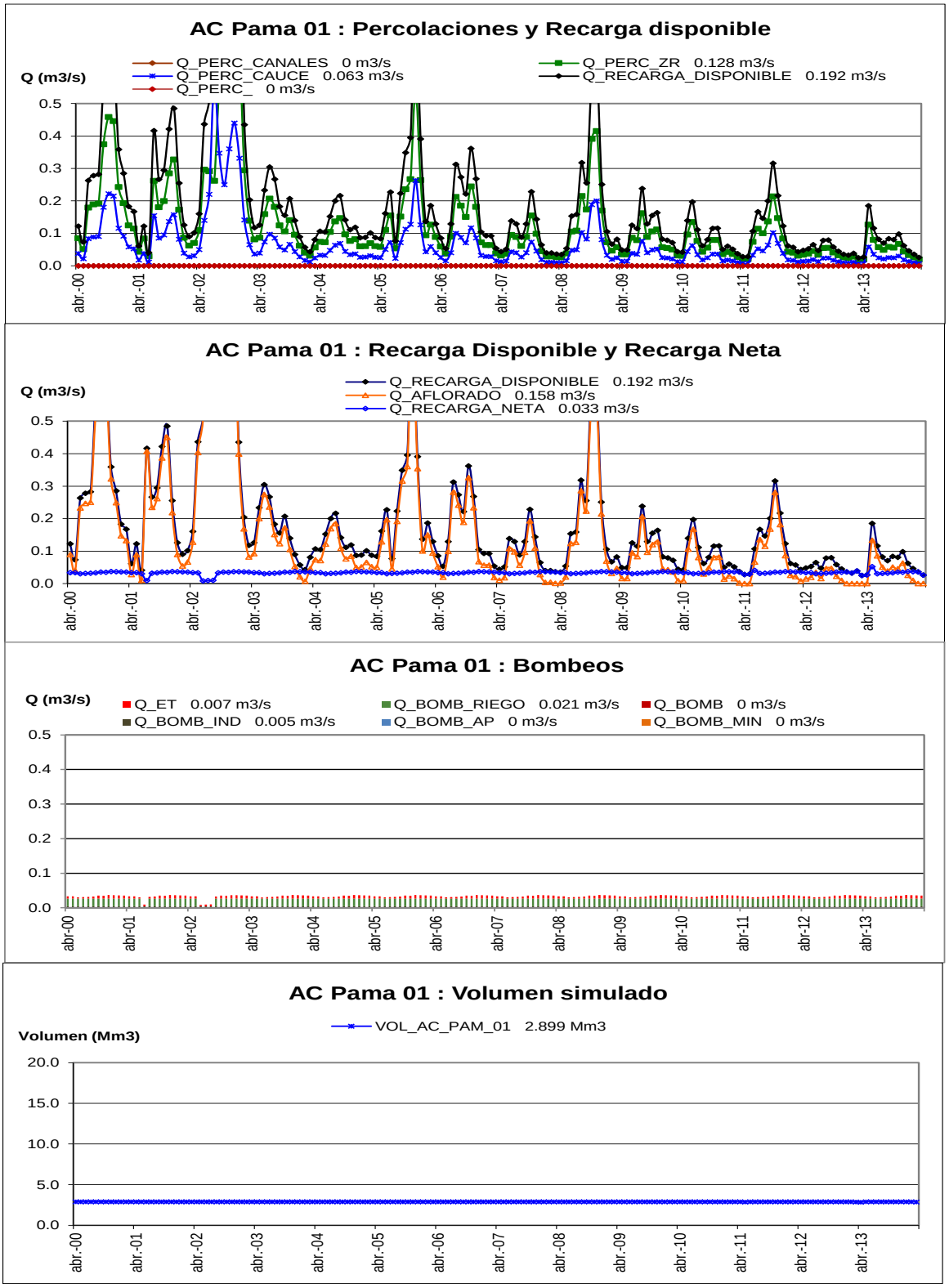
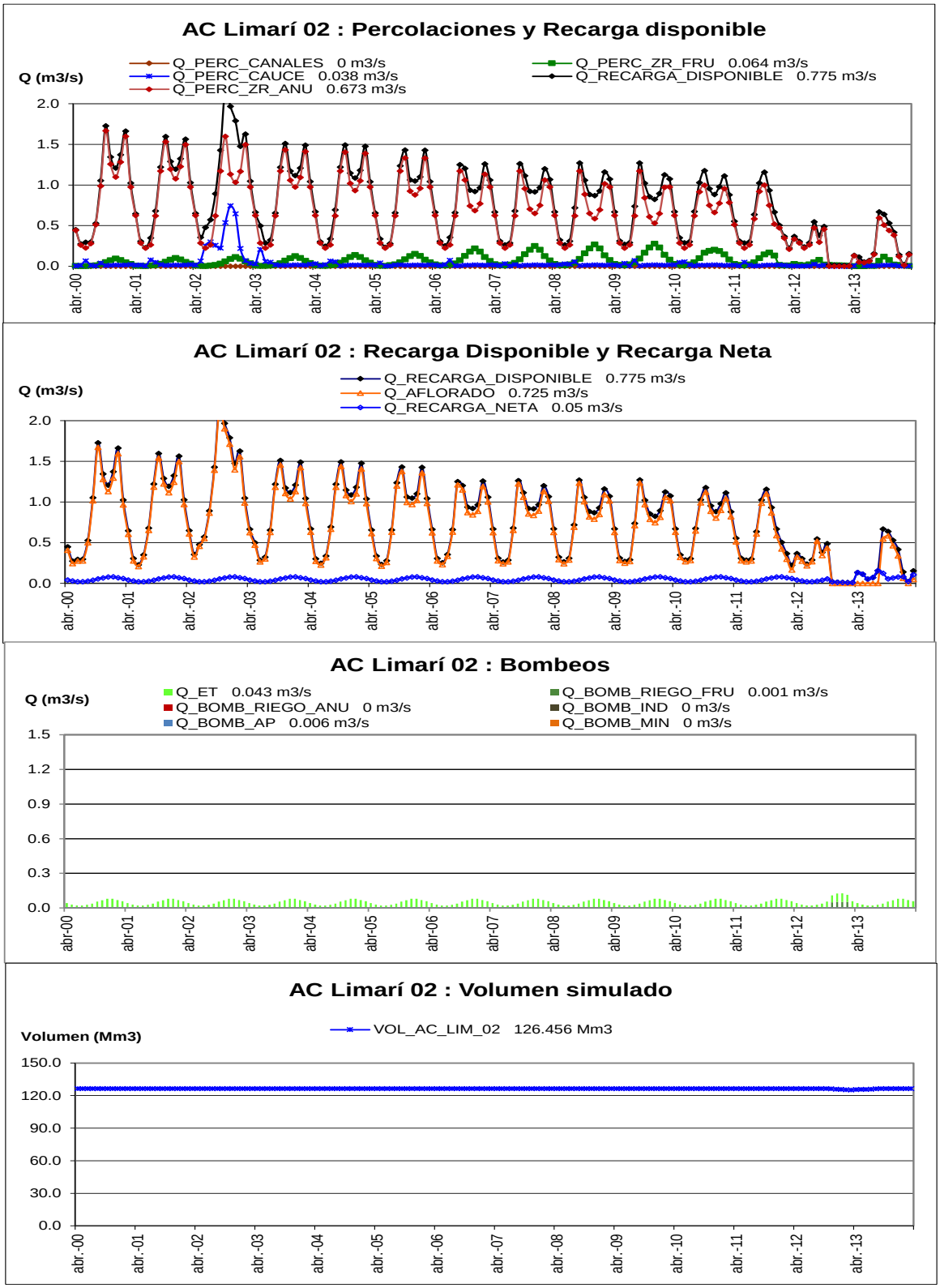


Figura 9.42
Acuífero Limarí bajo Q. Ingenio



9.3.4 Resultados globales del escenario de Calibración

Cada variable en cada una de las planillas se ha presentado con su promedio del período 1999-2014.

A continuación se muestra un cuadro resumen obtenido de cada tipo de planilla, con los promedios de todas las variables analizadas. Estos valores promedio constituyen un valor de referencia, y sirven para comparar escenarios entre ellos. La variabilidad temporal de cada variable se aprecia en las series de tiempo, todas graficadas.

Tabla 9.20
Promedios de variables asociadas a zonas de riego

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_HurtadoOvalle	1800.8	0.420	0.552	0.296	0.000	0.008	0.304	0.251	0.040	0.013	74
ZR_R.HuatulameantesBCC	922.3	0.232	0.294	0.254	0.000	0.003	0.257	0.201	0.000	0.056	91
ZR_R.Huatulame	1528.7	0.367	0.488	0.420	0.000	0.004	0.424	0.318	0.080	0.027	91
ZR_R.Palqui	1727.4	0.409	0.542	0.286	0.017	0.005	0.308	0.256	0.038	0.013	78
ZR_R.Cauchil	1011.5	0.216	0.327	0.095	0.009	0.002	0.106	0.080	0.019	0.006	64
ZR_R.PalomaPoniente	1195.6	0.278	0.388	0.119	0.000	0.003	0.122	0.097	0.000	0.025	62
ZR_R.M.Cogoti	820.8	0.172	0.258	0.090	0.002	0.000	0.092	0.065	0.019	0.008	59
ZR_R.GrandeA.Paloma	936.8	0.193	0.297	0.278	0.001	0.000	0.279	0.183	0.067	0.029	97
ZR_R.M.Paloma	777.6	0.162	0.214	0.173	0.001	0.000	0.174	0.135	0.028	0.012	88
ZR_R.Camarico_Hualli	583.7	0.123	0.175	0.090	0.000	0.003	0.093	0.076	0.013	0.004	67
ZR_R.Limari_Ingenio	2734.6	0.517	0.875	0.822	0.000	0.012	0.834	0.489	0.259	0.086	96
ZR_R.LimariabajoIngenio	2199.4	0.406	0.767	0.718	0.001	0.000	0.719	0.382	0.252	0.084	96
ZR_R.Talhuen	2487.1	0.553	0.681	0.413	0.000	0.011	0.424	0.360	0.016	0.048	78
ZR_R.VillalonIngenio	2534.0	0.547	0.865	0.648	0.000	0.010	0.658	0.419	0.179	0.060	85
ZR_R.CanalVillalon	5730.8	0.978	1.660	0.743	0.000	0.000	0.743	0.492	0.189	0.063	67
ZR_R.M.CogotiPun.	553.8	0.111	0.158	0.055	0.011	0.003	0.069	0.053	0.012	0.004	65
ZR_R.DerCogoti1	888.1	0.179	0.301	0.211	0.010	0.004	0.225	0.136	0.067	0.022	83
ZR_R.DerCogoti2	1072.9	0.197	0.270	0.204	0.010	0.004	0.218	0.161	0.048	0.009	88
ZR_R.CanalPunitaqui	1963.7	0.333	0.481	0.354	0.028	0.007	0.389	0.274	0.086	0.029	88
ZR_R.CamClindo	1890.9	0.365	0.662	0.309	0.020	0.007	0.336	0.197	0.118	0.021	68
ZR_R.CamMatriz	3397.1	0.630	1.006	0.553	0.034	0.013	0.600	0.410	0.161	0.028	74
ZR_R.CamaricoPunitaqui	805.7	0.155	0.249	0.138	0.006	0.003	0.147	0.100	0.040	0.007	74
ZR_R.Tabali	4616.2	0.720	1.166	0.502	0.000	0.000	0.502	0.346	0.117	0.039	62
ZR_HurtadoIntSA_Ang	1617.2	0.492	1.135	0.966	0.000	0.012	0.978	0.420	0.000	0.557	90
ZR_HurtadoARecoleta	198.0	0.056	0.131	0.131	0.000	0.001	0.132	0.056	0.057	0.019	100
ZR_LosMollesAlto8	87.9	0.028	0.039	0.039	0.000	0.001	0.040	0.028	0.000	0.011	100
ZR_Rapel	1906.7	0.616	0.849	0.726	0.008	0.016	0.750	0.535	0.107	0.107	91
ZR_MostazalDes	1001.0	0.324	0.449	0.376	0.000	0.006	0.382	0.272	0.000	0.110	88
ZR_GrandeAMostazalarr.G	498.0	0.161	0.216	0.208	0.000	0.008	0.216	0.155	0.000	0.061	98
ZR_GrandeAMostazalab.G	498.0	0.161	0.216	0.208	0.000	0.008	0.216	0.155	0.000	0.061	98
ZR_GrandePSJuan	1054.4	0.341	0.466	0.449	0.007	0.011	0.467	0.334	0.100	0.033	99
ZR_AfluentePalomaNorte	939.1	0.264	0.374	0.359	0.000	0.000	0.359	0.253	0.000	0.106	98
ZR_CogotiEmbalse	1399.1	0.469	0.775	0.633	0.002	0.011	0.646	0.388	0.193	0.064	87
ZR_Combarbala	1353.4	0.454	0.755	0.223	0.000	0.007	0.230	0.141	0.000	0.089	32
ZR_Pama	1500.0	0.512	1.590	0.229	0.021	0.008	0.258	0.087	0.128	0.043	22
ZR_PunitaquiCh	233.8	0.050	0.106	0.077	0.000	0.001	0.078	0.037	0.000	0.042	84
ZR_PunitaquiALimari	168.2	0.036	0.078	0.044	0.000	0.000	0.044	0.021	0.000	0.024	75
TOTAL	**54634**	**12.227**	**19.855**	**12.439**	**0.188**	**0.192**	**12.819**	**8.363**	**2.433**	**2.020**	**74.3**

Tabla 9.21
Promedios de variables asociadas a canales

Canal	Q captado	Q recibido de otros canales	Q total pérdidas evap + percol	Q entregado ZR	Q entregado a otros canales	Q Sobrante	Capacidad
	m3/s		m3/s	m3/s		m3/s	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.719	0.000	0.321	0.272	0.082	0.043	3.7
CA_D.Cauchil	0.013	0.082	0.008	0.087		0.000	0.8
CA_PalquiMauratSemita	0.495		0.224	0.270		0.000	1.6
CA_SifonElorsa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CA_Camarico	1.716		0.565	1.090		0.061	2.7
CA_M.Paloma	4.639		1.253	0.173	3.213	0.000	8.5
CA_D.Cogoti	0.009	1.877	0.468	0.761	0.528	0.128	4.5
CA_Tabali		0.528	0.026	0.502		0.000	2.5
CA_D.Recoleta		1.337	0.094		1.243		4.5
CA_M.Recoleta	1.630		0.440		1.190	0.000	7.0
CA_Talhuen		0.475	0.062	0.413		0.000	1.6
CA_Tuqui		0.470	0.061	0.296		0.113	0.5
CA_Villalon		1.488	0.000	1.397		0.096	7.0
TOTAL	**9.219**	**6.256**	**3.522**	**5.261**	**6.256**	**0.442**	**44.800**

Tabla 9.22
Promedios de variables asociadas a acuíferos

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q disponible recarga	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.000	0.235	0.100	0.335	0.296	0.038	0.022	0.007	0.009	0.000	0.000	0.038
AC_GRA_02	3.7	0.000	0.252	0.000	0.252	0.218	0.034	0.020	0.000	0.014	0.000	0.001	0.035
AC_GRA_03	62	0.468	0.042	0.126	0.636	0.594	0.042	0.034	0.004	0.005	0.000	0.001	0.044
AC_HUA_01	13.4	0.108	0.020	0.080	0.208	0.200	0.007	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.007
AC_COG_01	4.7	0.000	0.062	0.193	0.255	0.234	0.021	0.011	0.002	0.008	0.000	0.000	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.000	0.063	0.128	0.191	0.158	0.033	0.007	0.021	0.000	0.000	0.005	0.033
AC_HUR_04	2.9	0.000	0.022	0.057	0.079	0.051	0.028	0.020	0.000	0.008	0.000	0.000	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.269	0.021	0.041	0.331	0.319	0.011	0.000	0.000	0.007	0.000	0.004	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.061	0.033	0.258	0.352	0.296	0.056	0.055	0.000	0.000	0.000	0.001	0.056
AC_ING_01	38.1	0.000	0.003	0.016	0.019	0.001	0.018	0.016	0.000	0.005	0.000	0.000	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.000	0.038	0.737	0.775	0.725	0.050	0.043	0.001	0.006	0.000	0.000	0.050
AC_PAL_01	19.1	0.022	0.000	0.058	0.080	0.033	0.047	0.000	0.025	0.011	0.000	0.020	0.056
AC_PUN_01	4.8	0.000	0.011	0.004	0.015	0.005	0.011	0.000	0.002	0.012	0.000	0.000	0.014
AC_RAP_01	9.2	0.000	0.019	0.107	0.126	0.052	0.074	0.061	0.008	0.008	0.000	0.000	0.077
AC_TER_01	70.1	0.225	0.000	0.449	0.674	0.531	0.143	0.029	0.096	0.010	0.000	0.043	0.178
AC_TER_02	10.3	0.418	0.000	0.079	0.497	0.470	0.027	0.000	0.021	0.000	0.000	0.010	0.031
TOTAL	**513.6**	**1.571**	**0.821**	**2.433**	**4.825**	**4.183**	**0.640**	**0.318**	**0.187**	**0.110**	**0.000**	**0.085**	**0.700**

9.3.5 Comentario acerca del escenario de Calibración

A partir de las tablas antecedentes es posible hacerse una idea acerca de los grandes números en la cuenca del Limarí.

La configuración histórica de la cuenca permite suplir las demandas de riego, como promedio ponderado de toda la cuenca, y considerando tanto los meses de verano como los de invierno, en un 74,3%. Este porcentaje de cobertura muestra que la cuenca tiene una gran parte de su área sin riego seguro.

El caudal tanto captado directamente por los canales, o recibido de otros, para lograr esta cobertura, es de 15,5 m3/s, de los cuales 12,4 llegan a las zonas de riego. La demanda a suplir en las zonas de riego es de 19,9 m3/s. Los acuíferos aportan 0,2 m3/s, debido a que hay muy pocos derechos constituidos.

La devolución de canales al final de su trayecto, sería de 0,4 m3/s. Los afloramientos de acuíferos llegarían a 4,2 m3/s, mientras que la recarga neta alcanza 0,6 m3/s.

La extracción total desde acuíferos alcanza 0,7 m3/s.

A modo ilustrativo, se ha agregado una planilla con los resultados del caudal de salida al mar. En el caso de esta cuenca, el caudal de salida al mar se registra en la estación Limarí en Panamericana. En el período de calibración, el caudal de salida simulado resulta de 3,95 m3/s en promedio, aunque este valor incluye una crecida de 2002. El valor promedio de caudal de salida al mar sin considerar la crecida resulta de 1,73 m3/s, que corresponde al período 2004 y 2014.

A nivel de zona de riego, se puede apreciar que el porcentaje de cobertura de la demanda es muy variable dentro de la cuenca. Hay zonas con un área de riego relativamente muy grande, tratando de proveerse de un recurso hídrico escaso, como el Pama y el Combarbalá, mientras que hay zonas casi siempre bien suplidas, como el Hurtado, Rapel, Grande y Limarí, donde las demandas están dentro de lo que los recursos existentes permiten suplir.

Por otro lado, se aprecia que las zonas más deficitarias son las asociadas al Sistema Paloma, que no tienen respaldo de acciones de río, como las terrazas de Punitaqui por el sur del río Limarí, y las zonas de Q.Ingenio y Q. Seca (Villalón) por el norte, donde se extiende gran parte del área cultivada de esta cuenca.

En relación con los canales, ellos reflejan la complejidad del Sistema Paloma, al haber entregas entre ellos.

En relación con los acuíferos, se puede decir que muy mayoritariamente ellos están en un estado alto, debido a que las extracciones que permiten los derechos, son menores que el potencial de recarga. Esto significa que, en muchos casos, hay recargas disponibles que no

están siendo aprovechadas, debido al estado lleno de los acuíferos, y que en algunos casos no son despreciables, como los acuíferos de los ríos Grande y Limarí.

9.4 Escenario Futuro Base 1

El escenario Futuro Base 1 sirve de base de comparación a todos los escenarios de operación que se simulan posteriormente.

9.4.1 Configuración del escenario Futuro Base 1

Este escenario se configuró de la siguiente manera:

- Se configuró sobre el escenario Calib25.

- Hidrología del período 1999-2014, aplicada en el período 2014-2029.

- Las demandas de riego no crecen, debido a que el área potencial de cultivos es el área máxima reconocida en Google Earth, tiene casi 54000 ha, y es difícil acercarse a la condición de riego total.

- Las demandas de agua potable no crecen, porque las localidades abastecidas tanto con agua potable urbana como rural, son muy pequeñas, no muestran una tendencia de crecimiento, y en términos de modelación a nivel de cuenca su demanda no tiene peso cuantitativo. La única excepción es Ovalle, para cuya demanda se ha asumido un crecimiento de 2% anual a partir de 2014.

- Se incorporan 2 nuevos embalses, desactivados:
  * Valle Hermoso en el río Pama (20 Mm3)
  * Rapel en el río Rapel (14 Mm3)

- Se actualizaron los volúmenes iniciales de embalses y acuíferos

- Se reordenaron algunas prioridades de las zonas de riego servidas por los embalses, para que éstos sólo entreguen a sus respectivas zonas de riego, sin estar disponibles para el resto del sistema, una vez que se activen.

9.4.2 Presentación de resultados relevantes

A continuación se presentan los resultados de este escenario, en base a las planillas Calib_SUP, Calib_SUB, Balance_ZR, Balance_CA y Balance_AC. El contenido de la planilla Calib_SUB, en esta planilla referido a niveles, se encuentra también en la planilla Balance_AC, referido a volúmenes. En todas las planillas se muestra el período 2011-2029. En las Tablas finales se presenta el promedio del período 2014-2029.

a) Planilla FuturoBase1_Calib SUP

Esta planilla se presenta para mostrar el comportamiento de aguas superficiales y embalses existentes, que se espera a futuro en la cuenca, bajo las condiciones indicadas, sin intervenciones ni obras de importancia.

De esta planilla, en este capítulo sólo se muestran los embalses, en los cuales se observa que la regla de operación generaría comportamientos similares a los históricos, si la hidrología de entrada fuera similar a la histórica, en el futuro.

Figura 9.43
Embalse Recoleta

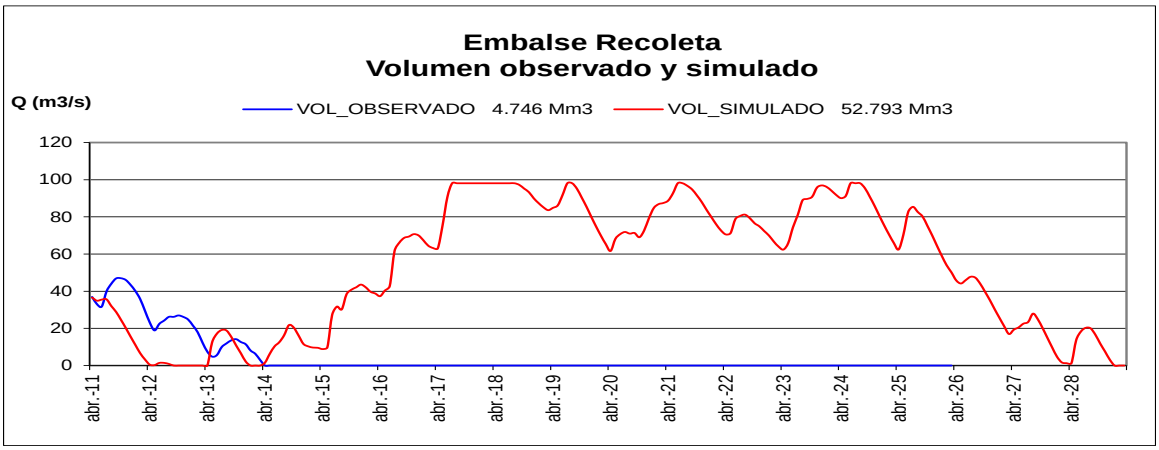


Figura 9.44
Embalse Cogotí

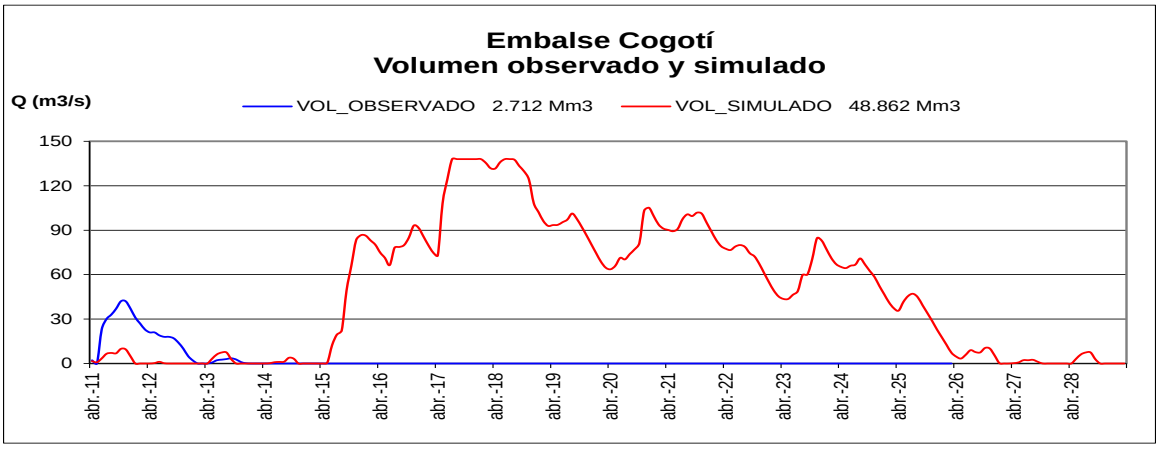
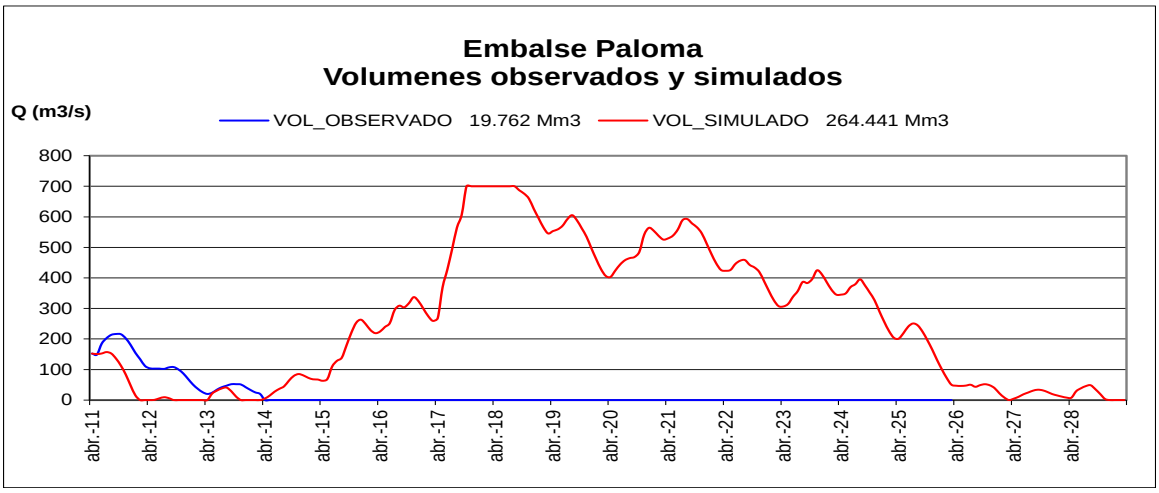


Figura 9.45
Embalse Paloma

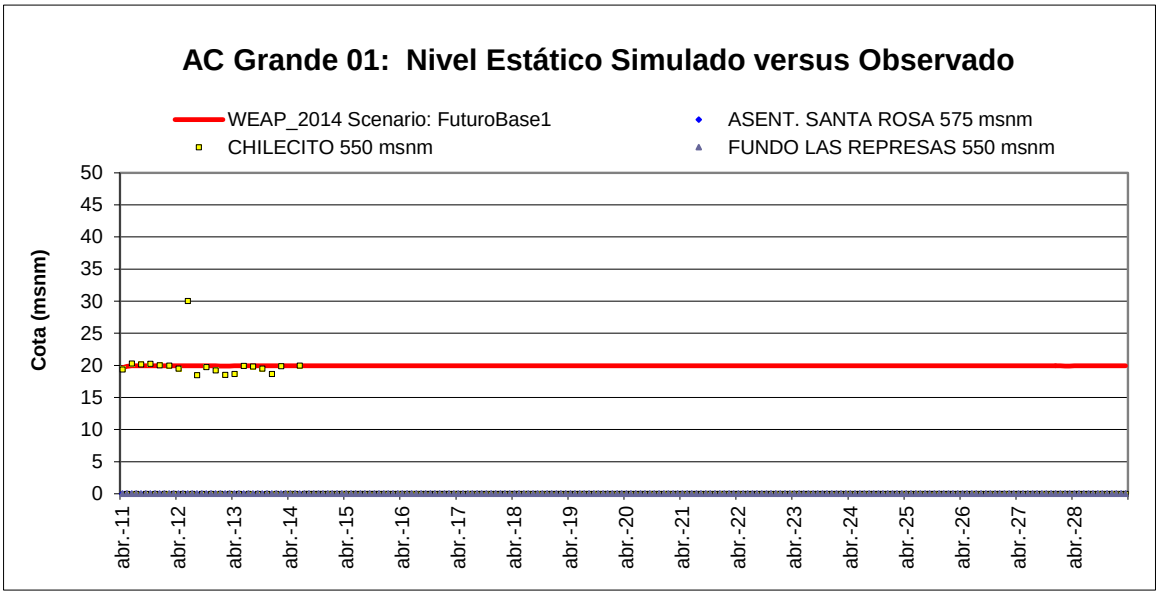


b) <u>Planilla FuturoBase1_Calib_SUB</u>

En este escenario futuro, los acuíferos de los ríos Hurtado, Rapel, Grande sobre Paloma, Grande bajo Paloma, Cogotí y Río Limarí no sufren descensos importantes, y los descensos estacionales que se producen se recuperan de manera rápida año a año.

En representación de este comportamiento se muestra el acuífero del río Grande entre Cuyano y Rapel, en la siguiente Figura 9.50.

Figura 9.46
Acuífero Río Grande entre Cuyano y Rapel

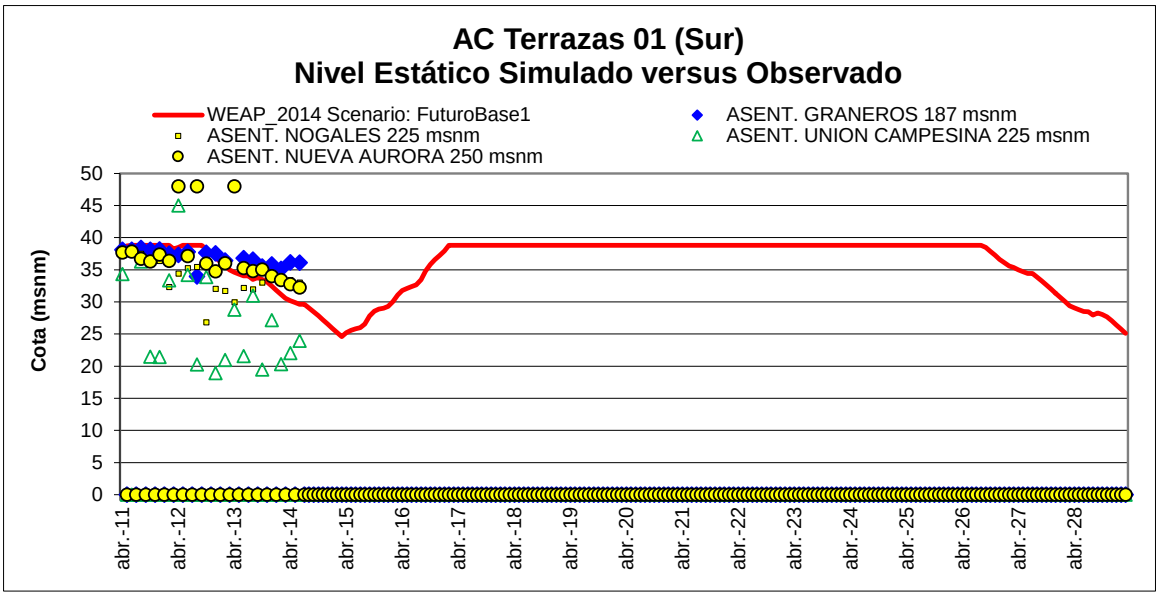


Los acuíferos para los que el modelo presenta muestras de descenso en condiciones como de la actual sequía, se pueden clasificar en tres tipos:

- Descensos leves y recuperables: los acuíferos Rapel (descenso leve), Pama y Punitaqui.
- Descensos fuertes y recuperables: El Palqui, Terrazas norte y sur de la ribera sur del Limarí,
- Descensos irrecuperables: El único acuífero que bajo los supuestos de modelación no se recuperaría, sería el de la Quebrada del Ingenio. Sin embargo, cabe mencionar que este acuífero no se pudo calibrar, ya que no cuenta con registros de niveles subterráneos. Probablemente, en la realidad el acuífero Q.Ingenio también se recuperaría bajo condiciones hidrológicas normales.

A continuación se muestra el acuífero de Terrazas Sur como muestra de los acuíferos que se recuperan, en la Figura 9.51.

Figura 9.47
Acuífero Terrazas Sur



c) <u>Planilla FuturoBase1_Balance_ZR</u>

Las zonas de riego se ven suplidas de forma muy similar a lo que ocurre en el período 1999-2014, salvo las que han crecido en ese lapso, y ahora se consideran con el área de 2014 constante durante el período futuro. Estas quedan peor suplidas en este nuevo escenario.

La forma en que quedan suplidas, en promedio, las zonas de riego, es la que se aprecia en la Tabla 9.23 adjunta.

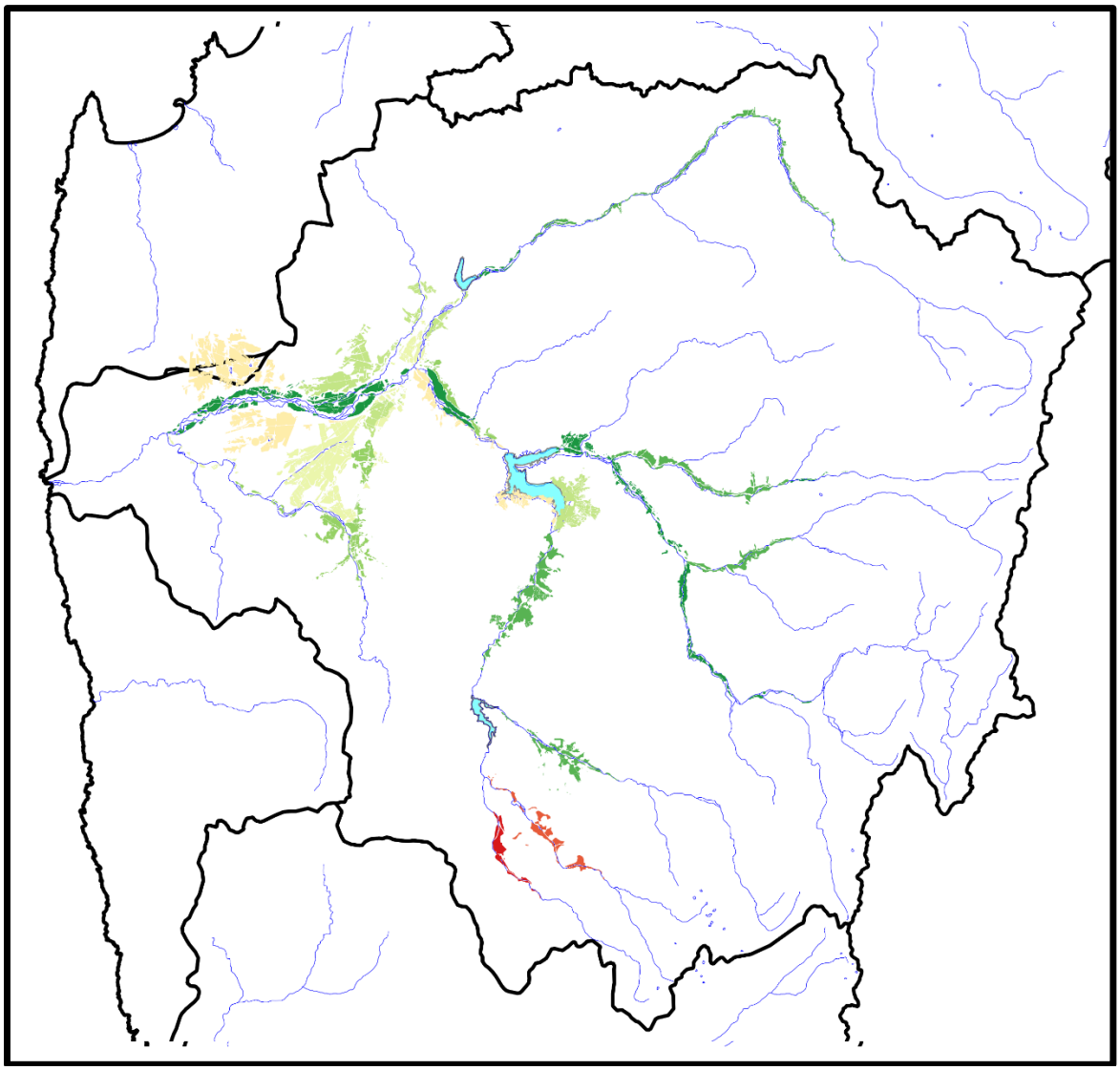
Las zonas peor suplidas son Combarbalá y Pama, seguidas de las zonas regadas por el canal Tabalí y Matriz Cogotí. Las zonas mejor suplidas son las de los ríos Hurtado sobre el embalse Recoleta, Los Molles y Grande-Limarí.

La Tabla 9.23 entrega una buena base de comparación para evaluar los efectos de las obras incluidas en los escenarios futuros. En la siguiente Figura 9.52 se presenta un mapa con las diferentes zonas de riego y su porcentaje de demanda suplida, utilizando el mismo código de colores que en la Tabla 9.23

Tabla 9.23
Promedio de demanda suplida por zona de riego

Zona de riego	%DS
ZR_Pama	21
ZR_Combarbala	31
ZR_R.Tabali	53
ZR_R.M.Cogoti	54
ZR_R.PalomaPoniente	56
ZR_R.CanalVillalon	58
ZR_R.Camarico_Hualli	59
ZR_R.M.CogotiPun.	61
ZR_R.CamClindo	62
ZR_R.Cauchil	63
ZR_HurtadoOvalle	66
ZR_R.CamaricoPunitaqui	67
ZR_PunitaquiALimari	68
ZR_R.CamMatriz	68
ZR_R.Talhuen	69
ZR_R.DerCogoti1	69
ZR_R.VillalonIngenio	72
ZR_R.Palqui	76
ZR_PunitaquiCh	77
ZR_R.M.Paloma	78
ZR_R.DerCogoti2	78
ZR_R.CanalPunitaqui	80
ZR_CogotiEmbalse	87
ZR_MostazalDes	89
ZR_HurtadoIntSA_Ang	90
ZR_Rapel	91
ZR_R.HuatulameantesBCC	91
ZR_R.Huatulame	91
ZR_GrandeAMostazalab.GC	98
ZR_GrandeAMostazalarr.GC	98
ZR_AfluentePalomaNorte	98
ZR_GrandePSJuan	99
ZR_R.LimariabajoIngenio	99
ZR_R.Limari_Ingenio	99
ZR_R.GrandeA.Paloma	99
ZR_HurtadoARecoleta	100
ZR_LosMollesAlto8	100
TOTAL	70.7

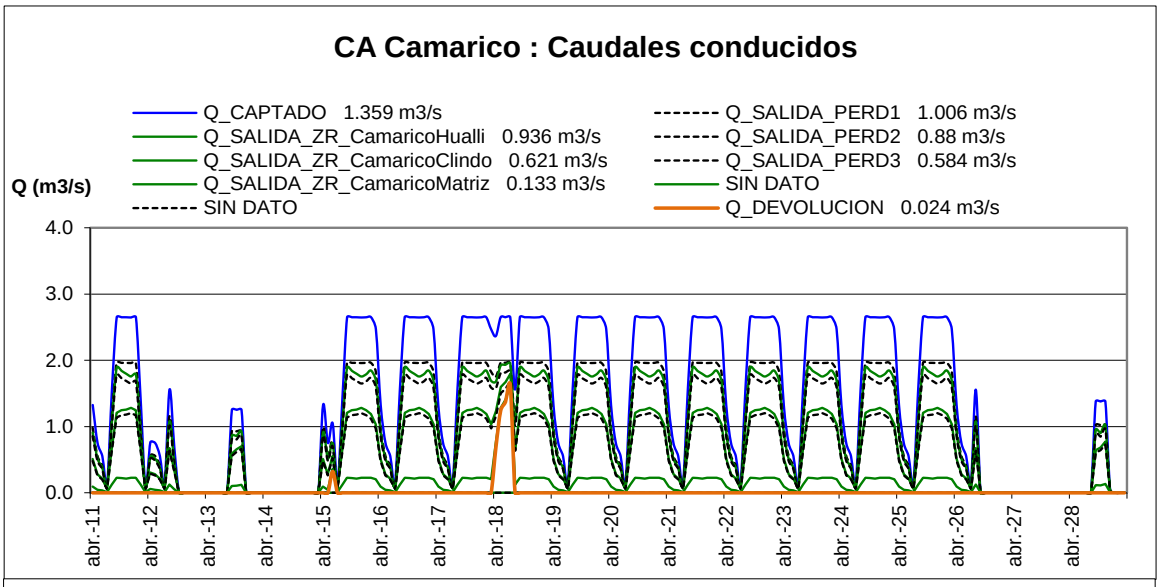
Figura 9.48
Promedio de demanda suplida por zona de riego

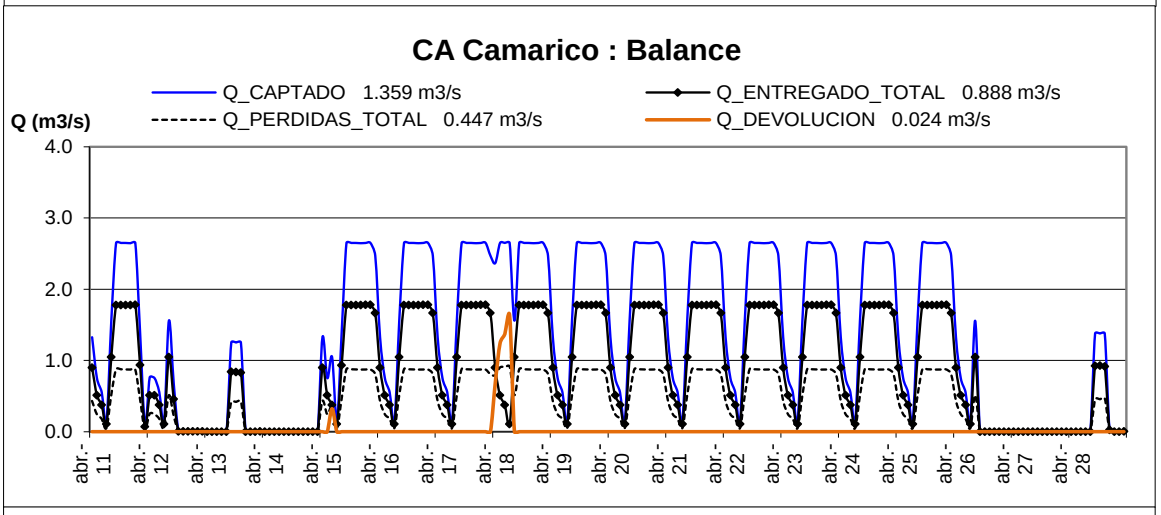


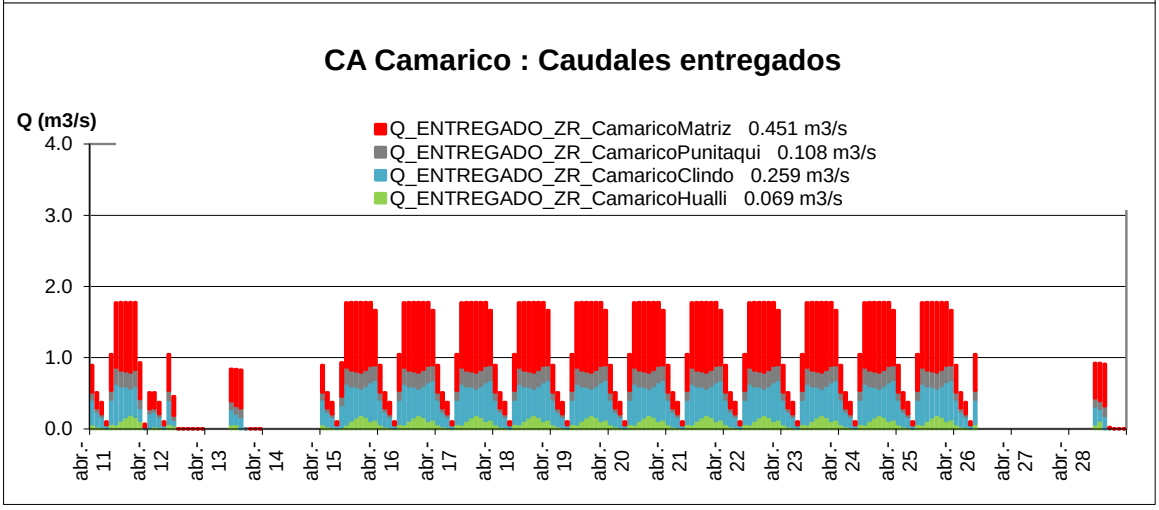
d) <u>Planilla FuturoBase1_Balance_CA</u>

El comportamiento de los canales en el período futuro es similar a lo que se observa en el período histórico, lo cual no es sorprendente en vista de que se mantiene la hidrología, y la regla de operación del sistema. Durante la sequía, casi todos los canales se ven fuertemente afectados, al igual que en el período histórico. Como muestra, en la Figura 9.53 se presenta el canal Camarico.

Figura 9.49
Canal Camarico







e) Planilla FuturoBase1_Balance_AC

El comportamiento de los acuíferos se ha comentado en base a la planilla FuturoBase1_Calib_SUB. De acuerdo con el balance en cada acuífero, las cifras estimativas de los diferentes procesos de recarga y extracción se resumen en la siguiente Tabla 9.24, que constituye una buena base de comparación con los escenarios posteriores.

Tabla 9.24
Recarga y extracción desde los acuíferos modelados

Acuífero	Vol Máx	Q disponible recarga	Q recarga neta	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.324	0.038	0.037
AC_GRA_02	3.7	0.244	0.035	0.035
AC_GRA_03	62	0.570	0.045	0.044
AC_HUA_01	13.4	0.195	0.007	0.007
AC_COG_01	4.7	0.268	0.021	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.185	0.033	0.034
AC_HUR_04	2.9	0.079	0.028	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.305	0.012	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.354	0.056	0.056
AC_ING_01	38.1	0.017	0.017	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.667	0.049	0.049
AC_PAL_01	19.1	0.073	0.060	0.061
AC_PUN_01	4.8	0.014	0.014	0.016
AC_RAP_01	9.2	0.121	0.078	0.077
AC_TER_01	70.1	0.566	0.193	0.215
AC_TER_02	10.3	0.412	0.037	0.039
TOTAL	**513.6**	**4.394**	**0.723**	**0.751**

9.4.3 Resultados globales del escenario Futuro Base 1

Este escenario es el escenario base para la evaluación técnica de los proyectos que se analizan en los tres escenarios siguientes de operación. A continuación se entregan las tablas con los valores promedio mensual del período 2014-2029, de todas las variables analizadas.

Tabla 9.25
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2029)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_HurtadoOvalle	1800.8	0.463	0.599	0.290	0.000	0.009	0.299	0.250	0.036	0.012	66
ZR_R.HuatulameantesBCC	922.3	0.230	0.292	0.249	0.000	0.003	0.252	0.197	0.000	0.055	91
ZR_R.Huatulame	1528.7	0.373	0.494	0.421	0.000	0.004	0.425	0.319	0.079	0.026	91
ZR_R.Palqui	1727.4	0.415	0.549	0.275	0.020	0.005	0.300	0.251	0.036	0.012	76
ZR_R.Cauchil	1011.5	0.219	0.330	0.088	0.009	0.002	0.099	0.076	0.017	0.006	63
ZR_R.PalomaPoniente	1195.6	0.293	0.404	0.105	0.000	0.003	0.108	0.088	0.000	0.020	56
ZR_R.M.Cogoti	820.8	0.204	0.293	0.097	0.002	0.000	0.099	0.075	0.017	0.007	54
ZR_R.GrandeA.Paloma	936.8	0.199	0.304	0.301	0.000	0.000	0.301	0.198	0.073	0.031	99
ZR_R.M.Paloma	777.6	0.182	0.236	0.164	0.002	0.000	0.166	0.134	0.023	0.010	78
ZR_R.Camarico_Hualli	583.7	0.118	0.170	0.075	0.000	0.002	0.077	0.063	0.011	0.004	59
ZR_R.Limari_Ingenio	2734.6	0.541	0.902	0.892	0.000	0.012	0.904	0.537	0.276	0.092	99
ZR_R.LimariabajoIngenio	2199.4	0.427	0.790	0.780	0.000	0.000	0.780	0.422	0.268	0.089	99
ZR_R.Talhuen	2487.1	0.614	0.747	0.396	0.000	0.013	0.409	0.352	0.014	0.043	69
ZR_R.VillalonIngenio	2534.0	0.651	0.978	0.595	0.000	0.012	0.607	0.427	0.135	0.045	72
ZR_R.CanalVillalon	5730.8	1.138	1.837	0.739	0.000	0.000	0.739	0.545	0.146	0.049	58
ZR_R.M.CogotiPun.	553.8	0.114	0.162	0.050	0.013	0.003	0.066	0.051	0.011	0.004	61
ZR_R.DerCogoti1	888.1	0.180	0.302	0.148	0.016	0.004	0.168	0.106	0.046	0.015	69
ZR_R.DerCogoti2	1072.9	0.220	0.295	0.180	0.018	0.005	0.203	0.159	0.038	0.007	78
ZR_R.CanalPunitaqui	1963.7	0.377	0.529	0.315	0.046	0.008	0.369	0.277	0.068	0.023	80
ZR_R.CamClindo	1890.9	0.377	0.675	0.282	0.022	0.007	0.311	0.187	0.106	0.019	62
ZR_R.CamMatriz	3397.1	0.634	1.011	0.488	0.042	0.013	0.543	0.373	0.145	0.026	68
ZR_R.CamaricoPunitaqui	805.7	0.151	0.244	0.118	0.008	0.003	0.129	0.087	0.036	0.006	67
ZR_R.Tabali	4616.2	0.841	1.297	0.482	0.000	0.000	0.482	0.363	0.089	0.030	53
ZR_HurtadoIntSA_Ang	1617.2	0.494	1.137	0.962	0.000	0.012	0.974	0.420	0.000	0.555	90
ZR_HurtadoARecoleta	198.0	0.056	0.131	0.131	0.000	0.001	0.132	0.056	0.057	0.019	100
ZR_LosMollesAlto8	87.9	0.028	0.039	0.039	0.000	0.001	0.040	0.028	0.000	0.011	100
ZR_Rapel	1906.7	0.618	0.843	0.718	0.008	0.016	0.742	0.535	0.103	0.103	91
ZR_MostazalDes	1001.0	0.325	0.446	0.377	0.000	0.006	0.383	0.275	0.000	0.107	89
ZR_GrandeAMostazalarr.G	498.0	0.161	0.214	0.207	0.000	0.008	0.215	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandeAMostazalab.G	498.0	0.161	0.214	0.207	0.000	0.008	0.215	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandePSJuan	1054.4	0.342	0.463	0.448	0.006	0.011	0.465	0.336	0.097	0.032	99
ZR_AfluentePalomaNorte	939.1	0.265	0.371	0.358	0.000	0.000	0.358	0.255	0.000	0.103	98
ZR_CogotiEmbalse	1399.1	0.476	0.803	0.660	0.002	0.011	0.673	0.395	0.209	0.070	87
ZR_Combarbala	1353.4	0.460	0.783	0.224	0.000	0.007	0.231	0.137	0.000	0.094	31
ZR_Pama	1500.0	0.512	1.590	0.221	0.022	0.008	0.251	0.084	0.124	0.041	21
ZR_PunitaquiCh	233.8	0.050	0.108	0.065	0.000	0.001	0.066	0.031	0.000	0.035	77
ZR_PunitaquiALimari	168.2	0.036	0.079	0.037	0.000	0.000	0.037	0.017	0.000	0.020	68
TOTAL	**54634**	**12.945**	**20.661**	**12.184**	**0.236**	**0.198**	**12.618**	**8.420**	**2.260**	**1.939**	**70.7**

Tabla 9.26
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2029)

Canal	Q captado	Q recibido de otros canales	Q total pérdidas evap + percol	Q entregado ZR	Q entregado a otros canales	Q Sobrante	Capacidad
	m3/s		m3/s	m3/s		m3/s	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.660	0.000	0.293	0.282	0.072	0.012	3.7
CA_D.Cauchil	0.012	0.072	0.007	0.077		0.000	0.8
CA_PalquiMauratSemita	0.439		0.188	0.251		0.000	1.6
CA_SifonElorsa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CA_Camarico	1.479		0.486	0.964		0.029	2.7
CA_M.Paloma	4.085		1.103	0.164	2.817	0.000	8.5
CA_D.Cogoti	0.007	1.562	0.379	0.614	0.508	0.069	4.5
CA_Tabali		0.508	0.025	0.482		0.000	2.5
CA_D.Recoleta		1.256	0.088		1.168		4.5
CA_M.Recoleta	1.451		0.392		1.059	0.000	7.0
CA_Talhuen		0.456	0.059	0.396		0.000	1.6
CA_Tuqui		0.400	0.052	0.290		0.059	0.5
CA_Villalon		1.371	0.000	1.335		0.037	7.0
TOTAL	**8.133**	**5.624**	**3.073**	**4.855**	**5.624**	**0.205**	**44.800**

Tabla 9.27
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2029)

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q disponible	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.000	0.227	0.097	0.324	0.286	0.038	0.022	0.006	0.009	0.000	0.000	0.037
AC_GRA_02	3.7	0.000	0.244	0.000	0.244	0.209	0.035	0.020	0.000	0.014	0.000	0.001	0.035
AC_GRA_03	62	0.412	0.035	0.123	0.570	0.526	0.045	0.034	0.004	0.005	0.000	0.001	0.044
AC_HUA_01	13.4	0.099	0.017	0.079	0.195	0.188	0.007	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.007
AC_COG_01	4.7	0.000	0.059	0.209	0.268	0.247	0.021	0.011	0.002	0.008	0.000	0.000	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.000	0.061	0.124	0.185	0.152	0.033	0.007	0.022	0.000	0.000	0.005	0.034
AC_HUR_04	2.9	0.000	0.022	0.057	0.079	0.050	0.028	0.020	0.000	0.008	0.000	0.000	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.249	0.019	0.037	0.305	0.293	0.012	0.000	0.000	0.007	0.000	0.004	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.052	0.026	0.276	0.354	0.297	0.056	0.055	0.000	0.000	0.000	0.001	0.056
AC_ING_01	38.1	0.000	0.003	0.014	0.017	0.000	0.017	0.016	0.000	0.005	0.000	0.000	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.000	0.029	0.638	0.667	0.618	0.049	0.043	0.000	0.006	0.000	0.000	0.049
AC_PAL_01	19.1	0.020	0.000	0.053	0.073	0.014	0.060	0.000	0.030	0.011	0.000	0.020	0.061
AC_PUN_01	4.8	0.000	0.011	0.003	0.014	0.000	0.014	0.000	0.004	0.012	0.000	0.000	0.016
AC_RAP_01	9.2	0.000	0.018	0.103	0.121	0.043	0.078	0.061	0.008	0.008	0.000	0.000	0.077
AC_TER_01	70.1	0.177	0.000	0.389	0.566	0.373	0.193	0.029	0.133	0.010	0.000	0.043	0.215
AC_TER_02	10.3	0.354	0.000	0.058	0.412	0.374	0.037	0.000	0.029	0.000	0.000	0.010	0.039
TOTAL	**513.6**	**1.363**	**0.771**	**2.26**	**4.394**	**3.67**	**0.723**	**0.318**	**0.238**	**0.110**	**0.000**	**0.085**	**0.751**

9.4.4 Comentarios acerca del escenario Futuro Base 1

La configuración futura de la cuenca permite suplir las demandas de riego, como promedio ponderado de toda la cuenca, y considerando tanto los meses de verano como los de invierno, en un 70,7%. Se observa que la cobertura de riego es menor que en el escenario de calibración, lo que se debe a que las áreas son mayores, pues son las áreas actuales en todo el período 2014-2028.

El caudal tanto captado directamente por los canales, o recibido de otros, para lograr esta cobertura, es de 13,8 m3/s, de los cuales llegan a las zonas de riego 12,2 m3/s. La demanda a suplir en las zonas de riego es de 20,7 m3/s, correspondiente a la de 2014. Los acuíferos aportan 0,2 m3/s, debido a que no se modifica la cantidad de derechos constituidos.

En relación con los promedios de los canales, éstos captan según la regla de operación, la cual depende del estado inicial de los embalses. El estado inicial del sistema de embalses es muy superior el año 2000 que el año 2014. En este año el sistema de embalses está prácticamente seco, y los canales no pueden captar. Por lo señalado, los promedios de los caudales captados y entregados por los canales, también se ve reducido en este escenario Futuro Base 1, en relación con el escenario histórico.

La devolución de canales al final de su trayecto, sería de 0,2 m3/s. Los afloramientos de acuíferos llegarían a 3,7 m3/s, mientras que la recarga neta alcanza 0,7 m3/s.

La extracción total desde acuíferos alcanza 0,8 m3/s.

Los acuíferos reflejan extracciones en promedio mayores, porque la entrega desde canales es menor, y también porque la demanda es mayor. Sin embargo, como se ha visto, todos los acuíferos tienen capacidad de recuperación en este escenario.

El caudal de salida al mar, en este período resulta de 2,5 m3/s en promedio, aunque este valor incluye una crecida, equivalente a la de 2002. El valor promedio de caudal de salida al mar sin considerar la crecida resulta de 1,69 m3/s, similar que en el escenario de calibración.

9.5 Escenario Futuro Operación 1: Embalses Valle Hermoso y Rapel

En este escenario se activan los dos nuevos embalses. Fuera de eso, en el sector de riego de Pama se hacen los siguientes cambios, en forma coherente con lo considerado en el estudio de diseño del embalse Valle Hermoso:

- Cambios en los tipos de cultivos de la zona de riego Pama, de la forma en que se señala en la Tabla 9.3.
- Cambios en la eficiencia de riego: todos los cultivos con una eficiencia de aplicación del riego de 90%.

9.5.1 Configuración del escenario Futuro Operación 1

Las condiciones de modelación son las siguientes:

- Los nuevos embalses sólo entregan agua a sus zonas de riego respectivas.

- Los embalses tributan hacia aguas abajo sólo cuando el caudal de entrada supera el valor de l/s del total de derechos (acciones) de los regantes.
  2.034 m3/s para Valle Hermoso
  3.606 m3/s para Rapel

- La entrega del embalse Valle Hermoso se restringe a 0.3 m3/s para hacer durar el beneficio de la regulación.

El objetivo del primer escenario de operación futura es hacer una evaluación de lo que sucedería si se incluyeran dos embalses de cabecera. Ya se ha visto que la situación del Pama es diferente a la del Rapel. En la primera, la cobertura de la demanda agrícola es muy precaria, porque el recurso hídrico es escaso, mientras que en la segunda no lo es tanto, porque el recurso hídrico es mucho más abundante en relación con el área demandante.

Al respecto cabe señalar que se trabaja con valores preliminares de volúmenes y capacidades de acuíferos, los que se deberán confirmar o actualizar en base a los resultados que se obtengan del estudio hidrogeológico que está realizando la CORFO para la cuenca del Limarí en la actualidad.

Los resultados de este primer escenario de operación futura se presentan de la misma forma que los del escenario Futuro Base 1. En el Anexo Capítulo 9.5 se entregan todas las planillas elaboradas. En el presente capítulo se comentan los efectos que tuvo la incorporación de dos embalses en cada uno de los aspectos modelados.

9.5.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación1_Calib_SUP

Esta planilla muestra, igual que antes, los caudales en las estaciones fluviométricas y puntos de control. En las siguientes figuras se presentan los comportamientos de los embalses existentes y de los proyectados.

Figura 9.50
Embalse Valle Hermoso

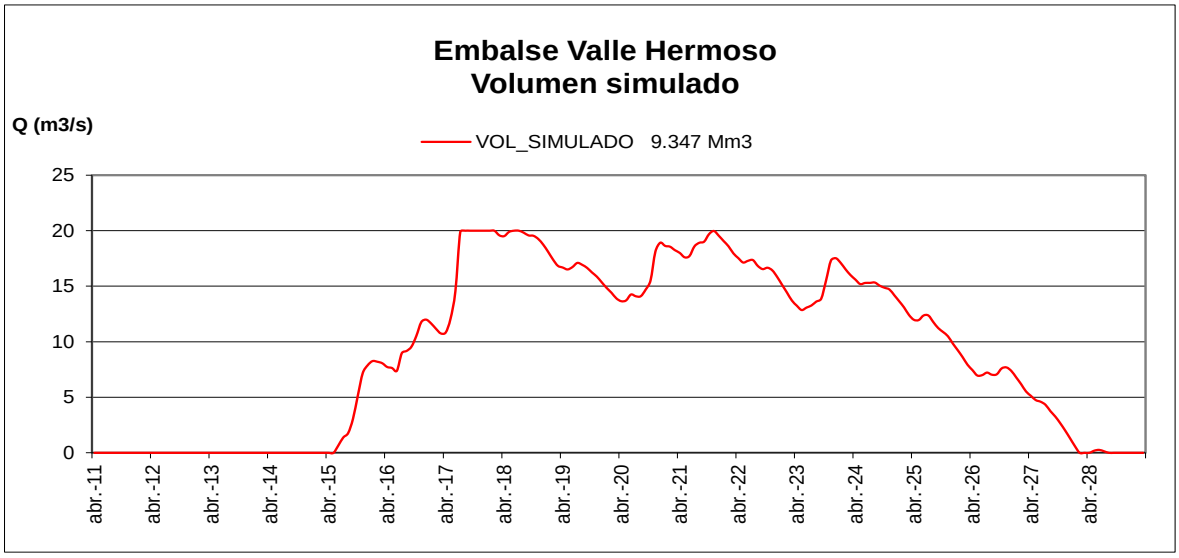
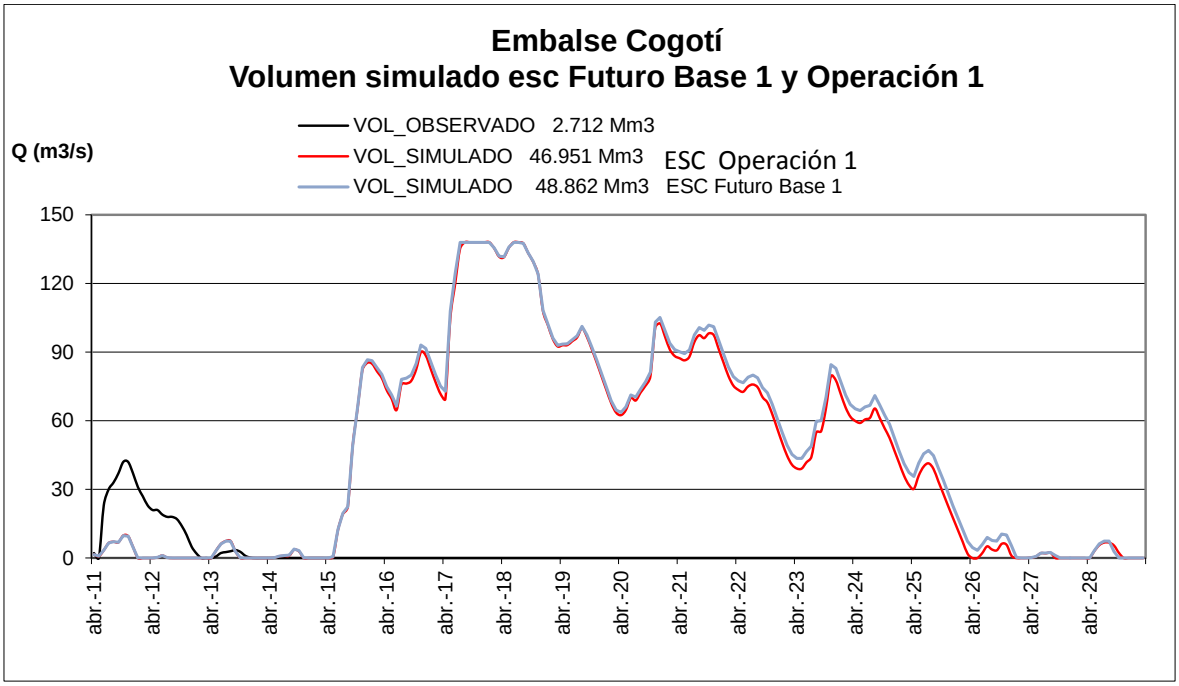


Figura 9.51
Embalse Cogotí

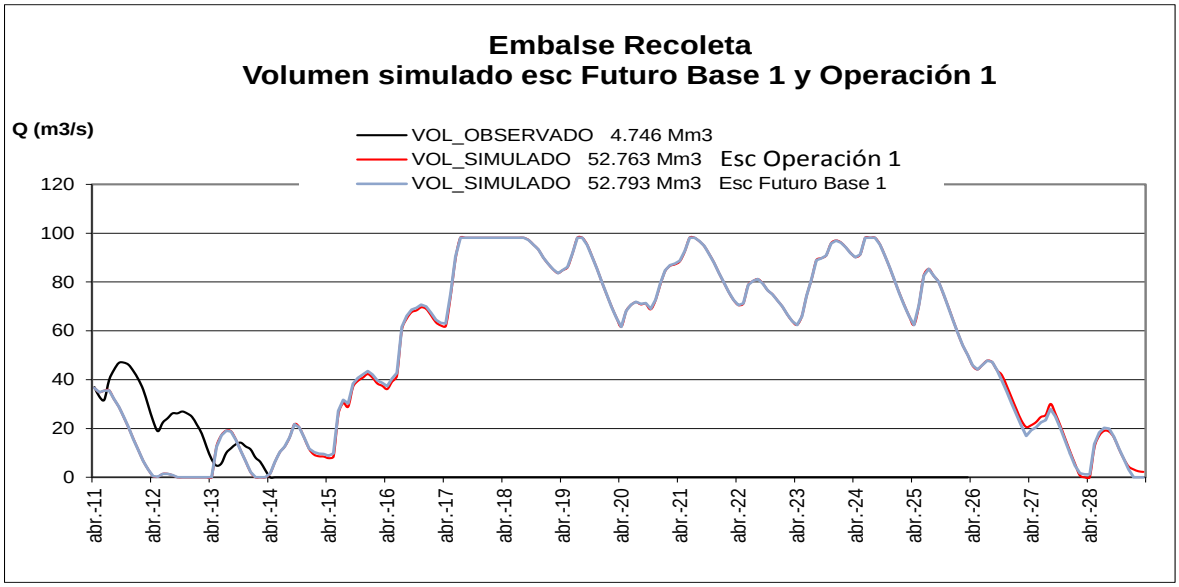


Se observa en este conjunto de gráficos, que el llenado del embalse Valle Hermoso en el escenario operación 1 tiene un efecto de merma permanente de unos 2 millones de m3 sobre el embalse Cogotí, Mientras el embalse Pama rebasa, también lo hace el Cogotí. Sin embargo, la operación asumida en este escenario del embalse Pama, que favorece la zona de riego Pama, afecta el volumen almacenado del embalse Cogotí, y consiguientemente las zonas de riego alimentadas por él, como se verá más adelante.

El recurso hídrico disponible para embalsar en el embalse Pama es muy reducido. El embalse apenas se llena una vez en el período, y eso solamente debido a un año muy húmedo, como el 2002. El embalse se controla muy fuertemente en su salida, entregando un máximo de 300 l/s, de modo que sea capaz de durar 5 años de sequía al final del período de análisis.

La situación del embalse Recoleta prácticamente no cambia en relación con el escenario base, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 9.52
Embalse Recoleta



A continuación se observa el efecto de los embalses Valle Hermoso y Rapel, sobre el embalse Paloma. Ya se vio que el efecto del embalse Valle Hermoso, operado de la forma en que propone, en conjunto con una completa tecnificación de la zona de riego correspondiente, tiene un efecto sensible de merma de 2 millones de m3 en promedio, sobre el embalse Cogotí.

El efecto conjunto de ambos embalses sobre el embalse Paloma, también es sensible, y si bien no se alcanza a percibir en el gráfico, significa una reducción del volumen embalsado, prácticamente permanente, de unos 6 millones de m3 en promedio

Figura 9.53
Embalse Rapel

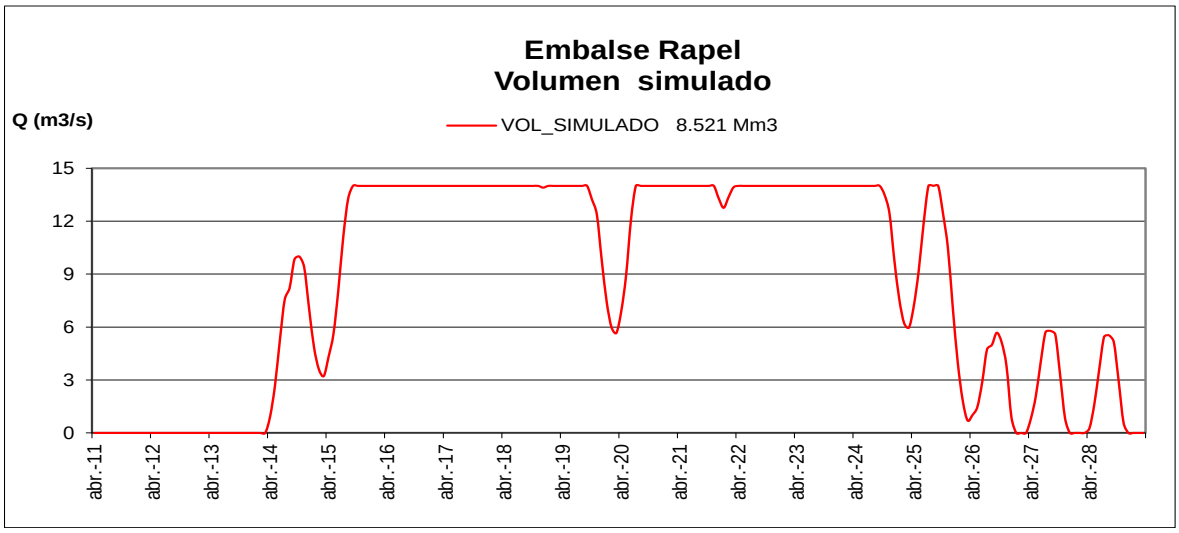
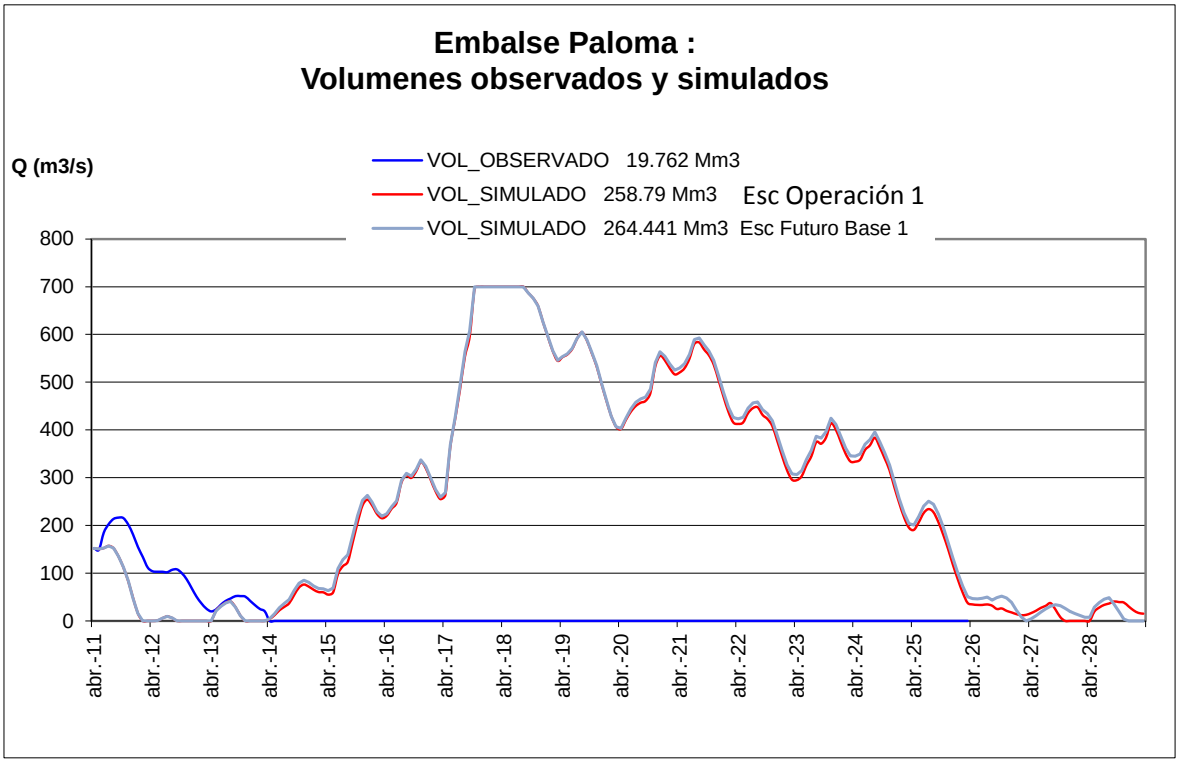


Figura 9.54
Embalse Paloma



b) Planilla Futuro Operación 1_Calib_SUB

El contenido de la planilla FuturoOperación1_Calib_SUB se comenta en el acápite de la planilla FuturoOperación1_Balance_AC. En todo caso, no hay grandes diferencias en relación con el comportamiento de los acuíferos, respecto del escenario Futuro Base 1.

c) Planilla Futuro Operación 1_Balance_ZR

A continuación se compara el grado de cobertura de la demanda, a través del parámetro % de demanda suplida, en los diferentes sectores de la cuenca, con los obtenidos en el escenario Futuro Base1. Los resultados se aprecian en la Tabla 9.28. El código de color de las primeras dos columnas busca mostrar el mejoramiento que los embalses generan dentro del contexto global. Se observa que en el contexto global, hay cambios significativos solamente en las zonas servidas con los embalses, en especial, con el embalse Valle Hermoso. Bajo las condiciones asumidas, de riego y de operación del embalse, la zona de riego Pama cambiaría de categoría, pasando de un porcentaje de demanda suplida promedio de 21% a 64%, lo que significa que de regar el 10% de su área con adecuada seguridad, pasaría a regar casi un 35% de su área, con adecuada seguridad. La zona de riego Rapel aumenta el porcentaje de demanda suplida promedio de 91% a 97%, pasando de ser un área en general muy bien suplida, que solamente tiene problemas en sequía, a tener seguridad casi total de riego para sus 2680 hectáreas, aunque pueden persistir problemas durante la sequía.

El código de color de la última columna busca mostrar los mejoramientos (en verde) y los desmejoramientos (en amarillo-naranjo) que la medida genera. Se observa que hay mejoramientos en cada una de las zonas de riego directamente servidas por los embalses, hay pocas zonas levemente mejoradas, hay muchas zonas que quedan igual (en blanco), y hay muchas otras donde se aprecia que habría desmejoramientos, en caso de implementarse los dos embalses del escenario Futuro Operación 1.

Los efectos leves positivos se producen en el río Grande aguas arriba del embalse Paloma.

Los efectos leves negativos se producen en todas las zonas de riego asociadas a los embalses Cogotí y Paloma, y abarcan hasta Punitaqui y las zonas apoyadas con el embalse Recoleta, que también se surten desde el embalse Paloma.

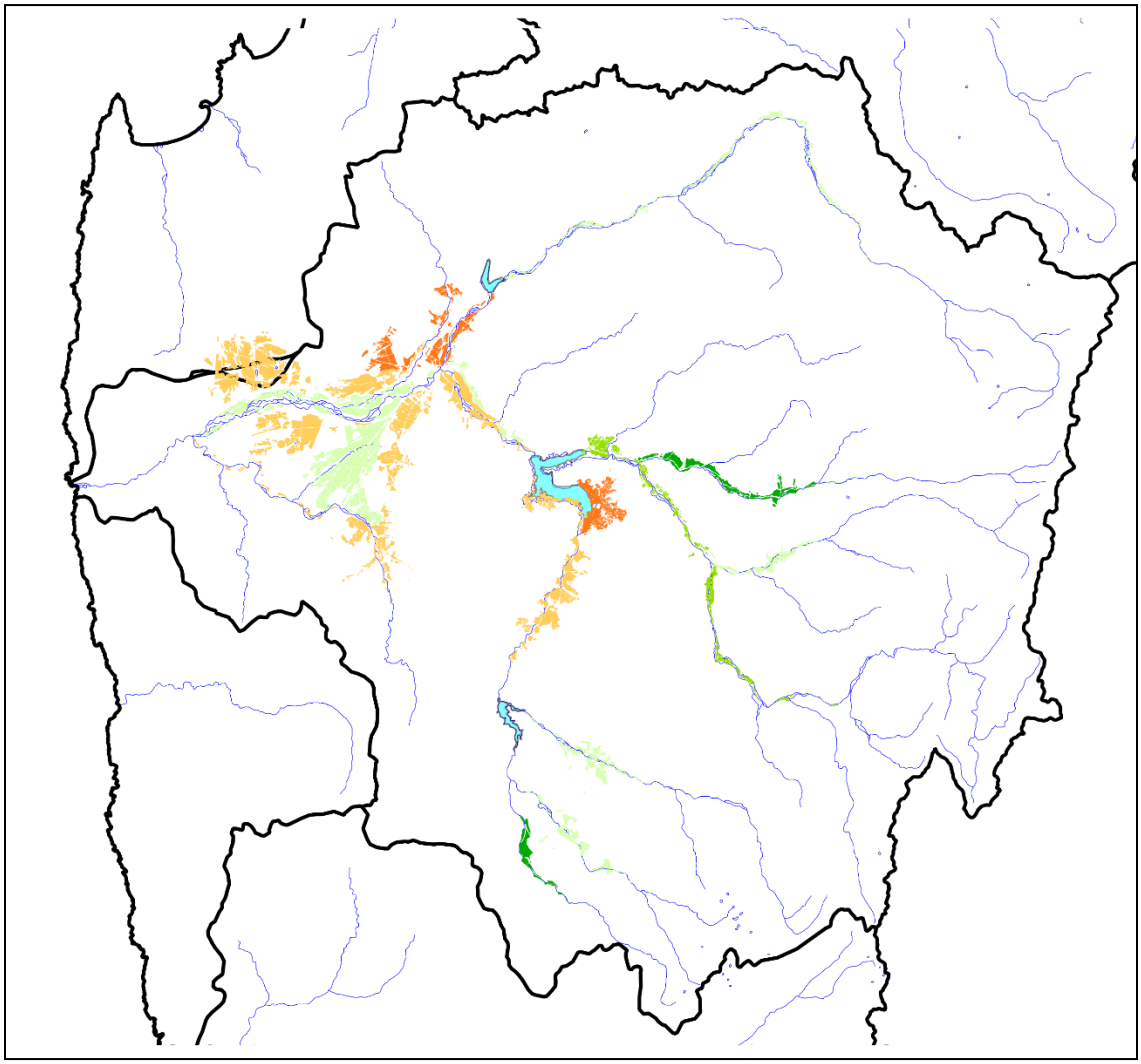
Las zonas más sensiblemente afectadas serían El Palqui, Talhuén y Hurtado bajo embalse Recoleta.

En la Figura 9.59 que se presenta a continuación, se grafica con el mismo código de colores de la última columna, las zonas de riego, permitiendo apreciar visualmente las zonas mejoradas y las desmejoradas. En verde claro se dibujaron las zonas que no cambian.

Tabla 9.28
Comparación demanda suplida en escenario Futuro Base 1 y escenario Operación 1

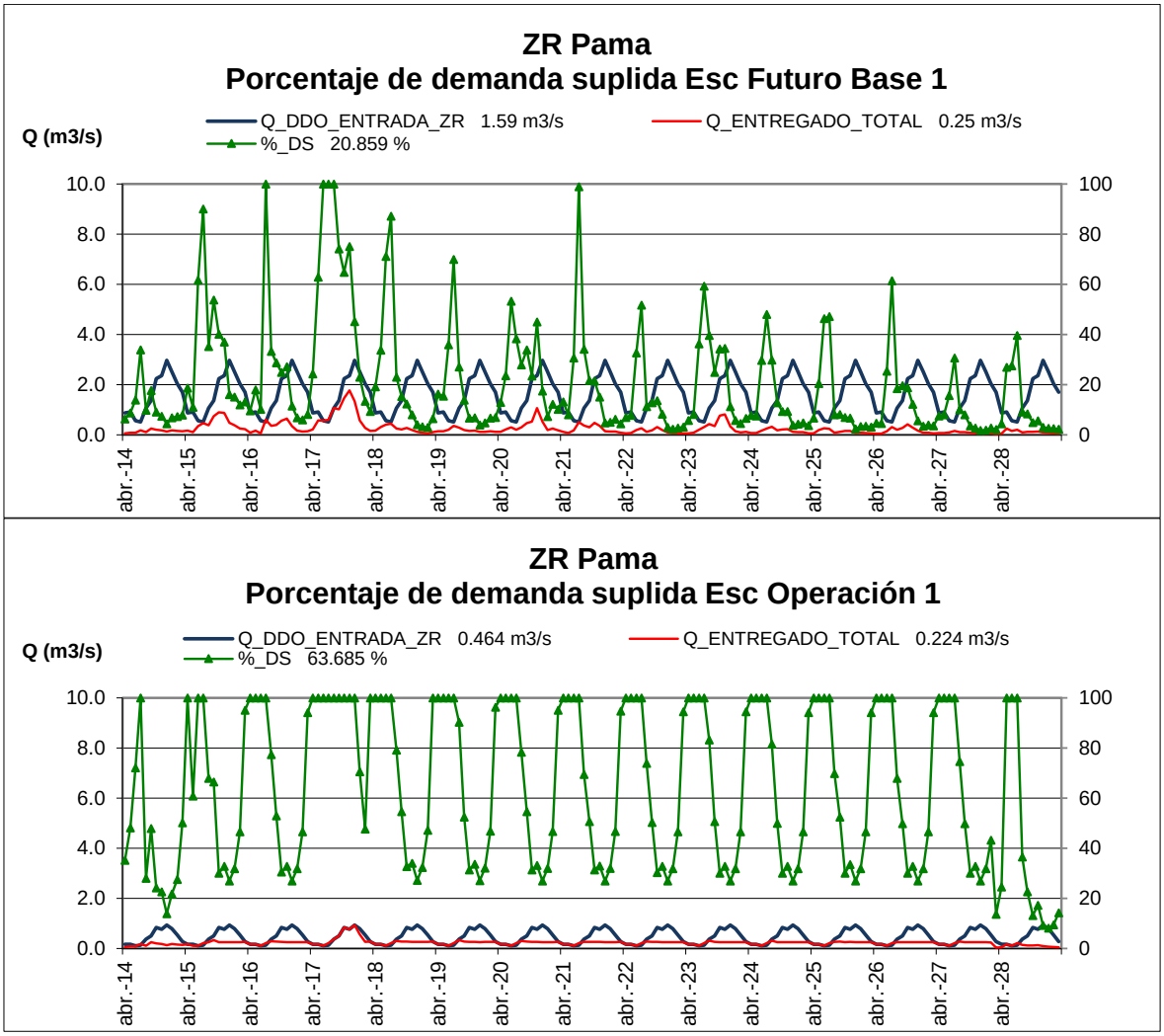
	Esc Futuro Base 1	Esc Operación 1	OP 1 - Fut Base 1
	2014-2029	2014-2029	Diferencia
	%DS	%DS	%DS
	%	%	%
ZR_Pama	21	64	42.8
ZR_Combarbala	31	31	0.0
ZR_R.Tabali	53	52	-0.7
ZR_R.M.Cogoti	54	53	-0.9
ZR_R.PalomaPoniente	56	55	-0.8
ZR_R.CanalVillalon	58	57	-0.6
ZR_R.Camarico_Hualli	59	59	-0.6
ZR_R.M.CogotiPun.	61	60	-0.7
ZR_R.CamClindo	62	62	-0.2
ZR_R.Cauchil	63	63	-0.4
ZR_HurtadoOvalle	66	64	-2.0
ZR_R.CamaricoPunitaqui	67	67	-0.1
ZR_PunitaquiALimari	68	68	-0.4
ZR_R.CamMatriz	68	68	0.0
ZR_R.Talhuen	69	67	-2.2
ZR_R.DerCogoti1	69	69	-0.5
ZR_R.VillalonIngenio	72	72	-0.7
ZR_R.Palqui	76	73	-2.5
ZR_PunitaquiCh	77	76	-0.2
ZR_R.M.Paloma	78	78	0.0
ZR_R.DerCogoti2	78	78	-0.4
ZR_R.CanalPunitaqui	80	79	-0.3
ZR_CogotiEmbalse	87	87	0.0
ZR_MostazalDes	89	89	0.0
ZR_HurtadoIntSA_Ang	90	90	0.0
ZR_Rapel	91	97	6.2
ZR_R.HuatulameantesBCC	91	91	-0.5
ZR_R.Huatulame	91	91	-0.6
ZR_GrandeAMostazalab.GC	98	98	0.3
ZR_GrandeAMostazalarr.GC	98	98	0.3
ZR_AfluentePalomaNorte	98	99	0.6
ZR_GrandePSJuan	99	99	0.2
ZR_R.LimariabajoIngenio	99	99	0.1
ZR_R.Limari_Ingenio	99	99	0.1
ZR_R.GrandeA.Paloma	99	99	-0.8
ZR_HurtadoARecoleta	100	100	0.0
ZR_LosMollesAlto8	100	100	0.0
TOTAL	70.7	75.0	4.3

Figura 9.55
Cambio de demanda suplida entre escenarios Futuro Base 1 y Operación 1



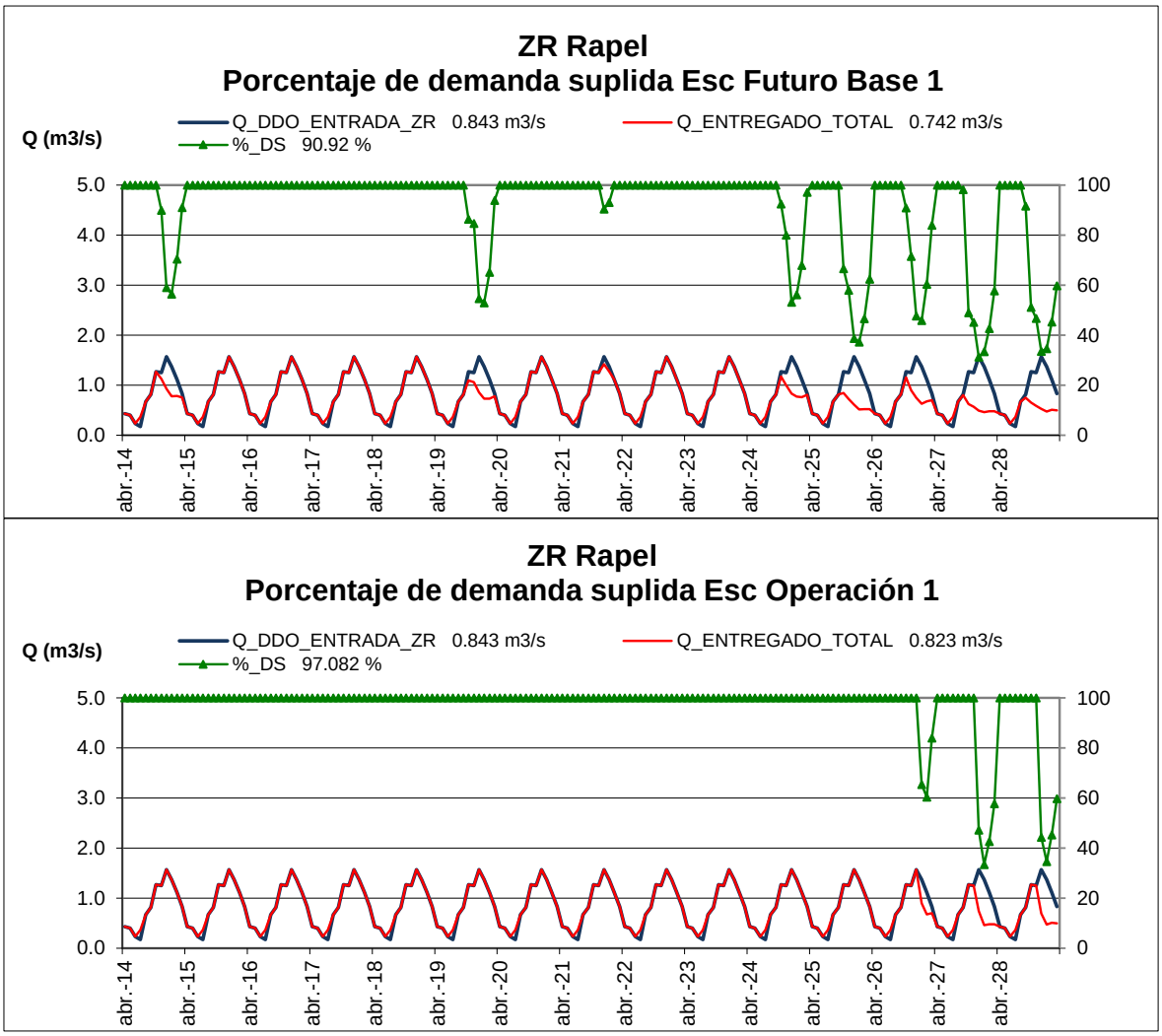
A continuación, en la Figura 9.60 se muestra la zona de riego Pama en ambos escenarios, Futuro Base 1 y Operación 1, donde se aprecia la fuerte reducción de la demanda en el nuevo escenario Operación 1, y la consiguiente mejora del porcentaje de demanda suplida que se produce bajo estos supuestos de operación del valle y del embalse.

Figura 9.56
Zona de riego Pama en escenarios Futuro Base 1 y Operación 1



Por otro lado, la zona de riego Rapel, mejora de la forma que se aprecia en la siguiente Figura 9.61, donde se puede ver alguna mejora en los años secos y también durante la sequía.

Figura 9.57
Zona de riego Rapel en escenarios Futuro Base 1 y Operación 1



Globalmente, el efecto de los dos nuevos embalses, además de la tecnificación completa del riego en el sector de riego Pama, del riego significa un aumento de 4,3% en el porcentaje de demanda suplida, como se aprecia en la Tabla 9.28. Este efecto es relevante, porque se ha considerado la tecnificación completa del riego en la zona del Pama. Si esto no se realiza, los embalses por si solos causan un efecto irrelevante en el aumento de la demanda suplida a nivel de cuenca.

d) Planilla Futuro Operación 1_Balance_CA

El comportamiento de los canales en el escenario con embalses es similar a lo que se observa en el período futuro base sin embalses, sin embargo muestran una leve reducción en los caudales porteados, coherente con el funcionamiento de la regla de operación con los embalses Paloma y Cogotí algo más bajos.

La diferencia de caudales captados en los canales modelados se aprecia en la siguiente Tabla 9.29.

Tabla 9.29
Comparación caudales captados por canales escenarios Futuro Base y Operación 1

Canal	Diferencia Q captado
	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	-0.013
CA_D.Cauchil	-0.001
CA_PalquiMauratSemita	-0.033
CA_SifonElorsa	0.000
CA_Camarico	0.009
CA_M.Paloma	-0.057
CA_D.Cogoti	0.000
CA_Tabali	0.000
CA_D.Recoleta	0.000
CA_M.Recoleta	-0.069
CA_Talhuen	0.000
CA_Tuqui	0.000
CA_Villalon	0.000
TOTAL	**-0.163**

e) Planilla FuturoOperación1_Balance_AC

El comportamiento de los acuíferos en los dos escenarios Futuro Base 1 y Operación 1, se puede comparar en base a los valores resultantes de la diferencia de recarga potencial, recarga neta y extracción total, que se muestran en la Tabla 9.30 adjunta.

Se puede apreciar que para el acuífero Rapel aumenta la recarga potencial o disponible, debido al aumento de caudales disponibles para riego que generaría el embalse. Sin embargo, para el acuífero del Pama, la recarga potencial disminuye, debido a la gran eficiencia de riego que se ha asumido. Como consecuencia de la presencia de los nuevos embalses, en varios otros acuíferos la recarga disponible disminuye, debido a los efectos de reducción del riego asociados al descenso del embalse Paloma.

Las diferencias de extracción sólo se producen para la extracción de riego. Hay menor extracción en aquellas zonas que se ven beneficiadas por la entrada en operación de los nuevos embalses, que son los acuíferos Pama y Rapel, y mayor extracción en las zonas afectadas, que son fundamentalmente El Palqui y las terrazas de Punitaqui.

Todos estos cambios son leves, y no generan grandes diferencias en el comportamiento de largo plazo de los acuíferos.

Tabla 9.30
Comparación recarga y extracción desde acuíferos en esc. Futuro Base 1 y Operación 1

Acuífero	Q disponible recarga	Q recarga neta	Q Total Extracción
	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	0.001	-0.001	0.000
AC_GRA_02	-0.004	0.000	0.000
AC_GRA_03	-0.005	0.001	0.001
AC_HUA_01	-0.002	0.000	0.000
AC_COG_01	0.000	0.000	0.000
AC_PAM_01	-0.110	-0.007	-0.007
AC_HUR_04	0.000	0.000	0.000
AC_HUR_05	-0.012	-0.001	0.000
AC_LIM_01	-0.004	0.000	0.000
AC_ING_01	-0.001	-0.001	0.000
AC_LIM_02	-0.005	0.000	0.000
AC_PAL_01	-0.002	0.000	0.001
AC_PUN_01	0.000	0.000	0.000
AC_RAP_01	0.012	-0.005	-0.006
AC_TER_01	-0.002	0.003	0.002
AC_TER_02	-0.004	-0.001	0.001
TOTAL	-0.138	-0.012	-0.008

9.5.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 1

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del escenario Futuro Operación 1, de todas las variables analizadas.

Tabla 9.31
Promedios de variables asociadas a zonas de riego

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_HurtadoOvalle	1800.8	0.463	0.599	0.272	0.000	0.009	0.281	0.234	0.035	0.012	64
ZR_R.HuatulameantesB	922.3	0.230	0.292	0.248	0.000	0.003	0.251	0.196	0.000	0.055	91
ZR_R.Huatulame	1528.7	0.373	0.494	0.418	0.000	0.004	0.422	0.317	0.079	0.026	91
ZR_R.Palqui	1727.4	0.415	0.549	0.256	0.022	0.005	0.283	0.236	0.035	0.012	73
ZR_R.Cauchil	1011.5	0.219	0.330	0.087	0.009	0.002	0.098	0.075	0.017	0.006	63
ZR_R.PalomaPoniente	1195.6	0.293	0.404	0.104	0.000	0.003	0.107	0.087	0.000	0.020	55
ZR_R.M.Cogoti	820.8	0.204	0.293	0.096	0.002	0.000	0.098	0.074	0.017	0.007	53
ZR_R.GrandeA.Paloma	936.8	0.199	0.304	0.296	0.000	0.000	0.296	0.195	0.071	0.031	99
ZR_R.M.Paloma	777.6	0.182	0.236	0.166	0.002	0.000	0.168	0.135	0.023	0.010	78
ZR_R.Camarico_Hualli	583.7	0.118	0.170	0.076	0.000	0.002	0.078	0.064	0.011	0.004	59
ZR_R.Limari_Ingenio	2734.6	0.541	0.902	0.893	0.000	0.012	0.905	0.537	0.276	0.092	99
ZR_R.LimariabajoIngeni	2199.4	0.427	0.790	0.781	0.000	0.000	0.781	0.423	0.269	0.090	99
ZR_R.Talhuen	2487.1	0.614	0.747	0.370	0.000	0.013	0.383	0.329	0.013	0.040	67
ZR_R.VillalonIngenio	2534.0	0.651	0.978	0.584	0.000	0.012	0.596	0.417	0.134	0.045	72
ZR_R.CanalVillalon	5730.8	1.138	1.837	0.725	0.000	0.000	0.725	0.533	0.144	0.048	57
ZR_R.M.CogotiPun.	553.8	0.114	0.162	0.049	0.013	0.003	0.065	0.050	0.011	0.004	60
ZR_R.DerCogoti1	888.1	0.180	0.302	0.146	0.017	0.004	0.167	0.106	0.046	0.015	69
ZR_R.DerCogoti2	1072.9	0.220	0.295	0.178	0.019	0.005	0.202	0.158	0.037	0.007	78
ZR_R.CanalPunitaqui	1963.7	0.377	0.529	0.310	0.048	0.008	0.366	0.275	0.068	0.023	79
ZR_R.CamClindo	1890.9	0.377	0.675	0.283	0.023	0.007	0.313	0.188	0.106	0.019	62
ZR_R.CamMatriz	3397.1	0.634	1.011	0.492	0.042	0.013	0.547	0.377	0.145	0.026	68
ZR_R.CamaricoPunitaqu	805.7	0.151	0.244	0.119	0.008	0.003	0.130	0.087	0.036	0.006	67
ZR_R.Tabali	4616.2	0.841	1.297	0.478	0.000	0.000	0.478	0.360	0.088	0.029	52
ZR_HurtadoIntSA_Ang	1617.2	0.494	1.137	0.962	0.000	0.012	0.974	0.420	0.000	0.555	90
ZR_HurtadoARecoleta	198.0	0.056	0.131	0.131	0.000	0.001	0.132	0.056	0.057	0.019	100
ZR_LosMollesAlto8	87.9	0.028	0.039	0.039	0.000	0.001	0.040	0.028	0.000	0.011	100
ZR_Rapel	1906.7	0.618	0.843	0.805	0.002	0.016	0.823	0.593	0.115	0.115	97
ZR_MostazalDes	1001.0	0.325	0.446	0.377	0.000	0.006	0.383	0.275	0.000	0.107	89
ZR_GrandeAMostazalar	498.0	0.161	0.214	0.209	0.000	0.008	0.217	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandeAMostazalab	498.0	0.161	0.214	0.209	0.000	0.008	0.217	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandePSJuan	1054.4	0.342	0.463	0.451	0.006	0.011	0.468	0.338	0.098	0.033	99
ZR_AfluentePalomaNor	939.1	0.265	0.371	0.362	0.000	0.000	0.362	0.258	0.000	0.104	99
ZR_CogotiEmbalse	1399.1	0.476	0.803	0.660	0.002	0.011	0.673	0.395	0.209	0.070	87
ZR_Combarbala	1353.4	0.460	0.783	0.224	0.000	0.007	0.231	0.137	0.000	0.094	31
ZR_Pama	1500.0	0.425	0.464	0.202	0.015	0.008	0.225	0.202	0.016	0.005	64
ZR_PunitaquiCh	233.8	0.050	0.108	0.065	0.000	0.001	0.066	0.031	0.000	0.035	76
ZR_PunitaquiALimari	168.2	0.036	0.079	0.037	0.000	0.000	0.037	0.017	0.000	0.020	68
TOTAL	**54634**	**12.858**	**19.535**	**12.160**	**0.230**	**0.198**	**12.588**	**8.517**	**2.156**	**1.913**	**75.0**

Tabla 9.32
Promedios de variables asociadas a canales

Canal	Q captado	Q recibido de otros canales	Q total pérdidas evap + percol	Q entregado ZR	Q entregado a otros canales	Q Sobrante	Capacidad
	m3/s		m3/s	m3/s		m3/s	
CA_CogotiPunitaqui	0.647	0.000	0.287	0.276	0.071	0.013	3.7
CA_D.Cauchil	0.012	0.071	0.007	0.076		0.000	0.8
CA_PalquiMauratSemita	0.407		0.175	0.232		0.000	1.6
CA_SifonElorsa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CA_Camarico	1.488		0.489	0.969		0.029	2.7
CA_M.Paloma	4.028		1.088	0.166	2.775	0.000	8.5
CA_D.Cogoti	0.007	1.548	0.375	0.608	0.503	0.069	4.5
CA_Tabali		0.503	0.025	0.478		0.000	2.5
CA_D.Recoleta		1.227	0.086		1.141		4.5
CA_M.Recoleta	1.382		0.373		1.009	0.000	7.0
CA_Talhuen		0.435	0.057	0.370		0.008	1.6
CA_Tuqui		0.370	0.048	0.272		0.050	0.5
CA_Villalon		1.345	0.000	1.309		0.037	7.0
TOTAL	**7.970**	**5.499**	**3.010**	**4.754**	**5.499**	**0.206**	**44.800**

Tabla 9.33
Promedios de variables asociadas a acuíferos

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q disponible recarga	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.000	0.227	0.098	0.325	0.287	0.037	0.022	0.006	0.009	0.000	0.000	0.037
AC_GRA_02	3.7	0.000	0.240	0.000	0.240	0.206	0.035	0.020	0.000	0.014	0.000	0.001	0.035
AC_GRA_03	62	0.408	0.035	0.122	0.565	0.519	0.046	0.034	0.005	0.005	0.000	0.001	0.045
AC_HUA_01	13.4	0.097	0.017	0.079	0.193	0.186	0.007	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.007
AC_COG_01	4.7	0.000	0.059	0.209	0.268	0.247	0.021	0.011	0.002	0.008	0.000	0.000	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.000	0.059	0.016	0.075	0.049	0.026	0.007	0.015	0.000	0.000	0.005	0.027
AC_HUR_04	2.9	0.000	0.022	0.057	0.079	0.050	0.028	0.020	0.000	0.008	0.000	0.000	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.239	0.019	0.035	0.293	0.282	0.011	0.000	0.000	0.007	0.000	0.004	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.048	0.026	0.276	0.350	0.294	0.056	0.055	0.000	0.000	0.000	0.001	0.056
AC_ING_01	38.1	0.000	0.003	0.013	0.016	0.000	0.016	0.016	0.000	0.005	0.000	0.000	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.000	0.028	0.634	0.662	0.614	0.049	0.043	0.000	0.006	0.000	0.000	0.049
AC_PAL_01	19.1	0.019	0.000	0.052	0.071	0.011	0.060	0.000	0.031	0.011	0.000	0.020	0.062
AC_PUN_01	4.8	0.000	0.011	0.003	0.014	0.000	0.014	0.000	0.004	0.012	0.000	0.000	0.016
AC_RAP_01	9.2	0.000	0.018	0.115	0.133	0.060	0.073	0.061	0.002	0.008	0.000	0.000	0.071
AC_TER_01	70.1	0.175	0.000	0.389	0.564	0.368	0.196	0.029	0.135	0.010	0.000	0.043	0.217
AC_TER_02	10.3	0.351	0.000	0.057	0.408	0.372	0.036	0.000	0.030	0.000	0.000	0.010	0.040
TOTAL	**513.6**	**1.337**	**0.764**	**2.155**	**4.256**	**3.545**	**0.711**	**0.318**	**0.230**	**0.110**	**0.000**	**0.085**	**0.743**

9.5.4 Comentarios sobre el escenario Futuro Operación 1

El caudal captado por los canales es de 13,5 m3/s, de los cuales llegan a las zonas de riego 11,4 m3/s. La demanda de las zonas de riego es de 19,5 m3/s, más reducida que en el escenario Futuro Base 1, debido a la tecnificación del sector Pama. El caudal aportado por los acuíferos es de 0,3 m3/s, el leve aumento que se explica en base a la menor entrega desde canales.

Las devoluciones de canales se mantienen en 0,2 m3/s, los afloramientos se reducen levemente a 3,5 m3/s, la recarga neta se mantiene en 0,7 m3/s, respondiendo a las extracciones, que también son de 0,7 m3/s. Las salidas al mar en este escenario tienen un promedio de 2,8 m3/s, mayores que en el escenario base. Sin incluir las crecidas, se mantienen en 1,7 m3/s, como en los escenarios anteriores.

El hecho de agregar dos embalses, más la tecnificación completa del sector de riego Pama al sistema de recursos hídricos del río Limarí, tiene connotaciones de diversos tipos sobre el sistema en su conjunto.

Como resumen de todo lo que se ha señalado antes, se puede decir que el embalse Valle Hermoso, operado con una regla de operación muy cuidadosa de 300 l/s como tope máximo, y con una eficiencia de riego de 90%, aportaría en forma significativa a la seguridad de riego de la zona de riego Pama, elevando el área con riego seguro del actual 10% a un futuro 35% del área total de 1500 ha.

El embalse Rapel, no aporta en forma tan significativa a la seguridad del riego de la zona de Rapel, pues ésta aparece bastante bien suplida desde antes.

El efecto del embalse Valle Hermoso es desfavorable para el embalse Cogotí, por lo tanto para el canal Cogotí y sus zonas de riego asociadas. El efecto de ambos embalses, Rapel y Valle Hermoso, además, es desfavorable para los embalses Paloma y Recoleta, y todas sus zonas de riego asociadas.

El efecto sobre los acuíferos es menor, y no difiere sustancialmente de lo que ocurre en el escenario Futuro Base 1.

En resumen, observando el indicador del porcentaje de demanda suplida, ponderado para la toda la cuenca, que resulta de 75,0% en el escenario con embalses y tecnificación, superior al 70,7% del escenario FuturoBase1, se aprecia que, si bien las medidas afectan los sectores de riego aguas abajo de los embalses Paloma y Cogotí, en conjunto son beneficiosas a nivel de cuenca completa.

9.6 Escenario Futuro Operación 2: Aumento de eficiencia de conducción

El segundo escenario futuro que se ha explorado, es el de aumentar la eficiencia de conducción de todos los canales mayores que portan grandes caudales. Este escenario se simula sobre el escenario Futuro Base 1.

9.6.1 Configuración del escenario Futuro Operación 2

Los canales mejorados son Cogotí, Matriz Paloma, Derivado Recoleta, Derivado Cogotí, Camarico y Matriz Recoleta.

La nueva configuración de pérdidas en los canales, en este escenario, queda como se muestra en la Tabla 9.34 adjunta. Los valores en rojo son los que mejoraron respecto del escenario Futuro Base 1.

Este escenario se compara con el escenario Futuro Base 1, sobre el cual se simuló. Lo que interesa observar es fundamentalmente el efecto sobre aspectos como la seguridad de riego, y la recarga de acuíferos.

Tabla 9.34
Pérdidas en canales en escenario Operación 2

CANAL	CAPACIDAD (m3/s)	PERDIDA 0 (%)	DESTINO	PERDIDA 1 (%)	DESTINO PERD 1	PERDIDA 2 (%)	DESTINO PERD 2	PERDIDA 3 (%)	DESTINO PERD 3	PERDIDA 4 (%)	DESTINO PERD 4	OBS
Palqui Maurat Semita	1	20	EVAP	10	Río Grande	5	AC_PAL_01					
Alimentador Recolet	-	20	EVAP									Desactivado
Cogotí Punitaqui	3.7	20	EVAP	5	AC_HUA_01	5	AC_GRA_03	10	AC_TER_02	10	AC_TER_01	
Camarico	2.65	20	EVAP	3	AC_GRA_03	3	AC_TER_02	3	AC_TER_01			
Derivado Cauchil	0.8			10	AC_PAL_01							
Matriz Paloma	8.5	20	EVAP	3	AC_GRA_03							
Derivado Recoleta	4.5			3	AC_HUR_05							
Derivado Cogotí	4.5			10	AC_TER_02	10	AC_TER_01					
Sub-Derivado Tabalí	2.5			5	AC_TER_02							
Matriz Recoleta	7	20	EVAP	3	AC_HUR_05							
Villaseca	0.42			20	AC_HUR_05							Desactivado *
Talhuen	1.6			13	AC_HUR_05							
Tuqui	0.45			13	AC_LIM_01							
Villalon	7		SIN PERDIDA									

*Nota: incluido en canal Talhuén

Todos los resultados de este escenario, presentados en los cinco tipos de planillas, se incluyen en el Anexo Digital, Anexo Capítulo 9.6.

9.6.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación2_Calib_SUP

En las figuras a continuación se muestra el comportamiento de los 3 embalses existentes. El embalse Cogotí aumenta su volumen en relación con el volumen del escenario Base, debido a que el canal Cogotí, al ser mucho más eficiente, no pide tanta agua al embalse.

El embalse Recoleta, por su parte, también se ve levemente favorecido por el aumento de eficiencia de sus canales. Estos ya son bastante eficientes en la actualidad, de modo que el

efecto es menor que en el Cogotí, pero de todas maneras se nota un efecto de aumento de volumen.

El embalse Paloma no muestra este comportamiento. Aquí, el efecto de aumento de volumen por reducción de demanda se compensa con la falta de percolaciones desde los canales, lo que se traduce en una disminución del afloramiento desde los acuíferos Grande bajo Paloma y Hurtado bajo Recoleta, hacia el río Limarí. El embalse Paloma debe hacerse cargo de dicha disminución, para suplir las zonas de riego asociadas al río, que están modeladas con una prioridad mayor que las asociadas al sistema de embalses.

Figura 9.58
Embalse Cogotí

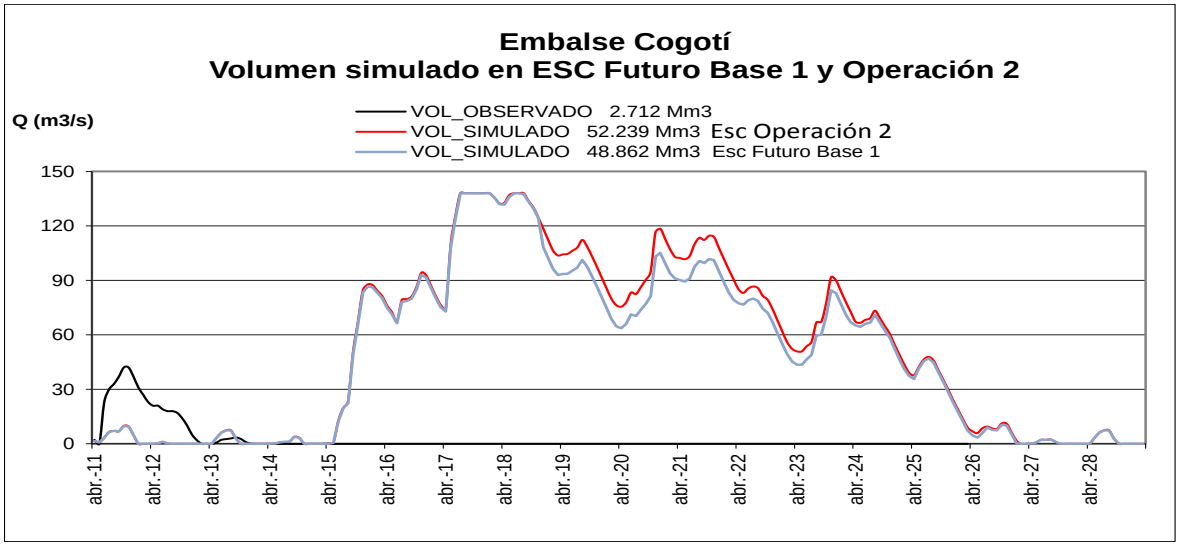


Figura 9.59
Embalse Recoleta

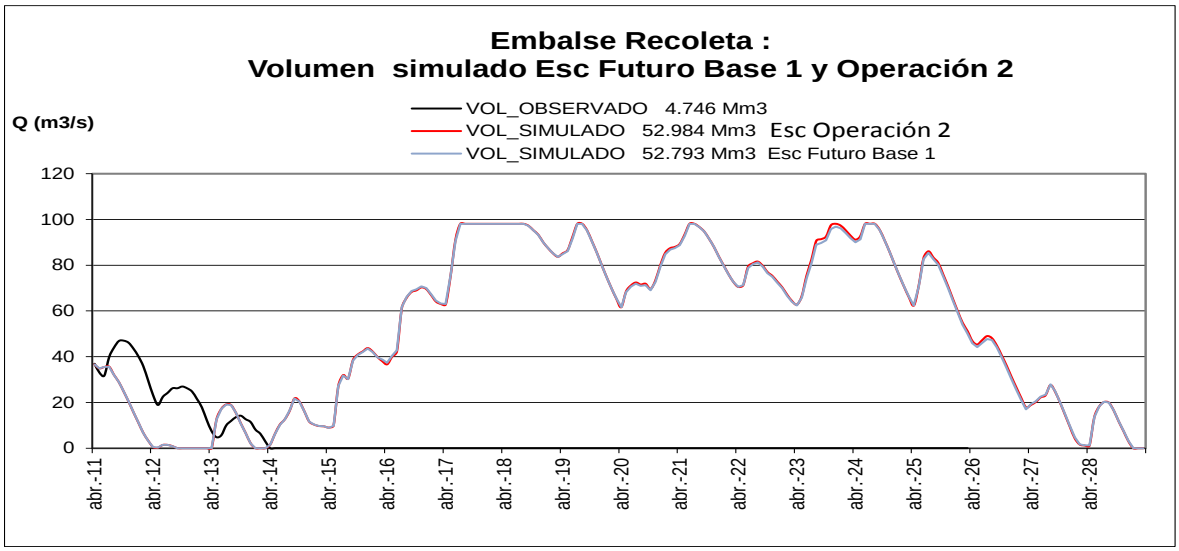
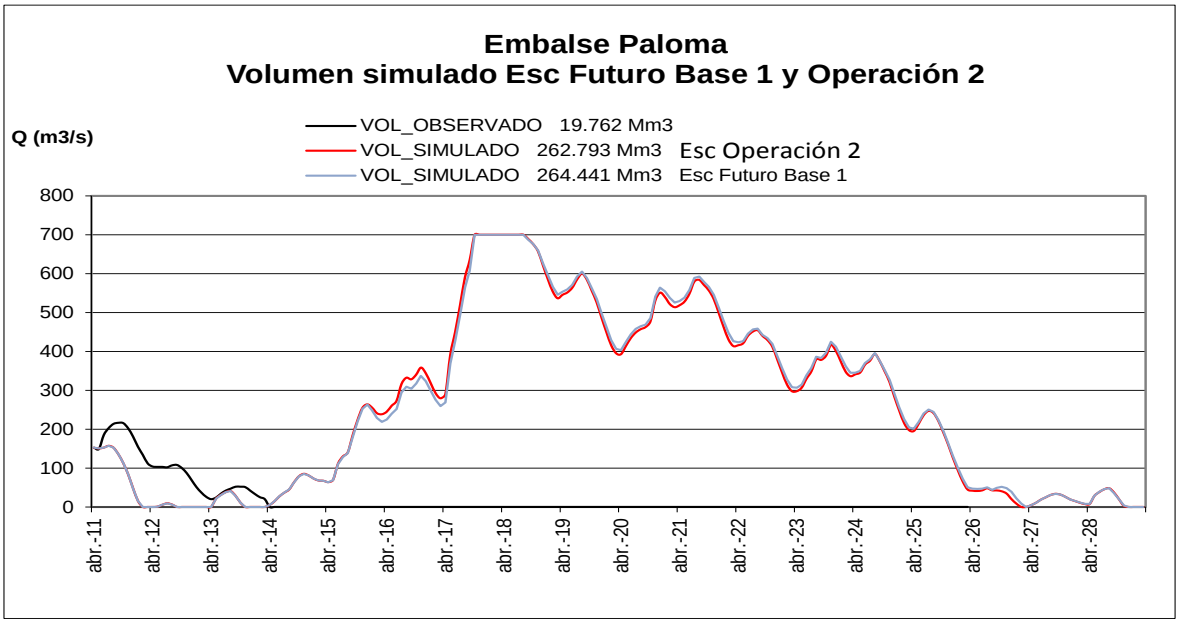


Figura 9.60
Embalse Paloma



b) Planilla FuturoOperación2_Calib_SUB

Esta planilla no aporta más elementos que la planilla Balance_AC, la cual se describe más adelante.

c) Planilla FuturoOperación2_Balance ZR

A continuación se compara el grado de cobertura de la demanda, a través del parámetro % de demanda suplida, en los diferentes sectores de la cuenca, con los obtenidos en el escenario Futuro Base 1. Los resultados se aprecian en la Tabla 9.35, concebida en forma similar a la Tabla 9.28 antes descrita.

Lo que se puede observar en esta tabla es que esta medida sólo genera cambios favorables, o no genera cambios, en los porcentajes de demanda suplida, en todas las zonas de riego. Sólo hay un sector que se ve muy levemente afectado, que es El Palqui, posiblemente debido a la forma en que se modifica la regla con el leve déficit de volumen en el embalse Paloma.

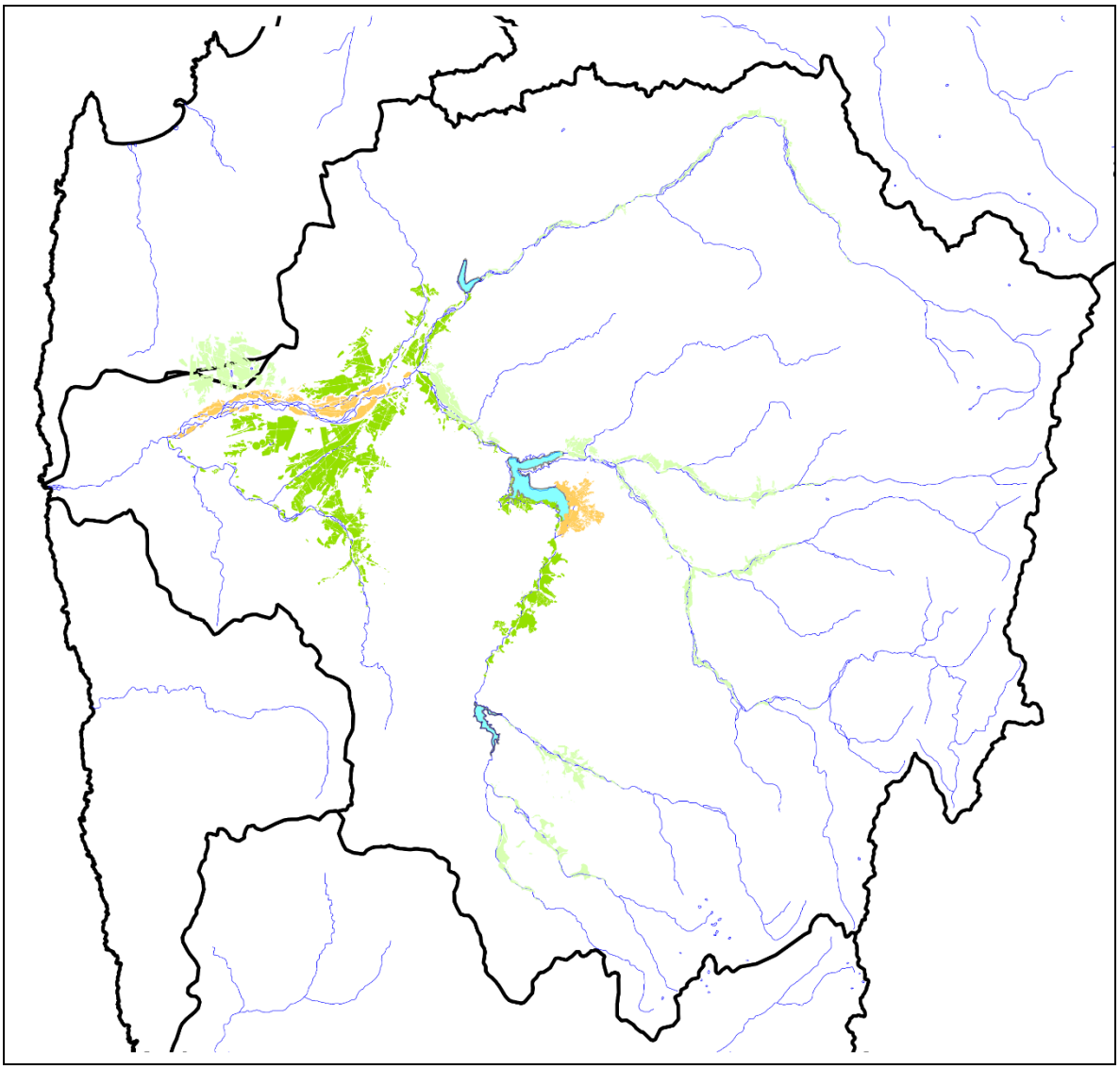
Lo mismo se muestra en la Figura 9.65 a continuación, con el mismo código de colores, para representar la diferencia en el porcentaje de demanda suplida entre el escenario Futuro Operación 2 y el escenario Futuro Base 1.

De acuerdo con el indicador del porcentaje de demanda suplida, desde un punto de vista global del sistema completo, este escenario es tan conveniente como el escenario de dos nuevos embalses, y es probable que como solución también sea económicamente más eficiente, menos onerosa, y admite inversión progresiva.

Tabla 9.35
Comparación demanda suplida en escenario Futuro Base 1 y escenario Operación 2

	Esc Futuro Base 1	Esc Operación 2	OP 1 - Fut Base 1
	2014-2029	2014-2029	Diferencia
	%DS	%DS	%DS
	%	%	%
ZR_Pama	21	21	0.0
ZR_Combarbala	31	31	0.0
ZR_R.Tabali	53	55	2.8
ZR_R.M.Cogoti	54	55	2.0
ZR_R.PalomaPoniente	56	58	2.1
ZR_R.CanalVillalon	58	59	0.9
ZR_R.Camarico_Hualli	59	61	1.7
ZR_R.M.CogotiPun.	61	63	1.7
ZR_R.CamClindo	62	64	1.9
ZR_R.Cauchil	63	65	1.2
ZR_HurtadoOvalle	66	67	0.4
ZR_R.CamaricoPunitaqui	67	69	2.0
ZR_PunitaquiALimari	68	69	1.5
ZR_R.CamMatriz	68	70	1.7
ZR_R.Talhuen	69	70	0.9
ZR_R.DerCogoti1	69	73	3.2
ZR_R.VillalonIngenio	72	74	1.9
ZR_R.Palqui	76	75	-0.5
ZR_PunitaquiCh	77	78	1.3
ZR_R.M.Paloma	78	78	0.1
ZR_R.DerCogoti2	78	80	1.4
ZR_R.CanalPunitaqui	80	81	1.6
ZR_CogotiEmbalse	87	87	0.0
ZR_MostazalDes	89	89	0.0
ZR_HurtadoIntSA_Ang	90	90	0.0
ZR_Rapel	91	91	0.0
ZR_R.HuatulameantesBCC	91	92	0.4
ZR_R.Huatulame	91	92	0.4
ZR_GrandeAMostazalab.G	98	98	0.0
ZR_GrandeAMostazalarr.G	98	98	0.0
ZR_AfluentePalomaNorte	98	98	0.0
ZR_GrandePSJuan	99	99	0.0
ZR_R.LimariabajoIngenio	99	99	-0.1
ZR_R.Limari_Ingenio	99	99	-0.1
ZR_R.GrandeA.Paloma	99	99	0.0
ZR_HurtadoARecoleta	100	100	0.0
ZR_LosMollesAlto8	100	100	0.0
TOTAL	70.7	71.5	0.8

Figura 9.61
Cambio de demanda suplida entre escenarios Futuro Base 1 y Operación 2



d) Planilla Futuro Operación 2_Balance_CA

Lo que se observa es que los canales captan en forma similar al escenario Futuro Base 1. Algunos reducen su captación, debido a la reducción de pérdidas, y en otros, este efecto se compensa con el hecho de que pueden satisfacer una mayor demanda. La diferencia de caudales captados por los canales modelados se aprecia en la siguiente Tabla 9.36, donde se ve que la diferencia de caudales captados, a nivel de cuenca, no es significativa entre ambos escenarios.

Tabla 9.36
Comparación caudales captados por canales escenarios Futuro Base 1 y Operación 2

Canal	Diferencia Q captado
	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.025
CA_D.Cauchil	0.000
CA_PalquiMauratSemita	-0.002
CA_SifonElorsa	0.000
CA_Camarico	0.043
CA_M.Paloma	-0.045
CA_D.Cogoti	0.001
CA_Tabali	0.000
CA_D.Recoleta	0.000
CA_M.Recoleta	0.068
CA_Talhuen	0.000
CA_Tuqui	0.000
CA_Villalon	0.000
TOTAL	0.089

e) Planilla FuturoOperación2_Balance_AC

El comportamiento de los acuíferos de los dos escenarios Futuro Base y Operación 2, se puede comparar en base los valores resultantes de la diferencia de recarga potencial, recarga neta y extracción total, que se muestran en la Tabla 9.37 adjunta.

Se puede apreciar que en todos los acuíferos comprometidos con las percolaciones desde canales, se reduce notoriamente el caudal disponible para percolar. Esto concierne en especial a los acuíferos Grande bajo Paloma, Hurtado bajo Recoleta, Huatulame y Terrazas de Punitaqui. Hay un acuífero, Limarí, cuya recarga aumenta, debido a que se beneficia de las ineficiencias de un mayor riego.

Tabla 9.37
Comparación recarga y extracción desde acuíferos
en esc. Futuro Base 1 y Operación 2

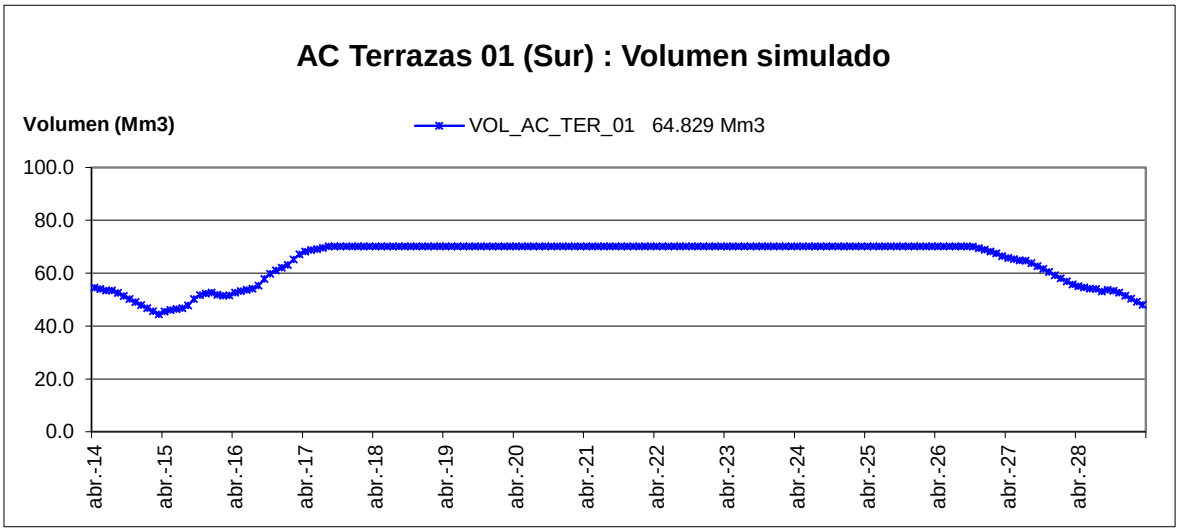
Acuífero	Q disponible recarga	Q recarga neta	Q Total Extracción
	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	0.000	0.000	0.000
AC_GRA_02	0.000	0.000	0.000
AC_GRA_03	-0.237	-0.001	0.000
AC_HUA_01	-0.069	0.000	0.000

AC_COG_01	0.000	0.000	0.000
AC_PAM_01	0.000	0.000	-0.001
AC_HUR_04	0.000	0.000	0.000
AC_HUR_05	-0.106	-0.001	0.000
AC_LIM_01	-0.002	0.000	0.000
AC_ING_01	0.000	0.000	0.000
AC_LIM_02	0.042	0.000	0.000
AC_PAL_01	0.002	-0.001	-0.001
AC_PUN_01	0.001	0.001	0.000
AC_RAP_01	0.000	0.000	0.000
AC_TER_01	-0.036	-0.002	-0.008
AC_TER_02	-0.124	-0.003	-0.002
TOTAL	**-0.529**	**-0.007**	**-0.012**

La merma de recarga, sin embargo, no afecta los acuíferos Grande, Hurtado y Huatulame, que siguen teniendo niveles altos en todo momento, aunque disminuyen sus afloramientos.

Los acuíferos más afectados durante la sequía son los del estero Punitaqui, Terrazas de Punitaqui, Pama y Palqui. Sin embargo, su comportamiento es similar al observado en el escenario Futuro Base 1, y en condiciones hidrológicas normales, todos se recuperan.

Figura 9.62
Acuífero Terrazas Sur



9.6.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 2

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del escenario Futuro Operación 2, de todas las variables analizadas.

Tabla 9.38
Promedios de variables asociadas a zonas de riego

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_HurtadoOvalle	1800.8	0.463	0.599	0.296	0.000	0.009	0.305	0.255	0.037	0.012	67
ZR_R.HuatulameantesBCC	922.3	0.230	0.292	0.251	0.000	0.003	0.254	0.199	0.000	0.055	92
ZR_R.Huatulame	1528.7	0.373	0.494	0.423	0.000	0.004	0.427	0.321	0.079	0.026	92
ZR_R.Palqui	1727.4	0.415	0.549	0.273	0.021	0.005	0.299	0.250	0.036	0.012	75
ZR_R.Cauchil	1011.5	0.219	0.330	0.094	0.009	0.002	0.105	0.080	0.018	0.006	65
ZR_R.PalomaPoniente	1195.6	0.293	0.404	0.117	0.000	0.003	0.120	0.097	0.000	0.023	58
ZR_R.M.Cogoti	820.8	0.204	0.293	0.105	0.002	0.000	0.107	0.080	0.019	0.008	55
ZR_R.GrandeA.Paloma	936.8	0.199	0.304	0.301	0.000	0.000	0.301	0.197	0.072	0.031	99
ZR_R.M.Paloma	777.6	0.182	0.236	0.166	0.002	0.000	0.168	0.134	0.024	0.010	78
ZR_R.Camarico_Hualli	583.7	0.118	0.170	0.079	0.000	0.002	0.081	0.066	0.012	0.004	61
ZR_R.Limari_Ingenio	2734.6	0.541	0.902	0.890	0.000	0.012	0.902	0.536	0.275	0.092	99
ZR_R.LimariabajoIngenio	2199.4	0.427	0.790	0.779	0.000	0.000	0.779	0.422	0.268	0.089	99
ZR_R.Talhuen	2487.1	0.614	0.747	0.405	0.000	0.013	0.418	0.360	0.014	0.043	69
ZR_R.VillalonIngenio	2534.0	0.651	0.978	0.641	0.000	0.012	0.653	0.451	0.152	0.051	74
ZR_R.CanalVillalon	5730.8	1.138	1.837	0.770	0.000	0.000	0.770	0.556	0.161	0.054	59
ZR_R.M.CogotiPun.	553.8	0.114	0.162	0.054	0.012	0.003	0.069	0.053	0.012	0.004	63
ZR_R.DerCogoti1	888.1	0.180	0.302	0.165	0.016	0.004	0.185	0.114	0.053	0.018	73
ZR_R.DerCogoti2	1072.9	0.220	0.295	0.188	0.018	0.005	0.211	0.162	0.041	0.007	80
ZR_R.CanalPunitaqui	1963.7	0.377	0.529	0.331	0.046	0.008	0.385	0.285	0.075	0.025	81
ZR_R.CamClindo	1890.9	0.377	0.675	0.306	0.020	0.007	0.333	0.199	0.114	0.020	64
ZR_R.CamMatriz	3397.1	0.634	1.011	0.527	0.038	0.013	0.578	0.394	0.156	0.028	70
ZR_R.CamaricoPunitaqui	805.7	0.151	0.244	0.127	0.007	0.003	0.137	0.092	0.038	0.007	69
ZR_R.Tabali	4616.2	0.841	1.297	0.528	0.000	0.000	0.528	0.392	0.102	0.034	55
ZR_HurtadoIntSA_Ang	1617.2	0.494	1.137	0.962	0.000	0.012	0.974	0.420	0.000	0.555	90
ZR_HurtadoARecoleta	198.0	0.056	0.131	0.131	0.000	0.001	0.132	0.056	0.057	0.019	100
ZR_LosMollesAlto8	87.9	0.028	0.039	0.039	0.000	0.001	0.040	0.028	0.000	0.011	100
ZR_Rapel	1906.7	0.618	0.843	0.718	0.008	0.016	0.742	0.535	0.103	0.103	91
ZR_MostazalDes	1001.0	0.325	0.446	0.377	0.000	0.006	0.383	0.275	0.000	0.107	89
ZR_GrandeAMostazalarr.G	498.0	0.161	0.214	0.207	0.000	0.008	0.215	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandeAMostazalab.G	498.0	0.161	0.214	0.207	0.000	0.008	0.215	0.157	0.000	0.059	98
ZR_GrandePSJuan	1054.4	0.342	0.463	0.448	0.006	0.011	0.465	0.336	0.097	0.032	99
ZR_AfluentePalomaNorte	939.1	0.265	0.371	0.358	0.000	0.000	0.358	0.255	0.000	0.103	98
ZR_CogotiEmbalse	1399.1	0.476	0.803	0.660	0.002	0.011	0.673	0.395	0.209	0.070	87
ZR_Combarbala	1353.4	0.460	0.783	0.224	0.000	0.007	0.231	0.137	0.000	0.094	31
ZR_Pama	1500.0	0.512	1.590	0.221	0.021	0.008	0.250	0.084	0.124	0.041	21
ZR_PunitaquiCh	233.8	0.050	0.108	0.068	0.000	0.001	0.069	0.032	0.000	0.037	78
ZR_PunitaquiALimari	168.2	0.036	0.079	0.040	0.000	0.000	0.040	0.018	0.000	0.021	70
TOTAL	**54634.4**	**12.945**	**20.661**	**12.476**	**0.228**	**0.198**	**12.902**	**8.580**	**2.348**	**1.970**	**71.5**

Tabla 9.39
Promedios de variables asociadas a canales

Canal	Q captado	Q recibido de otros canales	Q total pérdidas evap + percol	Q entregado ZR	Q entregado a otros canales	Q Sobrante	Capacidad
	m3/s		m3/s	m3/s		m3/s	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.685	0.000	0.271	0.314	0.080	0.019	3.7
CA_D.Cauchil	0.012	0.080	0.008	0.084		0.000	0.8
CA_PalquiMauratSemita	0.437		0.187	0.250		0.000	1.6
CA_SifonElorsa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CA_Camarico	1.522		0.449	1.039		0.035	2.7
CA_M.Paloma	4.040		1.091	0.166	2.780	0.003	8.5
CA_D.Cogoti	0.007	1.619	0.340	0.646	0.556	0.086	4.5
CA_Tabali		0.556	0.028	0.528		0.000	2.5
CA_D.Recoleta		1.323	0.093		1.230		4.5
CA_M.Recoleta	1.519		0.410		1.109	0.000	7.0
CA_Talhuen		0.485	0.063	0.405		0.017	1.6
CA_Tuqui		0.402	0.052	0.296		0.054	0.5
CA_Villalon		1.452	0.000	1.411		0.041	7.0
TOTAL	**8.222**	**5.917**	**2.991**	**5.139**	**5.754**	**0.255**	**44.800**

Tabla 9.40
Promedios de variables asociadas a acuíferos

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q disponible recarga	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.000	0.227	0.097	0.324	0.286	0.038	0.022	0.006	0.009	0.000	0.000	0.037
AC_GRA_02	3.7	0.000	0.244	0.000	0.244	0.209	0.035	0.020	0.000	0.014	0.000	0.001	0.035
AC_GRA_03	62	0.171	0.035	0.127	0.333	0.289	0.044	0.034	0.004	0.005	0.000	0.001	0.044
AC_HUA_01	13.4	0.030	0.017	0.079	0.126	0.119	0.007	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.007
AC_COG_01	4.7	0.000	0.059	0.209	0.268	0.247	0.021	0.011	0.002	0.008	0.000	0.000	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.000	0.061	0.124	0.185	0.152	0.033	0.007	0.021	0.000	0.000	0.005	0.033
AC_HUR_04	2.9	0.000	0.022	0.057	0.079	0.050	0.028	0.020	0.000	0.008	0.000	0.000	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.144	0.019	0.036	0.199	0.189	0.011	0.000	0.000	0.007	0.000	0.004	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.052	0.025	0.275	0.352	0.296	0.056	0.055	0.000	0.000	0.000	0.001	0.056
AC_ING_01	38.1	0.000	0.003	0.014	0.017	0.000	0.017	0.016	0.000	0.005	0.000	0.000	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.000	0.027	0.682	0.709	0.660	0.049	0.043	0.000	0.006	0.000	0.000	0.049
AC_PAL_01	19.1	0.021	0.000	0.054	0.075	0.016	0.059	0.000	0.029	0.011	0.000	0.020	0.060
AC_PUN_01	4.8	0.000	0.011	0.004	0.015	0.000	0.015	0.000	0.004	0.012	0.000	0.000	0.016
AC_RAP_01	9.2	0.000	0.018	0.103	0.121	0.043	0.078	0.061	0.008	0.008	0.000	0.000	0.077
AC_TER_01	70.1	0.108	0.000	0.422	0.530	0.338	0.191	0.029	0.125	0.010	0.000	0.043	0.207
AC_TER_02	10.3	0.223	0.000	0.065	0.288	0.254	0.034	0.000	0.027	0.000	0.000	0.010	0.037
TOTAL	**513.6**	**0.749**	**0.768**	**2.348**	**3.865**	**3.148**	**0.716**	**0.318**	**0.226**	**0.110**	**0.000**	**0.085**	**0.739**

9.6.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2

El caudal captado por los canales es de 14,1 m3/s, y entregan a las zonas de riego 12,5 m3/s. La demanda de las zonas de riego es de 20,7 m3/s, como en el escenario Futuro Base 1. El caudal aportado por los acuíferos es de 0,2 m3/s.

Las devoluciones de canales se estiman en 0,3 m3/s, los afloramientos se reducen levemente a 3,1 m3/s, la recarga neta se mantiene en 0,7 m3/s, respondiendo a las extracciones, que también se mantienen en 0,7 m3/s. Las salidas al mar en este escenario tienen un promedio de 2,7 m3/s, mayores que en el escenario base. Sin incluir las crecidas, se mantienen en 1,6 m3/s, levemente menor que en los escenarios anteriores.

Como resultado de lo anterior, se puede decir que el mejoramiento de canales aporta levemente a aumentar el porcentaje de demanda suplida a nivel de cuenca, elevando el 70,7% del escenario base a 71,5% en este escenario.

El revestimiento de canales afecta levemente los acuíferos, al reducir su recarga potencial. Sin embargo, la recarga neta se ve muy poco afectada, y con ello el estado de los niveles. Si bien hay acuíferos que se ven afectados durante la sequía, todos se recuperan en condiciones hidrológicas normales.

9.7 Escenario Futuro Operación 3: Aumento de eficiencia de riego

El tercer escenario futuro que se ha explorado, fue el de aumentar la eficiencia de riego en toda la cuenca. Este escenario se simuló sobre el escenario Futuro Base 1.

9.7.1 Configuración del escenario Futuro Operación 3

La forma en que se modeló el aumento de eficiencia fue a partir de los métodos de riego.

- El método riego tecnificado tiene eficiencia de 0,9, igual que en el escenario base.
- El método de riego no tecnificado subió de 0,5 a 0,65.
- El método tendido subió de 0,3 a 0,5.

Este escenario se compara con el escenario Futuro Base 1, sobre el cual se simuló. Lo que interesa observar es fundamentalmente el efecto sobre aspectos como la seguridad de riego, y la recarga de acuíferos. Todos los resultados de este escenario, presentados en los cinco tipos de planillas, se incluyen en el Anexo Digital, Anexo Capítulo 9.7.

9.7.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación3_Calib_SUP

En las figuras siguientes se muestra el comportamiento de los 3 embalses existentes. En este caso se observa que los tres aumentan su volumen en relación con el escenario Futuro Base 1, en especial después del llenado de 2017 (correspondiente a la hidrología de 2002). Esto se explica por una disminución de la demanda agrícola hacia los embalses gracias al

mejoramiento de la eficiencia de riego y al hecho que las áreas cultivadas tienen un tope. Sólo el embalse Recoleta muestra una bajada más importante que en el escenario base, en los últimos años más secos del período. En total, el volumen almacenado aumenta en promedio 30 millones de m3 entre los tres embalses.

Figura 9.63
Embalse Cogotí

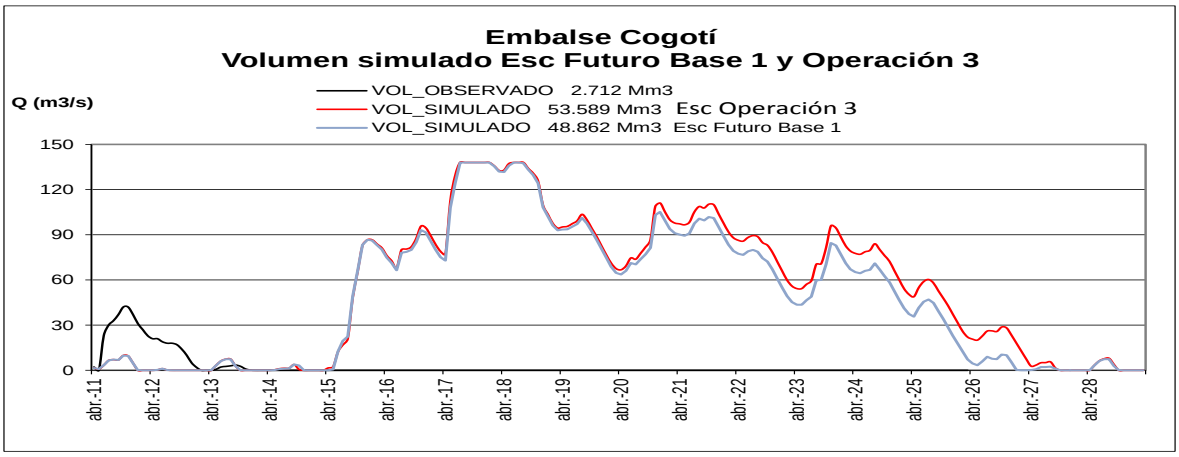


Figura 9.64
Embalse Recoleta

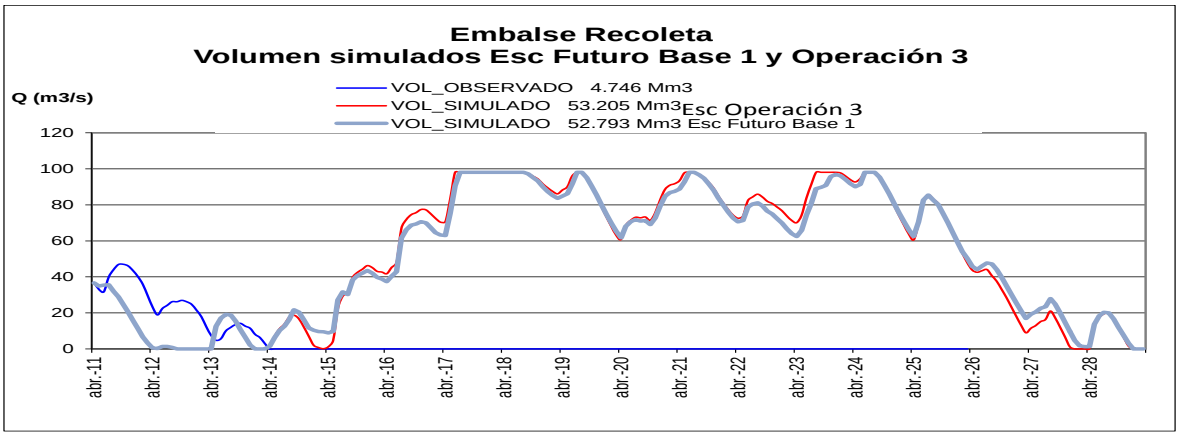
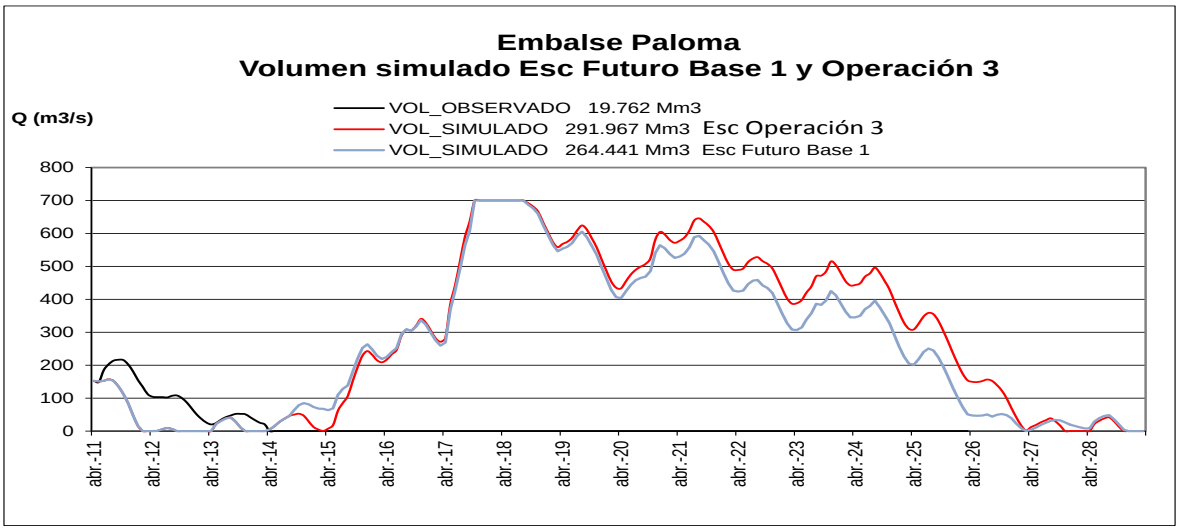


Figura 9.65
Embalse Paloma



b) Planilla FuturoOperación3_Calib_SUB

Esta planilla no aporta más elementos que la planilla Balance_AC, la cual se describe más adelante.

c) Planilla FuturoOperación3_Balance ZR

A continuación se compara el grado de cobertura de la demanda, a través del parámetro % de demanda suplida, en los diferentes sectores de la cuenca, con los obtenidos en el escenario Futuro Base 1. Los resultados se aprecian en la Tabla 9.41.

Lo que se puede observar en esta tabla es que esta medida genera casi sólo cambios favorables en los porcentajes de demanda suplida, en relación con el escenario base. Un único sector se ve claramente perjudicado, que es el riego del río Punitaqui, debido a la reducción de los derrames que recibe este río desde el riego de las terrazas. Muy levemente perjudicados se verían los sectores de riego del río Grande bajo Paloma y Limarí, que captan sus aguas directo del río, el cual recibe menos derrames.

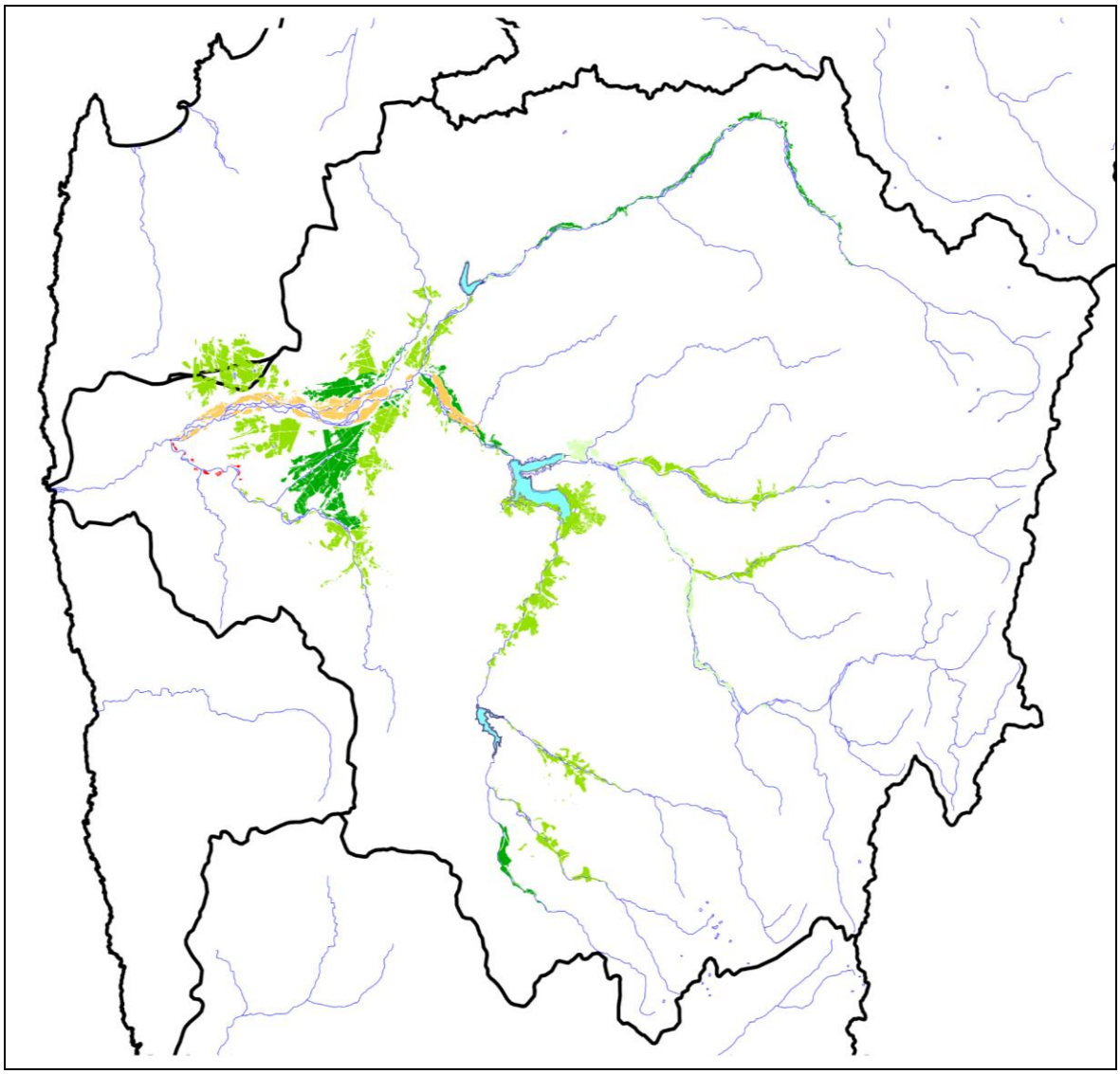
Lo mismo se muestra en la Figura 9.70 a continuación, donde se utilizó el código de color de la última columna, para representar la diferencia en el porcentaje de demanda suplida entre el escenario Futuro Operación 3 y el escenario Futuro Base 1.

De acuerdo con lo observado, este escenario es el más conveniente desde el punto de vista global del sistema, con un índice promedio ponderado para toda la cuenca, de 75,9% de demanda suplida, un 5,2% superior al del escenario Futuro Base 1.

Tabla 9.41
Comparación demanda suplida en escenario Futuro Base 1 y escenario Operación 3

	Esc Futuro Base 1	Esc Operación 3	OP 1 - Fut Base 1
	2014-2029	2014-2029	Diferencia
	%DS	%DS	%DS
	%	%	%
ZR_Pama	21	31	10.6
ZR_Combarbala	31	35	3.6
ZR_R.Tabali	53	57	3.9
ZR_R.M.Cogoti	54	55	1.4
ZR_R.PalomaPoniente	56	57	1.5
ZR_R.CanalVillalon	58	62	4.1
ZR_R.Camarico_Hualli	59	67	7.2
ZR_R.M.CogotiPun.	61	64	3.2
ZR_R.CamClindo	62	69	6.1
ZR_R.Cauchil	63	66	2.9
ZR_HurtadoOvalle	66	69	2.4
ZR_R.CamaricoPunitaqui	67	74	7.0
ZR_PunitaquiALimari	68	62	-5.7
ZR_R.CamMatriz	68	75	7.3
ZR_R.Talhuen	69	71	2.4
ZR_R.DerCogoti1	69	74	4.2
ZR_R.VillalonIngenio	72	78	5.1
ZR_R.Palqui	76	78	2.7
ZR_PunitaquiCh	77	79	2.4
ZR_R.M.Paloma	78	84	5.8
ZR_R.DerCogoti2	78	83	4.9
ZR_R.CanalPunitaqui	80	84	4.5
ZR_CogotiEmbalse	87	91	4.3
ZR_MostazalDes	89	91	2.0
ZR_HurtadoIntSA_Ang	90	95	5.4
ZR_Rapel	91	93	1.9
ZR_R.HuatulameantesBCC	91	92	1.2
ZR_R.Huatulame	91	92	1.2
ZR_GrandeAMostazalab.GC	98	98	0.0
ZR_GrandeAMostazalarr.GC	98	98	0.0
ZR_AfluentePalomaNorte	98	98	0.0
ZR_GrandePSJuan	99	99	0.0
ZR_R.LimariabajoIngenio	99	98	-1.6
ZR_R.Limari_Ingenio	99	98	-1.4
ZR_R.GrandeA.Paloma	99	98	-1.6
ZR_HurtadoARecoleta	100	100	0.0
ZR_LosMollesAlto8	100	100	0.0
TOTAL	70.7	75.9	5.2

Figura 9.66
Comparación porcentaje demanda suplida
entre escenario Futuro Base 1 y Operación 3



d) Planilla FuturoOperación3_Balance_CA

Lo que se observa es que algunos canales (Camarico, Matriz Paloma y Matriz Recoleta) en promedio captan sensiblemente más caudal, lo que se explica en base a que es más alto el estado de los embalses, y la regla resulta más favorable. Los demás canales captan prácticamente lo mismo que en el escenario Futuro Base 1, muy poco más o muy poco menos.

Tabla 9.42
Comparación caudales captados por canales escenarios Futuro Base 1 y Operación 3

Canal	Diferencia Q captado
	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.005
CA_D.Cauchil	-0.002
CA_PalquiMauratSemita	0.007
CA_SifonElorsa	0.000
CA_Camarico	0.043
CA_M.Paloma	0.077
CA_D.Cogoti	-0.002
CA_Tabali	0.000
CA_D.Recoleta	0.000
CA_M.Recoleta	0.068
CA_Talhuén	0.000
CA_Tuqui	0.000
CA_Villalón	0.000
TOTAL	**0.196**

e) Planilla FuturoOperación3_Balance_AC

El comportamiento de los acuíferos de los dos escenarios Futuro Base 1 y Operación 3, se puede comparar en base los valores resultantes de diferencia de recarga potencial, recarga neta y extracción total, que se muestran en la Tabla 9.43 adjunta.

Se puede apreciar que para todos los acuíferos se reduce significativamente el caudal disponible para recarga, debido a la fuerte reducción de la ineficiencia de riego. Sin embargo, observando la recarga neta, ella no se reduce muy significativamente, porque en el escenario base había muchos afloramientos. Los afloramientos se reducen en este escenario, pero la recarga neta no se reduce significativamente.

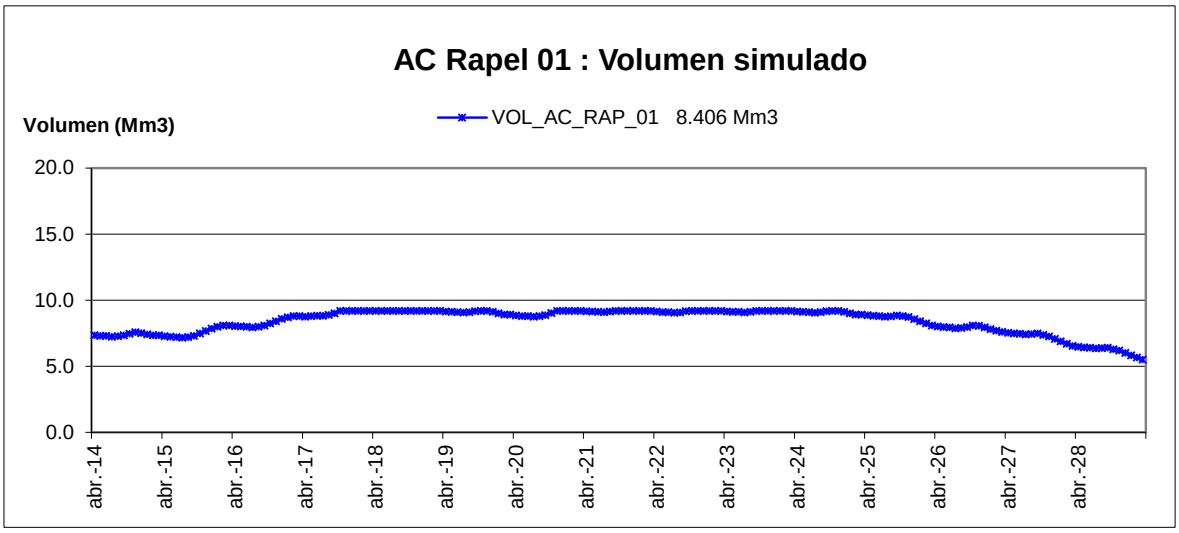
Como contrapartida al mejor uso del agua superficial, se reduce levemente la extracción desde el acuífero, en especial desde el acuífero Terrazas del Limarí.

Tabla 9.43
Comparación recarga y extracción desde acuíferos
en esc. Futuro Base 1 y Operación 3

Acuífero	Q disponible recarga	Q recarga neta	Q Total Extracción
AC_GRA_01	-0.039	-0.001	0.000
AC_GRA_02	0.001	0.000	0.000
AC_GRA_03	-0.035	-0.001	0.001
AC_HUA_01	-0.023	0.000	0.000
AC_COG_01	-0.098	-0.001	0.000
AC_PAM_01	-0.040	-0.001	-0.001
AC_HUR_04	-0.031	0.000	0.000
AC_HUR_05	0.006	-0.001	0.000
AC_LIM_01	-0.121	0.000	0.000
AC_ING_01	-0.001	-0.001	0.000
AC_LIM_02	-0.224	0.000	0.000
AC_PAL_01	-0.008	0.000	0.000
AC_PUN_01	-0.001	-0.001	0.000
AC_RAP_01	-0.040	-0.007	-0.002
AC_TER_01	-0.113	0.003	-0.013
AC_TER_02	-0.022	0.002	0.000
TOTAL	**-0.789**	**-0.009**	**-0.015**

En este escenario hay un importante efecto de reducción de almacenamiento, en los acuíferos El Palqui, Punitaqui, Rapel, Terrazas Sur y Norte, durante las sequías. Sin embargo, todos ellos logran recuperarse con la llegada de años normales, como se aprecia, a modo de ejemplo, en la Figura 9.71 adjunta.

Figura 9.67
Acuífero Rapel



9.7.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 3

En los cuadros siguientes se presentan los resultados promedio del escenario Futuro Operación 3, de todas las variables analizadas, para el período 2014-2028.

Tabla 9.44
Promedios de variables asociadas a zonas de riego

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_HurtadoOvalle	1800.8	0.463	0.550	0.301	0.000	0.009	0.310	0.269	0.030	0.010	69
ZR_R.HuatulameantesBCC	922.3	0.230	0.272	0.237	0.000	0.003	0.240	0.200	0.000	0.039	92
ZR_R.Huatulame	1528.7	0.373	0.452	0.392	0.000	0.004	0.396	0.324	0.054	0.018	92
ZR_R.Palqui	1727.4	0.415	0.502	0.277	0.021	0.005	0.303	0.261	0.031	0.010	78
ZR_R.Cauchil	1011.5	0.219	0.284	0.088	0.009	0.002	0.099	0.082	0.013	0.004	66
ZR_R.PalomaPoniente	1195.6	0.293	0.362	0.111	0.000	0.003	0.114	0.098	0.000	0.017	57
ZR_R.M.Cogoti	820.8	0.204	0.259	0.095	0.002	0.000	0.097	0.080	0.012	0.005	55
ZR_R.GrandeA.Paloma	936.8	0.199	0.261	0.250	0.001	0.000	0.251	0.192	0.041	0.018	98
ZR_R.M.Paloma	777.6	0.182	0.218	0.179	0.002	0.000	0.181	0.154	0.019	0.008	84
ZR_R.Camarico_Hualli	583.7	0.118	0.149	0.082	0.000	0.002	0.084	0.071	0.010	0.003	67
ZR_R.Limari_Ingenio	2734.6	0.541	0.739	0.715	0.000	0.012	0.727	0.526	0.151	0.050	98
ZR_R.LimariabajoIngenio	2199.4	0.427	0.624	0.600	0.000	0.000	0.600	0.413	0.141	0.047	98
ZR_R.Talhuen	2487.1	0.614	0.706	0.418	0.000	0.013	0.431	0.380	0.013	0.038	71
ZR_R.VillalonIngenio	2534.0	0.651	0.839	0.605	0.000	0.012	0.617	0.489	0.096	0.032	78
ZR_R.CanalVillalon	5730.8	1.138	1.537	0.762	0.000	0.000	0.762	0.614	0.111	0.037	62
ZR_R.M.CogotiPun.	553.8	0.114	0.142	0.049	0.012	0.003	0.064	0.054	0.008	0.003	64
ZR_R.DerCogoti1	888.1	0.180	0.247	0.134	0.016	0.004	0.154	0.115	0.029	0.010	74
ZR_R.DerCogoti2	1072.9	0.220	0.267	0.181	0.018	0.005	0.204	0.170	0.028	0.005	83
ZR_R.CanalPunitaqui	1963.7	0.377	0.468	0.309	0.044	0.008	0.361	0.295	0.049	0.016	84
ZR_R.CamClindo	1890.9	0.377	0.537	0.276	0.020	0.007	0.303	0.220	0.071	0.013	69
ZR_R.CamMatriz	3397.1	0.634	0.844	0.509	0.035	0.013	0.557	0.435	0.105	0.018	75
ZR_R.CamaricoPunitaqui	805.7	0.151	0.203	0.122	0.006	0.003	0.131	0.101	0.025	0.004	74
ZR_R.Tabali	4616.2	0.841	1.108	0.480	0.000	0.000	0.480	0.391	0.067	0.022	57
ZR_HurtadoIntSA_Ang	1617.2	0.494	0.783	0.724	0.000	0.012	0.736	0.458	0.000	0.279	95
ZR_HurtadoARecoleta	198.0	0.056	0.090	0.090	0.000	0.001	0.091	0.056	0.026	0.009	100
ZR_LosMollesAlto8	87.9	0.028	0.034	0.034	0.000	0.001	0.035	0.028	0.000	0.007	100
ZR_Rapel	1906.7	0.618	0.745	0.656	0.006	0.016	0.678	0.552	0.063	0.063	93
ZR_MostazalDes	1001.0	0.325	0.394	0.344	0.000	0.006	0.350	0.284	0.000	0.066	91
ZR_GrandeAMostazalarr.G	498.0	0.161	0.189	0.183	0.000	0.008	0.191	0.157	0.000	0.035	98
ZR_GrandeAMostazalab.G	498.0	0.161	0.189	0.183	0.000	0.008	0.191	0.157	0.000	0.035	98
ZR_GrandePSJuan	1054.4	0.342	0.409	0.396	0.006	0.011	0.413	0.337	0.058	0.019	99
ZR_AfluentePalomaNorte	939.1	0.265	0.327	0.316	0.000	0.000	0.316	0.255	0.000	0.061	98
ZR_CogotiEmbalse	1399.1	0.476	0.633	0.555	0.002	0.011	0.568	0.420	0.111	0.037	91
ZR_Combarbala	1353.4	0.460	0.617	0.197	0.000	0.007	0.204	0.152	0.000	0.052	35
ZR_Pama	1500.0	0.512	0.973	0.211	0.021	0.008	0.240	0.128	0.084	0.028	31
ZR_PunitaquiCh	233.8	0.050	0.077	0.050	0.000	0.001	0.051	0.033	0.000	0.018	79
ZR_PunitaquiALimari	168.2	0.036	0.056	0.023	0.000	0.000	0.023	0.015	0.000	0.008	62
TOTAL	**54634**	**12.945**	**17.086**	**11.134**	**0.221**	**0.198**	**11.553**	**8.966**	**1.446**	**1.144**	**75.9**

Tabla 9.45
Promedios de variables asociadas a canales

Canal	Q captado	Q recibido de otros canales	Q total pérdidas evap + percol	Q entregado ZR	Q entregado a otros canales	Q Sobrante	Capacidad
	m3/s		m3/s	m3/s		m3/s	m3/s
CA_CogotiPunitaqui	0.665	0.000	0.293	0.282	0.076	0.014	3.7
CA_D.Cauchil	0.010	0.076	0.008	0.078		0.000	0.8
CA_PalquiMauratSemita	0.446		0.190	0.256		0.000	1.6
CA_SifonElorsa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CA_Camarico	1.522		0.501	0.989		0.032	2.7
CA_M.Paloma	4.161		1.124	0.179	2.859	0.000	8.5
CA_D.Cogoti	0.005	1.553	0.376	0.598	0.505	0.079	4.5
CA_Tabali		0.505	0.025	0.480		0.000	2.5
CA_D.Recoleta		1.305	0.091		1.214		4.5
CA_M.Recoleta	1.519		0.410		1.109	0.000	7.0
CA_Talhuen		0.485	0.063	0.418		0.004	1.6
CA_Tuqui		0.433	0.056	0.301		0.076	0.5
CA_Villalon		1.405	0.000	1.367		0.038	7.0
TOTAL	**8.329**	**5.763**	**3.138**	**4.948**	**5.763**	**0.242**	**44.800**

Tabla 9.46
Promedios de variables asociadas a acuíferos

Acuífero	Vol Máx	Q perc Canales	Q perc Cauce	Q perc ZR	Q disponible recarga	Q afloram	Q recarga neta	Q ET	Q bombeo Riego	Q bombeo AP	Q bombeo Min	Q bombeo Ind	Q Total Extracción
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_GRA_01	13.9	0.000	0.227	0.058	0.285	0.248	0.037	0.022	0.006	0.009	0.000	0.000	0.037
AC_GRA_02	3.7	0.000	0.245	0.000	0.245	0.210	0.035	0.020	0.000	0.014	0.000	0.001	0.035
AC_GRA_03	62	0.419	0.035	0.081	0.535	0.492	0.044	0.034	0.005	0.005	0.000	0.001	0.045
AC_HUA_01	13.4	0.100	0.018	0.054	0.172	0.164	0.007	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.007
AC_COG_01	4.7	0.000	0.059	0.111	0.170	0.149	0.020	0.011	0.002	0.008	0.000	0.000	0.021
AC_PAM_01	2.9	0.000	0.061	0.084	0.145	0.113	0.032	0.007	0.021	0.000	0.000	0.005	0.033
AC_HUR_04	2.9	0.000	0.022	0.026	0.048	0.020	0.028	0.020	0.000	0.008	0.000	0.000	0.028
AC_HUR_05	34.8	0.261	0.020	0.030	0.311	0.299	0.011	0.000	0.000	0.007	0.000	0.004	0.011
AC_LIM_01	97.2	0.056	0.025	0.152	0.233	0.176	0.056	0.055	0.000	0.000	0.000	0.001	0.056
AC_ING_01	38.1	0.000	0.003	0.013	0.016	0.000	0.016	0.016	0.000	0.005	0.000	0.000	0.021
AC_LIM_02	126.5	0.000	0.028	0.415	0.443	0.393	0.049	0.043	0.000	0.006	0.000	0.000	0.049
AC_PAL_01	19.1	0.021	0.000	0.044	0.065	0.005	0.060	0.000	0.030	0.011	0.000	0.020	0.061
AC_PUN_01	4.8	0.000	0.011	0.002	0.013	0.000	0.013	0.000	0.004	0.012	0.000	0.000	0.016
AC_RAP_01	9.2	0.000	0.018	0.063	0.081	0.011	0.071	0.061	0.006	0.008	0.000	0.000	0.075
AC_TER_01	70.1	0.177	0.000	0.276	0.453	0.258	0.196	0.029	0.120	0.010	0.000	0.043	0.202
AC_TER_02	10.3	0.353	0.000	0.037	0.390	0.352	0.039	0.000	0.029	0.000	0.000	0.010	0.039
TOTAL	**513.6**	**1.387**	**0.772**	**1.446**	**3.605**	**2.89**	**0.714**	**0.318**	**0.223**	**0.110**	**0.000**	**0.085**	**0.736**

9.7.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 3

En este escenario, el caudal captado por canales alcanza 14,1 m3/s, de los cuales se entregan en las zonas de riego, 11,1 m3/s. La demanda de las zonas de riego es de 17,1 m3/s, se ha reducido sensiblemente debido al elevado grado de tecnificación de este escenario. El aporte del acuífero se mantiene en 0,2 m3/s.

El caudal de devolución desde canales es de 0,2 m3/s, los afloramientos alcanzan 2,9 m3/s, la recarga neta se mantiene en 0,7 m3/s, así como también el total de extracciones, que se mantiene en 0,7 m3/s.

Las salidas al mar promedio del período 2014-2029 son de 2,633 m3/s, pero eliminando la crecida, quedan en 1,4 m3/s.

El porcentaje de demanda suplida se eleva a 75,9%, en relación con 70,7% en el escenario base.

El escenario de Operación 3 aparece como el más beneficioso de todos los escenarios analizados, para el sistema hídrico de la cuenca del Limarí. Prácticamente toda la cuenca se beneficia, ya que logra disminuir su demanda gracias al mejoramiento de las técnicas de riego, con las cuales se riega mejor el área cultivable definida. Al mismo tiempo sólo habría un sector que se vería significativamente perjudicado, Punitaqui, por la disminución de los derrames provenientes desde la Terrazas Sur del Limarí, y algunos sectores levemente perjudicados, que serían los del río Grande bajo Paloma y Limarí.

Además, este escenario es el que más agua logra retener en la cuenca, incluso más que los embalses, reduciendo las salidas al mar.

La tecnificación del riego disminuye notoriamente la recarga disponible o potencial de los acuíferos, pero, como se señaló antes, ello ocurre a costa de la recarga potencial que aflora, con lo cual prácticamente no se ve afectada la recarga neta. Los acuíferos que sufren bajas significativa durante las sequías, se recuperan en épocas normales.

9.8 Conclusiones y recomendaciones

9.8.1 Algunos resultados relevantes

- La cuenca presenta actualmente un total de 54.634 ha cultivadas, 23% de ellas sobre los embalses Cogotí, Paloma y Recoleta, y 77% bajo ellos.

- Se estimó que el 59% de los cultivos corresponde a frutales, que se distribuyen con el 29% sobre embalses y el 71% sobre embalses. Por otro lado, el 41% de los cultivos corresponde a anuales, de los cuales el 15% se encuentra sobre embalses, y 85% bajo embalses.

- En cuanto a la tecnificación de riego, el mayor grado de tecnificación se observa en los sectores con cultivos frutales. Los sectores más tecnificados se encuentran sobre embales principalmente en los ríos Rapel, Grande y Mostazal y en los sectores de los canales Villaseca, Talhuén y en la Qda. del Ingenio. Los sectores menos tecnificados corresponden a aquellos regados por los canales Derivado Cogotí, Camarico y Villalón por una parte y a los sectores del río Hurtado sobre embalse por otro lado.

- La cuenca total del Limarí tiene una demanda agrícola promedio neta a nivel raíz, de 12,8 m3/s, equivalentes a 404 millones de m3. A nivel de zona de riego, tomando en cuenta la ineficiencia de los métodos de riego, se requieren 19,6 m3/s, es decir, 618 millones de m3 al año.

- El caudal que efectivamente reciben las zonas de riego, en promedio del período 2000-2014, totaliza 12.7 m3/s. De este caudal, 12.4 m3/s provienen de canales, 0.15 m3/s provienen de los acuíferos y 0.15 m3/s de la lluvia. Con estas cifras se aprecia el poco uso que se hace del agua subterránea para el riego. También es interesante ver que el caudal de entrega efectiva es muy cercano al caudal demando a nivel raíz. Ello indica que con un aumento de eficiencia de canales y de sistemas de riego, se podría aumentar mucho el porcentaje de demanda suplida en la cuenca.

- Del total de caudal recibido, 8,4 m3/s llegarían al nivel raíz, 2,3 m3/s percolarían a los acuíferos, y 2,0 m3/s derramarían, es decir, volverían al sistema superficial.

- De este modo, las aguas no consumidas en los sectores altos vuelven al sistema, para ser entregadas nuevamente más abajo.

- De acuerdo con las estimaciones que se pueden realizar hasta el momento, los acuíferos de la cuenca del río Limarí y afluentes totalizan un volumen de unos 500 millones de m3. Arriba de los embalses los acuíferos son bastante reducidos en cuanto a su volumen, siendo el más importante el del Palqui con 19.1 millones de m3. Los acuíferos principales se ubican bajo los embalses, y son; Grande bajo embalse (62 millones de m3), Limarí (224 millones de m3) y Terrazas Sur (70 Mm3). Estos valores deberán ser revisados una vez que se cuente con la información hidrogeológica que a la fecha está generando el estudio de Corfo.

- En los acuíferos modelados de la cuenca del río Limarí, se estima que hay 2.737 m3/s de derechos subterráneos constituidos, de los cuales 2.108 m3/s serían para riego, 0.455 m3/s están constituidos para agua potable y 0.174 m3/s para fines industriales. Esta cantidad de derechos no incluye los derechos en los acuíferos no modelados ni los derechos que se ubican fuera de los acuíferos pero dentro de las subcuencas aportantes.

- Los derechos subterráneos ubicados dentro de las subcuencas aportantes fueron considerados al restarlos de los aportes desde las subcuencas, de modo que los únicos derechos no considerados son los que se ubican en los acuíferos no

considerados, por ser muy pequeños. Estos derechos totalizan 372 l/s para uso en riego y 156 l/s para uso en agua potable, que se surten desde fuentes externas al modelo. El efecto de no haberlos considerado, está por el lado conservador. Los derechos para riego podrían aliviar en algo los déficits de este sector, pero el aporte no sería significativo. En cuanto al agua potable, son usos y fuentes que quedaron fuera del sistema, que cuantitativamente tampoco son significativos.

- Para los acuíferos se ha estimado una recarga potencial y una recarga neta o efectiva. La recarga potencial está compuesta por todas las aguas disponibles para infiltrar, que son las pérdidas desde canales, las percolaciones desde zonas de riego y las percolaciones desde el cauce. La recarga neta es la parte que realmente logra infiltrar, la que en muchos acuíferos es nula, debido a que se encuentran llenos y sin uso.

- Al contrario de lo que se observa en el Elqui, el largo proceso de sequía no hace cambiar el comportamiento de la cuenca, pues se puede observar que la mayor parte del área cultivada de esta cuenca se encuentra en zona de permanente sequía.

- Los acuíferos no han sido una fuente importante de agua para esta cuenca. Eso se debe a que donde tendrían buena recarga, asociada a los ríos, ellos son muy reducidos, y donde son más grandes, es aguas abajo de los embalses, donde los recursos hídricos son muy escasos.

9.8.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios

En la Tabla 9.47 adjunta, se presentan los resultados más importantes de cada escenario, que muestran en cifras lo que se ha descrito en los acápites anteriores.

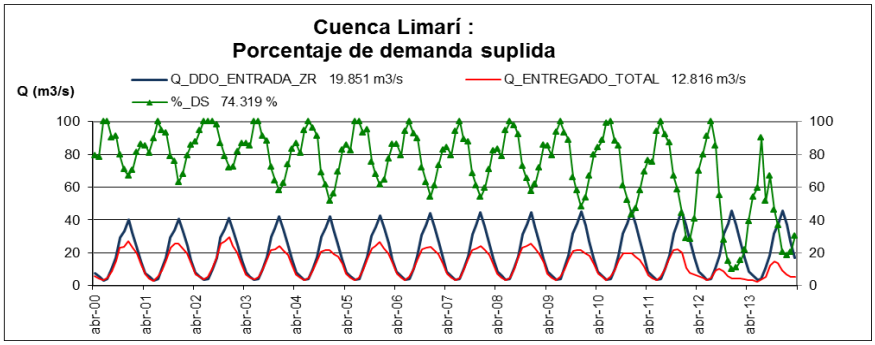
Tabla 9.47
Visión sinóptica resultados escenarios estudiados (m3/s)

Cuenca Limarí					
Escenario	**Calibración**	**Futuro Base 1**	**Operación 1**	**Operación 2**	**Operación 3**
Período	2000-2014	2014-2028	2014-2028	2014-2028	2014-2028
Área de riego	54634	54634	54634	54634	54634
Caudal captado por canales	15.5	13.8	13.5	14.1	14.1
Caudal entrada ZR	12.4	12.2	11.5	12.5	11.1
Caudal demanda ZR	19.9	20.7	19.5	20.7	17.1
Caudal aporte acuíferos	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
Devolución canales	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2
Afloramiento subt	4.2	3.7	3.5	3.1	2.9
Recarga Neta	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
Total extracción bombeo	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
% Demanda Suplida	74.3	70.7	75.0	71.5	75.9
Salidas al mar	4.0	2.5	2.8	2.7	2.6

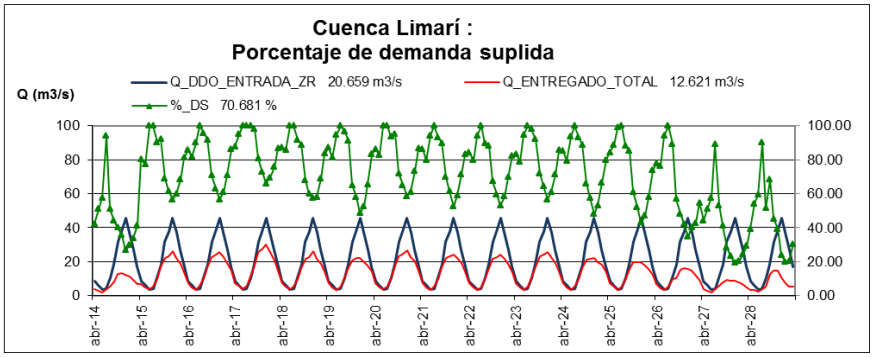
Finalmente, en la Figura 9.68 siguiente se presenta en forma gráfica el porcentaje de demanda suplida a nivel de la cuenca completa, como serie de tiempo, para cada escenario estudiado, donde se aprecia visualmente la forma en que se satisface la demanda. En especial, se aprecia la profundización de la sequía histórica en la figura de Calibración, la forma en que se repite el mismo período en el escenario Futuro Base 1, el alivio poco perceptible a nivel de cuenca, que introducen los embalses Valle Hermoso y Rapel, la mejora poco perceptible que significa el mejoramiento de canales a nivel global, y la mejora más perceptible de la tecnificación del riego.

Figura 9.68
Porcentaje de demanda suplida en escenarios estudiados

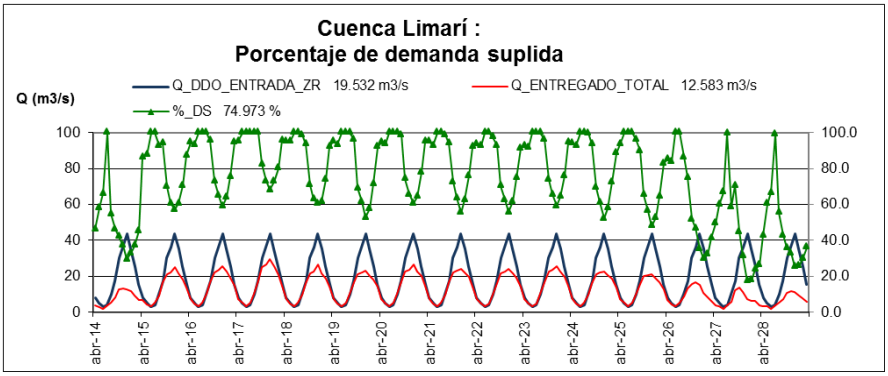
Calibración



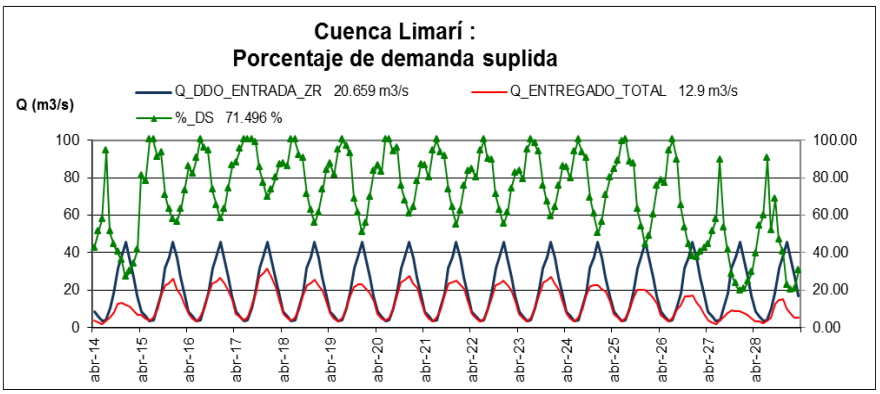
Futuro Base 1



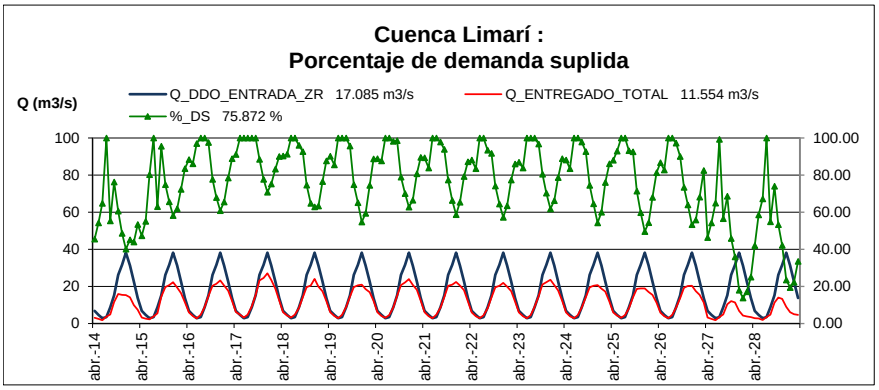
Futuro Operación 1



Futuro Operación 2



Futuro Operación 3



En todas las figuras se aprecia claramente que normalmente en verano se suple una demanda de 60% del total, que con riego deficitario podría llegar al 70%. En ningún caso se abastecería toda la superficie demandante de agua, de 54.630 hectáreas reconocidas como cultivables a la fecha actual.

9.8.3 Recomendaciones a partir de escenarios Futuro Base 1, Operación 1, 2 y 3

Se trabajó con un modelo desarrollado en ambiente académico (Universidad Católica y Universidad de La Serena), adaptando algunos aspectos a la presente consultoría. El gran valor del modelo UC-ULS, para el presente trabajo, radica en la programación de la regla de operación del Sistema Paloma, y en la caracterización de las áreas cultivadas.

Una vez adaptado a las condiciones y requerimientos de la presente consultoría, el modelo se calibró para el período 2000-2014.

Se efectuó un trabajo de calibración que buscó reproducir las estadísticas observadas de la DGA en estaciones que no fueran de cabecera, sino que estuvieran alteradas por las condiciones de uso de la cuenca. Hay pocas estaciones alteradas que sirvan para calibración, especialmente en los ríos Grande y Limarí. Por esta razón, una de las recomendaciones que se desprende del presente trabajo, es contar con algunas estaciones en régimen alterado, especialmente bajo embalses, en los ríos Hurtado y Limarí, en apoyo a la calibración de modelos de gestión integrada.

La calibración mostró que en los últimos años de sequía, la entrega se ha alejado de la regla preestablecida. Esto efectivamente ha ocurrido, debido a que la gestión se hace en forma más solidaria de lo que permite la regla. De este hecho se desprende la recomendación de revisar la regla de operación y proponer una nueva regla para estados de extrema escasez, como el actual, que se produce después de varios años de sequía, donde la regla en su forma estricta no tiene aplicación.

En vista de la prolongada sequía, se observa una reducción del área cultivada, porque el agua disponible sólo alcanza a cubrir una fracción de la demanda. La cuenca está preparada para una entrega de agua reducida, con cultivos anuales en general poco tecnificados, de alrededor de un 50% del área total cultivada. Sin embargo, la falta de agua ya ha superado ese límite, y el área que estuvo bajo cultivo en la temporada 2013-2014, se estima entre un 30% y 40%, de acuerdo con los resultados de la modelación.

Los acuíferos no tienen gran importancia en esta cuenca, salvo aguas abajo de los embalses Recoleta y Paloma. En los ríos de cabecera, sobre embalses, en general los acuíferos son pequeños, y están suficientemente explotados con los pocos derechos que tienen en la actualidad. Los acuíferos más importantes se encuentran en el río Hurtado bajo Recoleta, Grande bajo Paloma, río Limarí y Terrazas de Punitaqui. Con la excepción de Terrazas de Punitaqui, que se deprime fuertemente en sequía pero se recupera en épocas normales, estos acuíferos en general no están afectados por el uso actual, manteniéndose siempre llenos.

En estudios anteriores se ha hecho el análisis del grado en que podrían explotarse los acuíferos para dar sustento al sistema de aguas superficiales. En base a ellos, y a los resultados del presente estudio, se puede decir que al menos los acuíferos grandes del río Grande bajo Paloma y Limarí, pueden ser usados para aliviar situaciones de extrema escasez en sequía, y que sería conveniente simular algunos escenarios en ese sentido. La limitante, en este caso, podría ser la calidad del agua.

En cuanto a acciones mayores como la construcción de embalses, se aprecia que la construcción de nuevos embalses elevaría el porcentaje de satisfacción de la demanda, en su propia zona y a nivel de la cuenca completa, sólo si fuera acompañada de una intensiva tecnificación del riego. En tales condiciones, el embalse Valle Hermoso favorecería fuertemente la zona de riego Pama, elevando el área con riego seguro del 10% actual a un 35% futuro, siempre que se haga un uso muy cuidadoso del embalse, se revistan todos los canales y se tecnifique todo el riego.

El embalse Rapel se instala en un sector de riego de los mejor suplidos de la cuenca. Si bien aporta recursos para la zona de riego del río Rapel, en conjunto con el embalse Valle Hermoso afectarían el riego de todas las zonas dependientes de los embalses Cogotí, Paloma y Recoleta, zonas que están mucho peor suplidas que las del río Rapel.

En cuanto al mejoramiento de la eficiencia de canales, si bien no es muy significativo en cuanto al aumento de porcentaje de demanda suplida que produce, es positivo, porque no afecta en forma negativa a ningún sector, y, por el contrario, la medida beneficia a una

gran parte de la cuenca. Es eficiente poner el énfasis en los canales mayores. Para los acuíferos se reduce algo la recarga potencial, pero sin efectos sensibles.

Al igual que el mejoramiento de canales, la tecnificación de riego se perfila, una vez más, como una alternativa técnicamente muy atractiva para abordar el problema crónico de falta de agua en la cuenca bajo embalses. Genera beneficios prácticamente para toda la cuenca, sin perjuicios perceptibles salvo en la zona de riego del estero Punitaqui, cuya afección podría manejarse de otra forma, por ejemplo con mayor acceso al agua subterránea.

De todas formas, la tecnificación de riego per se no es la solución para la sequía, evento en el cual sería deseable contar con alguna nueva fuente, en lo posible permanente, como podrían ser algunos acuíferos.

10. Modelo WEAP_Choapa_CRDP_2014

La tercera etapa del estudio se refiere al desarrollo del modelo WEAP Choapa. Al igual que el modelo del Elqui, éste se configuró a partir de la información generada para el modelo MAGIC-Choapa, desarrollado en el estudio CAZALAC/RODHOS de 2006, y aplicado nuevamente en el estudio del Plan Maestro de Recursos Hídricos de 2013.

El modelo MAGIC-Choapa fue el tercer modelo MAGIC completo que se desarrolló en Chile, y como tal, tenía una topología muy adecuada, la cual sólo se modificó marginalmente al usar la herramienta WEAP. En esencia, el modelo Choapa se tradujo casi literalmente desde el modelo MAGIC, debido además, a los buenos resultados obtenidos con aquél en la modelación original.

10.1 Datos de entrada Modelo WEAP-Choapa

10.1.1 Topología

Lo primero que fue ingresado al modelo fue la topología. Ésta se basó en el modelo MAGIC, desarrollado en 2006 por CAZALAC / RODHOS, en el estudio "Aplicación de metodologías para la determinación de la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso: Región de Coquimbo".

De todas formas, se revisó integralmente la topología del MAGIC, y se detallaron más algunas zonas de riego y sectores acuíferos, específicamente del Choapa Alto, con miras a la futura gestión. Además, se volvió a actualizar la información de las zonas de cultivo y de los canales, y, a diferencia de los modelos Elqui y Limarí, en el modelo Choapa se pudo actualizar las características de los acuíferos en base a los avances del estudio hidrogeológico de la CORFO, que está siendo llevado a cabo por la empresa Hidrogestión.

Es importante señalar que en la topología se mantuvo una total coherencia de la nomenclatura con la nomenclatura del MAGIC, donde se enumeran los sectores de aguas arriba hacia aguas abajo, incluyendo donde corresponde los afluentes. Los acuíferos tienen el mismo número que las zonas de riego bajo los cuales se ubican.

En cuanto a los canales, están numerados desde aguas arriba hacia aguas abajo. El nombre de cada canal o grupo de canales modelado, se incorpora en las notas del modelo.

A continuación se detallan los aspectos relativos a los elementos topológicos del modelo**.**

- **Tramos de río**

Se trazó la hidrología completa de la cuenca, sobre una base SIG, marcando el río Choapa y los afluentes más importantes a ser modelados. Las cuencas de cabecera o intermedias aportantes en general se representan por aportes de caudal que van generando nodos en las confluencias. Los tramos de río se generan automáticamente al insertar nodos de entrada o de salida sobre el río.

- **Zonas de riego**

Se identificaron zonas de riego de acuerdo con un criterio de ubicación, y de fuentes desde las que son abastecidas. Básicamente, se mantuvieron las zonas de riego definidas en el modelo MAGIC. Las modificaciones, todas menores, se refieren a un mayor detalle del sector del Choapa Alto entre Chillepín y Quelén, y a la incorporación de algunos sectores nuevos identificados con Google Earth, que aún no están catastrados, o no fueron considerados en el último catastro, por encontrarse alejadas del valle principal, pero que representan una demanda de agua. A partir de 2011, desaparece como zona de riego la zona de inundación del embalse El Bato.

No se modificó la nomenclatura MAGIC, de modo que se mantiene una lógica de enumeración de aguas arriba hacia aguas abajo. Existiendo sectores con cultivos permanentes y temporales, con diferente prioridad se asignación del recurso hídrico, se separó cada zona de riego en una parte frutal (FRU) y otra parte anual (ANU), para hacer más realista la asignación. Las zonas de riego definidas en el presente estudio se presentan en la Tabla 10.1 adjunta.

Tabla 10.1
Zonas de riego y su ubicación

NO_ZR CL-050	Río Manque arriba
NO_ZR CL-11	Estero Cunlagua arriba
NO_ZR CL-13	Estero Camisas bajo embalse
NO_ZR CL-21	Quebrada de Cárcamo
NO_ZR CL-22	Estero Aucó
NO_ZR CL-24	Quebradas de Atelcura y Matancilla
ZR_01	Río Valle o Estero Almendrillo
ZR_02	Batuco, Río Choapa arriba de confluencia Choapa-Cuncumén
ZR_03	Cuncumén
ZR_04	Tranquilla, Río Choapa abajo de Cuncumén
ZR_050	Río Choapa Chillepín Coirón
ZR_051	Río Choapa Coirón Punta Nueva
ZR_052	Río Choapa arriba de Estero Quelén
ZR_06	Estero Quelén
ZR_07	Llimpo, abajo de Estero Quelén
ZR_08	Higuerilla, Río Choapa abajo de sector Panguecillo
ZR_09	El Queñe, Río Choapa arriba de Salamanca
ZR_10	Ciudad Salamanca, Río Choapa
ZR_11	Zapallar, Río Chalinga arriba San Agustín
ZR_12	Río Chalinga entre San Agustín y Qda Cunlagua
ZR_13	Río Chalinga entre Qda Cunlagua y Río Choapa
ZR_14	El Tambo, Río Choapa abajo de Salamanca

ZR_15	Estero Camisas
ZR_16	Choapa Medio y Estero Limáhuida
ZR_17	Choapa Medio entre Estero Limáhuida y Río Illapel
ZR_18	Río Illapel sobre Las Burras
ZR_19	Río Illapel arriba de Río Carén
ZR_20	Río Carén antes río Illapel
ZR_21	Río Illapel en junta Río Carén, actual embalse El Bato
ZR_22	Río Illapel entre embalse y Huintil
ZR_23	Río Illapel entre Huintil y Cárcamo
ZR_24	Río Illapel entre Qda Cárcamo y Estero Aucó
ZR_25	Río Illapel, Ciudad Illapel
ZR_26	El Peral, Río Illapel arriba confluencia con Choapa
ZR_27	Choapa entre Río Illapel y Estero Canela
ZR_28	Huentelauquén, Río Choapa abajo de Estero Canela

En la Figura 10.1 se muestra la identificación y definición de las zonas de riego para la modelación. En la Figura 10.2 se observa que hay dos tipos de zonas de riego:

- zonas definidas por CIREN en su Catastro de Frutales 2011, y que corresponden a frutales
- zonas definidas en el estudio CAZALAC/RODHOS 2006 (ZR NO Ciren), que corresponden a cultivos anuales y vides industriales

Figura 10.1
Identificación de zonas de riego modeladas cuenca Choapa

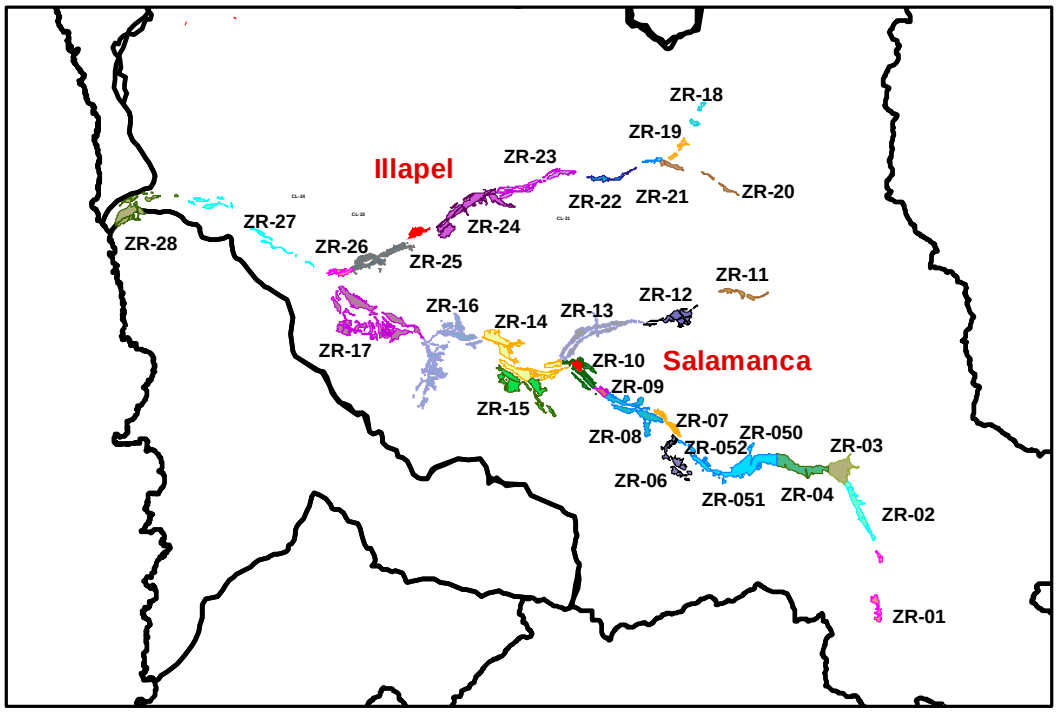
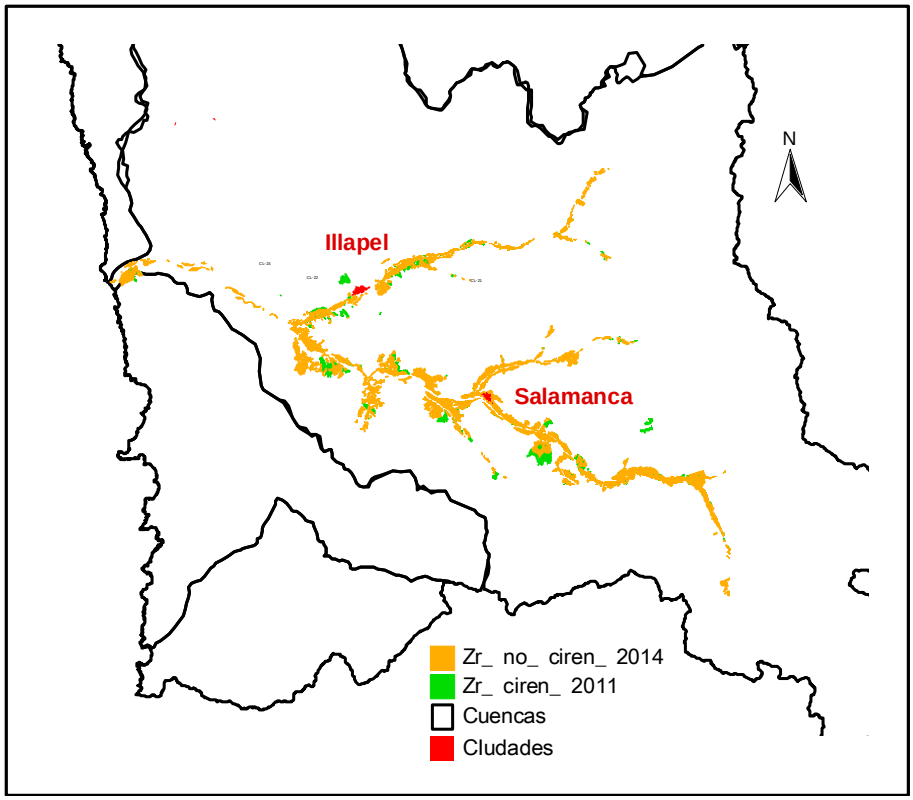


Figura 10.2
Ubicación de zonas de riego según cultivo



- **Canales**

Para la identificación de los canales a modelar con WEAP, se partió del listado de canales individuales de la Junta de Vigilancia del río Choapa, donde cada canal aparece con sus acciones.

Donde fue conveniente para la modelación, los canales se agregaron en función de su recorrido y de las zonas que riegan. Los canales más importantes en cuanto a caudal se modelaron en forma individual. Algunos canales tienen derivados, los cuales también quedaron representados en la modelación.

En la siguiente Tabla 10.2 se presentan todos los canales modelados, con sus acciones y capacidades. Vale señalar que las capacidades se obtuvieron del estudio de Catastro de Bocatomas Conic-BF 2002.

Tabla 10.2
Canales para modelación con WEAP

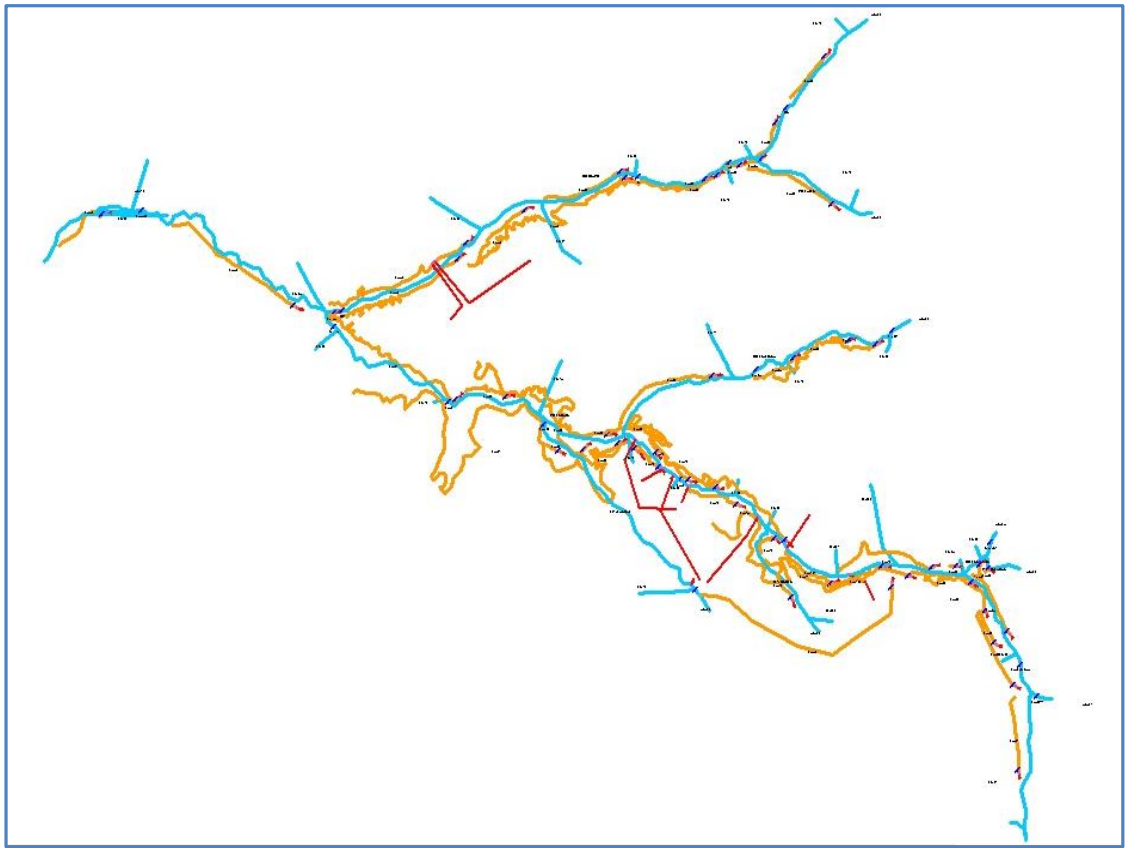
SECTOR	NOMBRE	CAPACIDAD	ACCIONES
		l/s	l/s
Río Valle	Los Morros		24
Río Valle	Cabecita de Leon		83
Río Valle	Eusebio		30
Río Valle	Huinganal		134
Río Valle	Los Blancos	210	28
Rio Valle	El Valle		66
Río Valle	Piedrino	400	104
Río Choapa arriba de Cuncumén	Batuco	300	105.62
Qda Llano del Manzano	Manzano Derecho		35
Qda Llano del Manzano	Manzano Izquierdo		70
Río Choapa arriba de Cuncumén	Rodadero o Manzano	240	350
Río Choapa arriba de Cuncumén	Pangue o Inquilinos	930	300
Río Choapa arriba Cuncumén	Molino de Tranquilla	400	300
Río Tencadán	Molino de Tencadan		100
Río Tencadán	Tencadan Derecho		15
Río Tencadán	Tencadan Izquierdo		30
Río Tencadán	Codicia o Las Pampitas	200	50
Estero Tencadán	Tencadan Cortadera Derecho		15
Estero Tencadán	Tencadan Aleton Izquierdo		20
Río Cuncumén	Buitron		3
Río Cuncumén	El Bosque		6.3
Río Cuncumén	Los Loros o Los Arriendos	800	160
Río Cuncumén	Tira Larga	120	90
Río Choapa abajo Cuncumén	Araya	800	350
Río Choapa abajo Cuncumén	Barraco Grande	950	400
Río Choapa abajo Cuncumén	Los Ranchos Choapa	810	350
Río Choapa abajo Cuncumén	Silvano	2000	1574
Río Choapa entre Cuncumén y Estero Quelé	Barraco Chico	810	50
Río Choapa entre Cuncumén y Estero Quelé	Aguas Claras de Chillepin	260	80
Río Choapa entre Cuncumén y Estero Quelé	Del Sauco	1300	350
Río Choapa entre Cuncumén y Estero Quelé	El Pavo	340	180
Río Choapa en Estero Quelén	El Molino de Quelen	1100	124
Río Choapa arriba Estero Quelén	Breas o Molino de Llimpo	1730	1000
Estero Quelén	De La Higuera		40
Estero Quelén	Potrero El Buey		20
Estero Quelén	Maiten		40
Río Choapa abajo Estero Quelén	Panguecillo Dos	300	100
Río Choapa abajo Estero Quelén	Panguecillo Uno o Del Medio	1700	500
Río Choapa abajo Estero Quelén	Higueral	600	500
Río Choapa abajo Estero Quelén	Pardo	1100	530
Choapa arriba Salamanca	El queñe	160	100
Choapa arriba Salamanca	Aguas Claras	90	25
Choapa arriba Salamanca	Poblacion	330	397
Choapa arriba Salamanca	Buzeta	3800	3000
Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Molino de Zapallar	980	59

Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Batuco de Chalinga	480	300
Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Alameda	125	28
Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Maravillal o La Viña		31.56
Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Palquial o Molino de San Agustin	300	290
Río Chalinga arriba Estero Cunlagua	Valentino y Canelo	390	3
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Vertiente Los Guindos		28
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Vertiente San Francisco		8
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Vertiente Las Casas		7
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Chañar Chalinga	178	50
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Cunlagua	452	200
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Huanque	169	140
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Arboleda Grande		150
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Chalinga o Cancha Brava		119
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Chilcas		120
Río Chalinga, abajo Estero Cunlagua	Tebal	101	230
Río Choapa abajo Salamanca	Tahuincano	900	350
Río Choapa en Salamanca	Las Viudas	650	220
Río Choapa en Salamanca	Caracha	1100	500
Río Choapa en Salamanca	El Boldo o Chuchiñi	1900	800
Estero Camisas	Jote	480	120
Estero Camisas	Camisas o Batito	59	20
Río Choapa arriba Estero Limáhuida	El Molino de Peralillo	750	310
Estero Limáhuida	Las Chacras	50	70
Río Choapa arriba Estero Limáhuida	Los Loros o del Medio	220	80
Río Choapa arriba junta Illapel	Pintacura norte	600	200
Río Choapa arriba junta Illapel	Pintacura Sur o Alto	1570	450
Río Illapel arriba Las Burras	Los Gonzalez	91	2.92
Río Illapel arriba Las Burras	Salinas	78	41.7
Quebrada Las Burras	Las Burras Bajas	60	28
Río Illapel arriba Las Burras	El Durazno Illapel	12	2.92
Río Illapel arriba Las Burras	Los Perales Illapel	-9999	3.41
Quebrada Las Burras	Las Burras Altas	10	17.5
Río Illapel arriba Río Carén	Llano Alto	50	21.6
Río Illapel arriba Río Carén	Llano Bajo	10	6.6
Río Illapel arriba Río Carén	Covachas	10	5.4
Río Illapel arriba Río Carén	Los Manque	10	0.5
Río Illapel arriba Río Carén	Alcantarilla	45	5.11
Río Illapel arriba Río Carén	Pichicaven	35	1.87
Río Illapel arriba Río Carén	Calderon	453	10.94
Río Illapel arriba Río Carén	Mala Ladera	336	114.66
Río Illapel arriba Río Carén	El Aguita		2.34
Río Illapel arriba Río Carén	Los Sauces		7.29
Río Illapel arriba Río Carén	La Montaña		1.46
Río Illapel arriba Río Carén	Rodado	1393	11.82
Río Illapel arriba Río Carén	El Bajo	35	5.84
Río Illapel arriba Río Carén	El Macal Illapel	42	5.11
Río Illapel en Carén	Santa Margot	92	39.03
Río Carén	Molino de Caren Illapel	60	105.65
Río Carén	Santa Ana	30	9.52
Río Carén	San Arturo	50	30.93

Río Carén	Carrizo Caren	170	8.7
Río Carén	San Isidro de Caren	70	11.7
Río Carén	El Buitre Caren	100	50.15
Río Carén	El Tizon	60	5
Río Illapel abajo Río Carén	Santa Margarita	173	62.73
Río Illapel abajo Río Carén	El Palqui Illapel	55	2.93
Río Illapel abajo Río Carén	El Peumo	15	2.92
Río Illapel abajo Río Carén	San Jorge	46	9.77
Río Illapel abajo Río Carén	Santa Isabel	120	96.16
Río Illapel abajo Río Carén	San Javier	14	4.38
Río Illapel abajo Río Carén	La Turbina	250	283.09
Río Illapel abajo Río Carén	Santa Olga	20	32.39
Río Illapel abajo Río Carén	Los Pelados	65	42.59
Río Illapel abajo Río Carén	San Isidro	153	44.51
Río Illapel abajo Río Carén	El Silo	61	64.07
Río Illapel abajo Río Carén	San Patricio	27	15.88
Río Illapel abajo Río Carén	Camarote	55	13.29
Río Illapel abajo Río Carén	Escorial Illapel	90	119.46
Río Illapel abajo Río Carén	Plantacion	79	42.31
Río Illapel abajo Río Carén	La Higuera	50	127.32
Río Illapel abajo Río Carén	Cocinera	930	813.07
Río Illapel abajo Río Carén	Vertiente Luna		14
Río Illapel abajo Río Carén	Hospital	60	99.06
Río Illapel abajo Río Carén	Molino de Carcamo	4500	566.12
Río Illapel abajo Río Carén	Potrero nuevo	150	136.12
Río Illapel en ciudad Illapel	Zepedino	20	18
Río Illapel en ciudad Illapel	Cuz Cuz	40	350
Río Illapel en ciudad Illapel	Poblacion Los Guindos	150	208.9
Río Illapel en ciudad Illapel	San Juan de Dios	112	12
Río Illapel abajo de ciudad illapel	Inquilinos o del Bajo	170	119
Río Illapel abajo de ciudad illapel	Molino El Peral	30	163.9
Río Illapel abajo de ciudad illapel	Tuc Bellavista	160	260
Río Illapel arriba junta Choapa	Junta El Maiten	500	7.5
Río Choapa abajo junta Illapel	Coyuntagua norte	120	20
Río Choapa abajo junta Illapel	Coyuntagua Sur Dos		20
Río Choapa abajo junta Illapel	Coyuntagua Sur Uno	30	20
Río Choapa abajo junta Illapel	San Francisco	152	35
Río Choapa abajo junta Illapel	San Pedro	118	40
Río Choapa abajo junta Illapel	Doña Juana	52	50
Río Choapa abajo junta Illapel	Mincha Sur Arriba	370	93
Río Choapa abajo junta Illapel	Mincha Sur Abajo	73	39
Río Choapa abajo junta Illapel	Matriz de Mincha	320	82
Rio Choapa Bajo	Tunga Norte Bajo		20
Rio Choapa Bajo	Mincha Norte		20
Río Choapa abajo Estero Canela	Salinero	300	100
Río Choapa abajo Estero Canela	Millahue Dos o Los Patos	420	150
Río Choapa abajo Estero Canela	Los Rulos		18
Río Choapa abajo Estero Canela	San Antonio	550	100
Río Choapa abajo Estero Canela	Millahue 1 o Lilenes	750	808
Rio Choapa Bajo	Molino de Choapa		70

En la siguiente Figura 10.3 se muestran en naranjo los canales modelados con WEAP. También se muestran los flujos de retorno, de los cuales tienen importancia los canales de devolución desde el embalse Corrales al río Choapa, y las devoluciones de aguas servidas tratadas de las plantas de Illapel y Salamanca.

Figura 10.3
Canales modelados



- **Embalses**

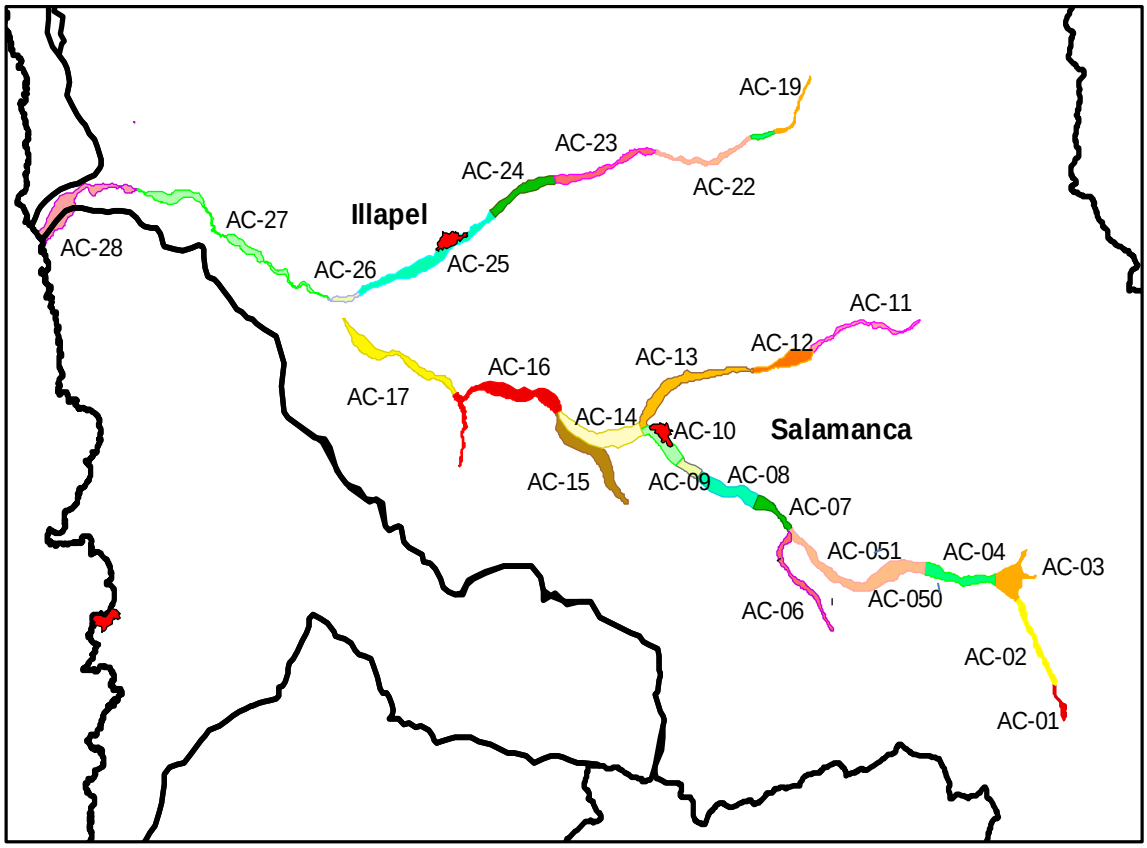
Se agregaron los dos embalses, Corrales y El Bato, los cuales se describen dentro del modelo WEAP. El Bato comienza su operación en Marzo de 2011.

- **Acuíferos**

La definición de acuíferos se efectuó en función de los sectores de riego. Es necesario comentar que la definición de los acuíferos pudo ser mejorada en función de los resultados del estudio hidrogeológico de Corfo, ejecutado por la empresa Hidrogestión, que entregó los resultados de la exploración geofísica del basamento rocoso al final de la etapa de calibración del presente estudio. Si bien se adecuaron los valores de volumen y área superficial de los acuíferos modelados, no se alcanzó a redefinir todo el sistema de acuíferos, tarea que puede quedar planteada para una etapa siguiente. La profundidad del basamento rocoso y los

parámetros de los acuíferos definidos se muestran en el capítulo 10.1.2. Los acuíferos modelados se muestran en la Figura 10.4.

Figura 10.4
Acuíferos modelados con WEAP



- **Sitio de demanda puntual**

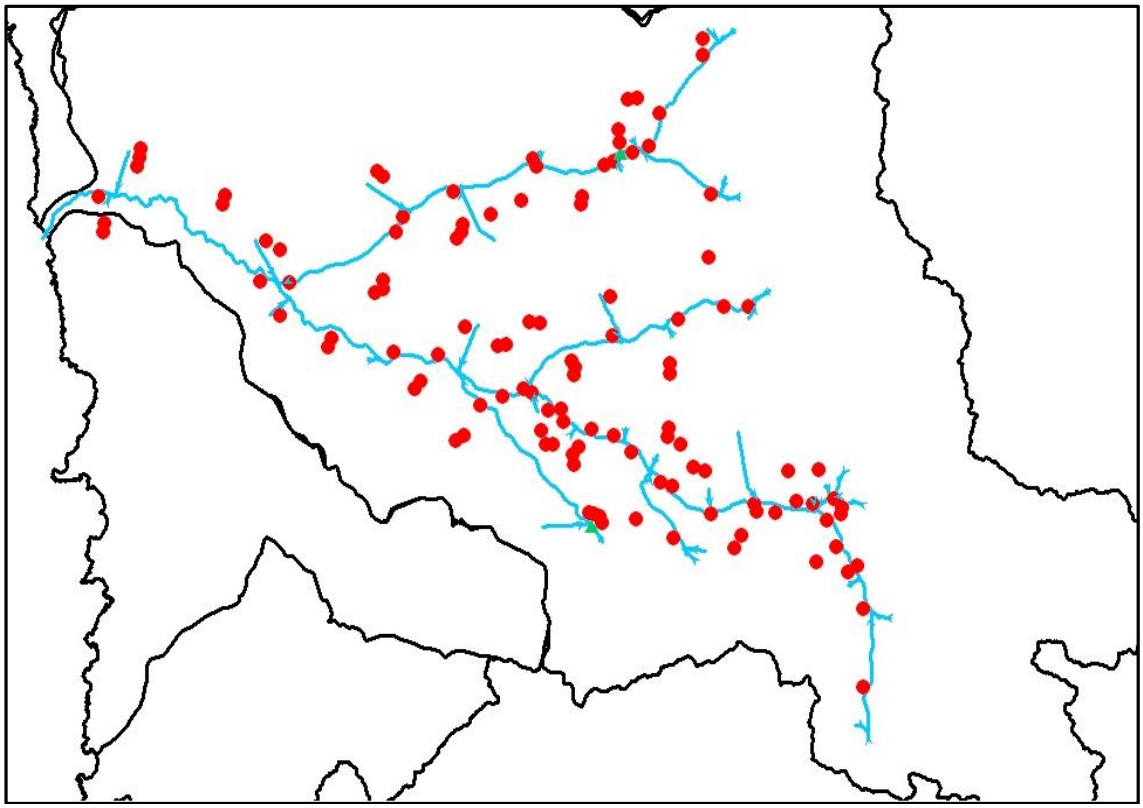
Los sitios de demanda puntual son sitios que consumen agua tanto superficial como subterránea. Se refieren a la demanda de agua por parte de la vegetación ripariana, agua potable, industria y minería, demandas evaporativas desde embalses y demandas de riego desde zonas NO_ZR, que están fuera de las zonas de riego originalmente definidas dentro del valle.

Los elementos considerados son los que se presentan en la Tabla 10.3 y están identificados con puntos rojos en la Figura 10.5.

Tabla 10.3
Captaciones puntuales de caudal

Nombre Captación	Concepto
AP_AC_xx	Entrega de agua potable rural desde Acuífero xx
AP_AC_08	Entrega de agua potable urbana (Salamanca) desde Acuífero 08
AP_AC_24	Entrega de agua potable urbana (Illapel) desde Acuífero 24
AP_AN_10	Entrega de agua potable urbana desde Aporte Natural 10 (Canela)
CS_01_MLP	Captación Superficial de Minera Los Pelambres en Cuncumén
EMB_CORRALES_CAMISAS	Demanda al embalse Corrales desde el estero Camisas (caudal ecológico)
EMB_CORRALES_CHOAPA1	Demanda al embalse Corrales desde el río Choapa (devoluciones Panguecillo e Higuerillas)
EMB_CORRALES_CHOAPA2	Demanda al embalse Corrales desde el río Choapa (devolución Los Veneros)
EMB_CORRALES_EVAP	Demanda al embalse Corrales por evaporación
EMB_EL_BATO_EVAP	Demanda al embalse El Bato por evaporación
EMB_TOTORAL_EVAP	Demanda al embalse Totoral por evaporación
EMB_CHALINGA_EVAP	Demanda al embalse Chalinga por evaporación
ET_AC_xx	Evaporación vegetación ripariana desde Acuífero xx
ET_AN_10	Evaporación vegetación ripariana desde Aporte Natural 10 (cuenca Canela)
ET_ILL_01	Evaporación vegetación ripariana desde Illapel
IND_AC_xx	Demanda de derechos industriales desde Acuífero xx
MIN_AC_03	Demanda de derechos mineros desde Acuífero 03
MIN_CL_22	Demanda de derechos mineros desde Cuenca Lateral 22
NOZR_AN_10	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca de aporte natural 10
NOZR_CL_11	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 11
NOZR_CL_14	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 14
NOZR_CL_21	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 21
NOZR_CL_22	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 22
NOZR_CL_23	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 23
NOZR_CL_24	Demanda de riego de la zona de riego ubicada en la cuenca lateral 24
REST_MPL_AC_050	Demanda de restitución a pozos MLP en Acuífero 050
REST_MPL_AC_051	Demanda de restitución a pozos MLP en Acuífero 051
REST_MPL_AC_08	Demanda de restitución a pozos MLP en Acuífero 08
REST_MPL_AC_09	Demanda de restitución a pozos MLP en Acuífero 09
RQ_CA_xx	Requerimiento de caudal en canal xx

Figura 10.5
Sitios de demanda puntual



- **Infiltración**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia del método de riego, cada zona de riego puede infiltrar recurso hacia el acuífero. Por esta razón, donde hay acuíferos, se ha definido una infiltración desde la zona de riego correspondiente.

- **Derrames**

El modelo considera que, en función de la ineficiencia de riego, cada zona de riego puede generar derrames o flujos de retorno hacia el río. De esta forma, se define un flujo de retorno desde cada una de las zonas de riego, de retorno al río.

- **Enlace de transmisión de caudal (Transmission Link)**

Se definen estos enlaces para unir e indicar la dirección del flujo entre los siguientes elementos:

i) Desde cada una de las bocatomas de canales, hacia el punto llamado requerimiento de caudal puesto al inicio de cada canal, desde donde se desarrolla el recorrido y se producen las sucesivas entregas del canal
ii) Desde acuíferos hacia las zonas de riego que tienen un pozo en dicho acuífero

iii) Desde acuíferos hacia sitios de demanda puntual que abastecen, tanto de agua potable, como derechos mineros e industriales
iv) Desde nodos de río en cuencas laterales aportantes hacia demandas de riego en cuencas laterales aportantes
v) Desde acuíferos hacia la demanda de evapotranspiración de la vegetación ripariana
vi) Desde acuíferos a pozos de restitución de MLP
vii) Desde embalses hacia la demanda de evaporación
viii) Desde embalses a sitios de demanda de caudal ecológico o de riego
ix) Desde acuíferos a bocatomas de canales (para apoyo de canales en escenarios futuros)

- **Flujo de retorno**

Se usaron de cuatro formas:

i) Para devolver al río las demandas de caudal ecológico solicitadas al embalse
ii) Para entregar al río Choapa el caudal desde el embalse Corrales
iii) Para entregar al río los caudales solicitados al acuífero por los pozos de restitución de MLP
iv) Para devolver al río el caudal de aguas servidas tratadas urbanas (Illapel y Salamanca)
v) Para entregar a cada canal el caudal solicitado al río mediante puntos de requerimiento de caudal

- **Punto de control de caudal**

Los puntos de control sirven para contrastar los resultados del modelo con cualquier tipo de dato con el que se cuente. De este modo, los datos de contraste pueden ser caudales observados en una estación fluviométrica, caudales calculados por fuera del modelo, u otro tipo de datos independientes de la modelación, con los que se desee contrastar los resultados en dicho punto.

10.1.2 Key Assumptions

En la sección Key Assumptions se definen variables personalizadas. Se admite entrada directa de la información, y alimentación de datos externos, en este caso, datos contenidos en la carpeta Datos, generalmente en formato .csv.

A continuación se presentan todos los datos, criterios y fórmulas que configuran la información de entrada del modelo WEAP Choapa.

a) Acuíferos

En este acápite del modelo se caracterizan todos los acuíferos que se incluyeron en la topología, de modo que aquí se encuentra el listado completo de acuíferos. Para esta cuenca

fue posible contar con los resultados de curvas de isoprofundidad del basamento rocoso, del estudio hidrogeológico que la CORFO está realizando en las tres cuencas mayores de la región, y que para el caso de esta cuenca fueron gentilmente facilitados por la empresa Hidrogestión. Estas curvas, que se presentan en la Figura 10.6 sirvieron para adecuar los volúmenes originalmente estimados.

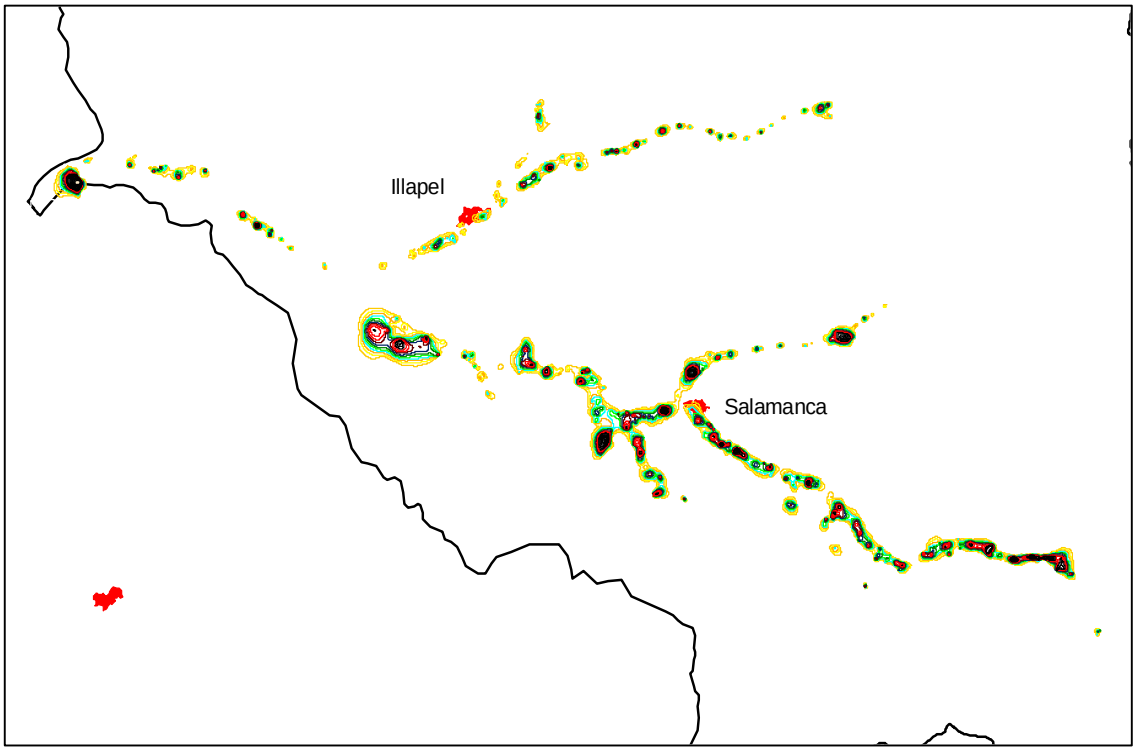
Los parámetros que representan los acuíferos, que son el volumen y el área superficial, se muestran en la Tabla 10.4 adjunta. Para todos se asumió un valor del coeficiente de almacenamiento, de 0.08.

Tabla 10.4
Acuíferos definidos para la modelación WEAP

Acuífero	**Área superf. WEAP**	**Volumen WEAP**
WEAP	**km2**	**Mill m3**
		S=0.08
AC-01	0.929801	0.07
AC-02	1.106000	2.06
AC-03	3.973000	12.71
AC-04	5.928000	23.71
AC-050	6.575000	22.36
AC-051	6.215000	21.13
AC-052	2.278166	7.75
AC-06	1.843625	3.01
AC-07	4.000000	8.00
AC-08	5.845000	17.54
AC-09	1.911660	8.41
AC-10	3.790500	8.34
AC-11	0.226378	0.16
AC-12	3.883491	15.09
AC-13	5.433255	18.63
AC-14	8.855507	25.71
AC-15	12.000000	36.00
AC-16	10.453661	32.99
AC-17	10.063350	27.68
AC-19	1.627000	3.90
AC-21	0.200000	0.32
AC-22	1.833972	3.49
AC-23	4.248547	11.06
AC-24	5.920000	16.64
AC-25	7.968966	11.82
AC-26	0.948016	0.15
AC-27	6.649150	19.77
AC-28	4.013000	46.19
TOTAL		**404.70**

Figura 10.6
Curvas de isoprofundidad de los acuíferos de la cuenca del Choapa

Amarillo:	0 - 30	m de profundidad
Verde:	40 - 50	m de profundidad
Azul:	60 - 80	m de profundidad
Rojo:	90 - 100	m de profundidad
Negro:	110 - 240	m de profundidad



b) Superficie de riego

A continuación se entrega la caracterización del área en cada zona de riego, distinguiendo entre cultivos anuales y frutales. En la Tabla 10.5 se entrega el detalle.

Tabla 10.5
Zonas de riego definidas para la modelación WEAP

Zonas de Riego	ANU	FRU	Total general
	ha	ha	ha
NO_ZR CL-050		77.9	77.9
NO_ZR CL-11	70.4	2.3	72.7
NO_ZR CL-13	37.9	45.0	82.9
NO_ZR CL-21		2.2	2.2
NO_ZR CL-22		49.7	49.7
NO_ZR CL-24		1.8	1.8
ZR_01	145.2	27.9	173.1
ZR_02	262.8	97.7	360.5

ZR_03	419.3	142.8	562.2
ZR_04	425.7	159.8	585.4
ZR_050	600.0	220.1	820.2
ZR_051	126.9	322.7	449.6
ZR_052	68.9	17.1	86.0
ZR_06	217.4	120.0	337.4
ZR_07	152.7	53.3	206.0
ZR_08	592.2	878.4	1470.5
ZR_09	14.7	2.2	16.9
ZR_10	357.8	73.0	430.8
ZR_11	120.6	28.3	148.8
ZR_12	371.1	38.9	410.0
ZR_13	826.3	45.3	871.6
ZR_14	1012.8	246.5	1259.3
ZR_15	657.0	254.8	911.8
ZR_16	1048.9	439.8	1488.7
ZR_17	874.3	1269.6	2144.0
ZR_18	179.8	23.8	203.6
ZR_19	113.1	10.8	124.0
ZR_20	141.8	25.3	167.2
ZR_21	56.7	6.2	62.9
ZR_22	139.3	40.7	180.0
ZR_23	343.4	136.6	480.0
ZR_24	831.5	275.3	1106.8
ZR_25	470.4	314.7	785.1
ZR_26	95.4	6.0	101.4
ZR_27	241.1	0.0	241.1
ZR_28	513.0	93.3	606.3
Total general	11528.3	5549.9	17078.2

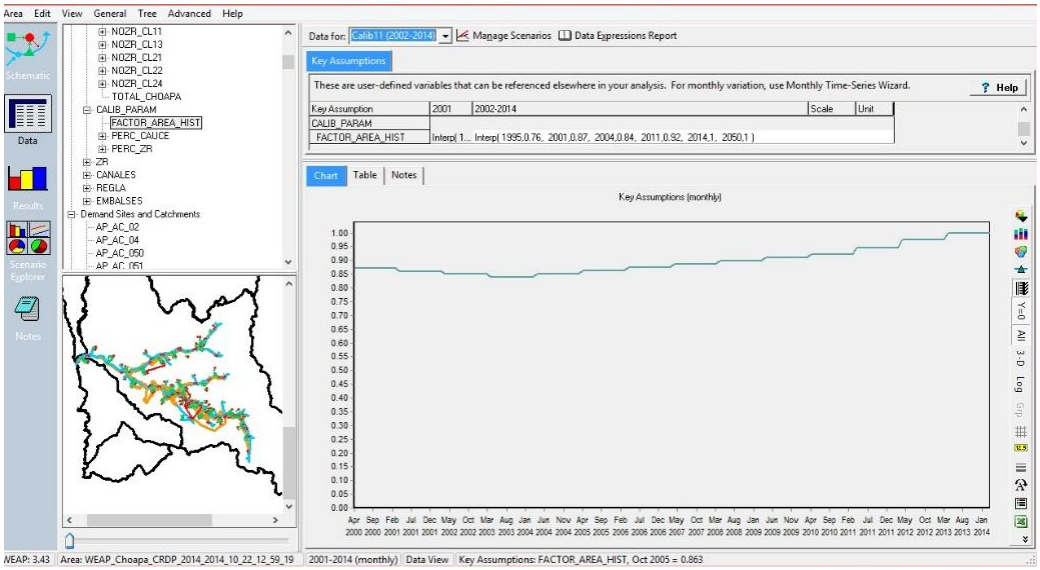
- **Calib_Param**

Se refiere a los parámetros de calibración del sistema hídrico. Se definieron tres parámetros:

  - Factor_Área_Hist

Las áreas de riego de referencia son las determinadas para el año 2014. Para reducir las áreas hacia atrás en la historia, y ajustarlas a las áreas consignadas en los censos, se aplicó un factor de reducción, según se puede observar en la siguiente Figura 10.7.

Figura 10.7
Factor histórico de reducción del área de riego actual



- **Perc_Cauce**

Este parámetro se refiere al porcentaje de percolación desde el cauce al acuífero, que se define para cada acuífero. La percolación se produce en el primer tramo del modelo WEAP aguas abajo de donde se ubica cada nodo en el modelo MAGIC. En todos los tramos, la percolación hacia el acuífero es de 1%.

- **+Perc_ZR**

Este parámetro representa la parte de la ineficiencia de riego, que percola hacia el acuífero. En todas las zonas se asumió un 75% para dicha percolación. La otra parte de la ineficiencia, el 25%, se devuelve al río como derrame superficial.

c) Caracterización de la demanda de riego

En esta sección se caracteriza la demanda agrícola en base a los siguientes aspectos: Coeficiente de cultivo kc, evapotranspiración potencial, precipitación efectiva y eficiencia de los métodos de riego asumidos en la cuenca.

- **Coeficiente de cultivo kc**

Se define un coeficiente de cultivo para cultivos anuales y otro para frutales, como se muestra en la siguiente Tabla 10.6.

La fuente de esta información fue fundamentalmente el estudio CAZALAC/RODHOS 2006, en el cual se hizo una recopilación exhaustiva de valores de kc de la Región, y además se

analizó la distribución de los valores a lo largo del año, adaptando la distribución anual del coeficiente de algunos cultivos, al clima de la Región.

Tabla 10.6
Coeficientes de cultivo definidos

	Valor de kc											
Tipo de cultivo	Abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
Cultivos anuales												
ALFALFA Y PRADERA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CEREALES	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.85	0.9	1	1.1	1.1	1.1	1
HORTALIZAS	0.24	0.31	0.26	0.26	0.42	0.59	0.72	0.72	0.72	0.48	0.35	0.24
Cultivos frutales												
ALMENDRO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.6	0.75	1	1	1	1	1	0.9
ARANDANO	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	1	1	0.95	0.95	0.9	0.5	0.2
BABACO	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
CAQUI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.5	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	1	0.5
CEREZO	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	0.85	1	1	0.95	0.7	0.65	0.4
CHIRIMOYO	0.7	0.65	0.65	0.7	0.7	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7
CIRUELO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.4	0.6	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8
CITRICOS	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
CAROZOS	0.5	0.01	0.01	0.01	0.4	0.6	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8
FEJIOA	0.7	0.65	0.65	0.7	0.7	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7
FRAMBUESA	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
FRUTILLA	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.8	0.8	0.7	0.5	0.5	0.5
GRANADO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.6	0.75	1	1	1	1	1	0.9
HIGUERA	0.5	0.01	0.01	0.01	0.6	0.75	1	1	1	1	1	0.9
JOJOBA	0.01	0.01	0.17	0.38	0.54	0.58	0.54	0.3	0.28	0.12	0.01	0.01
KIWI	0.01	0.01	0.01	0.01	0.45	0.75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.5
LUCUMO	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
MANGO	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
MANZANO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.4	0.6	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8
MEMBRILLO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.5	0.8	1	1.1	1.1	1	1	0.5
NISPERO	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
NOGAL	0.5	0.01	0.01	0.01	0.6	0.75	1	1	1	1	1	0.9
OLIVO	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
PALTO	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
PAPAYO	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
PERAL	0.5	0.01	0.01	0.01	0.4	0.6	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8
PISTACHO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.6	0.75	1	1	1	1	1	0.9
TUNA	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
VID DE MESA	0.01	0.01	0.01	0.01	0.45	0.75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.5
VID DE PISCO	0.5	0.01	0.01	0.01	0.45	0.75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
VID VINIFERA	0.5	0.01	0.01	0.01	0.45	0.75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
Otros												
PARCELA DE AGRADO	0.55	0.55	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.6	0.6	0.6	0.55
EUCALIPTUS	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

- **Evapotranspiración potencial**

La evapotranspiración potencial de cada zona de riego se obtuvo a partir del estudio CAZALAC/RODHOS 2006. En dicho estudio, los valores se obtuvieron del estudio "Atlas Agroclimático de Chile, Regiones IV a IX", CIREN, Marzo 1990. Los valores de ese estudio están agregados para la temporada diciembre-febrero, y se presentan por cuenca. Estos valores se distribuyeron en forma proporcional a las mediciones de evaporación de bandeja, y se completaron todo el año de la misma forma.

De acuerdo con el clima en la cuenca, se definieron tres sectores, desde el interior hacia la costa, los cuales presentan los siguientes valores de ETP:

Tabla 10.7
Valores de ETP por sector climático

	Valores de ETP											
	Abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
SECTOR1	76	59	44	44	48	71	102	123	162	167	141	129
SECTOR2	66	51	39	39	42	62	89	107	141	146	123	112
SECTOR3	55	43	32	32	35	51	74	89	117	121	102	93

Sector 1: Corresponde al río Choapa Alto y sus afluentes principales Tencadán, Cuncumén, Quelén y Chalinga
Sector 2: Corresponde al río Choapa Medio y río Illapel
Sector 3: Corresponde al río Choapa Bajo sector costa Huentelauquén

- **Precipitación efectiva**

Las precipitaciones efectivas mensuales desde el punto de vista agronómico (PpEf), son las que reducen la necesidad de riego. Para la determinación de las precipitaciones efectivas se trabajó con las precipitaciones asociadas al año con probabilidad de excedencia de 85%, de la estadística de la estación representativa de la zona de riego. Aquellas menores que 12 mm/mes se consideraron nulas. Las mayores se redujeron a un 60%. Las estaciones asociadas a cada zona de riego son señaladas en la Tabla 10.8.

Tabla 10.8
Valores de PpEf por estación

	Valores de Precipitación efectiva (mm)											
	Abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar
CUNCUMEN	0	12.7	10.3	8.7	14.3	8.2	0	0	0	0	0	0
LA TRANQUILLA	0	7.7	17	11.7	13.2	0	8.3	0	0	0	0	0
COIRON	0	0	39	12.1	16.9	11.5	0	0	0	0	0	0
SALAMANCA	0	0	8.9	25.4	12.6	13.6	0	0	0	0	0	0

SAN AGUSTIN	0	8.6	10.5	25.3	0	0	0	0	0	0	0	0
LIMAHUIDA	0	0	0	20.8	0	8.6	0	0	0	0	0	0
SANTA VIRGINIA	0	0	16.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ILLAPEL	0	8	0	12.5	0	0	10	0	0	0	0	0
MINCHA NORTE	0	0	0	14.5	0	9	0	0	0	0	0	0

Finalmente a cada zona de riego se asoció alguna de las estaciones de la Tabla 10.8, de la forma en que se establece en Key Assumptions / Demand Sites and Catchments / Climate.

- **Eficiencia de riego**

Se refiere a la eficiencia de riego asociada a los métodos de riego que se utilizan en cada zona de riego. De acuerdo con la eficiencia, los métodos de riego se agruparon en tres categorías:

- Tecnificado, con eficiencia de 90%. Esta categoría representa los métodos de riego de goteo, aspersión, microaspersaión y cintas.
- No tecnificado, con una eficiencia de 60%. Representa los métodos de surco, taza y curva de nivel
- Tendido, con una eficiencia de 50%.

El valor de estos coeficientes incluye implícitamente un factor de reuso de derrames, conforme a los resultados de la calibración del modelo MAGIC.

d) Canales

Los canales individualizados en el capítulo 10.1.1, Topología, se han agrupado de acuerdo con las zonas de riego que surten, de la misma forma en que se hizo en el MAGIC. Además, a cada canal se le asignan sus acciones, agregadas de varios canales cuando corresponde.

En la siguiente Tabla 10.9 se presentan los canales modelados con WEAP y las características de capacidades y pérdidas asumidas para ellos, que se requieren para la modelación.

Tabla 10.9
Canales modelados y sus características

Código	Nombre	Fuente	Qmáx (m3/s)	Acc. hasta 2011	Cambio Fuente Mercedario	Acc. después 2011	Pérd. (%)
CA-01	Los Morros, Cabecita de León, Eusebio, Huinganal, Los Blancos, El Valle	Río Valle	0.48	365		365	30
CA-02	Piedrino	Río Choapa	0.40	104		104	20, 20
CA-03	Batuco, Manzano Derecho, Manzano Izquierdo	Río Choapa	0.41	210.62		210.62	31
CA-04	Rodadero o Manzano	Río Choapa	0.24	350		350	20, 20
CA-05	Pangue o Inquilinos	Río Choapa	0.93	300		300	15, 15, 15
CA-06	Molino de Tranquilla	Río Choapa	0.40	300		300	19, 19
CA-07	Molino de Tencadán, Tencadán Derecho, Tencadán Izquierdo, Codicia o Las Pampitas, Tencadán Cortadera Derecho, Tencadán Aletón Izquierdo	Río Tencadan	0.35	230		230	25
CA-08	Buitrón, El Bosque, Los Loros o Los Arriendos	Río Cuncumén	0.82	169.3		169.3	34
CA-09	Tiralarga	Río Cuncumén	0.12	90		90	13, 13
CA-10	Araya, Barraco Grande, Los Ranchos Choapa	Río Choapa	2.56	1100	-17.85	1082.15	12, 21
CA-11	Silvano	Río Choapa	2.00	1574	-66.07	1507.93	8, 8, 8, 8, 8
CA-120	Barraco Chico, Del Sauco	Río Choapa	0.60	260	-4	256	16, 16
CA-121	Aguas Claras de Chillepín, El Pavo	Río Choapa	2.11	400		400	33
CA-13	El Molino de Quelén	Río Choapa	1.10	124		124	38
CA-14	Breas o Molino de Llimpo	Río Choapa	1.73	1000	-27	973	15, 15, 15
CA-15	De La Higuera, Potrero El Buey, Maitén	Est. Quelén	0.10	100		100	35
CA-16	Panguecillo Uno o Del Medio, Panguecillo Dos	Río Choapa	2.00	600		600	39
CA-17	Higueral	Río Choapa	0.60	500	-20.34	479.66	15, 15, 15
CA-18	Pardo	Río Choapa	1.10	530		530	12, 12, 12, 12
CA-19	El Queñe, Aguas Claras	Río Choapa	0.25	125		125	32
CA-20	Población	Río Choapa	0.33	397	-8.5	388.5	19, 19
CA-21	Buzeta	Río Choapa	3.80	3000		3000	20, 20, 20
CA-22	Molino de Zapallar	Río Chalinga	0.06	59.00		59.00	35
CA-23	Batuco de Chalinga	Río Chalinga	0.30	205.80		205.80	22, 22
CA-24	Alameda, Maravillal o La Viña, Palquial o Molino de San Agustín, Valentino y Canelo	Río Chalinga	0.50	469.10		469.10	30

CA-25	Vert. Los Guindos, Vert. San Francisco, Vert. Las Casas, Chañar Chalinga, Cunlagua, Huanque, Arboleda Grande, Chalinga o Cancha Brava, Chilcas, Tebal	Río Chalinga	1.04	929.23		929.23	34
CA-26	Tahuincano, Las Viudas	Río Choapa	1.55	570		570	35
CA-27	Caracha	Río Choapa	1.10	500		500	22, 22
CA-28	El Boldo o Chuchiñí	Río Choapa	1.90	800		800	22, 22
CA-29	Jote, Camisas o Batito	Est. Camisas	0.48	150		150	25
CA-30	El Molino de Peralillo, Las Chacras, Los Loros o Del Medio	Río Choapa	1.02	460		460	31
CA-31	Pintacura Norte, Pintacura Sur o Alto	Río Choapa	2.17	650		650	40
CA-32	Los Gonzalez, Salinas, Las Burras Bajas, El Durazno Illapel, Los Perales Illapel, Las Burras Altas	Río Illapel	0.26	96.45		96.45	29
CA-33	Llano Alto, Llano Bajo, Covachas, Los Manque, Alcantarilla, Pichicaven, Calderón, Mala Ladera, El Agüita, Los Sauces, La Montaña, Rodado, El Bajo, El Macal Illapel	Río Illapel	2.45	200.54		200.54	28
CA-34	Santa Margot	Río Illapel	0.09	39.03		39.03	13, 13
CA-35	Molino de Carén Illapel, Santa Ana, San Arturo, Carrizo Carén, San Isidro Carén, El Buitre Carén, Tizón	Río Caren	0.54	221.65		221.65	30
CA-36	Santa Margarita, El Palqui Illapel	Río Illapel	0.23	65.66		65.66	34
CA-37	El Peumo, San Jorge, Santa Isabel, San Javier	Río Illapel	0.20	113.23		113.23	32
CA-38	La Turbina	Río Illapel	0.25	283.09		283.09	22, 22
CA-39	Santa Olga, Los Pelados, San Isidro, El Silo, San Patricio, Camarote, Escorial Illapel, Plantación	Río Illapel	0.55	374.5		374.5	29
CA-40	La Higuera, Cocinera	Río Illapel	0.98	940.39		940.39	0, 0
CA-41	Vert. Luna, Hospital, Molino de Cárcamo, Potrero Nuevo	Río Illapel	4.72	815.3		815.3	37
CA-42	Zepedino, Cuz Cuz, Población Los Guindos, San Juan de Dios	Río Illapel	0.32	588.9		588.9	39
CA-43	Inquilinos o Del Bajo, Molino El Peral, Bellavista o Del Alto, Del Medio o Bellavista Bajo	Río Illapel	0.36	542.9		542.9	22, 22
CA-44	Junta El Maitén	Río Illapel	0.50	7.5		7.5	25
CA-45	Coyuntagua Norte, Coyuntagua Sur Uno, Coyuntagua Sur Dos, San Francisco, San Pedro, Doña Juana, Mincha Norte, Mincha Sur Arriba, Mincha Sur Abajo, Matriz de Mincha, Tunga Norte Bajo	Río Choapa	1.26	439		439	33
CA-46	Salinero, Millahue Uno o Lílenes, Millahue Dos o Los Patos, Los Rulos, San Antonio, Molino de Choapa	Río Choapa	2.04	1246		1246	37
CA-47	Canal Alimentador Corrales	Río Choapa	3.50	-		-	5

Nota: Donde hay más de un valor para las pérdidas, éstos se refieren a los diferentes tramos del canal.

Nota: Los valores en rojo corresponden a valores actualizados el año 2014.

e) Regla

Esta entrada de Key Assumptions contiene la regla de distribución de los derechos entre los diferentes canales de la cuenca.

Para la subcuenca del Choapa, la regla consiste en el desmarque. Se obtuvieron los porcentajes de desmarque históricos, los que se aplican por igual a todos los canales de la Junta de Vigilancia.

Para las subcuencas del Illapel y Chalinga, no se aplicaron directamente desmarques, debido a que no se conocieron. Sin embargo, la distribución real se basa en medir el caudal en la estación de cabecera (Illapel en la Burras y Chalinga en La Palmilla respectivamente) y distribuir el caudal más las recuperaciones entre todos los canales, según sus acciones, con dotaciones iguales en una misma sección. La modelación de este sistema de entrega, con el WEAP, se obtiene imponiendo porcentajes del río e igualdad de prioridades, para todos los canales de una misma sección.

f) Embalses

En esta sección se ingresa una curva de área superficial en función del volumen almacenado, para ambos embalses, que el modelo usa como herramienta para el cálculo de la evaporación. La función entrega un área para un volumen determinando, y el modelo calcula un caudal (o volumen) de evaporación en función de dicha área, la evaporación ingresada, y el factor de embalse (0,7).

10.1.3 Demand Sites and Catchments

Esta sección define las demandas que genera cada centro de demandas. En esta sección se asocia a cada centro de demanda, tanto puntual como areal (zonas de riego), todos los datos que permiten calcular la demanda efectiva mes a mes.

Se ingresa en esta sección los datos que se señalan a continuación.

a) Demandas de las captaciones individuales para agua potable

Todas las demás demandas para agua potable, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se asocian a una estadística de caudales mensuales que se encuentra en la planilla POZOS_Q_AP.scv en la carpeta Datos. Los datos de esta estadística corresponden a demandas efectivas, cuya ubicación se obtuvo a partir de los derechos, y cuyo valor se obtuvo a partir de la población abastecida, la cual se estima que tiene un crecimiento vegetativo del 2% anual. En el caso específico del agua potable urbana para Illapel,

Salamanca y Canela, la estadística de caudales se obtuvo a partir de datos de producción de la empresa Aguas del Valle. El tope de la extracción son los derechos. Finalmente, todos los valores se transforman en volumen mensual.

Se contó con las siguientes fuentes de información de base:

i) Uso efectivo (caudal efectivamente consumido) en el año 2003, recopilado por única vez en el estudio CAZALAC/RODHOS 2006, en todas las localidades con agua potable rural. En ese momento, casi no había derechos constituidos, posteriormente se constituyeron los derechos con el artículo 6ºT.
ii) Uso efectivo en meses de punta, a partir de entrevistas y averiguaciones en terreno
iii) Derechos en la localidades rurales (prácticamente todas tienen derechos hoy en día), a partir del listado de derechos de la DGA.
iv) Caudal máximo diario obtenido de los Planes de Desarrollo de la SISS, corroborado con los valores de demanda máxima obtenidos del estudio de ECONSSA. Coinciden completamente.
v) Derechos en las localidades urbanas, a partir del listado de derechos de la DGA.

b) Captación puntual superficial MLP en Estación Choapa 1

Esta captación tiene un derecho por 400 l/s, el cual originalmente se constituyó en el río Totoral, pero luego se trasladó al río Choapa, al sector de Cuncumén.

Para modelar esta extracción, que no es sometida a desmarque, sino que capta en forma permanente los 400 l/s, ésta se modeló captando su recurso en el afluente Totoral, para que no interfiera con el desmarque y la optimización que el modelo WEAP efectúa en la distribución del recurso entre canales que tienen la misma prioridad.

Posteriormente, la captación en exceso sobre el desmarque es restablecida, con un adicional por castigo, desde los pozos de restitución.

c) Caudal ecológico desde embalse Camisas

Se considera una demanda permanente de 50 l/s de caudal ecológico que el embalse Camisas debe entregar al estero Camisas.

d) Demanda de riego al embalse Corrales y El Bato

Por defecto, el algoritmo de resolución de WEAP sólo permite que los embalses entreguen un caudal inferior o igual a la demanda agregada de todos los sitios de demanda ubicados bajo él. Para “forzar” la entrega desde el embalse hacia el río, independientemente de las demandas ubicadas bajo él, es necesario utilizar un artificio, un sitio de demanda de consumo nulo o “requerimiento de caudal” que pide al embalse el caudal de salida y la devuelve al río en su totalidad. El embalse Corrales tiene una entrega forzada que corresponde a las entregas históricas reales hacia los canales de devolución, cuya estadística se obtuvo de la DOH. El

embalse El Bato no tiene entrega forzada, pero tiene una restricción a la entrega (tope máximo), igual a la entrega histórica, también obtenida de la DOH. En la planilla Calib16-FuturoBase1_Calib_SUP_Graficos.xlsx se comparan los resultados de las entregas simuladas con las entregas observadas, que son prácticamente coincidentes.

Para los escenarios futuros cortos (FuturoBase1 y 2 y FuturoOperación1 y 2) y largos (FuturoBase3 y FuturoOperación3) se levantó la restricción en la entrega del embalse El Bato, dejando que el modelo opere y optimice libremente el uso del embalse. El embalse El Bato entrega directamente al río Illapel, desde donde se surten los canales de acuerdo con sus derechos.

En el caso del embalse Corrales, para los escenarios futuros cortos se aplicó una entrega similar a la entrega real de los últimos dos años de sequía, mientras que para el escenario largo, se estimaron reglas de operación tanto para el canal alimentador Corrales como para la entrega desde el embalse hacia el río Choapa, basado en el análisis de la operación histórica:

- el canal alimentador Corrales puede captar los sobrantes del río (después de satisfacer la demanda de todos los canales) con un tope en 3.5 m3/s, entre los meses de julio y diciembre ambos inclusive. Los otros meses no puede captar. Esta captación tiene una prioridad más baja que el llenado del embalse Choapa (FuturoOperación3).

- la entrega del embalse Corrales hacia el río Choapa, se logra mediante una curva de entrega, entre los meses de diciembre y mayo ambos inclusive. Los otros meses, no hay entrega. De acuerdo con los canales existentes de devolución desde el embalse Corrales hacia el río Choapa, se han considerado dos devoluciones, Panguecillo e Higuerillas, con un 18% entre ambas (900 l/s de un total de 5000 l/s) y Los Veneros, con 82% de la entrega (4100 l/s del total de 5000 l/s).

e) Demanda evaporativa de los embalses Corrales y El Bato

A los embalses Corrales y El Bato, se les asocia una demanda evaporativa en base a una estadística de evaporación en mm que se define en la sección Key Assumptions, y un área que se obtiene en base a la función área vs volumen definida también en los Key Assumptions. El valor resultante se transforma en volumen mensual.

f) Demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana

Para modelar la demanda evapotranspirativa de la vegetación ripariana, también se utilizaron “Demand sites” conectados a los acuíferos. A cada una de las demandas se le asocia una estadística de caudales que se encuentra en la planilla ET_Q.csv en la carpeta Datos. Finalmente el caudal se transforma en un volumen mensual.

Tabla 10.10
Caudales de demanda evapotranspirativa

Nombre	Q Prom (m3/s)
ET_AC_06	0.030
ET_AC_07	0.019
ET_AC_08	0.026
ET_AC_09	0.008
ET_AC_10	0.025
ET_AC_11	0.058
ET_AC_12	0.023
ET_AC_13	0.065
ET_AC_14	0.057
ET_AC_15	0.041
ET_AC_16	0.069
ET_AC_17	0.128
ET_ILL_01	0.057
ET_AC_19	0.024
ET_AC_22	0.011
ET_AC_23	0.042
ET_AC_24	0.025
ET_AC_25	0.075
ET_AC_26	0.004
ET_AC_27	0.072
ET_AC_28	0.018

g) Demandas de las captaciones individuales para uso industrial

Las demandas de tipo industrial, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se obtuvieron a partir de los derechos (CPA de la DGA). La ubicación es la que resulta de la información del CPA. Finalmente los caudales se transforman en volumen mensual. En este caso, se ha asumido que estos derechos tienen un factor de uso igual a 0.25.

h) Demandas de las captaciones individuales para minería

Las demandas para la minería, agregadas por acuífero o por cuenca aportante, se asocian a una estadística de caudales mensuales que se encuentra en una planilla en la carpeta Datos. Los datos de esta estadística corresponden a derechos de agua, cuyo uso (ubicación y monto) se estableció en base al registro del CPA de la DGA. Los derechos de 133 l/s de MLP en Cuncumén se extraen con factor de uso igual a 1. A los 7,9 l/s que se extraen desde la subcuenca de Aucó, se les aplicó un factor de uso de 0.25.

i) Demandas de riego menores en subcuencas aportantes

Son las denominadas NOZR, y se encuentran en las cuencas aportantes y fuera del sistema de reparto. Corresponden a derechos otorgados por el artículo 4ºT. En el modelo WEAP se distinguieron dos tipos de NOZR: las que utilizan directamente sus derechos, y la que se caracterizan por una demanda de riego en base a una configuración de cultivos. En el primer caso, se les asocia un caudal igual al derecho, disponible en la planilla POZOS_Q_R.csv que

se encuentra en la carpeta Datos. En el segundo caso, la zona tiene definida un área de cultivos, que se encuentra definida en la carpeta AREAS_CULTIVOS de la carpeta DATOS. Se obtiene la demanda hídrica de esta área de cultivo, y se la resta de la hidrología.

j) Demandas de caudal para restitución de parte de pozos MLP

En el período histórico, la demanda de restitución se modeló en base a los datos obtenidos de MLP. Para el período futuro, esta demanda se modela en base al exceso de captación que los 400 l/s permanentes significan sobre el desmarque establecido, castigada con un 20% de acuerdo con la Resolución respectiva que otorga dicho derecho, y distribuida entre todos los pozos por igual.

k) Demandas de los canales

Por defecto, el algoritmo de resolución de WEAP sólo permite que los canales capten un caudal inferior o igual a la demanda agregada de todos los sitios de demanda conectados a él. Para "forzar" la entrega desde el río hacia los canales, independientemente de las demandas asociadas al canal, es necesario utilizar un artificio de modelación, un sitio de demanda de consumo nulo que pide al río el caudal que le corresponde por desmarque, al que se llamó "requerimiento de caudal" o RQ y lo devuelve al canal en su totalidad.

A los requerimientos de caudal desde cada uno de los canales, se le asigna el mínimo entre la capacidad definida en los Key Assumptions, y el caudal que le corresponde por derecho, que es el porcentaje de desmarque por el número de acciones del canal, ambos definidos en los Key Assumptions. Finalmente el caudal se transforma en un volumen mensual.

l) Demandas de las zonas de riego

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia una eficiencia de riego en función del método de riego (tecnificado, no tecnificado o tendido), la cual se encuentra definida en los Key Assumptions.

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia un valor de kc de acuerdo con lo ingresado en los Key Assumptions.

- A cada tipo de cultivo de cada zona de riego se le asocia una evapotranspiración potencial, la cual se encuentra definida para cada zona de riego en los Key Assumptions.

- Cada tipo de cultivo de cada zona de riego se asocia a un subsector de riego, ANU (cultivos anuales) o FRU (cultivos frutales).

- A cada tipo de cultivo de cada subsector de riego, ANU y FRU, se le asocia un método de riego.

- A cada subsector de riego, por lo tanto, le quedan asociados sus métodos de riego, y dentro de cada método de riego, los cultivos y las áreas de cada cultivo.

- A cada subsector de riego, ANU y FRU, se le asigna una precipitación efectiva de acuerdo con lo ingresado en los Key Assumptions.

El resumen de las áreas de cultivo por zona de riego, por método de riego y por tipo de cultivo se muestra en la Tabla 10.11.

En cuanto a la forma en que se surten las demandas, en primer lugar se solicita agua a los canales, y luego a los pozos. La entrega desde los pozos está restringida a los derechos, sin factor de uso. Los derechos subterráneos se han distribuido asignando 0,35 l/s/ha a las áreas frutales FRU, y el resto a las áreas anuales ANU.

Tabla 10.11
Resumen de las áreas cultivadas por zona de riego

ZR / FRU-ANU / Tipo Cult	Suma MR Tecnificados	Suma MR No Tecnificados	MR Tendido	TOTAL
NO_ZR CL-050	77.9			77.9
FRU	77.9			77.9
VID DE MESA	77.9			77.9
NO_ZR CL-11	2.3		70.4	72.7
ANU			70.4	70.4
ALFALFA Y PRADERA			70.4	70.4
FRU	2.3			2.3
ALMENDRO	0.3			0.3
CITRICOS	0.1			0.1
PALTO	0.2			0.2
VID DE MESA	1.8			1.8
NO_ZR CL-13	33.8	11.2	37.9	82.9
ANU			37.9	37.9
ALFALFA Y PRADERA			37.9	37.9
FRU	33.8	11.2		45.0
NOGAL	33.8	4.5		38.3
VID DE PISCO		6.7		6.7
NO_ZR CL-21	2.2			2.2
FRU	2.2			2.2
CAROZOS	0.1			0.1
CITRICOS	0.2			0.2
NOGAL	0.7			0.7
PALTO	1.2			1.2
NO_ZR CL-22	49.7			49.7
FRU	49.7			49.7
NOGAL	1.5			1.5
PALTO	48.2			48.2
NO_ZR CL-24	1.8			1.8
FRU	1.8			1.8
ALMENDRO	1.3			1.3
OLIVO	0.5			0.5
ZR_01		69.4	103.7	173.1
ANU		41.5	103.7	145.2
ALFALFA Y PRADERA			83.8	83.8
CEREALES			18.2	18.2
EUCALIPTUS			1.7	1.7
HORTALIZAS		41.5		41.5

FRU		27.9		27.9
CAROZOS		2.4		2.4
NOGAL		4.0		4.0
VID PISCO		21.5		21.5
ZR_02	10.8	160.1	189.5	360.5
ANU		75.1	187.7	262.8
ALFALFA Y PRADERA			151.8	151.8
CEREALES			32.9	32.9
EUCALIPTUS			3.0	3.0
HORTALIZAS		75.1		75.1
FRU	10.8	85.0	1.9	97.7
ALMENDRO		0.6		0.6
CAROZOS		19.2		19.2
NOGAL	10.8	26.3	1.9	39.0
VID PISCO		38.9		38.9
ZR_03	49.2	210.6	302.4	562.2
ANU		119.9	299.4	419.3
ALFALFA Y PRADERA			242.1	242.1
CEREALES			52.5	52.5
EUCALIPTUS			4.8	4.8
HORTALIZAS		119.9		119.9
FRU	49.2	90.7	3.0	142.8
ALMENDRO	0.3			0.3
CAROZOS	8.4	11.3		19.7
NOGAL	40.5	17.3	3.0	60.8
VID PISCO		62.1		62.1
ZR_04	29.1	251.8	304.5	585.4
ANU		121.7	304.0	425.7
ALFALFA Y PRADERA			245.8	245.8
CEREALES			53.3	53.3
EUCALIPTUS			4.9	4.9
HORTALIZAS		121.7		121.7
FRU	29.1	130.1	0.5	159.8
CAROZOS	9.2	50.7		59.9
CITRICOS	0.1	0.0		0.1
NOGAL	19.8	16.4	0.5	36.7
VID PISCO		63.0		63.0
ZR_050	58.1	333.6	428.5	820.2
ANU		171.5	428.5	600.0
ALFALFA Y PRADERA			346.5	346.5
CEREALES			75.1	75.1
EUCALIPTUS			6.9	6.9
HORTALIZAS		171.5		171.5
FRU	58.1	162.1		220.1
ALMENDRO	1.4			1.4
CAROZOS	29.5	60.7		90.2
CITRICOS	0.5	0.6		1.1
NOGAL	26.4	11.9		38.2
PALTO	0.4			0.4
VID PISCO		88.9		88.9
ZR_051	260.9	97.2	91.5	449.6
ANU		36.1	90.9	126.9
ALFALFA Y PRADERA			73.6	73.6
CEREALES			15.8	15.8
EUCALIPTUS			1.5	1.5
HORTALIZAS		36.1		36.1
FRU	260.9	61.2	0.6	322.7
CAROZOS	8.4	28.1	0.6	37.1
CITRICOS	53.0	5.1		58.1
NOGAL	26.1	8.1		34.2
PALTO	36.4			36.4

VID DE MESA	137.0			137.0
VID DE PISCO		1.2		1.2
VID PISCO		18.7		18.7
ZR_052		36.8	49.2	86.0
ANU		19.7	49.2	68.9
ALFALFA Y PRADERA			39.8	39.8
CEREALES			8.6	8.6
EUCALIPTUS			0.8	0.8
HORTALIZAS		19.7		19.7
FRU		17.1		17.1
CAROZOS		2.9		2.9
NOGAL		4.0		4.0
VID PISCO		10.2		10.2
ZR_06	84.3	97.8	155.3	337.4
ANU		62.1	155.3	217.4
ALFALFA Y PRADERA			125.6	125.6
CEREALES			27.2	27.2
EUCALIPTUS			2.5	2.5
HORTALIZAS		62.1		62.1
FRU	84.3	35.6		120.0
CAROZOS	8.6	2.1		10.7
NOGAL	22.1	1.3		23.5
VID DE MESA	53.6			53.6
VID PISCO		32.2		32.2
ZR_07	12.0	82.9	111.2	206.0
ANU		43.6	109.1	152.7
ALFALFA Y PRADERA			88.2	88.2
CEREALES			19.1	19.1
EUCALIPTUS			1.7	1.7
HORTALIZAS		43.6		43.6
FRU	12.0	39.3	2.1	53.3
ALMENDRO	2.0			2.0
CAROZOS	0.8	11.0	1.9	13.7
CITRICOS		0.7		0.7
NOGAL	8.5	4.9	0.2	13.7
PALTO	0.7			0.7
VID PISCO		22.6		22.6
ZR_08	736.5	308.5	425.5	1470.5
ANU		169.3	422.9	592.2
ALFALFA Y PRADERA			342.0	342.0
CEREALES			74.1	74.1
EUCALIPTUS			6.8	6.8
HORTALIZAS		169.3		169.3
FRU	736.5	139.3	2.6	878.4
CAROZOS	6.3	12.5	2.0	20.8
NOGAL	39.3	39.1	0.6	78.9
PALTO	595.0			595.0
VID DE MESA	95.9			95.9
VID PISCO		87.7		87.7
ZR_09		6.4	10.5	16.9
ANU		4.2	10.5	14.7
ALFALFA Y PRADERA			8.5	8.5
CEREALES			1.8	1.8
EUCALIPTUS			0.2	0.2
HORTALIZAS		4.2		4.2
FRU		2.2		2.2
VID PISCO		2.2		2.2
ZR_10	2.2	172.9	255.7	430.8
ANU		102.1	255.7	357.8
ALFALFA Y PRADERA			206.8	206.8
CEREALES			44.8	44.8

EUCALIPTUS			4.1	4.1
HORTALIZAS		102.1		102.1
FRU	2.2	70.8		73.0
ALMENDRO		0.6		0.6
CAROZOS	0.8	16.0		16.8
NOGAL	1.4	1.3		2.7
VID PISCO		52.8		52.8
ZR_11	16.2	34.9	97.7	148.8
ANU		22.8	97.7	120.6
ALFALFA Y PRADERA			84.7	84.7
CEREALES			12.7	12.7
EUCALIPTUS			0.3	0.3
HORTALIZAS		22.8		22.8
FRU	16.2	12.0		28.3
CAROZOS	0.4	1.8		2.2
NOGAL	15.8	6.0		21.8
VID PISCO		4.2		4.2
ZR_12	14.6	92.6	302.9	410.0
ANU		70.3	300.9	371.1
ALFALFA Y PRADERA			260.9	260.9
CEREALES			39.2	39.2
EUCALIPTUS			0.8	0.8
HORTALIZAS		70.3		70.3
FRU	14.6	22.3	2.0	38.9
CAROZOS	0.3	7.4		7.6
NOGAL	14.3	1.9	2.0	18.2
VID PISCO		13.1		13.1
ZR_13	11.2	181.9	678.5	871.6
ANU		147.8	678.5	826.3
ALFALFA Y PRADERA			594.6	594.6
CEREALES			82.3	82.3
EUCALIPTUS			1.6	1.6
HORTALIZAS		147.8		147.8
FRU	11.2	34.1		45.3
CAROZOS	0.8	5.8		6.6
CITRICOS	0.1			0.1
NOGAL	10.0	0.7		10.7
OLIVO		0.2		0.2
PALTO	0.3			0.3
VID PISCO		27.4		27.4
ZR_14	109.3	450.9	699.1	1259.3
ANU		318.0	694.8	1012.8
ALFALFA Y PRADERA			592.4	592.4
CEREALES			91.4	91.4
EUCALIPTUS			11.0	11.0
HORTALIZAS		318.0		318.0
FRU	109.3	132.9	4.2	246.5
ALMENDRO		0.3		0.3
CAROZOS	2.7	16.1	0.9	19.8
CITRICOS	0.6			0.6
NOGAL	26.5	31.2	3.3	60.9
PALTO	3.0	0.3		3.3
VID DE MESA	76.6			76.6
VID PISCO		85.1		85.1
ZR_15	154.4	296.8	460.5	911.8
ANU		196.5	460.5	657.0
ALFALFA Y PRADERA			397.5	397.5
CEREALES			56.3	56.3
EUCALIPTUS			6.8	6.8
HORTALIZAS		196.5		196.5
FRU	154.4	100.3		254.8

ARANDANO	19.7			19.7
CAROZOS		12.2		12.2
CITRICOS	40.1			40.1
NOGAL	18.0	34.7		52.7
PALTO	54.2	1.3		55.5
VID DE MESA	22.4			22.4
VID PISCO		52.2		52.2
ZR_16	327.7	412.5	748.6	1488.7
ANU		304.2	744.7	1048.9
ALFALFA Y PRADERA			645.3	645.3
CEREALES			86.4	86.4
EUCALIPTUS		2.1	11.3	13.4
HORTALIZAS		302.1	1.7	303.8
FRU	327.7	108.3	3.8	439.8
CAROZOS		10.3	2.0	12.4
CITRICOS	70.6	0.3		70.9
NOGAL	3.7	10.5		14.3
PALTO	223.8	6.9	1.8	232.5
VID DE MESA	29.6			29.6
VID PISCO		80.2		80.2
ZR_17	1190.7	283.0	670.3	2144.0
ANU		205.9	668.4	874.3
ALFALFA Y PRADERA		0.5	595.0	595.5
CEREALES			56.7	56.7
EUCALIPTUS		6.3	16.7	23.0
HORTALIZAS		199.1		199.1
FRU	1190.7	77.1	1.9	1269.6
ALMENDRO			0.6	0.6
ARANDANO	116.2			116.2
CAROZOS		1.7	1.3	3.0
CITRICOS	7.8	0.4		8.2
GRANADO	22.0			22.0
NOGAL	13.1	19.4		32.4
PALTO	1028.3			1028.3
VID DE MESA	3.4			3.4
VID DE PISCO		3.1		3.1
VID PISCO		52.6		52.6
ZR_18	3.0	13.5	187.1	203.6
ANU		13.2	166.6	179.8
ALFALFA Y PRADERA			151.6	151.6
CEREALES			13.7	13.7
EUCALIPTUS			1.3	1.3
HORTALIZAS		13.2		13.2
FRU	3.0	0.3	20.5	23.8
NOGAL	3.0		20.5	23.5
VID PISCO		0.3		0.3
ZR_19	4.1	18.9	101.0	124.0
ANU		14.9	98.2	113.1
ALFALFA Y PRADERA			81.3	81.3
CEREALES			15.5	15.5
EUCALIPTUS			1.5	1.5
HORTALIZAS		14.9		14.9
FRU	4.1	3.9	2.8	10.8
NOGAL	4.1	3.6	2.8	10.5
VID PISCO		0.4		0.4
ZR_20	13.3	30.1	123.8	167.2
ANU		22.7	119.1	141.8
ALFALFA Y PRADERA			93.3	93.3
CEREALES			23.6	23.6
EUCALIPTUS			2.2	2.2
HORTALIZAS		22.7		22.7

FRU	13.3	7.3	4.7	25.3
NOGAL	13.3	6.8	4.7	24.8
VID PISCO		0.6		0.6
ZR_21		6.2	56.7	62.9
ANU			55.8	55.8
POROTOS			8.3	8.3
MAÍZ			1.0	1.0
TRIGO			8.7	8.7
CEREALES			0.9	0.9
ALFALFA Y PRADERA			36.5	36.5
FRU		6.2		6.2
VID DE PISCO		0.2		0.2
NOGAL		6.0		6.0
OTROS			0.9	0.9
EUCALIPTUS			0.9	0.9
ZR_22	10.6	62.3	107.2	180.0
ANU		36.0	103.3	139.3
ALFALFA Y PRADERA			84.6	84.6
CEREALES			8.1	8.1
EUCALIPTUS			10.6	10.6
HORTALIZAS		36.0		36.0
FRU	10.6	26.2	3.9	40.7
CAROZOS			1.0	1.0
NOGAL	10.5	5.0	2.9	18.4
PALTO	0.1	16.8		16.8
VID PISCO		4.5		4.5
ZR_23	67.7	144.0	268.3	480.0
ANU		88.4	255.0	343.4
ALFALFA Y PRADERA			209.3	209.3
CEREALES			19.8	19.8
EUCALIPTUS			26.0	26.0
HORTALIZAS		88.4		88.4
FRU	67.7	55.6	13.3	136.6
ALMENDRO			0.2	0.2
CAROZOS		0.5		0.5
CITRICOS	3.5			3.5
NOGAL	29.4	26.1	13.0	68.6
PALTO	34.8	17.9		52.7
VID PISCO		11.1		11.1
ZR_24	219.0	270.2	617.6	1106.8
ANU		213.9	617.6	831.5
ALFALFA Y PRADERA			514.7	514.7
CEREALES			44.4	44.4
EUCALIPTUS		15.1	58.5	73.6
HORTALIZAS		198.8		198.8
FRU	219.0	56.3		275.3
ALMENDRO		0.1		0.1
ARANDANO	47.3			47.3
CAROZOS	1.3	0.4		1.6
CHIRIMOYO		0.1		0.1
CITRICOS	18.2	0.2		18.4
NOGAL	35.2	24.1		59.3
PALTO	117.1	6.4		123.5
VID PISCO		24.9		24.9
ZR_25	296.6	139.9	348.6	785.1
ANU		121.8	348.6	470.4
ALFALFA Y PRADERA		2.5	291.3	293.8
CEREALES			24.8	24.8
EUCALIPTUS		8.5	32.6	41.1
HORTALIZAS		110.8		110.8
FRU	296.6	18.1		314.7

ALMENDRO	0.4			0.4
ARANDANO	8.8			8.8
NOGAL	63.4	3.5		66.9
PALTO	221.3	0.7		222.0
VID DE MESA	2.7			2.7
VID PISCO		13.9		13.9
ZR_26	2.9	28.3	70.2	101.4
ANU		25.1	70.2	95.4
ALFALFA Y PRADERA			57.2	57.2
CEREALES			5.6	5.6
EUCALIPTUS			7.4	7.4
HORTALIZAS		25.1		25.1
FRU	2.9	3.1		6.0
NOGAL	2.9			2.9
VID PISCO		3.1		3.1
ZR_27		70.4	170.7	241.1
ANU		70.4	170.7	241.1
ALFALFA Y PRADERA			170.7	170.7
CEREALES			0.0	0.0
EUCALIPTUS			0.0	0.0
HORTALIZAS		70.4		70.4
FRU		0.0		0.0
VID PISCO		0.0		0.0
ZR_28	106.6	145.2	354.6	606.3
ANU	17.5	143.9	351.6	513.0
ALFALFA Y PRADERA			351.6	351.6
CEREALES			0.0	0.0
EUCALIPTUS			0.0	0.0
HORTALIZAS	17.5	143.9		161.4
FRU	89.1	1.3	3.0	93.3
BABACO	0.0			0.0
CHIRIMOYO	1.4			1.4
PALTO	71.1		3.0	74.1
PAPAYO	7.7	1.3		8.9
VID DE MESA	8.9			8.9
VID PISCO		0.0		0.0
Total general	**3958.6**	**4520.6**	**8598.8**	**17078.0**

m) Asignación de prioridad de cada uno de los sitios de demanda

A cada una de las demandas se le asocia una prioridad con la que debe ser abastecida. De este modo, adquieren prioridad de abastecimiento los requerimientos de caudal por parte de los canales, AP, MIN, IND, las captaciones puntuales de caudal (vegetación ripariana y captación MLP), los requerimientos de caudal por parte de los embalses, la evaporación desde los embalses, y cada uno de los subsectores de riego ANU y FRU, teniendo siempre una mayor prioridad la subzona FRU que la subzona ANU. En general, las prioridades son mayores para las demandas que siempre se abastecen, sin reglas ni consideraciones, como la captación desde la vegetación ripariana, y la evaporación desde los embalses.

La prioridad más alta la tienen todas las demandas que son suplidas sin condiciones, como son las demandas de agua potable urbana y rural, las demandas evapotranspirativas de la vegetación ripariana, la demanda evaporativa desde los embalses, las demandas industriales y mineras de aguas subterráneas, las demandas de agua solicitadas a los embalses, las demandas de riego que se encuentran en las subcuencas aportantes, y las demandas de los pozos de restitución de MLP. La siguiente prioridad la tienen los canales de los ríos y esteros

afluentes a los ríos Choapa e Illapel, esto es, del río Valle, Tencadán, Cuncumén, Quelén, Chalinga, Camisas y Carén. A continuación, están todos los canales del río Illapel y luego los del río Choapa. Entre los canales, la prioridad más baja la tiene el Canal Alimentador Corrales, o Coirón, el cual sólo capta cuando la demanda de los demás canales está suplida. De este modo, en general la prioridad de los canales decrece desde aguas arriba hacia aguas abajo, de acuerdo con el sector de la cuenca al que pertenecen.

Después de los canales, están las demandas de las zonas de riego, que se suplen desde aguas arriba hacia aguas abajo, con prioridades decrecientes, y siempre con una prioridad más alta la zona de riego FRU que la ANU.

Lo señalado se aprecia en la siguiente Tabla 10.12, donde se resumen todas las prioridades de suministro asignadas.

Tabla 10.12
Prioridades de demanda

Sitio de demanda	Prioridad
AP_AC_02 hasta 28	1
AP_AN_10	1
IND_AC_10, 24, 25	1
MIN_AC_03, CL_22	1
ET_AC_06 hasta 28	1
ET_AN_10	1
ET_ILL_01	1
EMB_CORRALES_CAMISAS	1
EMB_CORRALES_CHOAPA1	1
EMB_CORRALES_CHOAPA2	1
EMB_CORRALES_EVAP	1
EMB_EL_BATO_EVAP	1
NOZR (todas)	1
REST_MPL_AC_050	1
REST_MPL_AC_051	1
REST_MPL_AC_08	1
REST_MPL_AC_09	1
CS_01_MLP	10
RQ_CA_01	10
RQ_CA_02	13
RQ_CA_03	13
RQ_CA_04	13
RQ_CA_05	13
RQ_CA_06	13
RQ_CA_07	10
RQ_CA_08	11
RQ_CA_09	11
RQ_CA_10	13
RQ_CA_11	13
RQ_CA_120	13
RQ_CA_121	13
RQ_CA_13	13
RQ_CA_14	13
RQ_CA_15	10

RQ_CA_16	13
RQ_CA_17	13
RQ_CA_18	13
RQ_CA_19	13
RQ_CA_20	13
RQ_CA_21	13
RQ_CA_22	10
RQ_CA_23	10
RQ_CA_24	10
RQ_CA_25	10
RQ_CA_26	13
RQ_CA_27	13
RQ_CA_28	13
RQ_CA_29	10
RQ_CA_30	13
RQ_CA_31	13
RQ_CA_32	11
RQ_CA_33	11
RQ_CA_34	11
RQ_CA_35	10
RQ_CA_36	11
RQ_CA_37	11
RQ_CA_38	11
RQ_CA_39	11
RQ_CA_40	11
RQ_CA_41	11
RQ_CA_42	11
RQ_CA_43	11
RQ_CA_44	11
RQ_CA_45	13
RQ_CA_46	13
RQ_CA_47	15
ZR_01ANU	21
ZR_01FRU	20
ZR_02ANU	23
ZR_02FRU	22
ZR_03ANU	25
ZR_03FRU	24
ZR_04ANU	27
ZR_04FRU	26
ZR_050ANU	29
ZR_050FRU	28
ZR_051ANU	31
ZR_051FRU	30
ZR_052ANU	33
ZR_052FRU	32
ZR_06ANU	35
ZR_06FRU	34
ZR_07ANU	37
ZR_07FRU	36
ZR_08ANU	39
ZR_08FRU	38
ZR_09ANU	41
ZR_09FRU	40

ZR_10ANU	43
ZR_10FRU	42
ZR_11ANU	21
ZR_11FRU	20
ZR_12ANU	23
ZR_12FRU	22
ZR_13ANU	24
ZR_13FRU	25
ZR_14ANU	45
ZR_14FRU	44
ZR_15ANU	47
ZR_15FRU	46
ZR_16ANU	49
ZR_16FRU	48
ZR_17ANU	51
ZR_17FRU	50
ZR_18ANU	21
ZR_18FRU	20
ZR_19ANU	23
ZR_19FRU	22
ZR_20ANU	25
ZR_20FRU	24
ZR_22ANU	27
ZR_22FRU	26
ZR_23ANU	31
ZR_23FRU	30
ZR_24ANU	33
ZR_24FRU	32
ZR_25ANU	35
ZR_25FRU	34
ZR_26ANU	37
ZR_26FRU	36
ZR_27ANU	53
ZR_27FRU	52
ZR_28ANU	55
ZR_28FRU	54
ZR_21ANU	29
ZR_21FRU	28

Desde el punto de vista de la demanda, ella se surte a partir de las diversas fuentes con diferentes prioridades de suministro.

- los sectores de riego se surten primero de agua superficial y luego de agua subterránea. Cuando una misma zona de riego es abastecida con varios canales, se le da la prioridad de suministro más alta al canal que tiene su bocatoma más alejada aguas arriba, luego al que no tiene más entregas hacia agua abajo, tratando de vaciar primero los canales más pequeños y más cercanos al sector de riego y dejando agua en los canales más grandes que abastecen otros sectores de riego más alejados aguas abajo.
- requerimiento de caudal de canales en escenarios Operación2 y 3: primero agua superficial luego agua subterránea.

10.1.4 Supply and Resources

Esta sección contiene toda la información acerca de la oferta hídrica. La oferta se ingresa, a su vez, por subsecciones, que son las siguientes:

a) Ríos

En la subsección ríos se encuentra información de tres tipos:
- Hidrología aportada por las cuencas aportantes (AN, aporte natural)
- Canales
- Ríos
  i) Aportes naturales

Estos aportes de caudal provienen de cuencas de cabecera y laterales, que van aportando agua al sistema, y se han calculado externamente al modelo WEAP. Básicamente, se han tomado las mismas estadísticas del moldeo MAGIC, revisadas y adaptadas a la nueva topología y extendidas hasta marzo 2014. Se encuentran en el archivo AN_Q.csv de la carpeta Datos.

Los puntos de entrada de los caudales aportados desde las subcuencas generan nodos sobre los cauces, y con ello definen tramos (reaches).

Otros elementos que definen nodos y por lo tanto tramos en los cauces, son los puntos de extracción de caudal mediante canales, y los puntos de retorno desde las zonas de riego o desde otros usos.

ii) Canales

En el modelo WEAP, los canales se llaman “diversions”, y son tratados como ríos. En la modelación del Choapa, los canales están representados por un nodo de salida desde el río correspondiente, que se llama BT (bocatoma). Inmediatamente a continuación hay un sitio de demanda, llamado RQ (requerimiento de caudal), el cual tiene un requerimiento de caudal definido por el desmarque y limitado a la capacidad física del canal. Inmediatamente después viene un nodo llamado CAPT (captación del caudal), que representa realmente el punto de inicio del canal, es decir, lo que el canal ha captado. Por último, se ha definido un punto de control PC, en el cual se evalúa lo que el canal está captando realmente, en comparación con lo que le corresponde como desmarque.

A medida que el canal se va desarrollando, aparecen los nodos de entrega hacia las zonas de riego, que generan nuevos tramos o reaches sobre el canal. Las entregas están determinadas por las prioridades de los sitios de demanda que son abastecidas por cada canal.

Por otro lado, dentro de los tramos definidos por estos nodos, se producen las pérdidas. Las pérdidas totales del canal, ingresadas en la Key Assumptions, se reparten en los tramos definidos, de acuerdo a ciertos porcentajes que se ingresan en esta sección.

iii) Ríos

Los ríos aparecen por su propio nombre, y sobre ellos en esta sección aparecen todos los nodos que han sido generados a partir de

- entradas de aportes naturales
- entradas de aportes de ríos afluentes
- extracciones mediante bocatomas de canales
- retornos desde el riego por derrames
- devolución de aguas servidas tratadas
- extracción para demandas puntuales.

También aparecen las estaciones fluviométricas que han sido ubicadas en algún tramo. Cuando se ingresa una estación fluviométrica, se debe señalar dónde se encuentra la estadística correspondiente, de modo de que el modelo pueda desplegar ambas estadísticas, la simulada y la observada, en el mismo tramo. En el caso del modelo Choapa, la estadística de la estación se lee desde la planilla OBS_Q.csv que se ubica en la carpeta Datos. Las estadísticas que allí se encuentran, son las de la DGA.

b) Acuíferos

En esta sección se ingresan los datos de volumen máximo que aceptarán los acuíferos a lo largo del período de trabajo. El valor del volumen máximo se busca en los Key Assumptions.

En el caso de trabajar con acuíferos interrelacionados con el nivel del río, además se ingresan aquí los datos de extracción máxima, recarga natural y método de cálculo seleccionado para representar el comportamiento del acuífero.

En el caso del Choapa, dada la escasa interacción de los acuíferos entre ellos, confirmada además en base a los resultados de la exploración geofísica del estudio hidrogeológico de Corfo, en desarrollo por parte de la empresa Hidrogestión, se les definió directamente ligados al río, con posibilidad de intercambio en el sentido de que hay infiltración desde el cauce, para lo cual se indica un porcentaje de infiltración, y afloramientos hacia el cauce, los que el modelo calcula, y los cuales se devuelven al sistema superficial.

c) Transmission Links

En esta sección, netamente topológica, se encuentran todos los enlaces que transmiten agua, esto es:

- Desde los acuíferos hacia los sitios de demanda puntual (agua potable, minería, industria, riego fuera del sistema de reparto y bocatoma de canales)
- Desde los acuíferos hacia los sitios de captación puntual (evaporación de vegetación ripariana)
- Desde los acuíferos hacia los pozos de restitución
- Desde los acuíferos hacia las zonas de riego que tienen acceso a ellos, por medio de derechos de agua subterránea.

- Desde bocatomas de canales hacia los puntos de requerimiento de caudal respectivos ubicados sobre cada canal
- Desde los embalses hacia los requerimientos de caudal impuestos en la salida
- Desde los canales hacia las zonas de riego que son abastecidas por ellos. En este caso, se puede agregar el orden de preferencia o prioridad de suministro que tiene cada fuente o canal.

Todos los transmission links pueden recibir una prioridad de suministro en relación con cada sitio de demanda suplido.
En el caso de las zonas de riego que son abastecidas desde las dos fuentes, canales y acuíferos, se indica la prioridad con la que se usan las fuentes. Siempre la fuente superficial tiene la primera prioridad frente al bombeo, debido a los costos.

d) Runoff and Infiltration (Derrames y percolaciones)

En esta sección se define el destino de la ineficiencia de riego. Por un lado, se generan derrames (que se devuelven al río), y por otro lado, percolaciones que alimentan el acuífero subyacente.

Se ingresa, para cada zona de riego, el porcentaje de la ineficiencia que vuelve al río, y el porcentaje que va hacia el acuífero. Entre ambos, suman 100%.

e) Return Flows (flujos de retorno)

Este objeto conduce el caudal no consumido por un “Demand Site” hacia otro objeto del sistema que lo puede recibir. Este elemento también es netamente topológico, e indica el porcentaje del flujo que retorna al río o canal después de su extracción. Se distinguen tres tipos de flujos de retorno:

- El caudal que retorna al río desde el requerimiento de caudal a la salida de los embalses Corrales y El Bato. El porcentaje de retorno es del 100%.
- El caudal que retorna al canal después del requerimiento de caudal a la entrada de cada uno de los canales. El porcentaje de retorno también es del 100% en este caso.
- El caudal que retorna al río por descarga de aguas servidas tratadas de las ciudades de Illapel y Salamanca. El porcentaje de retorno es del 50%.
- El caudal que retorna al río Choapa desde los pozos de restitución de MLP. El porcentaje de retorno es del 100%.

10.1.5 Carpeta Datos

Como se ha señalado antes, el complemento a la información de entrada ingresada directamente al modelo a través de la interfaz, es la información contenida en la carpeta Datos, a la que el programa tiene acceso para la realización de los cálculos. En la carpeta Datos quedaron los datos que pueden ser modificados externamente por el operador, para el análisis de diversos escenarios, sin afectar la topología ni la lógica de operación del modelo.

En la carpeta Datos se encuentra la siguiente información:

- Una subcarpeta llamada Areas_Cultivos, la cual contiene una carpeta para cada zona de riego, con información de cultivos, separados por métodos de riego: tecnificado, no tecnificado, tendido.

- Un archivo AN_Q.csv, que contiene las estadísticas de caudales de las cuencas aportantes o aportes naturales. El archivo AN_Q_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBase3 y FuturoOperacion3.

- Un achivo CS_Q.csv, que contiene el caudal de captación superficial de MPL. El archivo CS_Q_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBase3 y FuturoOperacion3.

  Un archivo DESMARQUES_Q.csv, que contiene el caudal captado por cada canal, en función de los porcentajes de desmarque antes establecidos. El archivo DESMARQUES_Q_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBase3 y FuturoOperacion3.

- Unos archivos EM_VOL_INI_CALIB.xls y EM_VOL_INI_EXT.xls, que establecen los volúmenes iniciales de los embalses para los escenarios de calibración y futuro cortos, y el escenario futuro largo, respectivamente.

- Un archivo ET_Q.csv, que contiene los caudales de evapotranspiración ripariana, que se surte desde el acuífero subyacente.

- Un archivo OBS_EMB.csv, que contiene las observaciones relacionadas con los dos embalses Corrales y El Bato (caudal de salida, volumen observado y evaporación en mm básicamente). El archivo OBS_EMB_EXT.csv corresponde a los escenarios FuturoBase3 y FuturoOperacion3.

- Un archivo OBS_Q.csv, que contiene las estadísticas de todas las estaciones fluviométricas de la DGA.

- Un archivo POZOS_DDAA_AP.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso de agua potable, por acuífero. Esta estadística opera como un límite a la explotación efectiva de agua potable.

- Un archivo POZOS_Q_AP.csv, que contiene la información de explotación efectiva para el uso de agua potable que se realiza en los acuíferos que cuentan con derechos.

- Un archivo POZOS_DDAA_MIN.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso de minería, por acuífero. Esta estadística opera como un límite a la explotación efectiva para minería.

- Un archivo POZOS_DDAA_IND.csv, que contiene toda la información de derechos de agua para el uso identificado como industrial, por acuífero. El uso efectivo se basa

en esta misma estadística, afectada por un factor de uso definido en los Key Assumptions, de 0.25.

- Un archivo POZOS_DDAA_R.csv, que contiene todos los derechos de riego, entre ellos los derechos que se asumieron para riego correspondientes al artículo 4ºT, que se encuentran fuera del sistema de reparto, y cuyo uso efectivo se resta de los caudales aportados por las subcuencas de cabecera y laterales.

- Un archivo POZOS_Q_R,csv, que contiene la información de explotación de caudales asumidos para riego, desde las zonas de riego NOZR donde no se ha distinguido tipos de cultivo (derechos del 4ºT), sólo se ha asumido que los derechos constituidos son usados.

- Un archivo POZOS_Q_REST_MLP.csv que contiene la información de explotación efectiva de caudales históricos bombeados para restitución desde los pozos de MLP.

- Un archivo POZOS_DDAA_REST_MPL.csv, que contiene los derechos de los pozos de restitución de MLP.

En la presente entrega, la carpeta Datos se encuentra dentro del archivo llamado WEAP_ Choapa_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

10.1.6 Carpeta SIG

El modelo WEAP puede desplegar cualquier cobertura de SIG, por ejemplo en formato .shp, como apoyo para la presentación del esquema topológico.

Para que el modelo, al trasladarse a otro computador, pueda contar con todas las coberturas SIG con que se ha trabajado, se ha configurado una carpeta SIG dentro de la carpeta de resultados del WEAP. La carpeta contiene las coberturas que se listan en la Tabla 10.13.

Tabla 10.13
Coberturas SIG que acompañan el modelo WEAP Choapa

NOMBRE COBERTURA	CONTENIDO
ACUIFEROS	acuíferos modelados
CANALES	canales reales
DRENAJE	recorrido real de los ríos
ESTAC_ FLUV_ DGA	estaciones fluviométricas DGA
NODOS	Nodos de la modelación MAGIC
SUBCUENCAS	Todas las subcuencas aportantes definidas en la cuenca para la generación de caudales
ZR_CIREN_2011_CHOAPA	áreas cultivadas según catastro frutícola CIREN 2011
ZR_NO_CIREN_CHOAPA_2014	áreas cultivas complementarias al catastro CIREN (fuente modelo MAGIC 2011, e imagen satelital 2014 para áreas nuevas y actualización)

En la presente entrega, la carpeta SIG se encuentra dentro del archivo llamado WEAP_Choapa_CRDP_2014.zip, que se ubica en el Anexo Digital.

10.2 Reglas de operación del sistema Choapa

Para cumplir con el objetivo de simular escenarios futuros, tanto un escenario base como los escenarios de operación futura, es necesario conocer las reglas de operación del sistema hídrico. Para ello, fue necesario modelar la manera en que las tres Juntas de Vigilancia determinan los desmarques, que son los que finalmente definen la forma en que se opera el sistema. Ello incluye la forma en que se distribuye el caudal del río, la forma en que se operan los embalses, y la regla que afecta al canal Coirón o Alimentador Corrales.

10.2.1 Regla de operación del río Choapa

El río Choapa se opera y distribuye como una sola sección, con el mismo desmarque para todo el sistema, basado en el valor del caudal en la estación fluviométrica Choapa en Cuncumén (hoy Batuco) de la DGA, y en la experiencia de las recuperaciones y retornos al río a lo largo de su trayecto hacia el mar.

Históricamente, la Junta distribuía el río sólo hasta el sector de Pintacura, desde donde las recuperaciones del río por afloramientos del acuífero hacían innecesario el control de desmarque. Los canales desde Pintacura hacia aguas abajo se abastecían mejor que los de aguas arriba en el río Choapa, y el agua disponible había que distribuirla sólo a éstos últimos.

Con la actual sequía, han mermado los afloramientos del río Choapa, y con ello, se han visto desfavorecidos los canales de Pintacura hacia aguas abajo, razón por la cual están comenzando a solicitar su ingreso a la Junta y con ello al sistema de distribución por desmarques. Hay varios canales que ya están formalmente incorporados a la Junta de Vigilancia del Río Choapa y sus Afluentes.

Por esta razón, el río Choapa se ha operado con desmarques impuestos, otorgando a todos los canales una misma prioridad. En el período histórico, se aplicaron los desmarques informados por la Junta de Vigilancia. En los escenarios futuros, se aplicó una estadística de desmarques razonables en función de las obras existentes, similar a lo que ha hecho la Junta de Vigilancia del río Choapa. Ello incluye, tal como en la realidad, la posibilidad de recoger retornos, derrames y afloramientos, e incluirlos en la disponibilidad.

Los afluentes no tributan, sino que se reparten de la mejor forma los escasos recursos disponibles, tanto en la realidad, como también en la modelación, donde los canales de los afluentes tienen una prioridad más alta que los canales del río. Para la resolución de eventuales conflictos o problemas, se encuentran bajo la tuición de la Junta de Vigilancia del río Choapa y sus Afluentes.

10.2.2 Regla de operación del río Chalinga

Para la distribución del agua, el río Chalinga tiene 18 canales, que configuran dos secciones. Los 10 primeros canales de arriba pertenecen a la Primera Sección, que llega hasta aguas

abajo de Cunlagua y aguas arriba de San Agustín. Los siguientes 8 canales configuras la Segunda Sección.

Lo que se distribuye es el agua que se mide en Chalinga en La Palmilla, que está en la cabecera del río, más los derrames, que también se reparten. Se distribuye 50% a cada sección, aunque la cantidad de acciones no es la misma, la primera tiene más acciones, pero esta diferencia está asumida.

El desmarque promedio de los últimos 15 años es de 33%. En los últimos 3 años, ha sido del 21% en la Primera Sección, y de 17% en la Segunda Sección.

El río Chalinga se modeló con una misma prioridad para todos sus canales. A falta de información más precisa de desmarques, los canales de este río se modelaron con desmarques libres calculados por el modelo WEAP, en todo el período de calibración, y en los escenarios futuros sin embalse. En el escenario futuro con embalse, y con el fin de limitar la entrega de invierno, se impuso una estadística de desmarques, la cual el modelo WEAP internamente optimiza cuando no hay suficiente disponibilidad como para cubrirlo al 100%. Como resultado de la modelación, se obtienen desmarques muy similares a los informados, para las actuales temporadas de sequía.

10.2.3 Regla de operación del río Illapel y embalse El Bato

El embalse El Bato, al igual que todos los embalses que ha construido la DOH, se entregó a los regantes junto con una regla de operación, la que está siendo adaptada a las necesidades y requerimientos de los regantes.

Conceptualmente, la entrega de agua se hace igual que en el río Choapa, en base a la medición del caudal afluente en la estación de cabecera Illapel en Las Burras, y distribuyendo entre los canales, según sus respectivas acciones, el caudal más las recuperaciones y retornos que llegan al río.

Antes del embalse, el río se distribuía como uno solo en épocas normales. Cuando el caudal no alcanzaba a cubrir el total de acciones, se dividía en tres turnos o secciones, dejando el río completo durante 4 días para la primera sección, 4 días para la segunda sección, y 2 días para la tercera sección.

Hoy en día, con el embalse, ha cambiado el sistema de turnos, y se asigna un turno de 5 días a la primera y segunda sección en conjunto, y luego un turno de 2 días para la tercera sección. Si la escasez fuera muy pronunciada, eventualmente se podría volver al sistema de turnos original, pero sería la última opción.

El volumen a entregar por la Junta de Vigilancia del río Illapel y sus afluentes, dependerá del caudal entrante y del volumen almacenado. La prioridad para la entrega la tendrán el agua potable de Illapel y las aguas potables rurales. De acuerdo con lo que hoy se percibe, el desmarque de la temporada 2014-2015 comienza con 12,5% y se reduce a 7,5% al final de la temporada.

El río Illapel se modeló aplicando a todos sus canales una misma prioridad. Los canales de afluentes (Carén) tienen una prioridad más alta, porque no tributan. Al no contar con una estadística de desmarques, en el escenario histórico los desmarques se mantuvieron libres hasta marzo de 2012, dejando que WEAP aplicara sus algoritmos de cálculo y optimización interna para la distribución del agua. A partir de esa fecha, en que entró en operación en embalse El Bato, se trabajó con desmarques impuestos similares a los desmarques históricos del río Choapa, para poder operar el embalse de una forma razonable.

10.2.4 Regla de operación del Canal Alimentador Corrales

La obra Embalse Corrales considera los siguientes derechos de aprovechamiento otorgados al Fisco - Dirección de Obras Hidráulicas:

a. Derechos otorgados por resolución DGA Nº 259, de 1 de abril de 1999, de carácter consuntivo, sobre aguas superficiales y corrientes, de ejercicio eventual y continuo por un caudal de 5 millones de metros cúbicos al año en el estero Camisas, comuna de Salamanca, provincia de Choapa, Región de Coquimbo, que equivalen a 158 l/s continuos, y

b. Derechos otorgados por resolución DGA Nº 454, de 2 de agosto de 2000, de carácter consuntivo, sobre aguas superficiales y corrientes en el Río Choapa, en la comuna de Salamanca, Provincia de Choapa, IV Región, de ejercicio permanente y discontinuo en el mes de noviembre por un caudal de 5,48 millones de metros cúbicos al año y la diferencia como caudal eventual y continuo por 69,52 millones de metros cúbicos al año en el Río Choapa, en la comuna de Salamanca, Provincia de Choapa, IV Región. Estos caudales significan 2,11 m3/s como derechos permanentes durante el mes de noviembre, y 2,43 m3/s como derechos eventuales (que sólo operan cuando hay disponibilidad) el resto del año.

El embalse Corrales, al igual que todos los embalses que ha construido la DOH, se entregó a los regantes junto con una regla de operación, la que ellos, sin embargo, prontamente adaptan a sus criterios y requerimientos propios.

Según se ha podido constatar en terreno, la Junta de Vigilancia del río Choapa, que es la que administra y distribuye el recurso hídrico del embalse Corrales, en el presente período de sequía no ha operado el canal Alimentador según la letra del derecho, sino que de acuerdo con el espíritu, según el cual el embalse se carga con toda el agua que es posible destinar durante los meses de baja demanda, y con el agua que sobra durante los meses de alta demanda y de alto caudal (época de deshielo). Como los caudales de deshielo han sido más reducidos en los últimos años, la Junta ha estimulado a los regantes a hacer ahorro de agua en los meses de invierno, destinando al embalse un mayor caudal que el que permiten los derechos, en aras de contar con más agua en los meses de alta demanda, todo ello en beneficio de los regantes, que así lo han entendido.

En la modelación, se captan los sobrantes de julio a diciembre, con prioridad más baja que todos los canales del río Choapa, y que el embalse Totoral (desactivado en este escenario), con tope en la capacidad del canal de 3,5 m3/s.

10.2.5 Regla de operación del Embalse Corrales

El embalse se opera de modo que iguale, para los canales bajo Panguecillo, el desmarque que permite entregar el río Choapa a los canales sobre Panguecillo. Bajo Panguecillo, la dotación se logra con el drenaje del río Choapa y con las entregas del embalse Corrales. Hasta la fecha actual, la Junta se encargaba de los canales hasta Pintacura, mientras que hacia aguas abajo de ese punto los canales se alimentaban de las recuperaciones y afloramientos del río Choapa. Hoy en día, con la sequía, y la consiguiente disminución de las recuperaciones del río, la Junta incluirá en la distribución del río los canales del Choapa Bajo.

En cuanto a la operación del sistema en sequía, lo que se espera es poder otorgar desde el embalse Corrales una dotación de 40% en los meses de alta demanda, y si el río Choapa no cubre esta dotación con sus recursos propios en la parte alta, o baja, analizar la posibilidad de complementar el desmarque con el acuífero.

En la modelación, la entrega desde el embalse Corrales al río Choapa se hace con una curva de entrega con forma de campana, entre diciembre a mayo. La campana es la siguiente: Diciembre 1 m3/s, ene, feb, mar, abr 3 m3/s, mayo 1 m3/s, que actúan como topes. El resto del año sólo se entrega un caudal ecológico de 50 l/s al estero Camisas.

10.2.6 Regla de operación de pozos de restitución MLP

En el período histórico se cuenta con la estadística de extracción de los pozos de MLP. En los escenarios futuros, se aplicó la regla establecida en la resolución correspondiente: los pozos extraen del acuífero el exceso captado sobre el desmarque en la captación superficial de Cuncumén, castigado (amplificado) con una sobretasa de 20%. Q extr = (0.4 – (0.4 * Desmarque)) * 1.2. El caudal se reparte entre los pozos proporcionalmente a los derechos de cada pozo.

10.3 Calibración del modelo y escenario extensión Futuro Base 1

10.3.1 Proceso de calibración

El modelo se calibró para el período completo 2000-2014, tomando el período para el cual había datos de entrada para el modelo MAGIC en el estudio del Plan Maestro, y actualizando toda la información hasta el año 2014.

Para calibrar el modelo se corrió una gran cantidad de escenarios, en que se fueron ajustando los siguientes aspectos:

- Actualización de acciones y capacidades de canales en base a la información recabada en las Juntas de Vigilancia de los ríos Choapa y Chalinga
- Actualización de volúmenes de acuíferos en base a estudio hidrogeológico de CORFO, en ejecución por parte de la empresa Hidrogestión Ltda.

- Afinamiento del cálculo del caudal de entrada por el río Valle, a partir de la estadística de Choapa en Cuncumén
- Inclusión de los derechos de los pozos de Agrícola Mercedario Ltda.
- Inclusión de la operación del embalse El Bato a partir de marzo 2012
- Eliminación de la zona de riego ZR-21 que corresponde a área de inundación del embalse El Bato, a partir del año 2010.
- Ajuste de la hidrología de entrada a Embalse Corrales, en base a las mediciones de caudal de entrada y volumen en los embalses. En especial, ajuste de la hidrología de entrada para poder generar los rebases del embalse Corrales, medidos en la estación Camisas en Desembocadura, y no registrados en la hidrología del embalse.
- Revisión de prioridades de canales: prioridad superior en afluentes que no tributan, Chalinga y Illapel no tributan al río Choapa, consideración de captaciones de Pelambres y Coirón. Reordenamiento completo de prioridades.
- Ajuste de caudales de evapotranspiración de vegetación ripariana desde acuífero
- Inclusión de la restitución de aguas servidas tratadas urbanas a los ríos Choapa e Illapel
- Ajuste del afloramiento del acuífero del estero Camisas, 50% aguas arriba y 50% aguas abajo de la estación fluviométrica Estero Camisas en Desembocadura
- Ajuste del parámetro de porcentaje de percolación desde cauces hacia acuíferos. Finalmente queda en 1%.
- Ajuste de los puntos de devolución de caudales en exceso de canales hacia el río, en base a ubicación de derrames y retornos: canales El Queñe, Población, Buzeta, y desde canal Caracha hasta canales Pintacura Norte y Sur. En especial, ajuste de los derrames del canal Buzeta hacia el estero Camisas.
- Ajuste de puntos de afloramiento desde acuíferos hacia ríos.
- Ajuste de los coeficientes de percolación desde las zonas de riego hacia los acuíferos. Finalmente queda en 75%, el restante 25% se considera derrame hacia el río.
- Ajuste de la eficiencia global de riego, llegando a 90%, 60% y 50% en áreas tecnificadas, no tecnificadas y por tendido, respectivamente.
- Ajuste de las pérdidas por evaporación desde canales, finalmente se despreció.
- Ajuste de la ubicación de la captación superficial de MLP, para no interferir con prioridades de canales del Choapa

De esta forma, el proceso de calibración sirvió para comprender el funcionamiento del sistema.

El escenario de calibración se corrió con los siguientes desmarques:

- El río Choapa con los desmarques históricos informados por la Junta de Vigilancia del río Choapa
- El río Chalinga con desmarques libres calculados por el modelo WEAP, en todo el período de calibración
- El río Illapel con desmarques libres calculados por WEAP hasta marzo de 2012, y a partir de esa fecha, impuestos similares a los desmarques históricos del río Choapa, para poder operar el embalse de una forma razonable.

Los gráficos del período de calibración, correspondientes a los cinco tipos de planillas, se presentan en conjunto con los gráficos del escenario Futuro Base 1, en el Subcapítulo 10.3.3. Los gráficos más relevantes se presentan adjuntos en el texto. Los gráficos para la totalidad de los elementos modelados están contenidos en las planillas completas que se adjuntan en el Anexo Capítulo 10.3.

10.3.2 Configuración del escenario Futuro Base 1

De acuerdo con la solicitud de la Junta de Vigilancia, de analizar la posibilidad de explotar los acuíferos si el desmarque baja de 40% en el verano, se decidió establecer, como primer escenario futuro, el escenario en que después del año 2014 se agregan 3 años secos, para luego incorporar el uso de los acuíferos.

Para realizar dicho análisis, fue necesario previamente generar un escenario base, llamado Futuro Base 1, en el cual se extendió la hidrología de entrada en base a tres años secos, para lo cual se consideró los tres últimos años 2011 a 2014. En el escenario base, el sistema se opera tal como opera en la actualidad, sin cambios. Esto significa que el río Choapa tiene los desmarques conocidos aplicados por la Junta de Vigilancia, mientras que el ríos Chalinga opera libres, esto es, con desmarque calculado y optimizado internamente por WEAP, y el río Illapel opera con los desmarques históricos

De este modo, el escenario Futuro Base 1 tiene las siguientes características:

- hidrología de un período de sequía (2011-2014)
- demandas de agua potable urbana con proyección de crecimiento vegetativo
- desmarques en el río Choapa, impuestos, son los desmarques históricos de sequía, proyectados según Tabla 10.14 adjunta
- desmarques en los ríos Chalinga: a partir de 2014, impuestos, iguales que en el Choapa
- desmarques en el río Illapel, a partir de 2014, impuestos, iguales que en el río Choapa.

Tabla 10.14
Desmarques de sequía canales río Choapa

AÑO	MES	Desmarque º/1
2011	4	0.5
2011	5	0.37
2011	6	0.3
2011	7	0.3
2011	8	0.3
2011	9	0.49
2011	10	0.8
2011	11	0.78
2011	12	0.71
2012	1	0.7
2012	2	0.67
2012	3	0.63
2012	4	0.5
2012	5	0.38
2012	6	0.3
2012	7	0.3
2012	8	0.3

2012	9	0.3
2012	10	0.3
2012	11	0.3
2012	12	0.34
2013	1	0.4
2013	2	0.4
2013	3	0.4
2013	4	0.37
2013	5	0.3
2013	6	0.2
2013	7	0.2
2013	8	0.2
2013	9	0.24
2013	10	0.3
2013	11	0.35
2013	12	0.45
2014	1	0.4
2014	2	0.4
2014	3	0.4
2014	4	0.4
2014	5	0.4
2014	6	0.3
2014	7	0.2
2014	8	0.2
2014	9	0.2
2014	10	0.3
2014	11	0.35
2014	12	0.4
2015	1	0.4
2015	2	0.4
2015	3	0.4
2015	4	0.4
2015	5	0.35
2015	6	0.25
2015	7	0.2
2015	8	0.2
2015	9	0.2
2015	10	0.3
2015	11	0.35
2015	12	0.4
2016	1	0.4
2016	2	0.4
2016	3	0.4
2016	4	0.4
2016	5	0.35
2016	6	0.25
2016	7	0.2
2016	8	0.2
2016	9	0.2
2016	10	0.3
2016	11	0.35
2016	12	0.4
2017	1	0.4
2017	2	0.4
2017	3	0.4

Los resultados gráficos para el período de calibración, validación y futuro base se presentan en el set de gráficos de los cinco tipos de planillas antes descritos. Los gráficos más relevantes se presentan adjuntos en el texto. Las planillas completas se adjuntan en el Anexo Capítulo 10.3, y se llaman Calib20_Futuro Base 1.

10.3.3 Presentación de resultados relevantes

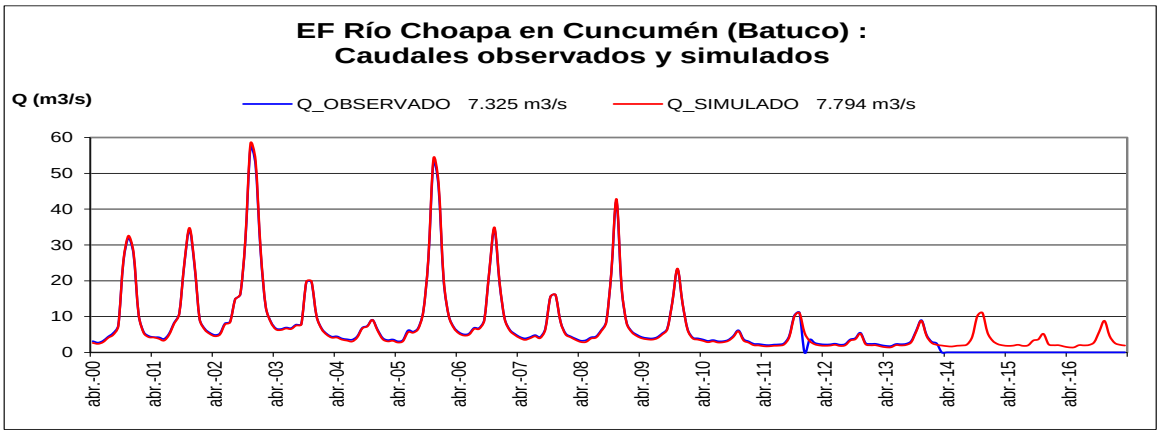
a) Planilla Calib20_FuturoBase1_Calib_SUP

Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración superficial, vale decir, los caudales observados y simulados en los puntos de control, y los caudales proyectados para tres años más de sequía. Al respecto cabe señalar que las estadísticas de las estaciones Choapa en Cuncumén, Chalinga en La Palmilla e Illapel en Las Burras se consideran estadísticas de cabecera, y como tales representan caudales de entrada al sistema.

- **Río Choapa en Cuncumén**

Esta estación es de cabecera, por lo que se estadística observada coincide con la que se simula a la entrada de la cuenca. Los tres últimos años son una extensión del último período seco.

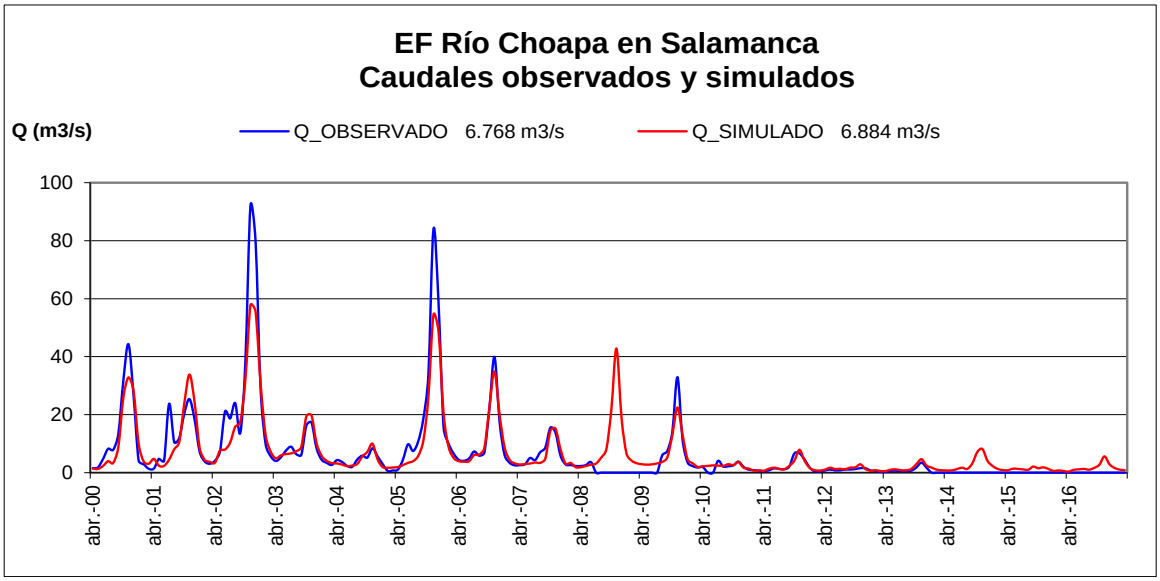
Figura 10.8
Río Choapa en Cuncumén



- **Río Choapa en Salamanca**

Se observa que el modelo es capaz de reproducir bien el escurrimiento hasta este sector, especialmente en períodos de estiaje y de sequía.

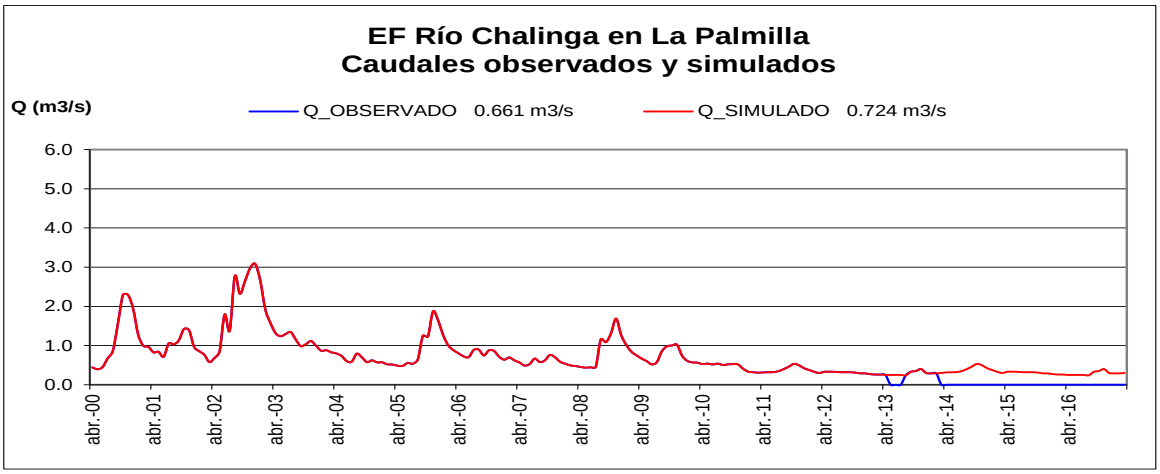
Figura 10.9
Río Choapa en Salamanca



- **Río Chalinga en La Palmilla**

También se trata de una estación de entrada. La estadística coincide con la simulada en este punto.

Figura 10.10
Río Chalinga en La Palmilla

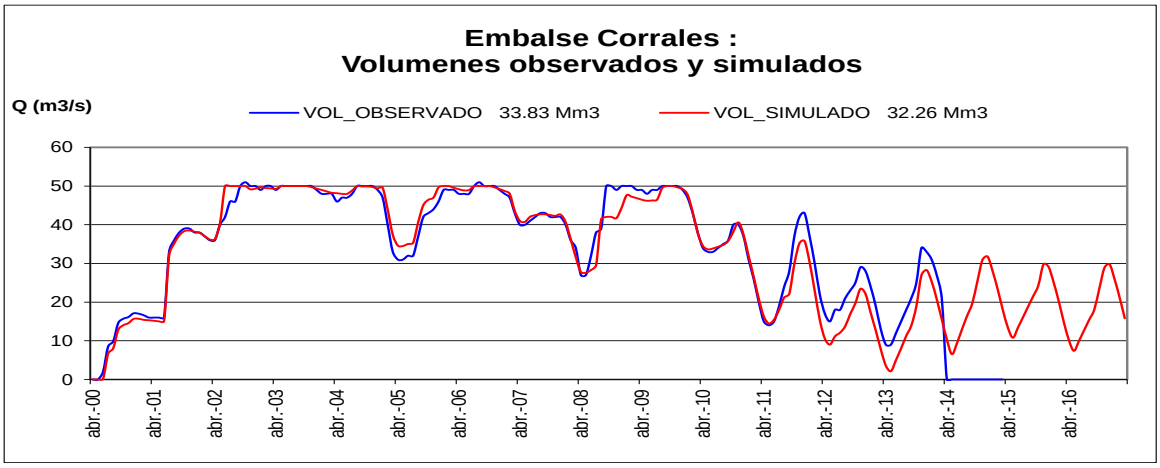


- **Embalse Corrales**

Durante el período de calibración, el volumen simulado es comparado con el registro de la DOH, con el que se hace coincidir totalmente, para obtener el caudal de entrada a la cuenca en forma calculada. El caudal de entrada, en este caso se compone del aporte desde el canal Alimentador, que también se conoce, y del aporte propio de la subcuenca, el que se calcula.

En los tres años adicionales simulados, el volumen es el resultado de aplicar la hidrología asumida para dicho período.

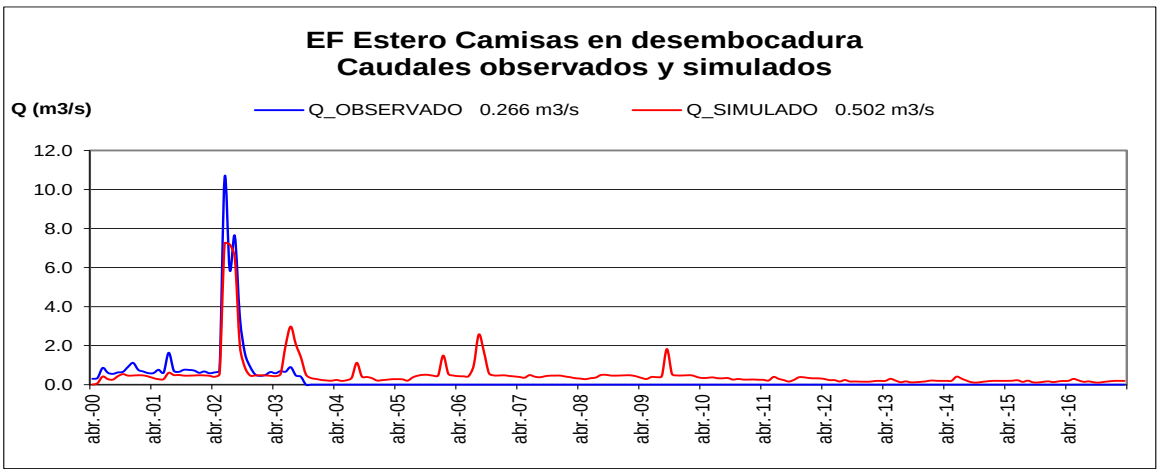
Figura 10.11
Embalse Corrales



- **Estero Camisas en Desembocadura**

Esta estación desde el año 2001 representa la salida desde el embalse Corrales hacia el estero Camisas, por lo cual el caudal es mínimo, y se ha dejado de medir por parte de la DGA. Por otro lado, la ubicación de la estación parece no ser totalmente adecuada, debido a que el estero Camisas, muy plano en este sector, presenta con frecuencia más de un brazo.

Figura 10.12
Estero Camisas en Desembocadura

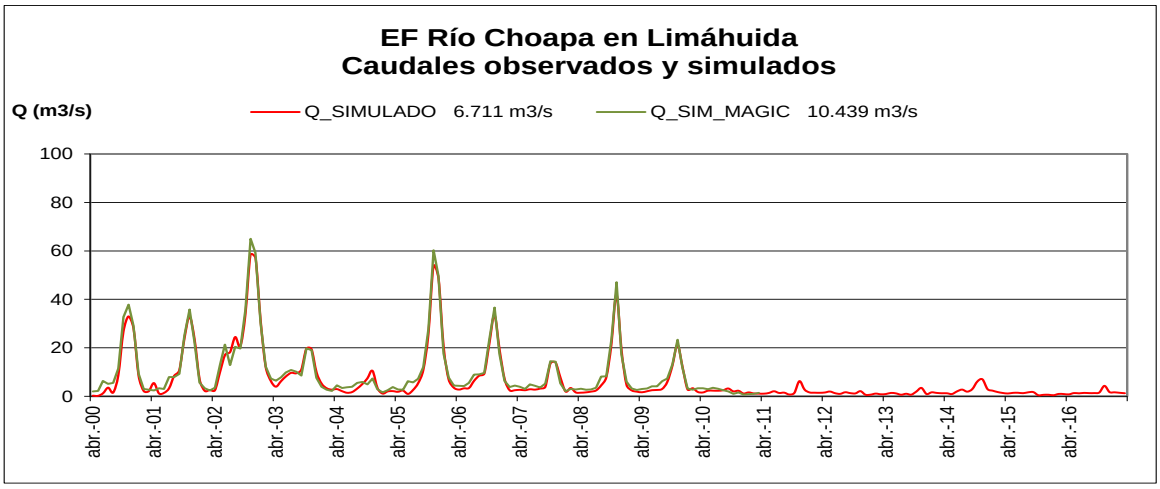


- **Río Choapa en Limáhuida**

En esta estación, la DGA dejó de medir el caudal el año 2001, probablemente debido a que la estadística es completamente alterada. No obstante, para fines de modelación y calibración, es totalmente necesario continuar con estas mediciones, especialmente las

alteradas. La línea de referencia (color verde) que se observa en este gráfico corresponde a lo simulado con el modelo MAGIC, en el mismo período. Se observa buena coherencia. La diferencia en los promedios se explica porque en ambos casos no se trata del mismo período.

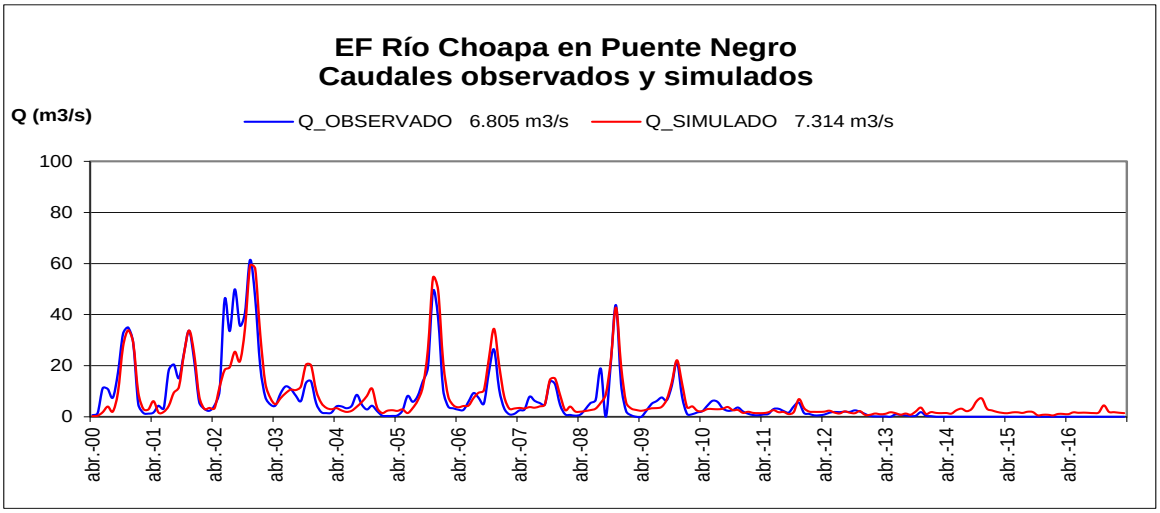
Figura 10.13
Río Choapa en Limáhuida



- **Río Choapa en Puente Negro**

Es la última estación antes de la confluencia con el río Illapel. Se observa que el modelo reproduce bien los caudales bajos y las crecidas de verano. En cuanto a las crecidas pluviales, hay algunas que el modelo no ha sido capaz de representar. En todo caso, el modelo está por el lado conservador.

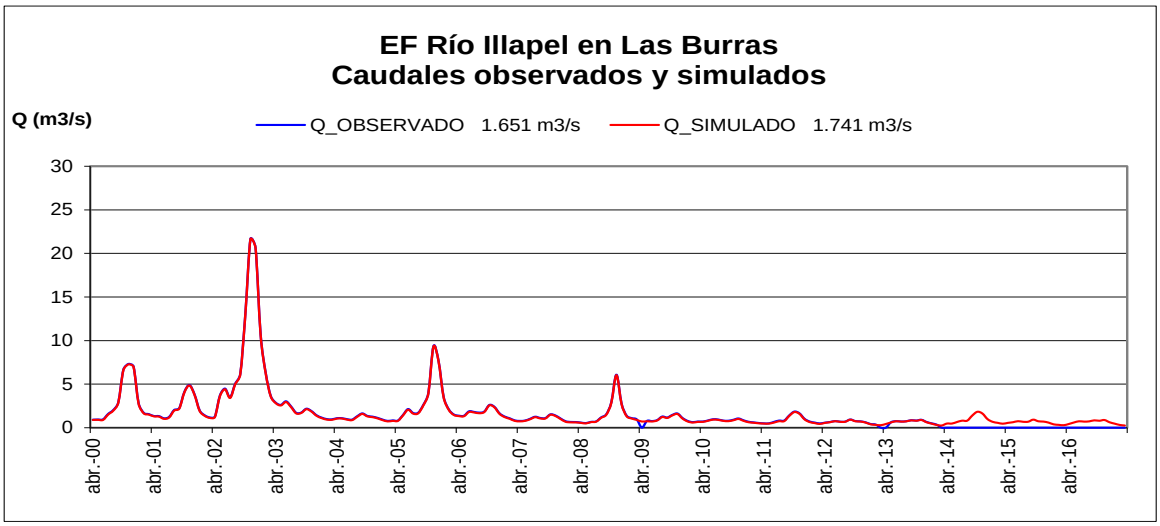
Figura 10.14
Río Choapa en Puente Negro



- **Río Illapel en Las Burras**

Es la estación de cabecera del río Illapel. La estadística observada se considera como la simulación de entrada al modelo.

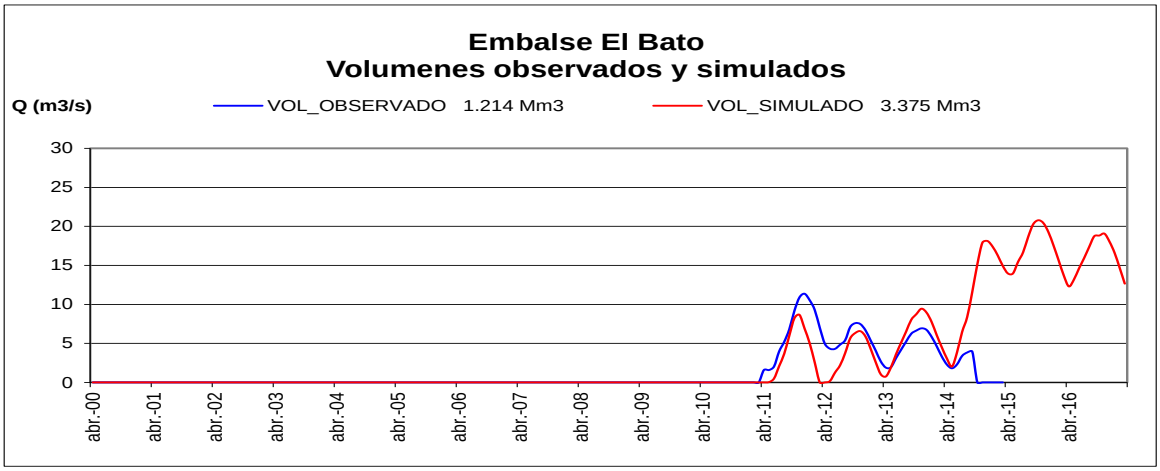
Figura 10.15
Río Illapel en Las Burras



- **Embalse El Bato**

En este embalse se observa que la señal simulada es muy similar a la señal observada, desde el año 2011 en que entra en operación. En el modelo, esto se logra instalando un tope en la entrega, igual al caudal informado como extracción, en el período histórico. Desde 2014 en adelante, el embalse se deja libre, para que pueda distribuir el agua de acuerdo a las acciones, con la misma prioridad aguas arriba que aguas abajo del embalse.

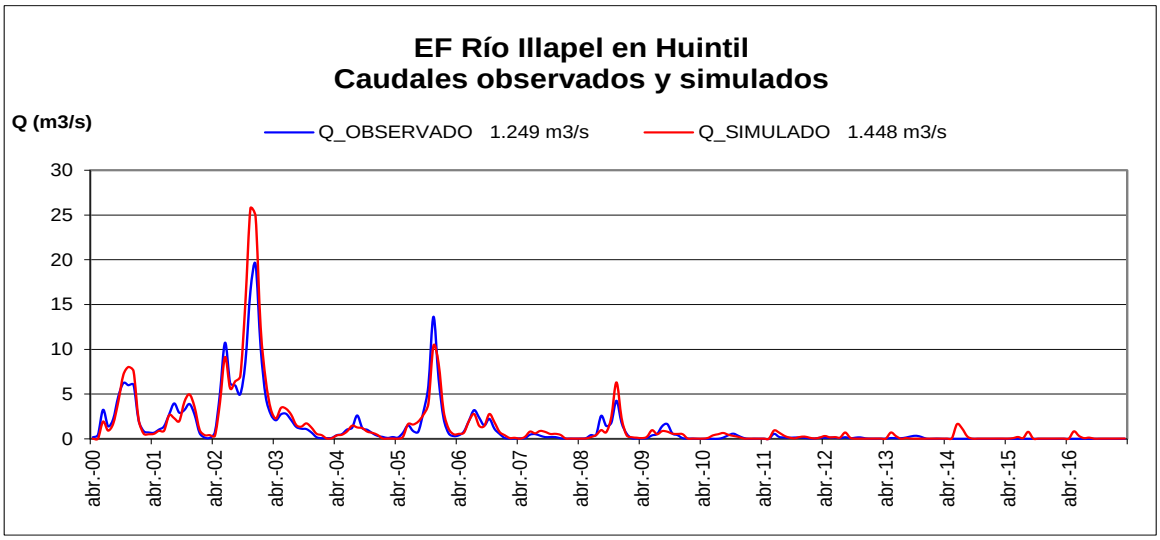
Figura 10.16
Embalse El Bato



- **Río Illapel en Huintil**

Esta estación se encuentra bajo el embalse El Bato. El modelo reproduce muy bien la señal, en especial la señal de caudales bajos.

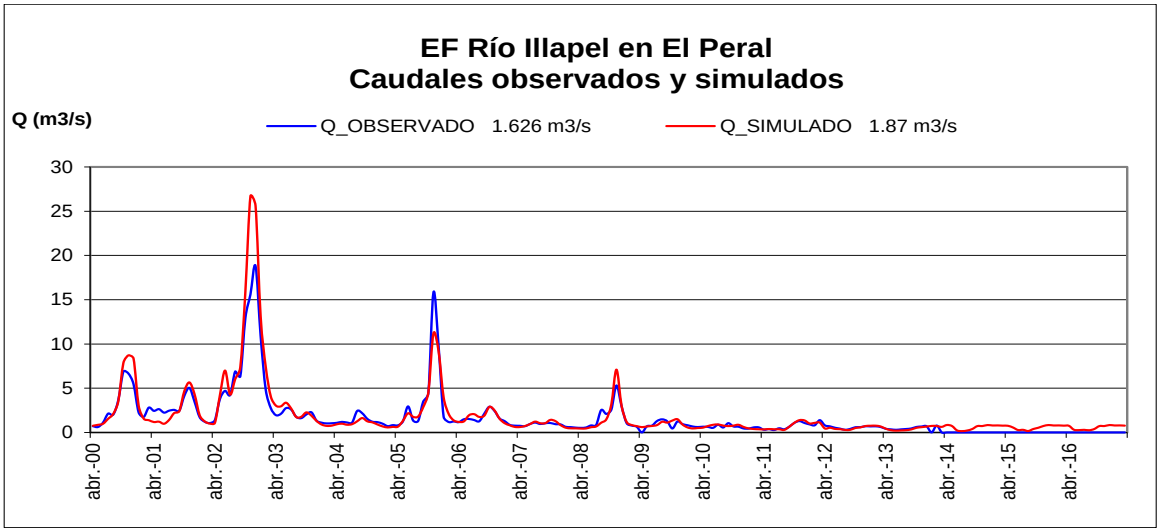
Figura 10.17
Río Illapel en Huintil



- **Río Illapel en El Peral**

Se puede apreciar que la señal modelada sigue muy buena hasta el final del río Illapel, en especial para los caudales bajos, que son los que más interesan.

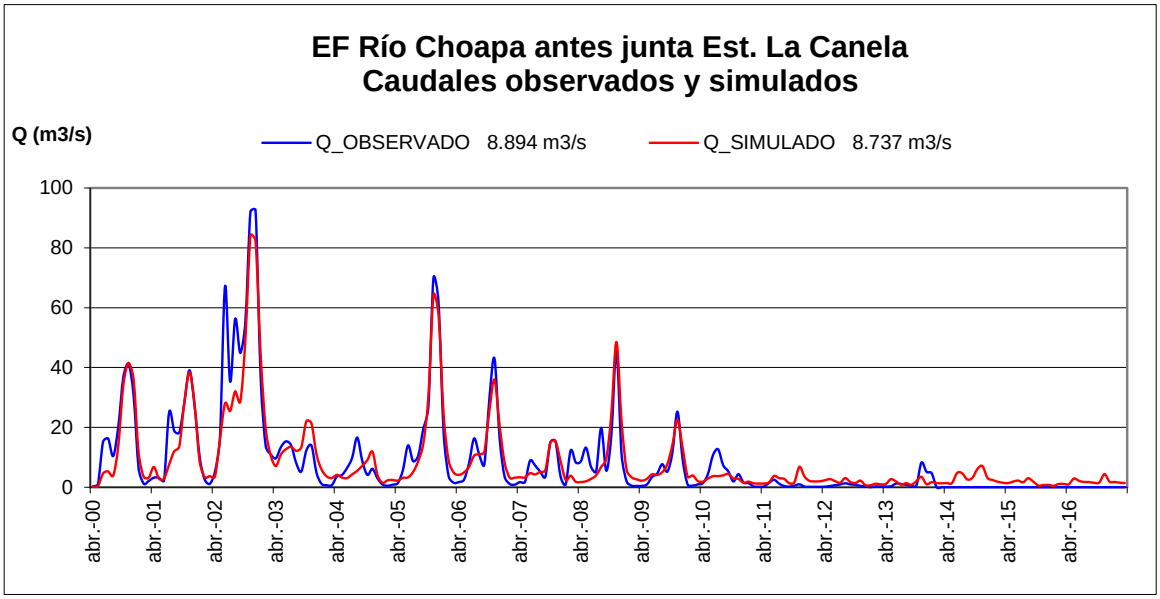
Figura 10.18
Río Illapel en El Peral



- **Río Choapa antes junta Estero Canela**

En esta estación se aprecia lo mismo que en Puente Negro, que la modelación reproduce bien los caudales bajos, pero hay períodos pluviales de invierno que no es capaz de reproducir adecuadamente.

Figura 10.19
Río Choapa antes junta estero Canela



b) Planilla Calib20_FuturoBase1_Calib_SUB

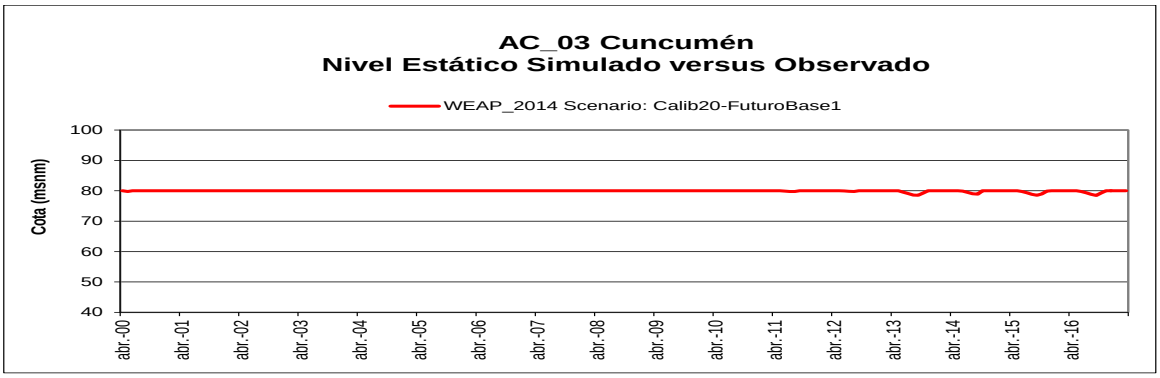
Esta planilla contiene todos los resultados de la calibración subterránea, vale decir, todos los resultados de niveles observados donde hay pozos de observación de la DGA, y todos los niveles simulados por el modelo. Se muestra a continuación, el comportamiento modelado en los acuíferos que tienen control de nivel, y los que muestran alguna variación que merece un comentario. El comportamiento de todos los acuíferos, con y sin control de nivel, está contenido en la planilla Calib20_FuturoBase1_Calib_SUB del Anexo 10.3. Además, los datos de volúmenes de todos los acuíferos se muestran en la planilla Calib20_FuturoBase1_Balance_AC. Para los tres años adicionales de sequía, el comportamiento simulado de los acuíferos responde a las condiciones de modelación, prolongadas sin cambios en la demanda, salvo aumento vegetativo de la demanda de agua potable urbana, hacia el futuro.

Es necesario señalar que en esta cuenca hay muy pocos pozos de control de nivel de la DGA. Por esta razón, la calibración subterránea sólo tiene un valor relativo. En una situación futura en que se formará una comunidad de usuarios de Aguas Subterráneas, y en que se requiere poder explotar el recurso almacenado en los acuíferos cuando el agua superficial se hace escasa, se hace imperativo establecer nuevas estaciones de control de nivel.

- **Acuífero Cuncumén**

Aunque no tiene datos de nivel, el comportamiento de este acuífero se presenta aquí porque es un acuífero con explotación relativamente intensiva, y sin embargo, no presentaría un efecto de descenso durante la sequía. La recarga depende fuertemente de la infiltración del riego, que es la que determina este comportamiento.

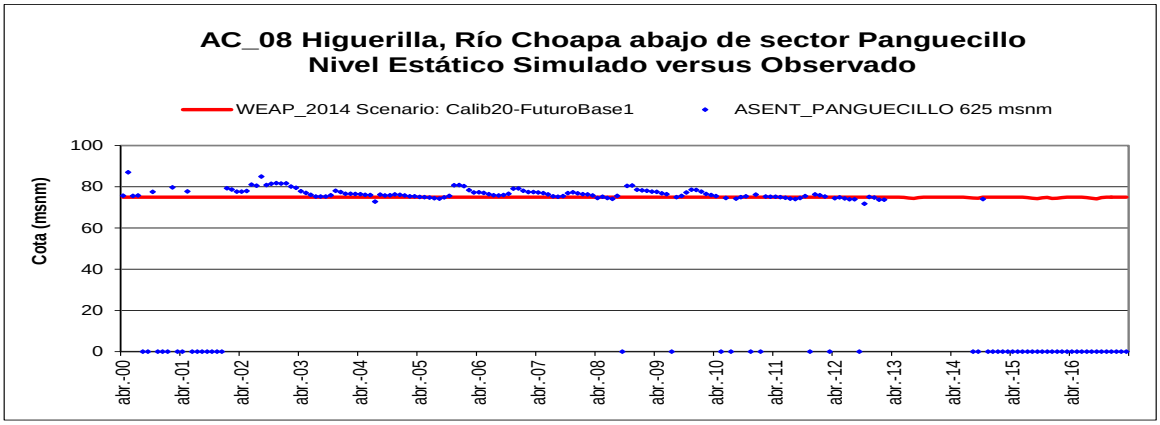
Figura 10.20
Acuífero Cuncumén



- **Acuífero de Panguecillo**

Este acuífero muestra un valor de base completamente estable, y sólo se ven afectadas las recuperaciones asociadas al período de deshielo / riego durante los últimos años, porque ha habido menos agua en los cauces, y menos agua para regar. Lamentablemente, la medición en el pozo se ha hecho difícil, y la DGA dejó de medirlo. Una medición realizada en octubre 2014 por el consultor, en que se pudo constatar esta dificultad, permitió, sin embargo, llegar al nivel estático, el cual no se ha movido de su situación base estable, como también lo muestra el nivel simulado en la modelación. En este sector se encuentran los derechos superficiales trasladados desde canales y que actualmente se extraen desde el acuífero.

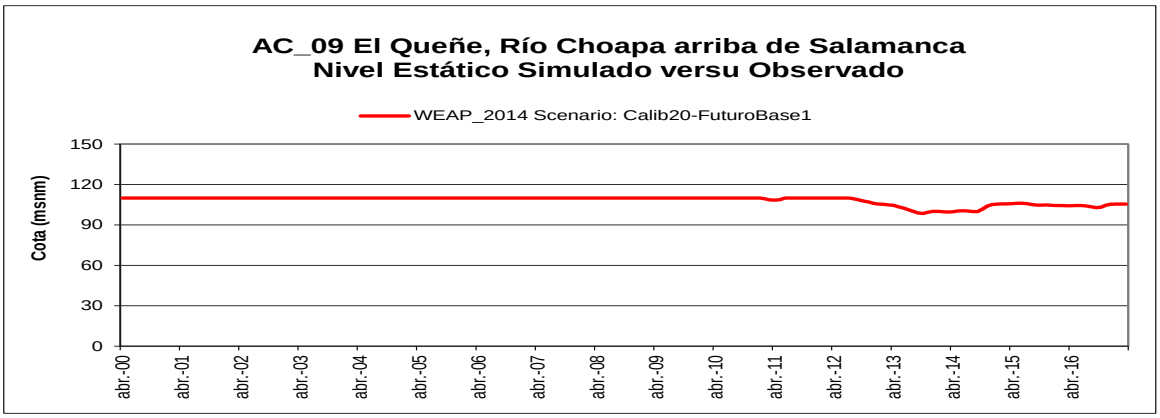
Figura 10.21
Acuífero Asentamiento Panguecillo



- **Acuífero El Queñe**

En este sector, la reducción de caudales en conjunto con la explotación de agua potable y pozos de restitución MLP, redundarían en un descenso del nivel estático, según se aprecia en la figura.

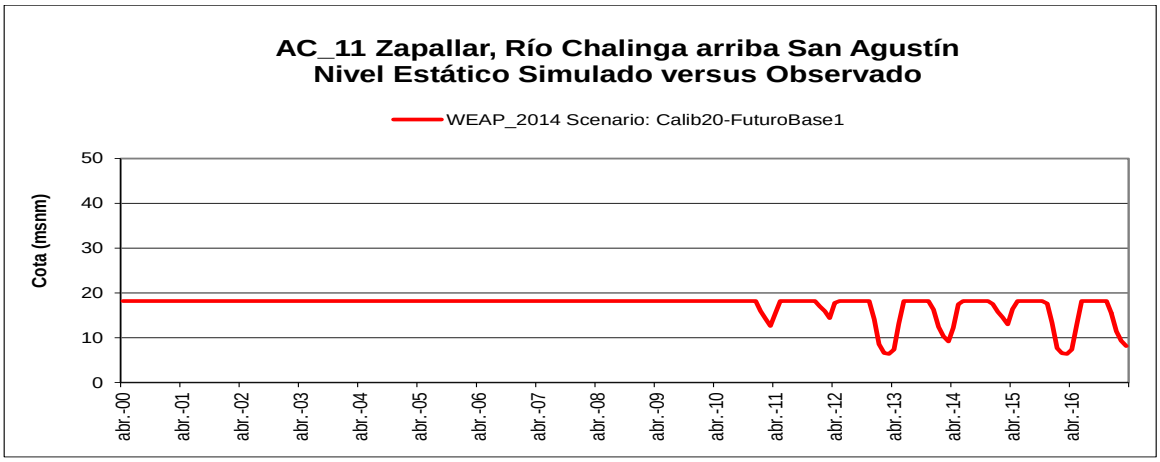
Figura 10.22
Acuífero Santa Rosa El Queñe



- **Acuífero Zapallar**

Este acuífero es pequeño, porque es de cabecera. Mostraría una fuerte influencia de hidrología, especialmente en los años secos. No tiene pozos de explotación ni de medición.

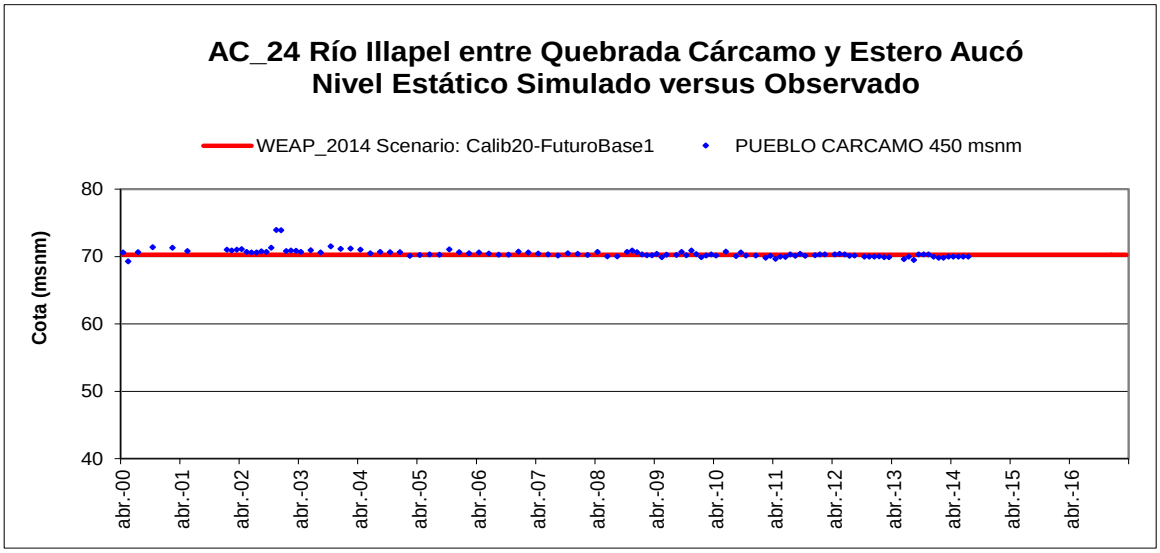
Figura 10.23
Acuífero Zapallar



- **Acuífero Pueblo Cárcamo**

Este acuífero, que se encuentra aguas arriba de Illapel, no muestra prácticamente ninguna influencia de la sequía. Si bien sus niveles aumentaron temporalmente con la crecida del año 2002, después de eso se ha mantenido estable, y seguiría con la misma tendencia en caso de prolongarse la sequía, bajo los mismos derechos de agua que hay en la actualidad.

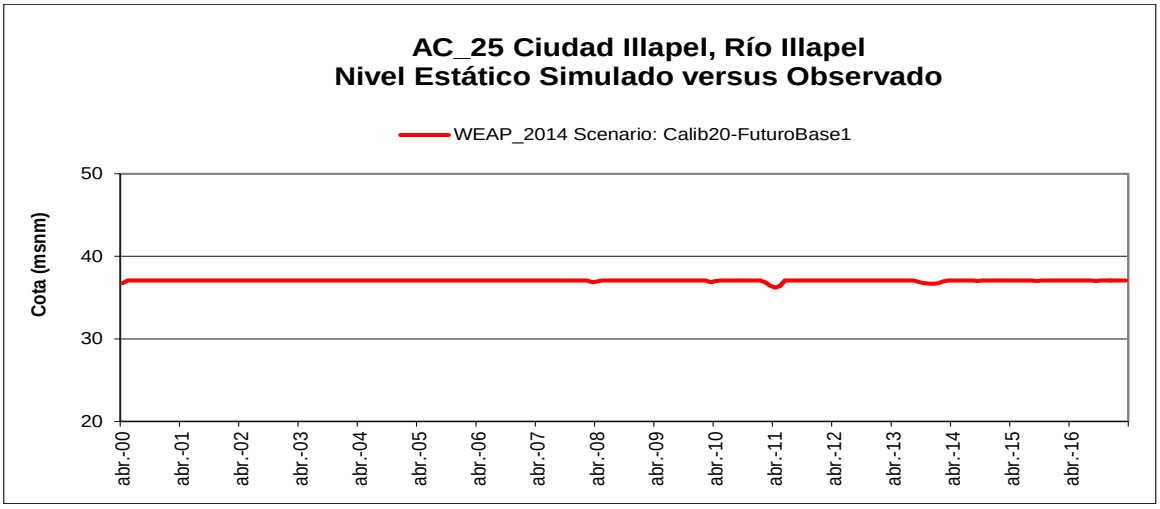
Figura 10.24
Acuífero Pueblo Cárcamo



- **Acuífero Illapel**

Este acuífero se ubica frente y aguas abajo de Illapel. Aunque no hay mediciones de nivel, el modelo muestra un movimiento del nivel estático, que no tendría tendencia al descenso, y sólo indicaría variaciones menores al prolongarse la sequía.

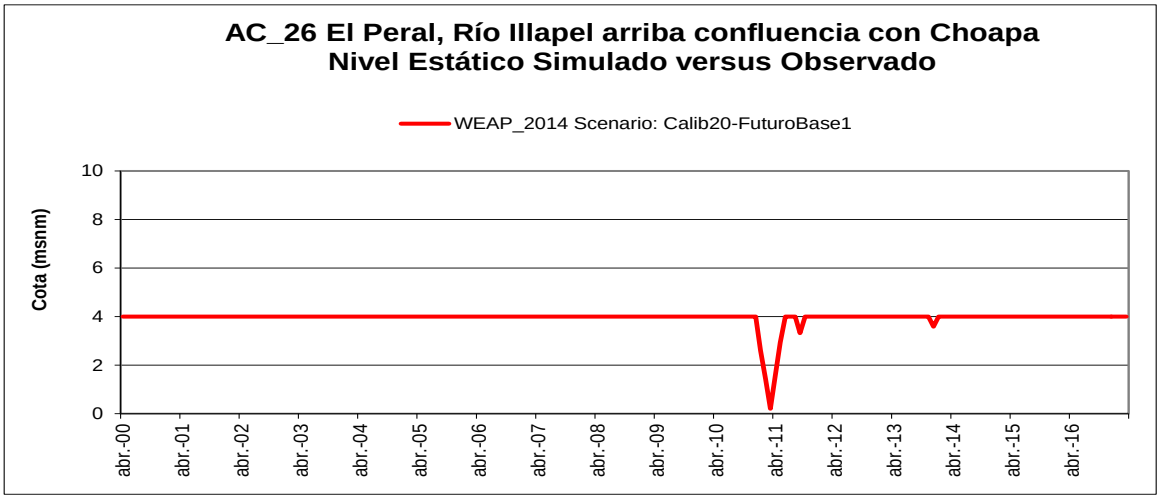
Figura 10.25
Acuífero Illapel



- Acuífero El Peral

Este acuífero es muy pequeño, y se observa que el uso intensivo de sus derechos podría afectar fuertemente su nivel, aunque si hay riego, este nivel se puede recuperar.

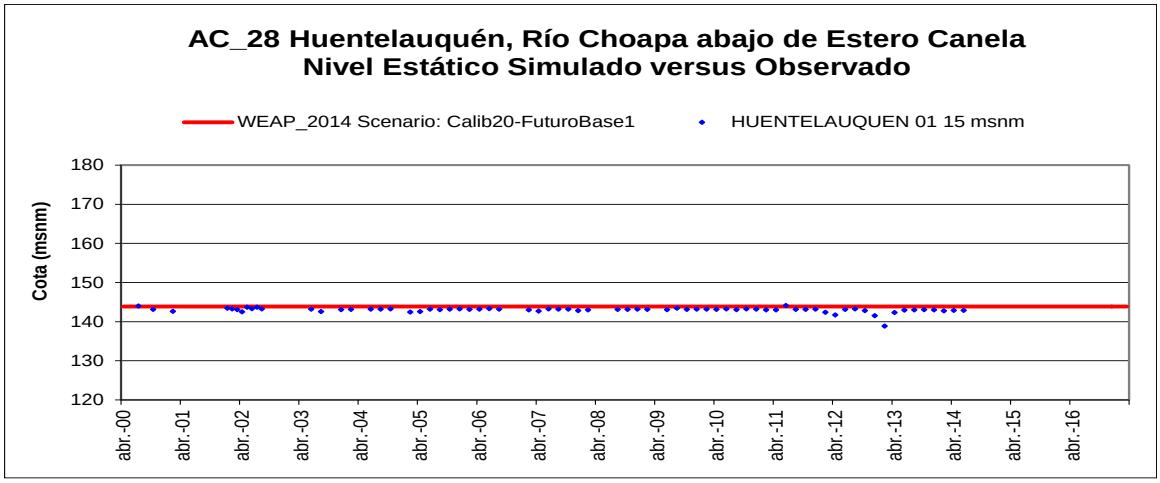
Figura 10.26
Acuífero El Peral



- **Acuífero Huentelauquén**

Es el acuífero final de la cuenca, en la desembocadura del río Choapa. No presenta variaciones, salvo una leve baja el año 2013. Se observa que el modelo es más optimista que la realidad, porque no muestra las variaciones de nivel en sequía. Según se ha constatado, este comportamiento en el modelo se puede ajustar con el coeficiente de percolación desde el riego. De todas formas, no hay tendencia de descenso en este acuífero.

Figura 10.27
Acuífero Huentelauquén



Es necesario tener presente que la visualización del comportamiento de los acuíferos en esta planilla de calibración, muestra solamente niveles (para compararlos con las mediciones reales), y no muestra la relación que hay entre el nivel y el volumen del acuífero. Los gráficos que muestran la forma en que va variando el volumen de los acuíferos, en relación con su volumen total, son los gráficos de la planilla Calib20_FuturoBase1_Balance_AC.
Lo que se observa en estas planillas de calibración, es que los acuíferos del río Choapa, prácticamente en su totalidad, no presentarían señales de descenso, ni por sequía, ni por uso, pues hay muy pocos derechos destinados al uso en estos acuíferos. La excepción sería el acuífero El Queñe, donde con la sequía se verían levemente afectados los niveles, y el sector de cabecera del río Chalinga, donde se aprecia el efecto de la hidrología. En el río Illapel, sólo hay efectos aguas abajo de la ciudad de Illapel, donde la sequía introduce una variabilidad que no se observa antes. El acuífero pequeño de El Peral parecería algo más afectado, en años de poco riego.

c) Planilla Calib20_FuturoBase1_Balance_CA

Esta planilla contiene una hoja para cada uno de los 47 canales modelados, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.3.

De esta forma, se configura un set de 3 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado canal. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunos canales representativos de la cuenca del Choapa.

La prioridad para suplir las demandas siempre la tienen las zonas de riego frutales sobre las anuales. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

Los canales tienen pérdidas, que van hacia los acuíferos subyacentes, y devoluciones, que se entregan de vuelta al río. Las devoluciones se generan en virtud de que la captación no está relacionada con la demanda, sino que con un porcentaje de desmarque, el cual en ocasiones puede superar la demanda.

En el río Choapa, donde se conocen las estadísticas de desmarques, en el período de calibración los canales captan de acuerdo con los desmarques preestablecidos, con tope en su capacidad. Los desmarques se encuentran en la planilla DESMARQUES.csv de la carpeta Datos, y para los últimos años de sequía han sido los que se muestran en la Tabla 10.14 más adelante. También se muestran los desmarques del período futuro en la misma Tabla, donde se aprecia que se asumió los desmarques actuales de la Junta de Vigilancia. Los desmarques se aplican a todos los canales del río Choapa que se encuentran dentro de la Junta de Vigilancia. En el modelo, esto se traduce en que se aplica la misma prioridad a todos esos canales. Se observa que los desmarques se reducen en épocas de invierno, para ahorrar agua con la cual se va cargando el embalse Corrales.

Tanto en el río Chalinga como en el río Illapel, al no conocerse los desmarques, durante el período de calibración se ha impuesto un desmarque igual a 1, dejando que el modelo

optimice la distribución entre los canales. El modelo WEAP optimiza la distribución entre canales en base a las prioridades establecidas para ellos. Dentro del río Chalinga y río Illapel, es decir, dentro de cada Junta de Vigilancia, se ha asumido que todos los canales tienen la misma prioridad.

A partir de marzo de 2012 en el río Illapel, y abril de 2014 en el río Chalinga, el escenario Futuro Base 1 considera desmarques controlados para todos los ríos, adaptados a los desmarques que se han usado en el río Choapa en sequía. Esto se ha considerado así para evaluar, sobre el escenario Futuro Base 1, el efecto de cambios como los embalses, que exigen una política de desmarques más eficiente.

A continuación se muestran algunos gráficos representativos de las situaciones que se dan en la cuenca. La totalidad de canales se puede apreciar en la planilla Calib20_Balance_CA del Anexo Capítulo 10.3.

- **Canales río Valle (CA_01 y 02)**

Estos canales siempre reciben lo que les corresponde por desmarque, como se observa en la Figura 10.27 más adelante, y están en condiciones de captar el desmarque porque tienen la capacidad suficiente. Hay grandes pérdidas, que se entregan al acuífero, y devoluciones al final del canal. Tanto las pérdidas como las devoluciones disminuyen fuertemente desde 2011, en la época de sequía.

- **Canales río Choapa (CA_03 a 6, CA_ 10 a 21 y CA_45 y 46))**

Todos los canales del río Choapa, que tienen la misma prioridad, se comportan en forma similar, pues reciben el mismo caudal por acción. Se presenta el caso del canal Silvano como representativo de todos los canales del río Choapa. Lo que se aprecia, es que no siempre hubo agua como para suplir el desmarque nominal. Crónicamente, el desmarque nominal en el período de estiaje no alcanza a ser totalmente cubierto, cuando se aspira a desmarques sobre 70% en los meses de verano. Sin embargo, en el período de sequía, al reducirse los desmarques de verano a 40% como máximo, este desmarque sí puede ser suplido por el sistema, incluso en años de sequía como los de 2011 a 2014, como se puede apreciar para los últimos años en la Figura 10.28. También se observa que la mayoría de los canales tiene grandes pérdidas, las cuales se integran a los acuíferos, e importantes devoluciones hacia el río, las que ocurren al final o a lo largo de su trayecto, dependiendo de las características de cada canal. Ambas disminuyen fuertemente hasta casi desaparecer, en los últimos años de sequía.

- **Canales río Chalinga (CA_22 a 25)**

En este río, se dejó al programa WEAP asignar libremente el caudal disponible entre los canales de igual prioridad, hasta 2014. En la Figura 10.29 se puede observar que la asignación que se logra, llega a un desmarque de 100% sólo en épocas abundantes de recursos, ya sea en invierno (en que se requiere poca agua) o en verano. Se aprecia muy claramente la época de sequía, en que los desmarques en verano descienden a 40%, 30% y

hasta a 20% en algunos canales, que es justamente lo que ocurre en la época actual. También se observa que los canales tienen pérdidas importantes, las cuales se entregan al acuífero, y devoluciones al río al final de su trayecto. Las devoluciones disminuyen hasta desaparecer, en los últimos años de sequía. El año 2014 se observa un cambio de comportamiento, el cual se debe a que el desmarque solicitado ya no es 100%, con una cobertura que define finalmente el WEAP, sino que se reduce a un rango entre 40% y 20%, desmarque el cual es factible de suplir 100% durante el invierno, y aproximadamente 50% durante el verano. Esto muestra que el desmarque efectivo de verano también sería de unos 20%, lo que es coincidente con la realidad.

- **Canales río Illapel (CA_32 a 44)**

Al igual que en el río Chalinga, en el río Illapel se observa que el desmarque suele fallar en el período de estiaje. Hasta 2011, antes del embalse El Bato, se aprecia la profundización de la sequía. El embalse El Bato, al ser exigido en forma razonable, permite suplir al 100% desmarques menores, como se aprecia a partir del año 2012. Por otro lado, se aprecia que los canales tienen grandes pérdidas y devoluciones, las cuales, sin embargo, vuelven al acuífero y al río. Ambas disminuyen fuertemente en los años de sequía, las devoluciones llegan a desaparecer. Ver Figura 10.30.

Figura 10.28
Canales río Valle

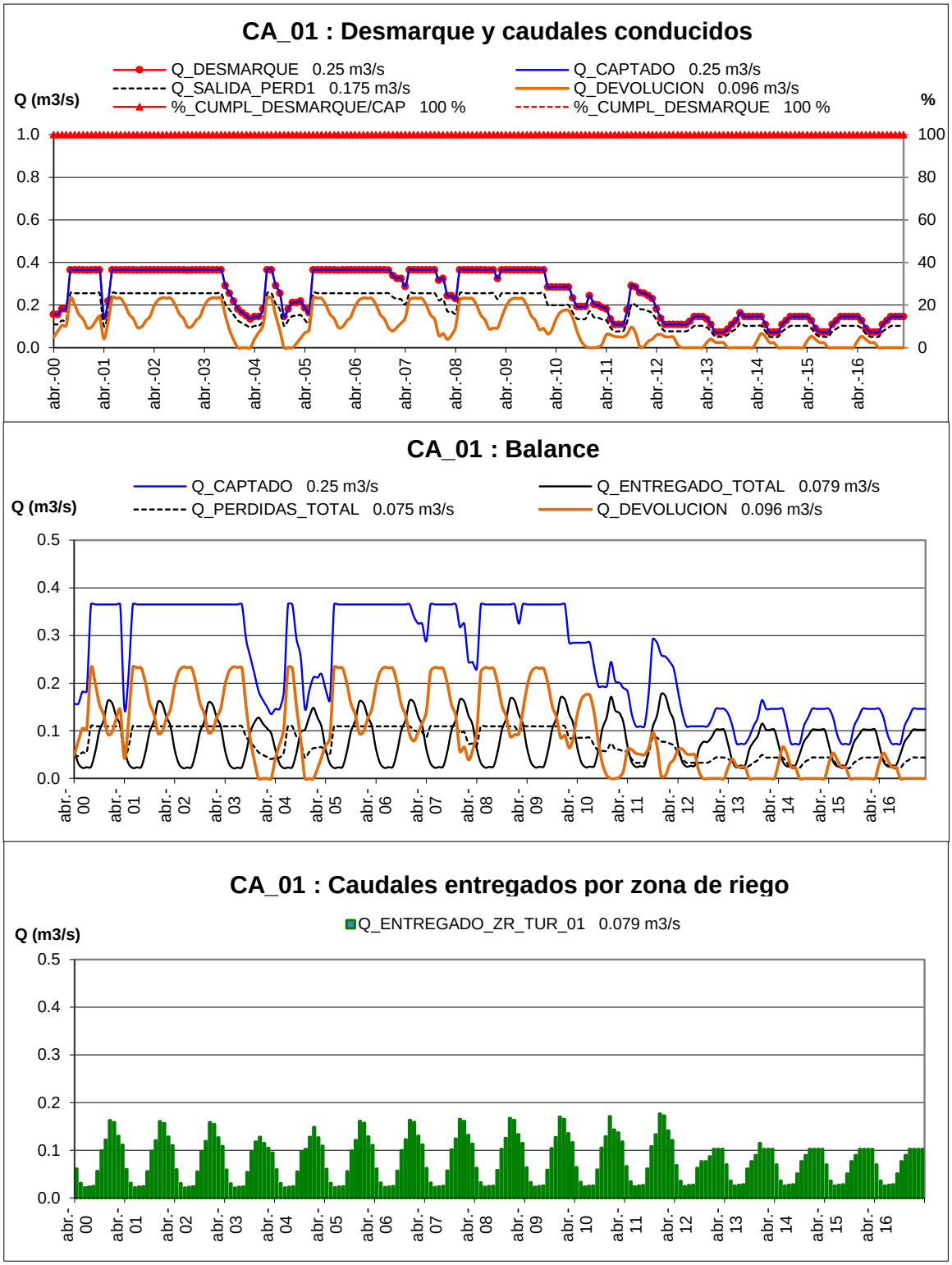


Figura 10.29
Canales río Choapa (canal Silvano)

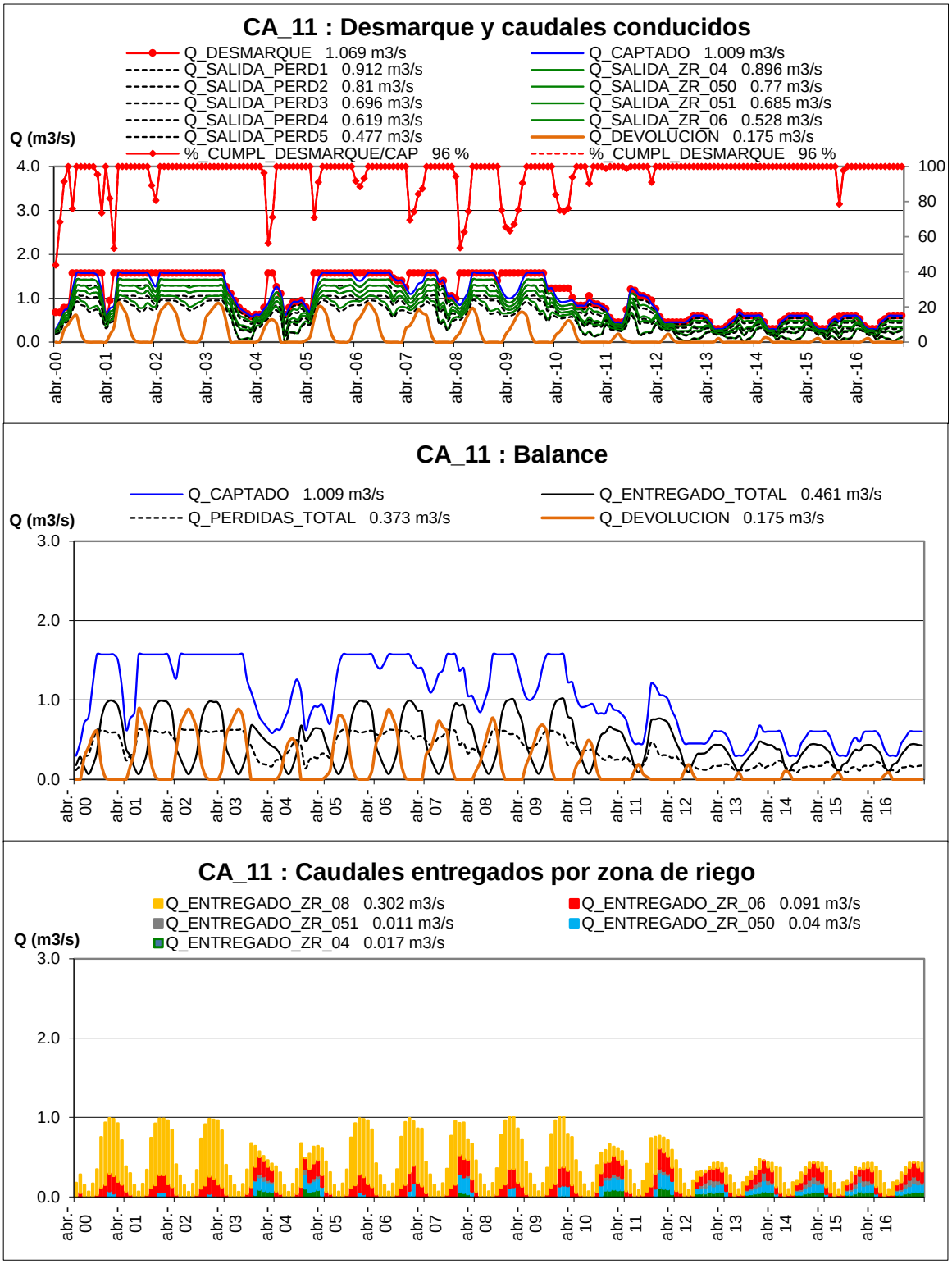


Figura 10.30
Canales río Chalinga (canal Batuco)

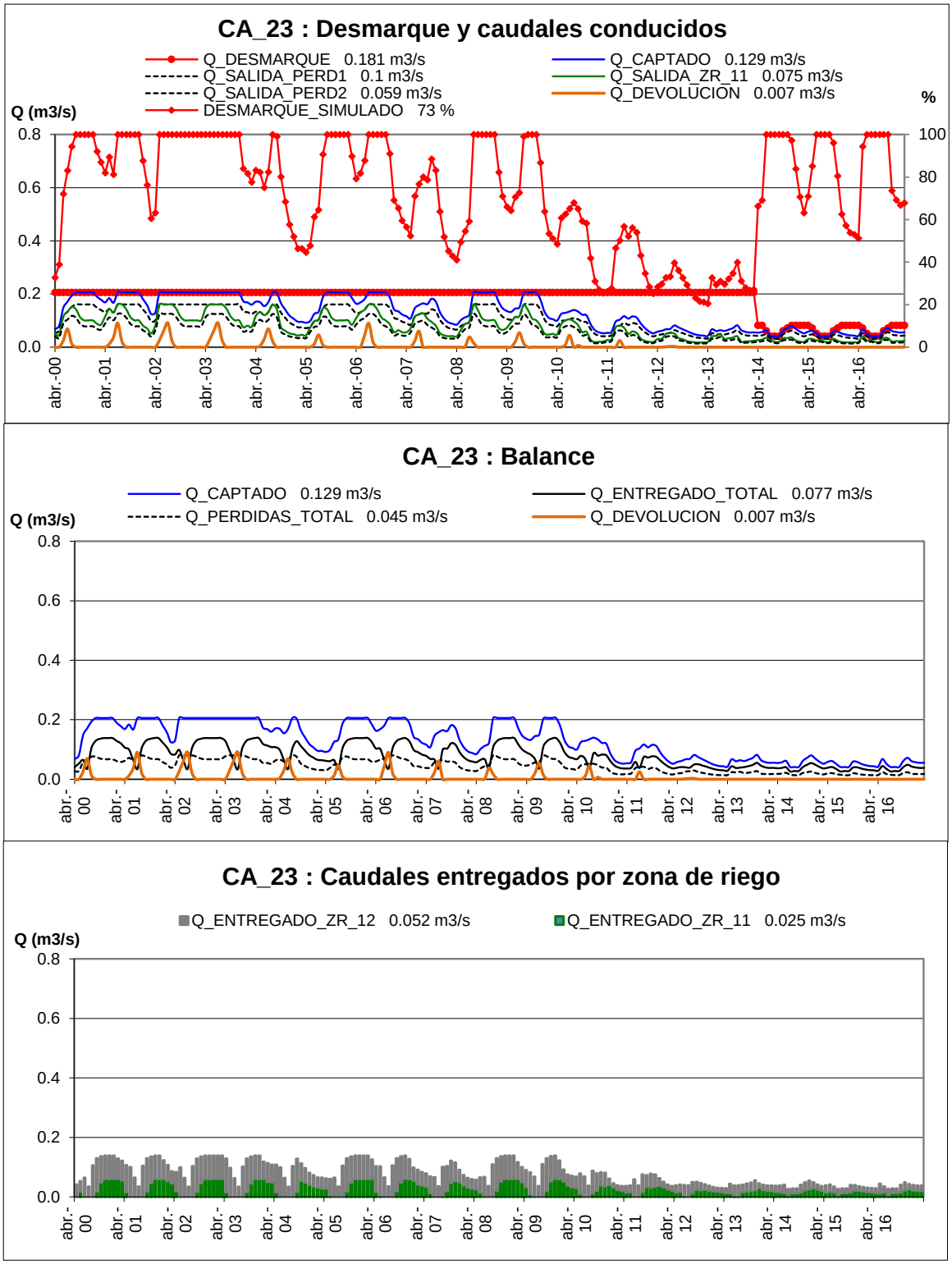
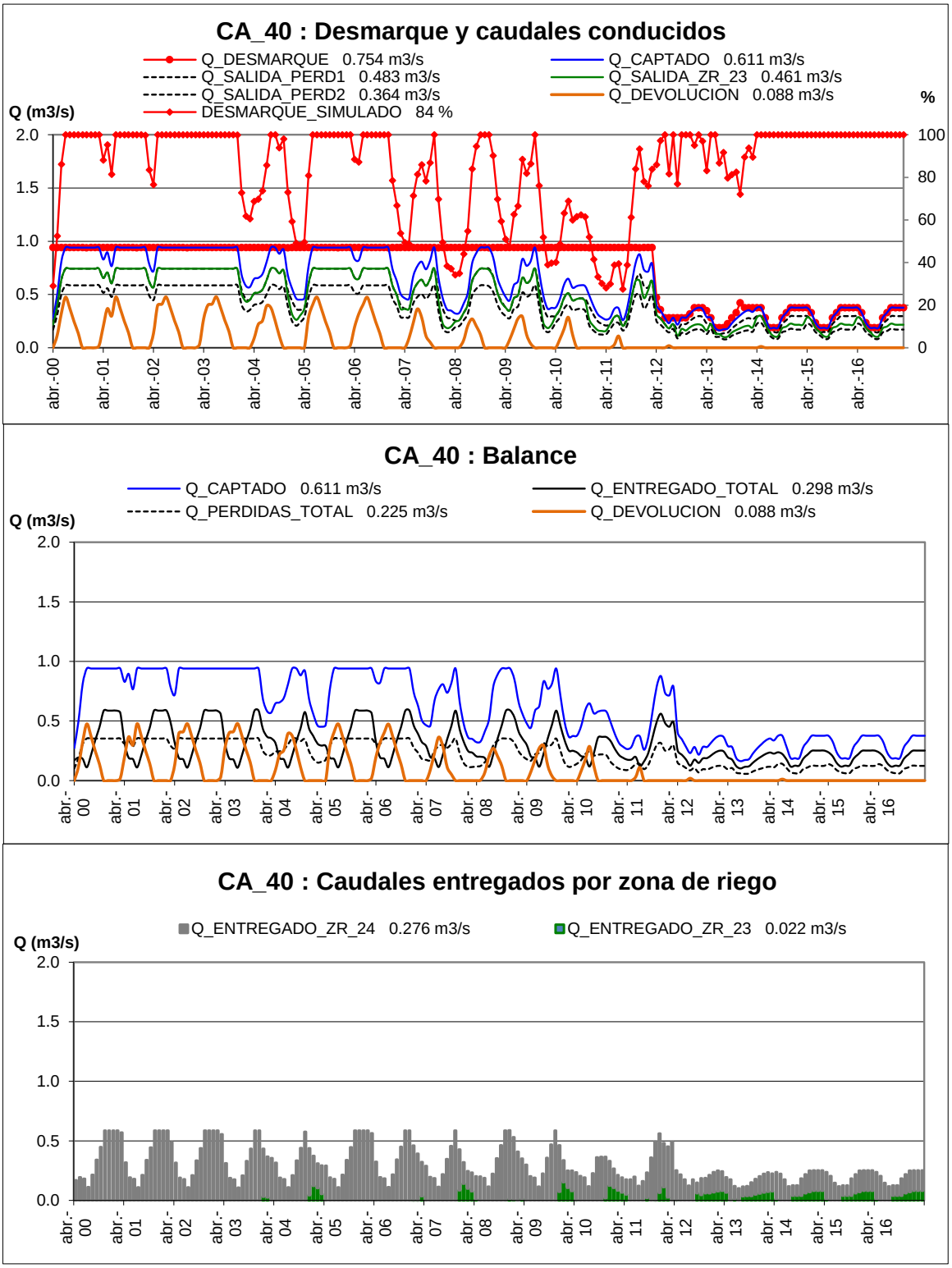


Figura 10.31
Canales río Illapel



d) Planilla Calib20_FuturoBase1_Balance_ZR

Si bien los canales captan equitativamente sus aguas en la bocatoma, las áreas de las zonas de riego que abastecen no son proporcionales al recurso recibido. De esta forma, las figuras siguientes muestran cómo finalmente son suplidas las zonas de riego con el agua que reciben de los canales, y si se suplementan o no con aguas subterráneas, en función de los derechos que tienen en el acuífero.

La planilla contiene una hoja para cada zona de riego, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.3.

De esta forma, se configura un set de 6 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con una determinada zona de riego. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunas zonas de riego representativas de la cuenca del río Choapa.

La prioridad para suplir las demandas siempre la tienen las zonas de riego frutales sobre las anuales. Desde el punto de vista de la oferta, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

- **Zona de Cuncumén (ZR_03)**

Se observa, en primer lugar, una muy baja eficiencia de riego en este sector, que implica una demanda muy alta a nivel de zona de riego, en relación con la demanda consuntiva o de raíz. La entrega por parte de los canales es adecuada en épocas normales, pero alcanza a cubrir menos de la mitad de la demanda en sequía, y no hay posibilidad de usar pozos por ausencia de derechos subterráneos para riego. Del caudal recibido en la zona de riego, una parte derrama de vuelta hacia el río, mientras que una parte mayor se estima que percola hacia el acuífero. Finalmente, se ve que la demanda de estiaje es mal suplida en años secos, salvo la de los cultivos frutales, que son prioritarios. La mayoría de los cultivos es anual. Ver Figura 10.32.

- **Zona de Panguecillo (ZR_08)**

Este sector es representativo del Choapa Alto. La eficiencia de riego es en general baja, aunque en este sector específico la Agrícola Mercedario Ltda. eleva el promedio de eficiencia del valor general cercano a 0,5 a aproximadamente 0.7. Se aprecia que no hay pozos para riego en este sector, pero a partir de 2011, aparecen los derechos que Agrícola Mercedario Ltda. cambió de fuente y que actualmente extrae desde el acuífero, lo que ha ayudado marginalmente a suplir las demandas. Esta zona de riego se surte de diversos canales, sin embargo durante la sequía la cobertura es precaria. La ineficiencia es alta, generando derrames y percolación, sin embargo disminuye sensiblemente durante la sequía. Las zonas de este sector son vulnerables. En años buenos la demanda es bien suplida, pero en años secos, la demanda suplida cae fuertemente en la época de riego, cayendo en los últimos años cerca o bajo el 40%. Hay cultivos anuales y frutales. Los anuales casi se han

dejado de regar, y los cultivos frutales han sufrido la baja oferta de la sequía. Ver Figura 10.33.

- **Zona río Chalinga (ZR_13)**

Los cultivos son fundamentalmente anuales. La eficiencia de riego es baja, y por lo tanto la demanda de riego es alta, y no se alcanza a cubrir. Gran parte de la ineficiencia se asume que percola hacia los acuíferos, el resto derrama al río. El aporte de los pozos es mínimo, porque hay muy pocos derechos de agua subterránea. Los cultivos frutales se surten bien, mientras que los anuales son los que pagan el costo de la escasez. La escasez es especialmente notoria en la sequía. Ver Figura 10.34.

- **Zona río Choapa Medio (ZR_16)**

Los cultivos son predominantemente anuales. No hay aporte desde pozos. La ineficiencia se distribuye entre el acuífero y el río. En épocas normales, todos los cultivos se surten bien. En los últimos años de sequía, ésta ha afectado sólo los cultivos anuales. Ver Figura 10.35.

- **Zona Cárcamo-Aucó (ZR_24)**

La zona ZR_24 presenta características bastante típicas dentro de la subcuenca del Illapel. La eficiencia de riego es baja, devolviéndose el agua de las pérdidas hacia el acuífero y hacia el río. Por lo general, no hay pozos de riego, salvo en los acuíferos AC_25 y AC_26, para el abastecimiento de las ZR_25 y ZR_26. En años normales y húmedos, la cobertura de la demanda es adecuada, pero baja en años secos. Durante la sequía, ha bajado hasta 40%, con los recursos del embalse. Si la sequía se prolonga, la cobertura podría mantenerse en unos 40% en época de estiaje. Los cultivos frutales minoritarios se mantienen regados, mientras que los cultivos anuales serían los afectados. Ver Figura 10.36.

- **Zona Choapa Bajo (ZR_27 y 28)**

Esta zona por lo general no tiene problemas de abastecimiento, solamente ha tenido alguna reducción de la cobertura en los últimos dos años de sequía, que se mantendría de prolongarse ésta. Sin embargo, la cobertura incluso en sequía no ha bajado del 70%, y en uno solo o pocos meses durante el estiaje. Este sector es el mejor suplido de toda la cuenca.

Figura 10.32
Cuncumén

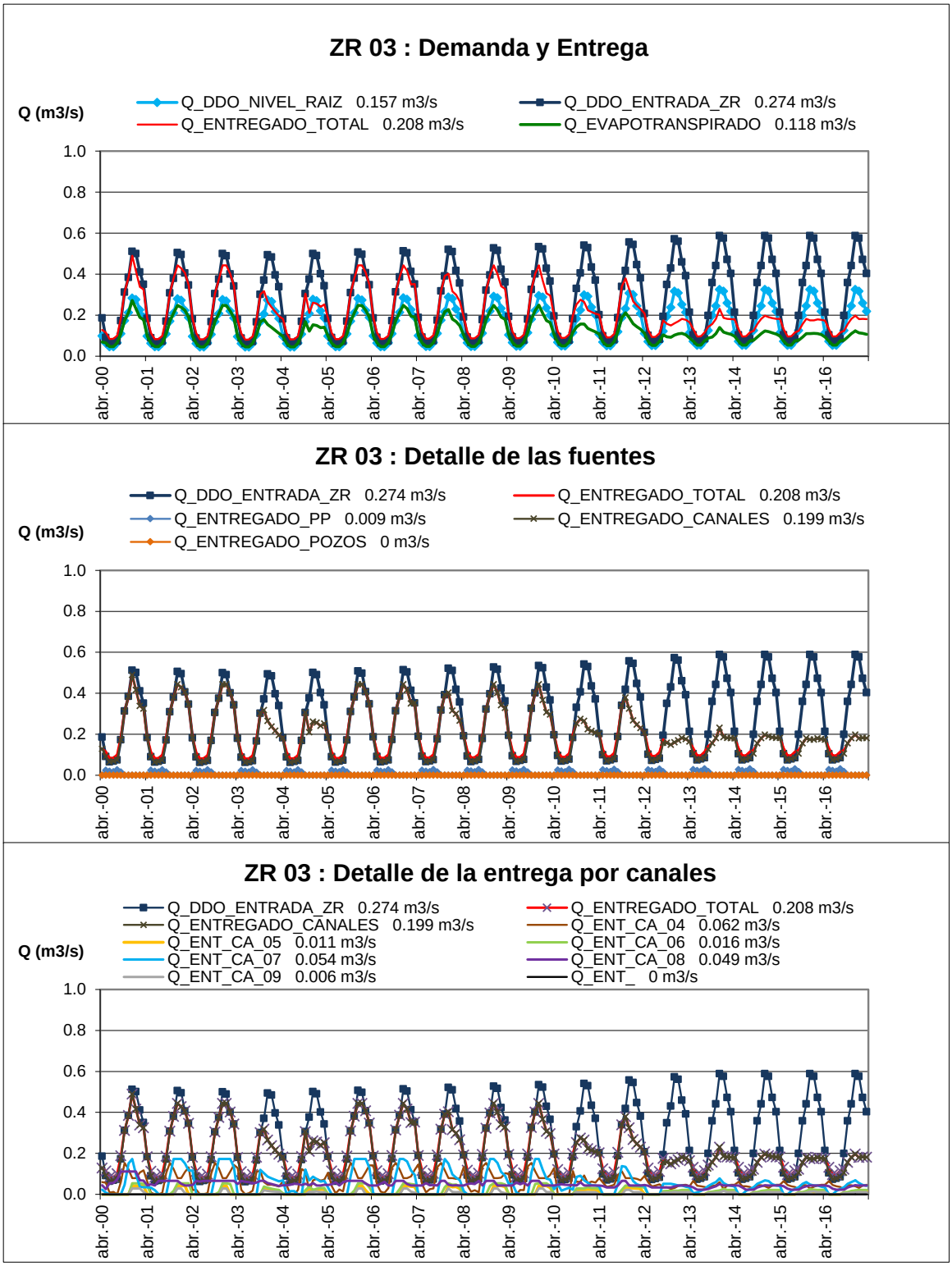


Figura 10.32 (Continuación)
Cuncumén

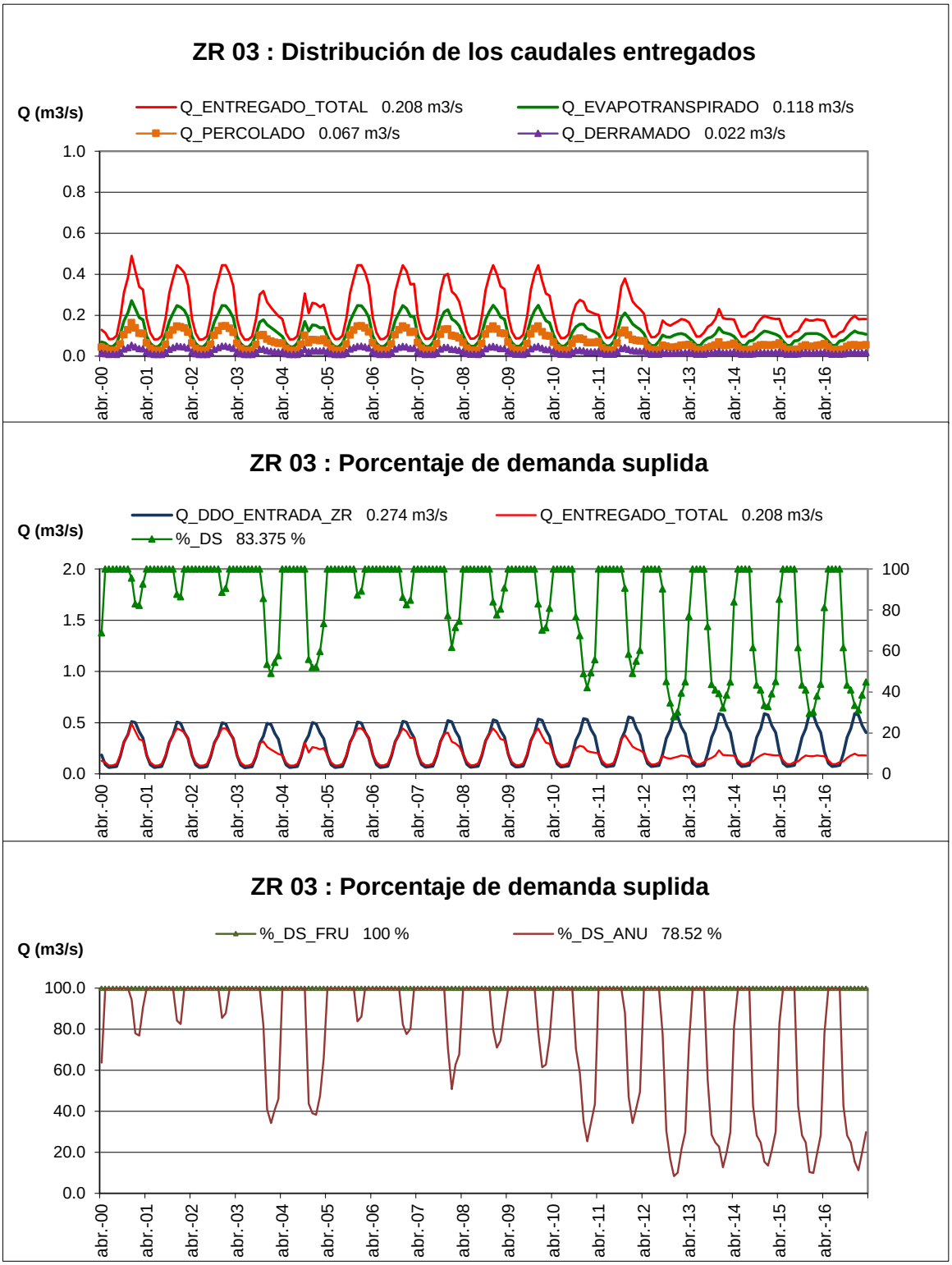


Figura 10.33
Choapa Alto - Panguecillo

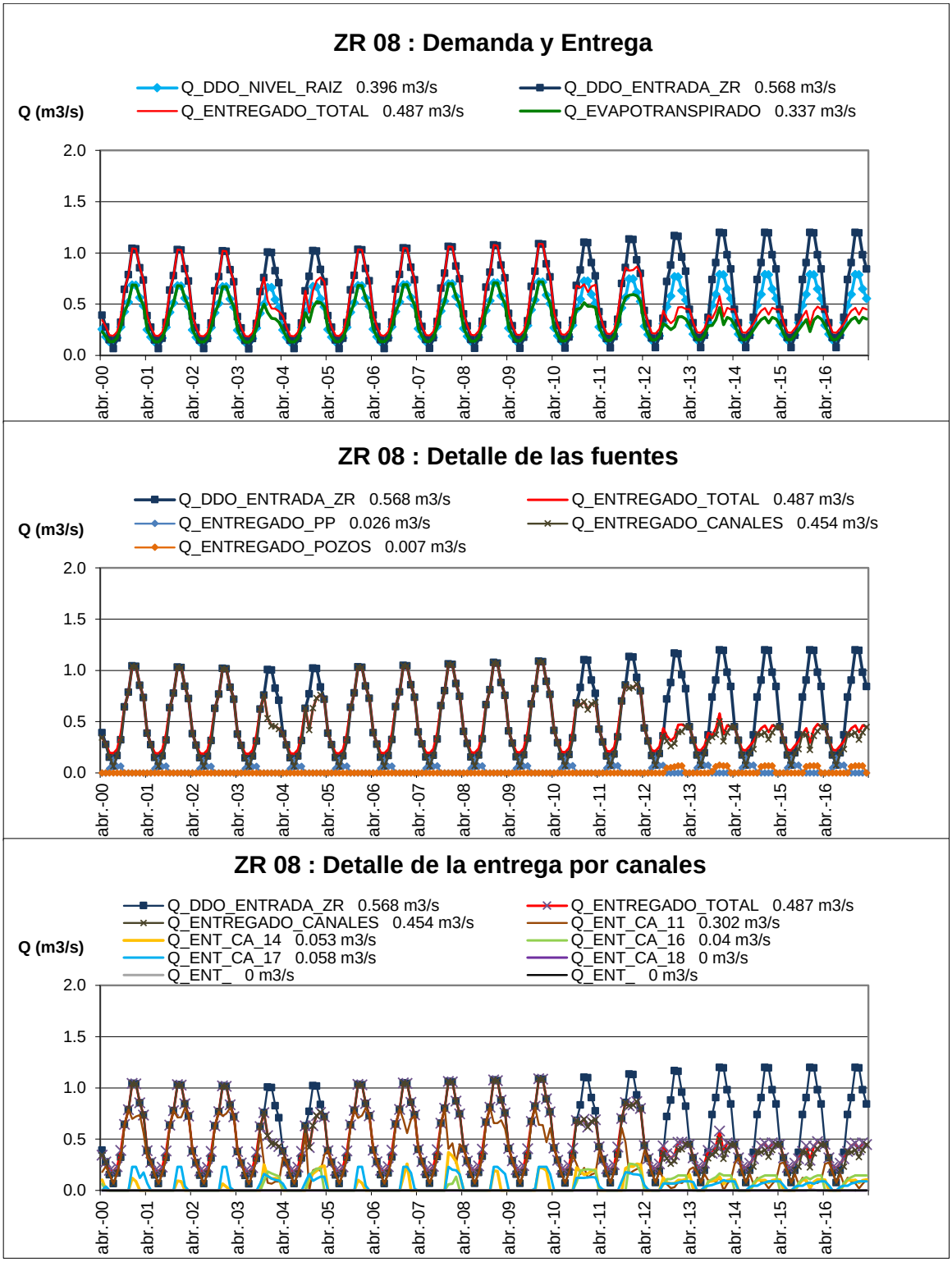


Figura 10.33 (Continuación)
Choapa Alto - Panguecillo

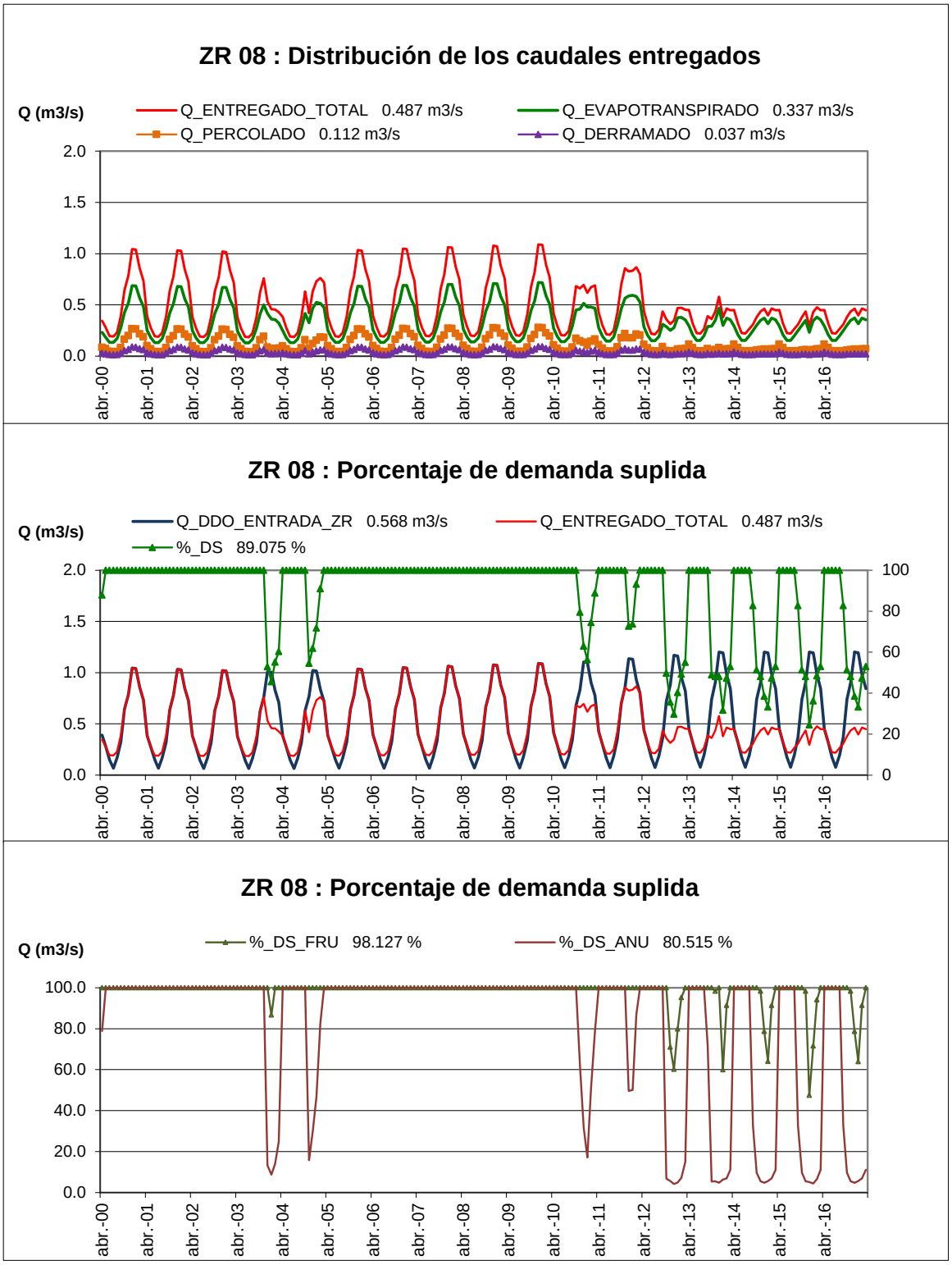


Figura 10.34
Río Chalinga Bajo

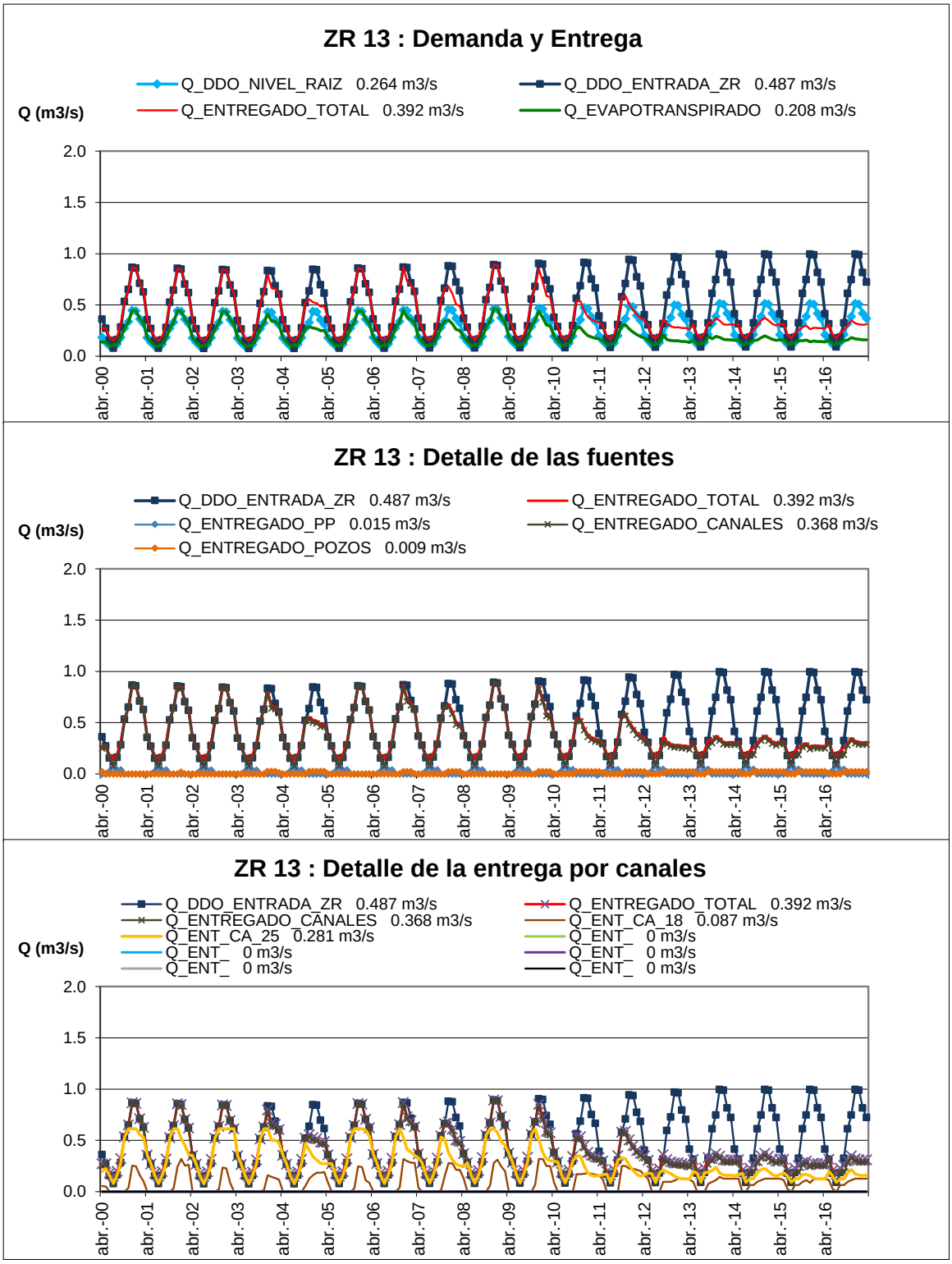


Figura 10.34 (Continuación)
Río Chalinga Bajo

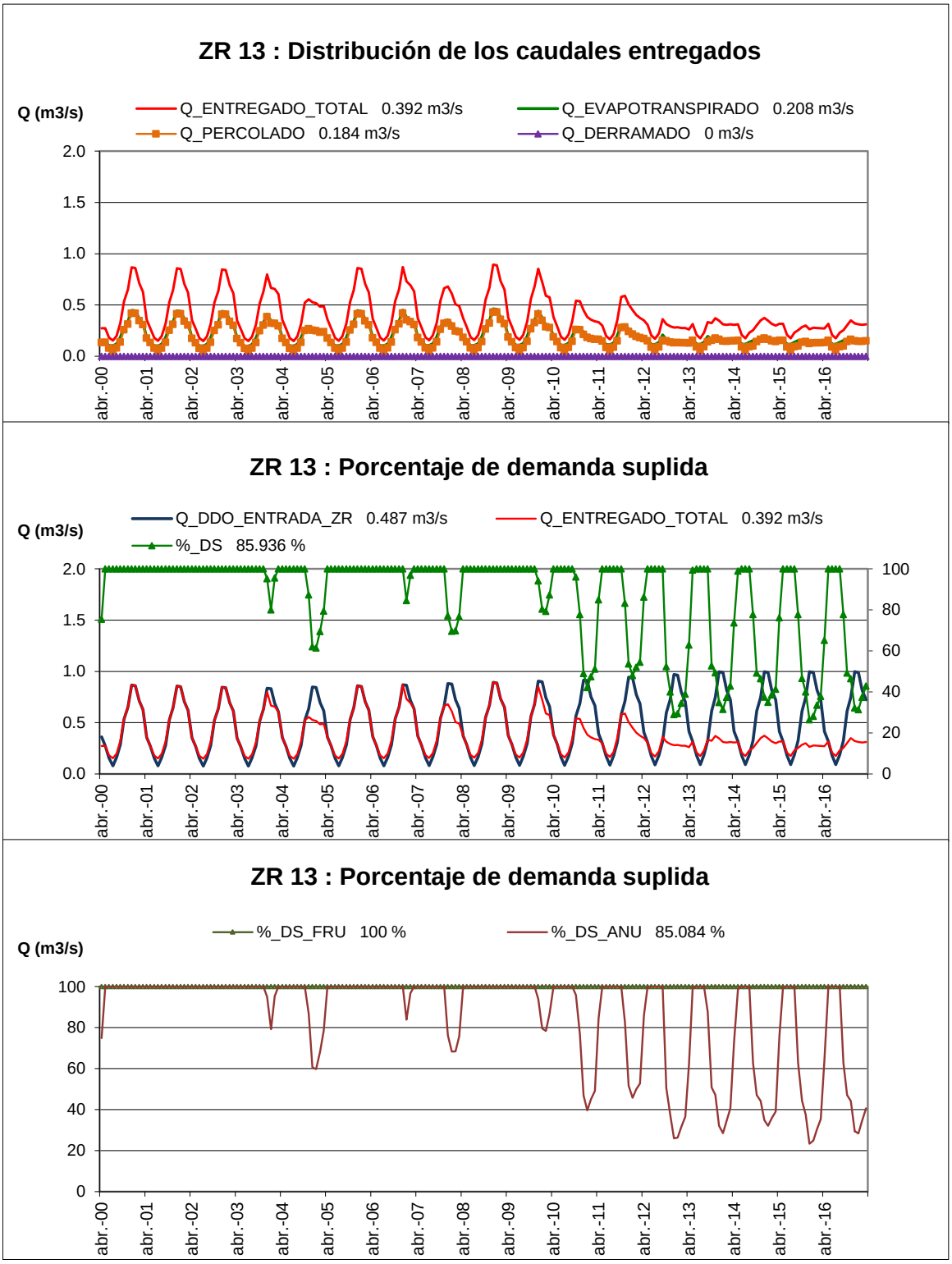


Figura 10.35
Río Choapa Medio

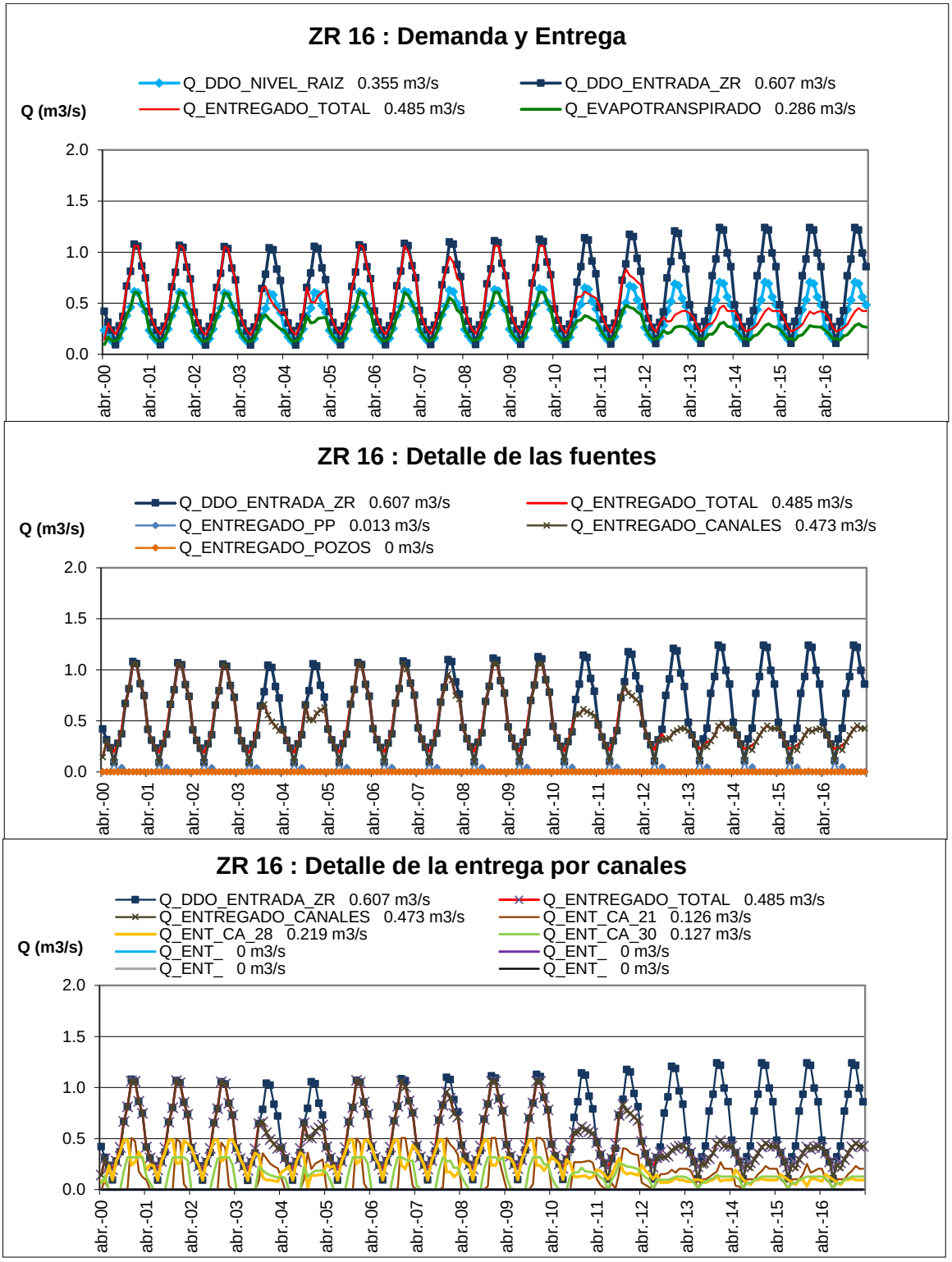


Figura 10.35 (Continuación)
Río Choapa Medio

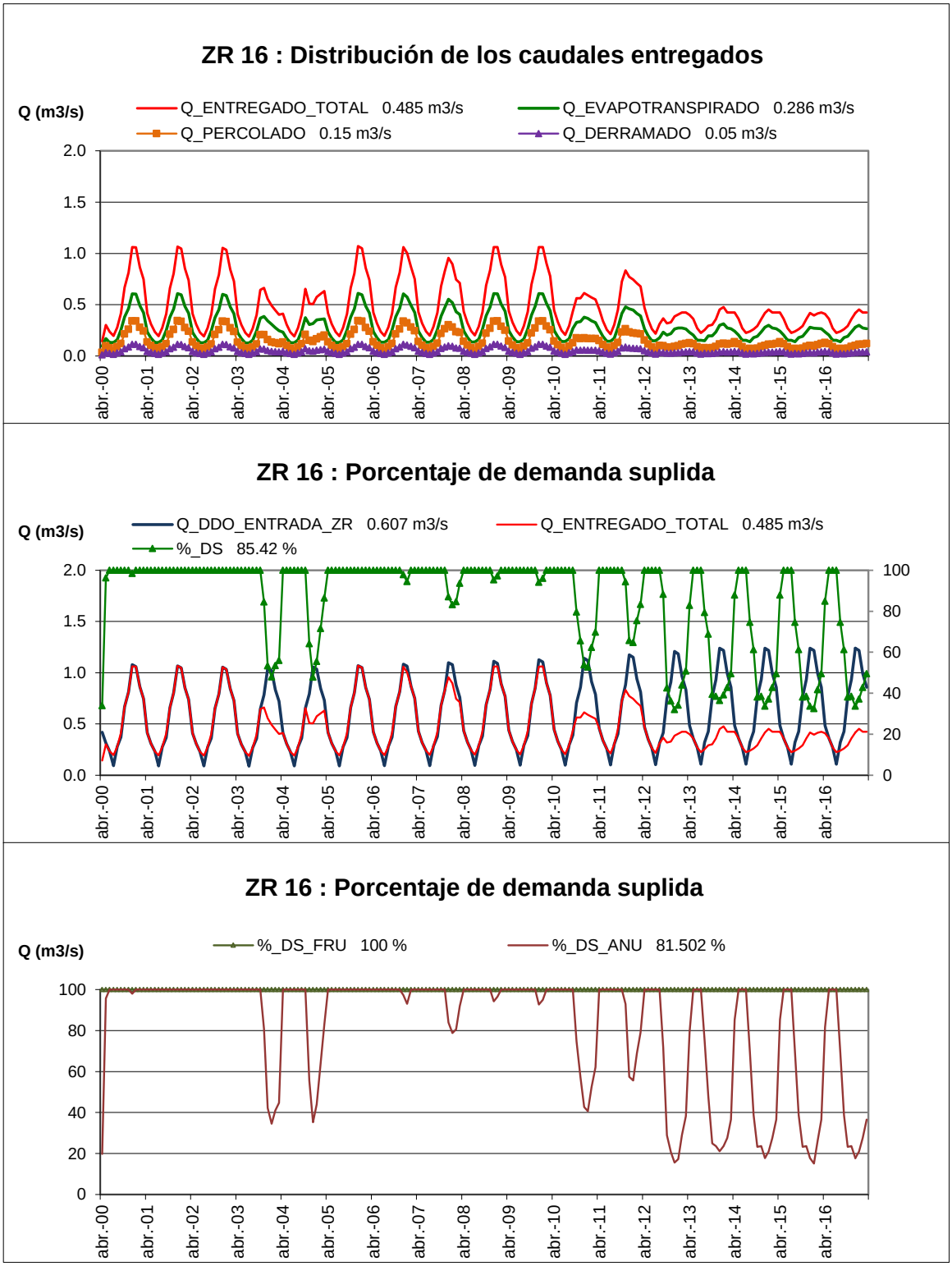


Figura 10.36
Río Illapel

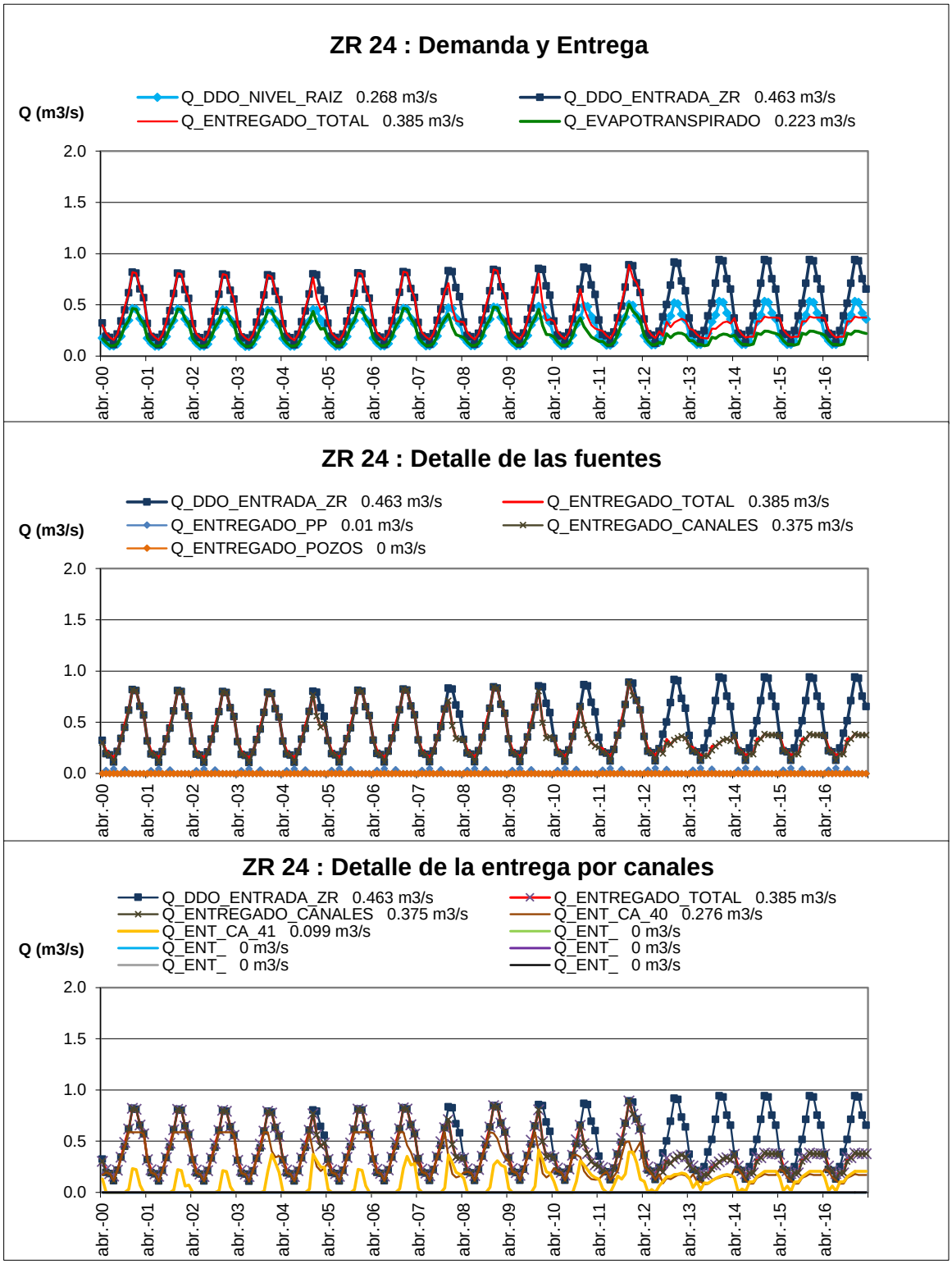
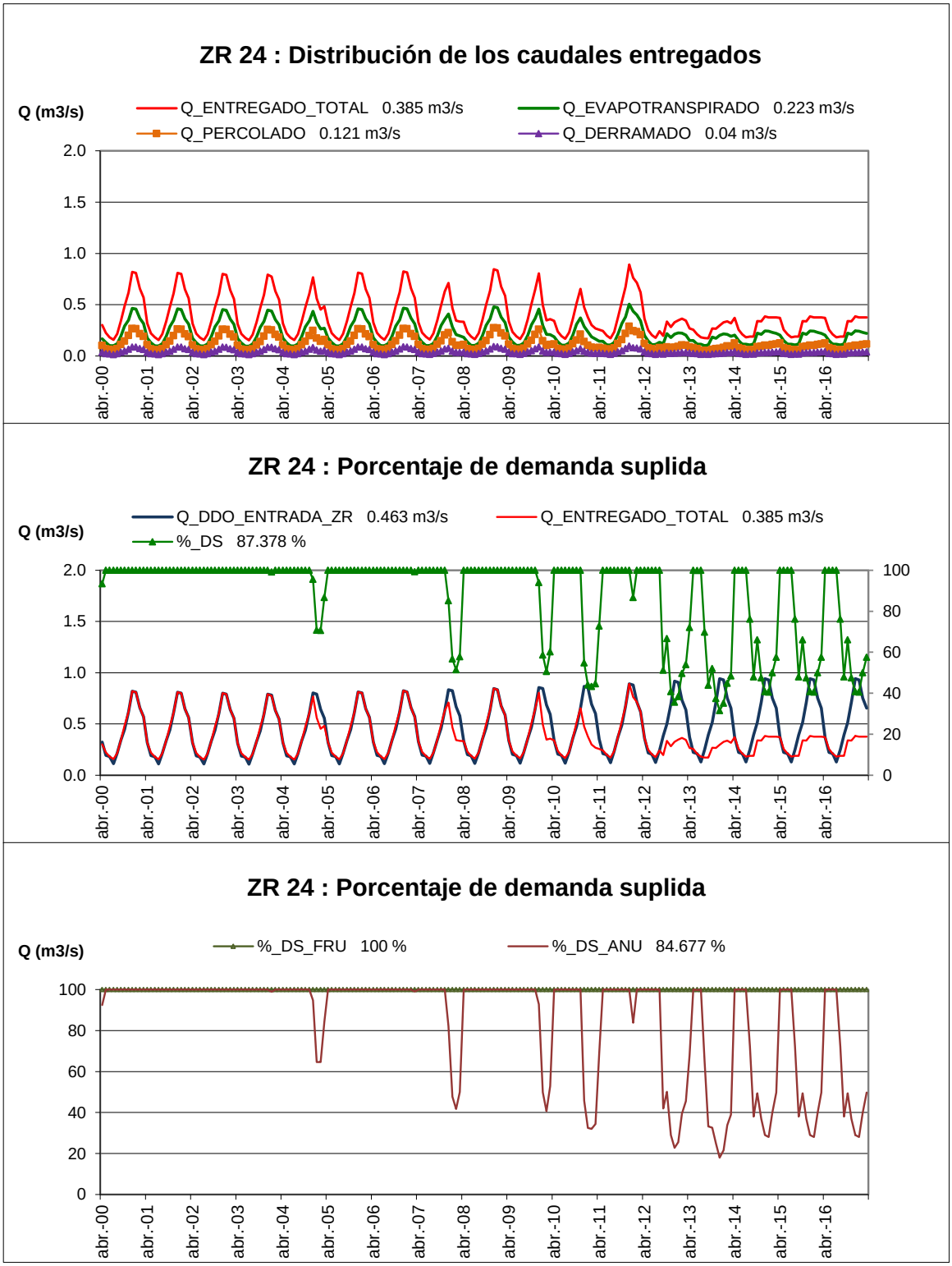


Figura 10.36 (Continuación)
Río Illapel



e) Planilla Calib20_FuturoBase1_Balance_AC

Esta planilla contiene una hoja para cada acuífero modelado, en la que se presentan todos los resultados que entrega el modelo, ordenados y graficados según se expone en el capítulo 7.3.

De esta forma, se configura un set de 4 gráficos, que da cuenta en detalle de todos los flujos que se asocian con un determinado acuífero. A continuación, se muestra el set completo de gráficos, para algunos acuíferos representativos de la cuenca del Choapa.

En los gráficos se puede apreciar el origen de las recargas, los afloramientos y recarga neta, los bombeos que se solicitan al acuífero por uso, y el volumen resultante de la operación. En este caso, los gráficos entregan el volumen de los acuíferos, y no el nivel.

En la modelación se asume que el acuífero es capaz de entregar todo el caudal solicitado, mientras exista algún volumen disponible. Probablemente en la realidad esto no sea así, y el caudal entregado vaya disminuyendo a medida que descienden los niveles.

Cuando se trata del agua superficial provista por los canales, las zonas de riego frutales tienen prioridad sobre las anuales. No es así en el caso de pozos, que suplen ambos tipos de zona con la misma prioridad. Sin embargo el derecho subterráneo se ha repartido preferentemente hacia los cultivos frutales, considerando una dotación promedio de 3.5 l/s/há. Si alcanza, el derecho complementario (para llegar al derecho total de la zona de riego) se entrega a la zona anual. Desde el punto de vista de la oferta total, siempre se usan primero los canales y luego los pozos, con tope en sus derechos.

- **Acuífero Choapa Alto**

En el Choapa Alto se distinguen dos tipos de comportamiento de los acuíferos: los que afloran y los que han dejado de aflorar en virtud de la explotación, en conjunto con la sequía. En el caso de los que ya no presentarían afloramientos, aproximadamente desde 2011, se encuentran los acuíferos de Cuncumén, Panguecillo y El Queñe, debido fundamentalmente a la explotación desde los pozos de explotación y de restitución de la Minera Los Pelambres. El caso de la explotación de la Agrícola Mercedario es diferente, porque su explotación responde a un intercambio de fuente, de modo que son aguas que se han dejado de captar superficialmente, para captarlas luego subterráneamente, con el mismo desmarque como si fueran superficiales. En todos los demás sectores, el acuífero seguiría aflorando.

A modo de ejemplo, en las Figuras 10.37 y 10.38 se presenta la situación del acuífero de Panguecillo (AC_08) como representativo de los acuíferos que no afloran, y el acuífero de Llimpo (AC-07) por los que sí afloran.

- **Acuífero Chalinga**

En el río Chalinga, el acuífero muestra la misma variabilidad en cuanto a su recarga, que el recurso superficial. La recarga varía fuertemente dependiendo del tipo de año. Durante la

sequía, se observa claramente una reducción de la recarga, con ello una reducción del afloramiento, pero se mantiene relativamente constante la recarga neta. Esta se produce debido a que hay extracciones, tanto por bombeo (muy poco) como por evapotranspiración de la vegetación ripariana. El nivel de los acuíferos se mantiene alto, salvo en la cabecera, donde en la sequía fluctúa. Ver Figura 10.39.

- **Acuífero Choapa Medio**

Se observa que la principal recarga de este acuífero es la percolación desde canales. La recarga disminuye en época de sequía. Con ello, también disminuyen los afloramientos, que sin embargo, no dejan de existir. La recarga neta es similar en todo el período, y ocurre debido a que hay alguna extracción mediante evapotranspiración, desde el acuífero. Los acuíferos de este sector están llenos, incluso durante la sequía. Ver Figura 10.40.

- **Acuífero Illapel**

Lo primero que se observa es que los acuíferos del río Illapel son muy pequeños en comparación con los del Choapa. La recarga provendría fundamentalmente de las ineficiencias de los canales. La disponibilidad de recarga va disminuyendo con la sequía. El uso del acuífero se produce a partir de la evapotranspiración ripariana, y del uso para riego que permiten los pocos derechos que hay en el AC_25. El uso posibilita una recarga neta. La disminución de recarga con la sequía genera la reducción de afloramientos y el aumento de la recarga neta. El acuífero no presentaría descensos importantes, ni siquiera en épocas de sequía. Ver Figura 10.41.

- **Acuífero Choapa Bajo**

Se presenta el acuífero de Huentelauquén. La principal componente de la recarga sería la percolación por ineficiencia de canales. Como en todo el sistema, en los últimos años secos ha bajado la disponibilidad general de recarga, por reducción de caudales en canales y en el río. Al mismo tiempo ha aumentado el bombeo, y con ello, han disminuido los afloramientos, y ha aumentado la recarga efectiva. Ésta se puede producir sólo porque hay un uso del acuífero, el cual genera espacio. Si bien el acuífero podría estar comenzando a marcar una variación interanual de niveles que antes no se observaba, no presenta tendencia al descenso. Ver Figura 10.42.

Figura 10.37
Acuífero de Panguecillo (AC_08)

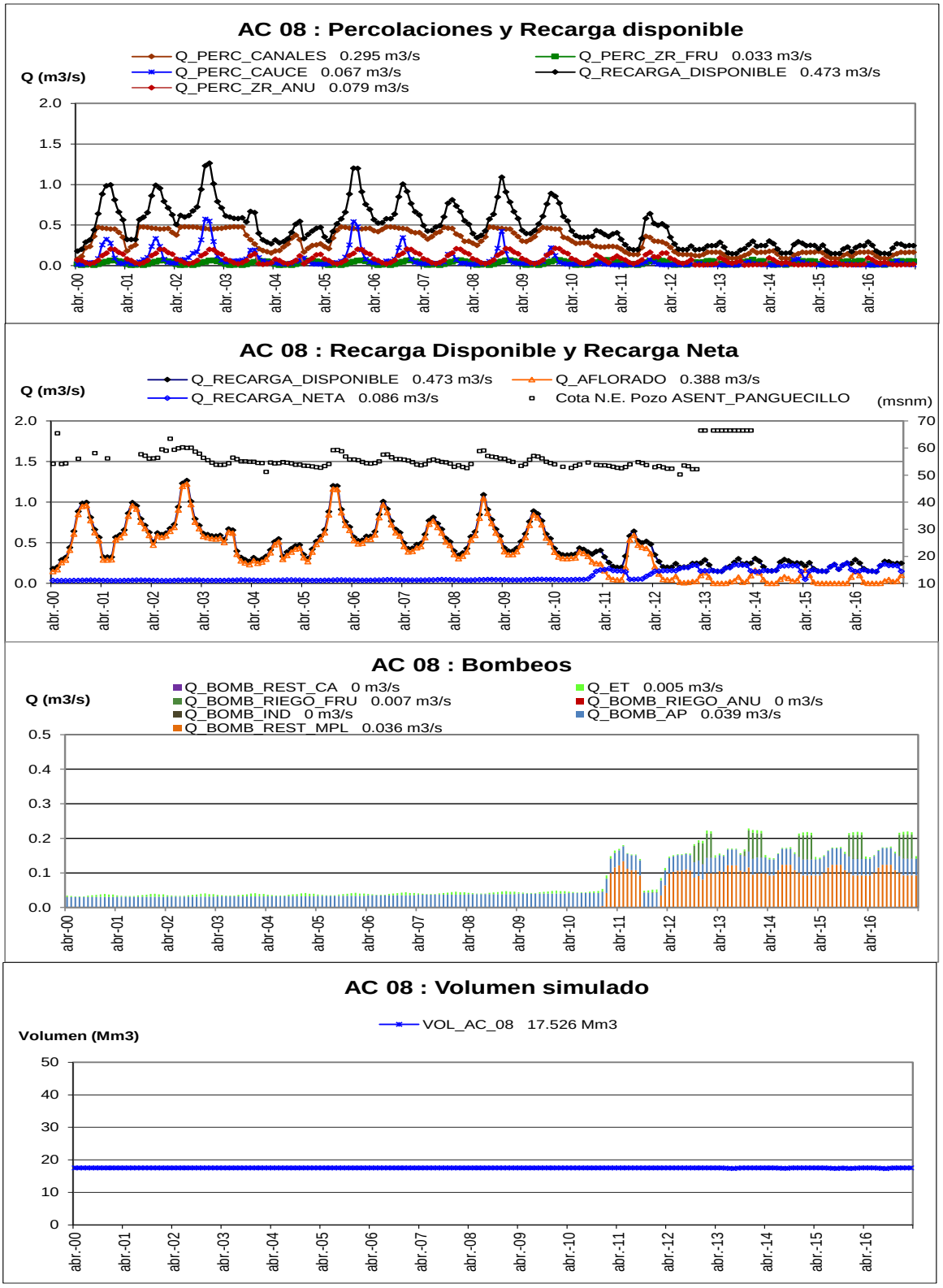


Figura 10.38
Acuífero de Llimpo (AC-07)

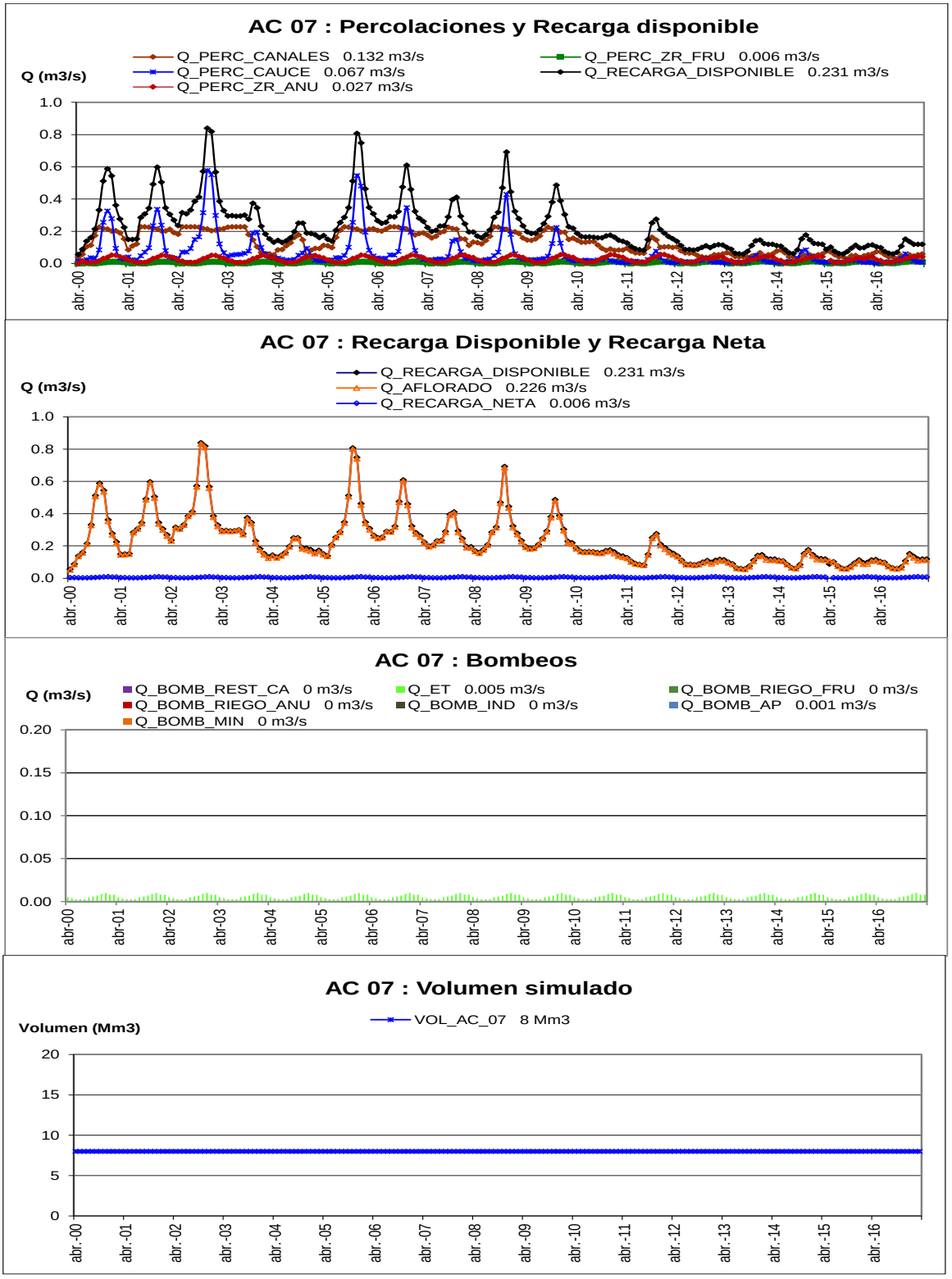


Figura 10.39
Acuífero de Chalinga

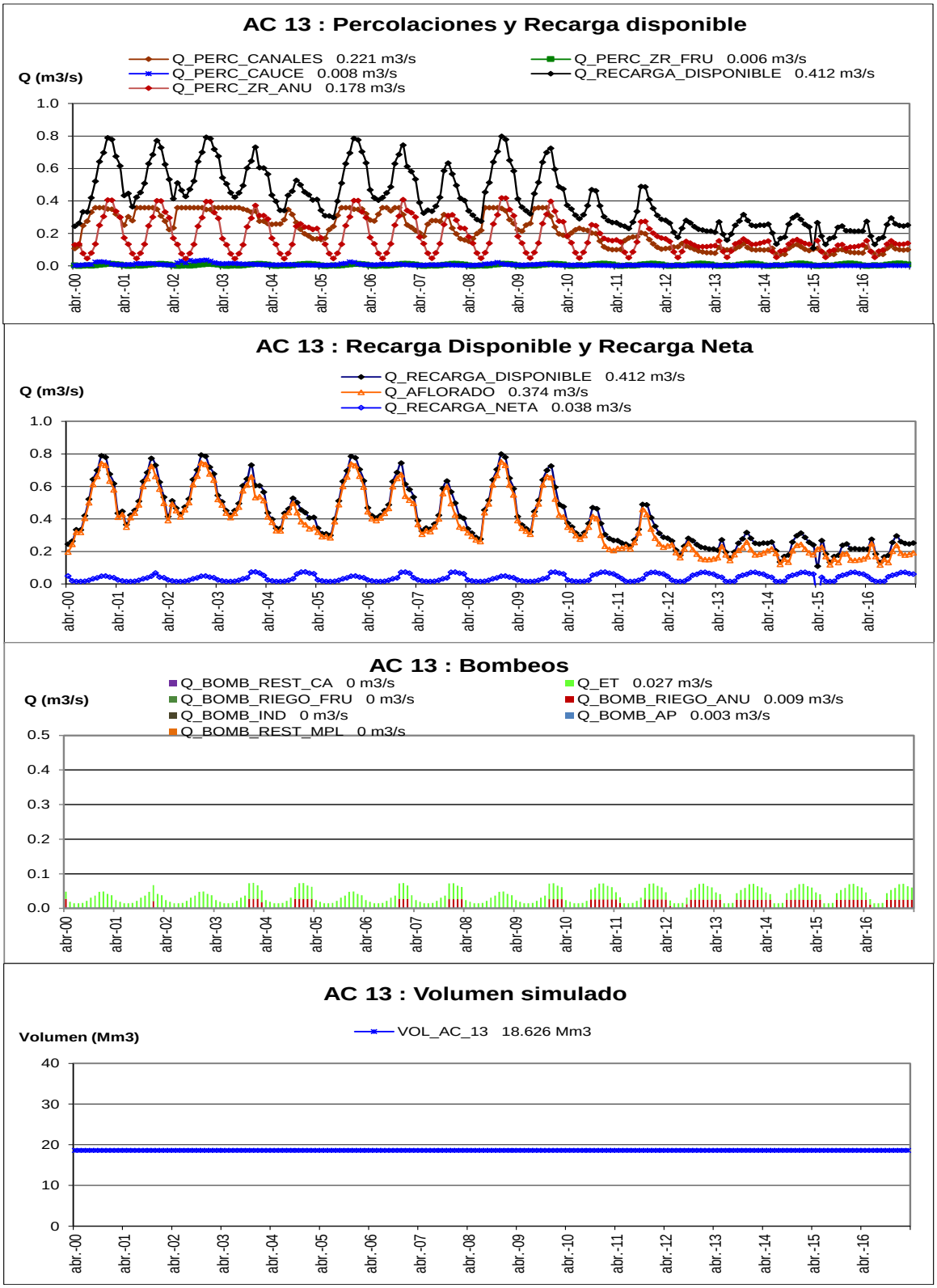


Figura 10.40
Acuífero Choapa Medio

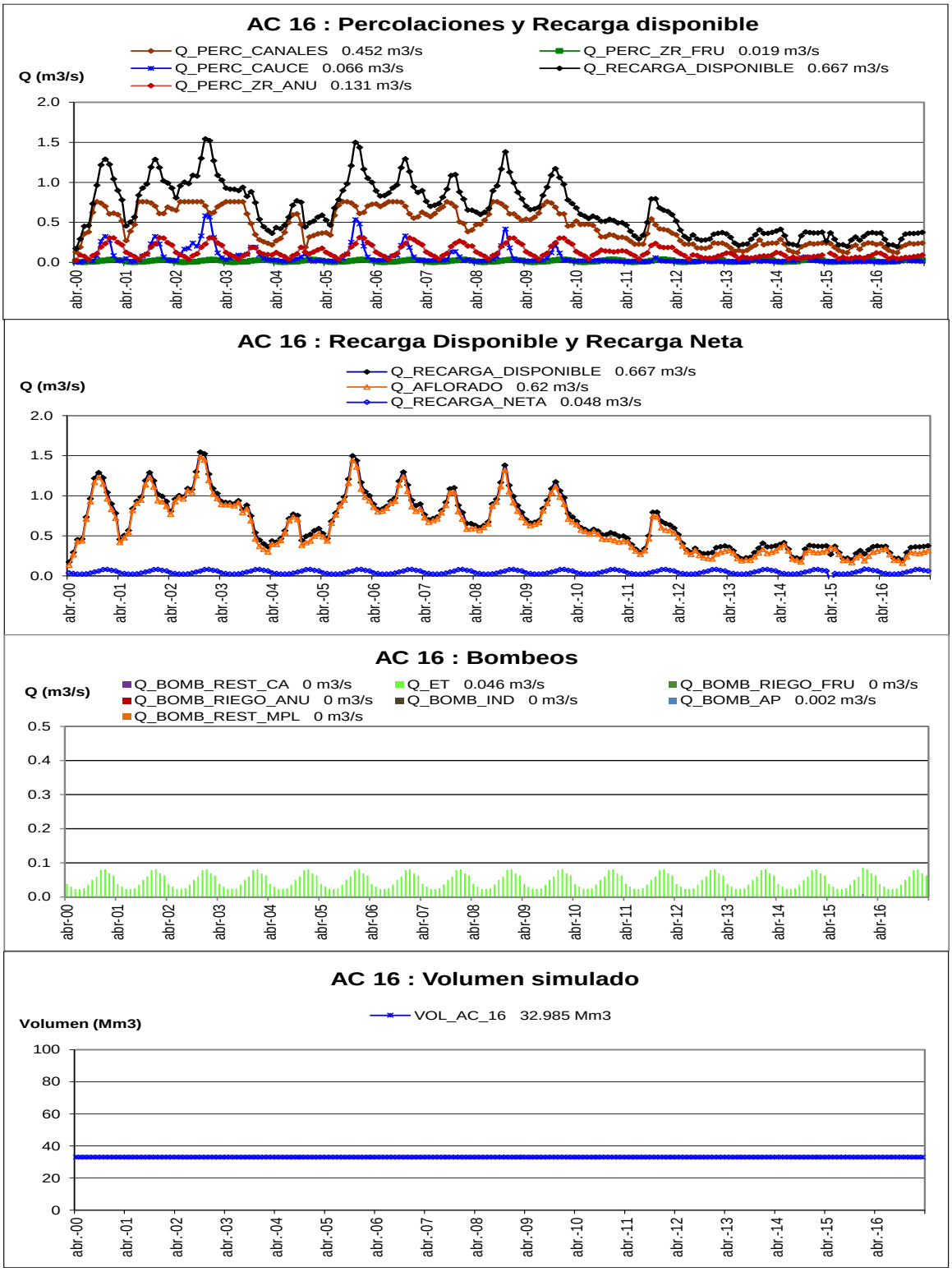


Figura 10.41
Acuífero Illapel

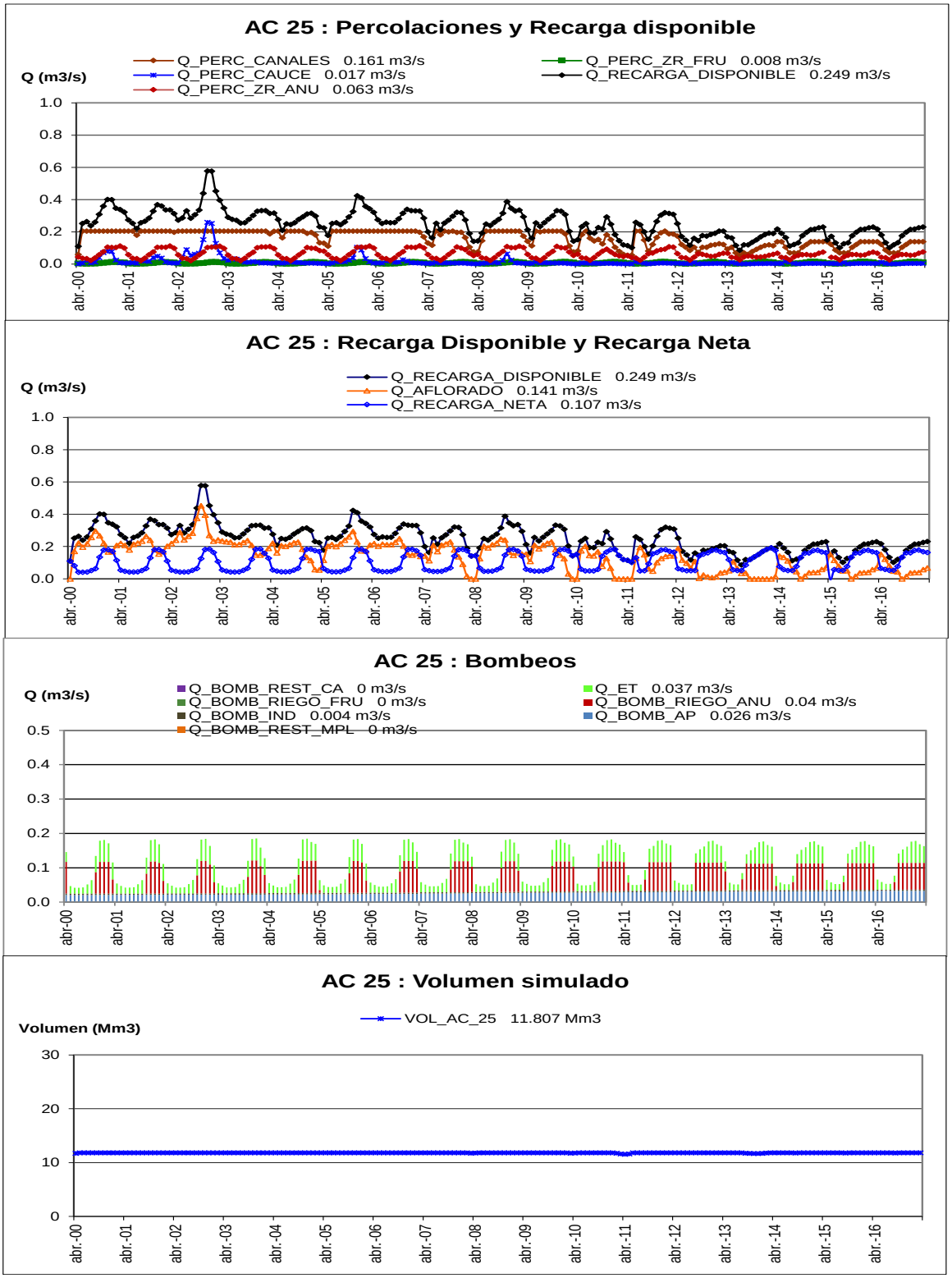
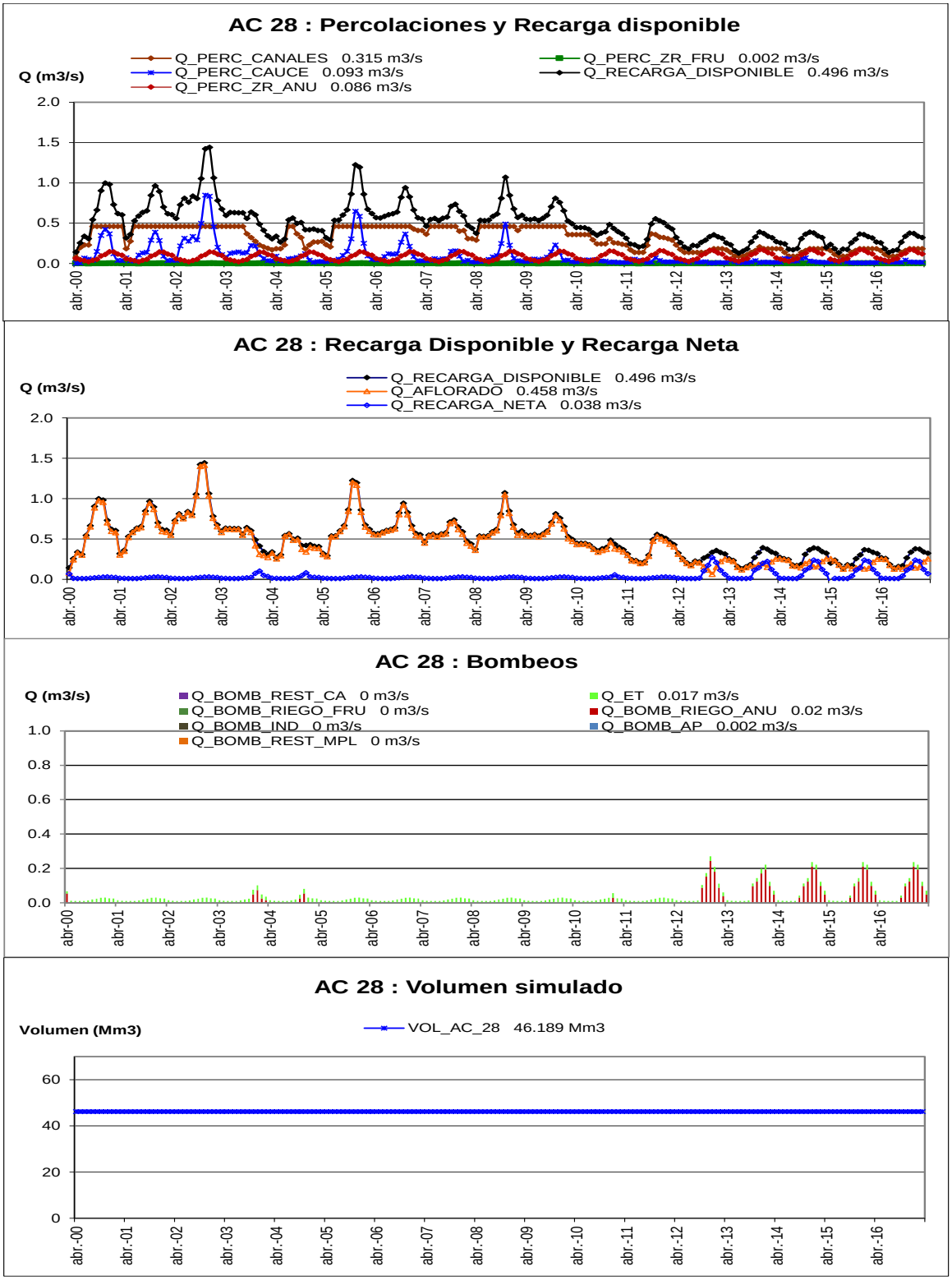


Figura 10.42
Acuífero Choapa Bajo



10.3.4 Resultados globales del escenario Calibración y Futuro Base 1

Las Tablas a continuación muestran el promedio de cada variable en un período específico. En primer lugar, se presentan los promedios del período de calibración 1999-2014, y luego, los del período extendido de tres años de sequía, 2014-2017. A partir de 2012, la ZR-21 queda inoperativa, pues constituye el área de inundación del embalse El Bato.

Tabla 10.15
Promedios de variables asociadas a zonas de riego – Calibración

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.048	0.086	0.082	0.000	0.003	0.085	0.045	0.029	0.010	97
ZR_02	360.5	0.099	0.175	0.154	0.000	0.006	0.160	0.088	0.054	0.018	93
ZR_03	562.2	0.154	0.268	0.211	0.000	0.009	0.220	0.124	0.072	0.024	87
ZR_04	585.4	0.160	0.281	0.256	0.000	0.010	0.266	0.147	0.089	0.030	95
ZR_050	820.2	0.224	0.386	0.341	0.000	0.019	0.360	0.201	0.119	0.040	93
ZR_051	449.6	0.109	0.150	0.142	0.000	0.010	0.152	0.105	0.035	0.012	97
ZR_052	86.0	0.024	0.042	0.034	0.000	0.002	0.036	0.020	0.012	0.004	90
ZR_06	337.4	0.089	0.145	0.134	0.000	0.008	0.142	0.084	0.044	0.015	96
ZR_07	206.0	0.056	0.097	0.095	0.000	0.005	0.100	0.055	0.033	0.011	98
ZR_08	1470.5	0.388	0.556	0.485	0.004	0.025	0.514	0.351	0.122	0.041	93
ZR_09	16.9	0.005	0.008	0.008	0.000	0.000	0.008	0.005	0.003	0.001	99
ZR_10	430.8	0.118	0.213	0.172	0.000	0.007	0.179	0.097	0.062	0.021	89
ZR_11	148.8	0.043	0.078	0.053	0.000	0.002	0.055	0.031	0.018	0.006	80
ZR_12	410.0	0.121	0.223	0.178	0.000	0.005	0.183	0.098	0.064	0.021	87
ZR_13	871.6	0.259	0.477	0.395	0.007	0.015	0.417	0.220	0.196	0.000	90
ZR_14	1259.3	0.295	0.513	0.436	0.000	0.022	0.458	0.255	0.152	0.051	91
ZR_15	911.8	0.212	0.357	0.297	0.000	0.016	0.313	0.181	0.099	0.033	90
ZR_16	1488.7	0.348	0.595	0.503	0.000	0.012	0.515	0.301	0.161	0.054	90
ZR_17	2144.0	0.500	0.728	0.601	0.002	0.018	0.621	0.435	0.140	0.047	89
ZR_18	203.6	0.063	0.124	0.071	0.000	0.001	0.072	0.037	0.000	0.035	70
ZR_19	124.0	0.038	0.072	0.064	0.000	0.001	0.065	0.034	0.023	0.008	93
ZR_20	167.2	0.049	0.093	0.088	0.000	0.001	0.089	0.047	0.000	0.042	97
ZR_21	62.7	0.014	0.028	0.022	0.000	0.000	0.022	0.012	0.008	0.003	91
ZR_22	180.0	0.043	0.079	0.074	0.000	0.001	0.075	0.041	0.026	0.009	96
ZR_23	480.0	0.114	0.200	0.185	0.000	0.004	0.189	0.106	0.062	0.021	95
ZR_24	1106.8	0.263	0.454	0.393	0.000	0.010	0.403	0.232	0.129	0.043	91
ZR_25	785.1	0.186	0.296	0.218	0.039	0.007	0.264	0.166	0.073	0.024	92
ZR_26	101.4	0.024	0.045	0.042	0.003	0.001	0.046	0.024	0.016	0.005	100
ZR_27	241.1	0.059	0.112	0.105	0.001	0.002	0.108	0.056	0.039	0.013	97
ZR_28	606.3	0.144	0.255	0.245	0.011	0.004	0.260	0.144	0.087	0.029	100
TOTAL	**16791**	**4.249**	**7.136**	**6.084**	**0.067**	**0.226**	**6.377**	**3.742**	**1.967**	**0.671**	**91.6**

Tabla 10.16
Promedios de variables asociadas a zonas de riego – Extensión Futuro Base 1

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.071	0.000	0.003	0.074	0.040	0.025	0.008	84
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.107	0.000	0.006	0.113	0.065	0.036	0.012	70
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.141	0.000	0.010	0.151	0.090	0.046	0.015	65
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.194	0.000	0.011	0.205	0.117	0.066	0.022	75
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.235	0.001	0.021	0.257	0.150	0.080	0.027	72
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.126	0.001	0.011	0.138	0.101	0.028	0.009	86
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.022	0.000	0.002	0.024	0.014	0.008	0.003	66
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.106	0.002	0.009	0.117	0.071	0.033	0.011	80
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.089	0.000	0.005	0.094	0.053	0.031	0.010	89
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.310	0.022	0.028	0.360	0.274	0.065	0.022	71
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.009	0.000	0.000	0.009	0.005	0.003	0.001	97
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.106	0.000	0.008	0.114	0.065	0.038	0.013	63
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.027	0.000	0.002	0.029	0.018	0.009	0.003	46
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.099	0.000	0.006	0.105	0.058	0.035	0.012	55
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.244	0.016	0.017	0.277	0.150	0.127	0.000	65
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.284	0.000	0.024	0.308	0.180	0.096	0.032	68
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.207	0.001	0.017	0.225	0.139	0.065	0.022	69
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.329	0.000	0.014	0.343	0.216	0.096	0.032	63
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.391	0.008	0.020	0.419	0.336	0.063	0.021	63
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.031	0.000	0.001	0.032	0.017	0.000	0.015	31
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.046	0.000	0.001	0.047	0.024	0.017	0.006	67
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.070	0.000	0.001	0.071	0.038	0.000	0.033	77
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.056	0.000	0.001	0.057	0.031	0.019	0.006	74
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.151	0.000	0.005	0.156	0.090	0.049	0.016	78
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.288	0.000	0.011	0.299	0.181	0.089	0.030	69
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.188	0.048	0.008	0.244	0.159	0.063	0.021	82
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.049	0.002	0.001	0.052	0.027	0.018	0.006	100
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.086	0.006	0.002	0.094	0.049	0.034	0.011	82
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.220	0.065	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**4.282**	**0.172**	**0.250**	**4.704**	**2.919**	**1.336**	**0.451**	**70.9**

Tabla 10.17
Promedios de variables asociadas a canales – Calibración

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	132
CA_01	0.278	0.278	0.083	0.081	0.114	100	100	365	0.481	385
CA_02	0.079	0.076	0.027	0.046	0.002	96	96	104	0.400	192
CA_03	0.160	0.152	0.047	0.068	0.036	95	95	211	0.405	69
CA_04	0.267	0.196	0.064	0.099	0.033	79	95	350	0.240	310
CA_05	0.229	0.216	0.080	0.108	0.029	95	95	300	0.930	133
CA_06	0.229	0.215	0.071	0.077	0.068	95	95	300	0.400	150
CA_07	0.175	0.135	0.034	0.058	0.043	77	77	230	0.345	484
CA_08	0.129	0.079	0.027	0.052	0.000	68	68	169	0.820	133
CA_09	0.069	0.050	0.011	0.038	0.000	76	76	90	0.120	233
CA_10	0.837	0.786	0.228	0.343	0.216	95	95	1100	2.560	127
CA_11	1.194	1.122	0.420	0.493	0.209	95	95	1574	2.000	231
CA_120	0.198	0.186	0.053	0.095	0.038	95	95	260	0.600	528
CA_121	0.305	0.286	0.094	0.059	0.133	95	95	400	2.110	887
CA_13	0.094	0.089	0.034	0.034	0.021	95	95	124	1.100	173
CA_14	0.760	0.712	0.260	0.149	0.303	95	95	1000	1.730	100
CA_15	0.076	0.075	0.026	0.041	0.007	99	99	100	0.100	333
CA_16	0.457	0.428	0.167	0.033	0.228	95	95	600	2.000	120
CA_17	0.379	0.357	0.120	0.142	0.095	95	95	500	0.600	208
CA_18	0.404	0.379	0.151	0.093	0.136	95	95	530	1.100	200
CA_19	0.095	0.092	0.030	0.059	0.004	97	97	125	0.250	83
CA_20	0.302	0.256	0.082	0.161	0.013	88	96	397	0.330	127
CA_21	2.286	2.147	0.971	0.779	0.397	95	95	3000	3.800	1661
CA_22	0.059	0.044	0.016	0.027	0.002	-	75	59	0.980	160
CA_23	0.206	0.145	0.051	0.086	0.008	-	70	300	0.480	241
CA_24	0.469	0.328	0.098	0.119	0.111	-	70	353	0.850	127
CA_25	0.929	0.641	0.218	0.308	0.114	-	69	1052	1.337	272
CA_26	0.434	0.408	0.143	0.172	0.093	95	95	570	1.550	220
CA_27	0.381	0.358	0.126	0.191	0.041	95	95	500	1.100	238
CA_28	0.610	0.572	0.208	0.317	0.047	95	95	800	1.900	320
CA_29	0.107	0.071	0.018	0.026	0.027	70	70	150	0.480	222
CA_30	0.350	0.350	0.108	0.134	0.108	100	100	460	1.020	334
CA_31	0.495	0.494	0.198	0.090	0.206	100	99	650	2.170	271
CA_32	0.087	0.081	0.000	0.071	0.010	-	93	96	0.261	1221
CA_33	0.181	0.150	0.042	0.064	0.045	-	84	201	2.449	236
CA_34	0.035	0.029	0.004	0.004	0.021	-	83	39	0.092	244
CA_35	0.201	0.194	0.000	0.087	0.106	-	97	222	0.540	347
CA_36	0.059	0.052	0.018	0.022	0.012	-	88	66	0.228	172
CA_37	0.102	0.092	0.029	0.052	0.010	-	90	113	0.195	88
CA_38	0.228	0.189	0.069	0.077	0.043	-	84	283	0.250	147
CA_39	0.339	0.271	0.078	0.112	0.080	-	81	375	0.550	104
CA_40	0.851	0.677	0.251	0.319	0.107	-	81	940	0.980	579
CA_41	0.738	0.583	0.216	0.091	0.276	-	80	815	4.724	55
CA_42	0.304	0.274	0.107	0.141	0.026	-	90	589	0.322	66
CA_43	0.334	0.295	0.104	0.094	0.097	-	88	543	0.360	6667
CA_44	0.007	0.007	0.002	0.001	0.005	-	100	8	0.500	286
CA_45	0.334	0.334	0.110	0.105	0.119	100	100	439	1.255	164
CA_46	0.949	0.948	0.351	0.245	0.352	100	100	1246	2.038	-
CA_47	0.000	0.176	0.000	0.000	0.176	-	96	-	3.500	
TOTAL		**16.071**	**5.643**	**6.063**	**4.365**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.18
Promedios de variables asociadas a canales – Extensión Futuro Base 1

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	
CA_01	0.118	0.118	0.035	0.068	0.015	100	100	365	0.481	132
CA_02	0.034	0.034	0.011	0.022	0.000	100	100	104	0.400	385
CA_03	0.068	0.068	0.021	0.045	0.002	100	100	211	0.405	192
CA_04	0.113	0.113	0.034	0.076	0.003	100	100	350	0.240	69
CA_05	0.097	0.096	0.033	0.062	0.001	99	99	300	0.930	310
CA_06	0.097	0.097	0.031	0.056	0.010	100	100	300	0.400	133
CA_07	0.074	0.059	0.015	0.036	0.009	83	83	230	0.345	150
CA_08	0.055	0.054	0.018	0.036	0.000	99	99	169	0.820	484
CA_09	0.029	0.029	0.006	0.023	0.000	99	99	90	0.120	133
CA_10	0.350	0.348	0.095	0.223	0.030	99	99	1100	2.560	233
CA_11	0.488	0.484	0.156	0.315	0.013	99	99	1574	2.000	127
CA_120	0.083	0.082	0.021	0.056	0.005	100	100	260	0.600	231
CA_121	0.129	0.128	0.042	0.058	0.027	99	99	400	2.110	528
CA_13	0.040	0.040	0.015	0.022	0.003	99	99	124	1.100	887
CA_14	0.315	0.310	0.104	0.157	0.049	99	99	1000	1.730	173
CA_15	0.032	0.032	0.011	0.020	0.001	100	100	100	0.100	100
CA_16	0.194	0.191	0.075	0.073	0.043	99	99	600	2.000	333
CA_17	0.155	0.153	0.043	0.103	0.007	99	99	500	0.600	120
CA_18	0.171	0.170	0.068	0.091	0.011	99	99	530	1.100	208
CA_19	0.040	0.040	0.013	0.027	0.000	99	99	125	0.250	200
CA_20	0.126	0.124	0.036	0.089	0.000	99	99	397	0.330	83
CA_21	0.971	0.956	0.397	0.539	0.020	99	99	3000	3.800	127
CA_22	0.019	0.017	0.006	0.011	0.000	-	90	59	0.980	1661
CA_23	0.067	0.054	0.017	0.036	0.000	-	84	300	0.480	160
CA_24	0.152	0.124	0.037	0.079	0.007	-	85	353	0.850	241
CA_25	0.301	0.237	0.081	0.153	0.003	-	83	1052	1.337	127
CA_26	0.184	0.182	0.064	0.112	0.006	99	99	570	1.550	272
CA_27	0.162	0.160	0.052	0.106	0.001	99	99	500	1.100	220
CA_28	0.259	0.255	0.083	0.171	0.000	99	99	800	1.900	238
CA_29	0.045	0.043	0.011	0.030	0.002	95	95	150	0.480	320
CA_30	0.149	0.149	0.046	0.098	0.005	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.210	0.210	0.084	0.104	0.022	100	100	650	2.170	334
CA_32	0.031	0.031	0.000	0.031	0.000	-	100	96	0.261	271
CA_33	0.065	0.065	0.018	0.044	0.002	-	100	201	2.449	1221
CA_34	0.013	0.013	0.002	0.008	0.003	-	100	39	0.092	236
CA_35	0.072	0.071	0.000	0.064	0.007	-	99	222	0.540	244
CA_36	0.021	0.021	0.007	0.000	0.014	-	100	66	0.228	347
CA_37	0.037	0.037	0.012	0.025	0.000	-	100	113	0.195	172
CA_38	0.092	0.092	0.029	0.058	0.005	-	100	283	0.250	88
CA_39	0.121	0.121	0.035	0.082	0.004	-	100	375	0.550	147
CA_40	0.304	0.304	0.106	0.198	0.000	-	100	940	0.980	104
CA_41	0.264	0.264	0.098	0.132	0.034	-	100	815	4.724	579
CA_42	0.191	0.191	0.074	0.113	0.003	-	100	589	0.322	55
CA_43	0.176	0.176	0.059	0.091	0.025	-	100	543	0.360	66
CA_44	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.142	0.142	0.047	0.086	0.009	100	100	439	1.255	286
CA_46	0.403	0.403	0.149	0.220	0.034	100	100	1246	2.038	164
CA_47	0.000	0.666	0.000	0.000	0.666	-	96	-	3.500	-
TOTAL		**7.755**	**2.400**	**4.253**	**1.102**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.19
Promedios de variables asociadas a acuíferos - Calibración

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.099	0.083	0.030	0.211	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.131	0.088	0.054	0.272	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_03	12.7	0.159	0.084	0.071	0.182	0.133	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.000	-
AC_04	23.7	0.293	0.086	0.089	0.467	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_050	22.4	0.225	0.076	0.119	0.392	0.027	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.024
AC_051	21.1	0.306	0.075	0.036	0.407	0.010	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.009
AC_052	7.7	0.034	0.073	0.012	0.118	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.101	0.002	0.044	0.138	0.009	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.149	0.077	0.033	0.253	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_08	17.5	0.329	0.077	0.122	0.462	0.066	0.005	0.004	0.037	0.000	0.000	0.000	0.021
AC_09	8.4	0.077	0.080	0.003	0.141	0.018	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
AC_10	8.3	0.143	0.081	0.062	0.275	0.011	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	-
AC_11	0.2	0.047	0.010	0.018	0.049	0.027	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_12	15.1	0.117	0.006	0.064	0.165	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.248	0.009	0.196	0.416	0.037	0.027	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_14	25.7	0.381	0.062	0.152	0.910	0.023	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_15	36.0	0.495	0.002	0.099	0.576	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_16	33.0	0.506	0.076	0.161	0.695	0.048	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.425	0.078	0.140	0.604	0.038	0.035	0.002	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.046	0.020	0.023	0.075	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.021	0.023	0.009	0.048	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.071	0.024	0.026	0.101	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.248	0.016	0.062	0.310	0.016	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.325	0.018	0.128	0.433	0.038	0.012	0.000	0.025	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.172	0.019	0.073	0.158	0.105	0.037	0.039	0.025	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.041	0.017	0.016	0.069	0.005	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.110	0.106	0.039	0.247	0.008	0.005	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.351	0.108	0.086	0.516	0.029	0.017	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	-
TOTAL	**404.7**	**5.650**	**1.476**	**1.967**	**8.690**	**0.736**	**0.361**	**0.067**	**0.112**	**0.133**	**0.009**	**0.000**	**0.062**

Tabla 10.20
Promedios de variables asociadas a acuíferos – Extensión Futuro Base 1

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.042	0.030	0.025	0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.063	0.032	0.036	0.131	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_03	12.7	0.077	0.030	0.046	0.020	0.133	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.000	-
AC_04	23.7	0.127	0.030	0.066	0.222	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_050	22.4	0.091	0.026	0.080	0.050	0.146	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.142
AC_051	21.1	0.127	0.019	0.028	0.129	0.046	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.043
AC_052	7.7	0.015	0.018	0.008	0.040	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.036	0.001	0.034	0.060	0.011	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.053	0.019	0.032	0.098	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_08	17.5	0.137	0.020	0.065	0.043	0.180	0.005	0.022	0.048	0.000	0.000	0.000	0.104
AC_09	8.4	0.029	0.019	0.003	0.000	0.052	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
AC_10	8.3	0.061	0.025	0.038	0.111	0.012	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	-
AC_11	0.2	0.018	0.004	0.009	0.004	0.027	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_12	15.1	0.043	0.002	0.035	0.058	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.094	0.003	0.127	0.178	0.046	0.027	0.016	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_14	25.7	0.167	0.014	0.096	0.432	0.023	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_15	36.0	0.219	0.000	0.066	0.263	0.021	0.019	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_16	33.0	0.203	0.019	0.095	0.269	0.048	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.161	0.018	0.063	0.197	0.044	0.035	0.008	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.020	0.007	0.016	0.029	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.008	0.008	0.000	0.013	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.032	0.007	0.019	0.038	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.108	0.003	0.049	0.144	0.016	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.139	0.004	0.088	0.188	0.044	0.012	0.000	0.031	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.113	0.005	0.063	0.060	0.121	0.037	0.048	0.032	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.021	0.002	0.018	0.037	0.004	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.047	0.024	0.034	0.092	0.012	0.005	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.149	0.025	0.096	0.187	0.084	0.017	0.065	0.002	0.000	0.000	0.000	-
TOTAL	**404.7**	**2.400**	**0.414**	**1.335**	**3.191**	**1.138**	**0.361**	**0.172**	**0.136**	**0.133**	**0.009**	**0.000**	**0.324**

10.3.5 Comentario sobre escenarios de Calibración y Futuro Base 1

El escenario de Calibración muestra las condiciones promedio del período 2000-2014. En este período, los canales captaron un promedio de 16,1 m3/s, y entregaron a las zonas de riego 6,1 m3/s, lo que muestra la alta ineficiencia del sistema de conducción. La demanda en las zonas de riego fue de 7,1 m3/s, la que se trató de suplementar con pozos, los que aportaron 0,1 m3/s, debido a la baja cantidad de derechos disponibles. La devolución de canales al sistema superficial fue de 4,4 m3/s.

El caudal de devolución de los canales al sistema superficial, se estimó en 4,4 m3/s, mientras que el resto de la ineficiencia alimentaría los acuíferos.

Los acuíferos, por su parte, presentan afloramientos de 8,7 m3/s, una recarga neta de 0,7 m3/s y una extracción también de 0,7 m3/s. Esto muestra que están subexplotados.

El porcentaje de demanda suplida llega a 91,6% como promedio del período, lo que significa que aproximadamente un 85% del área estaría cubierta con alta seguridad de riego.

Las salidas al mar promedio del período, llegan a 10,6 m3/s.

El escenario futuro base 1 es un escenario que explora el comportamiento de la cuenca en una situación futura de sequía, bajo las condiciones y restricciones vigentes. Hidrológicamente, los años de sequía se caracterizaron de la misma forma en que se han presentado los últimos 3 años en la cuenca. En cuanto a la distribución del agua, a partir de 2014 en toda la cuenca se aplican desmarques de sequía.

En este escenario, los canales captan 7,8 m3/s, cifra en que se refleja claramente l sequía, y entregan a las zonas de riego 4,3 m3/s en promedio. La demanda de las zonas de riego ha crecido, y en la actualidad sería de 7,9 m3/s. El acuífero aporta 0,2 m3/s, mediante los derechos subterráneos actualmente constituidos.

Los canales devuelven al sistema superficial un caudal de 1,1 m3/s, y el resto a los acuíferos. En este escenario, los afloramientos han bajado a 3,2 m3/s, y la recarga neta ha subido a 1,1 m3/s, en conjunto con el total de extracciones, que también llega a 1,1 m3/s.

El porcentaje de demanda suplida en este escenario es de 70,9%.

Las salidas al mar bajan a 2,3 m3/s.

Al comparar ambos períodos, se puede observar que la demanda a nivel raíz del último período es la actual, y por ello, levemente superior al promedio histórico. También se puede observar cómo en el período de sequía bajan los caudales entregados a las zonas de riego por canales, suben los caudales solicitados a los pozos, bajan las percolaciones y derrames, y baja la demanda suplida.

En los acuíferos, por otra parte, se puede observar cómo se reducen todas las fuentes de recarga de los acuíferos, que son las percolaciones desde cauces, canales y zonas de riego, aumenta el bombeo de riego y de restitución de MLP, se reducen significativamente los afloramientos y aumenta la recarga neta, al hacerse espacio dentro de los acuíferos.

La inquietud de la Junta de Vigilancia del Choapa se refiere a la posibilidad de usar los acuíferos para llegar a suplir al 100% un desmarque de al menos 40% en verano y 20% en invierno. Para ello, se corrió el escenario Futuro Operación 1.

10.4 Escenario Futuro Operación 1: Uso de acuíferos para apoyar desmarques

10.4.1 Configuración del escenario

El objetivo de este escenario de operación futura es hacer una evaluación de lo que les ocurriría a los acuíferos, y al sistema hídrico en general, si se recurriera al agua subterránea para llegar a un desmarque mínimo deseado como el que se muestra en la Tabla 10.21 adjunta, en los valles de Choapa, Chalinga e Illapel, en los años futuros de sequía.

Tabla 10.21
Desmarque mínimo deseado Choapa, Chalinga, Illapel

Mes	% desmarque mínimo deseado
abril	0.4
mayo	0.35
junio	0.25
julio	0.2
agosto	0.2
septiembre	0.2
octubre	0.3
noviembre	0.35
diciembre	0.4
enero	0.4
Febrero	0.4
marzo	0.4

Para la evaluación de este escenario, se han colocado pozos de riego en todos los acuíferos.

Al respecto cabe señalar que se trabaja con valores de volúmenes y capacidades de acuíferos, revisados y ajustados de acuerdo con los nuevos resultados obtenidos en el estudio hidrogeológico que está realizando en la actualidad la CORFO con la empresa Hidrogestión, para la cuenca del Choapa.

Este escenario se configuró sobre el escenario Futuro Base 1, con el siguiente cambio:

- Entrega desde los acuíferos hacia los canales de riego del mismo sector, en apoyo a lograr los desmarques deseados. Sólo el canal Buzeta no se alimenta desde su propio sector, sino que desde el acuífero El Tambo.

10.4.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación1_Calib_SUP

Los caudales superficiales en los puntos de control, que se muestran en esta planilla, no presentan cambios en relación con los caudales del escenario FuturoBase1 que le sirve de base. Los embalses se comportan muy similares, también el régimen en las estaciones fluviométricas de control prácticamente no cambia. Se comienza a percibir que el régimen de desmarques de 40% - 20% está bastante bien suplido en el escenario Futuro Base 1, sin uso adicional de acuíferos.

Figura 10.43
Embalse Corrales

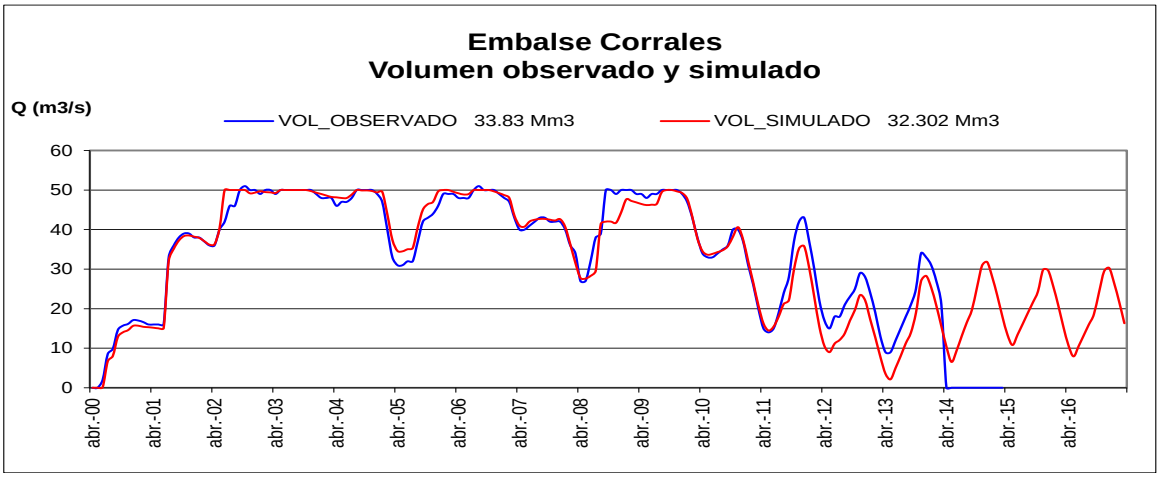


Figura 10.44
Embalse El Bato

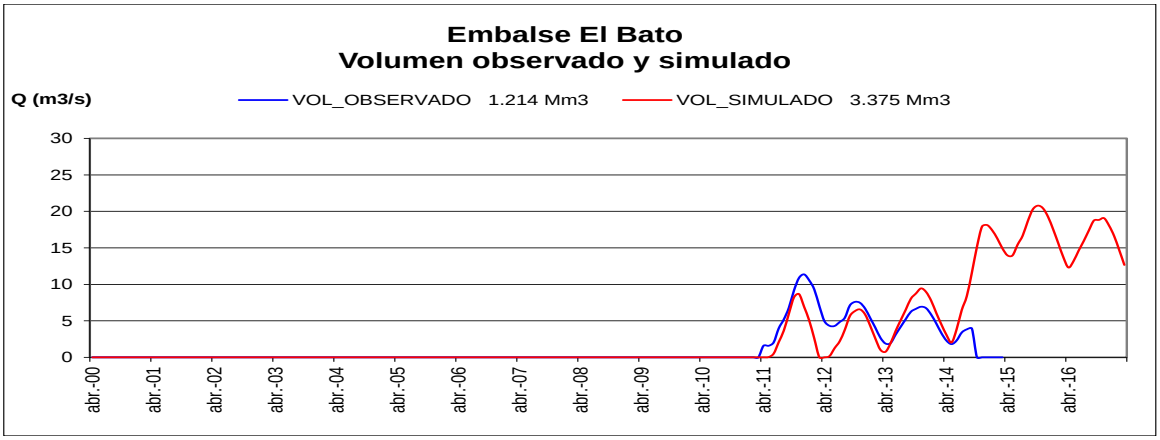
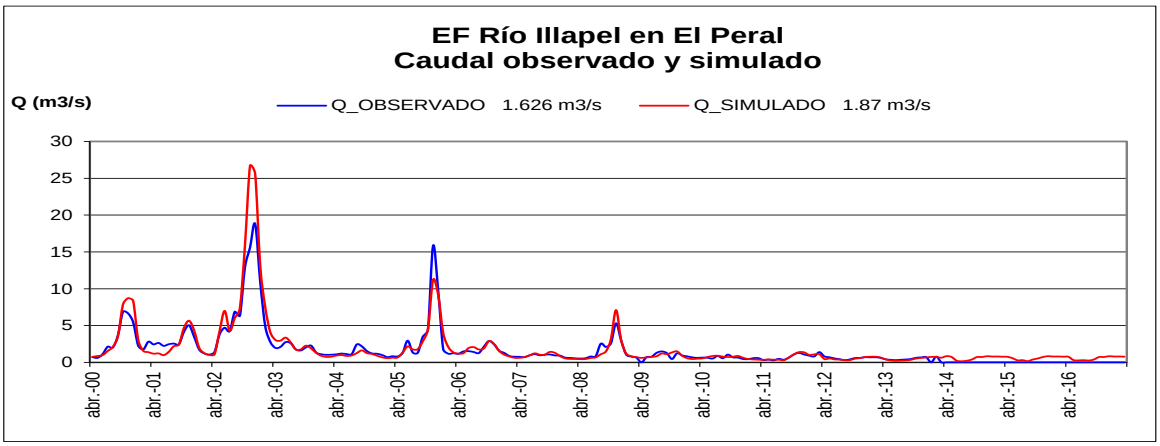


Figura 10.45
Río Illapel en El Peral



b) Planilla FuturoOperación1_Calib_SUB

Esta planilla muestra el resultado de niveles de cada uno de los acuíferos modelados. A comparar con los niveles observados en el escenario Futuro Base 1, no hay cambios sustanciales en los acuíferos del Choapa, los cuales permanecen todos en condiciones similares a la última sequía. Ver Figuras 10.46 y 10.47 adjuntas.

Figura 10.46
Acuífero Panguecillo

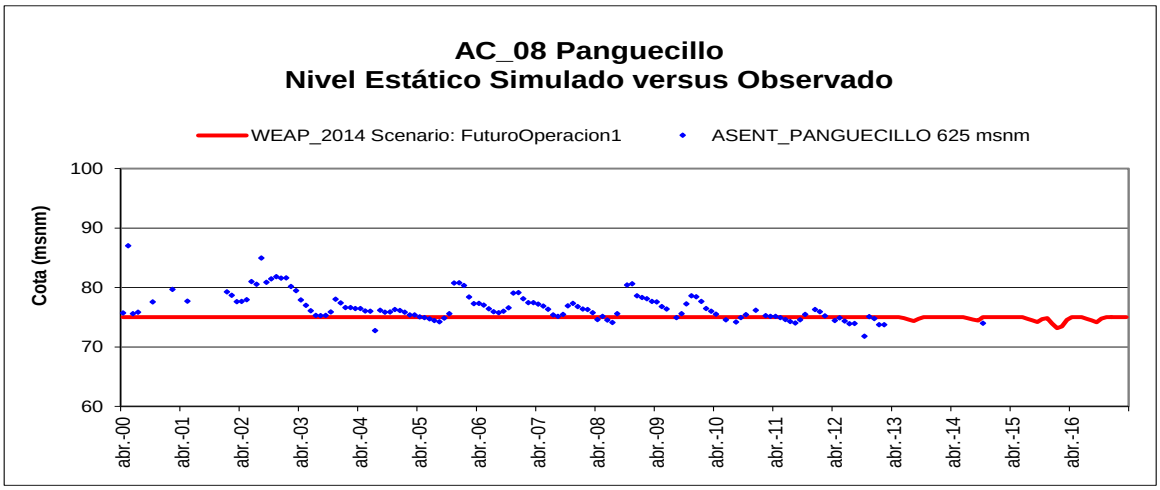
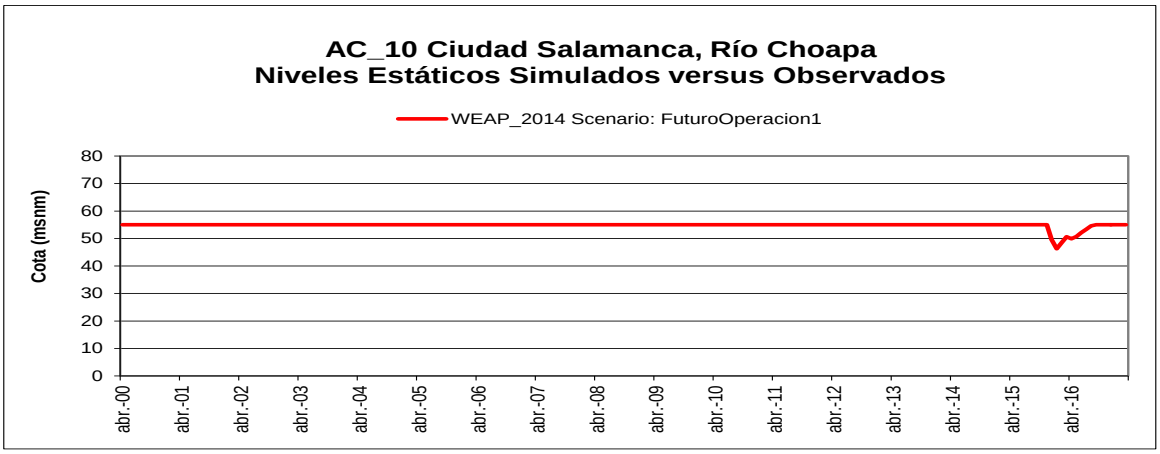
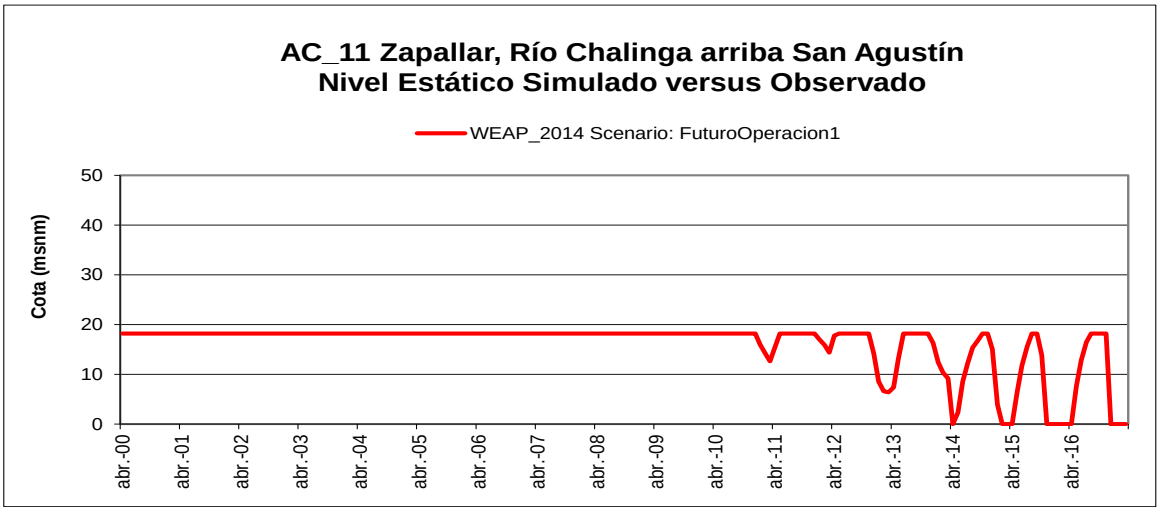


Figura 10.47
Acuífero Salamanca



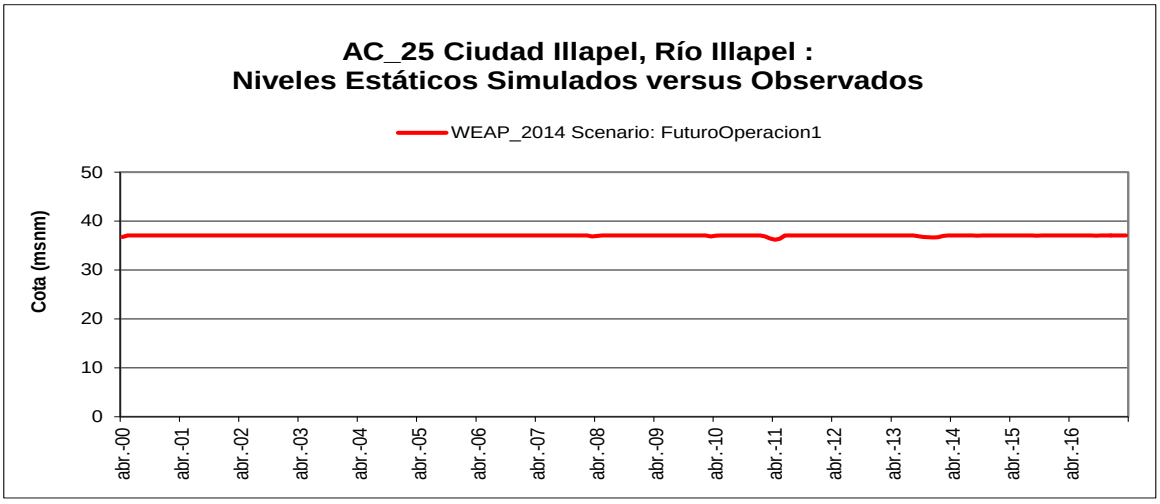
En el río Chalinga, el acuífero de cabecera AC-11, que es vulnerable al ser muy dependiente de la hidrología, colapsa con el aumento de explotación en este período de sequía. Los acuíferos del Chalinga aguas abajo de San Agustín, sin embargo, toleran bien el aumento de explotación, mostrando sólo efectos muy menores hacia el final del período. Ver Figura 10.48.

Figura 10.48
Acuífero Chalinga Cabecera



En el río Illapel, se observa que ningún acuífero muestra un efecto de explotación, en el período adicional. Ver Figura 10.49.

Figura 10.49
Acuífero Illapel



En el sector del Choapa Bajo, no se observa ningún efecto de descenso adicional.

El análisis muestra que para suplir un desmarque mínimo de estiaje de 40%, no es necesario, o sólo muy marginalmente, “enrolar” los acuíferos.

Como acuíferos que no debieran ser utilizados, solamente se identifica el de la cabecera del río Chalinga.

Esto muestra que en una medida razonable, en épocas de sequía, en todos los valles, se podrían usar los acuíferos para suplir las demandas mínimas de desmarque de un 40%,

solamente teniendo presente que hay algunos puntos donde los acuíferos son muy pequeños, o de gran variabilidad, como los de cabecera, que no pueden ser más explotados que lo que son en la actualidad. Sin embargo, la gran mayoría de ellos permite un aumento de explotación, lo que significa que las sequías superficiales pueden ser fuertemente mitigadas con el aporte subterráneo.

c) Planilla FuturoOperación1_Balance_AC

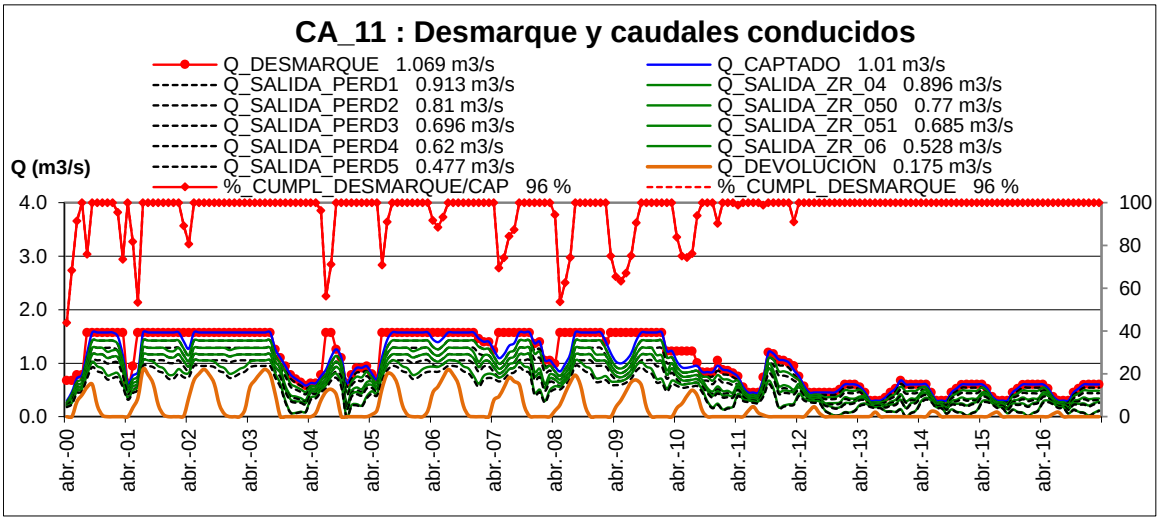
En esta planilla se observa lo mismo que en la planilla de niveles Calib_SUB, pero expresado en volúmenes. En la Tabla 10.25 de promedios, se puede comparar los valores con los valores del escenario Futuro Base 1, y apreciar que el caudal que aportan los acuíferos en esta situación, es reducido, de 157 l/s, de los cuales 60 l/s se usan en el acuífero de Chalinga Bajo, 27 l/s en el acuífero de Salamanca, y el resto distribuido desde los demás acuíferos. Hay muchos acuíferos que no son solicitados en este escenario.

d) Planilla FuturoOperación1_Balance_CA

En todos los casos de canales se puede apreciar que al controlar los desmarques (ciñéndose a los de la Tabla 10.21), y apoyar los canales desde los acuíferos, éstos se cubren al 100%. Esto ocurre en los canales del Choapa, Quelén, Chalinga, y también en los del Illapel. Solamente en el afluente Tencadán no es posible cumplir el desmarque de 40%, con seguridad, y en un canal local del río Chalinga.

En las Figuras a continuación, se presenta un ejemplo de canal del río Choapa, donde se aprecia que el canal en la sequía de 2011-2014, con un desmarque de sequía de entre 20% y 40%, podía captar el 100% de su desmarque.

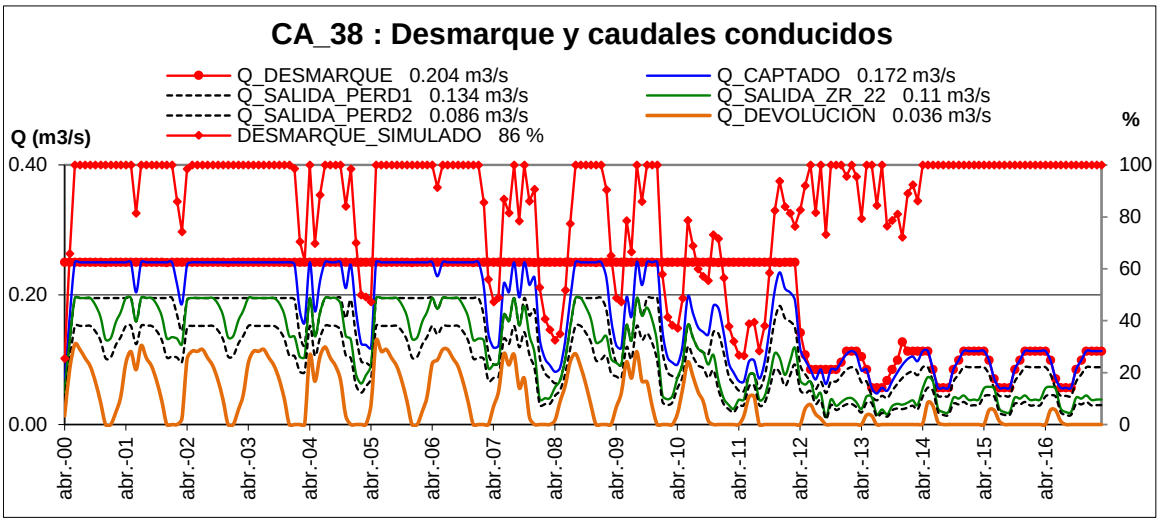
Figura 10.50
Canal Silvano



En el caso del canal Turbina de Illapel, se observa que en el período 2000-2012, en que se solicitaba un desmarque de 1, la cobertura de estiaje era muy variable. Al reducir el

desmarque, desde la entrada del embalse El Bato, disminuye la demanda del canal y esta nueva demanda se puede cubrir mucho mejor, hasta en un 100%, a partir de 2014, con apoyo de los pozos. El análisis de las zonas de riego muestra que la nueva política de entrega, de suplir los tiempos escasos con los pozos desde los acuíferos, es muy beneficiosa para aumentar el porcentaje de demanda suplida.

Figura 10.51
Canal Turbina



e) Planilla FuturoOperación1_Balance_ZR

En esta planilla se pueden ver los resultados de esta forma de operar el sistema, sobre las zonas de riego. En la Tabla 10.22 adjunta se presentan los resultados de porcentaje de demanda suplida para el escenario Futuro Base 1 y el de Operación 1, solamente para el período de sequía 2014-2017. Cabe recordar que en este período, todos los ríos operan con desmarque de sequía, según Tabla 10.21, entre 20% y 40%. Se puede apreciar que toda la cuenca se ve favorecida.

Tabla 10.22
Comparación de porcentaje de demanda suplida
entre escenarios Futuro Base 1 y Futuro Operación 1

Sector	Zona de Riego	Futuro Base 1	Futuro Operación 1	Diferencia
		2014-2017	2014-2017	2014-2017
		% DS	%DS	%DS
Choapa Alto	ZR_01	84	84	0
	ZR_02	70	70	0
	ZR_03	65	65	0
	ZR_04	75	75	0
	ZR_050	72	72	0
	ZR_051	86	86	0
	ZR_052	66	66	0
Quelén	ZR_06	80	81	1
Choapa Alto	ZR_07	89	90	1
	ZR_08	71	71	0
	ZR_09	97	97	0
	ZR_10	63	63	0
Chalinga	ZR_11	46	51	5
	ZR_12	55	58	3
	ZR_13	65	71	6
Choapa Medio	ZR_14	68	68	0
	ZR_15	69	70	0
	ZR_16	63	64	0
	ZR_17	63	63	1
Est.Carén	ZR_18	31	31	0
Illapel	ZR_19	67	67	0
	ZR_20	77	77	0
	ZR_21			
	ZR_22	74	74	0
	ZR_23	78	78	0
	ZR_24	69	69	0
	ZR_25	82	82	0
	ZR_26	100	100	0
Choapa Bajo	ZR_27	82	82	0
	ZR_28	100	100	0
TOTAL		**70.9**	**71.6**	0.7

Esta tabla muestra que en una sequía como la actual, y controlando los desmarques como lo hace la Junta de Vigilancia del río Choapa en la actualidad, el desmarque mínimo deseado de la Tabla 10.21 se logra prácticamente sin la intervención de los pozos. Hay muy pocos sectores donde son requeridos los pozos. En la mayoría de los sectores, el desmarque mínimo se obtiene con el agua superficial. El porcentaje de demanda suplida de 70,3% sin pozos, aumenta insignificantemente a 70,9% con la habilitación de los pozos.

10.4.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 1

En las tablas que siguen, se presentan los resultados del escenario, para el período de extensión 2014-2017.

Tabla 10.23
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.071	0.000	0.003	0.074	0.040	0.025	0.008	84
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.107	0.000	0.006	0.113	0.065	0.036	0.012	70
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.142	0.000	0.010	0.152	0.090	0.046	0.015	65
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.195	0.000	0.011	0.206	0.117	0.066	0.022	75
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.236	0.000	0.021	0.257	0.150	0.080	0.027	72
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.128	0.000	0.011	0.139	0.101	0.028	0.009	86
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.022	0.000	0.002	0.024	0.014	0.008	0.003	66
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.109	0.002	0.009	0.120	0.073	0.034	0.011	81
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.091	0.000	0.005	0.096	0.053	0.032	0.011	90
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.313	0.022	0.028	0.363	0.276	0.066	0.022	71
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.009	0.000	0.000	0.009	0.005	0.003	0.001	97
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.107	0.000	0.008	0.115	0.065	0.038	0.013	63
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.032	0.000	0.002	0.034	0.020	0.010	0.003	51
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.110	0.000	0.006	0.116	0.064	0.039	0.013	58
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.285	0.015	0.017	0.317	0.170	0.146	0.000	71
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.288	0.000	0.024	0.312	0.182	0.097	0.032	68
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.211	0.000	0.017	0.228	0.140	0.066	0.022	70
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.332	0.000	0.014	0.346	0.217	0.096	0.032	64
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.398	0.009	0.020	0.427	0.342	0.064	0.021	63
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.031	0.000	0.001	0.032	0.017	0.000	0.015	31
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.046	0.000	0.001	0.047	0.024	0.017	0.006	67
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.070	0.000	0.001	0.071	0.038	0.000	0.033	77
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.056	0.000	0.001	0.057	0.031	0.019	0.006	74
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.151	0.000	0.005	0.156	0.090	0.049	0.016	78
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.288	0.000	0.011	0.299	0.181	0.089	0.030	69
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.188	0.048	0.008	0.244	0.159	0.063	0.021	82
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.049	0.002	0.001	0.052	0.027	0.018	0.006	100
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.086	0.006	0.002	0.094	0.049	0.034	0.011	82
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.220	0.065	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**4.371**	**0.169**	**0.250**	**4.790**	**2.961**	**1.366**	**0.453**	**71.6**

Tabla 10.24
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	
CA_01	0.118	0.118	0.035	0.068	0.015	100	100	365	0.481	132
CA_02	0.034	0.034	0.011	0.022	0.000	100	100	104	0.400	385
CA_03	0.068	0.068	0.021	0.045	0.002	100	100	211	0.405	192
CA_04	0.113	0.113	0.034	0.077	0.003	100	100	350	0.240	69
CA_05	0.097	0.097	0.034	0.063	0.001	100	100	300	0.930	310
CA_06	0.097	0.097	0.031	0.056	0.010	100	100	300	0.400	133
CA_07	0.074	0.059	0.015	0.036	0.009	83	83	230	0.345	150
CA_08	0.055	0.054	0.018	0.036	0.000	99	99	169	0.820	484
CA_09	0.029	0.029	0.006	0.023	0.000	100	100	90	0.120	133
CA_10	0.350	0.350	0.096	0.225	0.030	100	100	1100	2.560	233
CA_11	0.488	0.488	0.157	0.318	0.013	100	100	1574	2.000	127
CA_120	0.083	0.083	0.021	0.056	0.005	100	100	260	0.600	231
CA_121	0.129	0.129	0.043	0.059	0.027	100	100	400	2.110	528
CA_13	0.040	0.040	0.015	0.022	0.003	100	100	124	1.100	887
CA_14	0.315	0.315	0.106	0.159	0.050	100	100	1000	1.730	173
CA_15	0.032	0.032	0.011	0.020	0.001	100	100	100	0.100	100
CA_16	0.194	0.194	0.076	0.075	0.044	100	100	600	2.000	333
CA_17	0.155	0.155	0.044	0.105	0.007	100	100	500	0.600	120
CA_18	0.171	0.172	0.069	0.090	0.013	100	100	530	1.100	208
CA_19	0.040	0.040	0.013	0.028	0.000	100	100	125	0.250	200
CA_20	0.126	0.126	0.036	0.090	0.000	100	100	397	0.330	83
CA_21	0.971	0.971	0.404	0.547	0.020	100	100	3000	3.800	127
CA_22	0.019	0.019	0.007	0.012	0.000	-	100	59	0.980	1661
CA_23	0.067	0.066	0.022	0.044	0.000	-	99	300	0.480	160
CA_24	0.152	0.133	0.040	0.085	0.008	-	90	353	0.850	241
CA_25	0.301	0.301	0.102	0.196	0.003	-	100	1052	1.337	127
CA_26	0.184	0.184	0.065	0.114	0.006	100	100	570	1.550	272
CA_27	0.162	0.162	0.053	0.107	0.001	100	100	500	1.100	220
CA_28	0.259	0.259	0.085	0.174	0.000	100	100	800	1.900	238
CA_29	0.045	0.045	0.011	0.032	0.002	100	100	150	0.480	320
CA_30	0.149	0.149	0.046	0.098	0.005	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.210	0.210	0.084	0.104	0.022	100	100	650	2.170	334
CA_32	0.031	0.031	0.000	0.031	0.000	-	100	96	0.261	271
CA_33	0.065	0.065	0.018	0.044	0.002	-	100	201	2.449	1221
CA_34	0.013	0.013	0.002	0.008	0.003	-	100	39	0.092	236
CA_35	0.072	0.071	0.000	0.064	0.007	-	99	222	0.540	244
CA_36	0.021	0.021	0.007	0.000	0.014	-	100	66	0.228	347
CA_37	0.037	0.037	0.012	0.025	0.000	-	100	113	0.195	172
CA_38	0.092	0.092	0.029	0.058	0.005	-	100	283	0.250	88
CA_39	0.121	0.121	0.035	0.082	0.004	-	100	375	0.550	147
CA_40	0.304	0.304	0.106	0.198	0.000	-	100	940	0.980	104
CA_41	0.264	0.264	0.098	0.132	0.034	-	100	815	4.724	579
CA_42	0.191	0.191	0.074	0.113	0.003	-	100	589	0.322	55
CA_43	0.176	0.176	0.059	0.091	0.025	-	100	543	0.360	66
CA_44	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.142	0.142	0.047	0.086	0.009	100	100	439	1.255	286
CA_46	0.403	0.403	0.149	0.220	0.034	100	100	1246	2.038	164
CA_47	0.000	0.672	0.000	0.000	0.672	-	97	-	3.500	-
TOTAL		**7.899**	**2.448**	**4.339**	**1.112**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.25
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	-
AC_01	0.1	0.042	0.030	0.025	0.098	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.063	0.032	0.036	0.128	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	-
AC_03	12.7	0.078	0.030	0.046	0.019	0.134	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.001	-
AC_04	23.7	0.128	0.030	0.066	0.213	0.011	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.010	0.142
AC_050	22.4	0.091	0.025	0.080	0.048	0.149	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.004	0.043
AC_051	21.1	0.129	0.019	0.028	0.125	0.051	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.007	-
AC_052	7.7	0.015	0.017	0.008	0.040	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.037	0.001	0.035	0.062	0.010	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.053	0.019	0.032	0.095	0.010	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.004	0.104
AC_08	17.5	0.139	0.020	0.066	0.038	0.186	0.005	0.022	0.048	0.000	0.000	0.007	0.035
AC_09	8.4	0.030	0.019	0.003	0.000	0.052	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-
AC_10	8.3	0.061	0.025	0.038	0.085	0.039	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.027	-
AC_11	0.2	0.021	0.004	0.010	0.001	0.035	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	-
AC_12	15.1	0.047	0.002	0.039	0.067	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.116	0.003	0.146	0.161	0.104	0.027	0.015	0.003	0.000	0.000	0.060	-
AC_14	25.7	0.169	0.014	0.097	0.410	0.033	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010	-
AC_15	36.0	0.223	0.000	0.066	0.267	0.023	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	-
AC_16	33.0	0.206	0.018	0.096	0.272	0.048	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.163	0.018	0.064	0.199	0.045	0.035	0.009	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.020	0.007	0.016	0.029	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.008	0.008	0.000	0.013	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.032	0.007	0.019	0.038	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.108	0.003	0.049	0.144	0.016	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.139	0.004	0.088	0.188	0.044	0.012	0.000	0.031	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.113	0.005	0.063	0.060	0.121	0.037	0.048	0.032	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.021	0.002	0.018	0.037	0.004	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.047	0.023	0.034	0.092	0.012	0.005	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.149	0.024	0.096	0.186	0.084	0.017	0.065	0.002	0.000	0.000	0.000	
TOTAL	**404.7**	**2.448**	**0.409**	**1.364**	**3.115**	**1.275**	**0.350**	**0.169**	**0.136**	**0.133**	**0.009**	**0.157**	**0.324**

10.4.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 1

En las tablas se aprecia que en este escenario, los canales captan un caudal de 7,9 m3/s, de los cuales 4,4 m3/s llegan a las zonas de riego. La demanda de las zonas de riego es 7,9 m3/s, pero la extracción desde el acuífero sólo busca suplir un desmarque de 40%, y no la demanda completa. Por ello, los aportes desde el acuífero sólo llegan a 0,3 m3/s, levemente más altos que en el escenario Futuro Base 1.

Las devoluciones de los canales se mantienen similares al escenario de base, en 1,1 m3/s, también los afloramientos desde los acuíferos, en 2,1 m3/s. La recarga neta sube levemente a 1,3 m3/s, como también las extracciones totales, a 1,3 m3/s.

Como resultado, el porcentaje de demanda suplida no aumenta sensiblemente, llegando sólo a 71,6%.

Las salidas al mar se mantienen en 2,3 m3/s.

Por lo tanto, se puede apreciar claramente que la medida de suplir desmarques de un mínimo deseado de 40% en verano y 20% en invierno, desde los acuíferos, alimentando directamente los canales, es una solución que no afecta sensiblemente los acuíferos, porque los caudales adicionales requeridos son muy pequeños, y por lo tanto es una solución viable para el sistema de demanda agrícola. De esta forma se podrían apoyar tres años más de sequía. De este modo, lo que se muestra aquí, es que el sistema hídrico de la cuenca del Choapa permitiría aplicar los desmarques deseados durante una sequía de tres años adicionales, sin consecuencias, acudiendo a los acuíferos.

10.5 Escenario Futuro Base 2

10.5.1 Configuración del escenario

Para analizar la situación de la cuenca del Choapa en una sequía más severa que la actual, se configuró otro escenario base, llamado Futuro Base 2, en el que se asumió tres años de sequía adicionales con aporte del 70% de la hidrología de los últimos 3 años.

Este escenario se estructuró directamente sobre el escenario Calib20_FuturoBase1, con los siguientes cambios:

- reducción del aporte de la hidrología al 70% en todas las subcuencas aportantes en los tres años de expansión.
- todos los ríos con el desmarque variando entre 40% en verano y 20% en invierno, según Tabla 10.30.

En lo que sigue, se presentan gráficamente los resultados de este escenario, en conjunto con el período de calibración.

10.5.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla Calib20_FuturoBase2_Calib_SUP

En el período histórico de calibración no cambia nada. Para el período futuro de 3 años adicionales, se aprecia que éstos aparecen más secos en todas las estadísticas. A modo de ejemplo, se presentan aquí las estadísticas de entrada de los ríos Choapa e Illapel, y el comportamiento de los embalses Corrales y El Bato, también con menos almacenamiento que en el escenario Futuro Base 1. En la planilla del Anexo Capítulo 10.5 se encuentra el conjunto completo de resultados.

Figura 10.52
Río Choapa en Salamanca

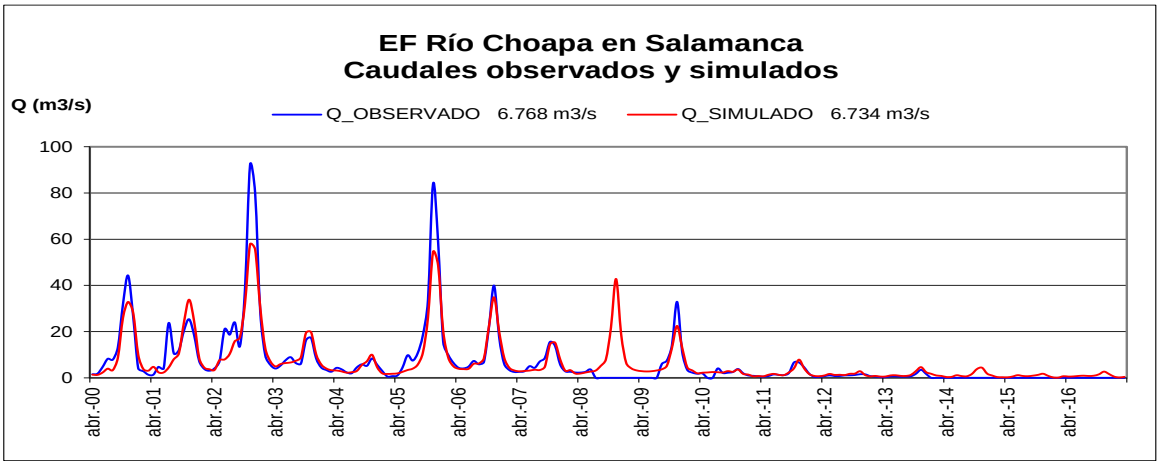


Figura 10.53
Río Illapel en Las Burras

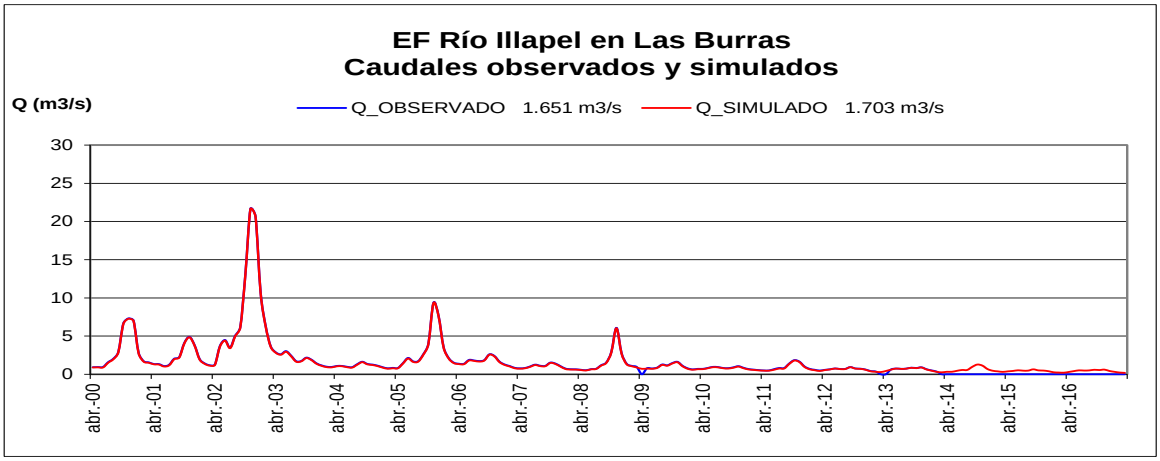


Figura 10.54
Embalse Corrales

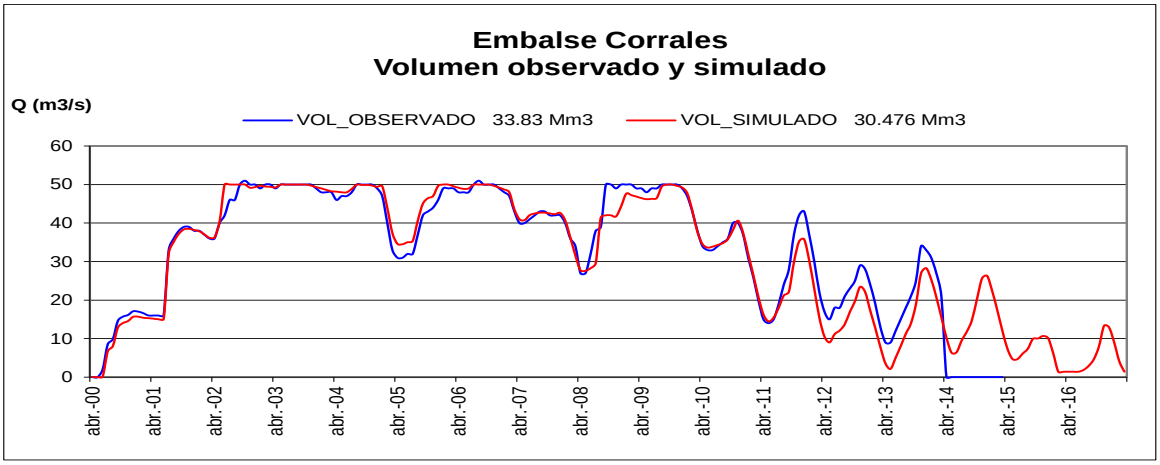
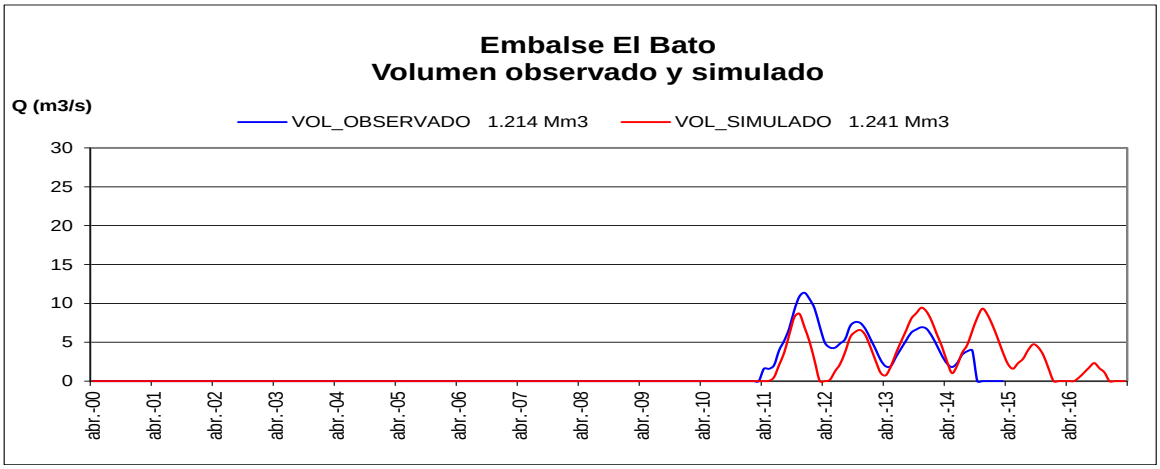


Figura 10.55
Embalse El Bato



b) Planilla Calib20_FuturoBase2_Calib_SUB

Esta planilla muestra la evolución que tendrían todos los sectores acuíferos si los siguientes 3 años fueran más secos que los 3 últimos, aportando sólo el 70% del caudal histórico, con la explotación que permiten los derechos actuales.

Lo que se puede apreciar, es que en gran parte de la cuenca, y dada la forma en que ella es explotada hoy, hasta tres años más los acuíferos no mostrarían afección de sus niveles. Sólo hay afecciones en los sectores que se muestran a continuación, donde los derechos de agua actualmente existentes permitirían una explotación más intensiva, para los cuales se muestran los metros de descenso al final del período.

- AC-03, Cuncumén, 5 m
- AC-05, Chillepín, descensos leves, pero se recupera cada temporada
- AC-08, Panguecillo, 6,4 m
- AC-09, El Queñe, 20 m
- AC-11, Zapallar,inestable frente a la hidrología, hasta 13 m, pero recuperándose en cada temporada
- AC-24, Cárcamo, 1 m
- AC-25, Illapel, desde la ciudad de Illapel hacia aguas abajo, 3 m pero se recupera cada temporada
- AC-26, El Peral, colapsa pero vuelve cada temporada.

Esto muestra que una hidrología extremadamente mermada en relación con la actual, de larga duración (3 años más secos que los últimos tres del período 2011 y 2014), tendría efectos sobre los acuíferos donde los derechos actuales permiten una similar o mayor explotación que la actual, aunque también se observa que estos acuíferos están lejos de colapsar.

Este análisis también muestra que en la mayor parte de la cuenca, los acuíferos no se verían afectados.

Como muestra de los acuíferos no afectados, se presenta la situación del acuífero AC-10, Salamanca, y como muestra representativa de los acuíferos más afectados, el acuífero AC-09, El Queñe.

Figura 10.56
Acuífero Salamanca

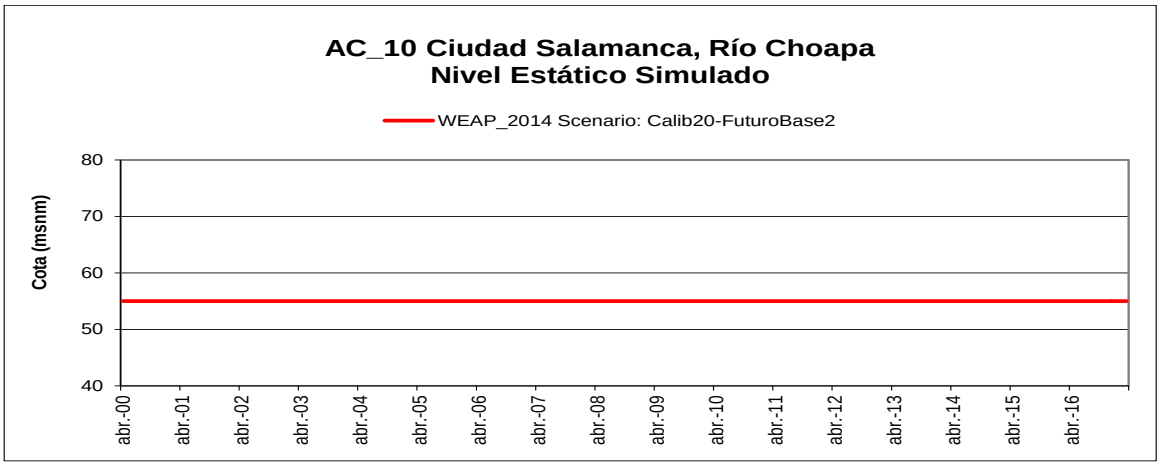
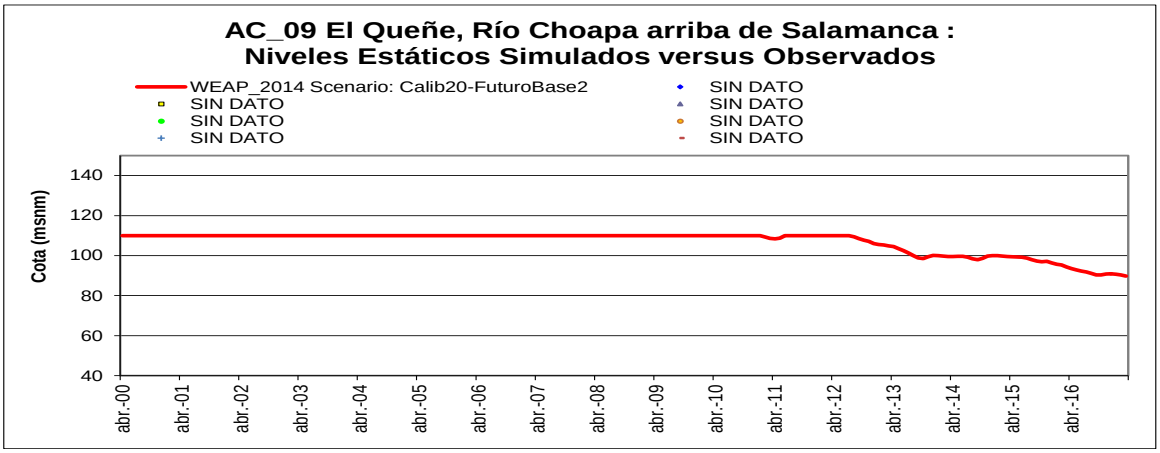


Figura 10.57
Acuífero El Queñe



c) Planilla FuturoBase2_Balance_AC

En las planillas de balance de los acuíferos, se puede observar lo mismo que en las planillas Calib_SUB, pero esta vez expresado en volumen. Así, en los acuíferos de Batuco, Tranquilla, Coirón, Quelén, Llimpo, todo el río Chalinga bajo San Agustín, El Tambo, Camisas, Limáhuida, Pintacura, todo el río Illapel hasta la ciudad de Illapel y Choapa bajo confluencia, no hay variación de volumen hasta el final de los tres años muy secos adicionales.

En los demás acuíferos, que sí presentarían bajas de nivel al final de los 3 años adicionales de sequía severa, dicha baja correspondería a una reducción de volumen en el porcentaje que se indica en la Tabla 10.26 a continuación. Se aprecia que no habría efectos significativos salvo en los acuíferos de Zapallar, cabecera de Chalinga, por ser muy pequeño, de cabecera y directamente ligado a la hidrología, y el acuífero de El Peral, fundamentalmente por haber sido definido en un tramo muy reducido.

Tabla 10.26
Descenso estimado de los acuíferos
después de 3 años adicionales de sequía 70% de la actual
con derechos actuales

Acuífero	Descenso en m	Descenso en % volumen
AC-03 Cuncumén	5	6
AC-050 Chillepín	4	se recupera
AC-08 Panguecillo	6.4	9
AC-09 El Queñe	20	18
AC-11 Zapallar (Chalinga)	13	100
AC-24 Cárcamo	1	8
AC-25 Illapel	3	se recupera
AC-26 El Peral	4	100

Todos los gráficos se encuentran en la planilla FuturoBase 2_Balance_AC, del Anexo 10.5.

d) Planilla FuturoBase2_Balance_CA

En este escenario se observa que los canales del río Choapa no son capaces de captar un desmarque mínimo deseable de verano, de 40%. Al contrario de lo que ocurre en los 3 últimos años de sequía real, en que los canales pueden captar el 40% de desmarque impuesto en todo el río Choapa, al imponer una sequía más intensa, el río no es capaz de mantener ese desmarque mínimo. En los canales directamente beneficiados por el embalse, el desmarque de 40% se mantiene una temporada más, pero al segundo año el embalse se seca.

Por lo señalado, este escenario ofrece una situación base útil para explorar la forma en que los acuíferos pudieran mejorar el desmarque, sin embargo, se trata de una sequía extrema, de casi nula probabilidad de ocurrencia.

En los ríos Chalinga e Illapel, el incumplimiento es más profundo que en el escenario FuturoBase1, donde se vio que con la prolongación de una sequía similar a la actual, en ocasiones ya no era posible entregar un desmarque de 40% a los canales de las respectivas Juntas de Vigilancia.

A modo de ejemplo, se muestra la figura de cumplimiento de desmarque en este escenario, para algunos canales representativos del sistema.

Figura 10.58
Canal Molino de Tranquilla

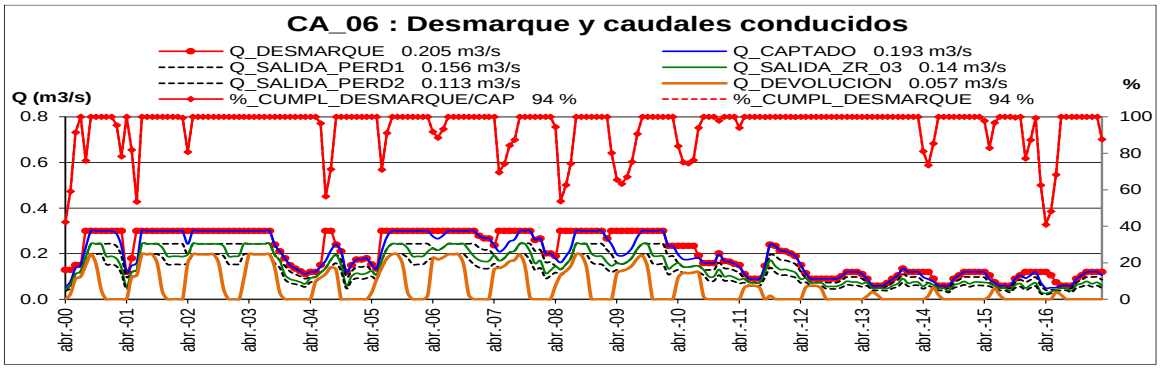


Figura 10.59
Canal Silvano

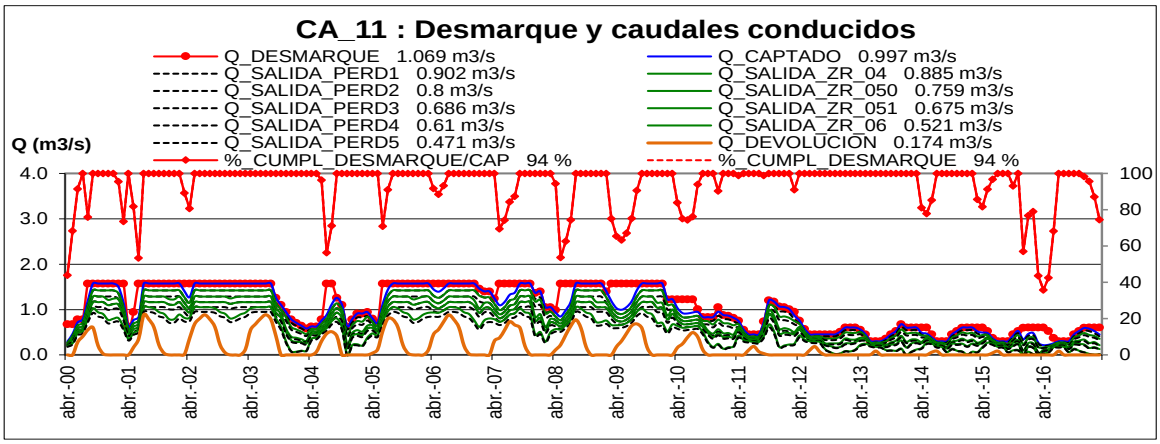


Figura 10.60
Canal Buzeta

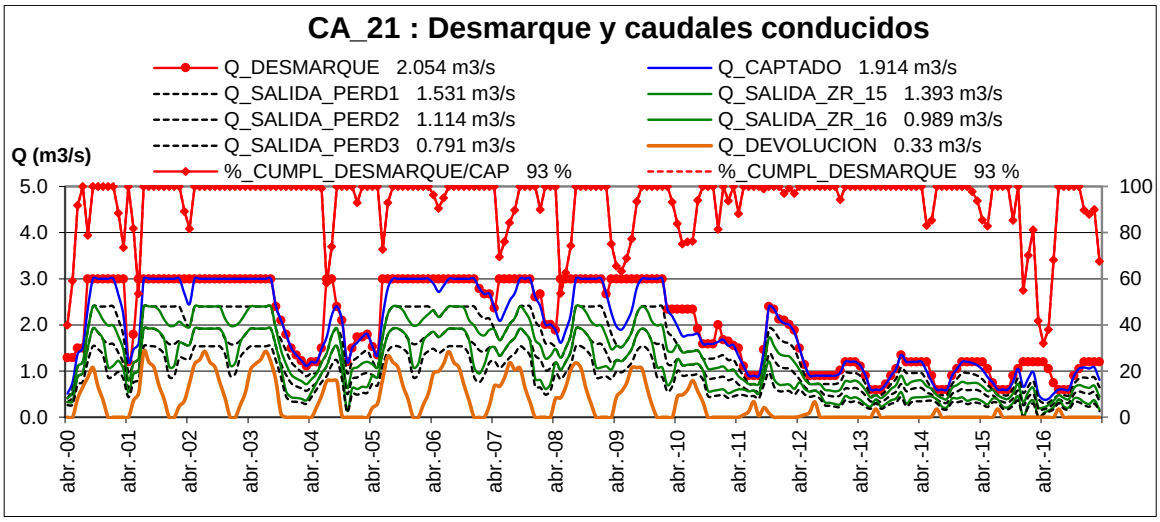


Figura 10.61
Canal Batuco de Chalinga

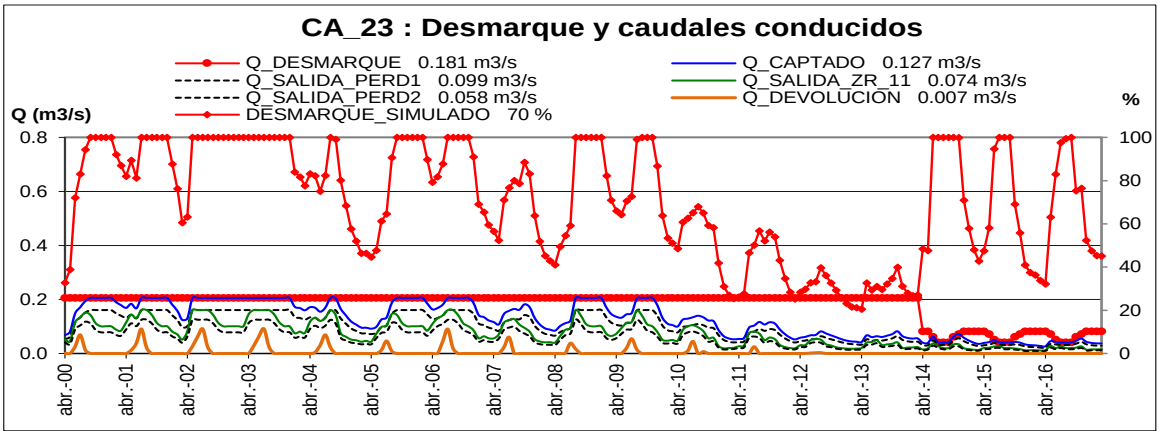
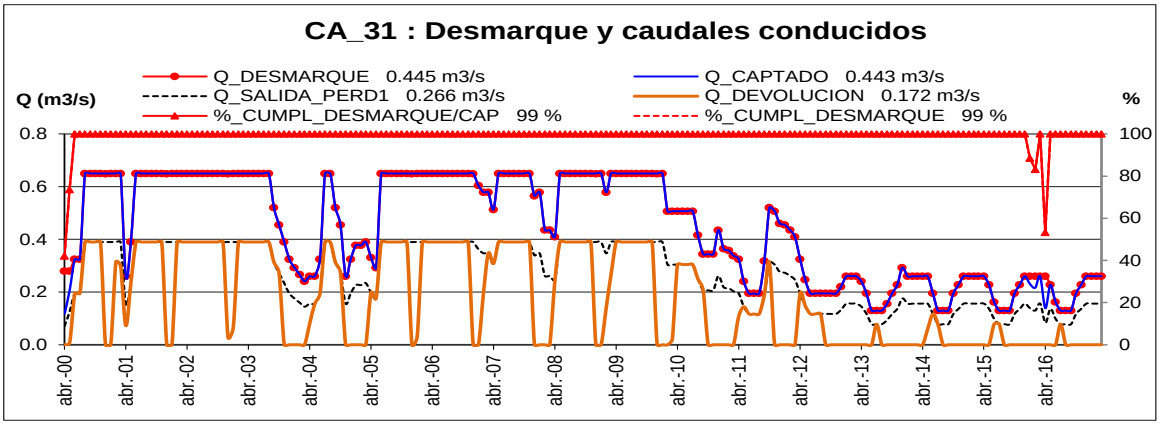


Figura 10.62
Canal Pintacura



En el canal Pintacura se observa que hasta el año 2015 ha podido captar los desmarques establecidos, sin problemas.

Figura 10.63
Canal Turbina

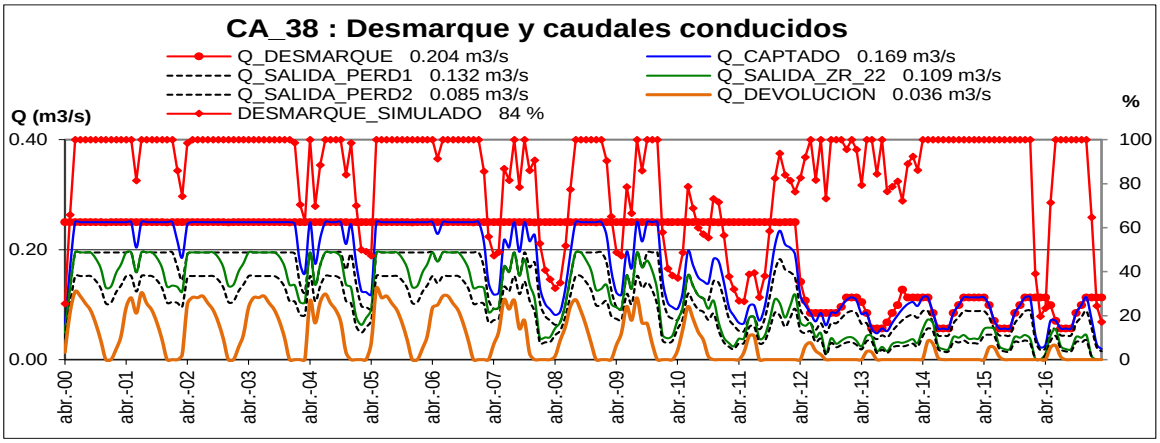
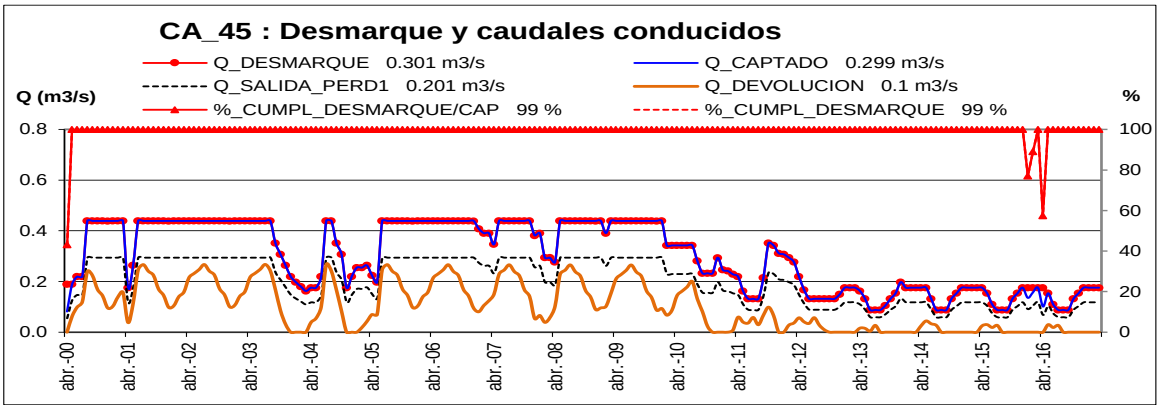


Figura 10.64
Canales Coyuntagua, Mincha, Tunga



En estos canales también se observa que hasta el año 2014 han podido captar los desmarques establecidos, sin problemas.

e) Planilla FuturoBase2_Balance_ZR

En este escenario se ha generado una situación de base, en que la cobertura de la demanda de las zonas de riego desea compararse con la que se obtendrá al activar los pozos en cada una de las zonas viables. De este modo, lo que interesa retener de este escenario, es el porcentaje de demanda suplida en cada zona de riego, en el período 2014-2017, para una comparación posterior.

10.5.3 Resultados globales del escenario Futuro Base 2

A través de los promedios de las variables a lo largo del período de análisis (2014-2017), es posible efectuar comparaciones entre los diferentes escenarios. Se presentan los promedios de variables asociadas a zonas de riego, canales y acuíferos.

Tabla 10.27
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.071	0.000	0.003	0.074	0.040	0.025	0.008	84
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.103	0.000	0.006	0.109	0.063	0.035	0.012	69
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.127	0.000	0.010	0.137	0.082	0.041	0.014	61
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.186	0.000	0.011	0.197	0.112	0.063	0.021	73
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.214	0.003	0.021	0.238	0.140	0.073	0.024	67
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.119	0.002	0.011	0.132	0.097	0.027	0.009	84
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.020	0.000	0.002	0.022	0.013	0.007	0.002	61
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.094	0.002	0.009	0.105	0.065	0.030	0.010	74
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.084	0.000	0.005	0.089	0.050	0.029	0.010	85
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.267	0.029	0.028	0.324	0.247	0.057	0.019	65
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.008	0.000	0.000	0.008	0.005	0.003	0.001	92
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.098	0.000	0.008	0.106	0.060	0.035	0.012	59
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.022	0.000	0.002	0.024	0.014	0.007	0.002	41
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.078	0.000	0.006	0.084	0.047	0.027	0.009	48
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.201	0.017	0.017	0.235	0.129	0.106	0.000	58
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.257	0.001	0.024	0.282	0.166	0.086	0.029	63
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.191	0.004	0.017	0.212	0.131	0.061	0.020	65
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.305	0.001	0.014	0.320	0.204	0.087	0.029	59
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.340	0.011	0.020	0.371	0.302	0.052	0.017	56
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.028	0.000	0.001	0.029	0.015	0.000	0.014	29
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.039	0.000	0.001	0.040	0.021	0.014	0.005	60
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.065	0.000	0.001	0.066	0.036	0.000	0.030	74
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.050	0.000	0.001	0.051	0.029	0.017	0.006	68
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.132	0.002	0.005	0.139	0.081	0.043	0.014	72
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.237	0.003	0.011	0.251	0.156	0.071	0.024	61
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.166	0.055	0.008	0.229	0.152	0.057	0.019	78
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.037	0.009	0.001	0.047	0.025	0.016	0.005	93
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.084	0.006	0.002	0.092	0.048	0.033	0.011	81
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.214	0.071	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**3.837**	**0.216**	**0.250**	**4.303**	**2.691**	**1.199**	**0.408**	**66.3**

Tabla 10.28
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_01	0.118	0.118	0.035	0.068	0.015	100	100	365	0.481	132
CA_02	0.034	0.032	0.011	0.021	0.000	96	96	104	0.400	385
CA_03	0.068	0.063	0.019	0.043	0.001	93	93	211	0.405	192
CA_04	0.113	0.101	0.030	0.071	0.001	90	90	350	0.240	69
CA_05	0.097	0.084	0.029	0.055	0.000	89	89	300	0.930	310
CA_06	0.097	0.088	0.028	0.054	0.006	91	91	300	0.400	133
CA_07	0.074	0.049	0.012	0.032	0.005	70	70	230	0.345	150
CA_08	0.055	0.044	0.015	0.029	0.000	85	85	169	0.820	484
CA_09	0.029	0.024	0.005	0.019	0.000	85	85	90	0.120	133
CA_10	0.350	0.302	0.081	0.199	0.022	88	88	1100	2.560	233
CA_11	0.488	0.417	0.128	0.279	0.010	88	88	1574	2.000	127
CA_120	0.083	0.074	0.019	0.051	0.004	91	91	260	0.600	231
CA_121	0.129	0.109	0.036	0.053	0.020	86	86	400	2.110	528
CA_13	0.040	0.035	0.013	0.020	0.002	89	89	124	1.100	887
CA_14	0.315	0.266	0.087	0.144	0.034	87	87	1000	1.730	173
CA_15	0.032	0.032	0.011	0.020	0.001	99	99	100	0.100	100
CA_16	0.194	0.167	0.065	0.073	0.030	88	88	600	2.000	333
CA_17	0.155	0.136	0.037	0.095	0.005	90	90	500	0.600	120
CA_18	0.171	0.153	0.061	0.084	0.009	90	90	530	1.100	208
CA_19	0.040	0.037	0.012	0.025	0.000	93	93	125	0.250	200
CA_20	0.126	0.110	0.031	0.079	0.000	89	89	397	0.330	83
CA_21	0.971	0.826	0.336	0.475	0.015	87	87	3000	3.800	127
CA_22	0.019	0.013	0.005	0.009	0.000	-	75	59	0.980	1661
CA_23	0.067	0.043	0.014	0.029	0.000	-	70	300	0.480	160
CA_24	0.152	0.097	0.029	0.062	0.006	-	70	353	0.850	241
CA_25	0.301	0.186	0.063	0.120	0.003	-	68	1052	1.337	127
CA_26	0.184	0.158	0.055	0.097	0.005	88	88	570	1.550	272
CA_27	0.162	0.139	0.045	0.093	0.001	88	88	500	1.100	220
CA_28	0.259	0.221	0.071	0.150	0.000	87	87	800	1.900	238
CA_29	0.045	0.039	0.010	0.027	0.002	89	89	150	0.480	320
CA_30	0.149	0.148	0.046	0.098	0.005	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.210	0.205	0.082	0.109	0.014	98	98	650	2.170	334
CA_32	0.031	0.028	0.000	0.028	0.000	-	92	96	0.261	271
CA_33	0.065	0.055	0.015	0.038	0.002	-	88	201	2.449	1221
CA_34	0.013	0.012	0.001	0.008	0.003	-	93	39	0.092	236
CA_35	0.072	0.067	0.000	0.060	0.007	-	94	222	0.540	244
CA_36	0.021	0.018	0.006	0.000	0.012	-	86	66	0.228	347
CA_37	0.037	0.034	0.011	0.023	0.000	-	94	113	0.195	172
CA_38	0.092	0.078	0.024	0.049	0.005	-	88	283	0.250	88
CA_39	0.121	0.104	0.030	0.070	0.003	-	88	375	0.550	147
CA_40	0.304	0.256	0.088	0.168	0.000	-	87	940	0.980	104
CA_41	0.264	0.221	0.082	0.109	0.030	-	87	815	4.724	579
CA_42	0.191	0.161	0.063	0.095	0.003	-	88	589	0.322	55
CA_43	0.176	0.148	0.049	0.076	0.023	-	87	543	0.360	66
CA_44	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.142	0.138	0.046	0.084	0.008	98	98	439	1.255	286
CA_46	0.403	0.390	0.144	0.214	0.031	97	97	1246	2.038	164
CA_47	0.000	0.377	0.000	0.000	0.377	-	70	-	3.500	-
TOTAL		**6.606**	**2.080**	**3.806**	**0.720**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.29
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.042	0.020	0.025	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.057	0.021	0.035	0.112	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_03	12.7	0.066	0.019	0.040	0.002	0.124	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.000	-
AC_04	23.7	0.109	0.019	0.063	0.191	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_050	22.4	0.076	0.015	0.074	0.017	0.148	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.142
AC_051	21.1	0.107	0.011	0.027	0.098	0.047	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.043
AC_052	7.7	0.013	0.010	0.008	0.029	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.031	0.001	0.029	0.050	0.011	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.043	0.011	0.030	0.078	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_08	17.5	0.119	0.011	0.057	0.018	0.170	0.005	0.029	0.048	0.000	0.000	0.000	0.104
AC_09	8.4	0.025	0.010	0.003	0.000	0.039	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
AC_10	8.3	0.054	0.015	0.035	0.091	0.012	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	-
AC_11	0.2	0.014	0.003	0.008	0.001	0.023	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_12	15.1	0.034	0.001	0.027	0.040	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.075	0.002	0.106	0.137	0.047	0.027	0.017	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_14	25.7	0.145	0.006	0.087	0.351	0.024	0.020	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_15	36.0	0.189	0.000	0.060	0.226	0.024	0.019	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_16	33.0	0.177	0.009	0.087	0.224	0.049	0.046	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.143	0.008	0.052	0.156	0.047	0.035	0.011	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.017	0.005	0.014	0.022	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.007	0.006	0.000	0.009	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.028	0.006	0.017	0.031	0.019	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.091	0.003	0.043	0.119	0.018	0.016	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.116	0.003	0.071	0.145	0.046	0.012	0.003	0.031	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.096	0.004	0.058	0.039	0.117	0.037	0.055	0.032	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.017	0.001	0.016	0.026	0.009	0.002	0.008	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.046	0.012	0.033	0.079	0.012	0.005	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.144	0.013	0.096	0.164	0.089	0.017	0.071	0.002	0.000	0.000	0.000	-
TOTAL	**404.7**	**2.081**	**0.245**	**1.201**	**2.542**	**1.124**	**0.358**	**0.215**	**0.136**	**0.133**	**0.009**	**0.000**	**0.324**

10.5.4 Comentario sobre escenario Futuro Base 2

Este escenario, de tres años de hidrología extremadamente escasa, a continuación de los últimos tres años históricos ya muy secos en la región, es de casi nula probabilidad de ocurrencia, y se analizó con el fin de explorar la capacidad de apoyo de los acuíferos en el escenario de operación 2 correspondiente.

En este escenario, se mantiene la demanda de 7,9 m3/s por parte de las zonas de riego, controlada, como siempre, por la política de desmarques. Los canales captan menos agua, sólo 6,6 m3/s, de los cuales entregan 3,8 m3/s a las zonas de riego. Se reducen las devoluciones, llegando a sólo 0,7 m3/s en este escenario.

El bombeo desde los acuíferos se mantiene en 0,2 m3/s, limitado por los derechos. Los afloramientos bajan a 2,5 m3/s, la recarga neta baja a 1,1 m3/s, similares a las extracciones totales, que suman 1,2 m3/s.

El porcentaje de demanda suplida en este escenario es de 66,3%.

Las salidas al mar se reducen a 1,1 m3/s.

El escenario Futuro Base 2 muestra que ante la muy extrema sequía, la mayoría de los acuíferos permanecen sin descensos. Sólo se observan descensos al final del período, en los acuíferos de Cuncumén, Panguecillo y El Queñe, y la posibilidad de colapsar, del acuífero Zapallar, cabecera del Chalinga, muy dependiente de la hidrología.

10.6 Escenario Futuro Operación 2

10.6.1 Configuración del escenario

En este escenario se desea probar la capacidad de apoyo de los acuíferos en las condiciones aún más extremas de sequía impuestas en el escenario Futuro Base 2.

El escenario se simuló sobre el escenario Futuro Base 2, con los desmarques de sequía de la Tabla 10.30 en todos los ríos, y con el siguiente cambio:

- Entrega desde los acuíferos hacia los canales de riego, en apoyo a lograr los desmarques deseados. El canal Buzeta se alimenta desde el acuífero El Tambo, para no sobrecargar el acuífero de Salamanca, que apoya otros canales y también tiene pozos de restitución de MLP.

Tabla 10.30
Desmarque mínimo deseado Choapa, Chalinga, Illapel

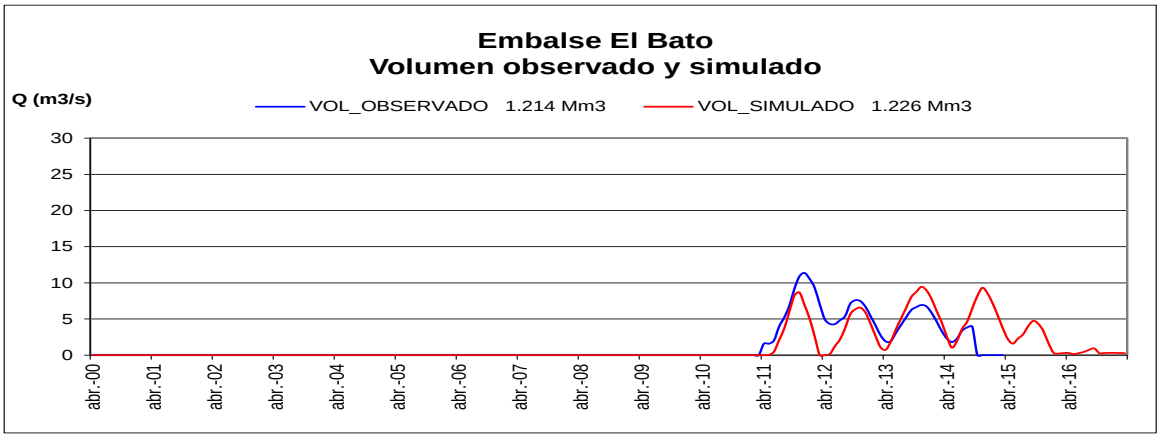
Mes	% desmarque mínimo deseado
abril	0.4
mayo	0.4
junio	0.3
julio	0.2
agosto	0.2
septiembre	0.2
octubre	0.3
noviembre	0.35
diciembre	0.4
enero	0.4
Febrero	0.4
marzo	0.4

10.6.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación2_Calib_SUP

Esta planilla muestra el comportamiento del sistema superficial, en condiciones históricas y futuras de extrema sequía. Los embalses se mantienen casi igual que en el escenario base, salvo el último año de sequía, en que su volumen es más reducido en el presente escenario. Como muestra se presenta el embalse El Bato.

Figura 10.65
Embalse El Bato



b) Planilla FuturoOperación2_Calib_SUB

Esta planilla muestra el comportamiento de niveles de todos los acuíferos en este escenario, al ser solicitados para suplementar el desmarque mínimo de los canales. Se observa que todos los acuíferos pueden ser explotados en esta situación, sin colapsar, con excepción del acuífero de Zapallar (AC-11).

En la Tabla adjunta, se muestra el descenso en metros y en porcentaje de volumen que se observa para los acuíferos que presentan algún descenso. Lo que se observa es que en el sector de Choapa Alto, los acuíferos de Cuncumén, Tranquilla, Chillepín, Coirón, Panguecillo, El Queñe y Salamanca, aumentarían su descenso respecto del escenario base, y entregarían un porcentaje importante de su volumen, sin colapsar. La condición para esto es que el canal Buzeta se alimenta desde el acuífero El Tambo.

En el Chalinga, con la nueva explotación del escenario Operación 2, el acuífero de cabecera AC-11, colapsa. Es el único acuífero que colapsa en esta situación. Los demás acuíferos del Chalinga no se verían afectados.

En el Choapa Medio, la explotación adicional prácticamente no es sensible.

Los acuíferos del río Illapel, si bien bajan su nivel en forma importante, están lejos de colapsar. Pero se observa que aportan una parte significativa de su volumen, aliviando la situación de sequía.

En el Choapa Bajo, la explotación prácticamente no es sensible.

En resumen, salvo por el acuífero de Zapallar, colapsa en esta situación, los demás acuíferos pueden apoyar en buenas condiciones la demanda para llegar a un desmarque mínimo de sequía, incluso en una sequía extrema sequía como la asumida en este escenario. Los gráficos se encuentran en la planilla FuturoOperación2_Calib_SUB del Anexo 10.6.

c) Planilla FuturoOperación2_Balance_AC

En esta planilla se observa lo mismo que en la planilla de niveles Calib_SUB, pero expresado en volúmenes. En la Tabla 10.31 adjunta, se aprecia el efecto de esta nueva forma de operación, sobre los volúmenes. En la Tabla sólo se presentan los acuíferos que llegan al final del período de análisis con un volumen más reducido que el inicial. El detalle del comportamiento de todos los acuíferos se puede apreciar en la planilla del Anexo 10.6.

Tabla 10.31
Variación de volúmenes de acuíferos en escenario FuturoOperación2

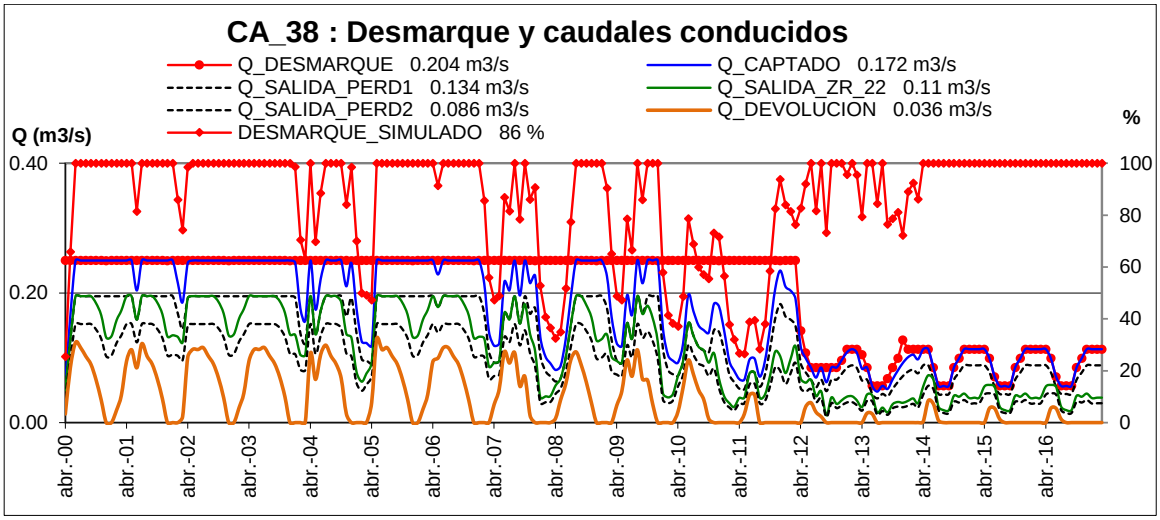
Acuífero	Nombre	Descenso en m	Descenso en % Volumen
AC-03	Cuncumén	6	7
AC-04	Tranquilla	10	10
AC-50	Chillepín	5	7
AC-51	Coirón	4	se recupera
AC-07	bajo Quelén	3	se recupera
AC-08	Panguecillo	13.2	18
AC-09	El Queñe	22	10
AC-10	Salamanca	6	se recupera
AC-11	Zapallar	18	100
AC-14	El Tambo	11.8	17
AC-19	Illapel sobre embalse	6	11
AC-21	Embalse Bato	15	34
AC-22	Illapel sobre Huintil	13	26
AC-23	Illapel bajo Huintil	12	19
AC-25	Illapel en Illapel	13	36
AC-26	Illapel El Peral	4	se recupera

En la Tabla de promedios, se puede apreciar que en este escenario, suben los caudales captados en relación con el escenario Futuro Base 2, también sube la recarga neta debido al mayor uso de los acuíferos, y bajan los afloramientos.

d) Planilla FuturoOperación2_Balance_CA

En forma similar a lo mostrado en el escenario de Operación 1, con la ayuda de los acuíferos, en este escenario todos los canales logran captar el desmarque mínimo de sequía establecido para este escenario (20 a 40%), con la sola excepción de los canales que están en zonas son acuíferos, como los de Tencadán, Illapel Alto sobre Las Burras y Carén, además de algunos canales del Chalinga. Todos los demás canales llegan al desmarque mínimo deseado. Se presenta la situación del canal CA-40, La Cocinera, como muestra. En la Tabla resumen de promedios, se observa que en relación con el período 2014-2017 del escenario Futuro Base 2, aumenta el caudal captado por los canales, aumentan las entregas a las zonas de riego, también las pérdidas desde canales, y muy poco, las devoluciones.

Figura 10.66
Canal La Cocinera



e) Planilla FuturoOperación2_Balance ZR

Finalmente, interesa analizar si esta forma de operar el sistema en sequía, imponiendo un desmarque mínimo deseado según la Tabla 10.30, es decir, acotando la demanda, pero apoyando la oferta con aguas subterráneas, tiene un resultado positivo sobre el porcentaje de demanda suplida de las zonas de riego.

Para ello, se comparan los porcentajes de demanda suplida, para el período de sequía, de los escenarios Futuro Base 2 y Futuro Operación 2, en la Tabla 10.32 a continuación. Se puede observar que la forma técnica de operar el recurso, incluyendo en la gestión el recurso subterráneo, permite aumentar muy fuertemente el porcentaje de demanda suplida, en comparación con lo que permitirían solamente los derechos actuales.

Tabla 10.32
Comparación de porcentaje de demanda suplida
entre escenarios FuturoBase2 y FuturoOperación2

Sector	Zona de Riego	Futuro Base 1	Futuro Operación 1	Diferencia
		2014-2017	2014-2017	2014-2017
		% DS	%DS	%DS
Choapa Alto	**ZR_01**	84	84	0
	ZR_02	69	70	2
	ZR_03	61	62	2
	ZR_04	73	75	3
	ZR_050	67	72	5
	ZR_051	84	86	3
	ZR_052	61	66	5
Quelén	**ZR_06**	74	81	6
Choapa Alto	**ZR_07**	85	90	5
	ZR_08	65	71	6
	ZR_09	92	97	5
	ZR_10	59	63	4
Chalinga	**ZR_11**	41	49	8
	ZR_12	48	51	4
	ZR_13	58	71	13
Choapa Medio	**ZR_14**	63	68	6
	ZR_15	65	70	4
	ZR_16	59	64	5
	ZR_17	56	63	7
Est.Carén	**ZR_18**	29	29	0
Illapel	**ZR_19**	60	67	7
	ZR_20	74	75	1
	ZR_21			
	ZR_22	68	74	6
	ZR_23	72	78	6
	ZR_24	61	69	8
	ZR_25	78	82	4
	ZR_26	93	100	7
Choapa Bajo	**ZR_27**	81	82	1
	ZR_28	100	**100**	0
TOTAL	**TOTAL**	**66.3**	71.2	4.9

10.6.3 Resultados globales del escenario Futuro Operación 2

En las tablas siguientes se presentan los promedios de todas las variables analizadas en las planillas, para el período 2014-2017.

Tabla 10.33
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2017)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.071	0.000	0.003	0.074	0.040	0.025	0.008	84
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.107	0.000	0.006	0.113	0.065	0.036	0.012	70
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.133	0.000	0.010	0.143	0.086	0.043	0.014	62
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.195	0.000	0.011	0.206	0.117	0.066	0.022	75
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.236	0.000	0.021	0.257	0.150	0.080	0.027	72
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.128	0.000	0.011	0.139	0.101	0.028	0.009	86
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.022	0.000	0.002	0.024	0.014	0.008	0.003	66
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.109	0.002	0.009	0.120	0.073	0.034	0.011	81
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.091	0.000	0.005	0.096	0.053	0.032	0.011	90
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.312	0.022	0.028	0.362	0.276	0.066	0.022	71
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.009	0.000	0.000	0.009	0.005	0.003	0.001	97
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.107	0.000	0.008	0.115	0.065	0.038	0.013	63
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.030	0.000	0.002	0.032	0.019	0.010	0.003	49
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.088	0.000	0.006	0.094	0.052	0.031	0.010	51
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.285	0.015	0.017	0.317	0.170	0.146	0.000	71
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.288	0.000	0.024	0.312	0.182	0.097	0.032	68
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.211	0.000	0.017	0.228	0.140	0.066	0.022	70
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.332	0.000	0.014	0.346	0.217	0.096	0.032	64
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.398	0.009	0.020	0.427	0.342	0.064	0.021	63
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.028	0.000	0.001	0.029	0.015	0.000	0.014	29
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.046	0.000	0.001	0.047	0.024	0.017	0.006	67
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.067	0.000	0.001	0.068	0.037	0.000	0.031	75
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.056	0.000	0.001	0.057	0.031	0.019	0.006	74
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.151	0.000	0.005	0.156	0.090	0.049	0.016	78
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.288	0.000	0.011	0.299	0.181	0.089	0.030	69
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.188	0.048	0.008	0.244	0.159	0.063	0.021	82
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.049	0.002	0.001	0.052	0.027	0.018	0.006	100
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.086	0.006	0.002	0.094	0.049	0.034	0.011	82
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.220	0.065	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**4.331**	**0.169**	**0.250**	**4.750**	**2.941**	**1.355**	**0.446**	**71.2**

Tabla 10.34
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2017)

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_01	0.118	0.118	0.035	0.068	0.015	100	100	365	0.481	132
CA_02	0.034	0.034	0.011	0.022	0.000	100	100	104	0.400	385
CA_03	0.068	0.068	0.021	0.045	0.002	100	100	211	0.405	192
CA_04	0.113	0.113	0.034	0.077	0.002	100	100	350	0.240	69
CA_05	0.097	0.097	0.034	0.063	0.001	100	100	300	0.930	310
CA_06	0.097	0.097	0.031	0.057	0.010	100	100	300	0.400	133
CA_07	0.074	0.049	0.012	0.031	0.006	70	70	230	0.345	150
CA_08	0.055	0.044	0.015	0.029	0.000	85	85	169	0.820	484
CA_09	0.029	0.029	0.006	0.023	0.000	100	100	90	0.120	133
CA_10	0.350	0.350	0.096	0.225	0.030	100	100	1100	2.560	233
CA_11	0.488	0.488	0.157	0.318	0.013	100	100	1574	2.000	127
CA_120	0.083	0.083	0.021	0.056	0.005	100	100	260	0.600	231
CA_121	0.129	0.129	0.043	0.059	0.027	100	100	400	2.110	528
CA_13	0.040	0.040	0.015	0.022	0.003	100	100	124	1.100	887
CA_14	0.315	0.315	0.106	0.160	0.050	100	100	1000	1.730	173
CA_15	0.032	0.032	0.011	0.020	0.001	100	100	100	0.100	100
CA_16	0.194	0.194	0.076	0.075	0.044	100	100	600	2.000	333
CA_17	0.155	0.155	0.044	0.105	0.007	100	100	500	0.600	120
CA_18	0.171	0.172	0.069	0.090	0.013	100	100	530	1.100	208
CA_19	0.040	0.040	0.013	0.028	0.000	100	100	125	0.250	200
CA_20	0.126	0.126	0.036	0.090	0.000	100	100	397	0.330	83
CA_21	0.971	0.971	0.404	0.547	0.020	100	100	3000	3.800	127
CA_22	0.019	0.019	0.007	0.012	0.000	-	100	59	0.980	1661
CA_23	0.067	0.058	0.019	0.039	0.000	-	89	300	0.480	160
CA_24	0.152	0.104	0.031	0.066	0.007	-	74	353	0.850	241
CA_25	0.301	0.301	0.102	0.196	0.003	-	100	1052	1.337	127
CA_26	0.184	0.184	0.065	0.114	0.006	100	100	570	1.550	272
CA_27	0.162	0.162	0.053	0.107	0.001	100	100	500	1.100	220
CA_28	0.259	0.259	0.085	0.174	0.000	100	100	800	1.900	238
CA_29	0.045	0.045	0.011	0.032	0.002	100	100	150	0.480	320
CA_30	0.149	0.149	0.046	0.098	0.005	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.210	0.210	0.084	0.104	0.022	100	100	650	2.170	334
CA_32	0.031	0.028	0.000	0.028	0.000	-	92	96	0.261	271
CA_33	0.065	0.065	0.018	0.044	0.002	-	100	201	2.449	1221
CA_34	0.013	0.013	0.002	0.008	0.003	-	100	39	0.092	236
CA_35	0.072	0.068	0.000	0.062	0.007	-	96	222	0.540	244
CA_36	0.021	0.021	0.007	0.000	0.014	-	100	66	0.228	347
CA_37	0.037	0.037	0.012	0.025	0.000	-	100	113	0.195	172
CA_38	0.092	0.092	0.029	0.058	0.005	-	100	283	0.250	88
CA_39	0.121	0.121	0.035	0.082	0.004	-	100	375	0.550	147
CA_40	0.304	0.304	0.106	0.198	0.000	-	100	940	0.980	104
CA_41	0.264	0.264	0.098	0.132	0.034	-	100	815	4.724	579
CA_42	0.191	0.191	0.074	0.113	0.003	-	100	589	0.322	55
CA_43	0.176	0.176	0.059	0.091	0.025	-	100	543	0.360	66
CA_44	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.142	0.142	0.047	0.086	0.009	100	100	439	1.255	286
CA_46	0.403	0.403	0.149	0.220	0.034	100	100	1246	2.038	164
CA_47	0.000	0.359	0.000	0.000	0.359	-	70	-	3.500	-
TOTAL		**7.522**	**2.430**	**4.298**	**0.794**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.35
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2017)

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.042	0.020	0.025	0.086	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-
AC_02	2.1	0.063	0.021	0.036	0.088	0.032	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.032	-
AC_03	12.7	0.072	0.019	0.043	0.001	0.132	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.009	-
AC_04	23.7	0.127	0.019	0.066	0.071	0.142	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.166	-
AC_050	22.4	0.091	0.014	0.080	0.012	0.173	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.042	0.142
AC_051	21.1	0.129	0.011	0.028	0.062	0.105	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.063	0.043
AC_052	7.7	0.015	0.009	0.008	0.031	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.037	0.001	0.035	0.061	0.011	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.053	0.011	0.032	0.062	0.034	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.029	-
AC_08	17.5	0.139	0.011	0.066	0.019	0.197	0.005	0.022	0.048	0.000	0.000	0.051	0.104
AC_09	8.4	0.030	0.010	0.003	0.000	0.043	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.035
AC_10	8.3	0.061	0.015	0.038	0.055	0.059	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.049	-
AC_11	0.2	0.019	0.003	0.010	0.000	0.032	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	-
AC_12	15.1	0.037	0.001	0.031	0.048	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.116	0.002	0.146	0.108	0.156	0.027	0.015	0.003	0.000	0.000	0.112	-
AC_14	25.7	0.169	0.005	0.097	0.172	0.212	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.235	-
AC_15	36.0	0.223	0.000	0.066	0.263	0.026	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.006	-
AC_16	33.0	0.206	0.008	0.096	0.250	0.060	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.012	-
AC_17	27.7	0.163	0.007	0.064	0.189	0.045	0.035	0.009	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.020	0.005	0.016	0.017	0.024	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.015	-
AC_21	0.3	0.008	0.005	0.000	0.007	0.007	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	-
AC_22	3.5	0.032	0.006	0.019	0.022	0.035	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.024	-
AC_23	11.1	0.108	0.003	0.049	0.084	0.076	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	-
AC_24	16.6	0.139	0.003	0.088	0.138	0.093	0.012	0.000	0.031	0.000	0.002	0.050	-
AC_25	11.8	0.113	0.004	0.063	0.036	0.144	0.037	0.048	0.032	0.000	0.004	0.067	-
AC_26	0.2	0.021	0.001	0.018	0.037	0.004	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.047	0.012	0.034	0.076	0.016	0.005	0.006	0.002	0.000	0.000	0.004	-
AC_28	46.2	0.149	0.012	0.096	0.162	0.096	0.017	0.065	0.002	0.000	0.000	0.013	-
TOTAL	**404.7**	**2.429**	**0.238**	**1.353**	**2.157**	**1.978**	**0.344**	**0.169**	**0.136**	**0.133**	**0.009**	**1.093**	**0.324**

10.6.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 2

El escenario de Operación 2 busca mostrar qué ocurre en una situación de sequía extrema, en que se desea mantener los desmarques mínimos entre 40% en verano y 20% en invierno, al permitirse el uso más intensivo de los acuíferos como apoyo directo al caudal solicitado en la entrada del canal por el desmarque.

En este escenario, la demanda se mantiene en 7,9 m3/s. Los canales captan 7,5 m3/s en este escenario, más que en el escenario Futuro Base 2, debido a que han sido apoyados por los pozos, caudal del cual entregan 4,3 m3/s a las zonas de riego. Los acuíferos aportan, en total, 1,3 m3/s, de los cuales 0,2 provienen de los derechos, y 1,1 corresponden a aportes especiales.

Los canales devuelven 0,8 m3/s al sistema superficial.

Los afloramientos llegan a 2,2 m3/s, las extracciones totales a 2,2 m3/s, y la recarga neta a 2,0 m3/s.

Incluso con esta forma más intensiva de explotar los acuíferos, en un período de extrema sequía en que todas las recargas disminuyen, los acuíferos serían capaces de aportar el caudal solicitado. Los niveles de varios de ellos, no todos, bajan, pero sin colapsar, con la única excepción del acuífero de cabecera del Chalinga (Zapallar), que por su condición especial de cabecera, no toleraría una explotación aumentada en época de sequía. Operando todo el sistema hídrico de esta forma, se podría elevar el porcentaje de demanda suplida desde un 66,3% sin usar los acuíferos más allá de los derechos actuales, a un 71,2%, usándolos en una modalidad de autorización especial en virtud del decreto de escasez.

En esta condición, las salidas al mar serían de 1,1 m3/s.

10.7 Escenario Futuro Base 3

10.7.1 Configuración del escenario Futuro Base 3

Este escenario se ha concebido para evaluar los embalses Chalinga y Totoral (cabecera del Choapa), por ser el primero un embalse que actualmente está incluido en el Programa de Gobierno, y el segundo un embalse de aspiración de los regantes del Choapa, en reemplazo del embalse Canelillo.

Por esta razón, el escenario se estructuró de la siguiente manera:

- Estadística hidrológica de entrada al modelo, réplica de la hidrología 1999-2014.
- Demanda actual en todos los usos, salvo agua potable urbana, a la que se asigna un crecimiento vegetativo de 2% anual.
- Embalse Chalinga ubicado en La Palmilla, volumen 5 millones de m3, desactivado
- Embalse Totoral, ubicado bajo la confluencia del río Valle y Choapa, aguas arriba de Batuco, volumen 30 millones de m3, desactivado
- Distribución de agua: desmarques impuestos en el río Choapa, Chalinga e Illapel, de acuerdo con el desmarque histórico, según el siguiente detalle: desmarques entre 100% en verano y 60% en invierno en épocas normales y entre 100% en verano y 40% en invierno, en épocas de sequía, según se aprecia en el archivo DESMARQUES_Q_EXT.csv. Desmarques menores no permiten hacer buen uso de los embalses.
- Operación del embalse Corrales según la siguiente regla: la entrega desde el embalse Corrales al río Choapa se hace con una curva de entrega con forma de campana, entre diciembre a mayo. La campana es la siguiente: Diciembre 1 m3/s, ene, feb, mar, abr 3 m3/s, mayo 1 m3/s. El resto del año sólo se entrega un caudal ecológico de 50 l/s al estero Camisas.
- Operación del canal Alimentador Corrales según la siguiente regla: se capta los sobrantes de julio a diciembre, con prioridad más baja que todos los canales del río Choapa, y que el embalse Totoral (desactivado en este escenario), con tope en la capacidad del canal de 3,5 m3/s.

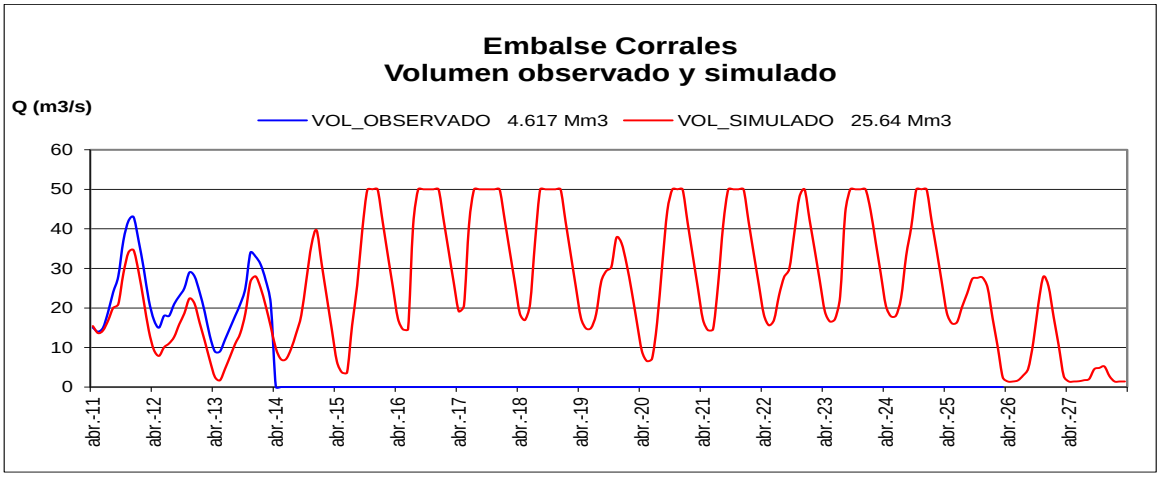
- Operación del embalse El Bato según la siguiente regla: este embalse entrega libremente de acuerdo con la política de desmarques establecida.
- Operación de los pozos de captación de MLP: Captan de acuerdo con la regla establecida en la resolución correspondiente: extraen del acuífero el exceso captado sobre el desmarque en la captación superficial de Cuncumén, castigado con una sobretasa de 20%. Q extr = (0.4 – (0.4 * Desmarque)) * 1.2. El caudal se reparte entre los pozos proporcionalmente a los derechos de cada pozo.

10.7.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoBase3_Calib_SUP

Lo más interesante de observar en este escenario, es la forma en que operarían los embalses Corrales y El Bato. Se adjuntan las figuras correspondientes.

Figura 10.67
Embalse Corrales



El embalse Corrales rebasaría varias veces, generando la siguiente estadística en el estero Camisas en desembocadura:

Figura 10.68
Estero Camisas en Desembocadura

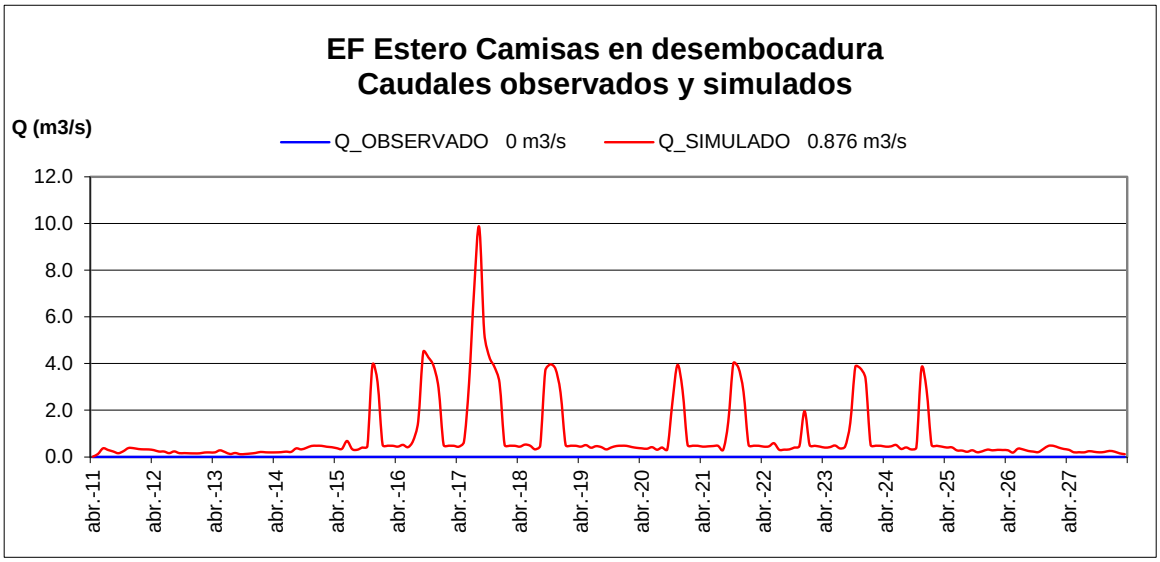
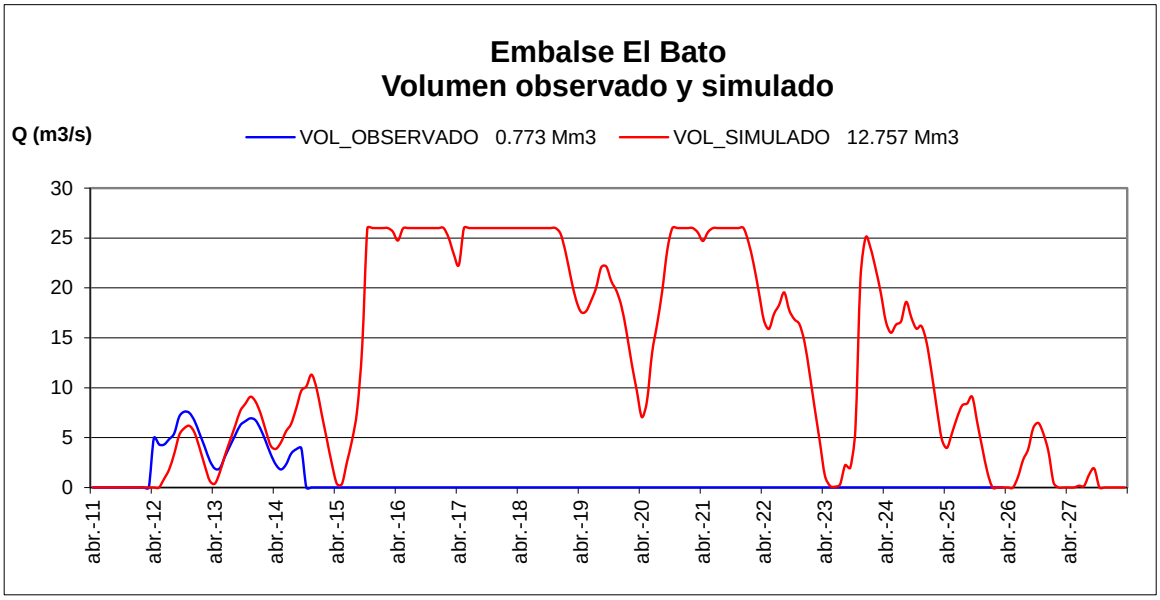


Figura 10.69
Embalse El Bato

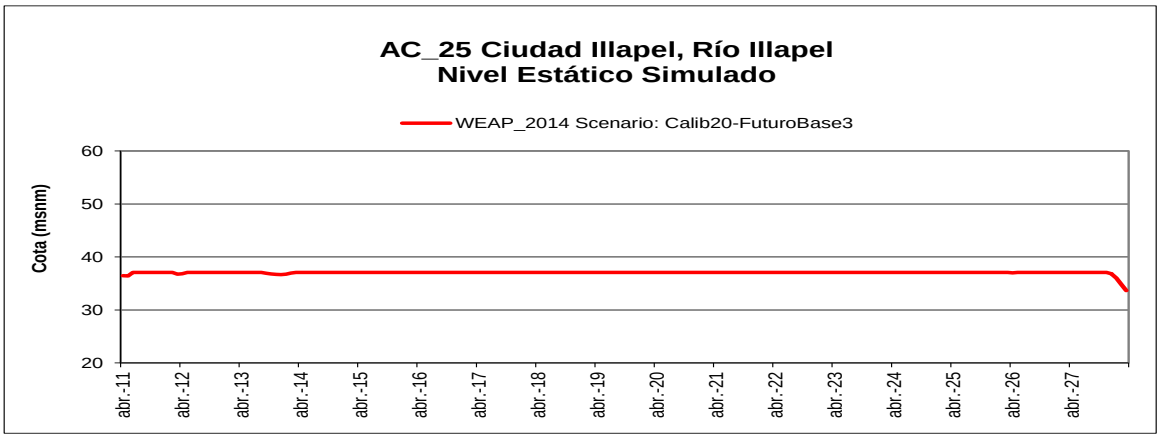


b) Planilla FuturoBase3_Calib_SUB

Esencialmente, lo que ocurriría con los acuíferos en este escenario, si se acabara la sequía y comenzara a repetirse la estadística histórica a partir de 1999, es que todos los acuíferos volverían a llenarse, hasta el comienzo de la nueva sequía al final del período, en que nuevamente se producirían leves descensos. Casi todos los acuíferos permanecen llenos en la condición de explotación asumida, mostrando el estado de subexplotación en que se

encuentran. A modo de ejemplo, se presenta el comportamiento del acuífero más afectado, el acuífero de Illapel.

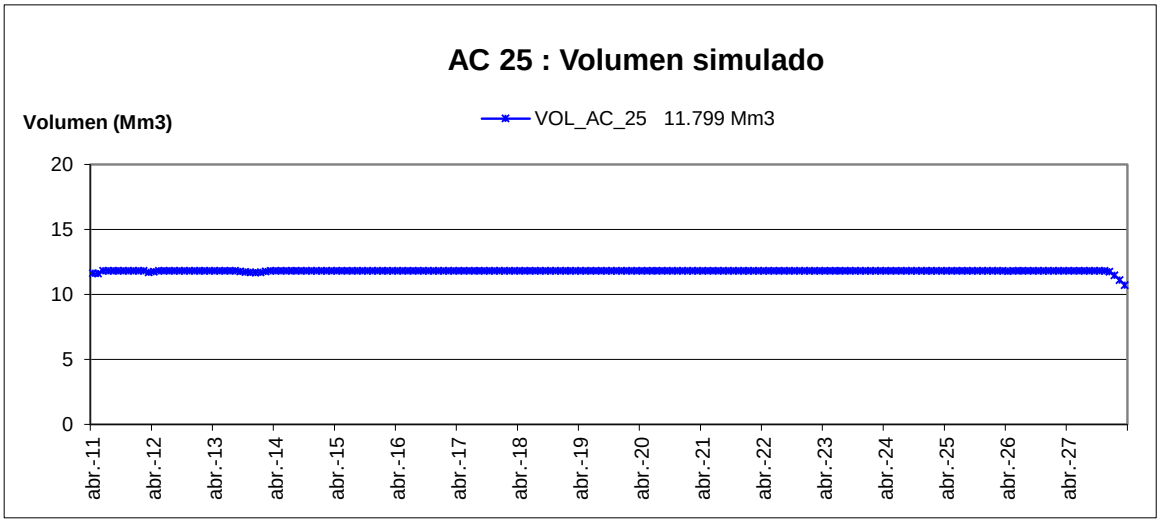
Figura 10.70
Acuífero Illapel



c) Planilla FuturoBase3_Balance_AC

Observando el comportamiento de los acuíferos pero ahora en forma de volumen, se muestra el comportamiento del mismo acuífero de Illapel. Los descensos de la actual sequía se revierten totalmente si comienza un período normal, y no se vuelven a producir hasta que se reinstala un período de sequía. La mayoría de los acuíferos ni siquiera ha presentado descensos con la sequía actual, como se ha podido apreciar en el escenario Calib20_FuturoBase1, y seguirían llenos bajo las condiciones de este escenario.

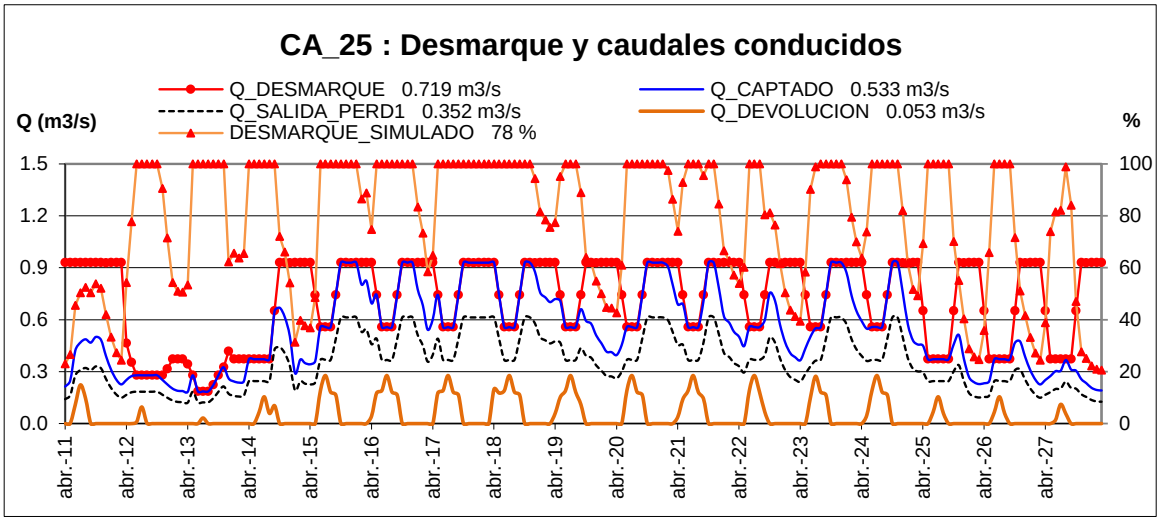
Figura 10.71
Acuífero Illapel



d) Planilla FuturoBase3_Balance_CA

En la Tabla 10.35 a continuación se puede observar el porcentaje de cumplimiento de desmarque que se obtiene en este escenario, para su comparación con el escenario de operación 3. Como ejemplo del comportamiento de canales, se presenta el canal CA_25, conjunto de canales que riegan la zona Chalinga Bajo, con sus fallas prácticamente crónicas de verano cuando el desmarque deseado es 100%, y fallas más profundas en condición de sequía. Esta situación es característica de los canales del Chalinga.

Figura 10.72
Canal CA_25 (Riego Chalinga Bajo)



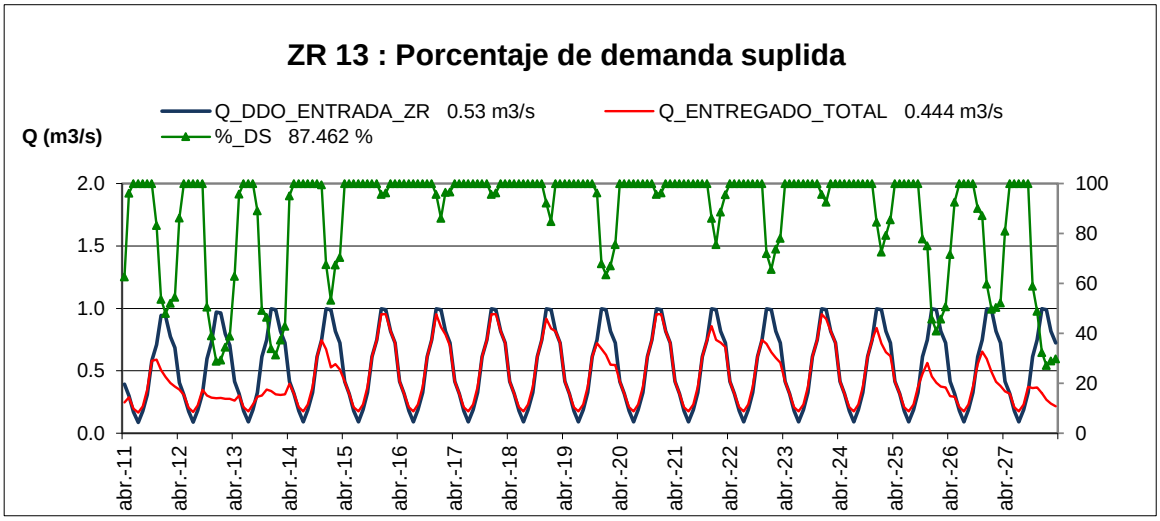
e) Planilla FuturoBase3_Balance_ZR

Las zonas de riego en sus distintas ubicaciones se ven suplidas en general en forma muy similar al escenario de calibración, en vista de que se trata de la misma hidrología, y que el área cultivada no crece en relación con el área actual de 2014.

Como ejemplo, se muestra la zona de riego del Chalinga Bajo, para luego poder compararla con el efecto que introduce el embalse Chalinga.

En la Tabla 10.34 a continuación se encuentran los valores que se compararán con el escenario de operación 3.

Figura 10.73
Zona de riego Chalinga Bajo (ZR-13)



10.7.3 Resultados globales del escenario Futuro Base 3

A continuación se presentan las tablas de promedios de todas las variables observadas a través de las planillas de resultados, que se obtienen para zonas de riego, canales y acuíferos, en el período 2014-2029. La zona ZR-21 dejó de existir a partir de la entrada en operación del embalse El Bato, pues constituye su zona de inundación.

Tabla 10.36
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2029)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.096	0.000	0.003	0.099	0.053	0.034	0.011	100
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.184	0.000	0.006	0.190	0.104	0.064	0.021	97
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.240	0.000	0.010	0.250	0.141	0.082	0.027	88
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.307	0.000	0.011	0.318	0.175	0.107	0.036	99
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.414	0.000	0.021	0.435	0.242	0.145	0.048	98
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.165	0.000	0.011	0.176	0.120	0.042	0.014	99
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.042	0.000	0.002	0.044	0.024	0.015	0.005	95
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.156	0.000	0.009	0.165	0.097	0.051	0.017	98
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.108	0.000	0.005	0.113	0.062	0.038	0.013	100
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.593	0.000	0.028	0.621	0.417	0.154	0.051	97
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.009	0.000	0.000	0.009	0.005	0.003	0.001	100
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.203	0.000	0.008	0.211	0.114	0.073	0.024	92
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.056	0.000	0.002	0.058	0.032	0.019	0.006	76
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.194	0.000	0.006	0.200	0.106	0.070	0.023	86
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.449	0.008	0.017	0.474	0.250	0.223	0.000	91
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.518	0.000	0.024	0.542	0.301	0.181	0.060	94
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.354	0.001	0.017	0.372	0.214	0.118	0.039	94
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.611	0.000	0.014	0.625	0.361	0.198	0.066	95
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.736	0.001	0.020	0.757	0.519	0.178	0.059	94
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.075	0.000	0.001	0.076	0.039	0.000	0.037	65
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.077	0.000	0.001	0.078	0.040	0.028	0.009	97
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.103	0.000	0.001	0.104	0.055	0.000	0.049	100
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.087	0.000	0.001	0.088	0.047	0.030	0.010	99
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.217	0.000	0.005	0.222	0.124	0.073	0.024	98
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.479	0.000	0.011	0.490	0.279	0.158	0.053	96
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.251	0.035	0.008	0.294	0.185	0.081	0.027	92
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.048	0.001	0.001	0.050	0.027	0.018	0.006	98
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.125	0.000	0.002	0.127	0.066	0.046	0.015	100
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.285	0.000	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**7.182**	**0.046**	**0.250**	**7.478**	**4.360**	**2.326**	**0.783**	**94.7**

Tabla 10.37
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2029)

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_01	0.300	0.297	0.089	0.096	0.112	99	99	365	0.481	132
CA_02	0.085	0.083	0.030	0.053	0.000	98	98	104	0.400	385
CA_03	0.173	0.165	0.051	0.085	0.029	96	96	211	0.405	192
CA_04	0.287	0.212	0.069	0.111	0.032	78	95	350	0.240	69
CA_05	0.246	0.232	0.085	0.129	0.018	95	95	300	0.930	310
CA_06	0.246	0.233	0.076	0.097	0.061	95	95	300	0.400	133
CA_07	0.189	0.137	0.034	0.065	0.038	74	74	230	0.345	150
CA_08	0.139	0.083	0.028	0.055	0.000	65	65	169	0.820	484
CA_09	0.074	0.050	0.011	0.039	0.000	72	72	90	0.120	133
CA_10	0.888	0.836	0.239	0.422	0.174	95	95	1100	2.560	233
CA_11	1.238	1.165	0.433	0.581	0.151	95	95	1574	2.000	127
CA_120	0.210	0.199	0.056	0.113	0.031	95	95	260	0.600	231
CA_121	0.328	0.305	0.101	0.075	0.130	94	94	400	2.110	528
CA_13	0.102	0.096	0.037	0.042	0.018	95	95	124	1.100	887
CA_14	0.799	0.744	0.270	0.186	0.287	94	94	1000	1.730	173
CA_15	0.082	0.078	0.027	0.048	0.003	95	95	100	0.100	100
CA_16	0.492	0.460	0.179	0.032	0.248	94	94	600	2.000	333
CA_17	0.394	0.370	0.120	0.178	0.073	94	94	500	0.600	120
CA_18	0.435	0.408	0.162	0.132	0.114	94	94	530	1.100	208
CA_19	0.103	0.099	0.032	0.067	0.001	97	97	125	0.250	200
CA_20	0.319	0.270	0.086	0.179	0.006	87	95	397	0.330	83
CA_21	2.462	2.293	1.026	0.946	0.321	94	94	3000	3.800	127
CA_22	0.048	0.040	0.014	0.025	0.001	-	85	59	0.980	1661
CA_23	0.169	0.132	0.045	0.085	0.002	-	81	300	0.480	160
CA_24	0.385	0.302	0.090	0.139	0.072	-	81	353	0.850	241
CA_25	0.763	0.586	0.199	0.325	0.061	-	80	1052	1.337	127
CA_26	0.468	0.436	0.152	0.206	0.077	94	94	570	1.550	272
CA_27	0.410	0.383	0.133	0.229	0.021	94	94	500	1.100	220
CA_28	0.657	0.612	0.219	0.377	0.016	94	94	800	1.900	238
CA_29	0.115	0.073	0.018	0.030	0.024	68	68	150	0.480	320
CA_30	0.378	0.376	0.117	0.174	0.085	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.533	0.528	0.211	0.115	0.202	99	99	650	2.170	334
CA_32	0.079	0.077	0.000	0.075	0.002	-	97	96	0.261	271
CA_33	0.165	0.156	0.044	0.076	0.036	-	95	201	2.449	1221
CA_34	0.032	0.031	0.004	0.004	0.022	-	96	39	0.092	236
CA_35	0.182	0.175	0.000	0.102	0.073	-	97	222	0.540	244
CA_36	0.054	0.051	0.017	0.000	0.034	-	95	66	0.228	347
CA_37	0.093	0.091	0.029	0.058	0.005	-	99	113	0.195	172
CA_38	0.214	0.203	0.073	0.092	0.038	-	95	283	0.250	88
CA_39	0.307	0.291	0.084	0.137	0.069	-	95	375	0.550	147
CA_40	0.772	0.729	0.271	0.391	0.068	-	95	940	0.980	104
CA_41	0.669	0.634	0.234	0.105	0.294	-	95	815	4.724	579
CA_42	0.312	0.300	0.117	0.155	0.027	-	96	589	0.322	55
CA_43	0.337	0.322	0.113	0.109	0.101	-	96	543	0.360	66
CA_44	0.006	0.006	0.002	0.000	0.004	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.360	0.357	0.118	0.125	0.114	99	99	439	1.255	286
CA_46	1.023	1.013	0.375	0.285	0.353	99	99	1246	2.038	164
CA_47	0.000	1.238	0.000	0.000	1.238	-	85	-	3.500	-
TOTAL		**17.954**	**5.921**	**7.150**	**4.883**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.38
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2029)

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.106	0.084	0.035	0.225	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.142	0.089	0.064	0.295	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_03	12.7	0.168	0.085	0.082	0.202	0.133	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.000	-
AC_04	23.7	0.308	0.087	0.107	0.501	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_050	22.4	0.234	0.076	0.145	0.415	0.041	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.038
AC_051	21.1	0.321	0.065	0.042	0.416	0.013	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.012
AC_052	7.7	0.037	0.062	0.016	0.113	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.104	0.002	0.051	0.149	0.009	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.154	0.067	0.039	0.253	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_08	17.5	0.348	0.068	0.154	0.483	0.086	0.005	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.028
AC_09	8.4	0.079	0.070	0.003	0.129	0.023	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
AC_10	8.3	0.150	0.077	0.073	0.288	0.012	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	-
AC_11	0.2	0.043	0.010	0.019	0.045	0.027	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_12	15.1	0.106	0.006	0.070	0.161	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.231	0.009	0.223	0.426	0.038	0.027	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_14	25.7	0.406	0.057	0.181	0.960	0.023	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_15	36.0	0.525	0.007	0.119	0.630	0.021	0.019	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_16	33.0	0.533	0.075	0.198	0.759	0.048	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.447	0.077	0.178	0.665	0.036	0.035	0.001	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.048	0.020	0.028	0.082	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.021	0.024	0.000	0.040	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.074	0.025	0.030	0.109	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.266	0.015	0.073	0.338	0.017	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.352	0.018	0.158	0.480	0.048	0.012	0.000	0.034	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.188	0.019	0.082	0.179	0.109	0.037	0.035	0.036	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.043	0.016	0.017	0.074	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.118	0.104	0.046	0.261	0.007	0.005	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.375	0.106	0.096	0.559	0.019	0.017	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
TOTAL	**404.7**	**5.927**	**1.420**	**2.329**	**9.237**	**0.782**	**0.361**	**0.046**	**0.148**	**0.133**	**0.009**	**0.000**	**0.087**

10.7.4 Comentario sobre el escenario Futuro Base 3

Este escenario provee una base para evaluar el aporte que harán los embalses. Se ha formulado con los mismos desmarques que se usarán en el escenario Futuro Operación 3.

Los canales captan un caudal de 18,0 m3/s, de los cuales entregan 7,2 m3/s a las zonas de riego. Las demandas son de 7,9 m3/s, por lo que se suplementan desde pozos, extrayendo 0,05 m3/s, cifra que se reduce en relación con escenarios anteriores, pues corresponde a la extracción para riego en un período normal, siempre limitada por los derechos.

Los canales devuelven 4,9 m3/s al sistema superficial, y el resto lo entregan a los acuíferos. Estos generan afloramientos por un caudal de 9,2 m3/s. Las extracciones totalizan 0,8 m3/s, por lo que la recarga neta alcanza también 0,8 m3/s.

Como resultado, el porcentaje de demanda suplida llega a 94,7%.

Las salidas al mar muestran un promedio de 10,5 m3/s en este escenario.

10.8 Escenario Futuro Operación 3: Activación de dos nuevos embalses

10.8.1 Configuración del escenario

Este escenario se estructura sobre el escenario FuturoBase3. El cambio consiste en activar los embalses Chalinga y Totoral, en el mes de abril de 2014. El llenado del embalse Totoral tiene una prioridad superior a la captación del canal Alimentador Corrales en la BT Coirón. El embalse Totoral se opera en forma libre, mientras que al embalse Chalinga se le aplica un buffer, que amortigua la salida a medida que el embalse se va vaciando. El valor del buffer es 20%, lo que significa que el embalse entrega como máximo el 20% del volumen almacenado cada mes.

En todos los ríos, Choapa, Chalinga e Illapel, se aplica como demanda por parte de los canales, los demarques entre 100% en verano y 60% en invierno, salvo en los últimos 3 años se sequía, en que se aplica 100% en verano y 40% en invierno, igual que en el escenario Futuro Base 3.

10.8.2 Presentación de resultados relevantes

a) Planilla FuturoOperación3_Calib_SUP

Al igual que en el escenario base, lo más interesante de observar en esta planilla es el comportamiento de los embalses, que se presenta en las figuras a continuación.

El embalse Corrales muestra leves mejoras en su volumen almacenado, aumentando de un promedio de 25 a 28 millones de m3.

El embalse Totoral pasa lleno gran parte del tiempo, lo que se debe a que en años normales no hay gran demanda sobre él, porque ésta se suple del agua superficial y agua del embalse Corrales. Sin embargo, mediante la operación propuesta, se logra hacer uso de su capacidad de almacenamiento.

El embalse Chalinga, si fuera operado en forma libre, sólo alcanzaría para una regulación intraanual, Por ello, en este escenario, se le aplicó un buffer, el cual permite una regulación que retiene recursos para el período de mayor sequía.

El embalse El Bato, operado también a partir de desmarques razonables (exigentes en verano y ahorrativos en invierno), alcanza a cubrir tres años seguidos más secos, guardando algo de recursos para la sequía. Su comportamiento no cambia respecto del escenario Futuro Base 3.

El análisis muestra que es importante encontrar la mejor forma de operar los embalses, haciendo un compromiso entre la demanda suplida inmediata y la futura, anticipándose al caso de una sequía prolongada.

Figura 10.74
Embalse Corrales

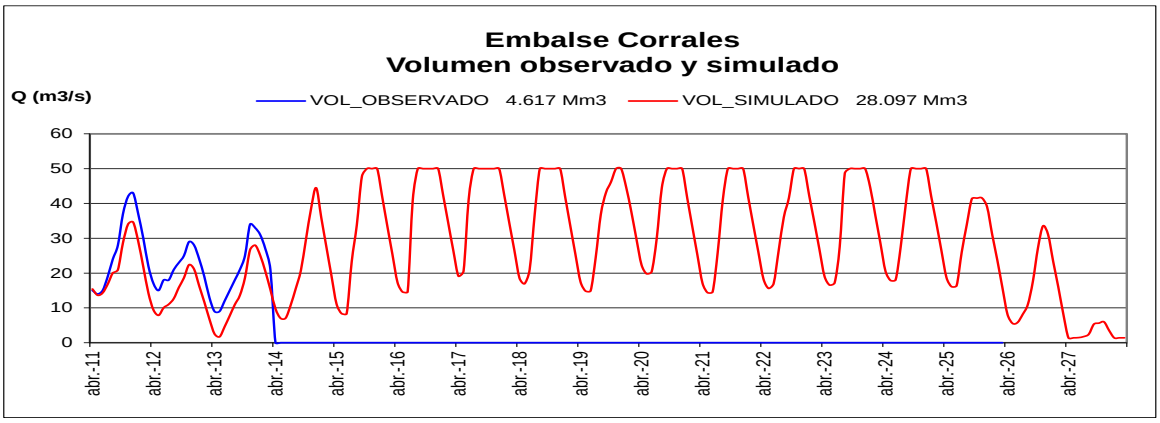


Figura 10.75
Embalse Totoral

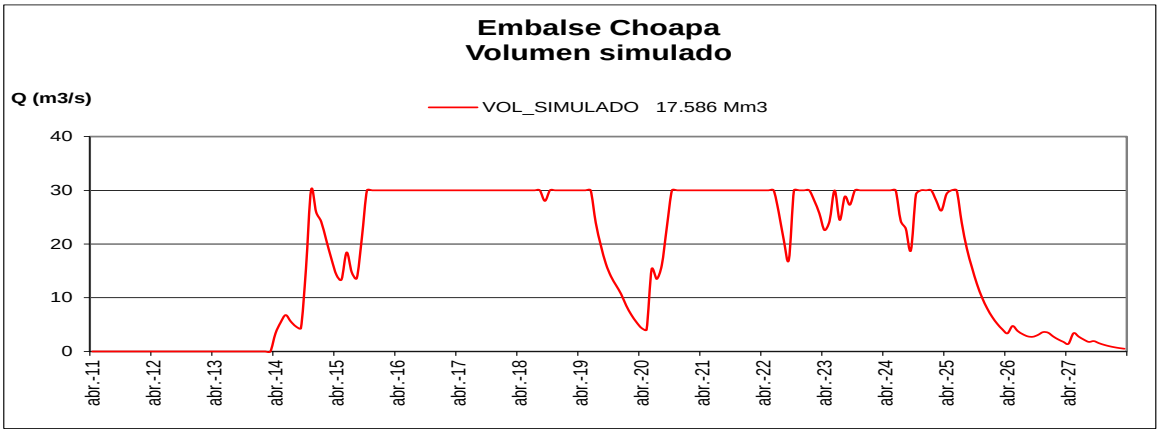


Figura 10.76
Embalse Chalinga

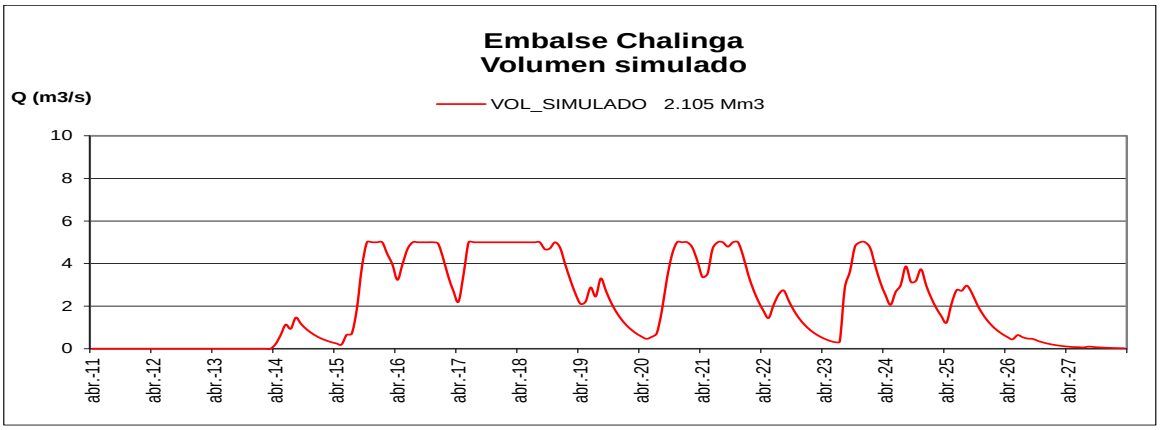
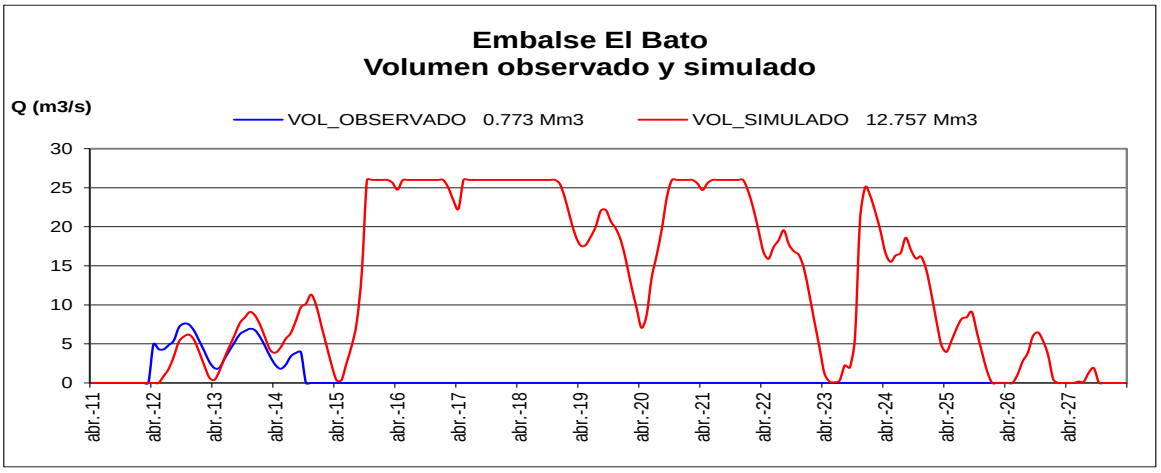


Figura 10.77
Embalse El Bato

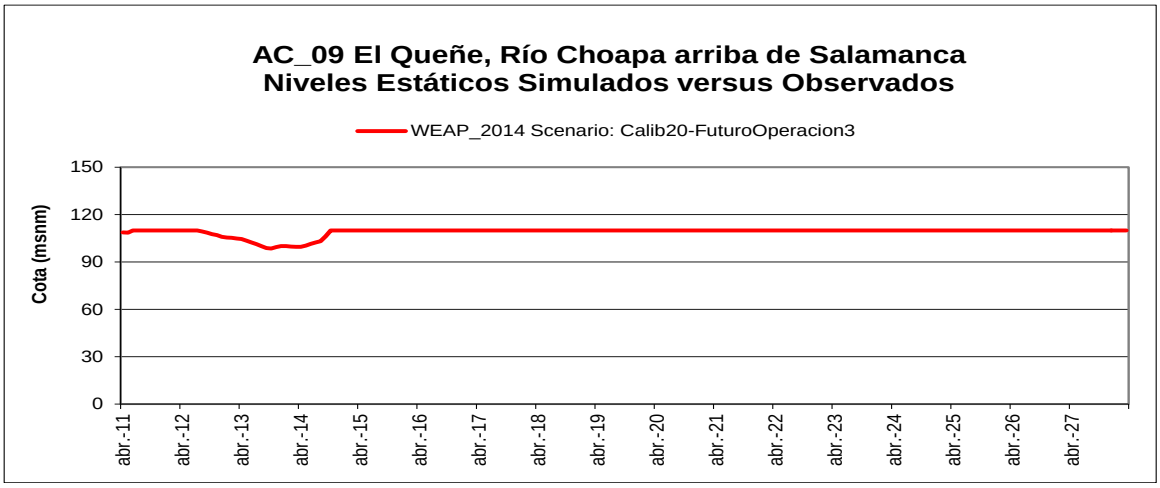


b) Planilla FuturoOperación3_Calib_SUB

Al igual que en el escenario Futuro Base 3, los acuíferos están casi todos siempre llenos, por lo que no se alcanza a apreciar el efecto de aumento de recarga que en general traen consigo los embalses. Salvo las mismas excepciones que en el escenario base, no hay variación en los acuíferos, subexplotados también en este escenario.

A modo de ejemplo, se muestra la situación del acuífero de El Queñe, donde se encuentra una parte importante de la explotación de Pelambres. En la sequía actual, la operación de dichos pozos es impuesta, mientras que en el período futuro, la extracción obedece a la regla de operación establecida en la resolución correspondiente. La extracción es superior a la futura.

Figura 10.78
Acuífero El Queñe



c) Planilla FuturoOperación3_Balance_AC

Esta planilla muestra lo mismo que la planilla Calib_SUB, pero en relación con los volúmenes. En cuanto a valores, se aprecia que hay aprox 0,12 m3/s de disponibilidad adicional para percolación, lo que hace que los acuíferos en general estén más llenos, y en definitiva acepten menor cantidad de recarga.

d) Planilla FuturoOperación3_Balance_CA

Según se puede apreciar en la Tabla de resultados, los canales presentan un aumento en el caudal captado, de casi 0,5 m3/s en promedio en total, debido a la existencia de los nuevos embalses. Ello implica también mayores entregas hacia los acuíferos (de ahí su mayor capacidad de recuperación y menor afección) y mayores entregas hacia las zonas de riego, que se ven a continuación.

En las Figuras adjuntas se observa el comportamiento del canal 25 del río Chalinga, que como promedio del período 2014-2018 capta 40 l/s más en este escenario que en el escenario base, y del canal Silvano del río Choapa, que capta 25 l/s más.

Figura 10.79
Comportamiento canal 25 río Chalinga con embalse Chalinga

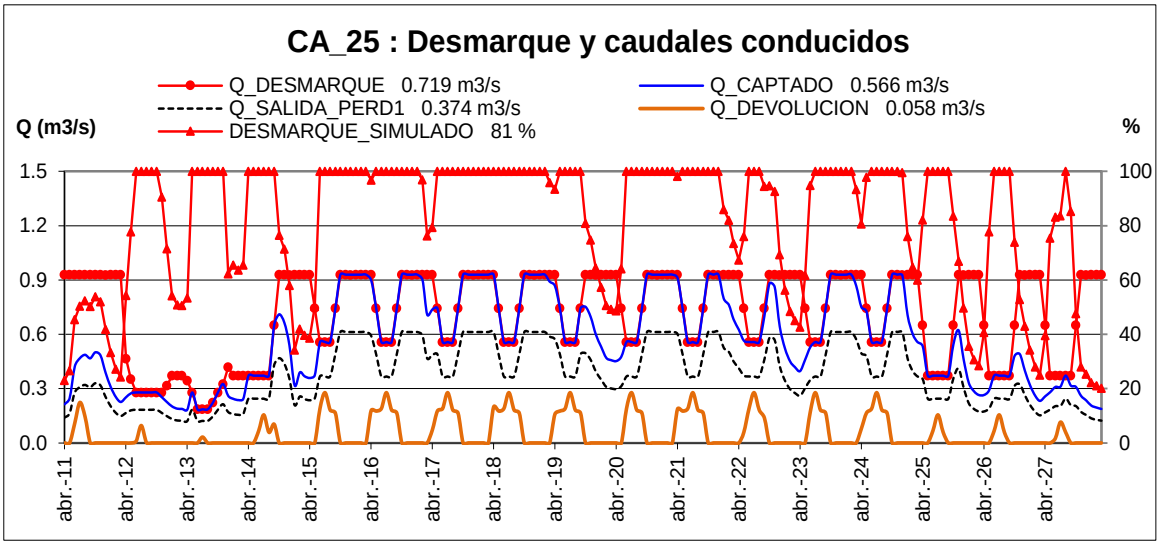
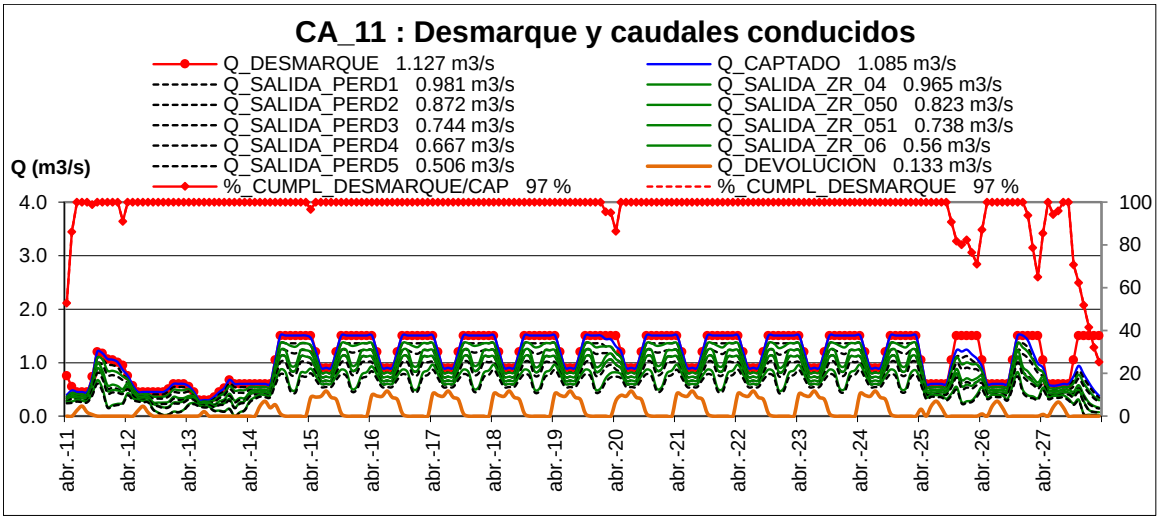


Figura 10.80
Comportamiento canal 11 (Silvano) río Choapa con embalse Totoral



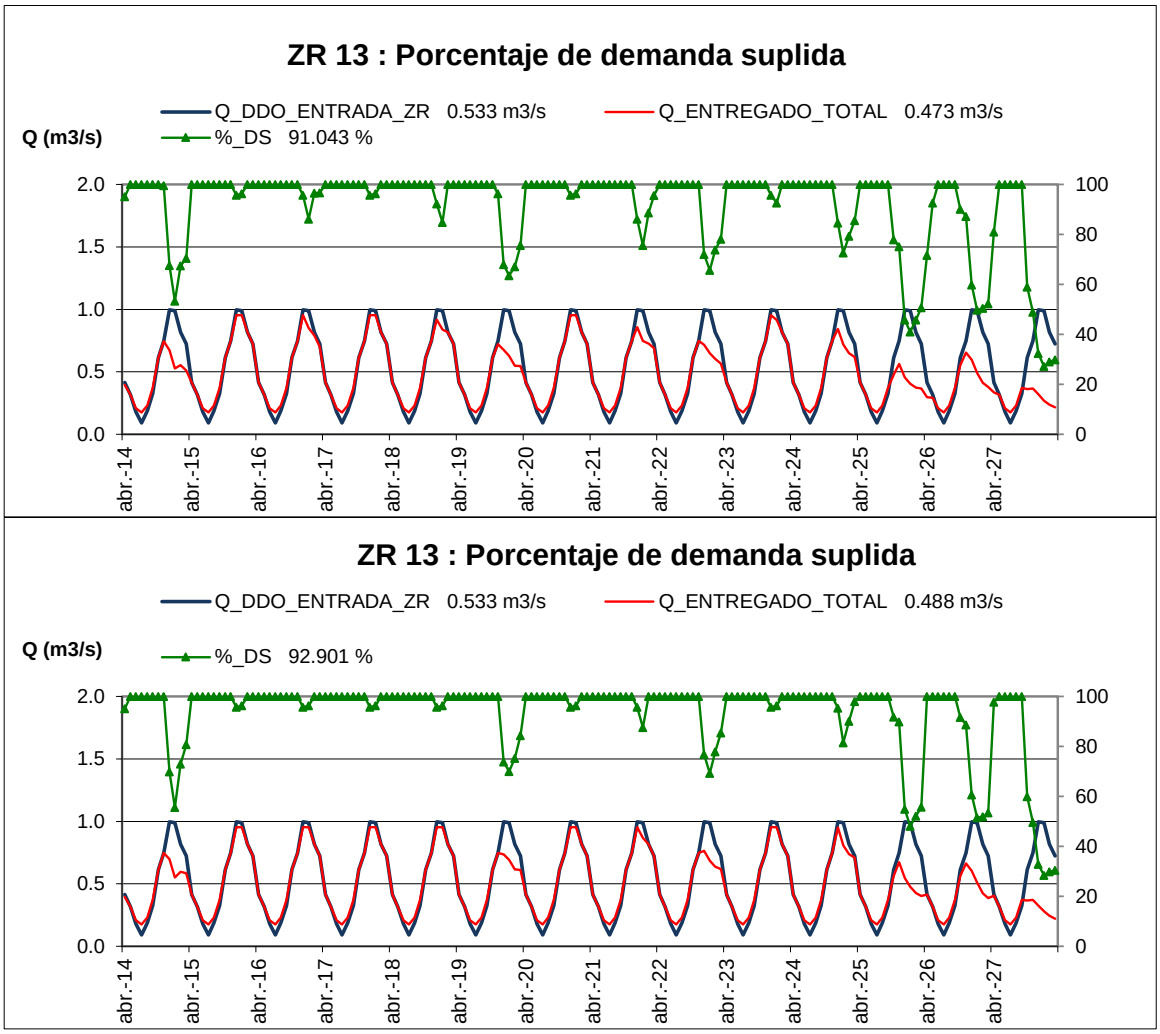
e) Planilla FuturoOperación3_Balance_ZR

Finalmente, se hace una comparación de la cobertura de la demanda suplida en las zonas de riego. Casi todas las zonas de riego del Choapa y del Chalinga se ven beneficiadas con estas nuevas obras operadas de la forma descrita, salvo la zona de Chaliga Alto y Carén, que no tienen acceso a embalse. Como ejemplo de las zonas que mejoran se muestra la zona de riego ZR-13, Chalinga Bajo, en las Figuras 10.81.

Tabla 10.39
Promedios de variables asociadas a zonas de riego

Sector	Zona de Riego	Futuro Base 1	Futuro Operación 1	Diferencia
		2014-2017	2014-2017	2014-2017
		% DS	%DS	%DS
Choapa Alto	ZR_01	100	100	0
	ZR_02	97	97	0
	ZR_03	88	89	0
	ZR_04	99	99	0
	ZR_050	98	98	1
	ZR_051	99	99	0
	ZR_052	95	95	0
Quelén	ZR_06	98	98	0
Choapa Alto	ZR_07	100	100	0
	ZR_08	97	98	0
	ZR_09	100	100	0
	ZR_10	92	92	1
Chalinga	ZR_11	76	78	2
	ZR_12	86	88	2
	ZR_13	91	93	2
Choapa Medio	ZR_14	94	95	1
	ZR_15	94	94	1
	ZR_16	95	96	0
	ZR_17	94	95	1
Est.Carén	ZR_18	65	65	0
Illapel	ZR_19	97	97	0
	ZR_20	100	100	0
	ZR_21			
	ZR_22	99	99	0
	ZR_23	98	98	0
	ZR_24	96	96	0
	ZR_25	92	92	0
	ZR_26	98	98	0
Choapa Bajo	ZR_27	100	100	0
	ZR_28	100	100	0
TOTAL		94.7	95.2	0.5

Figura 10.81
ZR-13 Chalinga Bajo Escenarios FuturoBase3 y FuturoOperación3



Lo que se observa a partir de estas figuras, es que el embalse Chalinga, que es pequeño, debiera ser operado en forma aún más eficiente para poder ser un embalse interanual, lo que resulta difícil dado su reducido volumen. En estos sectores, sólo podría ayudar a suplir en largo período de sequía el acceso al acuífero.

10.8.3 Resultados globales de escenario Futuro Operación 3

Las siguientes tablas muestran el promedio de las variables analizadas en las planillas de resultados, para el período 2014-2018.

Tabla 10.40
Promedios de variables asociadas a zonas de riego (2014-2028)

Zona de riego	Área máx. 2014	Q ddo nivel raíz	Q ddo entrada ZR	Q entregado canales	Q entregado pozos	Q entregado pp	Q recibido entrada ZR	Q recibido nivel raíz	Q percol	Q derr	%DS
	há	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
ZR_01	173.1	0.053	0.096	0.096	0.000	0.003	0.099	0.053	0.034	0.011	100
ZR_02	360.5	0.110	0.195	0.185	0.000	0.006	0.191	0.105	0.065	0.022	97
ZR_03	562.2	0.172	0.300	0.242	0.000	0.010	0.252	0.142	0.082	0.027	89
ZR_04	585.4	0.179	0.314	0.308	0.000	0.011	0.319	0.176	0.107	0.036	99
ZR_050	820.2	0.250	0.431	0.418	0.000	0.021	0.439	0.244	0.146	0.049	98
ZR_051	449.6	0.122	0.167	0.166	0.000	0.011	0.177	0.121	0.042	0.014	99
ZR_052	86.0	0.026	0.047	0.042	0.000	0.002	0.044	0.024	0.015	0.005	95
ZR_06	337.4	0.100	0.162	0.157	0.000	0.009	0.166	0.097	0.051	0.017	98
ZR_07	206.0	0.063	0.109	0.108	0.000	0.005	0.113	0.063	0.038	0.013	100
ZR_08	1470.5	0.433	0.621	0.598	0.000	0.028	0.626	0.419	0.155	0.052	98
ZR_09	16.9	0.005	0.009	0.009	0.000	0.000	0.009	0.005	0.003	0.001	100
ZR_10	430.8	0.132	0.238	0.206	0.000	0.008	0.214	0.116	0.074	0.025	92
ZR_11	148.8	0.048	0.087	0.058	0.000	0.002	0.060	0.034	0.020	0.007	78
ZR_12	410.0	0.135	0.249	0.203	0.000	0.006	0.209	0.111	0.073	0.024	88
ZR_13	871.6	0.289	0.533	0.464	0.007	0.017	0.488	0.258	0.230	0.000	93
ZR_14	1259.3	0.329	0.573	0.523	0.000	0.024	0.547	0.304	0.183	0.061	95
ZR_15	911.8	0.237	0.399	0.358	0.001	0.017	0.376	0.216	0.120	0.040	94
ZR_16	1488.7	0.389	0.664	0.616	0.000	0.014	0.630	0.364	0.200	0.067	96
ZR_17	2144.0	0.559	0.813	0.743	0.000	0.020	0.763	0.523	0.181	0.060	95
ZR_18	203.6	0.071	0.138	0.075	0.000	0.001	0.076	0.039	0.000	0.037	65
ZR_19	124.0	0.042	0.080	0.077	0.000	0.001	0.078	0.040	0.028	0.009	97
ZR_20	167.2	0.055	0.103	0.103	0.000	0.001	0.104	0.055	0.000	0.049	100
ZR_21											
ZR_22	180.0	0.048	0.088	0.087	0.000	0.001	0.088	0.047	0.030	0.010	99
ZR_23	480.0	0.128	0.224	0.217	0.000	0.005	0.222	0.124	0.073	0.024	98
ZR_24	1106.8	0.293	0.507	0.479	0.000	0.011	0.490	0.279	0.158	0.053	96
ZR_25	785.1	0.208	0.330	0.251	0.035	0.008	0.294	0.185	0.081	0.027	92
ZR_26	101.4	0.027	0.051	0.048	0.001	0.001	0.050	0.027	0.018	0.006	98
ZR_27	241.1	0.066	0.125	0.125	0.000	0.002	0.127	0.066	0.046	0.015	100
ZR_28	606.3	0.161	0.285	0.285	0.000	0.005	0.290	0.161	0.097	0.032	100
TOTAL	**16728**	**4.730**	**7.938**	**7.247**	**0.044**	**0.250**	**7.541**	**4.398**	**2.350**	**0.793**	**95.2**

Tabla 10.41
Promedios de variables asociadas a canales (2014-2028)

Canal	Q Desmarque	Q Capt	Q Pérdidas	Q Entrega ZR	Q Devol.	% Cumpl desm	% Cumpl desm / Q cap o desm sim.	Acciones	Capacidad	Cap / Acc
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	acc.	m3/s	%
CA_01	0.300	0.297	0.089	0.096	0.112	99	99	365	0.481	132
CA_02	0.085	0.084	0.030	0.054	0.000	99	99	104	0.400	385
CA_03	0.173	0.168	0.052	0.086	0.030	97	97	211	0.405	192
CA_04	0.287	0.216	0.070	0.111	0.034	79	97	350	0.240	69
CA_05	0.246	0.236	0.086	0.131	0.018	97	97	300	0.930	310
CA_06	0.246	0.238	0.078	0.098	0.063	97	97	300	0.400	133
CA_07	0.189	0.137	0.034	0.065	0.037	74	74	230	0.345	150
CA_08	0.139	0.083	0.028	0.055	0.000	65	65	169	0.820	484
CA_09	0.074	0.050	0.011	0.039	0.000	72	72	90	0.120	133
CA_10	0.888	0.853	0.245	0.426	0.182	97	97	1100	2.560	233
CA_11	1.238	1.190	0.444	0.590	0.156	97	97	1574	2.000	127
CA_120	0.210	0.203	0.057	0.114	0.032	97	97	260	0.600	231
CA_121	0.328	0.313	0.103	0.074	0.136	96	96	400	2.110	528
CA_13	0.102	0.098	0.037	0.042	0.018	97	97	124	1.100	887
CA_14	0.799	0.762	0.278	0.188	0.297	96	96	1000	1.730	173
CA_15	0.082	0.078	0.027	0.048	0.003	95	95	100	0.100	100
CA_16	0.492	0.470	0.183	0.027	0.259	96	96	600	2.000	333
CA_17	0.394	0.377	0.123	0.179	0.075	96	96	500	0.600	120
CA_18	0.435	0.417	0.165	0.129	0.122	96	96	530	1.100	208
CA_19	0.103	0.100	0.032	0.067	0.001	98	98	125	0.250	200
CA_20	0.319	0.275	0.088	0.181	0.006	89	96	397	0.330	83
CA_21	2.462	2.350	1.056	0.955	0.338	96	96	3000	3.800	127
CA_22	0.048	0.042	0.015	0.027	0.001	-	88	59	0.980	1661
CA_23	0.169	0.141	0.048	0.090	0.002	-	85	300	0.480	160
CA_24	0.385	0.320	0.096	0.144	0.080	-	85	353	0.850	241
CA_25	0.763	0.627	0.213	0.347	0.067	-	84	1052	1.337	127
CA_26	0.468	0.447	0.156	0.211	0.079	96	96	570	1.550	272
CA_27	0.410	0.392	0.136	0.234	0.022	96	96	500	1.100	220
CA_28	0.657	0.628	0.227	0.384	0.016	96	96	800	1.900	238
CA_29	0.115	0.077	0.019	0.033	0.025	71	71	150	0.480	320
CA_30	0.378	0.376	0.117	0.172	0.088	100	100	460	1.020	222
CA_31	0.533	0.529	0.212	0.103	0.214	99	99	650	2.170	334
CA_32	0.079	0.077	0.000	0.075	0.002	-	97	96	0.261	271
CA_33	0.165	0.156	0.044	0.076	0.036	-	95	201	2.449	1221
CA_34	0.032	0.031	0.004	0.004	0.022	-	96	39	0.092	236
CA_35	0.182	0.175	0.000	0.102	0.073	-	97	222	0.540	244
CA_36	0.054	0.051	0.017	0.000	0.034	-	95	66	0.228	347
CA_37	0.093	0.091	0.029	0.058	0.005	-	99	113	0.195	172
CA_38	0.214	0.203	0.073	0.092	0.038	-	95	283	0.250	88
CA_39	0.307	0.291	0.084	0.137	0.069	-	95	375	0.550	147
CA_40	0.772	0.729	0.271	0.391	0.068	-	95	940	0.980	104
CA_41	0.669	0.634	0.234	0.105	0.294	-	95	815	4.724	579
CA_42	0.312	0.300	0.117	0.155	0.027	-	96	589	0.322	55
CA_43	0.337	0.322	0.113	0.109	0.101	-	96	543	0.360	66
CA_44	0.006	0.006	0.002	0.000	0.004	-	100	8	0.500	6667
CA_45	0.360	0.357	0.118	0.125	0.114	99	99	439	1.255	286
CA_46	1.023	1.013	0.375	0.285	0.353	99	99	1246	2.038	164
CA_47	0.000	1.410	0.000	0.000	1.410	-	90	-	3.500	-
TOTAL		**18.419**	**6.039**	**7.215**	**5.165**			**22696.6**	**52.532**	

Tabla 10.42
Promedios de variables asociadas a acuíferos (2014-2028)

Acuífero	Vol Máx	Q Perc Canales	Q Perc Cauce	Q Perc ZR	Q Aflor	Q Recarga Neta	Q ET	Q Bomb Riego	Q Bomb AP	Q Bomb Min	Q Bomb Ind	Q Bomb a canales	Q Bomb Rest MLP
	Mm3	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
AC_01	0.1	0.106	0.084	0.035	0.225	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_02	2.1	0.144	0.089	0.065	0.297	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_03	12.7	0.170	0.085	0.082	0.204	0.133	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.000	-
AC_04	23.7	0.314	0.087	0.107	0.507	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_050	22.4	0.240	0.076	0.146	0.421	0.041	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.038
AC_051	21.1	0.329	0.063	0.042	0.422	0.013	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.012
AC_052	7.7	0.037	0.060	0.016	0.111	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_06	3.0	0.106	0.002	0.052	0.151	0.009	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_07	8.0	0.158	0.064	0.039	0.254	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_08	17.5	0.356	0.065	0.155	0.490	0.086	0.005	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.028
AC_09	8.4	0.081	0.068	0.003	0.129	0.023	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
AC_10	8.3	0.153	0.075	0.074	0.291	0.011	0.009	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	-
AC_11	0.2	0.046	0.010	0.020	0.048	0.027	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_12	15.1	0.113	0.006	0.073	0.170	0.022	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_13	18.6	0.246	0.009	0.230	0.448	0.036	0.027	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_14	25.7	0.417	0.054	0.182	0.974	0.023	0.020	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	-
AC_15	36.0	0.539	0.008	0.120	0.646	0.021	0.019	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_16	33.0	0.548	0.074	0.199	0.773	0.048	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_17	27.7	0.456	0.075	0.181	0.676	0.036	0.035	0.000	0.001	0.000	0.000	-	-
AC_19	3.9	0.048	0.020	0.028	0.082	0.014	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_21	0.3	0.021	0.024	0.000	0.040	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_22	3.5	0.074	0.025	0.030	0.109	0.020	0.019	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-
AC_23	11.1	0.266	0.015	0.073	0.338	0.017	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
AC_24	16.6	0.352	0.018	0.158	0.480	0.048	0.012	0.000	0.034	0.000	0.002	0.000	-
AC_25	11.8	0.188	0.019	0.082	0.179	0.109	0.037	0.035	0.036	0.000	0.004	0.000	-
AC_26	0.2	0.043	0.016	0.017	0.074	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	-	-
AC_27	19.8	0.118	0.103	0.046	0.260	0.007	0.005	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
AC_28	46.2	0.375	0.105	0.096	0.558	0.019	0.017	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	-
TOTAL	**404.7**	**6.044**	**1.399**	**2.351**	**9.357**	**0.778**	**0.361**	**0.044**	**0.148**	**0.133**	**0.009**	**0.000**	**0.087**

10.8.4 Comentario sobre el escenario Futuro Operación 3

Este escenario se caracteriza por los siguientes números: Los canales captan 18,4 m3/s, más que en el escenario anterior, pues hay más recurso superficial disponible. Entregan 7,2 m3/s a las zonas de riego, devuelven 5,2 m3/s al sistema superficial y el resto percola hacia los acuíferos.

Las zonas de riego demandan 7,9 m3/s, pues no han cambiado en relación con el escenario Futuro Base 3. Los acuíferos aportan 0,05 m3/s, similar al escenario Futuro Base 3. Tienen grandes afloramientos, de 9,4 m3/s, algo mayor que en el escenario Futuro Base 3. Las recargas netas se mantienen también en 0,8 m3/s, igualando las extracciones totales, de 0,8 m3/s.

Con ello, se logra aumentar levemente el porcentaje de demanda suplida, de 94,7% en el escenario Futuro Base 3, a 95,2% en este escenario. Las salidas al mar se mantienen casi tan altas como antes, en 10,4 m3/s.

Se puede observar que el efecto positivo de los embalses, es decir, el aumento de agua disponible en el momento en que más se requiera, depende en forma importante de la operación que se haga del recurso hídrico. En un escenario en que se mantuvieran los desmarques históricos de la condición sin embalse, los nuevos embalses no tendrían la posibilidad de aportar recursos, pasarían llenos gran parte del tiempo, y no aliviarían las necesidades mayores en sequías prolongadas.

Al aumentar las exigencias en verano, y además, guardar recursos durante el invierno, reduciendo los desmarques en esos meses, los embalses son capaces de ofrecer una adecuada regulación. En este sentido, la JV del río Choapa ha dado un ejemplo en cuanto a cultura de almacenamiento en sequía, al reducir los desmarques de invierno al 20%, ahorrando el agua para el verano.

El efecto de los embalses se percibe en los canales, que llevan más agua, también en los acuíferos, que reciben mayor recarga y se ven menos afectados en especial durante la sequía, y finalmente en las zonas de riego, que están mejor suplidas que sin embalses. A nivel local, en Chalinga, se puede apreciar que hay un aumento de 2 puntos en el porcentaje de demanda suplida de los sectores de riego asociados a este río. A nivel global, el cambio no es sustancial. Sin embargo, en esta cuenca se aprecia que los embalses no generan efectos negativos en ningún sector de aguas abajo.

Lo señalado indicaría que la solución de este valle tal vez no estaría en los embalses superficiales, sino que primero en la gestión de los acuíferos, casi todos ellos subexplotados en la actualidad.

10.9 Conclusiones y recomendaciones cuenca del Choapa

10.9.1 Algunos resultados relevantes

- La cuenca presenta actualmente un total de 17.015 ha cultivadas de las cuales 12.150 (71%) se ubican en el valle del Choapa y sus afluentes Quelén y Camisas, 3.148 (19%) en el valle del río Illapel, 1.430 (8%) en el valle del Chalinga y 287 (2%) se ubican fuera de los valles principales. Recientemente han desaparecido 55 hectárea bajo el área de inundación del embalse El Bato. Actualmente, 8.569 hás se encuentran bajo regulación del embalse Corrales y 2.653 hás bajo regulación del embalse El Bato, por lo que el 66% del área cultivada, cuenta con regulación superficial.

- Se estimó que el 67% de los cultivos corresponde a cultivos anuales, y el 33% de los cultivos corresponde a frutales. Coherentemente con estas cifras, se estimó que sólo el 23% del área cultivada es tecnificada. Este porcentaje ha aumentado notablemente en los últimos años, y muestra el gran desarrollo que la cuenca ha tenido desde el año 2004, en que el porcentaje de tecnificación era del orden de 4%.
- La cuenca total del Choapa tiene una demanda agrícola promedio neta a nivel raíz, de 4,73 m3/s, equivalentes a 149 millones de m3. A nivel de zona de riego, tomando en cuenta la ineficiencia de los métodos de riego, se requieren 7,94 m3/s equivalentes

a 250 millones de m3, lo que corresponde a una eficiencia global de riego en la cuenca, del orden de 60%.

- El caudal que efectivamente reciben las zonas de riego, totaliza 5,3 m3/s. De este caudal, 4,7 m3/s provienen de canales, 0,4 m3/s provienen de los acuíferos a través de pozos de extracción y 0,2 m3/s de la lluvia.

- Del total de caudal recibido, 2,8 m3/s llegan al nivel raíz, 1.9 m3/s percolan a los acuíferos, y 0,6 m3/s derraman, es decir, vuelven al sistema superficial.

- De este modo, las aguas no consumidas en los sectores altos vuelven al sistema, para ser entregadas nuevamente más abajo.

- Desde el año 2010 no se han observado crecidas y los caudales de los ríos se han ido reduciendo.

- Los valores observados de caudales históricos se logran representar bien mediante la modelación, salvo algunos eventos puntuales. En los acuíferos que poseen algún pozo de medición, también se pudo representar adecuadamente las variaciones de nivel estático observadas. Sin embargo son muy pocos los acuíferos que cuentan con pozos de observación, por lo que la calibración del modelo en estos acuíferos es sólo preliminar. Se sugiere aumentar las mediciones sistemáticas en pozos de observación sobre todo en los años de sequía, de modo de poder entender la forma en que funcionan, calibrar el modelo en estos puntos, y finalmente lograr una buena gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

- A pesar de los últimos años de sequía, se observa que la oferta que genera la cuenca es capaz de mantener el sistema de demandas razonablemente bien suplido.

- De acuerdo con la revisión de los resultados preliminares del estudio CORFO-Hidrogestión que cuenta con la información hidrogeológica más actualizada de la cuenca, pero aún está en ejecución, los acuíferos del río Choapa y afluentes totalizarían un volumen de unos 405 millones de m3, de los cuales 323 millones de m3 ((73%) corresponden al valle del río Choapa, 75 millones de m3 (19%) al valle del río Illapel y 34 millones de m3 (8%) al valle del río Chalinga. Los acuíferos más importantes se encuentran en el río Choapa.

- En la cuenca del Choapa hay 2.422 l/s de derechos subterráneos constituidos, de los cuales 1.323 l/s se estima que serían para riego, 364 l/s están constituidos para agua potable, 141 l/s para la minería y 34 l/s para fines industriales. Los otros 560 l/s restantes corresponden a los derechos de los pozos de restitución que posee Minera Los Pelambres para devolver agua desde el acuífero de Choapa Alto, al río.
- Para los acuíferos se ha estimado una recarga potencial y una recarga neta o efectiva. La recarga potencial está compuesta por todas las aguas disponibles para infiltrar, que son las pérdidas desde canales, las percolaciones desde zonas de riego y las

percolaciones desde el cauce. La recarga neta es la parte que realmente logra infiltrar, la que en muchos acuíferos es nula, debido a que se encuentran llenos y sin uso.

10.9.2 Visión sinóptica de los resultados de los escenarios

En la Tabla 10.43 adjunta se presentan los resultados más importantes de cada escenario, que muestran en cifras lo que se ha descrito en los acápites anteriores.

Tabla 10.43
Visión sinóptica resultados escenarios estudiados (m3/s)

Cuenca Choapa							
Escenario	**Calibración**	**Futuro Base 1**	**Operación 1**	**Futuro Base 2**	**Operación 2**	**Futuro Base 3**	**Operación 3**
Período	2000-2014	2014-2017	2014-2017	2014-2017	2014-2017	2014-2028	2014-2028
Área de riego	16791	16791	16971	16791	16791	16791	16791
Caudal captado por canales	16.1	7.8	7.9	6.6	7.5	18.0	18.4
Caudal entrada ZR	6.1	4.3	4.4	3.8	4.3	7.2	7.2
Caudal demanda ZR	7.1	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
Caudal aporte acuíferos	0.1	0.2	0.3	0.2	1.3	0.05	0.05
Devolución canales	4.4	1.1	1.1	0.7	0.8	4.9	5.2
Afloramiento subt	8.7	3.2	3.1	2.5	2.2	9.2	9.4
Recarga Neta	0.7	1.1	1.3	1.1	2.0	0.8	0.8
Total extracción bombeo	0.7	1.1	1.3	1.2	2.2	0.8	0.8
% Demanda Suplida	91.6	70.9	71.6	66.3	71.2	94.7	95.2
Salidas al mar	10.6	2.3	2.3	1.1	1.1	10.5	10.4

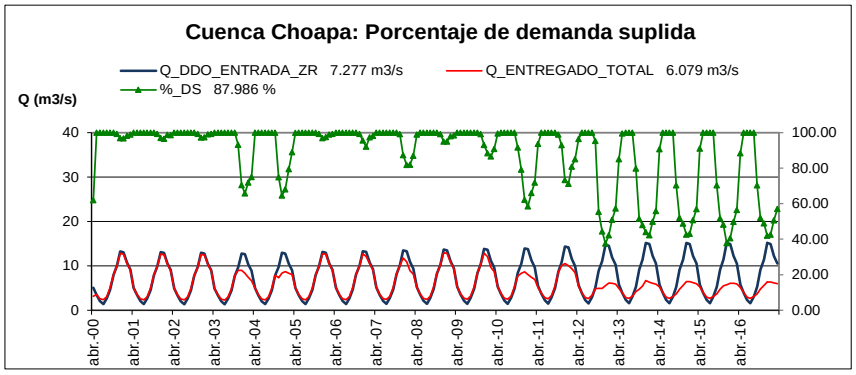
Finalmente, en la Figura 10.82 siguiente se presenta en forma gráfica el porcentaje de demanda suplida a nivel de la cuenca completa, como serie de tiempo, para cada escenario estudiado, donde se aprecia visualmente todo lo anteriormente señalado.

En todas las figuras se aprecia claramente que esta cuenca está bien suplida en épocas normales, pero su cobertura disminuye fuertemente durante la sequía, logrando regar un área de aproximadamente 60% del área total.

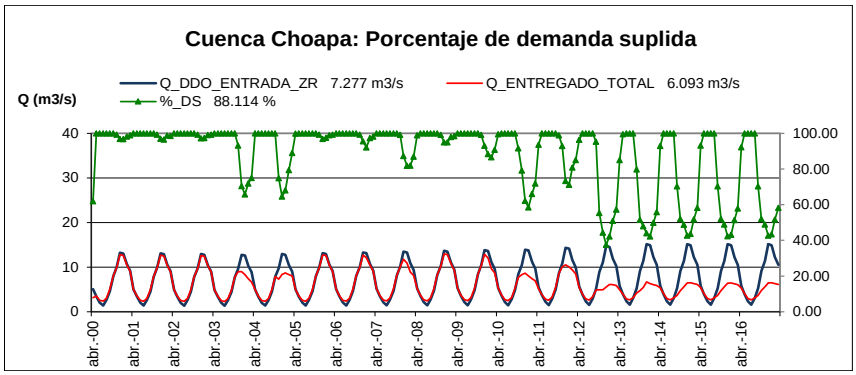
Específicamente, se aprecia el bajo requerimiento que significa para los acuíferos el suplir los desmarques mínimos deseados, en una situación de sequía como la actual. Prácticamente, dicho desmarque estaría suplido con aguas superficiales. Si la sequía se hiciera más severa, los acuíferos estarían más exigidos, y también serían capaces de entregar el recurso solicitado, como se aprecia en el escenario Futuro Operación 2, aumentando sensiblemente el porcentaje de demanda suplida en la cuenca durante la sequía. Finalmente, se aprecia el efecto de los embalses, con un efecto local importante, pero sin que se aprecie afecciones a sectores de riego de aguas abajo.

Figura 10.82
Porcentaje de demanda suplida en escenarios estudiados

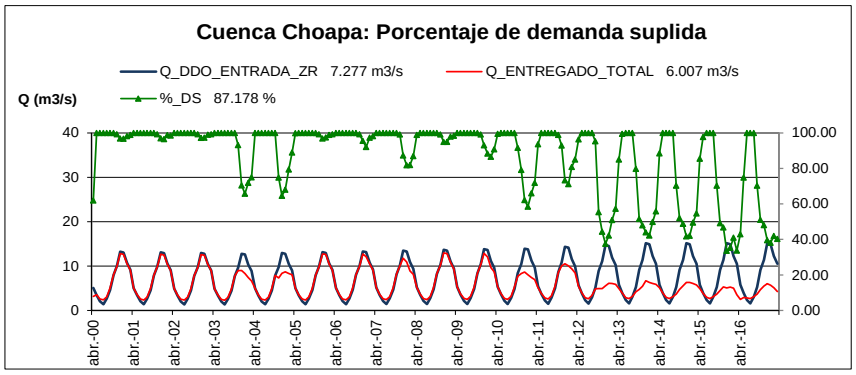
Calibración y Futuro Base 1



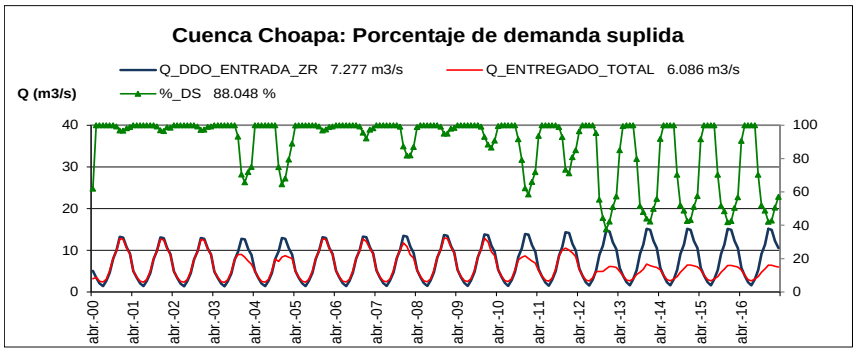
Futuro Operación 1



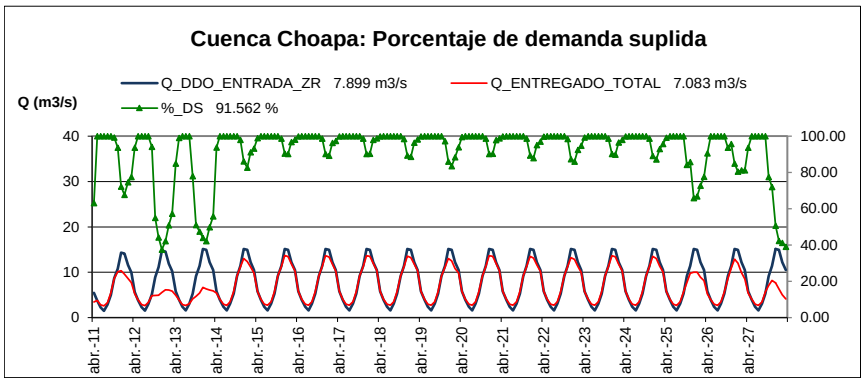
Futuro Base 2



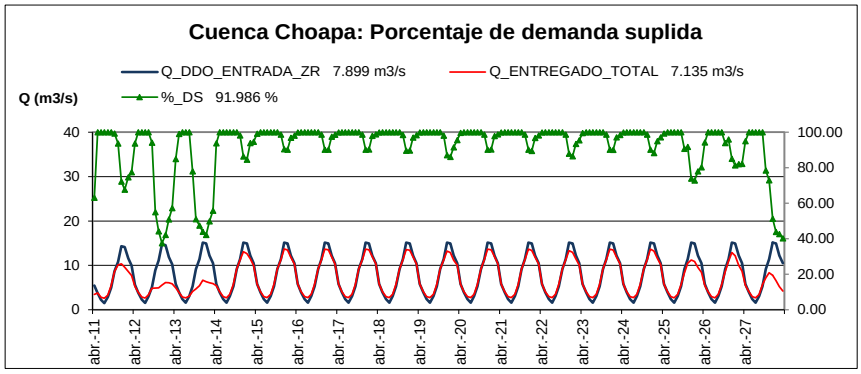
Futuro Operación 2



Futuro Base 3



Futuro Operación 3



10.9.3 Conclusiones acerca de los escenarios simulados

El escenario histórico de calibración sirve para describir el sistema hasta la fecha actual, conocerlo y calibrar el modelo en el período seleccionado, entre abril 2000 y mar 2014. En el escenario de calibración se observa que en los últimos años de sequía, se han reducido los desmarques para la distribución del agua superficial, y no se ha recurrido a los acuíferos, que se encuentran distribuidos, con mayor o menor tamaño, en toda la cuenca.

Así, mientras en las estaciones fluviométricas han mermado significativamente los caudales, como se aprecia en las figuras del escenario de calibración, los acuíferos, por el contrario, en general han mantenido sus niveles históricos de lleno total.

Esta situación se ha mantenido en el tiempo, debido a que hay muy pocos derechos para riego constituidos en estos acuíferos. El temor de que la explotación de aguas subterráneas afecte el agua de los cauces, es decir, los derechos superficiales, ha inhibido a la administración para constituir nuevos derechos subterráneos, incluso para explotarlos durante la sequía. Los acuíferos fueron declarados área de restricción y más aún, área de prohibición, en vista de la muy probable pero poco documentada interacción superficial-subterránea que presentaría el sistema. De esta forma, se ha desaprovechado el potencial de almacenamiento que representa el recurso subterráneo, que en esta cuenca no es despreciable, como también, el potencial de recarga que tiene esta cuenca. De esta forma, los acuíferos de esta cuenca son hoy un recurso subexplotado.

Lo que posiblemente ha frenado la explotación de los acuíferos, es, por un lado, la experiencia extrema que se vive en el valle del Copiapó, y que no guarda ninguna relación con lo que ocurre en el Choapa, y, por otro lado, el desconocimiento de las características de estos acuíferos y de su comportamiento en relación con el recurso superficial. Hasta muy recientemente no se estudiaron las propiedades básicas de profundidad del acuífero en la cuenca, de modo de poder estimar el volumen de agua existente en ellos. Afortunadamente, se encuentra en ejecución un estudio hidrogeológico integral por parte de CORFO, que está siendo realizado por la empresa Hidrogestión, del cual en el presente estudio al menos se han podido aprovechar las curvas batimétricas del basamento rocoso, como se ha señalado antes, y que han sido consideradas para estimar el volumen de almacenamiento de cada acuífero en la presente modelación.

En la siguiente Tabla 10.44 se vuelven a presentar los volúmenes estimados de los acuíferos, con el fin de que sean considerados como alternativa frente a la construcción de nuevos embalses, pues pueden apoyar en forma importante la disponibilidad del recurso, al menos en una sequía.

Tabla 10.44
Estimación del volumen útil de los acuíferos según basamento rocoso Hidrogestión

Acuífero	**Volumen WEAP**
WEAP	**Mill m3**
	S=0.08
AC-01	0.07
AC-02	2.06
AC-03	12.71
AC-04	23.71
AC-050	22.36
AC-051	21.13
AC-052	7.75
AC-06	3.01
AC-07	8.00
AC-08	17.54
AC-09	8.41
AC-10	8.34
AC-11	0.16
AC-12	15.09
AC-13	18.63
AC-14	25.71
AC-15	36.00
AC-16	32.99
AC-17	27.68
AC-19	3.90
AC-21	0.32
AC-22	3.49
AC-23	11.06
AC-24	16.64
AC-25	11.82
AC-26	0.15
AC-27	19.77
AC-28	46.19
TOTAL	**404.70**

Justamente en este sentido, uno de los aspectos que interesaba explorar en base a los diferentes escenarios, era la posibilidad de recurrir a los acuíferos, para mejorar el desmarque cuando éste fuera muy reducido.

Contra la validez generalizada de cualquier conclusión, se puede argumentar que atenta la baja cantidad de controles de nivel que existen en los acuíferos en el valle del Choapa. Lo señalado es efectivo. Sin embargo, en los controles existentes, el modelo calibra razonablemente bien, como también en los controles superficiales y embalses, de modo que al menos puede decirse que el modelo entrega una idea de lo que podría ocurrir en las condiciones actuales, y con ello permitir estimar lo que podría ocurrir condiciones de explotación distintas de las actuales.

Otro aspecto que interesaba explorar, era el efecto de los embalses superficiales, los cuales en ningún tipo de estudio son analizados en cuanto a sus efectos globales sobre la cuenca, sino que sólo en cuanto a sus efectos locales, efectos que en general, técnicamente son positivos, pero económicamente no se justifican. Sin embargo, son sólo los efectos locales los que se evalúan, mientras que un modelo como el desarrollado en el presente estudio permite obtener una visión más global de lo que significa para toda la cuenca incorporar un embalse superficial en algún lugar de ella.

En el escenario histórico de calibración, lo que se observa en los pozos de control, es que los niveles históricos de los acuíferos no varían, salvo levemente y localmente en los acuíferos del río Choapa Bajo, en la temporada 2012/2013, y prácticamente sin tendencia de descenso en los acuíferos del río Illapel.

El modelo, por su parte, muestra que los acuíferos del río Choapa, casi en su totalidad, actualmente no presentarían señales de descenso, ni por sequía, ni por uso, pues hay muy pocos derechos destinados al uso en estos acuíferos. Las excepciones son el sector de Cuncumén y el sector de El Queñe, sectores donde hay explotación, y donde se apreciaría reciente e incipientemente el efecto de la sequía. En cuanto al río Illapel, sólo hay efectos recientes, aguas abajo de la ciudad de Illapel, que consisten en una leve variablidad interanual del nivel. El acuífero pequeño de El Peral parecería más afectado. En el río Chalinga, se observa que la cabecera estaría afectada por la sequía, mientras que el sector más bajo no presentaría afección.

En tales condiciones, de acuerdo con la inquietud de la Junta de Vigilancia del río Choapa, se buscó analizar si los canales del río Choapa podrían suplirse con aguas subterráneas, en las zonas sobre las entregas del embalse Corrales y bajo Pintacura, con un desmarque mínimo deseado de verano de 40%, si los canales del medio se suplían con 40% desde el embalse. Para ello se configuraron los escenarios Futuro Base 1 y Futuro Operación 1. Sin embargo, lo que se observa en este escenario, es que a los canales del río Choapa prácticamente no les falta agua para suplir el desmarque mínimo deseado de verano, de 40% en dichas condiciones de sequía, por lo que no se generaría demanda hacia los acuíferos en estas condiciones.

En el escenario Futuro Base 1, que solamente prolonga la sequía actual, no hay grandes afecciones a los acuíferos, ni tendencias de descenso en ningún acuífero. Las afecciones de los acuíferos Cuncumén y El Queñe se mantendrían sin llegar a estados alarmantes después de 3 años, el comportamiento de los acuíferos El Peral y Zapallar también se mantendría. Ningún acuífero mostraría descensos significativos.

Por lo señalado, sobre este escenario Futuro Base 1 se estableció un escenario Futuro Operación 1, el cual consistió en acotar la demanda de todas las zonas de riego a un desmarque deseado de 40% máximo en verano, y desmarques de ahorro (20%) en invierno, y apoyando desde los acuíferos el agua requerida adicional, sin restricción, para cubrir dicha demanda.

En el escenario Futuro Operación 1 se observa que prácticamente no hay cambios relacionados con los acuíferos, pues ellos no son significativamente requeridos. Aportan sólo 157 l/s como promedio del período 2014-2028. El agua superficial alcanza para suplir casi completos los desmarques mínimos deseados, entre 40% en verano y 20% en invierno.

Posteriormente se estableció un escenario Futuro Base 2 más exigente que el Futuro Base 1, asumiendo que la hidrología de los tres años futuros sería de sólo el 70% de la hidrología de los tres años últimos. En dicho escenario, los acuíferos reciben menos recarga y se ven más exigidos.

Sobre este escenario se probó el escenario de Operación 2, en que se desea lograr el mismo desmarque mínimo, recurriendo a los acuíferos. En este escenario, los acuíferos aportarían 1093 l/s adicionales a la extracción que permiten los derechos, de 160 l/s como promedio. De acuerdo con las características modeladas, podrían aportar sin problemas este caudal, entregando un porcentaje de su volumen, y descendiendo sus niveles, pero estarían lejos de colapsar, salvo el acuífero de Zapallar, que es de cabecera y muy pequeño.

Finalmente se configuró un escenario 3 con dos nuevos embalses, los cuales requieren de una política adecuada de operación para hacer sensible su aporte. Dicha política consiste en aplicar desmarques exigentes en verano, de modo que los embalses bajen su nivel, y luego, aplicar desmarques reducidos en invierno, que permitan el embalsamiento de las aguas excedentarias. De esta forma, realmente se produce una regulación del recurso, que aumenta la disponibilidad, con lo que aumenta el agua en los canales, en los acuíferos y también la cobertura de las zonas de riego. No obstante, el aumento del porcentaje de demanda suplida no fue significativo en este escenario, llegando sólo a 2% en el valle de Chalinga, y a 0.5% al nivel global de la cuenca. Se aprecia que los embalses no tienen efectos negativos sobre los sectores de riego de aguas abajo.

10.9.4 Recomendaciones a partir del análisis de los escenarios simulados

La calibración del modelo ha servido para entender el funcionamiento del sistema, tanto en tiempos hidrológicos normales como en sequía.

La modelación es una herramienta que puede llegar a ser bastante confiable si se sustenta en un buen conocimiento de la realidad. En la cuenca del Choapa hay una cantidad adecuada de controles superficiales de caudal, enfocados hacia la determinación de los caudales de entrada al sistema, intermedios, y de salida. Algunas estaciones intermedias que han sido suspendidas, como Choapa en Limáhuida, por presentar un régimen alterado, cumplirían un fin importante desde el punto de vista de modelación, al representar el régimen alterado.

Los controles que son muy escasos en la cuenca, son los subterráneos. Para la modelación se definieron 26 tramos acuíferos, de los cuales sólo 5 tienen control de nivel estático. En vista de la conveniencia y la necesidad de explotar los recursos subterráneos, como complemento a los recursos superficiales, en especial en épocas de sequía como la actual, es necesario establecer más controles en el acuífero, de modo de monitorear su comportamiento y gestionar su uso en tiempo real.

Los acuíferos más importantes se sitúan en el río Choapa, Alto, Medio y Bajo. También hay acuíferos, aunque menores, en los ríos Chalinga e Illapel y esteros Camisas y Quelén. Todos tienen alguna capacidad de explotación. Los acuíferos donde no convendría aumentar la explotación actual, serían los de Zapallar y El Peral.

En cuanto a las zonas de riego agrícola, las mejor suplidas son las del Choapa Bajo, que no resienten en forma importante ni siquiera la sequía, y el Choapa Medio, que se surte bien en condiciones normales, pero que se resiente en las temporadas altas, desde 2012/2013, presentando fallas. También se pueden considerar bien surtidas, en años normales, las zonas de riego del río Choapa Alto, que comienzan con fallas en la temporada 2011/2012.

También las zonas de riego del río Illapel están bien suplidas en años normales, mostrando problemas a partir de la temporada 2012/2013.

En oposición a esto, se observa que las zonas de riego del río Chalinga están crónicamente mal suplidas, y peor aún en los últimos años de sequía, lo que muestra que las áreas que se pretende cultivar superan las posibilidades del recurso superficial. El valle de Chalinga también presenta acuíferos no despreciables, que sería conveniente explorar, según se puede observar en la Tabla 10.40 más arriba.

La recomendación para todos los sectores es hacer uso de sus acuíferos, como complemento al agua superficial, y bajo estricta supervigilancia de la evolución de los niveles estáticos, especialmente en los actuales tiempos de sequía. Los acuíferos constituyen una capacidad de almacenamiento y de regulación que la cuenca necesita, y que tiene desde ya a su disposición. Además, en la actualidad, están subexplotados.

La limitante para acceder a los acuíferos es administrativa, pero puede ser revertida, al menos en épocas de extrema sequía, mediante los decretos de escasez.

En cuanto a los embalses, se desprende la importancia de operarlos con reglas de operación que reduzcan la captación en el invierno, y establezcan un volumen máximo a distribuir en el verano, de modo que puedan cumplir una función de regulación al menos anual, y de acuerdo con las reglas de operación, en lo posible también interanual.

Para mejorar la gestión del recurso hídrico en esta cuenca, y entrar en la era de la gestión integrada, es de especial importancia que existan organizaciones de usuarios que puedan dotarse de conocimiento y de herramientas que le permitan monitorear y proyectar adecuadamente el sistema, y tomar decisiones adecuadas, esto significa que no sobreexploten, pero tampoco subexploten, sus recursos hídricos, pues son renovables. En

ese contexto, la modelación integrada ofrece una muy buena herramienta, y el presente estudio constituye un buen comienzo.

11. Modelo de pronóstico HBV

Dentro de la oferta de trabajo hecha por el consultor, se incluía como aspecto adicional de interés, un modelo de pronóstico de derretimiento de nieves aplicado en forma de piloto a la cuenca del río Elqui.

El modelo ofrecido y efectivamente utilizado en el presente trabajo es el modelo llamado HBV, en su versión light, que está disponible en forma gratuita en internet.

El modelo HBV (Bergström 1976) fue desarrollado por el SMHI (Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia), y ha sido ampliamente utilizado durante los últimos 20 años para las simulaciones de escurrimiento de origen nival. El modelo no sólo ha sido utilizado en Suecia (Bergström, 1990, 1992), sino que también en otros 30 países, a veces en versiones modificadas. El software ha sido utilizado en diversos proyectos de investigación, por parte de diferentes grupos (por ejemplo, Konz y Seibert, 2010; Seibert y Beven, 2009; Steele-Dunne et al, 2008).

El modelo puede ser utilizado para generar la escorrentía histórica en cuencas no controladas, a partir de su calibración en una cuenca con control fluviométrico. También puede servir para generar la escorrentía esperada en una temporada futura determinada, si se puede conocer o anticipar la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial en dicho período futuro. En la Región de Coquimbo, la precipitación de la temporada de verano tiene alta probabilidad de ser nula, y las temperaturas y evapotranspiración pueden ser estimadas en base a registros históricos, por lo cual este modelo resulta apto para ser usado como modelo de pronóstico.

11.1 Objetivo de la aplicación del modelo HBV

En el presente estudio, el objetivo del trabajo con el modelo HBV fue contar con una herramienta de pronóstico de caudales, que permitiera estimar la escorrentía de la temporada de riego octubre-abril en la estación Elqui en Algarrobal, en función de las precipitaciones líquidas o sólidas del invierno saliente.

El modelo WEAP Elqui opera con una hidrología de entrada generada por el modelo MPL, u obtenida mediante un modelo de transposición de caudales nivales, ambos basados en estadísticas históricas, ninguno de los cuales permite hacer pronósticos de derretimiento nival.

El modelo HBV es un modelo que simula el proceso de derretimiento nival, y se puede utilizar, por lo tanto, para pronosticar la escorrentía nival de la siguiente temporada, la que se obtiene a partir de datos históricos de precipitaciones, temperatura y evapotranspiración hasta septiembre, precipitación igual a cero desde octubre a abril, y estimaciones de la temperatura y evaporación en el período octubre-abril.

En el presente trabajo, se desarrolló un modelo HBV para cada una de las subcuencas

aportantes definidas en el modelo WEAP. En cada subcuenca se calcula una escorrentía de derretimiento, la que se introduce como hidrología de entrada al modelo WEAP, el cual aporta todas las demandas y genera todas las interacciones, para llegar finalmente a un determinado caudal en la estación Elqui en Algarrobal. Aquí, la estadística pronosticada se compara con los caudales efectivamente observados en la estación.

El proceso de calibración consistió en adecuar los parámetros de los diversos modelos HBV, hasta lograr reproducir los caudales de la estación Elqui en Algarrobal.

El posterior proceso de pronóstico se realizó con los valores de los parámetros calibrados. Se presentan los pronósticos de todos los años entre 2011 y 2014, incluido el pronóstico para la temporada actual octubre 2014-abril 2015.

11.2 Breve descripción del modelo HBV

La sigla HBV responde a "Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning" (Agencia Hidrológica Departamento de Balance de Aguas).

El modelo HBV tiene las siguientes características básicas:

- es un modelo conceptual de simulación de escorrentía
- posee una estructura simple
- es semi-distribuido, i.e., permite dividir la cuenca en subcuencas, zonas de elevación y de vegetación
- es simple de entender, aprender y aplicar
- ha sido aplicado en muchas cuencas en Suecia y en otros países
- da buenos resultados en la mayoría de sus aplicaciones
- se ha hecho una herramienta estándar para estudios de escorrentía en los países nórdicos
- necesita una cantidad moderada de datos de entrada
- corre en un PC básico (286 mega RAM o más)
- existe en diferentes versiones (sueca, noruega, finlandesa, suiza, …)

a) Datos de entrada

El modelo opera con los siguientes datos de entrada, que deben ser leídos cono vector columna, y otros directamente desde de la interfaz:

- Estadística de temperaturas medias diarias

Se necesitan datos de temperatura para cuencas con aportes nivales. La temperatura se calcula como el promedio ponderado a partir de los datos de estaciones representativas de la cuenca. La cuenca se divide en diferentes zonas de elevación. Para cada zona la temperatura se puede corregir para tomar en cuenta su variación en función de la elevación sobre el nivel del mar.

- Precipitaciones diarias

La cuenca se divide en diferentes zonas de elevación. Para cada zona la precipitación se corrige para tomar en cuenta su variación en función de la elevación sobre el nivel del mar.

- Evapotranspiración potencial mensual

Estimaciones de la evapotranspiración potencial se pueden obtener por cálculo con la fórmula de Penman por ejemplo o bien a partir de mediciones de evaporímetros. En general son suficientes los valores medios mensuales. El modelo hace una distribución diaria obtenida a partir de la temperatura.

- Otros datos a ingresar:
  - Caudales observados para calibrar
  - Curva hipsométrica (en base al SIG de la cuenca), con la cual se define el número de bandas en que se subdivide la cuenca (hasta 20 bandas).
  - Orientación de las laderas (opcional)
  - Existencia de glaciares (opcional)

b) Subrutinas

El modelo tiene tres subprocesos o subrutinas obligadas, más una subrutina de uso opcional, de las que cada una simula un proceso específico. Los subprocesos se refieren a:

- Acumulación y derretimiento de nieve
- Procesos de acumulación y entrega de humedad en el suelo
- Procesos de balance en el subsuelo y en el acuífero
- Desfase del hidrograma.

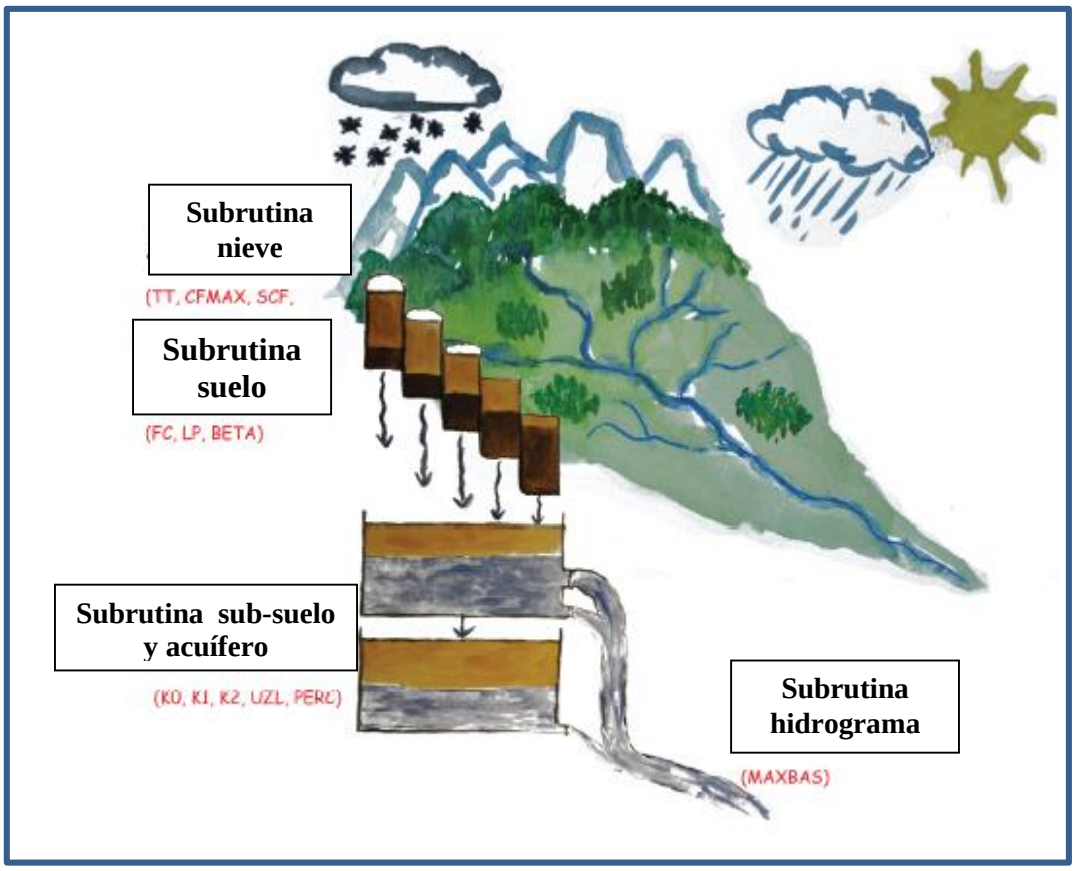
Los procesos se han esquematizado en la Figura 11.1.

Cada uno de los procesos tiene los requerimientos de datos de entrada y genera la información de salida que se presenta en la Tabla 11.1 adjunta.

Tabla 11.1
Datos de entrada y resultados de las subrutinas del modelo HBV

Subrutina	Entrada	Salida
Subrutina de nieve	Precip., Temp.	Nieve acumulada, derretimiento
Subrutina de suelo	Evap. Pot., Precip., Derretimiento	Evap. real, Humedad suelo, Recarga subt.
Subrutina subsuelo y acuífero	Recarga subt., (Evap. Pot.)	Escorrentía, Nivel subt.
Subrutina hidrograma	Escorrentía	Escorrentía final

Figura 11.1
Estructura de subrutinas y parámetros del modelo HBV



Los procesos se pueden describir someramente de la siguiente forma:

i) Subrutina de nieve

1. Acumulación de las precipitaciones en forma de nieve si la temperatura es inferior a la temperatura umbral TT
2. Derretimiento de nieve empieza cuando la temperatura es superior a la temperatura umbral TT, calculado con el método grado-día.
3. El manto nival retiene el agua derretida hasta un monto-umbral correspondiente a una porción CWH del equivalente en agua del manto. Cuando la temperatura toma valores por debajo de TT, ésta agua se vuelve a congelar.

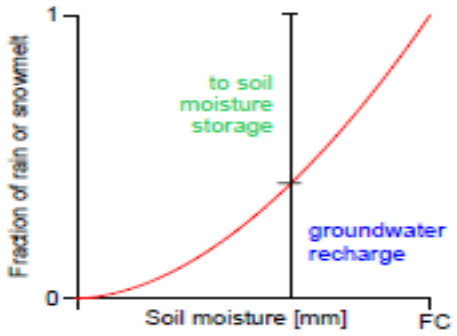
ii) Subrutina de suelo

Esta rutina determina que porción del monto de agua disponible (por precipitación y/o derretimiento) contribuye al aumento de la humedad del suelo o a la recarga.

Recarga / Agua disponible = (Humedad / FC) ^ beta

En la Figura 11.2 se aprecia la porción que humedece el suelo y la que percola profundamente, en función del grado de humedad del suelo.

Figura 11.2
Destino del agua del suelo



Por otra parte el modelo evalúa la cantidad de agua que se evapora desde el suelo.

iii) Subrutina de subsuelo y acuífero

El modelo utiliza el concepto sencillo de embalse lineal que corresponde a decir que en un momento dado t la escorrentía generada por la cuenca Q(t) es proporcional al agua almacenada S(t), de tal manera que la solución de la ecuación diferencial de balance es:

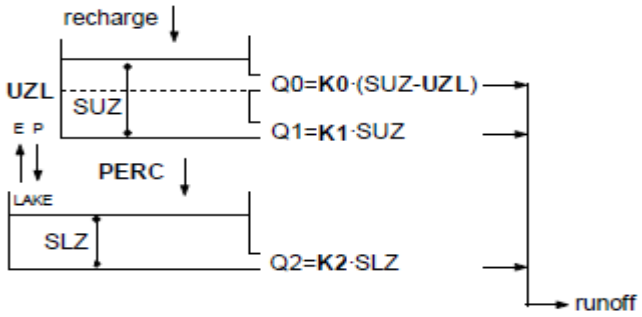
$$Q(t) = Q(t=0) * e \wedge -(t-t0) * K$$

El modelo considera 2 embalses:

- el primer embalse subsuperficial tiene 2 salidas: la primera se desactiva cuando el almacenamiento baja más que el valor umbral UZL.
- el segundo embalse subterráneo tiene una sola salida.

El embalse subsuperficial está caracterizado por 4 parámetros, y el embalse subterráneo por 2 parámetros según se muestra en la Figura 11.3 a continuación.

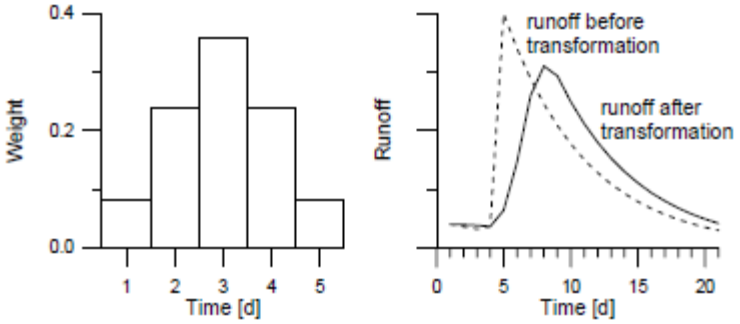
Figura 11.3
Parámetros de respuesta desde subsuelo y acuífero



iv) Subrutina de hidrograma

El caudal de escorrentía generado en un paso tiempo es distribuido en los siguientes pasos de tiempo mediante una función de ponderación de tipo triangular. El parámetro que caracteriza el triángulo es su ancho basal MAXBAS. El efecto de la función de ponderación se aprecia en la Figura 11.4.

Figura 11.4
Efecto de la función de ponderación de la escorrentía



c) Resultados

En definitiva, los resultados del modelo son los siguientes:

- Escorrentía simulada (en mm) versus observada (cuando ésta existe)
- Aporte de la zona no saturada superior
- Aporte de la zona no saturada inferior
- Medida del error de ajuste (coeficiente de determinación)

11.3 Pre calibración por grupo de subcuencas

En la Figura 11.5 adjunta se presentan todas las subcuencas definidas desde la cabecera de la cuenca hasta la estación Elqui en Algarrobal. Las mismas subcuencas también se muestran en la Tabla 11.2, que incluye los parámetros preliminares de calibración.

Para obtener dichos parámetros preliminares, se tuvo en consideración dos aspectos:

a) Los parámetros resultantes de la calibración del modelo en 3 estaciones fluviométricas, que fueron las siguientes:
   - Afluentes Embalse La Laguna, que se usó con estadísticas de precipitación, temperatura y evapotranspiración de la estación meteorológica La Laguna
   - Río Cochiguaz en El Peñón, que se usó con estadísticas de precipitación, temperatura y evapotranspiración de la estación La Ortiga

- Estero Derecho en Alcohuaz, que también se usó con estadísticas de precipitación, temperatura y evapotranspiración de la estación meteorológica La Ortiga.

b) Los parámetros resultantes de una precalibración realizada con apoyo en las estadísticas sintetizadas para todas las demás subcuencas afluentes, en base al modelo MPL o modelo nival, según se estimaron estos aportes para MAGIC y también para WEAP.

Figura 11.5
Subcuencas para modelo HBV

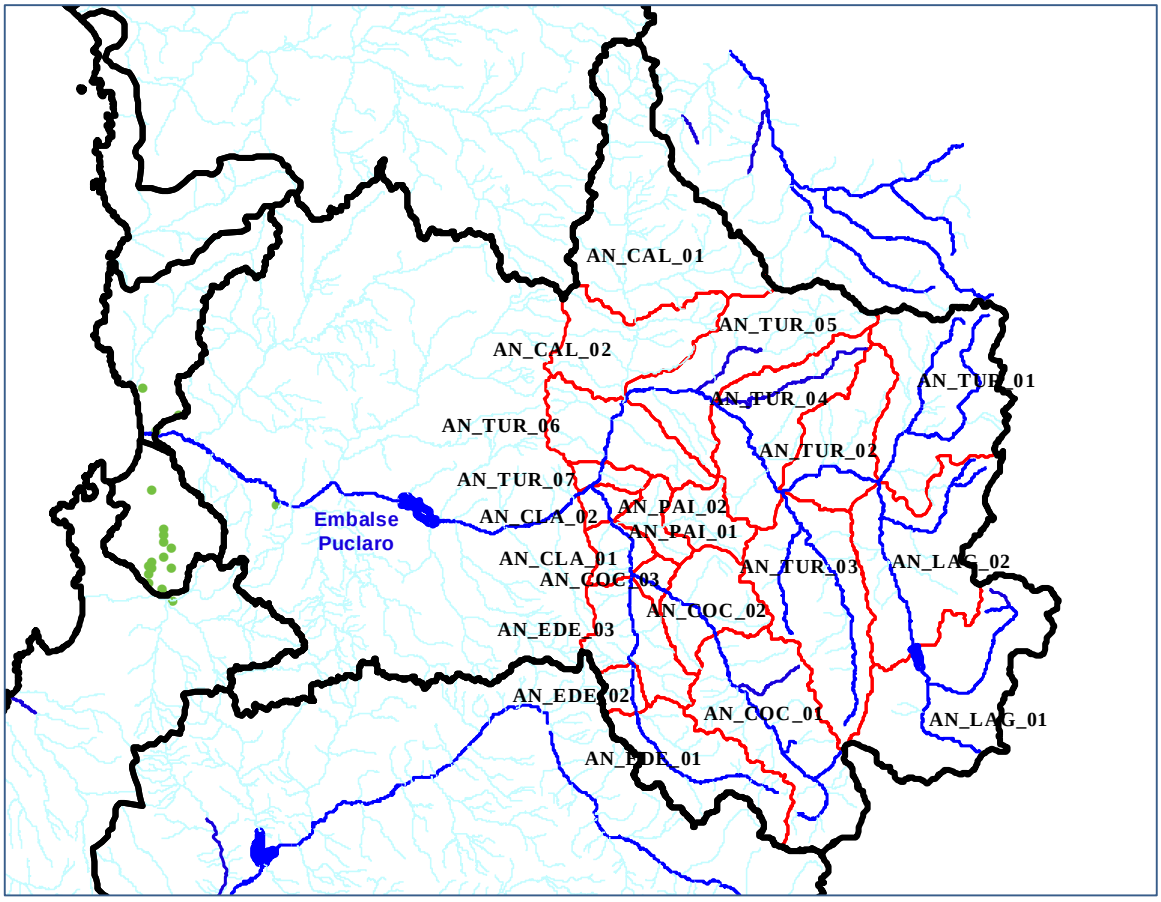


Tabla 11.2
Parámetros precalibrados HBV subcuencas aportantes

HBV	Subcuencas con estación fluviométrica				Subcuencas generadas sintéticamente para WEAP															
Parámetro	Toro antes Laguna	Cochiguaz en el Peñón	E.Derecho en Alcohuaz	E. La Laguna AN_LAG_01	AN_LAG_02	AN_CAL_01	AN_CAL_02	AN_CLA_01	AN_CLA_02	AN_COC_03	AN_EDE_03	AN_ELQ_01	AN_PAI_01	AN_PAI_02	AN_TUR_02	AN_TUR_03	AN_TUR_04	AN_TUR_05	AN_TUR_06	AN_TUR_07
TT	0	10	9	4	4	9	10	4	4	13	8	4	9	4	9	9	9	9	11	4
CFMAX	2	5	5	2	2	4	3	3	3	5	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3
SFCF	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742
CFR	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
CWH	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
CFGlacier	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CFSlope	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FC	300	600	600	285	300	285	285	800	800	600	300	800	350	800	350	350	350	350	350	800
LP	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
BETA	1.4	0.3	0.3	0.45	1.2	2	1.5	0.6	0.6	0.3	0.6	0.6	0.3	0.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	0.7
PERC	0.55	0	0	0.55	0.55	0.55	0.55	0	0	0	0.1	0	0.55	0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.3	0
UZL	238	200	200	238	238	238	238	250	250	200	200	250	238	250	238	238	238	238	238	250
K0	0.02	0.07	0.04	0.02	0.02	0.07	0.07	0.5	0.5	0.07	0.07	0.5	0.05	0.5	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.5
K1	0.002	0.004	0.005	0.007	0.007	0.005	0.008	0.1	0.1	0.005	0.005	0.1	0.0035	0.1	0.006	0.006	0.006	0.006	0.008	0.1
K2	0.0002	0.0002	0.0002	0.002	0.003	0.0008	0.001	0.5	0.5	0.0002	0.0002	0.5	0.001	0.5	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0008	0.5
MAXBAS	1	1	1	1	1	30	1	1	1	1	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PCALT	7	4	4	7	7	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
TCALT	0.2	0.25	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.4	0.4	0.25	0.25	0.4	0.25	0.4	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.4
Elev. of P	3160	1560	1560	3160	3160	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560
Elev. of T	3160	1560	1560	3160	3160	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560

11.4 Calibración del modelo HBV en Elqui en Algarrobal

Para proceder a la calibración propiamente tal, en primer lugar se procedió a hacer un modelo WEAP-Elqui reducido, que sólo modela el sistema hasta la estación Elqui en Algarrobal.

A continuación, se introdujo la hidrología generada con el modelo HBV en el programa WEAP reducido, como hidrología de entrada. Con esta hidrología, se corrió el modelo generando la estadística simulada en Elqui en Algarrobal.

La estadística observada fue reproducida bastante fielmente con los parámetros precalibrados, sin embargo se consideró que el sistema podría quedar aún mejor representado, especialmente en sequía, haciendo algunos ajustes a los parámetros del HBV. La configuración final de los parámetros de todas las subcuencas aportantes fue la que se presenta en la Tabla 11.3 adjunta. En la Figura 11.6 se presenta el resultado de la calibración en la estación Elqui en Algarrobal, donde también se muestran los caudales generados con el modelo WEAP a partir del modelo precipitación-escorrentía MPL y modelos de transposición nival para generación de la estadística de entrada.

Figura 11.6
Calibración en estación Elqui en Algarrobal

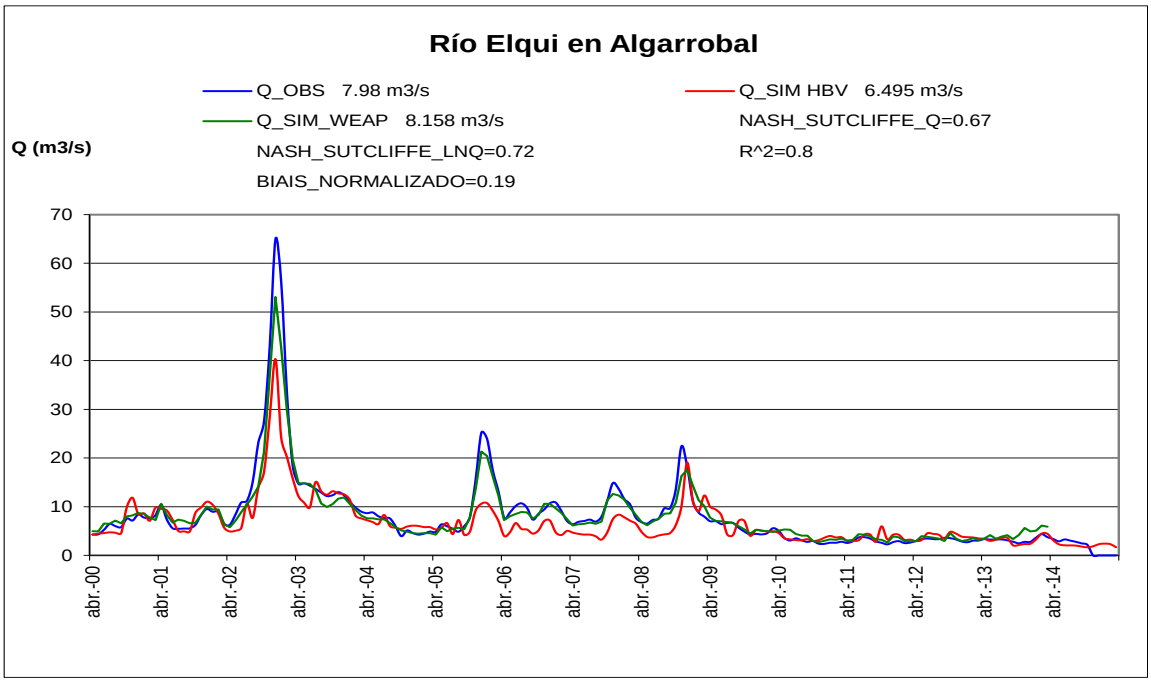


Tabla 11.3
Parámetros calibrados HBV en subcuencas aportantes

HBV	Subcuencas de calibración				Subcuencas generadas sintéticamente para WEAP															
Parámetro	Toro antes Laguna	Cochiguaz en el Peñón	E.Derecho en Alcohuaz	Afluente E. La Laguna AN_LAG_01	AN_LAG_02	AN_CAL_01	AN_CAL_02	AN_CLA_01	AN_CLA_02	AN_COC_03	AN_EDE_03	AN_ELQ_01	AN_PAI_01	AN_PAI_02	AN_TUR_02	AN_TUR_03	AN_TUR_04	AN_TUR_05	AN_TUR_06	AN_TUR_07
TT	0	10	9	4	4	9	10	4	4	13	8	4	10	4	9	9	9	9	9	4
CFMAX	2	5	5	2	2	4	3	3	3	5	4	3	5	3	4	4	4	4	4	3
SFCF	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742	0.742
CFR	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
CWH	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
CFGlacier	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CFSlope	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FC	300	600	600	285	300	285	285	800	800	600	300	800	600	800	350	350	350	350	350	800
LP	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
BETA	1.4	0.3	0.3	0.45	1.2	2	105	0.6	0.6	0.3	0.6	0.6	0.3	0.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0.6
PERC	0.55	0	0	0.55	0.55	0.55	0.55	0	0	0	0.1	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0
UZL	238	200	200	238	238	238	238	250	250	200	200	250	200	250	238	238	238	238	238	250
K0	0.02	0.07	0.04	0.02	0.02	0.07	0.07	0.5	0.5	0.07	0.07	0.5	0.07	0.5	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.5
K1	0.002	0.004	0.005	0.007	0.007	0.005	0.008	0.1	0.1	0.005	0.005	0.1	0.004	0.1	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.1
K2	0.0002	0.0002	0.0002	0.002	0.003	0.0008	0.001	0.5	0.5	0.0002	0.0002	0.5	0.0002	0.5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.5
MAXBAS	1	1	1	1	1	30	1	1	1	1	100	1	1	1	1	1	1	1	100	1
PCALT	7	4	4	7	7	5	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
TCALT	0.2	0.25	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	0.4	0.4	0.25	0.25	0.4	0.25	0.4	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.4
Elev. of P	3160	1560	1560	3160	3160	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560
Elev. of T	3160	1560	1560	3160	3160	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560

11.5 Datos para el pronóstico con HBV

Una vez calibrado el modelo en la estación Elqui en Algarrobal, se procedió a situarse en el mes de agosto de cada año, para realizar el pronóstico de temporada en cada una de las subcuencas, con el modelo HBV. Este modelo requiere datos de precipitación, temperatura y evaporación para operar. Para situarse en una condición de pronóstico, o sea, futura, el mes de agosto de cada año, se asumió lo siguiente:

a) La evapotranspiración se proyecta como los valores mensuales de cada estación de referencia.

b) Las precipitaciones entre septiembre y marzo se proyectan iguales a cero.

c) Las temperaturas de septiembre a marzo se proyectan de acuerdo con una función que suaviza la estadística diaria de los últimos cuatro años (curva negra), según se observa en las Figuras 11.7 a 11.9 adjuntas.

Figura 11.7
Estadística diaria de temperatura

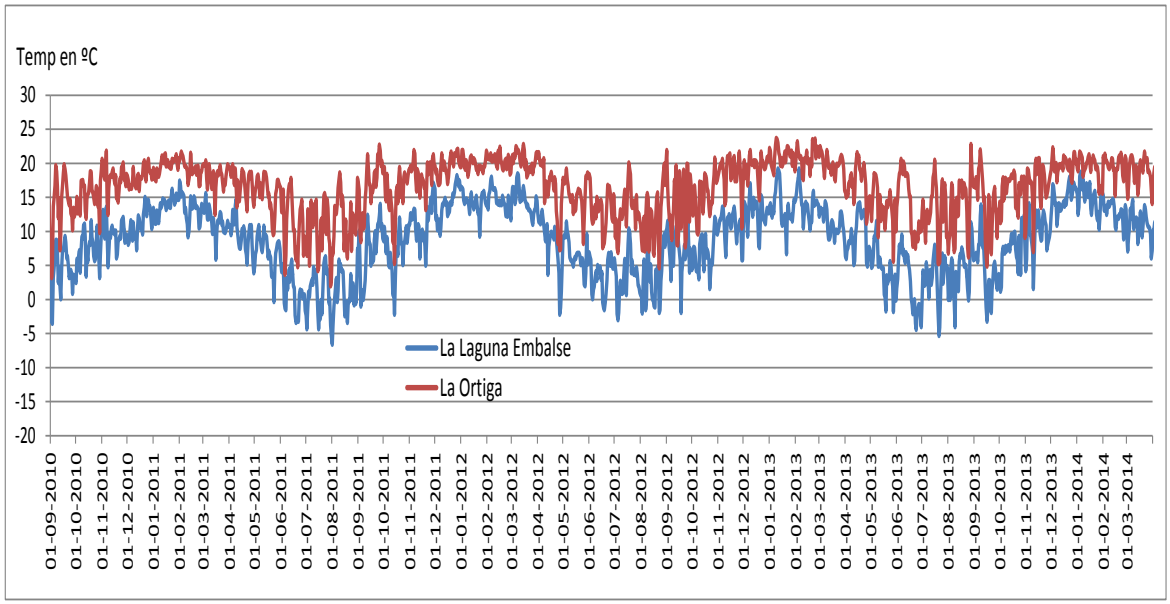


Figura 11.8
Estimación de temperaturas para pronóstico en La Laguna Embalse

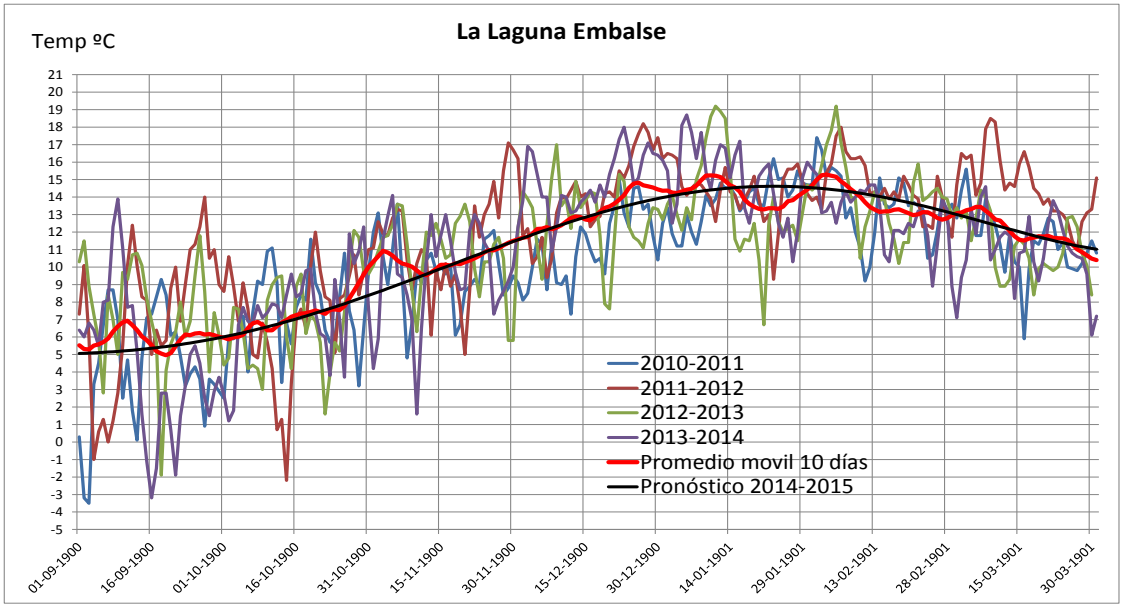
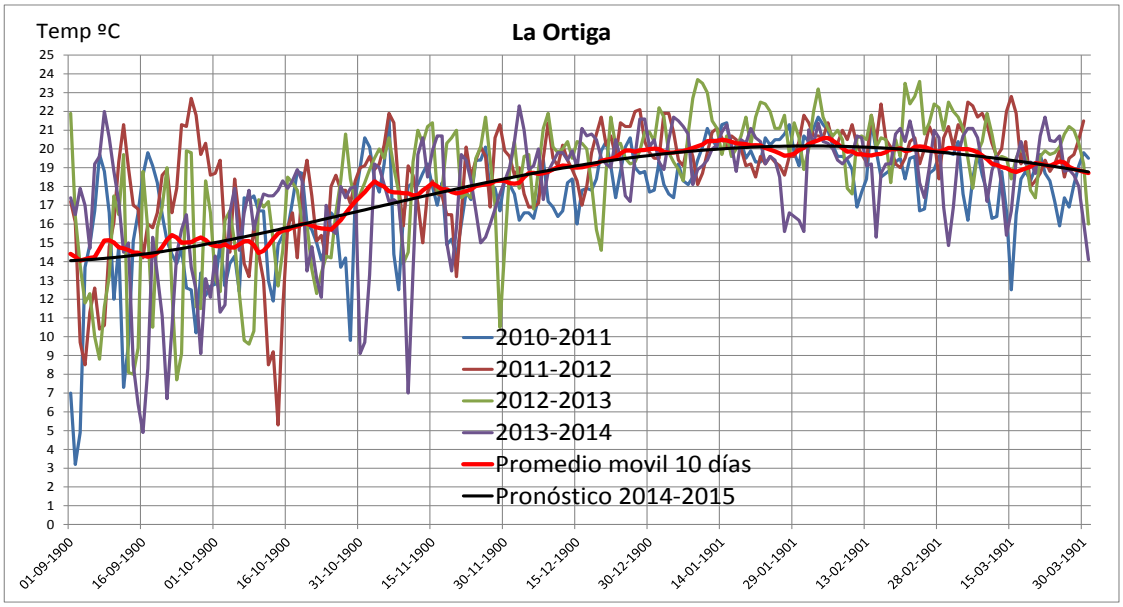


Figura 11.9
Estimación de temperaturas para pronóstico en La Ortiga



11.6 Pronóstico de temporada

Con esta información, finalmente se ha realizado el pronóstico de los últimos tres años, situándose cada año en el mes de agosto. Se han obtenido las siguientes series de caudales medios mensuales, las que en las figuras adjuntas se comparan con las series observadas y con las series pronosticadas por la DGA.

Figura 11.10
Resultado pronóstico temporada 2011-2012

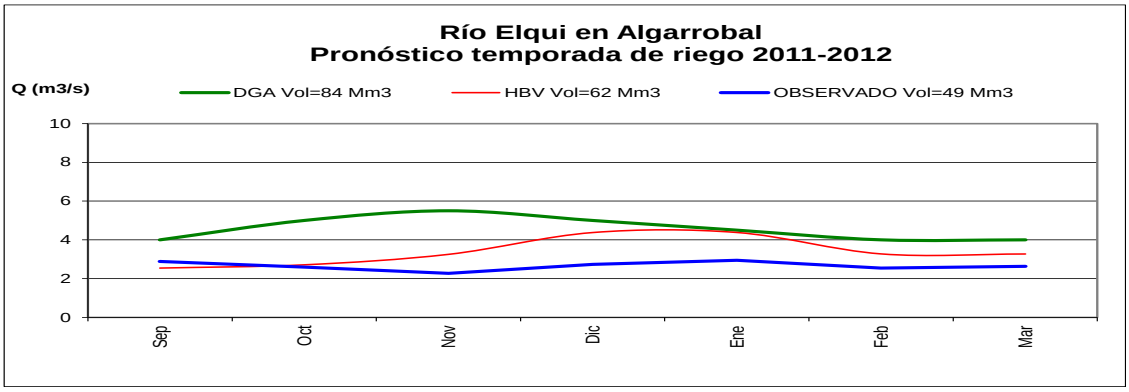


Figura 11.11
Resultado pronóstico temporada 2012-2013

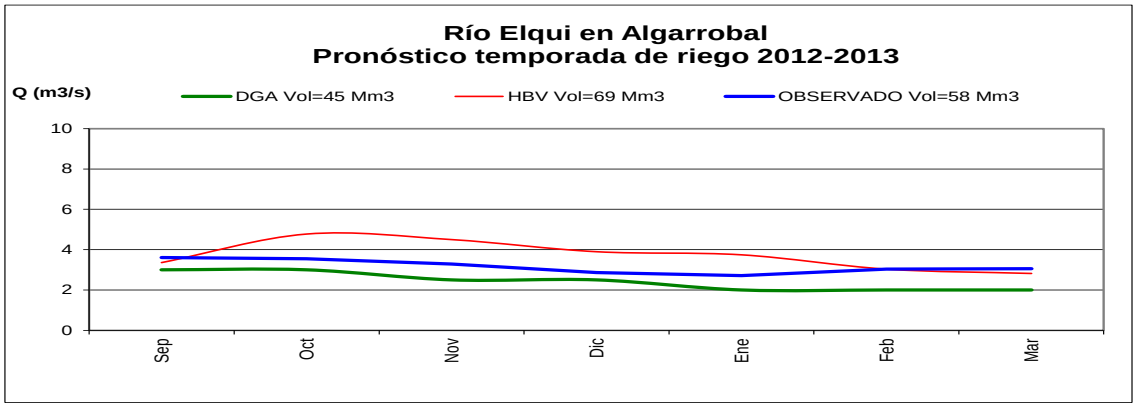
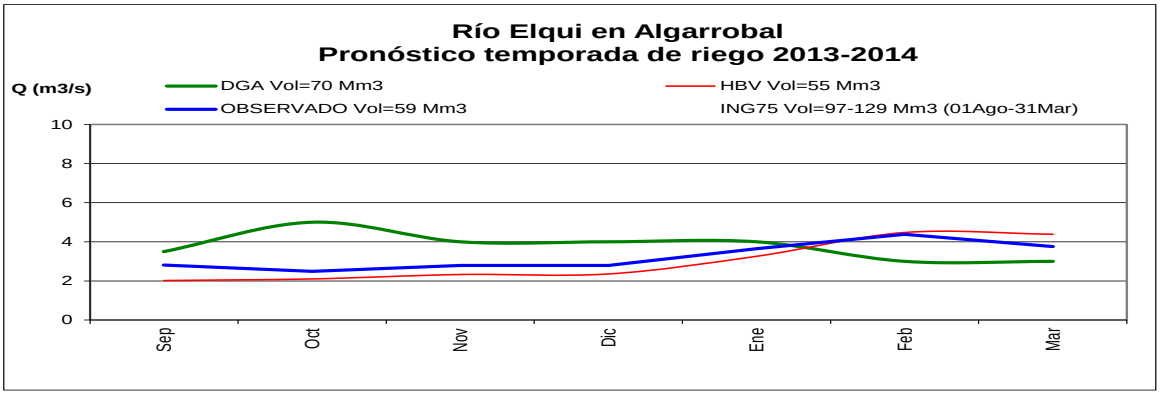
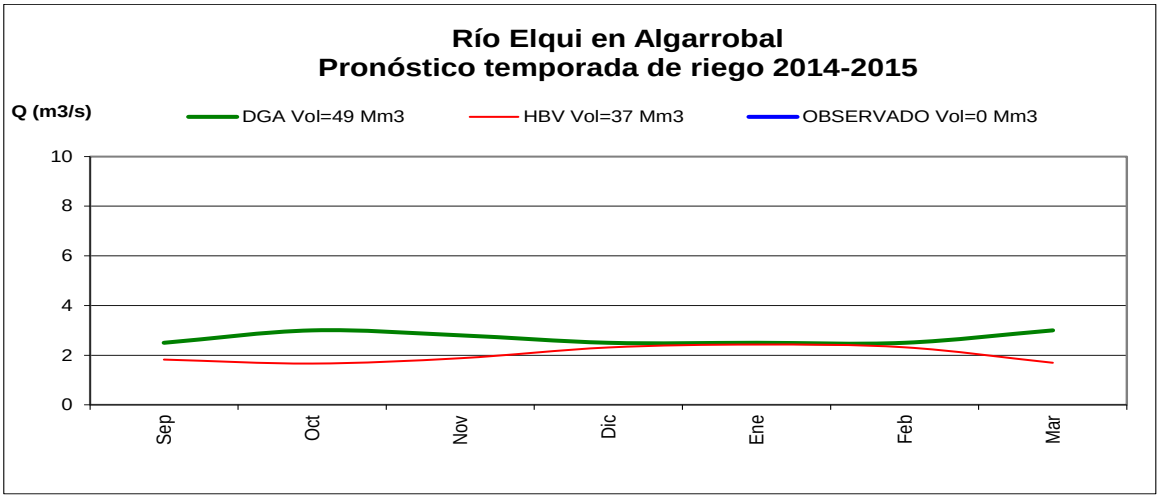


Figura 11.12
Resultado pronóstico temporada 2013-2014



Finalmente, y de la misma manera, se ha realizado el pronóstico para el presente año, el cual se muestra en la Figura 11.13, donde se compara con el pronóstico de la DGA.

Figura 11.13
Resultado pronóstico temporada 2014-2015



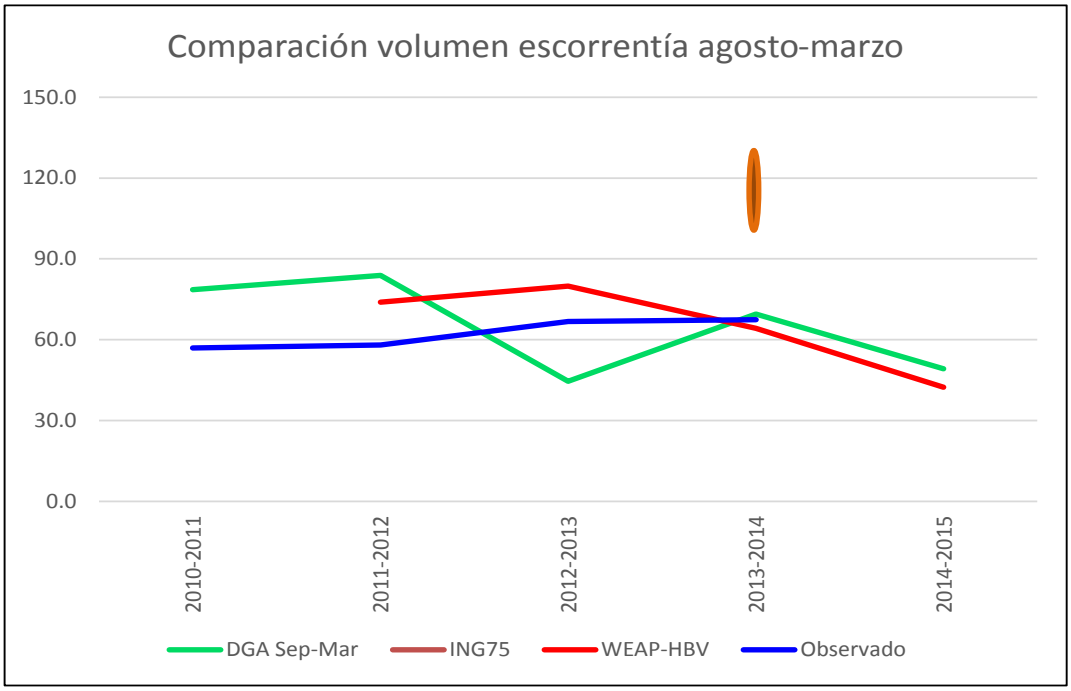
11.7 Comparación de valores de volumen acumulado entre agosto y marzo

Lo que se presenta en la Tabla 11.4 adjunta, es el volumen de escorrentía obtenido a partir de los caudales pronosticados por la DGA, por el modelo WEAP (reducido y con hidrología generada por HBV), y por el estudio de la empresa ING75, de la cual lamentablemente no se pudo obtener la estadística de valores mensuales, y se compara con el volumen efectivamente escurrido. Lo mismo se presenta en forma gráfica en la Figura 11.14. Se observa que para la temporada 2013-2014 los pronósticos de DGA y el obtenido con la presente metodología WEAP_HBV coinciden muy cercanamente con el valor observado, y predicen algo similar para la temporada 2014/2015. Cabe observar, eso sí, que el pronóstico DGA abarca entre septiembre y marzo, mientras que para las demás fuentes se ha presentado el valor acumulado entre agosto y marzo.

Tabla 11.4
Volumen de escorrentía pronosticado según diversas fuentes

Año	Volumen Agosto-Marzo			
	millones de m3			
	DGA Sep-Mar	ING75	WEAP-HBV	Observado
2010-2011	78.6			56.9
2011-2012	83.9		73.9	58.0
2012-2013	44.5		79.9	66.8
2013-2014	69.6	97-129	64.2	67.4
2014-2015	49.2		42.3	

Figura 11.14
Volumen de escorrentía pronosticado según diversas fuentes



11.8 Conclusiones

El trabajo realizado con el modelo HBV se considera muy satisfactorio, porque permitió llegar a resultados totalmente aceptables, si bien aún se pueden mejorar.

Es necesario tener presente que, en esta oportunidad, el modelo HBV se desarrolló y pudo ser rápidamente calibrado en base a subcuencas que ya estaban calibradas y preestablecidas a partir de otros métodos de generación indirecta de caudales, como el modelo MPL y el modelo de transposición de caudales de derretimiento nival, que se aplicaron con buenos resultados en estudios anteriores. De este modo, los caudales generados antes, en todas las subcuencas de análisis, facilitaron mucho el trabajo de calibración.

Sin embargo, el modelo ofrece una gran variedad de posibilidades para representar la realidad nival y de derretimiento, así como la realidad pluvial de cuencas de índole muy variada. Es un modelo muy amplio, que debiera ser mucho más profundamente explorado que lo que se ha podido hacer en el contexto y dentro de los alcances del presente estudio.

Teniendo buenas estaciones de calibración, y una estadística confiable, el modelo, sin requerir información sofisticada ni difícil de conseguir o de interpretar, sino que sólo en base a precipitaciones, temperaturas y evaporación, y sus respectivos gradientes en función de la altura que son parámetros de calibración, es capaz de reproducir una amplia gama de

regímenes ya sea pluviales como de derretimiento nival, lo que lo hace una herramienta atractiva y útil para el análisis de una realidad de esta naturaleza.

Aún no se han explorado diversas otras capacidades de este modelo, tales como la consideración de la orientación de las laderas en la función de derretimiento, el aporte de glaciares, y las diferentes formas de representar el embalsamiento en el suelo.

Como conclusión del análisis efectuado, se puede decir que el modelo constituye una herramienta válida, útil, atractiva, fácil de usar, y además gratuita, que ofrece muchas posibilidades aún no exploradas, y que por lo tanto, debiera quedar en carpeta para aplicaciones posteriores.

12. Talleres de capacitación

Uno de los objetivos específicos del estudio era hacer una capacitación en cada cuenca, en la cual se realizara el traspaso de la herramienta de modelación desarrollada, WEAP Elqui, WEAP Limarí y WEAP Choapa respectivamente, a todos los usuarios interesados de la Región.

Con este fin, se programaron misiones intensivas de capacitación de dos días en cada cuenca. Se estructuró un instructivo con algunas indicaciones que los asistentes debían atender en forma previa al taller mismo, específicamente para cargar el modelo WEAP en sus computadores personales.

En base a los escenarios modelados en cada cuenca, se redactó una guía con ejercicios a ser desarrollados por los asistentes durante el taller. Finalmente, se preparó un CD, en el cual se grabó la última versión del modelo WEAP de cada cuenca, todo el material del taller y los resultados de los ejercicios, para apoyar el trabajo posterior de cada alumno.

Los talleres se desarrollaron en los siguientes lugares y fechas:

- 9 y 10 de Julio de 2014, en el salón de reuniones de la Junta de Vigilancia del río Elqui, con la asistencia de 15 alumnos provenientes de la Universidad La Serena, CEAZA, CAZALAC, DGA, INIA y Junta de Vigilancia del río Elqui.
- 17 y 18 de Noviembre de 2014, en la Junta de Vigilancia del río Choapa, con la asistencia de 15 alumnos provenientes de empresas privadas, Municipalidad d Salamanca, Junta de Vigilancia Río Choapa, INIA, Universidad de La Serena, INDAP, DGA y Asociación de Canalistas de Illapel.
- 19 y 20 de Noviembre de 2014, en el Campus Limarí de la Universidad de La Serena, Ovalle, con la asistencia de 15 alumnos provenientes de Aguas del Valle, Universidad de Heidelberg, Junta de Vigilancia del Río Pama, Universidad de La Serena, INIA, CASEP, Asociación Canalistas Canal Derivado Punitaqui y CORE.

Las listas de asistencia a estos talleres se encuentran en el Anexo Digital Capítulo 12.

El programa del taller fue el siguiente:

Día 1, mañana:

- Exposición sobre el modelo WEAP. Historia, características, fortalezas, limitaciones, aplicaciones en el mundo y en Chile.
- Tutoriales básicos del WEAP

Día 1, tarde:

- Exposición del modelo desarrollado para cada una de las cuencas

Día 2, mañana:

- Trabajo con el modelo:
  Ejercicios para montar escenarios y extraer set de resultados

Día 2, tarde (sólo en La Serena, modelo WEAP-Elqui):

- Trabajo con el modelo:
  Ejercicios para montar escenarios y extraer set de resultados

Todo el material generado para el desarrollo del taller, como también la lista de participantes, se entrega en el Anexo Digital, Anexo Capítulo 12.

13. Conclusiones generales

a) Cuenca Elqui

Se desarrolló un modelo WEAP con apoyo en el modelo MAGIC-Elqui desarrollado en el trabajo de CAZALAC / RODHOS 2006.

Durante la calibración del modelo WEAP-Elqui, se pudo observar que la productividad de la cuenca se está reduciendo a raíz de la sequía. Para reproducir los valores medidos, hubo que reducir al 50% el aporte hidrológico pluvial de algunos sectores en los últimos años.

En los acuíferos Culebrón y Elqui bajo Quebrada Marquesa, en la condición actual los derechos existentes permiten una explotación muy fuerte, que eventualmente podría llevar a una situación de sobreexplotación temporal en épocas de sequía. En estos acuíferos se recomienda controlar las extracciones actuales y los niveles.

Los demás acuíferos, aunque pequeños, si bien no podrían alimentar derechos permanentes, podrían aliviar la escasez de una sequía como la actual.
A raíz de algunos escenarios de proyección de la sequía por otros 3 años, se pudo estimar que el conjunto de acuíferos de la cuenca del Elqui podría dar soporte a las demandas reducidas a un 70% de la demanda potencial. Para ello sería necesario permitir su uso más allá de los derechos actuales, salvo en Elqui Bajo, Culebrón y Santa Gracia.

El acuífero Costa, en ninguno de sus tres sectores norte, centro y sur, pareciera verse aún afectado por la sequía. Ello hace pensar que tal vez sería adecuado trasladar hacia este acuífero, en su sector sur (AC_COS_03), los derechos que la minera Teck hoy explota en el Elqui Bajo. El análisis de la viabilidad de esta propuesta podría realizarse con el modelo WEAP-Elqui.

En cuanto a la evaluación de nuevas obras, se analizó el efecto de un embalse de cabecera de 2 millones de m3 en la cabecera del Estero Derecho, el cual mostró ser positivo, porque al mismo tiempo que favorece mucho al sector de riego del Estero Derecho, no genera efectos negativos perceptibles sobre el sistema de aguas abajo. Por lo señalado, la implementación de este embalse es técnicamente justificable.

También se analizó el efecto del revestimiento de canales. Se observa que este hecho tiene efectos tanto positivos, sobre las zonas de riego, a las que favorece directamente aumentando su demanda suplida, como negativos, en especial sobre los sectores acuíferos que dejan de percibir las infiltraciones por ineficiencias, por lo que se hace necesario evaluar localmente el efecto de este tipo de medidas.

Se considera un logro, obtenido en conjunto con la Junta de Vigilancia, el hecho de haber podido establecer una regla de operación para el sistema hídrico de la cuenca del Elqui. Con los años de estadística disponible en la Junta de Vigilancia, y la experiencia en el manejo del recurso, se pudo entender y expresar matemáticamente la forma en que se establece el

desmarque de la cuenca, en función de las características hidrológicas de los períodos antecedentes, y del estado del embalse Puclaro en agosto de cada año. Ello significa un avance técnico importante para la Junta de Vigilancia.

b) Cuenca Limarí

Se trabajó sobre un modelo preexistente, WEAP-UC-ULS, modificando y simplificando algunos aspectos para poder calibrarlo a nivel de cuenca completa.

El trabajo de calibración mostró que, si bien hay muchas estaciones de cabecera, hay pocas estaciones alteradas que sirven para calibración, especialmente en los ríos Grande y Limarí. Por esta razón, una de las recomendaciones que se desprende del presente trabajo, es contar con algunas estaciones en régimen alterado, especialmente bajo embalses, en los ríos Hurtado y Limarí, en apoyo a la calibración de modelos de gestión integrada.

La calibración también mostró que en los últimos años de sequía, la entrega se ha alejado de la regla preestablecida. Esto efectivamente ha ocurrido, debido a que la gestión se hace en forma más solidaria de lo que permite la regla. De este hecho se desprende la recomendación de revisar la regla de operación y proponer una nueva regla para estados de extrema escasez, como el actual, que se produce después de varios años de sequía, donde la regla vigente, en su forma estricta, no tiene aplicación.

En vista de la prolongada sequía, se observa una reducción del área cultivada, porque el agua disponible sólo alcanza a cubrir una fracción de la demanda. La cuenca está preparada para una entrega de agua reducida, con cultivos anuales en general poco tecnificados, de alrededor de un 50% del área total cultivada. Sin embargo, la falta de agua ya ha superado ese límite, y el área que estuvo bajo cultivo en la temporada 2013-2014, se estima entre 30 y 40%, de acuerdo con los resultados de la modelación.

Los acuíferos no tienen gran importancia en esta cuenca, salvo bajo los embalses Recoleta y Paloma. En los ríos de cabecera, sobre embalses, en general los acuíferos son pequeños, y están suficientemente explotados con los pocos derechos que tienen en la actualidad. Los acuíferos más importantes se encuentran en el río Hurtado bajo Recoleta, Grande bajo Paloma, río Limarí y Terrazas de Punitaqui. Con excepción de éste último, que se deprime sensiblemente en épocas de sequía, los acuíferos en general no están afectados por el uso actual, manteniéndose siempre llenos.

Si bien no se ha hecho el análisis del grado en que podrían explotarse los acuíferos para dar sustento al sistema de aguas superficiales, se puede decir que al menos los acuíferos grandes del río Grande bajo Paloma y Limarí, pueden ser usados para aliviar situaciones de extrema escasez en sequía, y que sería conveniente simular algunos escenarios en ese sentido. El problema del uso de estos acuíferos podría ser el de la calidad del agua.

En cuanto a acciones mayores como la construcción de embalses, se aprecia que el embalse Valle Hermoso se ubica en una de las zonas actualmente peor suplidas de la cuenca. Para ser

eficiente, debe ser cuidadosamente operado, y acompañado con una tecnificación total del riego y mejoramiento de canales. De esta forma, podría elevar el porcentaje de demanda suplida en la zona de riego del Pama, de 10% en la actualidad, a 35% en la condición desarrollada. El embalse Rapel, en cambio, se inserta en una zona que es una de las mejor suplidas dentro de la cuenca del Limarí, por lo que se recomienda revisar su justificación.

Ambos embalses en conjunto, afectan una gran parte de las zonas de riego bajo los embalses Cogotí, Paloma y Recoleta, que quedan levemente desfavorecidas con estas obras. Sin embargo, el aumento global del porcentaje de demanda suplida, a nivel de cuenca, resulta de 4,3%.

En cuanto al mejoramiento de canales, es eficiente poner el énfasis en los canales mayores. Las pérdidas por infiltración que se evitan y que los acuíferos dejarían de percibir, no afectan en forma significativa a ningún sector, y, por el contrario, la medida beneficia a una gran parte de la cuenca. El aumento del porcentaje de demanda suplida es de 1%.

La tecnificación de riego se perfila, una vez más, como una alternativa técnicamente muy atractiva para abordar el problema crónico de falta de agua en la cuenca bajo embalses. Genera beneficios prácticamente para toda la cuenca, sin perjuicios salvo en la zona de riego del estero Punitaqui, cuya afección podría manejarse de otra forma, por ejemplo con mayor acceso al agua subterránea. El aumento del porcentaje de demanda suplida se estima en 2,3%.

c) Cuenca del Choapa

Como se ha visto, la modelación es una herramienta que puede llegar a ser bastante confiable si se sustenta en un buen conocimiento de la realidad. En la cuenca del Choapa hay una cantidad adecuada de controles superficiales de caudal, enfocados hacia la determinación de los caudales de entrada al sistema, intermedios, y de salida. Algunas estaciones intermedias que han sido suspendidas, como Choapa en Limáhuida, por presentar un régimen alterado, cumplirían un fin importante desde el punto de vista de calibración. Se recomienda reponerla. También se sugiere controlar el caudal de salida de la cuenca del río Chalinga, antes de su confluencia con el río Choapa.

Los controles que son muy escasos en la cuenca, son los subterráneos. Para la modelación se definieron 26 tramos acuíferos, de los cuales sólo 5 tienen control de nivel estático. En vista de la conveniencia y la necesidad de explotar los recursos subterráneos, como complemento a los recursos superficiales, en especial en épocas de sequía como la actual, es necesario establecer más controles en el acuífero, de modo de monitorear su comportamiento y gestionar su uso en tiempo real.

Los acuíferos más importantes se sitúan en el río Choapa, Alto, Medio y Bajo. También hay acuíferos, aunque menores, en los ríos Chalinga e Illapel y esteros Camisas y Quelén. Todos tienen alguna capacidad de explotación. El acuífero donde no convendría aumentar la explotación actual, sería el de Zapallar.

En cuanto a las zonas de riego agrícola, las mejor suplidas son las del Choapa Bajo, que no resienten en forma importante ni siquiera la actual sequía, y el Choapa Medio, que se surte bien en condiciones normales, pero que se resiente en las temporadas altas, desde 2012/2013, presentando fallas. También se pueden considerar bien suplidas, en años normales, las zonas de riego del río Choapa Alto, que comienzan con fallas en la temporada 2011/2012. Estas fallas podrían ser evitadas recurriendo a los acuíferos.

Las zonas de riego del río Illapel están bien suplidas en años normales, mostrando problemas a partir de la temporada 2012/2013. Hay sectores donde también se podría recurrir a los acuíferos.

En oposición a esto, se observa que las zonas de riego del río Chalinga están crónicamente mal suplidas, y peor aún en los últimos años de sequía, lo que muestra que las áreas que se pretende cultivar superan las posibilidades del recurso superficial. El valle de Chalinga también presenta acuíferos no despreciables, que sería conveniente explorar.

La recomendación para todos los sectores es hacer uso de sus acuíferos, como complemento al agua superficial, y bajo supervigilancia de la evolución de los niveles estáticos. Los acuíferos constituyen una capacidad de almacenamiento y de regulación que la cuenca necesita, y que la naturaleza ha puesto a su disposición. Además, en la actualidad, están subexplotados.

La limitante para acceder a los acuíferos es administrativa, pero puede ser revertida al menos en épocas de extrema sequía, mediante los decretos de escasez.

En cuanto a los embalses, se desprende la importancia de operarlos con reglas de operación que reduzcan la captación en el invierno, y establezcan un volumen máximo a distribuir en el verano, de modo que puedan cumplir una función de regulación al menos anual, y en lo posible, interanual. Sin embargo, la inclusión de dos embalses de cabecera, en Chalinga y Totoral, no permitió elevar en forma sustantiva el porcentaje de demanda suplida del valle (0,5%). Ello indicaría, por un lado, que los embalses deben ser acompañados de otras medidas de eficiencia, como la tecnificación y el mejoramiento de canales, y por otro lado, que la solución de este valle no habría que buscarla en los embalses superficiales, sino que, primero, en la gestión de los acuíferos, embalses naturales disponibles, y casi todos ellos subexplotados en la actualidad.

Para mejorar la gestión del recurso hídrico en esta cuenca, y entrar en la era de la gestión integrada, es de especial importancia que existan organizaciones de usuarios que puedan dotarse de conocimiento y de herramientas que le permitan monitorear y proyectar adecuadamente el sistema, y tomar decisiones adecuadas, esto significa que no sobreexploten, pero tampoco subexploten, sus recursos hídricos, pues son renovables. En ese contexto, el presente estudio constituye un muy buen comienzo.

d) Modelo HBV para pronóstico

La modelación de pronóstico, realizada con el modelo HBV, permitió conocer e introducir este modelo aún muy poco usado en Chile, pero de profusa aplicación a nivel mundial, como aplicación piloto en la cuenca afluente a Elqui en Algarrobal. El modelo ofrece una gran variedad de posibilidades para representar la realidad nival y de derretimiento, así como la realidad pluvial de cuencas de índole muy variada. Es un modelo muy amplio, que también considera la existencia de glaciares, y que debiera ser más profundamente explorado que lo que se ha podido hacer en el contexto y dentro de los alcances del presente estudio. Como conclusión del análisis efectuado, se puede decir que el modelo constituye una herramienta sencilla, pero válida, útil, atractiva, fácil de usar, y además gratuita, que pudo ser aplicada con buenos resultados en la Región.

e) Modelo WEAP

Un modelo de simulación de balance como el WEAP es fácil de entender conceptualmente, pero requiere de una gran cantidad de antecedentes para que pueda lograrse el objetivo de hacer una representación útil de la realidad. El trabajo de modelamiento de una cuenca, la calibración del modelo y la interpretación adecuada de los resultados, requiere conocer a fondo no sólo la manera en que el WEAP opera, y el significado de cada una de las variables que se obtienen como resultados, sino que también la cuenca y sus características en todo lo referente a recursos hídricos.

El modelo WEAP permite modelar y representar un sistema hídrico, y aplicar las reglas de operación que reflejan la forma en que los usuarios se organizan para aprovechar de la mejor forma este recurso.

El modelo muestra la interrelación entre los flujos que se producen entre los diversos elementos que configuran hídricamente un sistema:

- por parte de la oferta, las subcuencas aportantes, los cauces, acuíferos y embalses, y
- por parte de la demanda, los sistemas de riego, los usos de agua potable, industria, minería, y los requerimientos ecología.

Todos los flujos de interrelación entre estos elementos, que el modelo calcula, no es posible conocerlos sin una modelación, por la gran cantidad de complejidades inherentes al sistema hídrico y la imposibilidad de medirlos.

Una vez calibrado, el modelo también permite observar el comportamiento del sistema hídrico en función de determinadas acciones aplicadas sobre él. Al permitir predecir los efectos que dichas acciones tienen sobre el sistema, el modelo constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Por otro lado, es necesario tener presente que todos los modelos tienen limitaciones, las cuales hay que conocer para no caer en la sobreinterpretación de los resultados.

La conclusión del estudio respecto de la modelación integrada con el modelo WEAP, es que este modelo ha podido ser experimentado como una herramienta muy versátil, suficientemente amistosa como para ser entendida por usuarios preparados, atractiva, y de gran proyección en la Región. El modelo WEAP ofrece aspectos de mucho interés que aún no han sido explorados, como la inclusión de centrales hidroeléctricas, la evaluación económica de los escenarios calculados, la modelación de la calidad a lo largo de los cuerpos de agua, y la modelación conjunta con ModFlow para una representación más acuciosa de los acuíferos. Por lo tanto, se considera que es una herramienta que debiera quedar activa en el acervo técnico-cultural de la Región.

14. Anexo Digital

El Anexo Digital contiene el siguiente material:

14.1 Texto:
Texto completo del presente Informe en Word y en pdf.

14.2 Anexo Capítulo 4:

Acta campañas de terreno Nº 1 y Nº 2

14.3 Anexo Capítulo 5:

Contactos Región de Coquimbo por cuencas
Contenido Talleres de Participación (metodología de Espacio Abierto)

14.4 Anexo Capítulo 8 (WEAP Elqui)

a) Anexo Capítulo 8.2:
Planilla con regla de operación y metodología de estimación de desmarque

b) Anexo Capítulo 8.3:
Planillas de resultados del escenario Calibración-Validación-Futuro Base 3

c) Anexo Capítulo 8.4:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 1:
Tres años más de sequía, liberación de acuíferos, demanda 70%

d) Anexo Capítulo 8.5:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 2:
Tres años más de sequía, liberación de acuíferos, demanda 100%

e) Anexo Capítulo 8.6:
Planillas de resultados del escenario Futuro Base Ext 2:
Extensión con hidrología del período de calibración

f) Anexo Capítulo 8.7:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 4
Embalse cabecera Estero Derecho 2 millones de m3

g) Anexo Capítulo 8.8:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 5
Mejoramiento de canales

14.5 Anexo Capítulo 9 (WEAP Limarí)

a) Anexo Capítulo 9.2:
Regla de Operación Sistema Embalse Paloma

b) Anexo Capítulo 9.3:
Planillas de resultados del escenario Calib25

c) Anexo Capítulo 9.4:
Planillas de resultados del escenario Futuro Base 1

d) Anexo Capítulo 9.5:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 1:
Embalses Pama y Rapel

e) Anexo Capítulo 9.6:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 2:
Aumento de eficiencia de conducción

f) Anexo Capítulo 9.7:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 3:
Aumento de eficiencia de riego

14.6 Anexo Capítulo 10 (WEAP Choapa)

a) Anexo Capítulo 10.3:
Planillas de resultados del escenario Calibración y Futuro Base 1

b) Anexo Capítulo 10.4:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 1:
Tres años adicionales de sequía, desmarques mínimos aumentados

c) Anexo Capítulo 10.5:
Planillas de resultados del escenario Futuro Base 2

d) Anexo Capítulo 10.6:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 2:
Tres años adicionales de sequía extrema, desmarques mínimos

e) Anexo Capítulo 10.7:
Planillas de resultados del escenario Futuro Base 3

f) Anexo Capítulo 10.8:
Planillas de resultados del escenario Futuro Operación 3:
Embalses Chalinga y Totoral

14.7 Anexo Capítulo 12:

Material Capacitación y Lista de asistencia en las tres cuencas:

- Elqui
- Limarí
- Choapa

14.8 Anexo WEAP

Este Anexo contiene todas las versiones finales de los modelos con los escenarios simulados:

- Elqui
- Limarí
- Choapa

14.9 Presentaciones Powerpoint

Finalmente, en el Anexo Digital se incluye las presentaciones Powerpoint que sintetizan el contenido de presente informe para cada cuenca:

- Elqui
- Limarí
- Choapa

15. Referencias bibliográficas y antecedentes

El estudio se apoyó en los siguientes estudios y antecedentes:

- "Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua. Estudio de caso en la Región de Coquimbo. CAZALAC/RODHOS, 2006", desarrollado para el Gobierno Regional de Coquimbo

- "Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo. CONIC-BF, 2013", dearrollado para la Dirección Regional de Aguas Región de Coquimbo

- Página principal del programa WEAP: www.weap21.org

- Manuales de usuario del programa WEAP: http://www.weap21.org/index.asp?action=208

- Tutoriales del programa WEAP: http://www.weap21.org/index.asp?action=213

- "Guía metodológica. Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP, CCG-UC/SEI, 2009"

- http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf

- Página principal del programa HBV-light : http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV_light.html