

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**EFICIENCIA DE USO DEL AGUA
METODOLOGÍAS PARA DETERMINARLA**

**DAMARIS ORPHANOPOULOS S. ¹
ALVARO CHÁVEZ V. ²
GUIDO SOTO A. ³**

RESUMEN

El objetivo medular del trabajo fue desarrollar una metodología para hacer un diagnóstico de la eficiencia de uso del agua en las tres cuencas mayores de la IVª Región, Elqui, Limarí y Choapa, expresar esta eficiencia en indicadores, y desprender recomendaciones para aumentar la eficiencia de uso. Objetivos adicionales fueron el desarrollo de un proyecto piloto que permitiera aumentar la eficiencia de uso en la región, que consistió en el entubamiento parcial de un canal de riego, y un amplio programa de difusión, con 9 talleres en la región, y la publicación de un afiche, una revista y un video didáctico.

Como resultado del estudio se desprenden para cada cuenca, recomendaciones de medidas en todos los ámbitos, físico, económico, ambiental y administrativo, que permiten aumentar la eficiencia de uso del agua en forma viable.

¹ Gerente General Rodhos Aseosrías y Proyectos Ltda., Asesora CAZALAC. damaris@entelchile.net

² Ingeniero de Proyectos y Modelación Rodhos Aseosrías y Proyectos Ltda alvchavez@gmail.com

³ Director Ejecutivo CAZALAC gsoto@cazalac.org

1. OBJETIVOS

El presente trabajo tuvo por objetivo medular, hacer un diagnóstico de la eficiencia de uso del agua en las tres cuencas principales de la IV^a Región: Elqui, Limarí y Choapa, para luego desprender algunos indicadores que permitieran expresar y comparar niveles de eficiencia, y finalmente, proponer medidas para aumentarla. Este objetivo se logró en base a la utilización de cuatro herramientas, que fueron: la investigación directa en terreno y en gabinete, el uso del SIG para la presentación, ordenamiento y elaboración espacial de toda la información, la aplicación de un modelo integrado superficial-subterráneo de modelación hidrológica llamado MAGIC, y un modelo de evaluación económica que se aplicó a todos los escenarios de uso más eficiente del agua, técnicamente viables. Objetivos adicionales fueron el desarrollo de un proyecto piloto, que consistió en el entubamiento parcial de un canal de riego en la cuenca del Limarí, y un amplio programa de difusión, que abarcó 9 talleres en la IV^a Región, la redacción de una revista didáctica y un afiche, ambos en 1000 ejemplares, y la generación de un video didáctico en 350 ejemplares.

2. ALCANCES Y METODOLOGÍA

El concepto de eficiencia en el uso del agua es muy amplio y complejo, y para hacerlo operativo y poder aplicar una metodología de análisis, fue necesario precisar sus alcances.

Primero, se identificó los diferentes tipos de eficiencia sobre los que sería necesario trabajar: eficiencia física, económica, ambiental y administrativa. A continuación, se identificaron los diferentes usos del agua en la IV^a Región: agricultura, agua potable, minería e industria. Y finalmente, se establecieron los diferentes niveles de análisis en los que interesa lograr el uso eficiente del agua: nivel local o individual, nivel medio o colectivo o de sistemas, y nivel global o de cuenca.

Hecha esta definición de alcance para entender el concepto de eficiencia de uso del agua, surgió como una herramienta fundamental de trabajo la aplicación de un modelo de simulación, que permitiera aclarar los aspectos cuantitativos. En efecto, esta herramienta, aunque muy compleja de aplicar, constituyó la base para la caracterización de la situación actual de uso del agua, y para la evaluación y recomendación de medidas técnicamente y económicamente viables. El uso del modelo de simulación dio lugar a la aplicación y desarrollo de otras tres herramientas muy poderosas, que en conjunto con el modelo, conforman una metodología de análisis de la eficiencia de uso del agua. Así, las cuatro herramientas metodológicas fueron:

- En primer lugar, la investigación directa, en terreno y gabinete, destinada a recopilar y analizar información. Consistió en 130 entrevistas personales realizadas en terreno, en que se conversó con autoridades, jefes de instituciones públicas y privadas, directivos de asociaciones y comunidades y sistemas de APR, y usuarios de las tres cuencas, para recoger la experiencia, la visión y las sugerencias de la gente involucrada en el uso y la gestión de los recursos hídricos. En gabinete, se recopilaron y se revisaron 87 estudios anteriores, de los cuales se extrajo toda la información de utilidad, y los que se plasmaron en un SIG bibliográfico. Facilitaron sus coberturas SIG de la región, las instituciones DGA, CNR y SERPLAC IV^a Región. Finalmente,

se recolectó y analizó todas las estadísticas hidrológicas, económicas y de calidad de aguas generadas por diversas instituciones locales y centrales.

- La segunda herramienta la constituyó el establecimiento de un Sistema de Información Geográfico o SIG para cada cuenca, que se incluyó para poder ordenar y visualizar toda la información recopilada y generada en este estudio, y para facilitar su elaboración espacial. En la forma de SIG se entregó una gran cantidad de mapas, todos con sus bases de datos asociadas, que incluyen: coberturas básicas de ubicación, mapas con estaciones de monitoreo, mapas con información hidrológica de cuencas y drenaje, mapas con información de infraestructura de riego (canales y pozos), mapas con la información de los modelos de simulación (nodos, ramos, acuíferos, sectores de riego), mapas con la información que caracteriza la demanda de riego, vale decir, tipos de cultivo y métodos de riego, mapas con la ubicación de la demanda de no riego, esto es, agua potable, industria y minería, y mapas con algunos indicadores de eficiencia resultantes del estudio: acciones por hectárea, seguridad de riego, porcentaje de demanda suplida. Gracias a sus bases de datos asociadas, estos son “mapas que nos hablan”

- Como tercera herramienta, central para integrar toda la información recogida y obtener de ella el máximo provecho, se desarrolló y se aplicó un modelo hidrológico de balance, de simulación integrada superficial y subterránea, a nivel mensual, para cada cuenca estudiada, Elqui, Limarí y Choapa. Se usó el modelo MAGIC, en desarrollo por parte de la DGA, haciendo diversas proposiciones para su mejoramiento. El atractivo de un modelo de simulación es triple. Por un lado, su configuración requiere de una gran cantidad de información de entrada, lo que exige disponer de mucha información y gran conocimiento acerca del funcionamiento de la cuenca. Esta información sustenta una buena parte del diagnóstico sobre la eficiencia de uso del agua. En segundo lugar, el modelo, una vez calibrado, entrega una gran cantidad de información de salida, caracterizando los flujos hasta entonces desconocidos que ahora se pueden llegar a conocer, como son los flujos de interacción superficial-subterránea, flujos entre elementos, grados de satisfacción de la demanda, aportes requeridos desde los acuíferos para suplir demandas, pérdidas, y otros. Esta información de salida permite complementar de buena forma el diagnóstico logrado con la información de entrada. Y, por último, el gran atractivo de un modelo calibrado consiste en que se pueden introducir cambios en las cuencas, como incorporación de obras, cambios de cultivos o medidas de gestión, que se pueden evaluar técnicamente para conocer sus efectos sobre el sistema.

- Como cuarta herramienta, se aplicó un modelo económico, que, con apoyo en la información técnica que se obtiene del modelo hídrico, permite evaluar económicamente las medidas de aumento de eficiencia evaluadas con el modelo hídrico, y desprender recomendaciones en relación con la eficiencia económica del uso del agua. Se usó una metodología tradicional de evaluación, basada en la estimación de costos y beneficios de cada alternativa, y se obtuvieron como indicadores los siguientes: \$/m³, VAN y TIR.

3. CONFIGURACIÓN, ALIMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Se configuró un modelo MAGIC para cada cuenca, en base a los tres elementos constitutivos fundamentales: tramos de cauce definidos por nodos, tramos acuíferos y zonas de riego. A los cauces se asociaron los correspondientes elementos operativos con todas sus características

constitutivas y de operación, que son los canales, embalses y centrales hidroeléctricas, a los acuíferos se asociaron los pozos. A cada elemento se le asocian también, sus propiedades características, como permeabilidades para cauces y acuíferos, coeficiente de almacenamiento y volumen máximo para los acuíferos, capacidades para los embalses, y los datos que configuran la demanda. En las zonas de riego, los datos que configuran la demanda, son los cultivos, los métodos de riego, los coeficientes de derrame y percolación, la evapotranspiración y las lluvias efectivas.

Los modelos quedaron configurados de la siguiente manera:

- El modelo Elqui tiene 19 nodos, 12 sectores de riego y 12 acuíferos.
- El modelo Limarí tiene 53 nodos, 44 sectores de riego y 30 acuíferos.
- El modelo Choapa tiene 37 nodos, 28 sectores de riego y 26 acuíferos.

En las tres cuencas estudiadas, la demanda hídrica principal es la agrícola. Según se aprecia en el Cuadro N° 2, en la cuenca del Elqui, representa el 82% de la demanda consuntiva total, en la cuenca del Limarí, el 88%, y en la cuenca del Choapa, el 71%. En esta cuenca, el otro usuario importante es la minería, con un 11%.

Por lo señalado, una parte importante del trabajo se refirió a la caracterización de la demanda agrícola. A pesar de ser las tres cuencas similares en cuanto a la importancia de la demanda agrícola, difieren sustancialmente en los tipos de cultivos y el grado de tecnificación, lo que tiene relevancia para la eficiencia económica del uso del agua, y para la rentabilidad de las medidas que pueden proponerse. En el Cuadro N° 1 se caracteriza la demanda agrícola actual de las tres cuencas.

Cuadro N° 1
Caracterización de la demanda agrícola actual

Cuenca	Elqui *	Limarí	Choapa **
Superf.agrícola (ha)	23440	44040	14793
Sin / sobre embalse	2030 (9%)	11275 (26%)	8134 (55%)
Bajo embalse	21410 (91%)	32766 (74%)	6659 (45%)
Cultivos predominantes	hort/chac 62%, frut/vid 31%	frut/vid 49% hort/chac 31% prad 20%	prad/forr. 53% hort/chac 24% frut/vid 12%
Área tecnificada	31%	31%	4%
Sobre embalse	63%	29%	2%
Bajo embalse	21%	31%	8%

* el embalse es el Puclaro

** el embalse es el Corrales, que aún no estaba en funcionamiento en el período de calibración.

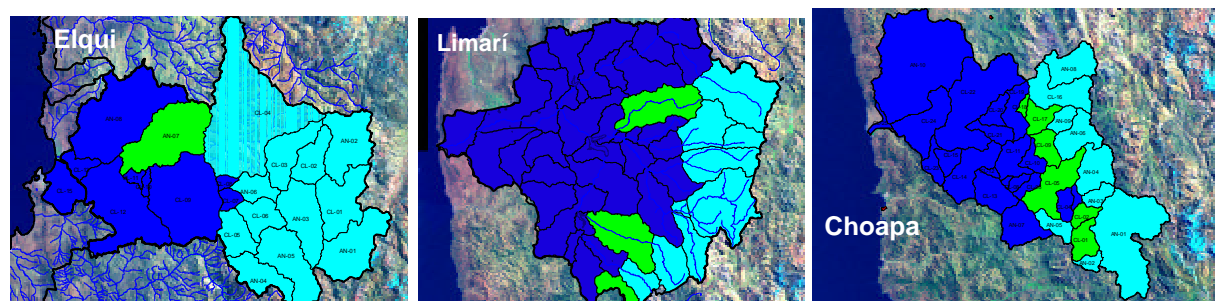
Cuadro N° 2
Cuantificación de la demanda consuntiva y de captación, por cuenca y por uso.
m3/s

Cuenca	Elqui	Limarí	Choapa
Demanda consuntiva			
agricultura	4.822	11.952	3.886
APU	0.250	0.050	0.020
APR	0.039	0.086	0.012
minería	0.101	0.020	0.600
industria	0.062	0.040	0.058
ET natural	0.630	1.380	0.900
Total demanda consuntiva	5.904	13.528	5.476
Demanda captación			
agricultura	13.584	23.207	14.184
APU	0.831	0.220	0.075
APR	0.141	0.185	0.104
minería	0.216	0.040	0.700
industria	0.062	0.040	0.058
ET natural	0.630	1.380	0.900
Total demanda captación	15.464	25.072	16.021

Tan importante como estimar bien la demanda por recursos hídricos, es estimar bien la oferta. Para ello se hizo un estudio hidrológico, por subcuenca aportante, para todas las subcuencas que quedan determinadas por los nodos de la modelación. La base del análisis la proveen las subcuencas con medición de caudal en estaciones fluviométricas, como es el caso de gran parte de las subcuencas de cabecera. Para las demás subcuencas, en general intermedias, se generaron los caudales en forma sintética, con ayuda de modelos de generación de escorrentía pluviales, mixtos o nivales.

La Figura N° 1 muestra para cada cuenca, la división en subcuencas que queda definida por los nodos. Con colores se distinguen las cuencas nivales, mixtas y pluviales.

Figura N° 1
Subcuencas aportantes definidas en base a nodos



El proceso de calibración de los tres modelos, Elqui, Limarí y Choapa, fue un proceso mayor, destinado a reproducir todos los comportamientos conocidos dentro de cada cuenca: caudales en

estaciones fluviométricas, niveles de embalses y niveles de acuíferos. En el proceso de calibración, las demandas, las ofertas medidas y algunos parámetros, se consideran datos. Las ofertas generadas sintéticamente y otros parámetros del sistema, como permeabilidades, coeficientes de almacenamiento, de derrame y percolación, fueron variables de calibración, y estuvieron sujetas a cambios y ajustes durante el proceso.

Una vez calibrados los modelos en todas sus partes, se asumió que reproducirían razonablemente bien los flujos del sistema hídrico de cada cuenca.

4. INDICADORES DE DIAGNÓSTICO

El diagnóstico se realizó para todos los tipos de eficiencia identificados en el acápite 2 de este trabajo. El diagnóstico de la eficiencia física se basó fuertemente en los modelos de simulación, específicamente en los datos de entrada y la interpretación de los datos de salida. El diagnóstico de la eficiencia económica se basó en el cálculo de la productividad del agua en \$/m³ en las diferentes actividades productivas. El diagnóstico de la eficiencia ambiental se basó en el análisis de los efectos contaminantes que cada tipo de uso ejerce sobre el agua, reconocidos en base a los monitoreos existentes. El diagnóstico de la eficiencia administrativa se basó en el análisis de la forma de organización y distribución del agua en la cuenca, en la que intervienen fundamentalmente las organizaciones de usuarios, y el marco legal que rige la asignación y reasignación de los derechos de agua.

Los modelos de simulación entregaron la siguiente información, la que se presenta en forma de series de tiempo mensuales para todo el período de análisis. El volumen de la información generada hace imposible su presentación en estas páginas. :

- Caudales demandados y recibidos por las zonas de riego: demanda nivel raíz, demanda de riego, caudal captado por canales, caudal entregado a zonas de riego y caudal bombeado. El análisis de esta información muestra las ineficiencias de riego y de conducción, para cada zona de riego dentro de cada cuenca.
- Curvas de satisfacción de la demanda, en valores absolutos y porcentuales, para cada zona de riego en cada cuenca.
- Caudales de retorno en comparación con los caudales afluentes a cada zona de riego, como comparación absoluta y porcentual
- Evolución del volumen almacenado en todos los acuíferos de cada cuenca, resultado de las demandas, recargas y afloramientos, para todo el período de análisis.
- Caudales disponibles para recarga, desde zonas de riego, cauces y canales
- Recargas netas o efectivamente recibidas por cada uno de los acuíferos, y afloramientos resultantes.
- Salidas al mar

Los indicadores de diagnóstico más importantes generados, se presentan en el Cuadro N° 3. Algunos de ellos se han representado también en los mapas de SIG, como los siguientes.

- los métodos de riego
- la eficiencia de aplicación del riego
- el porcentaje de área tecnificada por sectores de riego
- las acciones por hectárea.

- las tasas de riego resultantes
- el porcentaje de demanda suplida
- la eficiencia total de uso de agua desde bocatoma (incluye ineficiencias de conducción y de aplicación)
- el porcentaje de retorno de los caudales afluentes a las zonas de riego.

Cuadro N° 3
Indicadores de diagnóstico

Cuenca	Elqui	Limarí	Choapa
Extensión (km2)	9684	11695	7640
Agente demandante de agua			
Población urbana (hab)	325565	96239	49118
Población rural (hab)	39806	59919	32563
Superf.agrícola (ha)	23440	44040	14793
Minería	8730 tms/día sin Minera El Indio	15 ton conc/día Sólo Panulcillo	120.000 tms/día Pelambres
Derechos permanentes			
Totales	25846 + 3043 ED acciones perm. + 8.207 m3/s subt	60860 acciones permanentes + 3.170 m3/s subt.	22553 acciones permanentes + 1.821 m3/s subt
agricultura	25110 acciones + 5.348 m3/s subt	60433 acciones + 2.200 m3/s subt.	22553 acc + 0.797 m3/s subt + 0.560 m3/s subt
APU	736 acc superficial + 1813 l/s subt	427 acc + 482 l/s subt.	0.172 m3/s subterr
APR	0.288 m3/s subt (capac. bombeo)	89 l/s sup.+ 326 l/s subt	0.104 m3/s subt (capac. Bombeo)
minería	0.512 m3/s subt	227 l/s subt, usos menores sin derechos	1.100 m3/s superf. + 0.133 m3/s subt.
industria	0.246 m3/s subt	0.162 m3/s subt	0.058 m3/s subt.
Acciones riego	25110 + 3043 (ED)	60433	22553 acciones
Sobre embalse (sin ED)	11,963	18597	15894 (4067 Bato)
Bajo embalse	13,148	41836	6659
Derechos subterráneos	8.207 m3/s	3.170 m3/s	1.821 m3/s
Sobre embalse	1.850	0.874	1.218
Bajo embalse	6.360	2.296	0.603
Período modelado	1999-2004	1989-2004	1991-2001
Demandas, pérdidas y uso total (m3/s)			
Total demanda consuntiva	5.904	13.528	5.476
Total demanda captación	15.464	25.072	16.021
Demanda consuntiva suplida	5.402	8.094	4.610
Probab.exced.dda.cons.suplida	91%	86%	91%
Pérdidas			
ET embalses	0.260	1.510	0.000
Salidas al mar	4.067	2.315	10.596
Total pérdidas	4.327	3.825	10.596

Uso total	9.729	11.919	15.206
Probab.exced.del uso total en %	61	80	52
Eficiencia global de uso en %	56	68	30
Dotaciones uso agrícola			
Dotación media m3/acción/año	13658	11331	19470
sobre embalse	12925	20580	
bajo embalse	14970	6069	
Dotación sequía m3/acción/año	12125	6600	8600
sobre embalse	11985	13281	
bajo embalse	12284	3684	
Dotación media m3/ha/año	16555	15549	30647
sobre embalse	34139	35631	
bajo embalse	11068	9288	
Dotación sequía m3/ha/año	14697	9056	13536
sobre embalse	32555	21937	
bajo embalse	9123	4825	
Caracterización uso agrícola			
Dda consunt agrícola (m3/s)	4.822	11.952	3.886
Tasa media dda consunt (l/s/ha)	0.210	0.270	0.270
Eficiencia de aplic.riego en %	54	49	34
Porcentaje Demanda Suplida %	90	63	88
Área riego seguridad 85% actual	22100	24200	8600
Área riego seguridad 85% pot.	33400	42000	>20000
Caracterización acuíferos y su uso actual			
Vol. acuíferos (millones m3)	449	600	607
Sobre embalse	47	166	278
Bajo embalse	402	434	329
Disponibilidad de recarga (m3/s)	9.100	9.119	38.570
sobre embalse	3.900	5.380	11.260
bajo embalse	5.200	3.740	27.310
Derechos subterr. totales (m3/s)	8.207	3.170	1.821
sobre embalse	1.850	0.916	1.218
bajo embalse	6.360	2.254	0.603
Derechos subterr. riego (m3/s)	5.348	2.200	1.360
sobre embalse	1.618	0.606	0.858
bajo embalse	3.730	1.594	0.502
Bombeo efectivo total (m3/s)	1.848	1.757	0.504
sobre embalse	0.092	0.373	
bajo embalse	1.757	1.383	
Bombeo efectivo riego (m3/s)	1.390	1.386	0.262
sobre embalse	0.010	0.315	
bajo embalse	1.380	1.071	
Factor de uso riego	0.26	0.63	0.19
Factor de uso otros usos	0.16	0.38	0.53
Eficiencia física otros usos			
Agua potable urbana	asegurada	asegurada	asegurada
Agua potable rural	falta efect. cobro	falta efect. cobro	falta efect. cobro
Minería	alta	alta	alta
Industria	alta	alta	alta

Eficiencia económica			
minería	500 a 50.000 \$/m3	300 a 22.000 \$/m3	1500 a 45.000 \$/m3
agricultura	30 a 900 \$/m3	3 a 370 \$/m3	3 a 430 \$/m3
efic promedio agrícola	257 \$/m3	107 \$/m3	37 \$/m3
potencial utilizado	21%	23%	6%
aumento productividad 1996-2005	58% (conversión de cultivos)	28% (aumento área)	7.4% (conversión de cultivos)
ingreso agrícola anual esperado actual (mill \$)	25739	22141	2736
agua potable urbana:	asegurada x tarifas	asegurada x tarifas	asegurada x tarifas
agua potable rural	falta efect. cobro	falta efect. cobro	falta efect. cobro
Eficiencia administrativa			
Distribución del agua	Por desmarques	Sobre embalses: por turnos	Por desmarques
		Bajo embalses: ajust.demandas	
Aceptación de las organizaciones	buena	buena	buena
Profesionalización de directivas	alta	alta	creciente
Participación de usuarios nivel medio	regular	Sobre embalses: regular	regular
		Bajo embalses: buena	
Infraestructura de entrega	buen estado, proporcional no apta para traslados	buen estado, apta para traslados bajo embalses	buen estado, proporcional no apta para traslados
Estado de canales	deficiente	deficiente sobre embalses, buena bajo embalses	deficiente
Traslados dentro de canales	flexible o flexibilizándose	entregas volumétricas bajo embalses	flexible, poco formal
Traslados entre canales	difícil por infraestructura	difícil sobre embalses	difícil por infraestructura y falta de voluntad
Mercado del agua	local en Pan de Azúcar.	bajo embalse mercado spot y de acciones	compras de agua y arreglo de canales por agrícolas grandes
Cuándo no hay mercado	ha habido agua, así no hay mucho mercado	limitante: capacidad de infraestructura	se espera más mercado cuando haya más agua con embalse Corrales
Se oponen al mercado	la infraestructura, la costumbre de adaptar la demanda a la oferta, la falta de recursos para adaptar la infraestructura,	sobre embalse: la falta de recursos económicos para comprar agua	la infraestructura, la mentalidad, la costumbre, la falta de recursos económicos
Profundidad del mercado	17% hasta 2001	28% hasta 2001	desconocida

Eficiencia ambiental			
Natural	Toro y Malo: aporte malo: pH, sulfatos, Fe, Al, Mg (0,7 m3/s).Contam.natural boro, potasio	natural: salinidad en terras altas de la cuenca baja	calidad natural cabeceras: buenas pero aportan frec. Fe, Mn, y ocas. Mo sobre normas.
Minería	CN, Hg, Mo, Zn se redujeron después del cierre	hierro, manganeso, molibdeno, aluminio, ocas.	Pelambres: se diluye antes de Choapa. Aucó: conductiv y sulfatos, se diluyen en río Illapel, pero marcan acuífero
	Laguna, Incahuaz y Claro: aporte bueno (11,0 m3/s)	tranques de relave	Acuífero Illapel: exceso de sulfatos.
	Vicuña: casi norma en arsénico	contam minera: Panulcillo (Fe, Mn, Cu)	Acuíferos ocas Fe, Mn (sólo Choapa), Mo.
	Embalse Puclaro: norma.	Pero: están haciendo piscina	Tranques de relaves
Intrusión salina	no se detecta	no hay	no hay
Agricultura	no nitratos, ¿pesticidas?, ¿erosión laderas?	no nitratos, ¿pesticidas? ¿erosión de laderas?	no nitratos, no pesticidas (SAG, salvo en un canal), ¿erosión de laderas?
Aguas servidas	tratadas	tratadas	tratadas
Usuarios no tradicionales	contaminación de canales, basurales	contaminación de canales, humo de quemas	contaminación de canales, sales de caminos, basurales

5. OPERACIÓN DE LOS MODELOS EN NUEVOS ESCENARIOS

El diagnóstico mostró que en las tres cuencas hay agua que se nos escapa del sistema, por causa de diversas ineficiencias, que se producen a nivel local, medio y global. Lo que interesa entonces, es buscar medidas que permitan aumentar la eficiencia, vale decir, que permitan retener más agua dentro de la cuenca. Hacia esto se enfocó el trabajo de operación de escenarios con los modelos. Las medidas que se evaluaron con los modelos, son medidas estructurales y no estructurales, y fueron las siguientes:

- Incorporación de nuevos embalses (Corrales en el Choapa y El Bato en el Illapel)
- Entubamiento de canales
- Tecnificación de zonas de riego
- Explotación más intensiva de los acuíferos subexplotados
- Aplicación de nuevas formas de gestión o entrega de las aguas.

La aplicación de estas medidas, aisladas y en diversas combinaciones, dio lugar a la operación de numerosos escenarios para cada una de las cuencas: 17 para el Elqui, 5 para el Limarí y 9 para el Choapa. Los escenarios técnicamente viables, esto es, en los cuales no se deprimen

permanentemente los acuíferos, ni se secan los cauces, ni se ven mayormente afectados los canales, se evaluaron con el modelo de evaluación económica, para conocer su viabilidad.

6. RESULTADOS GENERALES

La operación de los modelos hídrico y económico permitió concluir, a grandes rasgos, lo que se presenta a continuación. Todo el análisis en detalle se presenta en el informe.

- Los embalses Corrales y El Bato, si bien técnicamente factibles, no son rentables si no van acompañados de una política radical de cambio de cultivos, y con ello, un cambio importante en la generación de ingresos. El embalse Corrales requiere, desde ahora mismo, más que duplicar los ingresos en el valles del Choapa, y el embalse El Bato requiere casi quintuplicar los ingresos en el valle del Illapel, para llegar a rentabilizarse.

- En relación con el aumento de eficiencia en la conducción de canales, ésta es imperiosa en todas las cuencas. Y esto, no sólo por las grandes filtraciones que presentan los canales, que alimentan mucha vegetación parásita, sino que también por las fuertes pérdidas por evaporación que se producen, especialmente cuando los caudales son pequeños.

- Las ventajas del entubamiento frente al revestimiento son muchas, en todos los ámbitos, físico, económico, ambiental y de gestión. El costo no es necesariamente mayor, como quedó demostrado a través del proyecto de entubamiento del canal Población. El anteproyecto mostró los siguientes rangos de precios para el revestimiento común: entre 20.000 \$/ml hasta 60000 \$/ml, para caudales entre 50 y 500 l/s, y para cantidades de 1 a 10 compuertas por km. Para entubamientos, valores reales se encuentran entre 35.000 \$/ml para un canal de 6,5 km de largo, caudal inicial de 400 l/s y 84 válvulas de salida, ya construido, y 55.000 \$/ml, para un proyecto de 500 m de entubamiento, un caudal de 100 l/s y 6 válvulas de salida.

- Visto a nivel global, en la cuenca del Elqui, los entubamientos se justifican principalmente bajo el embalse Puclaro, y se rentabilizan a través del solo aumento de satisfacción de la demanda que permiten generar en las áreas de riego actuales. En la cuenca del Limarí, los entubamientos, que se asumen para los canales de toda la cuenca no revestidos ni entubados en la actualidad, requieren un aumento de ingreso de un 11% global en toda la cuenca para justificarse económicamente. En la cuenca del Choapa, se probó el entubamiento de canales en conjunto con la tecnificación. Estas medidas se justifican si los canales se entuban unificados de a dos, y se cambian los cultivos, especialmente las praderas, por otros que permitan casi duplicar los ingresos actuales.

- La tecnificación del riego es física y económicamente viable, y por lo tanto, deseable, en casi todos los sectores de todas las cuencas estudiadas. Se proponen algunos métodos avanzados para la tecnificación, como monitoreo de suelo y clima, riego intermitente, riego deficitario controlado y sistemas lepa, los cuales ya están siendo conocidos en la región.

- Visto a nivel global, en el valle del Elqui, la tecnificación completa del área actual queda económicamente justificada casi sólo con el aumento de demanda suplida que se logra. En la cuenca del Limarí, la tecnificación es la medida que más se justifica, tanto física como económicamente. También se rentabiliza prácticamente sólo con el aumento de áreas que permite

incorporar al riego seguro, que se estiman en unos 11.000 ha sobre las 24.000 actuales. En el valle del Choapa, la tecnificación del riego se analiza en conjunto con los entubamientos. En este valle, las inversiones de mejoramiento requieren una fuerte optimización de costos a través de la unificación de canales, y una reconversión de las praderas a cultivos más rentables.

- Hay algunos sectores, donde los acuíferos subyacentes no cuentan con cauces, reciben poca recarga por lluvias, son principalmente alimentados por las percolaciones del riego, y además hay derechos suficientes como para explotar toda la recarga media actual. En estos acuíferos, la tecnificación reduce la recarga más que lo que se reduce el consumo, lo que puede tener efectos de depresión irreversible en los niveles. Los sectores que se encuentran en esta situación, son los de Pan de Azúcar y Santa Gracia en el sistema del Elqui, y las terrazas al sur del Limarí en la cuenca del Limarí. No hay sectores en esta situación en la cuenca del Choapa, donde en todas partes la recarga principal de los acuíferos la constituye el cauce.

- Por la misma razón, en los mismos sectores mencionados, no se debieran constituir más derechos de agua subterránea. Tampoco es recomendable en tales sectores cambiar la forma de uso de los derechos, por ejemplo, hacer un uso más intensivo a través de un traspaso a la minería, como podría ocurrir en el Pan de Azúcar.

- Por otro lado, hay diversos acuíferos en que sí es posible una mayor explotación, la cual requiere de una mayor cantidad de derechos para ser operativa. En tal situación se encuentran los acuíferos Elqui Alto, Elqui Bajo y Costa de la cuenca del Elqui, los acuíferos del río Grande bajo Paloma y del río Limarí en la cuenca del Limarí, y prácticamente todos los acuíferos de la cuenca del Choapa. Las solas excepciones en la cuenca del Choapa son el acuífero de Quelén y la cabecera del Chalinga, donde una tecnificación del riego podría limitar el uso más intensivo de los acuíferos, por la misma razón de reducción de recarga antes señalada.

- La explotación mayor de los acuíferos requiere que la administración constituya más derechos, aunque sean condicionados. Hay que reconocer que los acuíferos, si son pequeños, como los de los afluentes del Elqui, o los de la cuenca Limarí en general, pueden no aceptar una explotación regular, pero de todas formas, pueden generar alivio ante las sequías. Para ello deben estar operativos a través de pozos. Los acuíferos intermedios y grandes deben estar operativos con derechos hasta el límite de su explotabilidad, de modo de suplir en forma importante los déficits de agua superficial en ocasión de sequías, que pueden durar varios años. Hacia esto es que debe enfocarse la gestión integrada de los recursos hídricos.

- En cuanto a la rentabilidad de explotar más intensivamente los acuíferos, en el Elqui los pozos adicionales necesarios se rentabilizan prácticamente con el aumento de seguridad de riego que dan a las áreas actuales. Para un escenario con aumento de áreas, con mayor razón resultan rentables los pozos y su explotación. En el valle del Limarí, nuevos pozos sólo se pueden admitir en los sectores antes señalados, y requieren de un análisis local para conocer su justificación económica. En el valle del Choapa, la implementación de pozos es físicamente viable en casi toda la cuenca, pero para rentabilizarse económicamente requiere de un cambio de cultivos que duplique los ingresos actuales.

- Hay una medida de gestión, no estructural, que se perfila como muy efectiva, y rentable porque no genera costos. Es fundamentalmente la entrega o distribución del agua ajustada a las

demandas, ya sea entregas desde los embalses, como de los mismos canales. Esto requiere que la movilización física de los derechos sea fácil, para que el agua se pueda entregar donde realmente haya demanda, pues allí es donde genera valor. Lo señalado se facilita a través de la entrega por válvulas desde canales entubados.

- Al facilitarse la movilización física del agua, también se facilita la transacción económica, o mercado del agua, y el agua puede llegar a donde mayor valor genera, con lo que todos ganan.

- En cuanto a la eficiencia ambiental de los usuarios, el agua potable es un usuario eficiente por ley, y todas las aguas servidas concentradas en la IV^a Región son tratadas en la actualidad. La industria está haciendo acuerdos de producción limpia con la autoridad ambiental. La gran minería del cobre no se percibe fuertemente contaminante de las aguas, pero sí instaladora de grandes obras que inquietan la conciencia pública. La gran minería del oro aparece más contaminante (El Indio, cuenca del Elqui). La mediana y pequeña minería tiene en la región, dispersos, 422 tranques de relaves que aportan sedimentos y elementos de lixiviación a la calidad general del agua de las cuencas, constituyendo un pasivo ambiental.

- Además, hay algunos agentes contaminadores que podrían llamarse no tradicionales, que son la contaminación natural, la recontaminación doméstica de canales, y los basurales. Los dos últimos requieren la elevación del nivel cultural de la población.

7. CONCLUSIONES

- El tema de la eficiencia es complejo, y su análisis efectivo requiere de la aplicación de herramientas adecuadas, que son también complejas.
- El estudio entrega una metodología de análisis para el tema de la eficiencia en el uso del agua.
- El estudio entrega tres modelos calibrados a la DGA, para su aplicación, operación y perfeccionamiento posterior.
- La visión local de la eficiencia difiere de la visión global. Medidas de eficiencia local no necesariamente son eficientes también en el nivel global.
- Las verdaderas pérdidas, desde el punto de vista del sistema, son la evaporación no controlada, y las salidas al mar, y no los derrames ni las percolaciones, porque ellos pueden ser reusados aguas abajo o rellenar acuíferos.
- La eficiencia global requiere la máxima flexibilidad en la reasignación de los derechos. El desafío consiste en potenciar el mercado del agua, y lograr una administración ágil de ellos.
- Contribuye fuertemente al uso eficiente del agua el hecho de asumir los costos reales en que se incurre para obtenerla. Un ejemplo de ello es sistema sanitario chileno.
- La gestión integrada del recurso hídrico debiera tender hacia los derechos de agua genéricos, de modo que el recurso se obtenga superficial o subterráneamente, de acuerdo con el lugar y las circunstancias, optimizando la eficiencia de uso en la cuenca completa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue contratado a CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y El Caribe) por el Gobierno Regional de la IV^a Región de Coquimbo, con Fondos Nacionales de Desarrollo Regional. El trabajo fue desarrollado con la asesoría de RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda, bajo la inspección de la Dirección Regional de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.

Los autores desean expresar su agradecimiento a todas las personas de la región y de Santiago que colaboraron con los objetivos del estudio, facilitando tiempo, datos y transmitiendo su valiosa experiencia. Muy especialmente se agradece su amplia colaboración a José Izquierdo, Manuel Domínguez y Alex Cortés de la Junta de Vigilancia del río Elqui, a Carlos Peralta de la Junta de Vigilancia del Estero Derecho, a José González del Río y Manuel Muñoz de la Junta de Vigilancia del río Grande y Limarí, y a Francisco Meza del INIA de Illapel.

REFERENCIAS

Las referencias bibliográficas consultadas son 87, se encuentran reseñadas en el Anexo Digital Bibliográfico del estudio, y también se incluyeron en el SIG de cada cuenca. Aquí solamente se presentan los títulos principales, ordenados cronológicamente.

1. Investigación de Recursos Hidráulicos en la IV Región. Tomos: Hidrología, Hidrogeología de la cuenca del río Limarí. SERPLAC, DGA, ONU, CORFO. Mayo 1979.
2. Estudio Integral de Riego Valle de Elqui. Comisión Nacional de Riego. Ina Ingenieros Consultores, Ipla Ltda, Noguera y Asoc, Agroingeniería Ltda. 1987.
3. Levantamiento catastral de los tranques de relaves en Chile. Etapa B: Regiones IV, VI y VII. Catastro resumido de los tranques de relaves de la IV Región, Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Ingeniería y Geotecnia Ltda. Marzo 1990.
4. Mejoramiento Sistema Paloma. IV Región. Estudio Hidrológico Abril 1992, Modelo Simulación Junio 1992. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. Ingendesa.
5. Proyecto embalse Puclaro. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. Consorcio Ingeniería Ingendesa – Edic Ltda. 1994.
6. Estudio Integral de Riego Proyecto Choapa. Comisión Nacional de Riego. Ingendesa. Junio 1995.
7. Manual de fichas agroeconómicas de cultivos de hortalizas para el área del proyecto PROMM canal Buzeta. Francisco Meza, Oscar Campusano, Alfonso Osorio. ODEPA, INIA Intihuasi, Noviembre 1999
8. Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios. SIT N° 6. REG Ricardo Edwards G. Ingenieros Ltda. 1991.
9. Modelo de simulación mensual para la operación del sistema de recursos hidráulicos del río Elqui, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Junta de Vigilancia Río Elqui y sus Afluentes. Luis Arrau del Canto, Ingenieros Consultores. 2001.
10. Mercado de agua para irrigación. Una aplicación al Sistema Paloma de la cuenca del Limarí, Chile. Oscar Cristo y Sebastián Vicuña, Banco Mundial. 2001.