



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

**ANÁLISIS DE EMBALSE SUBTERRÁNEO:
APLICACIÓN EN ACUÍFERO SUBYACENTE AL RÍO ELQUI,
IV REGIÓN DE COQUIMBO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CHRISTIAN FERNANDO ROMERO FIGUEROA

**PROFESOR GUÍA:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EUGENIO CELEDÓN SILVA
JULIO CORNEJO MORALES**

**SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CHRISTIAN ROMERO F.
FECHA: 22/06/2009
PROF. GUIA: Sr.CARLOS ESPINOZA C.

**ANÁLISIS DE EMBALSE SUBTERRÁNEO:
APLICACIÓN EN ACUÍFERO SUBYACENTE AL RÍO ELQUI,
IV REGIÓN DE COQUIMBO**

El motivo de este estudio ha sido abordar el concepto del manejo conjunto de los recursos hídricos superficiales y subterráneos a través del análisis de la respuesta del acuífero del Valle del río Elqui frente a escenarios de operación que permiten una mayor tasa de extracción de aguas subterráneas en periodos de sequía y la cuantificación de eventuales tasas de recuperación del volumen almacenado una vez que se reestablecen las condiciones hidrológicas normales.

Se utiliza como base el modelo de simulación hidrogeológico de la Dirección General de Aguas para el acuífero del Valle del río Elqui implementado en *Visual Modflow* y 5 de 10 escenarios de operación que se consideran provienen de un estudio previo en donde se utilizó el modelo *MAGIC*, un modelo hidrológico de balance, de simulación integrada superficial y subterránea, a nivel mensual. Estos escenarios de operación de duración de 15 años tienen como consecuencia cambios directos en la explotación de los acuíferos y en la recarga de estos. Los 5 escenarios restantes se proponen en el presente estudio, de los cuales 3 tienen una duración de 15 años y 2 de 30 años.

El modelo implementado en *Visual Modflow* es calibrado en régimen transiente en el periodo entre Abril de 1999 y Marzo de 2004. La operación de los escenarios en este modelo hidrogeológico se realiza entre el periodo de Abril de 1989 y Marzo de 2004, el cual contiene la sequía hidrológica que afectó la zona de estudio ocurrida entre 1993 y 1997.

Como resultado del modelo de simulación hidrogeológico se logra identificar cuales escenarios logran recuperar la disminución del volumen almacenado a causa del aumento de la explotación de aguas subterráneas durante el periodo de sequía, se calculan las tasas de recuperación del volumen de agua y se analiza el efecto que tienen estos escenarios en los flujos subterráneos que se deben a condiciones de borde del sistema.

Se concluye como viable de una tasa de explotación del agua subterránea más allá de los criterios actuales frente a un evento como una sequía hidrológica por cuanto se observa para algunos escenarios una recuperación del volumen almacenado una vez que se recuperan las condiciones de recarga normales incluso considerando una continuidad en la explotación normal del acuífero, aunque esta recuperación del volumen almacenado resulta significativamente más rápida si se considera una suspensión de la explotación del agua subterránea una vez terminada la sequía hidrológica con el objeto de reestablecer los niveles piezométricos para garantizar la seguridad del sistema frente a una eventual nueva sequía.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Organización del Informe	2
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
2.1	Antecedentes Generales	3
2.1.1	Ubicación	3
2.1.2	Clima y Vegetación	4
2.1.3	Geomorfología	5
2.1.4	Suelos	8
2.1.5	Usos del Suelo	8
2.1.6	Usos del Agua	9
2.2	Hidrología	10
2.2.1	Pluviometría y Evapotranspiración	10
2.2.2	Fluviometría y Drenaje	12
2.3	Geología	13
2.4	Hidrogeología	15
2.4.1	Formaciones Acuíferas	15
2.4.2	Propiedades Hidrogeológicas	15
2.4.3	Estimación del Volumen de Agua Almacenada	15
2.4.4	Profundidad de la Napa y Sentido de Escurrimiento	16
3	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	19
3.1	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Elqui, IV ^a Región. Dirección General de Aguas, Diciembre 2003.	19
3.2	Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero del Valle del Elqui. Dirección General de Aguas, Junio 2006.	20
3.3	Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua - Estudio de caso en la región de Coquimbo. Cazalac – Rodhos, Diciembre 2006.	21
3.3.1	Alcances y Metodología	22
3.3.2	Descripción del Modelo MAGIC	23
3.3.3	Configuración, Suministro de Información y Calibración del Modelo Elqui	26
3.3.4	Resultados del diagnóstico Modelo Elqui	31
3.3.5	Operación del sistema en nuevos escenarios	31
3.4	Valle del Elqui - Investigación del Agua Subterránea. Informe preparado para la CORFO por el Departamento del Interior de EE.UU. - Bureau of Reclamation, Octubre de 1955.	31
3.4.1	Descripción	31
3.4.2	Resultados Generales	32
3.4.3	Constantes Elásticas del Acuífero	33
3.4.4	Gasto de la corriente subterránea y recarga	34
3.4.5	Capacidad del embalse subterráneo	36
4	MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICO	37
4.1	Descripción de Visual Modflow	37
4.2	Implementación del Modelo	38
4.2.1	Simplificación del Sistema Físico	38
4.2.1.1	Discretización espacial horizontal	38
4.2.1.2	Discretización espacial vertical	39
4.2.2	Discretización Temporal y Periodo de Simulación	43
4.2.3	Propiedades Hidrogeológicas	43

4.2.3.1	Conductividades Hidráulicas.....	43
4.2.3.2	Coefficientes de Almacenamiento.....	46
4.2.4	Condiciones de Borde	48
4.2.5	Sectores de Balance Hídrico Subterráneo.....	49
4.2.6	Acciones Externas: Recarga y Extracción	50
4.2.6.1	Recarga Subterránea	50
4.2.6.2	Recarga Superficial	51
4.2.6.3	Extracción por Pozos de Bombeo	52
4.3	Calibración del Modelo de Simulación.....	55
4.3.1	Pozos de Observación	55
4.3.2	Acciones Externas: Recarga y Extracción	59
4.3.3	Condición Inicial	60
4.3.4	Esquema de Solución o <i>Solver</i> Seleccionado y Opciones de Ejecución.....	61
4.3.5	Resultados de la Calibración.....	62
4.3.5.1	Niveles Observados y Calculados.....	62
4.3.5.2	Balance Hídrico	66
4.3.6	Aceptación de Recarga Superficial y Extracción por Bombeo.....	67
4.3.7	Equipotenciales.....	68
4.3.8	Flujos	69
5	OPERACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	72
5.1	Definición de Escenarios Seleccionados.....	72
5.1.1	Escenarios extraídos del estudio Cazalac-Rodhos (2006)	72
5.1.2	Escenarios propuestos	74
5.2	Bombeo y Recarga Superficial Nominal de Escenarios	75
5.3	Resultados de la Simulación	78
5.3.1	Escenarios con Simulación de 15 años	78
5.3.1.1	Demanda Suplida y Recargas Aceptadas por el Modelo.....	78
5.3.1.2	Balance Hídrico Subterráneo	82
5.3.1.3	Niveles piezométricos.....	84
5.3.1.4	Evolución del Volumen Almacenado en el Acuífero	85
5.3.1.5	Tasas de Recuperación.....	92
5.3.1.6	Equipotenciales	93
5.3.1.7	Flujos Dependientes de Condiciones de Borde	94
5.3.2	Escenarios con Simulación de 30 años	97
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
6.1	Conclusiones.....	101
6.2	Recomendaciones	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	105

ANEXOS

ANEXO A Niveles observados y calculados en periodo de calibración.....	107
ANEXO B Pozos de observación.....	110
ANEXO C Definición de estadísticos en calibración (Visual Modflow)	111
ANEXO D Recarga superficial y bombeos nominales.....	112
ANEXO E Demanda suplida en escenarios de operación.....	116
ANEXO F Balance hídrico subterráneo de escenarios de operación	119
ANEXO G Niveles piezométricos en escenarios de operación	127
ANEXO H Flujos netos en acuífero por concepto de condición de borde del río Elqui	129
ANEXO I Recarga superficial aceptada y demanda suplida en simulaciones de 30 años	133
ANEXO J Comparación de niveles obtenidos entre el presente estudio y el estudio DGA, 2006.	135
ANEXO K Relleno sedimentario del río elqui entre Algarrobal y Altovalsol.....	138

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Atendiendo a que en general el factor que más se distingue en el constante desarrollo de un determinado lugar es la disponibilidad de abastecimientos adecuados de agua, resulta fundamental abordar la importancia que tiene en el manejo conjunto de los recursos hídricos superficiales y subterráneos el hecho de considerar al acuífero como un embalse subterráneo y el rol que representa la recarga variable en la regulación de los recursos hídricos al asumir el concepto de *explotación óptima*, teniendo en cuenta los recursos permanentes, reservas existentes y el funcionamiento de los acuíferos.

De esta forma, teniendo en cuenta las condicionantes de la demanda de recursos hídricos, como puede ser el caso de una sequía hidrológica, resulta significativo considerar para un mejor aprovechamiento de las aguas subterráneas el intensificar la explotación de los embalses subterráneos, apoyando la falta de aguas superficiales, y la vez teniendo en cuenta la recuperación del volumen extraído a través del aumento en la recarga en los periodos húmedos.

A partir de la conceptualización anterior, considerando un modelo de simulación hidrogeológico implementado en Visual Modflow como una herramienta que permite conocer la tendencia del comportamiento del acuífero, este trabajo de título tiene como fin analizar la respuesta del acuífero del Valle del río Elqui, IV Región de Coquimbo, frente a escenarios de operación que, modificando la utilización de los elementos que conforman el sistema, tienen como resultado modificaciones directas en el proceso de recarga superficial del acuífero y en la explotación de aguas subterráneas.

Los escenarios de operación que se analizan en este estudio provienen de los resultados obtenidos de un estudio previo, en donde se utilizó un modelo hidrológico de balance, de simulación integrada superficial y subterránea, a nivel mensual, y cuyo objetivo principal fue simular el comportamiento de los elementos superficiales que componen la cuenca a través del tiempo y su relación con los acuíferos subyacentes a dicha cuenca. Si bien el modelo mencionado incorpora una representación de la hidrología subterránea, esta no es satisfactoria, por lo que resulta de interés alimentar con la información resultante un modelo hidrogeológico más detallado, como lo permite la herramienta computacional Visual Modflow.

Lo esencial de estos escenarios de operación es que su simulación se realiza entre el periodo de abril de 1989 y marzo de 2004, el cual contiene la sequía hidrológica que afectó la zona de estudio ocurrida entre 1993 y 1997 en donde, a falta de aguas superficiales para satisfacer la demanda, se intensificó la extracción de aguas subterráneas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de este estudio es evaluar el efecto regulador del embalse subterráneo frente a mayores tasas de explotación del recurso hídrico en épocas de sequía hidrológica, considerando como aplicación la situación en el acuífero del Valle del Elqui.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- § Calibrar un modelo de simulación hidrogeológico a nivel mensual con información proveniente de un modelo hidrológico de balance, de simulación integrada superficial y subterránea, previamente desarrollado, que tuvo como objetivo principal representar los elementos superficiales que componen la zona de estudio.
- § Evaluar el comportamiento del acuífero en escenarios de operación que modifican el procedimiento de utilización del recurso hídrico, previamente definidos y en escenarios ficticios que se proponen.
- § Determinar tasas de recuperación del volumen almacenado en el embalse subterráneo una vez terminada la sequía hidrológica para los escenarios de operación considerados.

1.3 Organización del Informe

En el Capítulo 2, *Descripción de la Zona de Estudio*, se indican las principales características de la IV Región de Coquimbo, desde el punto de vista geográfico y climático, poniendo énfasis en la hidrología y la actividades económicas de esta.

En el Capítulo 3, *Revisión de Antecedentes*, se muestra un breve resumen de los estudios en los cuales se fundamenta el presente trabajo de título, describiendo los aspectos más relevantes en cuanto a supuestos y resultados.

El Capítulo 4, *Modelo de Simulación Hidrogeológico*, se compone de dos partes. La primera tiene relación con la descripción general del modelo y su construcción para representar la zona de estudio. La segunda parte corresponde la calibración del modelo, indicando las acciones externas sobre este en el periodo de calibración y sus resultados sobre el sistema.

En el Capítulo 5, *Operación del Modelo de Simulación*, se describen los escenarios de operación a los que es sometido el sistema, entregando una evaluación del efecto que estos tienen sobre el embalse subterráneo.

Por último, en el Capítulo 6, *Conclusiones y Recomendaciones*, se entregan una serie de comentarios relacionados con los resultados obtenidos del presente estudio.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Ubicación

La cuenca hidrográfica del río Elqui forma parte de la IV Región de Coquimbo. La IV Región de Coquimbo, ubicada aproximadamente entre los 29° 10' y 32° 10' de latitud Sur y entre los 70° 30' y 70° 15' de longitud Oeste, comprende una superficie de 40.656,3 km². Limita al Oeste con el Océano Pacífico, al Este con la Cordillera de los Andes, al Norte con la III Región de Atacama, y al Sur con la V Región de Valparaíso.

Administrativamente, esta Región se divide en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. Por su geografía, la región está constituida por tres cuencas principales; Elqui, Limarí y Choapa, y otras cuencas menores.

La cuenca hidrográfica del río Elqui, se ubica aproximadamente entre los paralelos 29° 35' y 30° 20' de latitud Sur, abarcando una extensión de 9.826 km².

La zona de estudio del presente trabajo de título comprende el valle del río Elqui, desde su nacimiento en la confluencia de los ríos Turbio y Claro, hasta su desembocadura en el mar y, de ahí hacia el Norte, al sector costero que se extiende hasta Punta Teatinos.

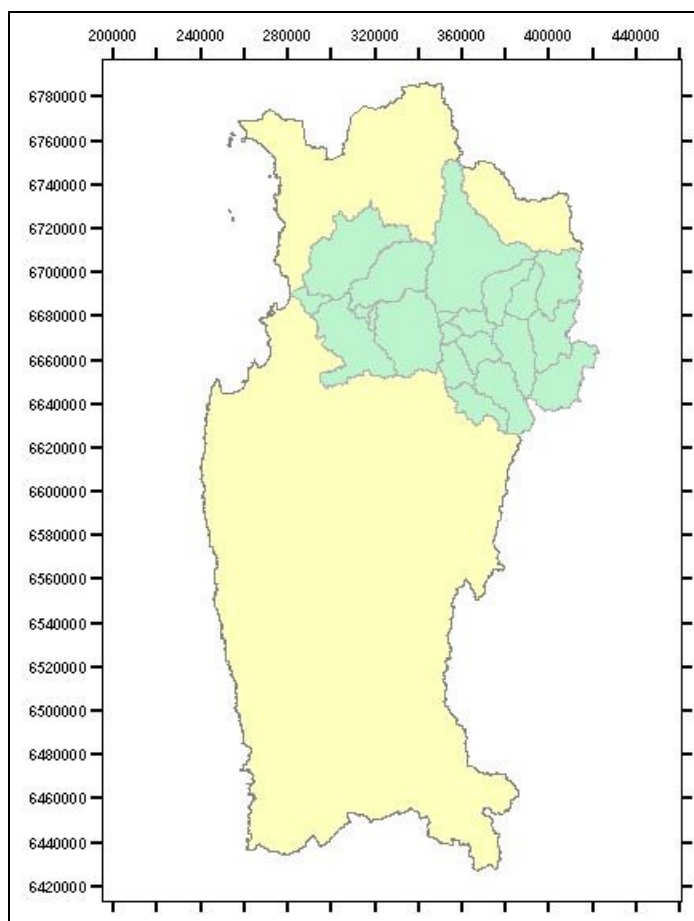


Figura 2-1 IV Región de Coquimbo y la cuenca hidrográfica del río Elqui.
Fuente: SIG, Cazalac-Rodhos, 2006.

2.1.2 Clima y Vegetación

La hoya hidrográfica del Elqui presenta un carácter árido con influencias del clima desértico del norte y del clima semiárido de Chile central. Los tipos de clima que se presentan corresponden a Estepárico Costero o Nuboso, Estepa Cálido y Templado Frío de Altura (DGA, 2004), cuya distribución se indica en la Figura 2-2.

§ Clima Estepárico Costero o Nuboso

Se presenta a lo largo de toda la costa. Su influencia llega hasta el interior hasta 40km, por medio de los valles transversales y quebradas. Su mayor característica es la abundante nubosidad; humedad, temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8 a 9 meses

§ Clima de Estepa Cálido

Este clima se sitúa en el valle del río Elqui, por sobre los 800 metros y se caracteriza por la ausencia de nubosidad y sequedad del aire. Sus temperaturas son mayores que en la costa, las precipitaciones no son tan abundantes y los períodos de sequía son característicos.

§ Clima Templado Frío de Altura

Este clima se localiza en la Cordillera de Los Andes sobre los 3.000 metros de altitud con características de altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival.

La vegetación se describe como una estepa arbustiva abierta, la cual presenta variaciones producto del efecto combinado de factores ecoclimáticos, topográficos y altitudinales. En general, en sentido Oeste – Este, se pueden distinguir las zonas de vegetación: matorral arbustivo costero, poco denso con presencia de espinos y cactáceas, desarrollado en la franja litoral y vertiente oriental de los cordones costeros; estepa abierta de acacia caven, que corresponde a una matriz de matorral degradado localizado en el interior de la cuenca, en las laderas de los cordones transversales donde la insolación es mayor; matorral abierto andino, formación abierta, baja, cubierta de hiervas y arbustos bajos muy dispersos localizada en los cordones montañosos andinos entre los 1.000 y 2.000 m.s.n.m. aproximadamente; y la estepa andina, ubicada por sobre los 2.000 m.s.n.m. y limita con las nieves de alta montaña, caracterizada por la presencia de hierbas xerófitas y arbustos pequeños cuya talla no sobrepasa los 60 cm de altura, resistentes a bajas temperaturas y nieve.

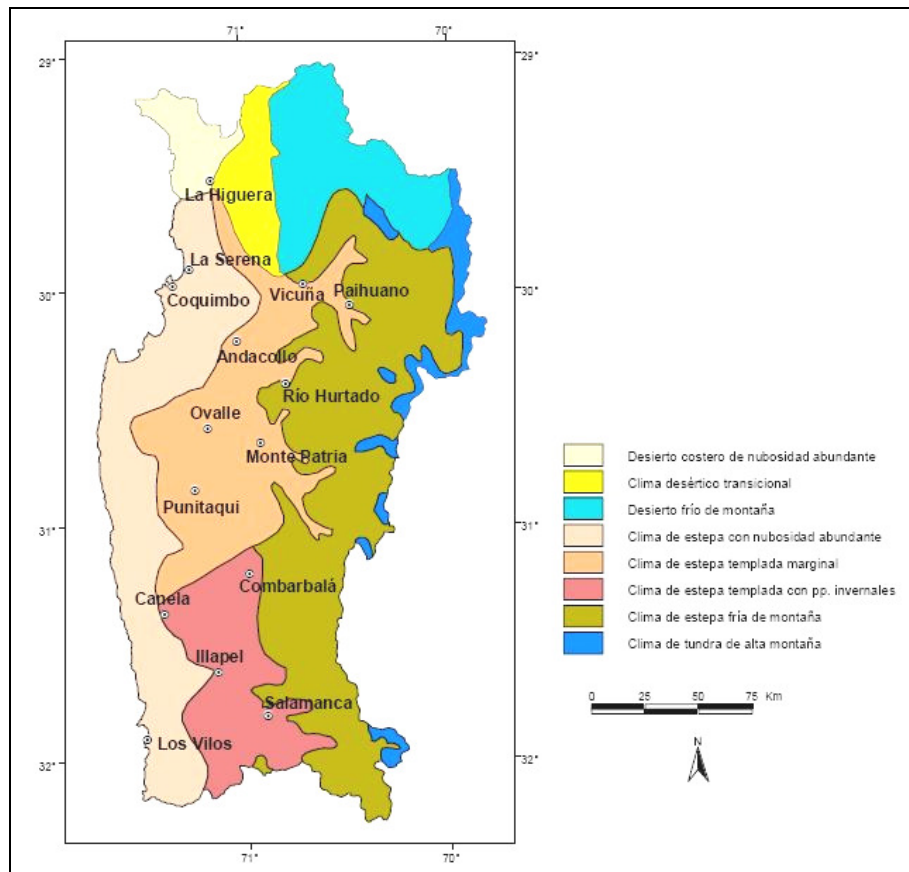


Figura 2-2 Clima Región de Coquimbo.

Fuente: Novoa y López, 2001.

2.1.3 Geomorfología

Romero *et al.* (1988), citado por Cepeda *et al.*, 2005, reconocen para el Valle del Elqui: una franja litoral o costera, en sus expresiones litoral norte y litoral central; la media montaña, en sus expresiones interfluvio norte del Elqui e interfluvio Elqui- Limarí; el valle transversal; y la alta montaña, que en la hoya del Río Elqui está representada por la Cordillera del Elqui. Estas características geomorfológicas de la hoya hidrográfica siguen la descripción de Paskoff (1970). Estos principales rasgos se muestran en las Figuras 2-3 y 2-4, y se describen a continuación:

§ La franja litoral

Constituye la unidad geomorfológica más occidental y de menor altitud de la hoya hidrográfica. En ella se encuentran terrazas marinas construidas ya sea a partir de depositaciones o de procesos de labrado de las rocas litorales. Las terrazas marinas bajan gradualmente en dirección al mar con una pendiente del 7%; cerca de la desembocadura del río Elqui alcanzan ~ 120 a 130 m.s.n.m. (Paskoff, 1970).

Las terrazas logran su mayor desarrollo en la Bahía de Coquimbo (29°53'S-71°18'O), donde se asienta la conurbanación La Serena-Coquimbo. En el sector de la costa, el valle se mezcla con las planicies litorales que se extienden latitudinalmente por el borde costero, alcanzando en algunos sectores un ancho de 30 km (DGA, 2004).

§ **La media montaña**

Corresponde a los sectores de interfluvios o serranías presentes en la hoya hidrográfica. Se trata de un macizo montañoso de regular altitud que se encuentra muy disectado por la erosión fluvial. La precipitación promedio anual de la media montaña es cercana a los 100 mm, con una gran variabilidad interanual. Esta pluviometría no permite la formación de cursos permanentes de agua; los escurrimientos son sólo esporádicos, en respuesta a precipitaciones intensas y concentradas, particularmente durante ocurrencias del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), durante el cual la precipitación aumenta marcadamente (Cepeda *et al.* 2005).

§ **El valle transversal**

Corresponde al curso medio del río Elqui. Los caudales de este interrumpen sucesivamente la media montaña y más la Oeste las terrazas marinas, manifestando una diferenciación significativa respecto al paisaje árido y semiárido en que se encuentra inmerso.

Desde el sector de El Molle hasta la desembocadura en el mar, el cauce principal presenta escurrimiento de tipo anastomosado y valles con mayores amplitudes cuyo material de sedimentación fluvial ha originado amplias terrazas laterales de significativa importancia, localizadas a unos 25 km de la desembocadura. Las diferencias de altitud en el valle transversal, oscilan entre los 700 m por el norte del cauce principal de la cuenca y 260 m por el sur del mismo curso fluvial (DGA, 2004).

§ **La alta montaña**

Constituye la sección más oriente y de mayor altitud de la hoya hidrográfica. Corresponde básicamente a aquella parte de la alta montaña de los Andes donde se originan los cursos de agua que forman el Río Elqui, razón por la cual esta sección se conoce como la Cordillera del Elqui (Romero *et al.* 1988). El área es orográficamente muy compleja (Veit 1991, 1993), con una gran energía gravitacional potencial (Cepeda - Pizarro *et al.* 2004). Se caracteriza por poseer una apariencia maciza y alta. Diversas cumbres alcanzan los 5.000 m.s.n.m. y dos de ellas sobrepasan los 6.000 m.s.n.m. Estas son: los cerros Olivares (6.252 m.s.n.m.) y Las Tórtolas (6.332 m.s.n.m.). En la actualidad, este macizo se encuentra surcado por numerosos ríos, esteros y quebradas cuya orientación se presenta controlada por factores geológicos (Veit 1991, Paskoff 1993).

En el sector del nacimiento del río Elqui, localizado en la confluencia de los ríos Claro y Turbio, la precordillera Andina presenta importantes alturas, entre las que destacan el Cerro Mamalluca (2.330 m.s.n.m.) y el Cerro El Molle (2.630 m.s.n.m.). El río Elqui presenta un escurrimiento en sentido Oriente – Poniente, en donde sus primeros kilómetros, hasta la localidad de El Molle, el río se caracteriza principalmente por presentar un escurrimiento de tipo recto y valles de reducida extensión. Las elevaciones que se presentan en este sector están comprendidas entre los 1.000 y 1.600 m.s.n.m., disminuyendo en forma paulatina con una baja sinuosidad del relieve (DGA, 2004).

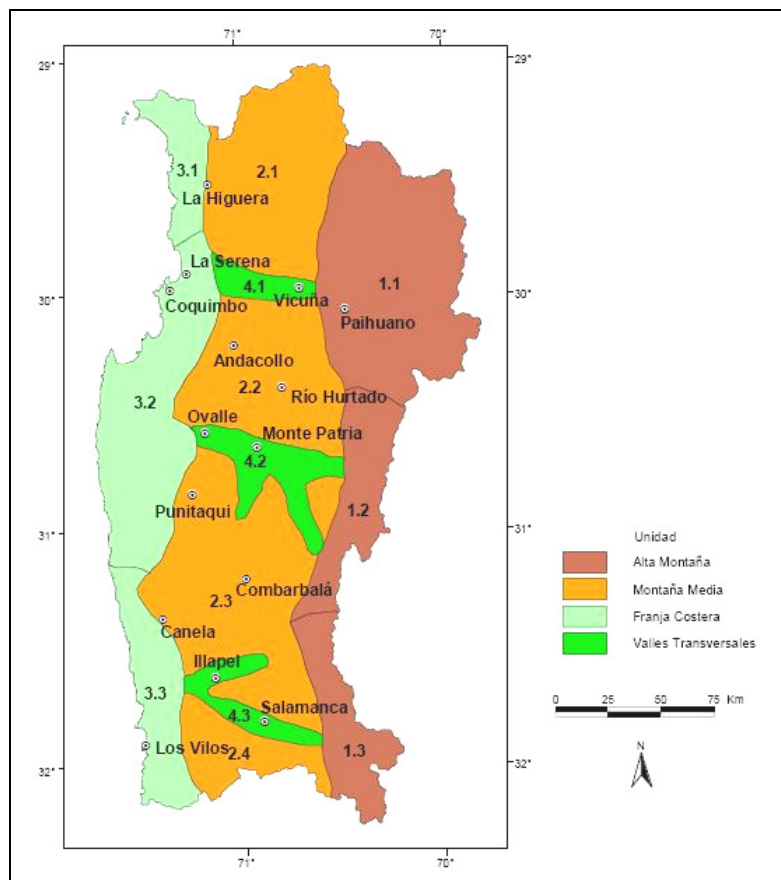


Figura 2-3 Fisiografía Región de Coquimbo.
Fuente: Novoa y López, 2001.

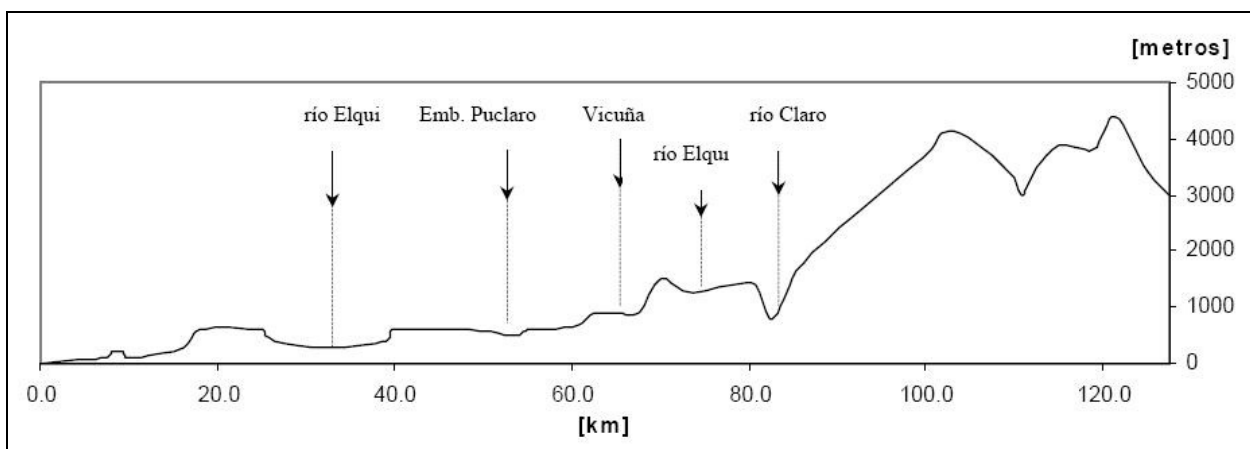


Figura 2-4 Perfil topográfico Oeste -Este en latitud 30° (Cuenca del río Elqui).
Fuente: DGA, 2004.

2.1.4 Suelos

En la sección litoral se desarrollan suelos aluviales sobre terrazas marinas y fondos de valles fluviales. Estos suelos han evolucionado a partir de sedimentos marinos y continentales. Se denominan suelos de praderas costeras o molisoles, son de color pardo, textura fina, compuestos por arenas y limos. En los niveles superiores de terrazas predominan las arcillas (Sánchez & Morales 1993).

En la cuenca del río Elqui, predominan los suelos rojos litosólicos que muestran una formación de arcilla y algunas segregaciones de limo en las grietas de las rocas subyacentes. En antiguos paisajes remanentes hay suelos rojos desérticos más desarrollados y bien diferenciados, ellos tienen en sus primeros 50 cm de profundidad (Horizonte A) suelos de color pardo claro, de textura gruesa. En el lecho del río, los suelos presentan texturas gruesas con gravas y piedras de aluviones. Litosoles en los sectores montañosos (DGA, 2004).

En el valle predominan los suelos aluviales pardo cálcicos o alfisoles. Son suelos provenientes de los interfluvios montañosos, transportados por los cauces naturales.

En los suelos del piedemonte cordillerano y de la Ata Montaña predominan los suelos llamados entisoles y aridisoles. Estos suelos poseen un escaso desarrollo y están por lo general desprovistos de vegetación, son frecuentes en las fuertes pendientes de cerros escarpados (Rovira, 1984).

2.1.5 Usos del Suelo

En cuanto a los usos del suelo, según DGA (2004), se resume en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Clasificación usos del suelo - Cuenca del río Elqui.

Usos del Suelo	Superficie Destinada	
	[ha]	[%]
Praderas	25.429	3
Terrenos Agrícolas y Agricultura de Riego	27.713	3
Plantaciones Forestales	0	0
Áreas Urbanas e Industriales	343	0,03
Minería Industrial	< 156,25	0
Bosque Nativo y Bosque Mixto	0	0
Otros Usos*	665.921	67
Áreas sin Vegetación	263.194	27

Fuente: DGA, 2004.

* Referidos a los siguientes usos: matorrales, matorral - pradera, rotación cultivo - pradera, áreas no reconocidas, cuerpos de agua, nieves - glaciares y humedales.

Como indica la tabla anterior, basada en el estudio Catastro de Bosque Nativo, CONAF- CONAMA, el uso del suelo tipo agrícola comprende 27.713 ha, representando un 3 % de la superficie total de la cuenca.

Los terrenos agrícolas se presentan principalmente a lo largo del valle del río Elqui aguas abajo de la localidad de Vicuña hasta la desembocadura en La Serena. Estos terrenos se presentan únicamente en áreas aledañas a las terrazas fluviales de este cauce, mayoritariamente entre la localidad del Almendral y ciudad de La Serena.

Los principales cultivos de la provincia corresponden a hortalizas, frutales, parronales viníferos y forrajeras anuales y permanentes. De los frutales, mayoritariamente se encuentran papayas, paltas, chirimoyas, higos, duraznos y uva.

2.1.6 Usos del Agua

En la cuenca del río Elqui, según muestran los resultados del estudio “Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua - Estudio de caso en la Región de Coquimbo” (CAZALAC-RODHOS, 2006), la principal demanda hídrica es la agrícola, representando el 82 % de la demanda consuntiva, tal como indica la Tabla 2-2. En esta tabla se indica un caudal de 4,822 m³/s como demanda agrícola a nivel de raíz, mientras que el caudal producido para esta demanda corresponde a 13,584 m³/s, cuyas diferencias se explican en las pérdidas a nivel predial y en la distribución a través de canales.

En la Tabla 2-3 se muestra una caracterización de la demanda agrícola, en donde se aprecia la significativa influencia que genera el embalse Puclaro en cuanto a la superficie destinada a riego y la tecnificación utilizada aguas arriba y abajo de este. Aguas abajo del embalse la superficie agrícola representa el 76%, en donde el área tecnificada sólo es el 21%, mientras el área tecnificada es de un 63 % sobre el embalse.

Cabe mencionar que en estas tablas se considera la cuenca del río Elqui en su totalidad, esto es, tomando en cuenta todas las subcuencas que aportan al río Elqui.

Tabla 2-2 Demanda consuntiva y de captación.

Tipo de uso	Demanda Consuntiva		Demanda de Captación	
	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]
Agricultura	4,822	81,7	13,584	87,8
APU	0,250	4,2	0,831	5,4
APR	0,039	0,7	0,141	0,9
Minería	0,101	1,7	0,216	1,4
Industria	0,062	1,1	0,062	0,4
ET natural	0,630	10,7	0,630	4,1
Total	5,904	100	15,464	100

Fuente: Orphanópoulos *et al.* 2007.

Tabla 2-3 Caracterización de la demanda agrícola actual.

Superficie agrícola [ha]	23.440
Sin / sobre embalse Puclaro	2.030 (9%)
Bajo embalse Puclaro	17.703 (76%)
Bajo embalses Puclaro y La Laguna	21.410 (91%)
Cultivos predominantes	hort/chac 62 % frut/vid 31 %
Área tecnificada	31%
Sobre embalse Puclaro	63%
Bajo embalse Puclaro	21%

Fuente: Orphanópoulos *et al.* 2007.

2.2 Hidrología

2.2.1 Pluviometría y Evapotranspiración

Las precipitaciones en la cuenca del río Elqui se concentran en los meses de otoño-inverno, presentando aproximadamente un 86 % de su precipitación media anual entre los meses de mayo y agosto y un 94% entre abril y septiembre. Lo anterior se puede observar en la Figura 2-5 donde se muestra la distribución de la precipitación media mensual en el periodo 1963-2004.

Aunque la precipitación (incluyendo nieve) que promedia alrededor de 100 mm anuales para toda la cuenca, este valor puede ser duplicado o triplicado en presencia del fenómeno del Niño (ENOS). Estos periodos son sucedidos por años secos asociados al fenómeno de la Niña (Díaz, 2007).

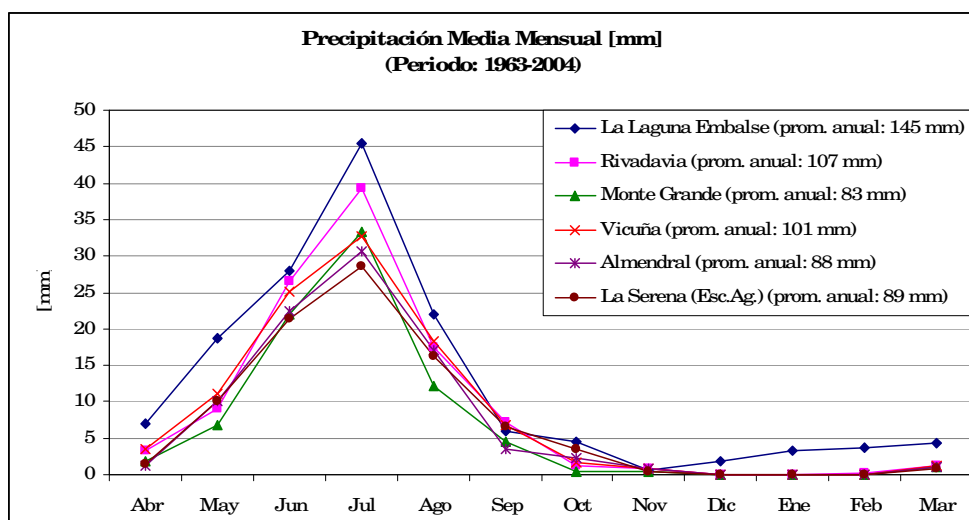


Figura 2-5 Precipitación media mensual en periodo 1963-2004 en algunas estaciones de la cuenca del Elqui.
Fuente: Cazalac-Rodhos, 2006.

Considerando la distribución de la precipitación y la evapotranspiración potencial sobre la cuenca indicada en la Figura 2-6 y tomando como referencia las evapotranspiración potencial que se indica en la

Tabla 2-4, en conjunto con el índice de aridez definido por UNEP (*United Nations Environment Program*) (Ec. 2.1), se clasifica a esta cuenca como árida al presentarse en el rango 0,2 - 0,05, definido para este tipo de clima.

$$I_a = P_a / ET_o \quad (2.1)$$

donde,

P_a : Precipitación media anual

ET_o : Evapotranspiración potencial media anual

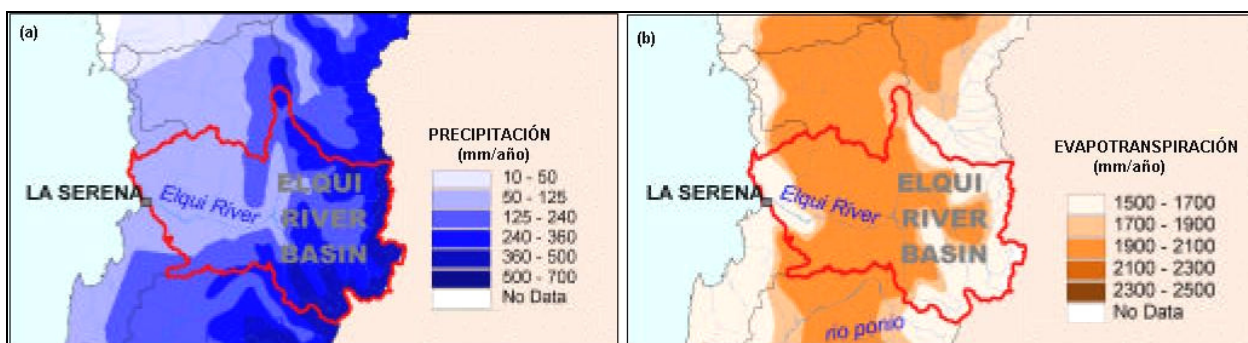


Figura 2-6 (a) Precipitación y (b) evapotranspiración promedio anual en la cuenca del río Elqui.
Fuente: Gangas, 2007.

Tabla 2-4 Humedad relativa y evapotranspiración potencial en nacimiento y desembocadura del río Elqui.

Mes	Río Elqui en nacimiento		Río Elqui en desembocadura	
	Humedad Relativa (%)	Evapotranspiración Potencial (mm)	Humedad Relativa (%)	Evapotranspiración Potencial (mm)
Abr	48	127,5	80	101
May	49	88,7	83	69
Jun	50	60,4	84	45,6
Jul	50	50	85	37
Ago	49	60,4	84	45,6
Sep	48	88,8	82	69
Oct	47	127,5	79	101
Nov	46	166,3	77	133
Dic	45	194,6	80	156,4
Ene	45	205	75	165
Feb	45	194,6	76	156,4
Mar	46	166,2	78	133
Prom. mensual	47	127,5	80	101
Total Anual	-	1530	-	1212

Fuente: DGA, 2004.

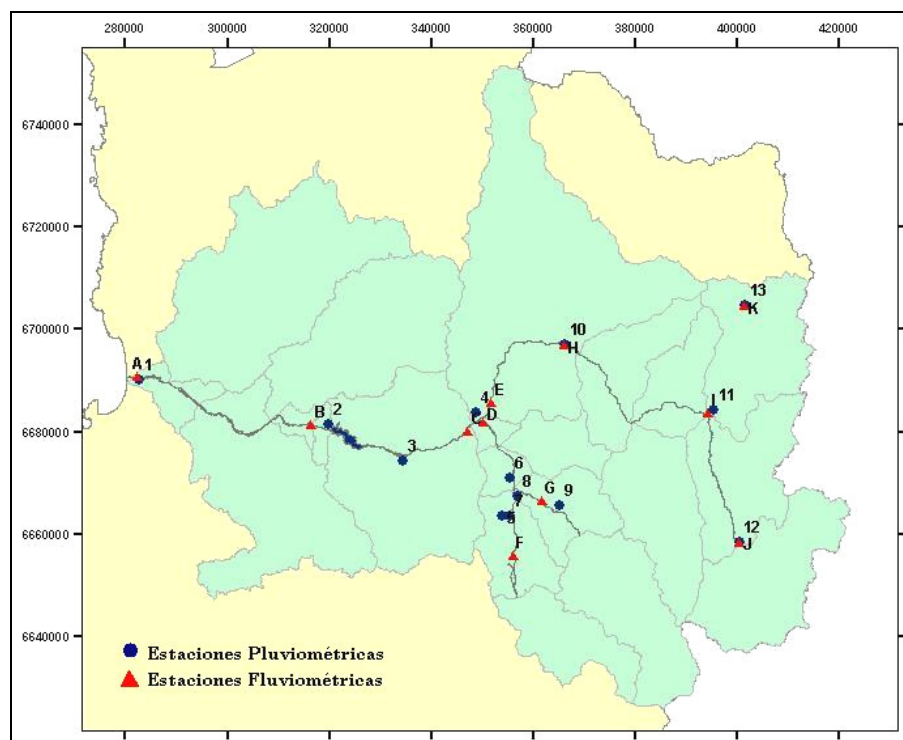


Figura 2-7 Distribución de estaciones pluviométricas y fluviométricas en la cuenca del río Elqui.
Fuente: elaboración propia, a partir de SIG, Cazalac-Rodhos, 2006.

Tabla 2-5 Estaciones pluviométricas y fluviométricas indicadas en Figura 2-7.

Estaciones Pluviométricas		Estaciones Fluviométricas	
Id.	Nombre	Id.	Nombre
1	La Serena (Escuela Agrícola)	A	Río Elqui en La Serena
2	Almendral	B	Río Elqui en Almendral
3	Vicuña	C	Río Elqui en Algarrobal
4	Rivadavia	D	Río Claro en Rivadavia
5	La Ortiga	E	Río Turbio en Varillar
6	Monte Grande	F	Estero Derecho Alcahuaz
7	Los Nichos	G	Río Cochigüaz en el Peñón
8	Pisco Elqui DMC	H	Río Turbio en Huanta
9	Cochigüaz	I	Río Toro Antes junta río La Laguna
10	Huanta	J	Río La Laguna en salida embalse La Laguna
11	Juntas	K	Dren G Tranque El Indio
12	La Laguna Embalse		
13	El Indio		

Fuente: SIG, Cazalac-Rodhos, 2006.

2.2.2 Fluviometría y Drenaje

La disposición de la red hidrográfica regional está controlada por los grandes accidentes verticales existentes. El sistema hídrico de la cuenca del río Elqui drena hacia el Océano Pacífico con una longitud aproximada de 240 km y una pendiente media de 1,1 %; no presenta rápidos ni saltos en su recorrido; con afluentes que le aportan cantidades importantes de agua especialmente cuando ocurren eventos lluviosos con precipitaciones elevadas (Espíldora y Palma 1977).

El cauce principal de la hoya hidrográfica lo constituye el río Elqui. Este río se origina a 815 m.s.n.m., de la confluencia de los ríos Turbio y Claro, hecho que ocurre a 2 kilómetros aguas arriba de la localidad de Rivadavia. Mientras las aguas del río Turbio descienden de cordones cordilleranos ubicados al N-E del sistema, las aguas del río Claro lo hacen desde el S-E. Desde su origen hasta su desembocadura en la Bahía de Coquimbo, el río Elqui tiene una longitud Este-Oeste de ~75 km, transcurso en el que confluyen, por el norte, las quebradas Santa Gracia (29°46'S- 71°05', 400 m.s.n.m.) y Marquesa (29°55'S-70°57'O, 750 m.s.n.m.) y, por el sur, las quebradas San Carlos (29°56'S-70°54', 850 m.s.n.m.), El Arrayán (29°50'S-71°05'O, 850 m.s.n.m.) y de Talca (30°07'S-71°06'O, 225 m.s.n.m.). Estas quebradas se encuentran normalmente secas y sólo aportan agua en caso de lluvia directa en años húmedos, no obstante, actúan como fuente de recarga del acuífero.

El río Elqui en sus primeros kilómetros, hasta la localidad de El Molle, el río se caracteriza principalmente por presentar un escurrimiento de tipo recto y valles de reducida extensión (los más extensos de ~ 3 km). En la extensión final del río, desde el sector de El Molle hasta la desembocadura en el mar, el cauce principal presenta escurrimiento de tipo anastomosado y valles con mayores amplitudes cuyo material de sedimentación fluvial ha originado amplias terrazas laterales de significativa importancia (de 5 a 6 km).

El río Elqui tiene una caudal superficial promedio de 7,1 m³/s, con una gran variabilidad interanual. Su régimen de crecidas depende de la altitud. En el tramo medio-alto (aguas arriba de la ciudad de Vicuña), las mayores crecidas, tanto en volumen como en caudal máximo instantáneo, ocurren durante primavera-verano. En el tramo medio-bajo (aguas abajo de la ciudad de Vicuña), mientras los caudales máximos instantáneos tienen un origen pluvial (durante otoño-invierno), los mayores volúmenes de crecida tienen lugar durante la primavera-verano. Los ríos afluentes al Elqui, el Turbio y el Claro, tienen un caudal promedio de 4,3 y 3 m³/seg, respectivamente (Honores y Alfaro, 2002).

En la Figura 2-8 se muestra la curva de variación estacional en las estaciones fluviométricas Río Elqui en Algarrobal y Río Elqui en Almendral, ubicadas a 760 m.s.n.m y 395 m.s.n.m., respectivamente. Se aprecia en ambas estaciones un régimen nival, en donde sus mayores caudales ocurren entre noviembre y febrero en años húmedos, producto de los deshielos. En años secos los caudales se distribuyen de manera homogénea, sin variaciones significativas.

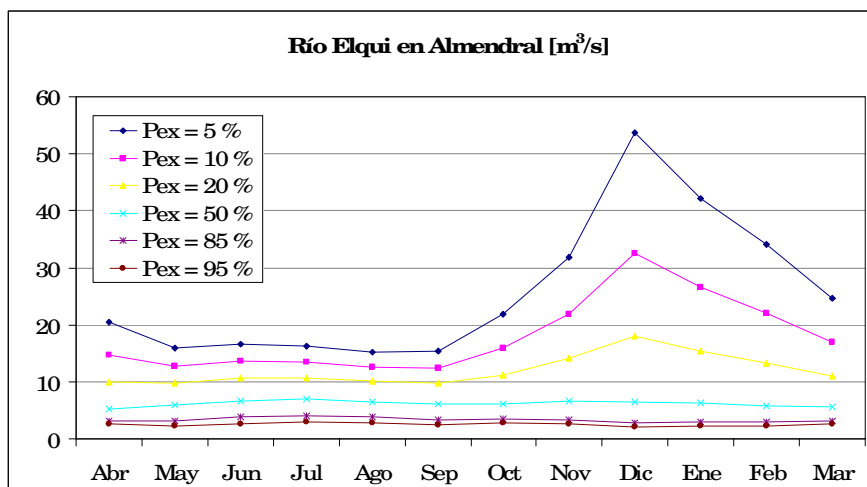
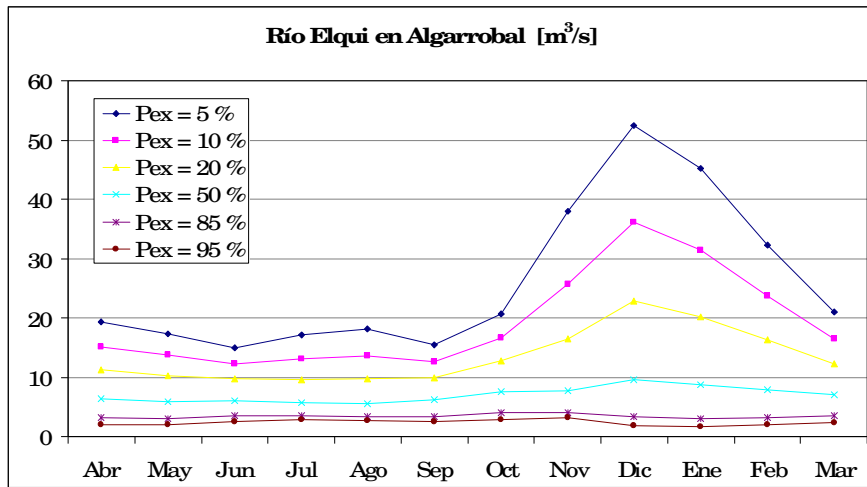


Figura 2-8 Curvas de variación estacional en río Elqui en Algarrobal y Almendral.
Fuente: DGA, 2004.

2.3 Geología

La geología de la hoya hidrográfica está representada por el predominio de rocas fundamentales preterciarias sobre sedimentos terciarios y cuaternarios, los cuales se ubican en las zonas llanas, por debajo de los 200 m.s.n.m. y en los sectores depresionales entre macizos rocosos a cotas superiores a la indicada (Mpodozis y Cornejo 1988). Según lo citado por Cepeda *et al.*, 2005, se reconocen las siguientes unidades:

§ Franja litoral

Está representada principalmente por grandes arenales consolidados y sitios de humedales, muchos de los cuales han sido drenados para permitir la construcción de caminos, viviendas y grandes complejos turísticos.

§ El valle

Formado casi exclusivamente por gravas, arenas, rípios aluviales aterrazados con origen en el Terciario Superior y Cuaternario (Moscoso *et al.* 1982).

§ La media montaña

Está constituida por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y graníticos. Se encuentran las siguientes formaciones:

- **Gravas de Atacama:** constituyen gravas, conglomerados, ripios y areniscas poco consolidadas (Mioceno-Pleistoceno).
- **Grupo Bandurrias:** corresponden a andesitas porfíricas, brechas volcánicas, tobas con intercalaciones sedimentarias o marinas (principalmente Neocomiano, Titoniano-Aptiano; (volcánico, marino; 2.000-4.000 m).

§ La alta montaña

Está constituida en parte por rocas mesozoicas y por rocas eruptivas paleozoicas. Según Thomas (1967), en el área de estudio se encuentran las siguientes formaciones:

- **Formación Los Elquinos:** (continental; 3.500 m.s.n.m.) predominantemente volcánica andesítica, con intercalaciones de lavas riolíticas y rocas sedimentarias (Paleógeno).
- **Formación Algarrobal:** (continental; 400-1.540 m.s.n.m.) andesitas con intercalaciones sedimentarias, clásticas (Jurásico Superior).
- **Formación Matahuaico:** (continental; 1.400 m) volcánica, riolítica, con intercalaciones sedimentarias clásticas (Pérmico-Triásico).

En la Figura 2-9 se muestra un mapa geológico de la cuenca hidrográfica del río Elqui.

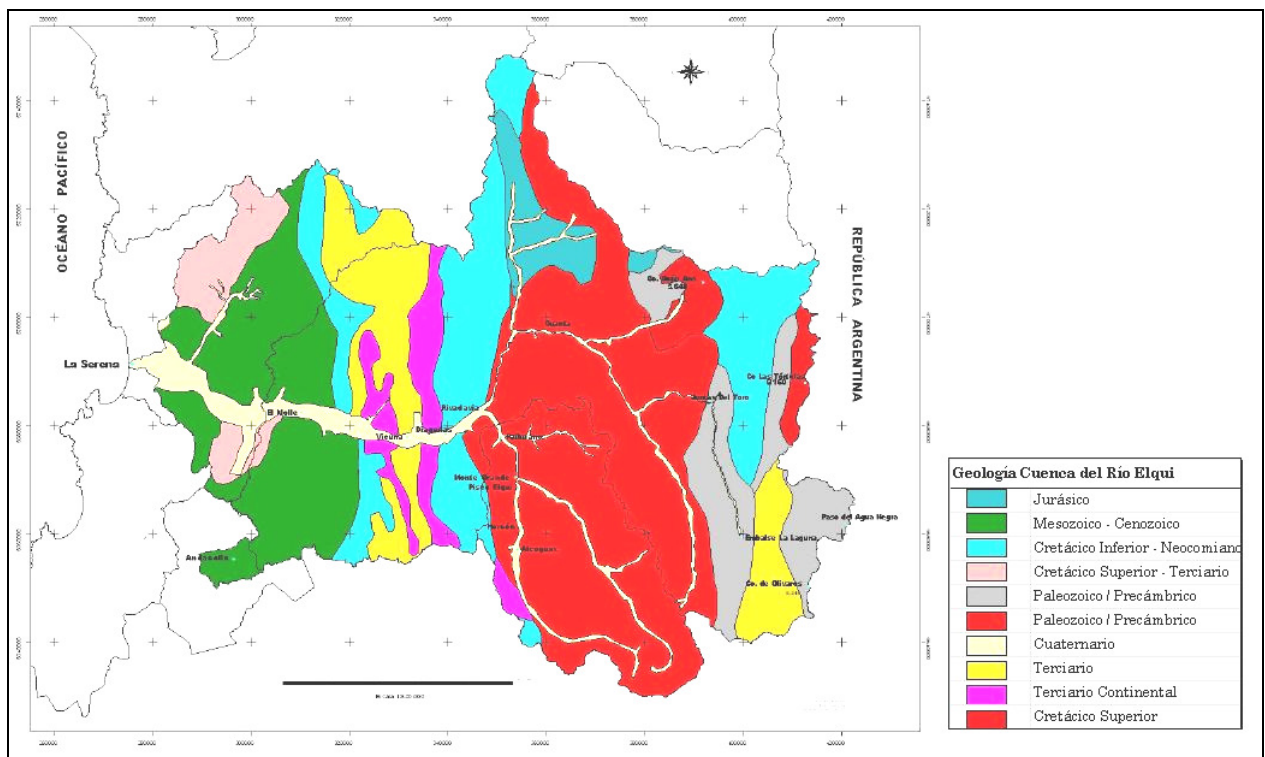


Figura 2-9 Mapa Geológico Cuenca del Río Elqui.
Fuente: Cepeda *et al.* 2005.

2.4 Hidrogeología

En este acápite se muestra un breve resumen de la hidrogeología de valle del Elqui extraída de DGA (2003), cuyos antecedentes lo constituye principalmente el estudio Valle del Elqui, Chile – Investigación del Agua Subterránea (CORFO, 1955).

2.4.1 Formaciones Acuíferas

El relleno fluvial del valle del río Elqui corresponde a una unidad hidrogeológica de buena permeabilidad, con un origen aluvial, reconociéndose materiales gruesos con predominio de grava y arenas, intercalados entre estratos con predominio de arcillas y limos.

Se identifica un acuífero superior del tipo libre, ubicado preferentemente en los primeros 10 m del relleno, el que sobreyace a niveles acuíferos más profundos de carácter libre, semiconfinado y confinado, que incluso manifiestan comportamientos surgentes locales. Estos rellenos sedimentarios que constituyen acuíferos se pueden separar en tres capas o niveles principales que en su conjunto no exceden los 250 m de potencia.

El nivel más superficial corresponde a los primeros 15 m de profundidad y está compuesto por depósitos de gravas con arenas, ripio, bolones e intercalaciones menores de sedimentos finos. Estos depósitos presentan una baja compactación y buena a muy buena capacidad hídrica.

El segundo nivel presenta un espesor variable entre 30 m y 120 m. Está compuesto por arenas de tamaño variable con gravas, bolones y arcillas e intercalaciones de lentes de arcilla de dimensiones variables.

El nivel más profundo tiene espesores también variables entre 30 m y 120 m. Este estrato queda representado por una sucesión de interdigitaciones de niveles arenosos con gravas y niveles arcillosos con clastos de tamaño característicos de grava. Debido a su mayor compactación y menor granulometría, la capacidad hídrica de este último nivel es inferior a la del nivel superior. Bajo este nivel se dispone el basamento rocoso del acuífero.

2.4.2 Propiedades Hidrogeológicas

En función de las variaciones granulométricas en los rellenos sedimentarios a lo largo del valle, los coeficientes de permeabilidad y transmisividad estimados presentan una variabilidad considerable. El coeficiente de permeabilidad varía entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día, mientras que la transmisividad varía entre 130 m²/día y 5300 m²/día. No obstante, estos valores pueden estar influenciados por el río, lo que podría explicar valores muy altos para el coeficiente de transmisividad. Desde el punto de vista conceptual, se puede afirmar que la conductividad hidráulica del acuífero puede variar entre 1 y 60 m/día, aproximadamente (DGA, 2003).

En cuanto al coeficiente de almacenamiento, se estima un valor del orden de 7% (CORFO, 1955).

2.4.3 Estimación del Volumen de Agua Almacenada

Basado en estudios geofísicos para diversas secciones transversales del valle entre las localidades de Algarrobal y Algarrobito se calcula un volumen de material saturado de 5.200 millones de m³, el que al considerar una porosidad efectiva promedio de 7 % contiene un volumen de agua que ascendería a 364 millones de m³, de los cuales 211 millones de m³ se encuentran en sus primeros 50 m de su relleno sedimentario (CORFO, 1955).

2.4.4 Profundidad de la Napa y Sentido de Escurrimiento

La profundidad de la napa no sobrepasa los 40 m hacia los márgenes del acuífero a ambos lados del acuífero, disminuyendo hasta aproximadamente 10 m en la vecindad del río, presentándose zonas en que la napa freática del acuífero superficial está en directa conexión con el río.

Como se muestra en la Figura 2-10, el sentido de escurrimiento subterráneo ocurre de Oeste a Este, siguiendo el curso del río, con un gradiente variable longitudinalmente. El gradiente promedio de la napa subterránea desde Rivadavia hasta La Serena es de 1%.

En la Figura 2-11 se muestran las unidades hidrogeológicas identificadas en el estudio “Informe hidrogeológico de la región de asentamientos del valle del río Elqui y zona de El Peñón- Cerro Pan de Azúcar” (Karzulovic, J. y E. Celedón, 1971), en donde sólo se describen las unidades de interés para este estudio.

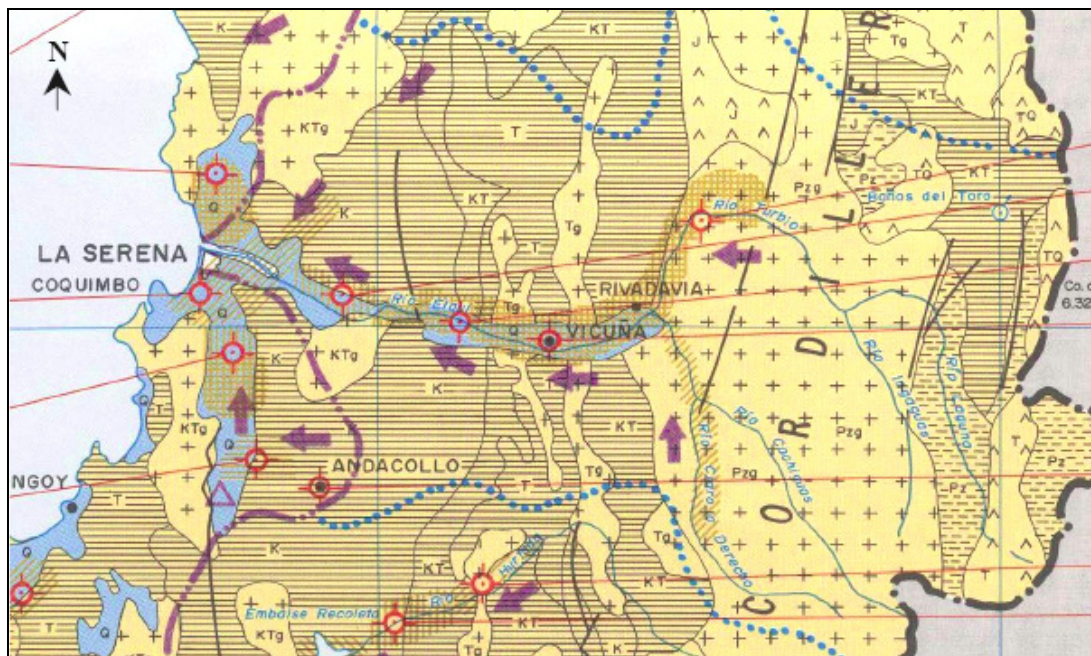


Figura 2-10 Características hidrogeológicas de la cuenca del río Elqui.

Fuente: DGA, 2004

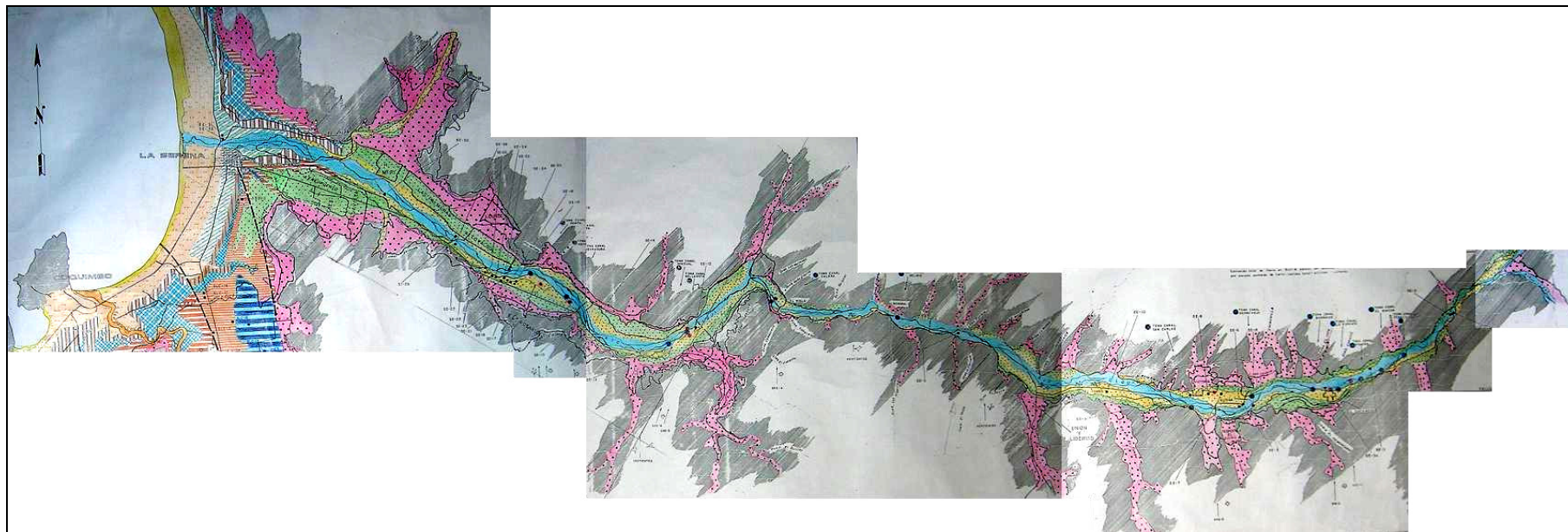


Figura 2-11 Unidades hidrogeológicas en el Valle del río Elqui.

Fuente: Karzulovic, J. y E. Celedón, 1971

Tabla 2-6 Unidades hidrogeológicas en el Valle del río Elqui (Ver Figura 2-11).

Símbolo	Unidad	Tipo de Materiales Principales	Calidad de Acuíferos
	EF	Escombros de Falda: materiales coluviales, acarreo de quebradas menores y depósitos aluvionales antiguos de tributarios del río Elqui o del estero Lagunillas.	En general corresponde a un conjunto de mezclas en proporciones muy diversas de gravas heterogéneas, en partes angulosas, arenas-limos-arcillas. Permeabilidad irregular, de baja a mediana, favorable especialmente como área de recarga de terrenos acuíferos situado a cotas más bajas. No atractivo para captaciones que serían profundas y de muy pequeño gasto
	DTFS	Depósitos de Terraza Fluvial Superior: alternaciones de mezclas de gravas-arenas-limos-arcillas y de capas limo arcillosas. Conjunto predominantemente de origen fluvial, antiguo, en partes como areniscas y conglomerados semi-consolidados.	Permeabilidad usualmente baja, posibilita acuíferos profundos contenidos en capas delgadas de arenas y gravas de mejor permeabilidad. Estos acuíferos, los cuales pueden tener presión de confinamiento, rendirían gastos no mayores que 5 l/s permanentes con aguas de calidad química deficiente. No atractivo para desarrollar captaciones de aguas subterráneas.
	DTFI	Depósitos de Terraza Fluvial Inferior: acarreo fluviales recientes del río Elqui y ligados a terrenos ribereños bajos y de inundación frecuente. Alternaciones de gravas, arenas y limos sueltos a pobremente consolidados.	Conjunto de alta permeabilidad con alternaciones de mezclas de gravas y limos arcillosos de permeabilidad deficiente. Muy favorable para la perforación de sondajes de hasta 70 m de hondura, con rendimientos de 10 a 50 l/s, en aguas de buena calidad química. Recarga derivada esencialmente de infiltraciones del caudal superficial del río, y de infiltraciones subterráneas de parte de las precipitaciones de la hoya correspondiente.
	DFARE	Depósitos Fluviales Actuales Río Elqui: Acarreo de gravas y arenas asociadas al cauce o lecho actual del río Elqui. En partes alternaciones con limos arcillosos y gravas areno arcillosas poco permeables.	Similar al anterior y de mejor calidad como acuíferos. Muy atractivo para la ubicación y perforación de nuevos sondajes de captación de aguas subterráneas de hasta 70 m de hondura.
	DTMS	Depósitos de Terrazas Marinas: Alteraciones de areniscas blandas marinas, coquinos o brechas de conchos cuaternarios o pleistocenos, arenas de dunas costeras antiguas sueltos a pobremente cementado, delgadas capas de arenas y gravas fluviales semiconglomerádicas a conglomerádicas. Cotas aproximadas: Terraza marina superior 75 – 100 m Terraza marina alta 50 – 75 m Terraza marina intermedia 25 – 50 m Terraza marina baja 10 – 25 m	Conjunto de permeabilidad irregular; en general deficiente y no atractivo para captaciones que serían profundas, con gastos poco permanentes y aguas de pobre calidad química.
	DTMA		Ocasionalmente estos depósitos pueden contener acuíferos aparentemente muy interesantes, sin embargo, deben estimarse estos acuíferos como de recursos de aguas viejas, poco permanentes y altamente contaminados con sales.
	DTMI		
	DTMB		
	DPA	Depósitos de Playa Actual Arenas de la playa actual	Suelos y permeables. Contiene aguas subterráneas próximas a la superficie; pero, éstas quedan muy diseminadas a lo largo de la playa y pueden contaminarse fácilmente con aguas del mar. No recomendable para captaciones.
	DVA	Depósitos de Vegas Actuales Alteraciones de limos, limos arcillosos y arenas finas con frecuentes sectores de vegas o de aguas subterráneas muy superficiales.	Conjunto de permeabilidad baja a media. Favorable para captaciones mediante norias de gran diámetro o con zanjones de drenaje paralelos a la línea de Costa Aguas fuertemente salinas.

Fuente: Karzulovic, J. y E. Celedón, 1971.

3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

En el presente capítulo se describen los principales estudios que sirven de apoyo para el desarrollo de este trabajo de título, como son los desarrollados por la Dirección General de Aguas (DGA), titulados “Evaluación de recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui - IV Región (2003)” y “Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero del valle del Elqui (2006)”, los que tienen relación con el modelo de simulación hidrogeológico implementado en Visual ModFlow, que se utiliza como plataforma en el presente estudio; el estudio realizado por CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y El Caribe) y RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda. bajo la inspección de la Dirección Regional de Aguas, “Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso de agua – Estudio de caso en la región de Coquimbo”, cuyos resultados son utilizados como variables de entrada en el presente estudio; y el estudio “Valle del Elqui – Investigación de Agua Subterránea”, preparado para la CORFO por el departamento del Interior de EE.UU. – Bureau of Reclamation en 1955, el cual permite complementar los antecedentes hidrogeológicos de la zona de estudio.

3.1 Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Elqui, IVª Región. Dirección General de Aguas, Diciembre 2003.

Este estudio realizado por la Dirección General de Aguas tiene por objeto realizar una evaluación de los recursos hídricos subterráneos del río Elquí, IV Región, y su comparación con la explotación prevista de los derechos solicitados y los usos y derechos factibles de regularizar, para diversos escenarios de extracción. Para determinar la demanda en el sector estudiado, en este se trabajó con las solicitudes presentadas a la DGA hasta el 31 de julio de 2002.

El área específica de este estudio comprende el valle del río Elqui, desde el nacimiento de éste en la confluencia de los ríos Turbio y Claro, hasta su desembocadura en el mar y de ahí hacia el norte al sector costero que se extiende hasta Punta Teatinos.

Desde el punto de vista de la zonificación hidrogeológica, el área analizada fue subdividida en 5 sectores, determinándose la demanda para cada uno de ellos. Estas zonas corresponden a:

- Sector Alto: Abarca desde la convergencia de los ríos Turbio y Claro hasta la localidad del Tambo.
- Sector Medio: Corresponde al sector ubicado entre la localidad del Tambo y la Quebrada Talca.
- Santa Gracia: Corresponde al sector ubicado en la quebrada Santa Gracia.
- Elqui Bajo: Corresponde al sector ubicado entre la Quebrada Talca y el borde costero.
- Serena Norte: Corresponde al sector ubicado desde el sector norte de la desembocadura del río Elqui hacia el norte incluyendo las áreas de Vegas Norte y Juan Soldado.

Se expone cómo se desarrolló el modelo de simulación hidrogeológico a través de la herramienta Visual Modflow, el cual fue desarrollado por el DICTUC para la Dirección General de Aguas. Dicho modelo permite representar el movimiento del agua subterránea en distintos tipos de acuíferos, bajo distintas condiciones de borde y bajo distintas condiciones de recarga y descarga.

En cuanto a la caracterización hidrogeológica, se describen las fronteras o límites del acuífero, profundidad del fondo impermeable o basamento rocoso, zonas de recarga y descarga, tipo de acuífero, estratigrafía, profundidad de la napa, sentido de escurrimiento y constantes elásticas del acuífero. Para estimar la precipitación en las distintas zonas aportantes se utilizó el mapa de isoyetas

extractado del Estudio Integral de Riego – Valle del Elqui (1987), para una probabilidad de excedencia del 50%.

Se realizó una estimación de la recarga del acuífero para la década del 50, considerando que en esa época el riego era poco significativo y por consiguiente, se consideró que la principal fuente de recarga la constituían las precipitaciones directas sobre el acuífero y aquellas que se produce en quebradas laterales que drenan finalmente al valle. Toda la recarga del acuífero producto de la precipitación fue ingresada al modelo como recarga superficial y validada durante el proceso de calibración en régimen permanente.

Respecto de las descargas del acuífero y según los antecedentes disponibles, estas se deben principalmente a, en orden de importancia: aportes al río Elqui, evaporación en el sector costero de vegas y descarga al mar.

Los valores de evaporación en la zona costera han sido estimados, en el estudio Elqui Valley Chile – Groundwater Investigations (1955), en cerca de 1 m/año en la zona adyacente a la línea de costa.

Respecto de las descargas al río Elqui, no existe claridad de las cantidades involucradas. En el Estudio Integral de Riego – Valle del Elqui (1987), se presentan antecedentes de aforos realizados que permiten tener una idea aproximada del caudal que se descarga. Este sería del orden de los 2000 l/s, aunque existen imprecisiones en la metodología de aforo que ponen una alerta a la hora de hacer conclusiones con esta información.

El modelo considera una distribución espacialmente variable para la elevación del nivel de terreno, para la divisoria entre los dos estratos considerados y para la profundidad del basamento rocoso o borde impermeable inferior del acuífero.

Luego del proceso de calibración del modelo en régimen permanente, los coeficientes de conductividad hidráulica se estiman que varían espacialmente entre 3 y 60 m/día para la capa superficial, y para la capa más profunda, entre 1,5 y 30 m/día.

En este estudio se realizaron dos simulaciones del funcionamiento del acuífero, denominados para efectos del estudio escenarios 1 y 2. El escenario 1 corresponde al total de los derechos otorgados (demanda comprometida) y el escenario 2 corresponde a la demanda comprometida más los derechos en trámite. Primero se realizó la calibración del modelo en régimen permanente sin la presencia del embalse Puclaro (Régimen Permanente 1) y otra con el embalse Puclaro en funcionamiento (Régimen Permanente 2).

Dentro de las conclusiones en base a los resultados obtenidos mediante la simulación, en este estudio se definió en qué sectores del acuífero la explotación previsible de los derechos y usos a respetar eran sustentables en el largo plazo, de acuerdo las solicitudes vigentes al 31 de julio de 2002, y en cuáles esta no era sustentable, para los cuales se emitió la declaración de “limitación a la explotación de aguas subterráneas”.

Cabe mencionar que dentro de los antecedentes de este estudio se encuentra el estudio Elqui Valley Chile – Groundwater Investigations (CORFO, 1955) y Estudio Integral de Riego – Valle del Elqui (Comisión Nacional de Riego, 1987), los que también se incluyen en esta revisión bibliográfica.

3.2 Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero del Valle del Elqui. Dirección General de Aguas, Junio 2006.

En este informe técnico tuvo por objeto realizar una evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del río Elqui, IV^a Región de Coquimbo, y su comparación con diversos escenarios de extracción. Para ello asume como base el informe técnico “Evaluación de los Recursos Subterráneos

de la Cuenca del Río Elqui, IVª Región”, desarrollado por la DGA en diciembre de 2003, en el que se realizó una primera evaluación determinando una serie de sectores que quedaban cerrados a nuevas extracciones bajo los criterios actuales de la DGA en cuanto a la entrega de derechos de agua.

Para las evaluaciones de cada uno de los escenarios de demanda, se utilizó el mismo modelo de simulación hidrogeológico que se utilizó en el estudio descrito en el acápite anterior, implementado en el software Visual Modflow, en el que se modeló el acuífero del Valle del Elqui desde la confluencia entre el río Claro y río Turbio hasta la desembocadura en el mar.

Los criterios que se consideran para cumplir con una explotación máxima sustentable en el sector de interés se indican a continuación:

- Descensos sustentables en el tiempo a nivel de acuífero. Es decir, los descensos deben estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Por estabilización se entenderá que la tasa de descensos sea inferior a 5 cm/año para un periodo no inferior a 5 años. Esta estabilización de niveles debe estar respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, aporte de flujos de agua subterránea de acuíferos superiores, etc.).
- La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc) y aguas subterráneas debe ser despreciable, de tal forma de no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparado con una situación de régimen natural) debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.
- Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica son factibles de obtener.
- En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.
- Por último, verificar que el aumento de las extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable desde otro sector aguas abajo.

Como conclusión de este trabajo se entrega la oferta o caudales máximos posibles de otorgar en términos de explotación neta previsible de los usos para los cinco sectores bajo los criterios antes señalados.

3.3 Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua - Estudio de caso en la región de Coquimbo. Cazalac – Rodhos, Diciembre 2006.

Este trabajo fue elaborado por CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y El Caribe) con la asesoría de RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda, bajo la inspección de la Dirección Regional de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, para el Gobierno Regional de la IVª Región de Coquimbo.

3.3.1 Alcances y Metodología

El objetivo principal de este estudio fue hacer un diagnóstico del uso efectivo del recurso hídrico, investigando y conociendo las técnicas actuales de utilización, aprovechamiento y eficiencia de su uso en las tres cuencas principales de la IVª Región de Coquimbo: Elqui, Limarí y Choapa, y a partir de ello elaborar propuestas específicas que apunten a la mejor utilización del agua y a formular recomendaciones que orienten a los usuarios en las tomas de decisiones debidamente informados en materias que involucre el recurso hídrico en la Región.

Dada la magnitud de este estudio, en primer lugar se identificaron 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 IVª 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:

- § Nivel local o micro o predial: En este nivel interesa conocer la forma de utilización del recurso, de modo de evaluar el grado de eficiencia desde dos puntos de vista: eficiencia física de uso del recurso, y eficiencia económica del uso del recurso hídrico aplicado en la forma en que actualmente se hace. Entre los principales productos que se obtienen destacan un levantamiento de uso de riego y levantamiento de otros usos.
- § Nivel medio: En este nivel, que corresponde a los sistemas de aprovechamiento (por ejemplo sistemas de riego), interesa evaluar la eficiencia de uso del recurso, en el sentido tanto del manejo como de la administración, para detectar si hay ineficiencias que pudieran ser subsanadas. Como resultado se obtuvo una evaluación de la eficiencia tanto física como de gestión de los sistemas que configuran el nivel intermedio de las cuencas.
- § Nivel global: El nivel global está conformado por toda la cuenca, y representa el nivel para el cual en definitiva interesan los resultados de eficiencia, e interesa optimizar la eficiencia, tanto del uso del agua en su calidad de bien físico, como en su calidad de bien económico. Para el nivel global se hacen estudios de eficiencia en la asignación del recurso, existencia de efectos ambientales negativos y capacidad de control.

Dado el objetivo de entender y cuantificar el concepto de eficiencia de uso del agua, en este estudio fue necesaria la aplicación de un modelo de simulación que constituyó la base para la caracterización de la situación actual de uso del agua, y para la evaluación y recomendación de medidas técnica y económicamente viables. El modelo de simulación consistió en un modelo integrado superficial-subterráneo de modelación hidrológica (modelo MAGIC) cuyo uso dio lugar a la aplicación y desarrollo de una investigación directa en terreno y en gabinete, la utilización de un sistema de información geográfico (SIG) para la presentación, ordenamiento y elaboración espacial de toda la información y la utilización de un modelo de evaluación económica que se aplicó a todos los escenarios de uso técnicamente viables con un uso más eficiente del agua. Estas cuatro herramientas metodológicas se describen a continuación:

- § 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, 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 IVª 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, tramos, 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.
- § 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. Este modelo de evaluación se aplica al uso agrícola del agua, puesto que los demás usos son menores en la región, tienden a cubrir sus demandas independientemente de la disponibilidad, y no son objeto del presente análisis ni materia de recomendaciones (Orphanópoulos et al. 2007).

3.3.2 Descripción del Modelo MAGIC

En función de la relevancia que tiene el modelo de simulación utilizado en el estudio desarrollado por CAZALAC (2006) en los resultados que de este se infieren, en esta sección se realiza una breve descripción conceptual del modelo MAGIC, resumida de Zambrano *et al.*, 2003.

El modelo MAGIC, Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas, fue desarrollada por la DGA para el análisis de la dinámica integrada de cuencas y acuíferos. Este modelo, programado en lenguaje Delphi 7.0, permite simular el comportamiento a través del tiempo de los elementos superficiales que componen una cuenca y relacionarlo con las variaciones de volumen experimentadas por los acuíferos subyacentes a dicha cuenca.

Los acuíferos se consideran embalses subterráneos y se modelan aplicando, simultáneamente, la ecuación de continuidad y la ley de Darcy. El objetivo es contar con un entorno de simulación hidrológica, que contemple todos los usos y manejos del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo, facilitando la obtención de las recargas netas hacia los sistemas acuíferos, para lograr una óptima gestión Integrada del recurso hídrico.

El primer paso de simulación de una determinada cuenca (luego de haber reunido toda la información pertinente), es realizar los supuestos y simplificaciones tales que permitan transformar la cuenca real en un conjunto de objetos interconectados entre sí y cuyo comportamiento se aproxime al de la cuenca real. Este proceso se ilustra en la Figura 3-1 para el caso de un tramo de río, un acuífero y una zona de riego.

Cada uno de los objetos que se desee modelar, debe poseer un código único (XX-ij), el cual lo identifica internamente en forma biunívoca y permite relacionarlo con el resto de los objetos del sistema. Los objetos posibles de representar en MAGIC son: acuíferos (AC-), canales derivados (CA-), aportes naturales (AN-), tramos de un canal (CT-), centrales hidroeléctricas (CH-), captaciones puntuales (CP-), descargas puntuales (DP-), embalses (EM-), estadísticas pluviométricas o pluviométricas (EST-), cuencas laterales (CL-), nodos (NO-), pozos (PO-), caudales ecológicos (QE-), tramos de río (TR-) y zonas de riego (ZR-).

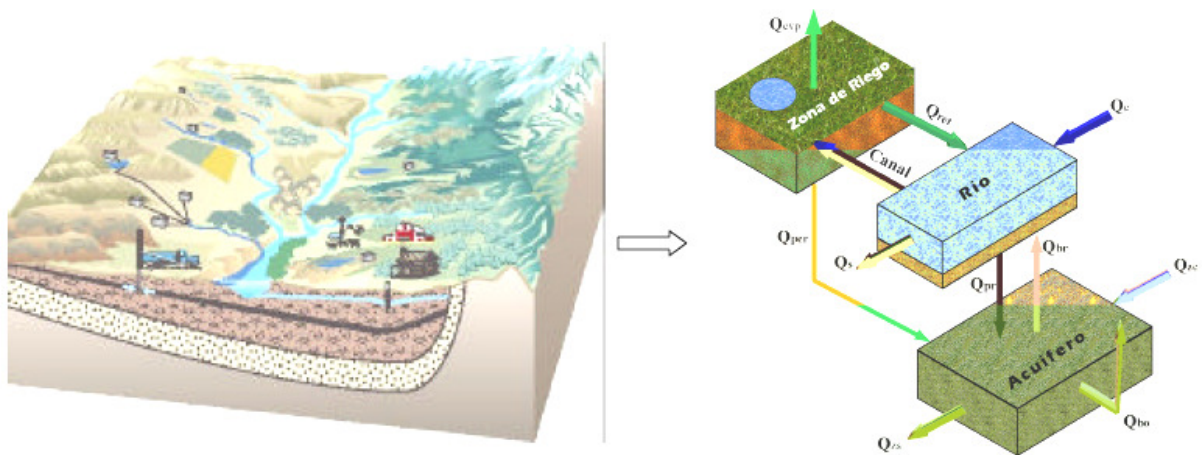


Figura 3-1 Representación en el modelo MAGIC de la interacción real entre un tramo de río, una zona de riego y un acuífero. Los caudales de la figura corresponden a: Q_{evp} : evapotranspiración; Q_{ret} : retorno de riego al río, Q_{canal} : canal de riego; Q_{per} : percolación de riego hacia el acuífero; Q_e : entrada al tramo de río; Q_s : salida del tramo de río; Q_{pr} : percolación del río hacia el acuífero; Q_{br} : bombeo para riego; Q_{bo} : bombeo para otros usos; Q_{ze} : entrada subterránea al acuífero; Q_{zs} : salida subterránea del acuífero. Fuente: Zambrano et al., 2003.

MAGIC utiliza el modelo de precipitación–escorrentía MPL. Este modelo fue desarrollado conceptualmente por el Ingeniero Pablo Isensee M. desde fines de la década de los 80, y su última actualización se realizó en 1998, para simular el paso del agua a través del suelo de los sectores de riego y para la generación de escorrentía superficial. Este modelo utiliza como dato de entrada la precipitación media mensual sobre las distintas zonas de riego, la evapotranspiración potencial de los cultivos de sector, y algunos parámetros característicos del suelo de las mismas, y simula los procesos de infiltración, evapotranspiración y percolación profunda, entregando como resultado el caudal de escorrentía superficial correspondiente y la percolación profunda hacia el acuífero subyacente. Este modelo también puede ser utilizado en forma independiente para calcular el caudal de escorrentía superficial producto de las precipitaciones en aquellas cuencas pluviales que no poseen control fluviométrico y que aportan caudal a la cuenca en estudio.

El modelo utiliza como datos de entrada los parámetros que describen a cada uno de los objetos del sistema y la información hidrológica, en términos de valores medios mensuales de la cuenca bajo estudio. Además, MAGIC permite obtener el valor medio mensual de la recarga hacia él o los acuíferos existentes, producto tanto del riego agrícola, como de las precipitaciones y la infiltración proveniente de los ríos, canales y embalses existentes en la cuenca, entre otros.

Los datos de la cuenca recopilados se ingresan a MAGIC en una base de datos en formato Access o Excel. Por ejemplo, existen 4 tablas relacionadas en el caso de los acuíferos que caracterizan el sistema, con una variedad de secciones (semicircular, triangular y rectangular), geometría, elasticidad, características topológicas y con diferentes flujos para cada uno.

La simulación de los flujos que circulan en la cuenca se lleva a cabo desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada uno de los nodos que definen los ríos del sistema. MAGIC realiza un ciclo para todos los meses del periodo de simulación, y dentro de este efectúa otro ciclo de iteraciones para calcular todos los caudales de entrada y salida en todos los nodos del sistema.

En una primera iteración se calcula en cada nodo el caudal afluente producto de los aportes de cuencas cabeceras u hoyas intermedias (para los nodos cabecera), de los tramos de río (para los nodos intermedios), de las descargas puntuales existentes, y los tramos de canal. En esta primera iteración no se consideran las entregas de los embalses, de los acuíferos ni los derrames de las zonas de riego, pues todavía no han sido operados dichos objetos. Al finalizar esta primera iteración para todos los nodos del sistema, se operan los embalses y se calculan sus entregas para riego e hidroelectricidad, se operan los acuíferos y se calculan sus afloramientos y caudales efectivamente bombeados hacia el sistema superficial y se operan las zonas de riego, calculando sus derrames y percolaciones al sistema subterráneo.

En las iteraciones posteriores, el cálculo del caudal afluente a los nodos se hace conociendo todos los caudales involucrados, incluso las entregas a los embalses, de los acuíferos y los derrames de las zonas de riego calculados al final de la iteración anterior. El modelo sigue iterando dentro del ciclo mensual hasta asegurar que los caudales de salida de las zonas de riego, embalses y acuíferos coincidan con los correspondientes caudales afluentes a los nodos del sistema.

MAGIC entrega salidas detalladas para cada objeto del sistema en formato de texto o Excel. Datos adicionales disponibles consisten en el caudal promedio en secciones de río, seguridad de riego, volúmenes de embalses, caudales entregados por embalse, infiltraciones por lluvia, riego y uso doméstico; volúmenes bombeados para riego, salidas y condiciones finales de acuíferos, entre otros resultados.

Los patrones de ajuste para la calibración del modelo MAGIC son:

- Balance de cierre de las ecuaciones de continuidad incorporadas en todas las iteraciones del modelo.
- Chequeo de caudales observados en estaciones fluviométricas alineadas con los nodos del río simulado, para nodos previamente determinados.
- El ajuste de los niveles observados comparados con las salidas de los niveles simulados en el correspondiente sector acuífero, obtenidos indirectamente a través del volumen del embalse subterráneo y su respectiva geometría, para cada mes del periodo de calibración.

Las ventajas de este modelo son que 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. Además, MAGIC incorpora una gran variedad de usos y posibilidades de manejo del recurso hídrico. Por lo cual es posible vincular las entradas de agua en distintos puntos de la cuenca con los usos específicos del recurso, para evaluar el efecto, en términos de cantidad de caudal, de distintas alternativas de manejo relacionadas a la infraestructura, operación de diversos objetos y manejo de la demanda. Estas características facilitan, entre otros, la obtención de las recargas netas hacia los sistemas acuíferos, lo que serviría, por ejemplo, para alimentar un modelo subterráneo posterior más detallado, de diferencias finitas o elementos finitos, para algunos casos más críticos.

Las principales desventajas del modelo son que requiere ingresar demasiada información - la base de datos utilizada por este modelo está compuesta de 43 tablas con distinta información requerida - y la

modelación de la componente subterránea es simplificada por cuanto no se puede representar en forma satisfactoria la geometría del basamento del acuífero.

3.3.3 Configuración, Suministro de Información y Calibración del Modelo Elqui

Para cada cuenca, Elqui, Limarí y Choapa, se configuró un modelo MAGIC 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.

Para el caso de la cuenca del Elqui, el modelo configurado quedó compuesto por 19 nodos, 12 sectores de riego y 12 sectores de acuíferos.

En la cuenca del río Elqui la demanda hídrica principal es la agrícola, representando un 82 % de la demanda consuntiva total. Es por esto que parte importante de este estudio se refirió a la caracterización de esta demanda.

En cuanto a la oferta hídrica 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. Las demás subcuencas se generaron caudales en forma sintética, con ayuda de modelos de generación de escorrentía pluvial, nival o mixta.

Es importante mencionar que el objetivo de la calibración en este modelo fue reproducir, en primer lugar, el flujo pasante en algunos puntos de control del río, y paralelamente, aunque con un menor grado de importancia, poder reproducir el nivel de las aguas subterráneas, debido a que esta componente se representa en forma gruesa, obteniendo diferencias importantes entre los niveles simulados y observados. A continuación se indica la descripción de la calibración del modelo en la cuenca del Elqui.

§ Periodo de calibración

En la selección del periodo de calibración se consideró el periodo que representara más fielmente la operación del valle en la actualidad. Por ello, como el embalse Puclaro comenzó a funcionar el año 1999, la calibración se realizó para el periodo abril 1999 – abril 2004.

Este periodo de 5 años incluye un año húmedo (evento extremo correspondiente a septiembre 2002 – febrero 2003), considerado positivo para los fines de calibración para validar la bondad de ajuste del modelo en cuanto a representar los caudales medios mensuales de años normales y este evento extremo.

§ Parámetros ajustados en la calibración

El proceso de calibración en el modelo MAGIC se destinó a reproducir todos los comportamientos conocidos dentro de cada cuenca: caudales en estaciones pluviométricas, niveles de embalses y niveles de acuíferos. Durante este proceso, las demandas, ofertas medidas, y algunos parámetros se consideran datos. Dentro de los parámetros ajustados en la calibración se indican los siguientes:

- Tramos de río: espesor del estrato permeable y permeabilidad vertical
- Eficiencia de distribución del agua dentro de cada zona de riego

- Caudales en cuencas aportantes no controladas
- Coeficientes de derrame y percolación por paño de cultivo
- Parámetros de los sectores acuíferos:
 - Coeficientes de almacenamiento
 - Coeficientes de permeabilidad hidráulica horizontal en las secciones de entrada y salida
 - Tipo de sección considerada para cada acuífero (rectangulares y triangulares)

§ Resultado calibración superficial

La calibración superficial consistió en ajustar los caudales obtenidos de la modelación con los observados en el río en ciertos puntos de control. A modo de resumen, en la Figura 3-2 se indica el resultado de la calibración superficial del modelo MAGIC en dos de las siete estaciones pluviométricas utilizadas. En estas se puede observar un ajuste satisfactorio de los caudales generados por la simulación.

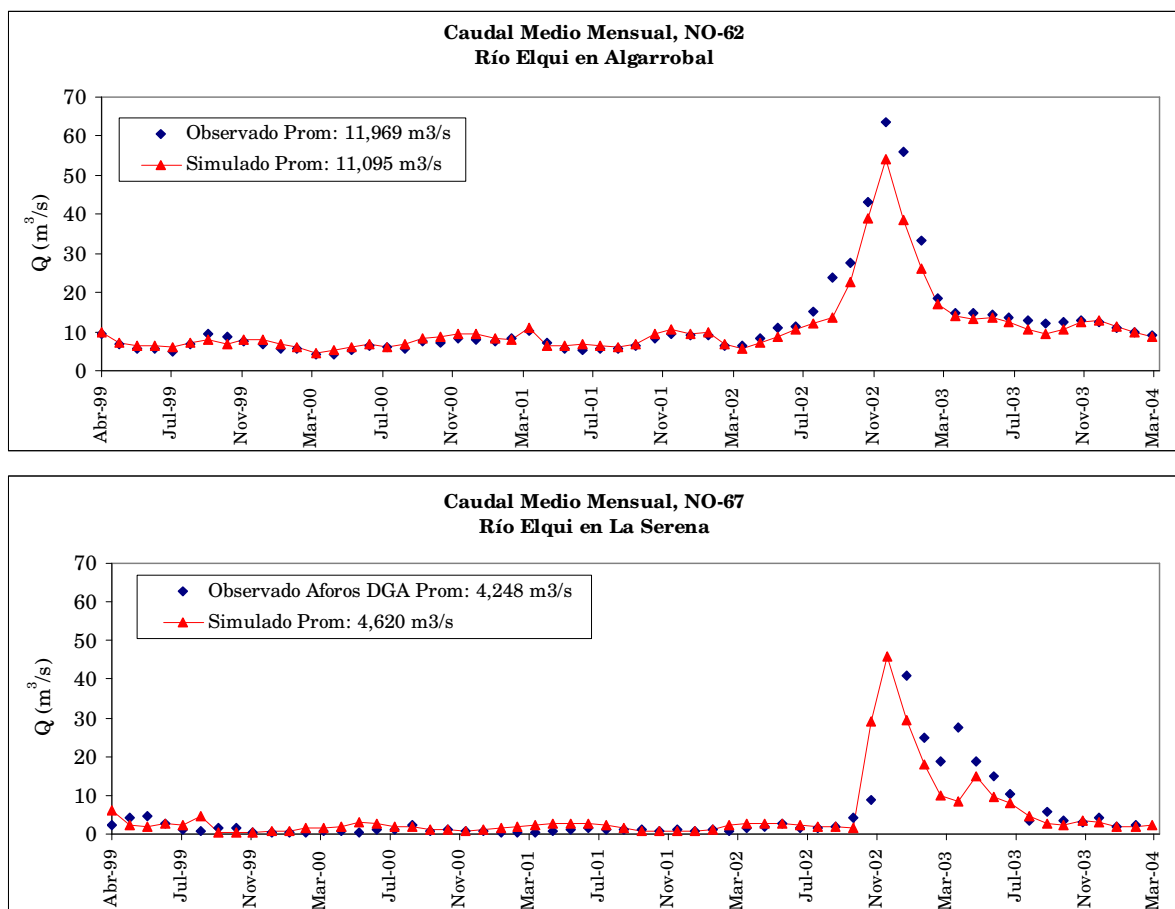


Figura 3-2 Calibración superficial modelo MAGIC Elqui, estaciones fluviométricas Elqui en Algarrobal y Elqui en La Serena .

Fuente: CAZALAC, 2006.

5 Resultado calibración subterránea

Como se mencionó anteriormente, el modelo MAGIC es un modelo de balance, en el que no existe una representación acuciosa del acuífero, y en consecuencia, el comportamiento simulado no pretende reproducir exactamente los niveles piezométricos medidos.

La cota piezométrica de cada sector acuífero se obtiene a través del estado del volumen final en el mes y su relación con el tipo de sección del acuífero, largo del tramo acuífero y el coeficiente de almacenamiento.

Las elevaciones de niveles piezométricos observados se obtuvieron de los datos registrados en los pozos incluidos en la red de monitoreo de aguas subterráneas de la DGA. Estos, en conjunto con la sectorización de los acuíferos en este estudio de referencia, se muestran en la Figura 3-3.

En la Figura 3-4 se muestra el resultado de la calibración en tres de los doce sectores acuíferos modelados en MAGIC, correspondientes a Elqui Alto, Elqui Bajo y La Serena. El comportamiento simulado aparece en rojo, mientras que el comportamiento observado se muestra en varios colores. En general, considerando los doce acuíferos, la variación de los niveles observados en el tiempo es casi nula, salvo en algunos pozos de observación debido a su ubicación lateral y al estar alejados del acuífero principal.

Como se puede ver en la Figura 3-4, pese a que existe un amplio rango entre los distintos niveles piezométricos que se observan en los acuíferos, el nivel promedio que puede entregar el modelo MAGIC no se aleja de lo real.

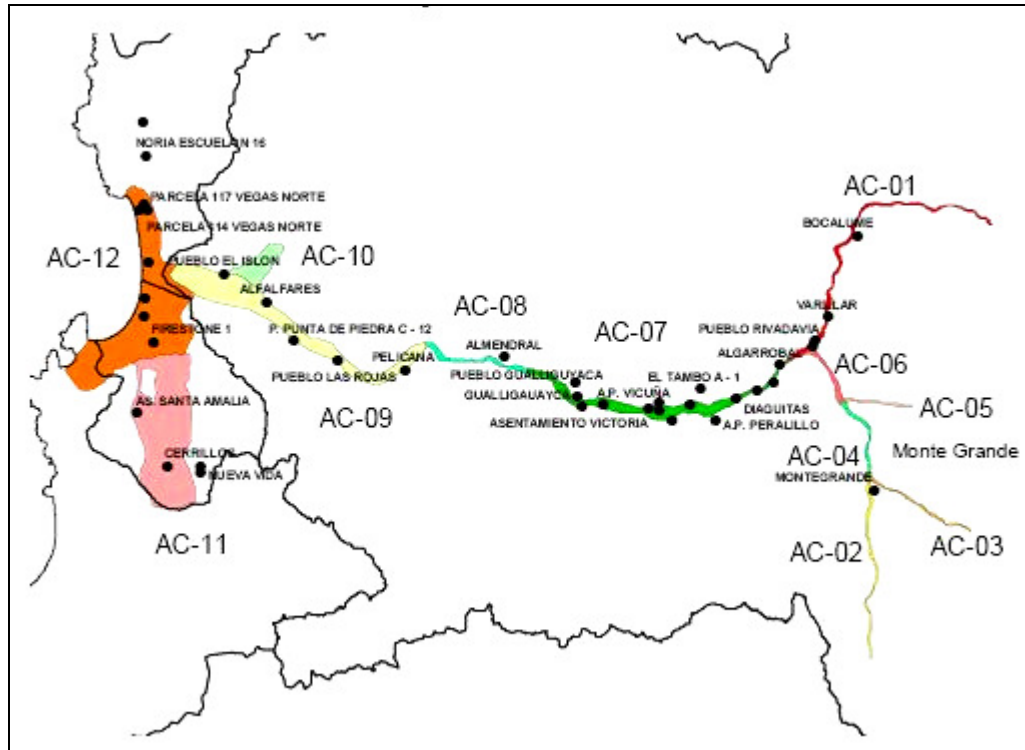


Figura 3-3 Sectores Acuíferos y pozos de observación DGA para calibración modelo MAGIC.
Fuente: CAZALAC, 2006.

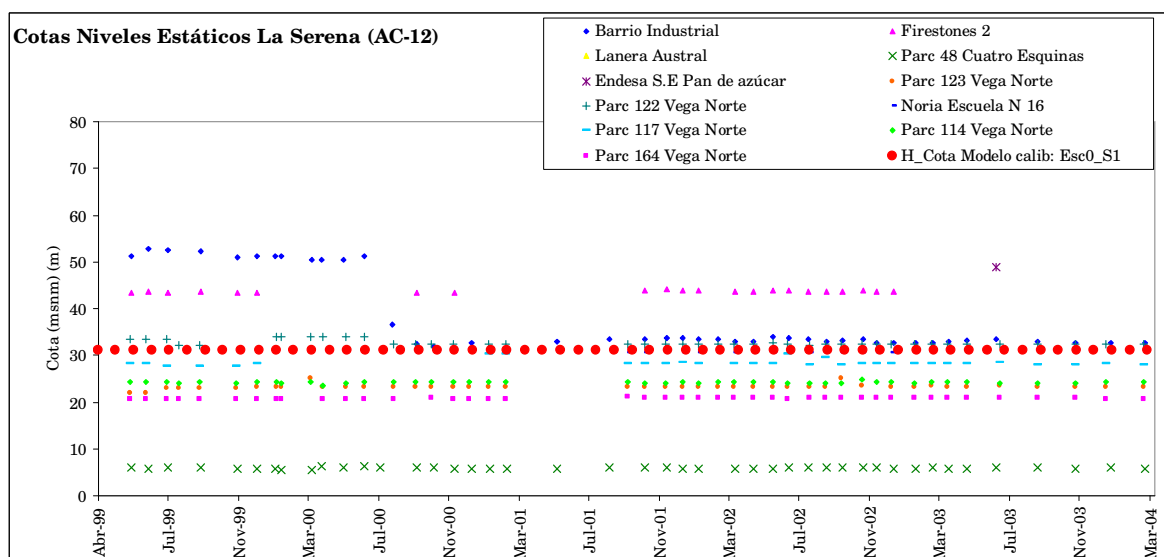
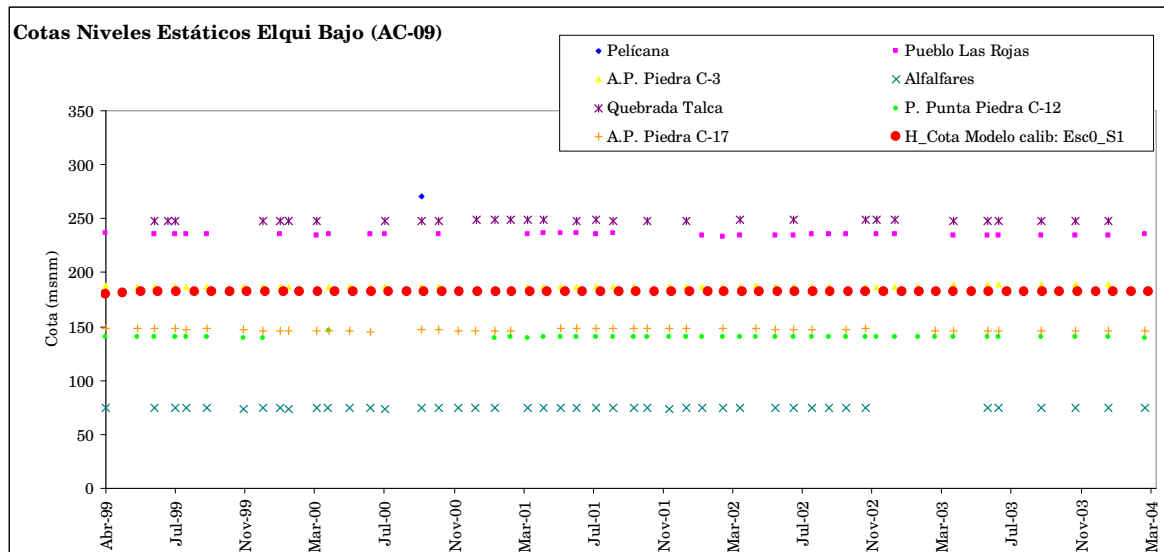
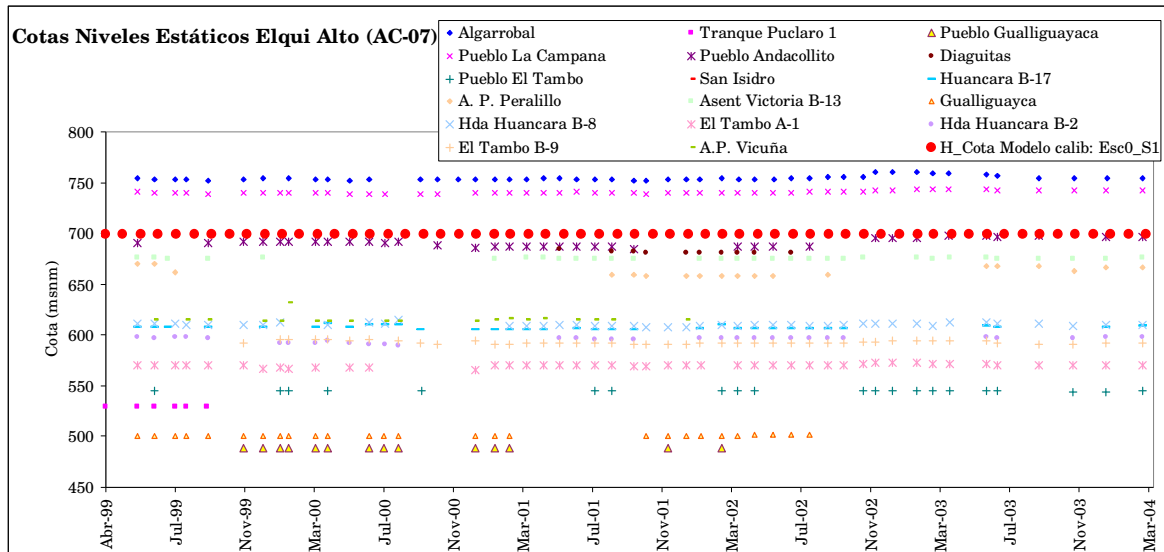


Figura 3-4 Calibración subterránea modelo MAGIC Elqui, sectores acuíferos Elqui Alto, Elqui Bajo y La Serena. Fuente: CAZALAC, 2006.

5 Resultado comportamiento de embalses

El comportamiento anteriormente calibrado se verifica a través del comportamiento de los embalses, los que en esta cuenca corresponden a La Laguna y Puclaro. En estos se entregan los valores observados y simulados de las siguiente variables: caudal de entrada, volumen embalsado, filtraciones, evaporación, rebases y caudal de salida. En las Figuras 3-5 y 3-6 se muestra el resultado para el volumen embalsado y las filtraciones en el embalse Puclaro, respectivamente. De la última figura destaca que la filtración es cerca de 35 l/s para cuando el embalse se encuentra cerca de su capacidad máxima.

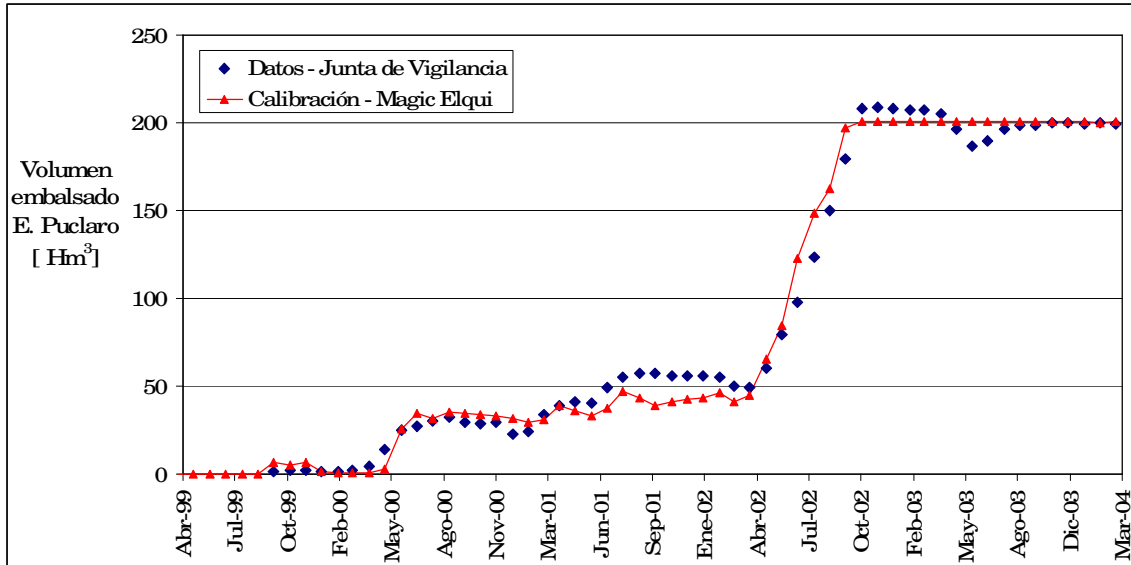


Figura 3-5 Calibración volumen total embalsado promedio mensual embalse Puclaro.

Fuente: CAZALAC, 2006.

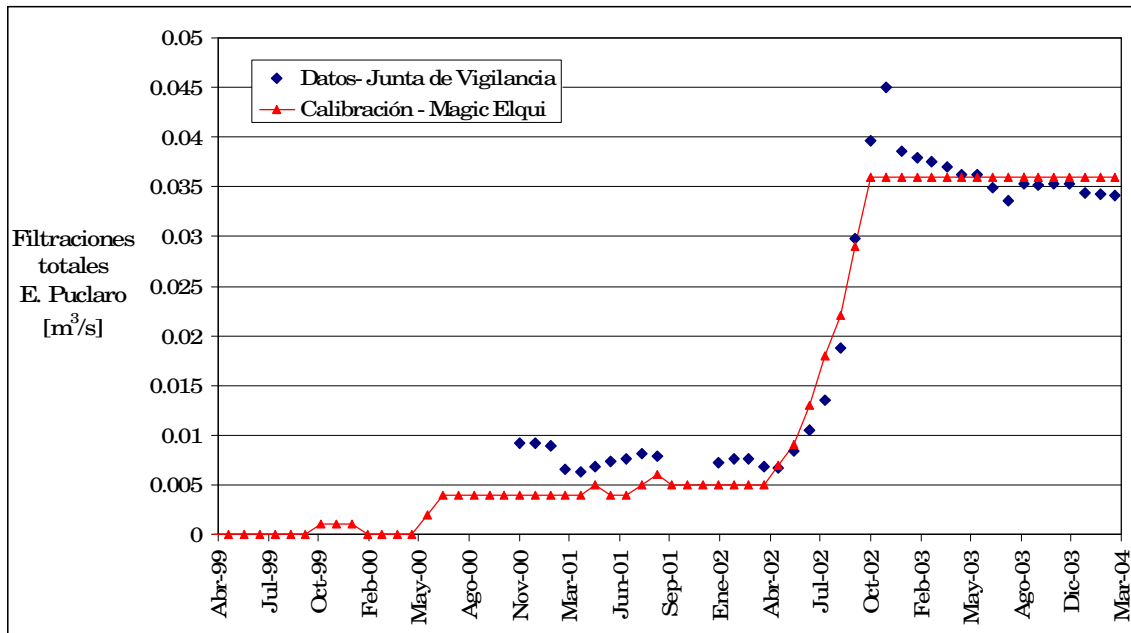


Figura 3-6 Calibración filtración total promedio mensual embalse Puclaro.

Fuente: CAZALAC, 2006.

3.3.4 Resultados del diagnóstico Modelo Elqui

Como resultado de la calibración del modelo de simulación en el estudio se muestra un diagnóstico de la cuenca en los siguientes términos:

- Grado de utilización del recurso hídrico: comparación entre las diferentes demandas que se obtienen para cada zona de riego.
- Interacción entre aguas superficiales y subterráneas: interacción entre cauces, canales, zonas de riego y acuíferos que conforman la disponibilidad total para la recarga de estos.
- Comportamiento de los acuíferos: detalla todos los flujos a los que son sometidos cada uno de los acuíferos en el periodo de simulación. Un resultado de importancia son los bombeos de riego, que son los resultantes de acuerdo con el déficit que deja la disponibilidad de aguas superficiales, y los bombeos para otros usos, los cuales son impuestos.
- Seguridad de riego: se entregan porcentajes de satisfacción de la demanda por zona de riego.
- Flujos de retorno: se indican los caudales efluentes de las zonas de riego, los cuales vuelven al río y una parte actúa como percolación que alimenta los acuíferos.
- Salidas al mar: se muestra el flujo de salida de la cuenca en todas sus componentes.

3.3.5 Operación del sistema en nuevos escenarios

En el estudio se probaron diversas acciones sobre el sistema, para analizar sus efectos y viabilidad técnica, y someter las acciones viables a una evaluación económica. Las medidas que se evaluaron con los modelos tienen relación con:

- Entubamiento de canales
- Tecnificación de zonas de riego
- Explotación más intensiva de los acuíferos subexplotados
- Aplicación de nuevas formas de gestión o entrega de aguas

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

3.4 Valle del Elqui - Investigación del Agua Subterránea. Informe preparado para la CORFO por el Departamento del Interior de EE.UU. - Bureau of Reclamation, Octubre de 1955.

3.4.1 Descripción

El propósito fundamental de este estudio fue evaluar el potencial de los acuíferos anidados en los rellenos que conforman los valles de Elqui y Lagunillas en la IV Región, en orden a determinar principalmente la factibilidad técnica y económica de mejorar la irrigación del valle con recursos subterráneos. Este fue estudiado por la Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas junto al Bureau of Reclamation de los EE.UU., con trabajos en terreno ejecutados por la empresa Snare Corporation.

La caracterización del acuífero se realizó sobre la base de la información recopilada, tanto existente previamente como obtenida especialmente con ocasión del estudio, a partir de sendas campañas de terreno efectuadas.

Los trabajos de terreno se desarrollaron a lo largo de todo el valle del río Elqui, desde su punto de origen (confluencia de los ríos Turbio y Claro, sector de Algarrobal) hasta su desembocadura en el mar. Estos consistieron básicamente en la perforación de sondajes exploratorios, la ejecución de trabajos geofísicos, el desarrollo de pruebas de infiltración y la ejecución de ensayos de bombeo:

- Se elaboraron 28 perfiles geofísicos transversales al valle, determinando la forma geométrica de diversas secciones del valle y la profundidad de la roca basal.
- Se estableció una red de monitoreo del nivel de agua subterránea a lo largo de todo el valle del río, consistente en 22 pares de pozos de observación, ubicados a ambos lados del río y distanciados cada 2 km. aproximadamente.
- Se construyeron 12 pozos de bombeo, que en conjunto con la red de pozos de observación, permitieron la determinación de las características hidráulicas del acuífero, gradientes de escurrimiento subterráneo y profundidad de niveles de agua.

Los sondajes de exploración fueron controlados a nivel mensual desde Julio de 1952 hasta Diciembre de 1954. Se midieron además, en forma periódica, los niveles de la napa en 14 sondajes situados cerca de la desembocadura del río, con el objeto de estudiar el fenómeno de intrusión salina.

3.4.2 Resultados Generales

Los principales resultados obtenidos en este estudio se pueden resumir en:

- En el valle del río Elqui se identificó un relleno de origen aluvial, reconociéndose materiales gruesos con predominio de grava y arenas, intercalados entre estratos con predominio de arcillas y limos.
- A lo largo del valle del río, desde Algarrobal a poco antes de La Serena (Algarrobito), la profundidad del basamento rocoso no sobrepasa los 200 m.
- Se identifica un acuífero superior del tipo libre, ubicado preferentemente en los primeros 10 m del relleno sedimentario, el que sobreyace a niveles acuíferos más profundos de carácter libre, semiconfinado y confinado, que incluso manifiestan comportamientos surgentes locales.
- En todo el valle del río, desde su nacimiento en la confluencia de los ríos Claro y Turbio hasta su desembocadura, la profundidad del nivel de la napa es inferior a 20 m, disminuyendo hacia el eje del río a valores inferiores a 10 m.
- El gradiente promedio de la napa subterránea entre Algarrobal y La Serena es de 1%, variando a lo largo de este sector entre 0,3 y 2%.
- La conductividad hidráulica se estimó en general como moderada con algunos altos y bajos locales, correspondiéndole a la mayoría de los sectores valores del orden de 10 m/d o menores. Por su parte, el coeficiente de almacenamiento (de corto plazo) se estimó menor a 0,001 y la porosidad efectiva entre 1 y 10%.
- Se estimó para los rellenos del valle del río, entre Algarrobal y Algarrobito, un volumen saturado de 5.200 millones de m³ y un volumen embalsado de 364 millones de m³. Se estimó además que sería factible extraer la tercera parte de este volumen embalsado con una batería de pozos con profundidades no mayores a 50 m., que corresponde al 57 % del total de agua requerida en el valle hacia mediados del siglo XX.

Estos antecedentes constituyen la principal fuente de conocimiento del acuífero, en especial respecto de la geología de subsuperficie y de la hidrogeología del valle. En particular, las pruebas de bombeo y las campañas de medición de los niveles estáticos en el acuífero proporcionan información representativa del sistema en régimen permanente, por cuanto en esa fecha existían muy pocos pozos en explotación.

3.4.3 Constantes Elásticas del Acuífero

En la Tabla 3-1 se indica un resumen de las características hidráulicas resultantes de las pruebas de bombeo. Según esta, los coeficientes de permeabilidad y transmisividad estimados presentan una variabilidad considerable. El coeficiente de permeabilidad varía entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día, mientras que la transmisividad varía entre 130 m²/día y 5300 m²/día.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento, los valores que se computan como resultado de las pruebas de bombeo estuvieron todos dentro de los límites de aquellos que se encuentran ordinariamente en las napas artesianas (2 a 83 x 10⁻⁴). Sin embargo, en el estudio se explica que estando en producción las napas superiores artesianas probablemente perderán agua periódicamente y parcialmente, lo que daría por resultado que la capacidad específica probablemente se encontraría entre 0,01 y 0,10.

Del análisis granulométrico, a causal del alto porcentaje de finos presente en la mayoría de las muestras, la capacidad específica de los materiales probablemente estaría entre 0,05 y 0,10 en el caso que los agotamientos fueran suficientes para bajar la presión por debajo de los estratos confinantes. Con fines de cálculo, el valor de 0,07 se utilizó para computar el probable almacenamiento del relleno.

Tabla 3-1 Constantes Elásticas del Acuífero

Sector	Sección Geofísica	Pozo	Prueba Nº	K [m/min]	K [m/día]	S []	T [m ² /min]	T [m ² /día]	b [m]	Acuífero	
Algarrobito	3	B3	1	0.018	25.9	0.0002	0.18	259	10	inferior	
			2*	0.0033	4.7	0.0008	0.27	389	82	ambos	
Altovalsol	4	B5'	1			0.0007	0.17	245		ambos	
			2			0.002	0.13	187		ambos	
			3*	0.0021	3	0.0083	0.24	346	114	ambos	
Saturno	6	B7	1			0.0016	0.11	158		inferior	
			2			0.0001	0.09	130		medio	
			3			0.0007	0.16	230		superior	
			4*	0.0015	2.2	0.0002	0.17	245	113	todos	
Calera	11	B7'	1	0.0014	2	0.002**	0.18	259	129	ambos	
			C6	1	0.0029	4.2	0.001**	0.28	403	97	ambos
				C7'	1*	0.0019	2.7	0.001**	0.18	259	95
		2					0.17	245		ambos	
Puclaro	18	B8	1			0.0005	3.7	5328		ambos	
			2			0.0005	3.1	4464		ambos	
			3*	0.045	64.8	0.0006	2.9	4176	64	ambos	
Algarrobal	26'	B9	1	0.031	44.6	0.0017	1.76	2534	57	inferior	
			2*	0.017	24.5	0.0007	1.98	2851	116	ambos	

Fuente: CORFO, 1955

Según estudio de referencia:

* Valor utilizado en estimaciones y cálculos

** Valor supuesto

3.4.4 Gasto de la corriente subterránea y recarga

En la Tabla 3-2 se muestra la estimación del flujo subterráneo basado en datos ajustados de las pruebas de bombeo y niveles de pozos de observación, la cual considera los comentarios y observaciones realizadas por la Dirección de Riego sobre este estudio (Monsalve, 1957).

Los caudales calculados de la corriente subterránea en diferentes secciones del río, distintas del Perfil Geofísico N° 18, varían de 0,014 a 0,041 m³/s.

En el caso del Perfil Geofísico N° 18, cuyo flujo subterráneo se estima en 131 l/s y que corresponde al mayor estimado en el valle, según el estudio se cree que el valor calculado es mucho mayor que el real. Los pozos de observación y de bombeo reflejan niveles estáticos de varias napas. Se usó el promedio de estas cifras para calcular la probable gradiente hidráulica, cuyo valor puede ser demasiado grande dando por resultado un error en el caudal calculado de la corriente subterránea. La ubicación referencial de los perfiles geofísicos mencionados en la tabla anterior se muestran en la Figura 3-7. En la Figura 3-8 se muestran algunos de los perfiles, los cuales fueron extraídos del estudio de referencia.

Respecto a la recarga superficial del acuífero, en este estudio se estiman que esta corresponde a los retornos de riego, el cual le tiene un valor de 0,5 m³/s.

Tabla 3-2 Estimación del flujo subterráneo

Sector	Sección Geofísica	Permeabilidad Ajustada		Gradiente Hidráulico [%]	Área Sección [m ²]	Flujo Estimado	
		[m/min]	[m/día]			[m ³ /min]	[m ³ /s]
Algarrobito	3	0.0017	2.4	0.64	226000	2.46	0.041
Altovalsol	4	0.0011	1.6	0.64	246000	1.73	0.029
Saturno	6	0.0008	1.2	1.27	145000	1.47	0.025
Calera	11	0.0015	2.2	0.86	67800	0.87	0.015
Puclaro	18	0.023	33.1	1.28	26600	7.83	0.131
Algarrobal	26'	0.0086	12.4	0.22	49500	0.94	0.016

Fuente: CORFO, 1955.

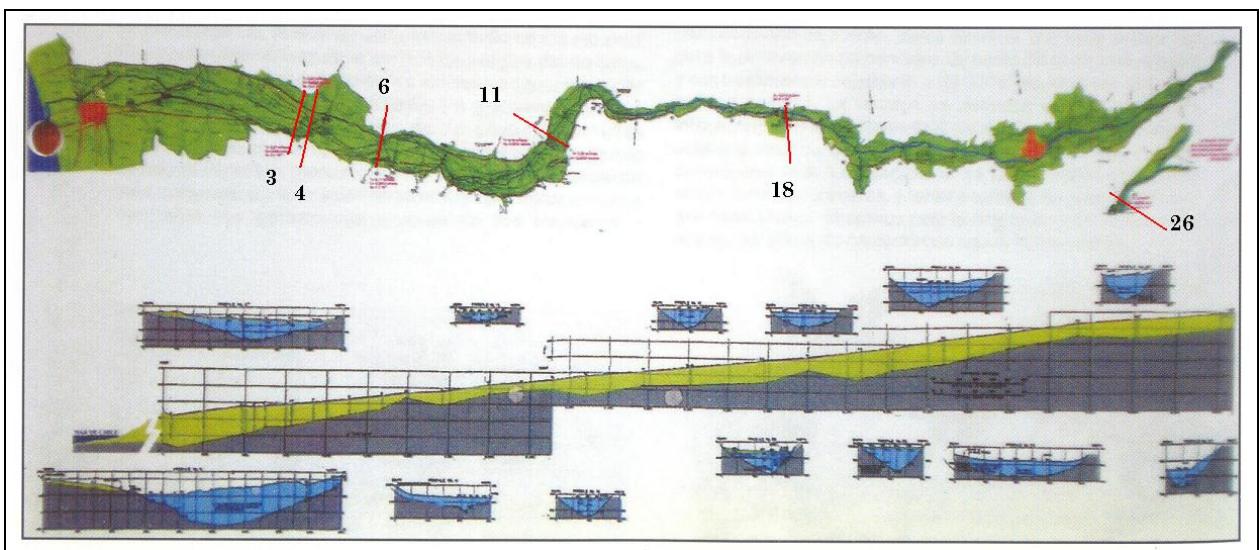


Figura 3-7 Ubicación de perfiles geofísicos indicados en Tabla 3-2.

Fuente: Celedón, E. 2007.

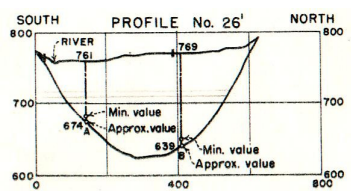
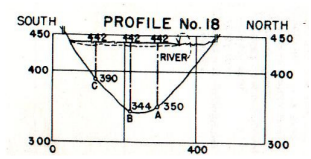
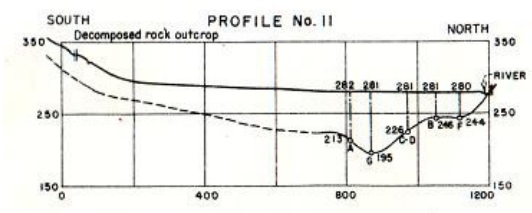
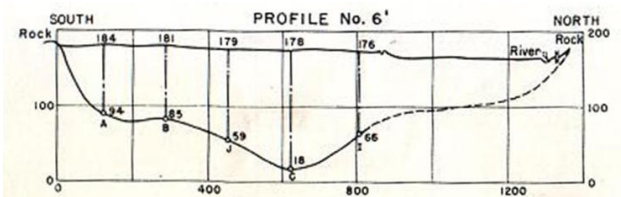
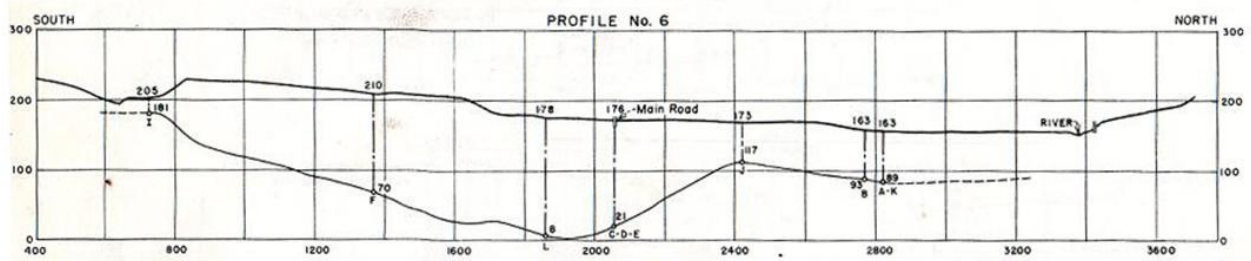
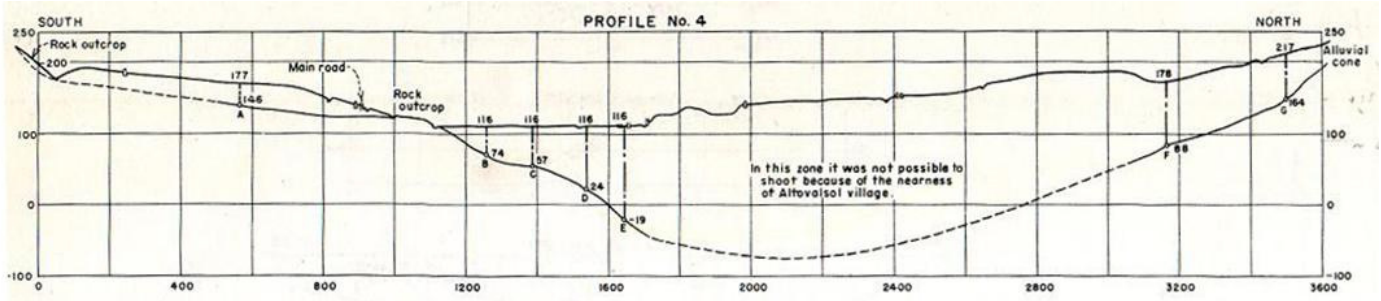


Figura 3-8 Perfiles geofísicos indicados en Tabla 3-2.
Fuente: CORFO, 1955.

3.4.5 Capacidad del embalse subterráneo

El informe Valle del Elqui – Investigación del Agua Subterránea supone que el embalse funciona como napa libre, al que le asigna una capacidad específica de 7%. Con la base del análisis de los registros granulométricos se estima que el material saturado el agua en el relleno aluvial del valle del Elqui, entre las localidades de Algarrobal y Algarrobito, ascendería a 5.200 millones de m³. En consecuencia habría una capacidad de 364 millones de m³ de agua (El volumen del relleno según este estudio se muestra en Anexo K).

De lo anterior, considerando al acuífero como libre y tomando en cuenta captaciones que permitan una altura de elevación de 50 m, se infiere que el volumen útil del embalse es de 127 millones de m³.

No obstante se menciona el desagüe y desaparición de la presión de la napa artesiana superior en el carácter de fenómeno eventual. Los coeficientes de almacenamiento son del orden de menos de 0,001, pero si se produce el desagüe de la napa artesiana superior como resultado del bombeo, la capacidad específica probablemente estaría entre 0,01 y 0,10.

En vista de lo anterior, se considera adecuado mencionar un resumen las observaciones realizadas por la Dirección de Riego respecto a la capacidad del embalse (Monsalve, 1957):

§ Observación de la Dirección de Riego

Considerando lo descrito previamente, la Dirección de Riego indica que el funcionamiento del sistema como napa libre es inseguro, puesto que se confirma que es probable que las napas artesianas superiores sean desaguadas sólo parcialmente y periódicamente.

Es entonces, de considerable importancia la cuestión de si la napa artesiana funciona como tal o como napa libre, puesto que según ocurra, la capacidad del embalse puede valer desde 43 millones de m³, hasta tres veces este valor.

Según las observaciones, dado el hecho que las capas que encierran las napas en el Valle del Elqui son conglomerados arcillo-limosos no consolidados, la posibilidad de una disminución rápida de la presión hidrostática y vaciamiento de la napa de manera que funcione como napa libre no es posible en la zona de estudio.

Dentro de las observaciones de la Dirección de Riego se concluye que el funcionamiento de las napas artesianas como libres no llegará a suceder en el Valle del Elqui y que, si ocurriera, será de corta duración en relación con su funcionamiento artesiano.

No obstante, pese a que no hay una base para cuantificar, dentro de las observaciones se hace una suposición probablemente muy optimista al suponer que la napa artesiana funcionaría como libre en una tercera parte del tiempo de bombeo. Bajo este supuesto, se estima una capacidad virtual útil del embalse de 80 millones de m³.

4 MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICO

Un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad debido a la complejidad inherente de los procesos que tienen lugar en el medio natural.

Un modelo de flujo en un medio poroso saturado o modelo de simulación hidrogeológico es una representación matemática o numérica que simplifica la compleja hidrogeología de un sitio determinado. Este, utilizando las ecuaciones que gobiernan el flujo y conservación de la masa para simular el flujo de agua y transporte de sustancias contaminantes en el medio poroso, entrega como resultado la distribución de los niveles piezométricos, permitiendo determinar la magnitud y dirección del escurrimiento de agua subterránea (Espinoza, 2008). No obstante, este tipo de modelos no resuelven la necesidad de contar con una sólida fuente de información hidrogeológica para garantizar que el modelo coincida con el sistema físico que se modela.

Según el IGWMC (*Internacional Ground Water Modeling Center*) un modelo de simulación hidrogeológico se define como “una descripción matemática, no única, simplificada de un sistema de aguas subterráneas existente, codificado en un lenguaje de programación, junto con una cuantificación del sistema acuífero que incluya las condiciones de borde relevantes, los parámetros del sistema, así como las presiones o acciones sobre éste” (Espinoza, 2008).

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo de título, se utilizó como base un modelo de simulación hidrogeológico implementado en Visual MODFLOW para la Cuenca del Río Elqui, desarrollado por el DICTUC para la Dirección General de Aguas (DGA 2003 y 2006). En dicho estudio se realizó una evaluación de los recursos hídricos subterráneos en la zona de estudio.

Sobre dicho modelo de simulación, que fue elaborado para representar el sistema bajo acciones externas (recargas y extracciones) distintas a las que se plantean en el periodo de calibración del presente estudio, se realizaron modificaciones en su discretización espacial vertical en algunas zonas del sistema, que presentaban singularidades, y se modificaron algunas conductividades hidráulicas, en base a antecedentes disponibles, con el objeto de representar de mejor forma los niveles observados.

En este capítulo se muestra la descripción del modelo de simulación, basada en DGA (2003), y se detallan las modificaciones realizadas sobre este. Posteriormente se detallan las condiciones y metodologías para su calibración, y los resultados que se obtienen de esta.

4.1 Descripción de Visual Modflow

La herramienta computacional Visual Modflow es un producto comercial, desarrollado en 1995 por Waterloo Hydrogeologic Inc., que permite resolver problemas de flujo en medios porosos en tres dimensiones mediante la utilización del modelo matemático Modflow. Visual Modflow facilita la implementación y el análisis de resultados de un modelo a través de un ambiente gráfico que permite el ingreso, modificación e intercambio de información con archivos externos de forma rápida y sencilla. Además de abordar simulaciones de flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones, en conjunto con una serie de paquetes que posee el programa (MT3D y RT3D), Visual Modflow permite simular problemas de transporte y degradación de contaminantes (Espinoza, 2008).

Visual Modflow, al entregar la evolución de los niveles de aguas subterráneas y las velocidades del flujo en la zona de interés, es uno de los modelos más utilizados y reconocidos internacionalmente en el área de la hidrogeología para la simulación de flujo, tanto por administraciones públicas como por consultorías privadas.

MODFLOW, desarrollado en 1988 por McDonald y Harbaugh, pertenecientes al U.S. Geological Survey, es un modelo matemático que resuelve la ecuación diferencial que describe el movimiento del agua subterránea (Ec. 4.1) utilizando un método numérico basado en diferencias finitas e implementando una discretización tridimensional del medio, a través de un número discreto y finito de puntos en el espacio (celdas) y tiempo (períodos), dando origen a un sistema de ecuaciones lineales, cuya solución entrega el valor de nivel piezométrico en cada celda y en cada período simulado. El sistema resuelve mediante iteraciones sucesivas hasta que el valor del nivel piezométrico satisfaga el criterio de convergencia impuesto (Von Frey, 2004).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

donde,

K_x, K_y, K_z : conductividades hidráulicas en las direcciones “x”, “y” y “z”, respectivamente.
 h : nivel piezométrico
 W : flujo por unidad de volumen de recargas o extracciones de agua
 S_s : almacenamiento específico
 t : tiempo

En MODFLOW la región de flujo se subdivide mediante una grilla formada por una serie de líneas perpendiculares en el plano horizontal, no necesariamente equidistantes, que generan celdas en las cuales las propiedades del medio son asumidas uniformes, generando filas, columnas y capas o estratos. Los estratos pueden ser simulados como confinados, no confinados, o una combinación de ambas.

El programa posee una estructura modular que consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes llamadas módulos. Estos módulos están agrupados en paquetes, en donde cada paquete atiende a una característica específica del sistema hidrológico a ser simulado, tales como flujos desde ríos o drenes, o al algoritmo de solución con que se resolverá el sistema de ecuaciones que describe el sistema en estudio. Por ser un programa modular, puede ser fácilmente modificado para adaptarse a diferentes problemas, tales como incorporar flujos de acciones externas, tales como bombeos (extracción o inyección), recargas superficiales, evapotranspiración, flujos por drenes y flujos a través de lechos de ríos (SSG, 2009). En este trabajo de título se utilizó Visual Modflow Premium versión 4.2.

4.2 Implementación del Modelo

4.2.1 Simplificación del Sistema Físico

4.2.1.1 Discretización espacial horizontal

En cuanto a la discretización espacial horizontal no se realizaron modificaciones al modelo desarrollado por DICTUC S.A. Esta representación considera los siguientes límites expresados en coordenadas planas, según el datum geodésico 56:

Límite Norte : UTM N 6.710.100 [m]
 Límite Sur : UTM N 6.671.700 [m]
 Límite Oeste : UTM E 276.200 [m]
 Límite Este : UTM E 350.400 [m]

La red utilizada tiene una dimensión de 74,2 km x 38,4 km, extendiéndose desde la confluencia de los ríos Claro y Turbio (comienzo del río Elqui), cerca de la localidad de Rivadavia, hasta el Océano Pacífico, comprendiendo una superficie de 2849 km². Las celdas tienen dimensiones de 200 m x 200 m, resultando 192 filas y 371 columnas. En la Figura 4-1 se muestran las celdas activas e inactivas, en donde las primeras representan al relleno sedimentario y que contribuyen efectivamente al flujo subterráneo, y las segundas representan zonas en donde no existe flujo subterráneo o cuyo acuífero no está conectado con el acuífero en estudio, como es el caso del acuífero de Pan de Azúcar.

Los límites que definen el contacto roca- relleno se obtuvieron a partir de un análisis geomorfológico de la topografía y al conocimiento previo de la geología del valle (DGA, 2006).

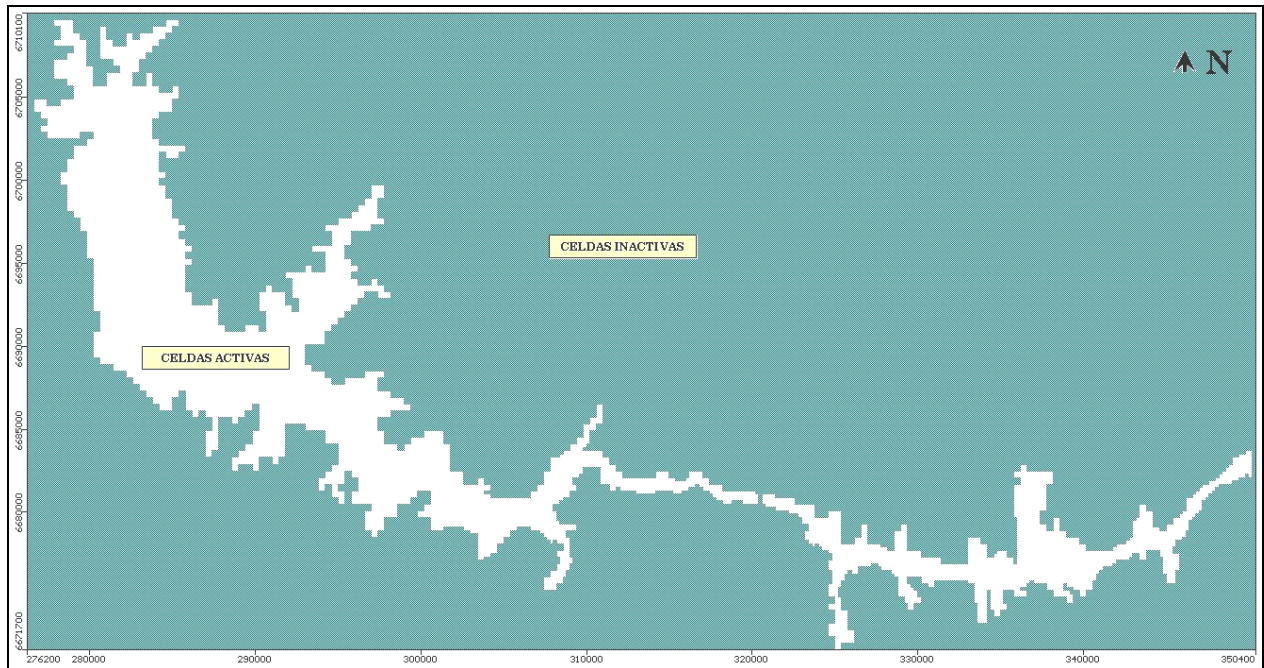


Figura 4-1 . Representación de los bordes impermeables laterales que delimitan el acuífero.

Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.2.1.2 Discretización espacial vertical

El modelo considera 2 estratos o capas con el objetivo de representar de mejor forma los acuíferos, ambos con característica hidrogeológica libre o no confinada. Estos se representan mediante una superficie espacialmente variable para la representación del nivel del terreno, una divisoria entre los dos estratos y una superficie para la representación del basamento rocoso o borde impermeable inferior del acuífero.

En la discretización espacial vertical se realizaron modificaciones al modelo original. Estas modificaciones consistieron en suavizar los cambios bruscos en el manto que representa el basamento rocoso en algunas zonas con el objeto de garantizar o mejorar la existencia de flujos entre las celdas adyacentes. La zona que sufrió mayores modificaciones corresponde al sector de Santa Gracia y una pequeña zona en los sectores Serena Norte y Elqui Bajo, los cuales se definen en el acápite 4.2.5 – *Sectores de Balance Hídrico Subterráneo*.

Cabe mencionar que en el modelo original estas superficies que definen los estratos fueron obtenidas mediante los resultados del estudio Elqui Valley Chile – Groundwater Investigation (CORFO, 1955)

(41 puntos correspondientes a pozos y perfiles) y un análisis tridimensional en todo el valle en base al tipo de sedimentación, energía del río, geología estructural y tectónica reciente en donde se generaron cerca de 100 puntos adicionales con una distribución relativamente uniforme para ser finalmente interpolados y extrapolados por Visual Modflow, generando las elevaciones de los tres niveles en toda la extensión del modelo.

En las Figuras 4-2 y 4-3 se puede observar la elevación de la superficie del terreno y del basamento rocoso del acuífero, respectivamente. En estas se distingue que su elevación aumenta conforme se avanza desde la costa hacia el Este. Una vista 3-D de la grilla que representa el basamento rocoso se muestra en la Figura 4-4.

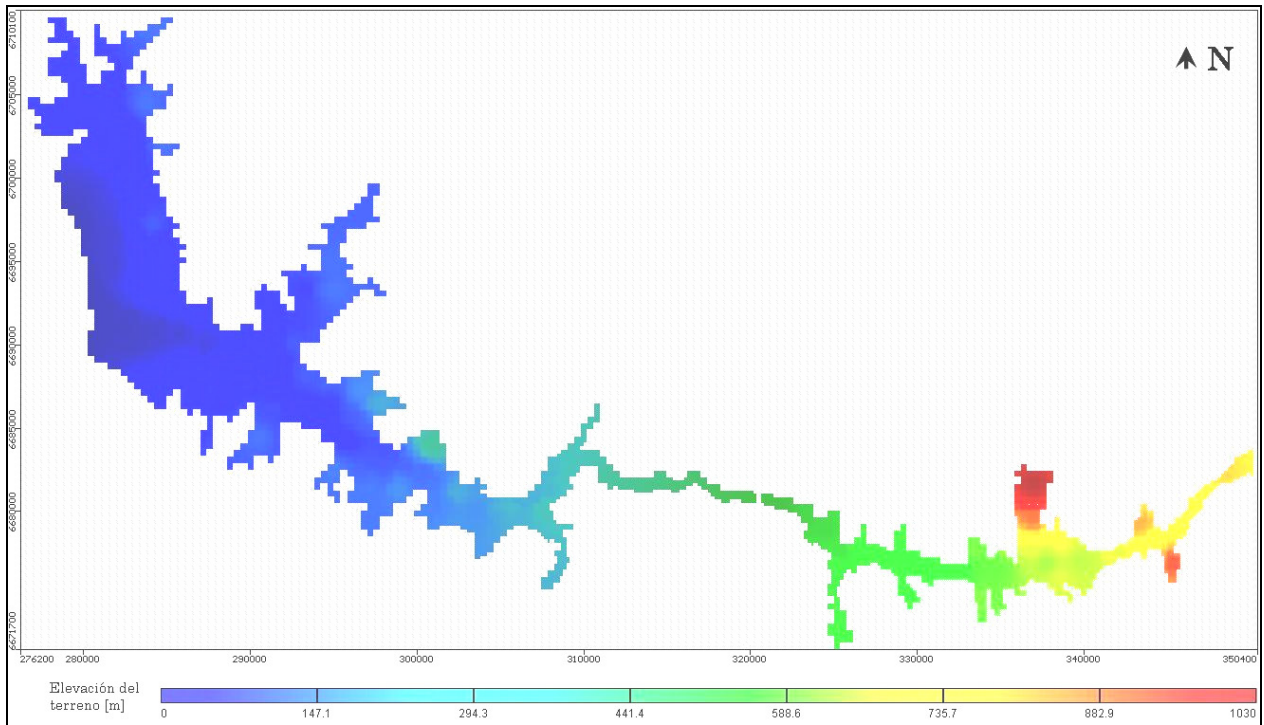


Figura 4-2 Elevación de la superficie del terreno en modelo.

Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow 4.2.

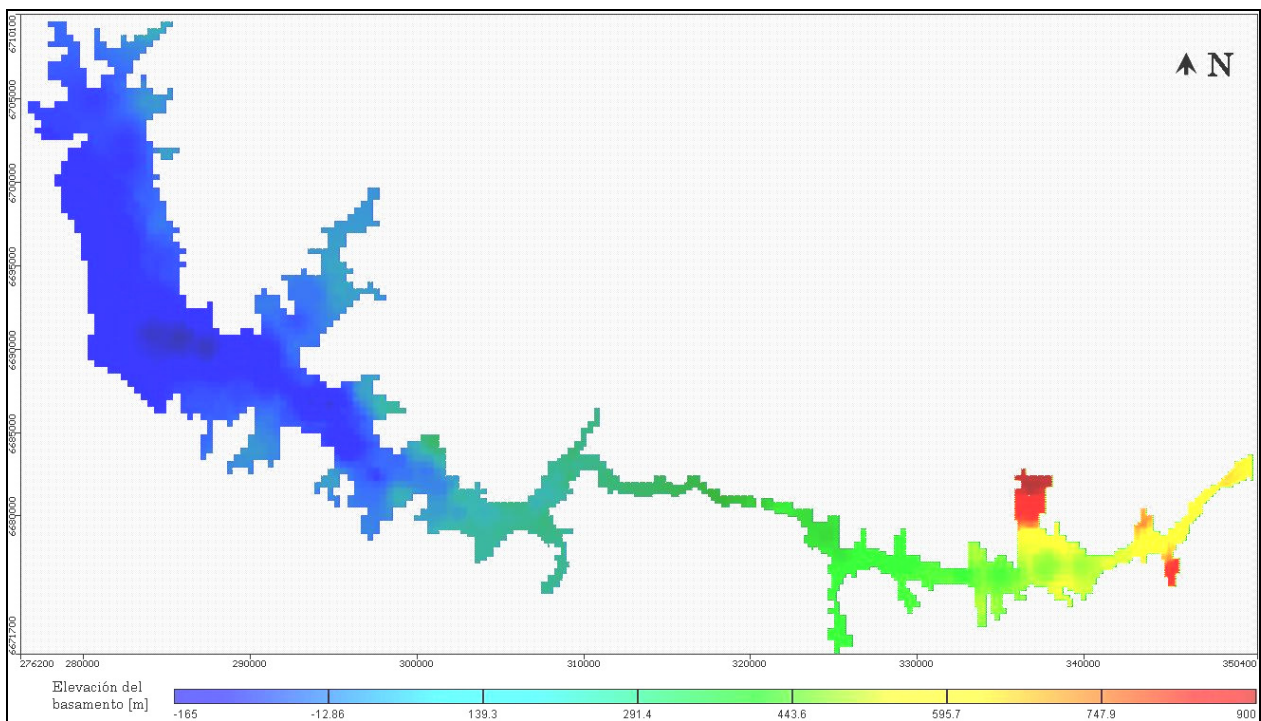


Figura 4-3 Elevación del basamento rocoso en modelo.
Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

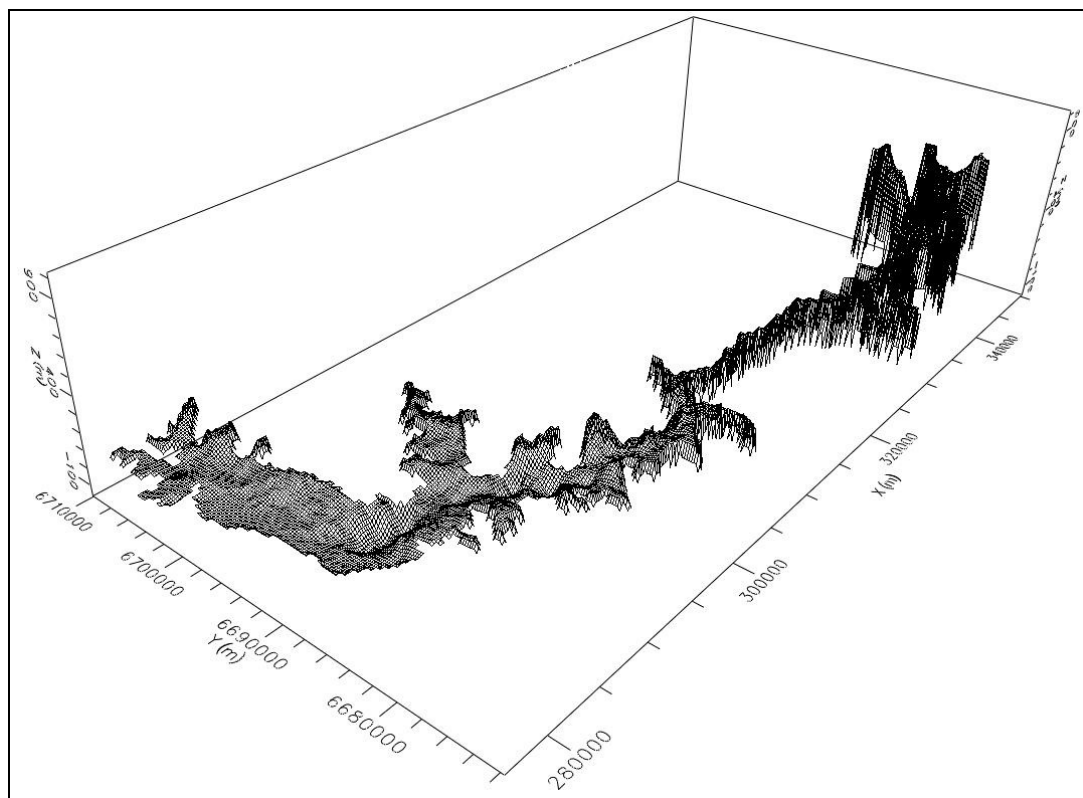


Figura 4-4 Representación del basamento rocoso del acuífero.
Fuente: Visual Modflow

Como muestra la Figura 4-5, la potencia o espesor del relleno, considerando ambos estratos, varía entre los 50 m y poco más de 250 m, pero presentando relativamente un espesor de aproximadamente 150 m en la mayor parte del acuífero.

Un corte transversal en la columna 76 del modelo de simulación es el que se muestra en la Figura 4-6, en donde se detallan las tres superficies que definen el estrato superior e inferior.

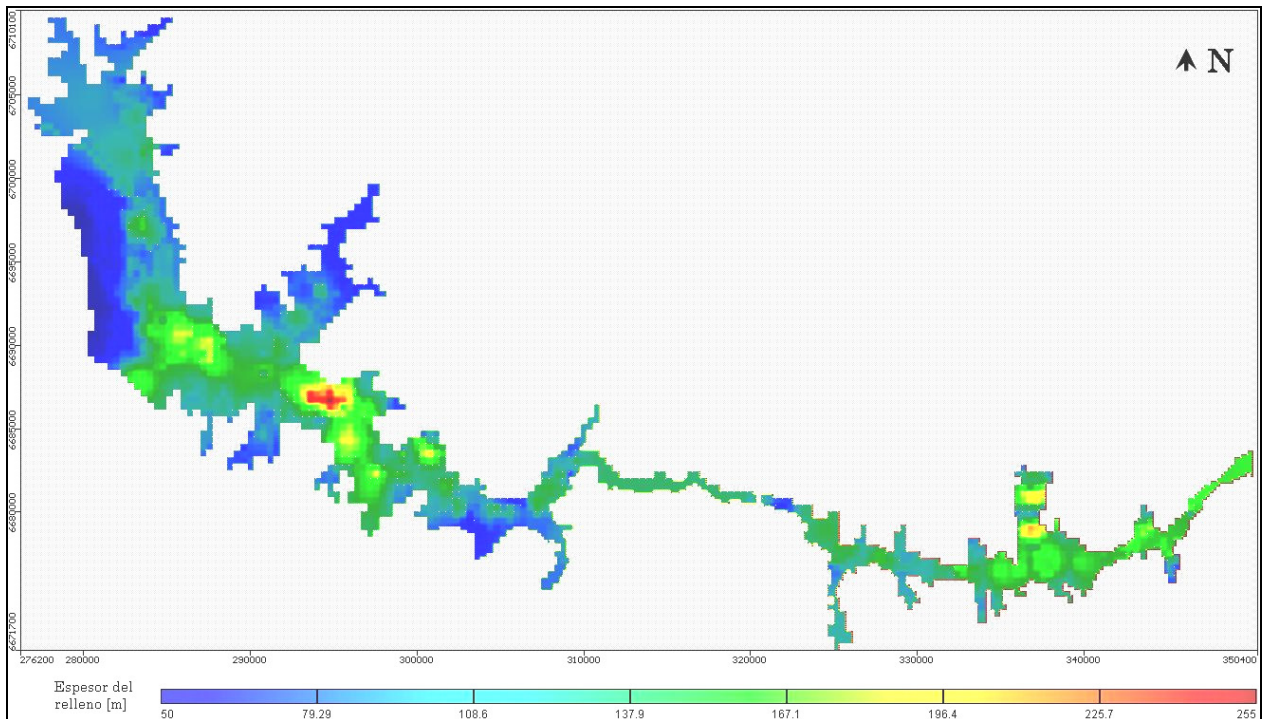


Figura 4-5 Espesor o potencia del relleno en modelo.
Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow 4.2.

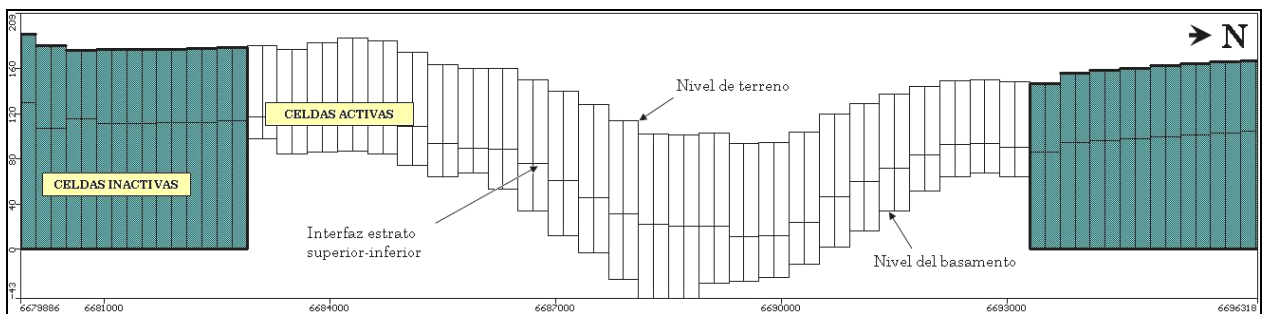


Figura 4-6 Corte transversal en modelo (columna 76).
Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow 4.2.

4.2.2 Discretización Temporal y Periodo de Simulación

La discretización temporal y periodo de simulación utilizados, tanto en la calibración como en los escenarios de operación, son los mismos que se presentan en el estudio de Cazalac–Rodhos (2006) y están dados por la frecuencia de los datos de terreno (nivel freático), recarga y bombeo, y por considerarse apropiados para representar los objetivos del estudio.

De acuerdo a lo anterior, el intervalo de tiempo es mensual. Para el caso de la calibración el tiempo corresponde a 5 años, entre abril de 1999 y marzo de 2004 (60 períodos), en donde no se registran sequías, y para el caso de los escenarios de operación el tiempo de simulación es de 15 años, entre abril de 1989 y marzo de 2004 (180 períodos), en los que se registran años secos y húmedos.

En cuanto al tiempo de inicio de la simulación, tanto para la calibración como para los escenarios de operación, este corresponde al mes de abril, el cual se considera apropiado por el hecho de corresponder a un mes en donde la recarga superficial es cercana al promedio anual y en el que las extracciones por bombeo no corresponden al periodo de mayor demanda, partiendo de una situación de equilibrio.

Respecto a la condición inicial utilizada para los niveles freáticos en las distintas simulaciones, se consideró la situación a la que tiende el modelo en el periodo de calibración con el objeto de tener un estado de inicio en que no se produzcan perturbaciones en el sistema.

4.2.3 Propiedades Hidrogeológicas

En esta sección se describen las propiedades elásticas del acuífero, tanto conductividades hidráulicas como coeficientes de almacenamiento, y las modificaciones realizadas para el caso de las primeras.

En Visual Modflow es preciso especificar los siguientes parámetros para que este logre ejecutar el modelo de flujo y calcular el nivel piezométrico en cada celda:

Conductividad hidráulica horizontal	: K_x y K_y [m/día]
Conductividad hidráulica vertical	: K_z [m/día]
Almacenamiento específico	: S_s [1/m]
Capacidad específica	: S_y []

Cabe mencionar que la porosidad efectiva no es considerada por MODFLOW en sus simulaciones (modelos de flujo) y sólo es utilizada en problemas de transporte de partículas para identificar zonas de captura (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006).

4.2.3.1 Conductividades Hidráulicas

Las conductividades hidráulicas fueron modificadas a partir de los valores que indicaba el modelo original dispuesto por la DGA, el cual fue calibrado en régimen permanente y en su condición natural (1953) – sin embalse ni extracciones por bombeos al considerarse estos muy pequeños – , obteniendo un adecuado nivel de ajuste entre los niveles calculados y observados durante la calibración en régimen transiente durante el periodo Abril 1999 – Marzo 2004.

Las modificaciones que sufrieron las conductividades hidráulicas fueron ligeras, sin cambiar significativamente y en base a antecedentes disponibles (las cuales varían entre 2 y 65 m/día), con el objeto de representar de mejor forma los niveles observados. Cabe mencionar que en el estudio DGA-2003 se indica que los antecedentes revisados para el análisis de las constantes elásticas se consideraron sólo los resultados derivados del estudio de CORFO (1955).

Cada zona identificada se considera isotrópica horizontalmente y homogénea, asumiendo $K_x = K_y$ y $K_z = 0,1 K_x$. La transmisividad, que según los antecedentes varía entre $130 \text{ m}^2/\text{día}$ y $5300 \text{ m}^2/\text{día}$, en el modelo es obtenida a través del producto entre el espesor saturado del estrato y la conductividad hidráulica.

Para efectos de comparación entre las conductividades hidráulicas originales y modificadas, en las Figuras 4-7 y 4-8 se muestran las conductividades para el estrato superior en el modelo original y el modificado o final, respectivamente. En cuanto al estrato inferior, las conductividades originales y modificadas se muestran en las Figuras 4-9 y 4-10, respectivamente.

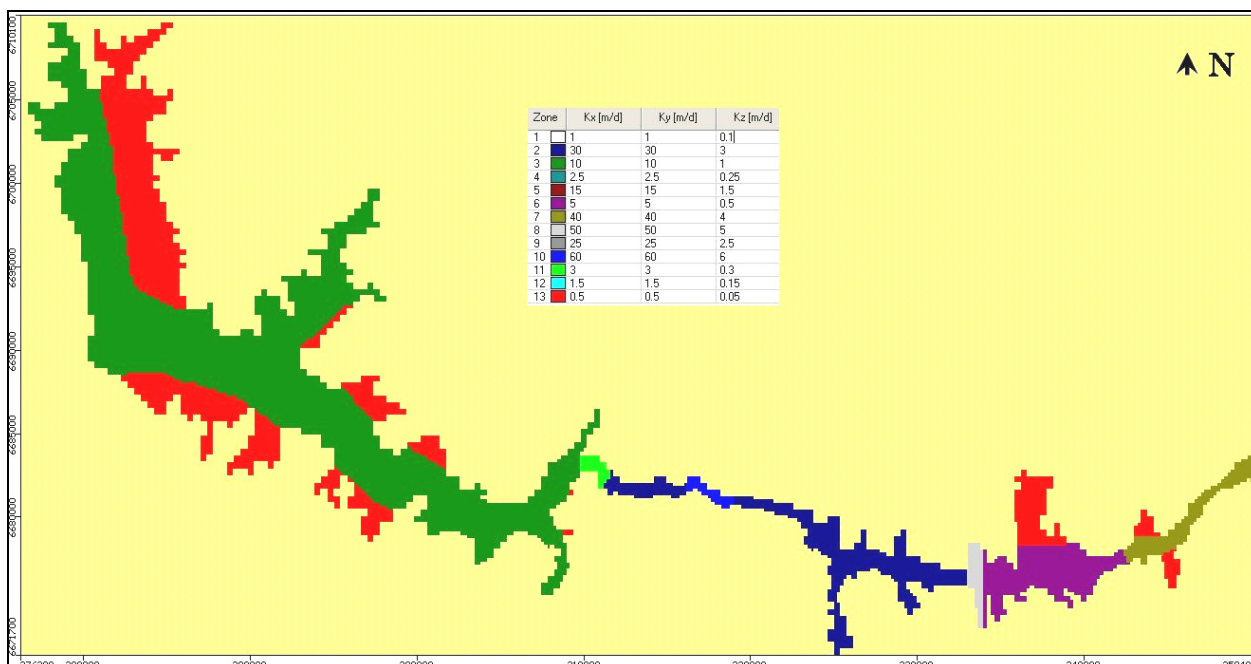


Figura 4-7 Distribución de la conductividad hidráulica en estrato superior en modelo original.

Fuente: DGA, 2006.

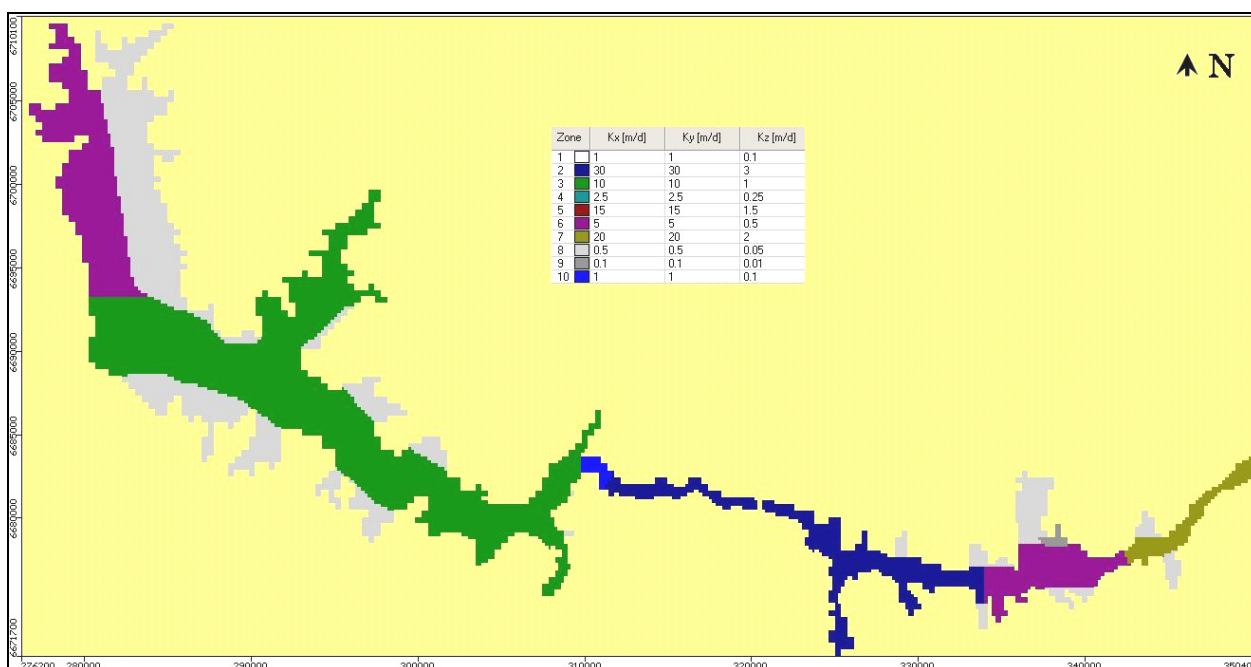


Figura 4-8 Distribución de la conductividad hidráulica en estrato superior en modelo final.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

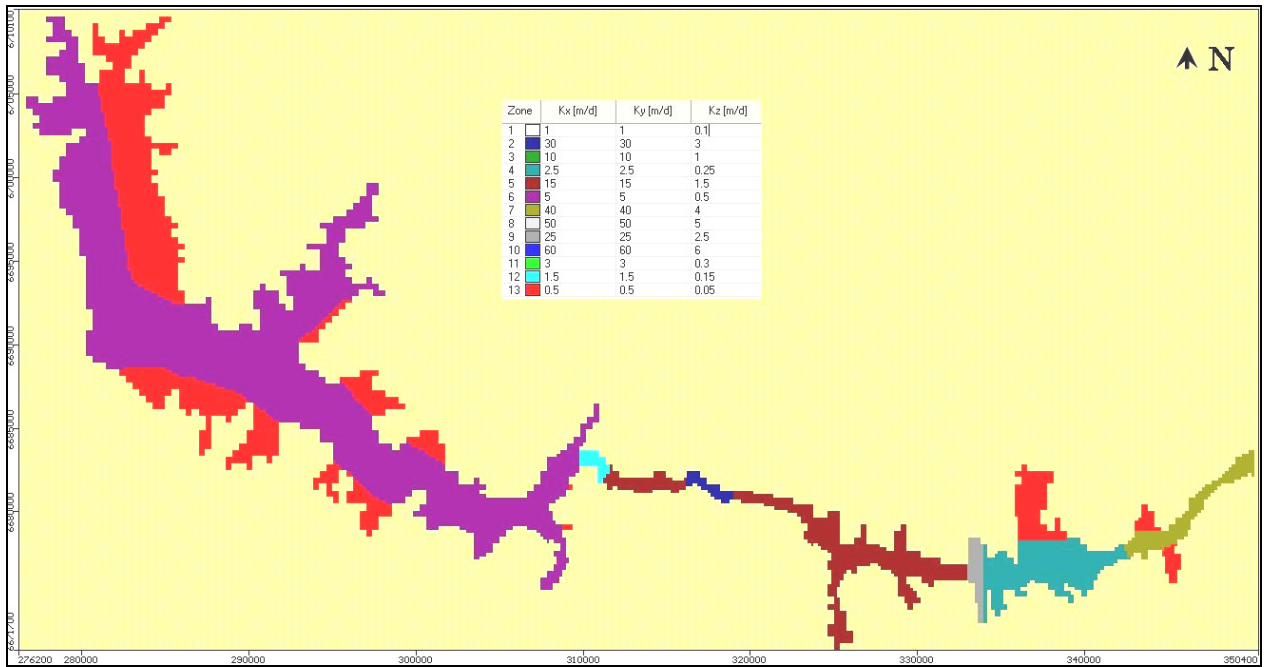


Figura 4-9 Zonas de conductividad hidráulica en estrato inferior en modelo original.
Fuente: DGA, 2006.

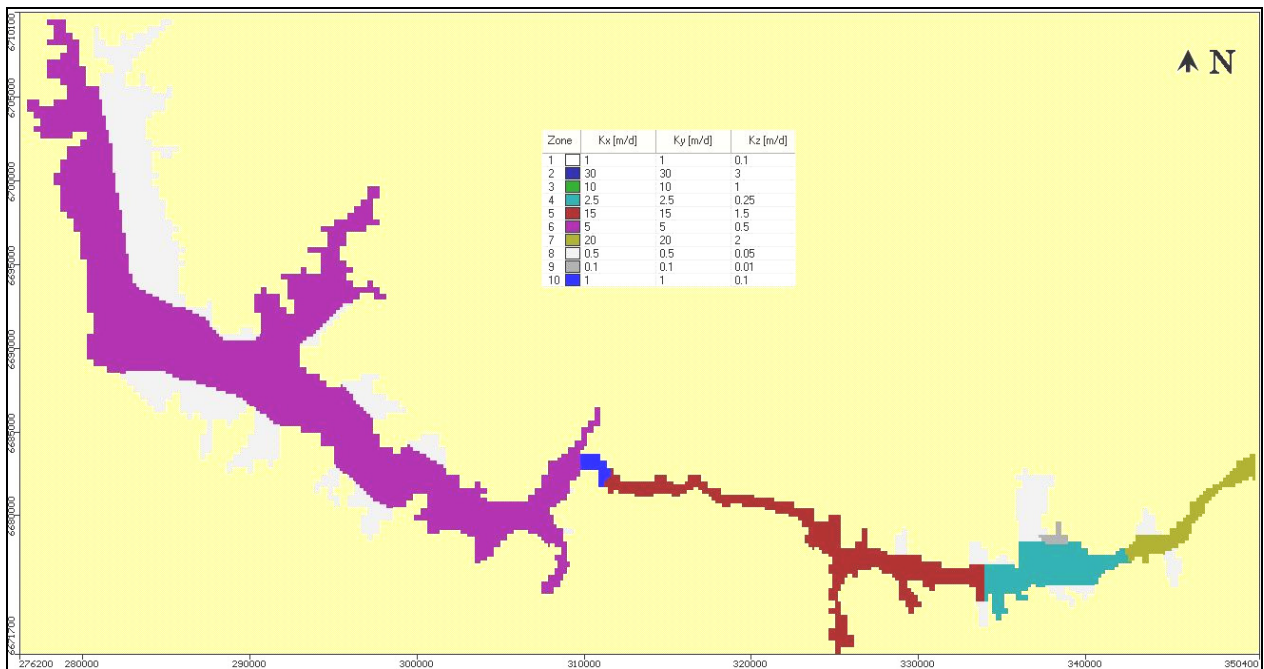


Figura 4-10 Zonas de conductividad hidráulica en estrato inferior en modelo final.
Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.2.3.2 Coeficientes de Almacenamiento

Visual Modflow permite modelar el acuífero suponiendo que este puede ser libre, confinado ó confinado / libre, en función del nivel de la napa en este último caso. En el caso de este modelo de simulación, el estrato superior fue modelado como acuífero libre, mientras que el estrato inferior se modeló como un acuífero confinado / libre. En el caso del estrato inferior, este funciona como confinado mientras el nivel piezométrico se encuentra en la capa superior, mientras que cuando el nivel piezométrico se encuentra en el estrato inferior, este funciona como acuífero libre.

En los acuíferos confinados, una cantidad de agua es liberada desde almacenamiento, pero el acuífero permanece saturado. El coeficiente de almacenamiento (S) en este caso es el producto del almacenamiento específico (S_s) y del espesor del acuífero (b); $S = S_s \cdot b$.

En el caso de acuíferos libres el nivel freático aumenta o disminuye debido a cambios en la cantidad de agua almacenada. Este almacenamiento o liberación de agua se debe a la capacidad específica de la unidad (S_y), así como al almacenamiento específico (S_s) de ella. Para un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento (S) se calcula como $S = S_y + h \cdot S_s$, donde h es el espesor de la zona saturada del acuífero. Sin embargo ante gradientes hidráulicos menores al 10% se puede desprestigiar la capacidad específica ($S_y \ll h \cdot S_s$), considerando estos acuíferos como confinados ($S = h \cdot S_s$) (Espinoza, 2008).

En base a la buena representación de los niveles estáticos en el periodo de calibración, se conservaron los coeficientes de almacenamiento que originalmente poseía el modelo de simulación dispuesto por la DGA. Estos coeficientes de almacenamiento fueron estimados en función de sus características sedimentológicas y del funcionamiento en acuíferos similares.

El coeficiente de almacenamiento varía entre 4 y 8 % para el estrato superior y entre 2 y 4 % en el estrato inferior, adoptando una distribución espacial similar a la obtenida para el coeficiente de conductividad hidráulica, con el objeto de que sectores con mejores expectativas hidrogeológicas tengan asociados mayores coeficientes de almacenamiento. En las Figuras 4-11 y 4-12 se muestra la distribución del coeficiente de almacenamiento en el estrato superior e inferior, respectivamente.

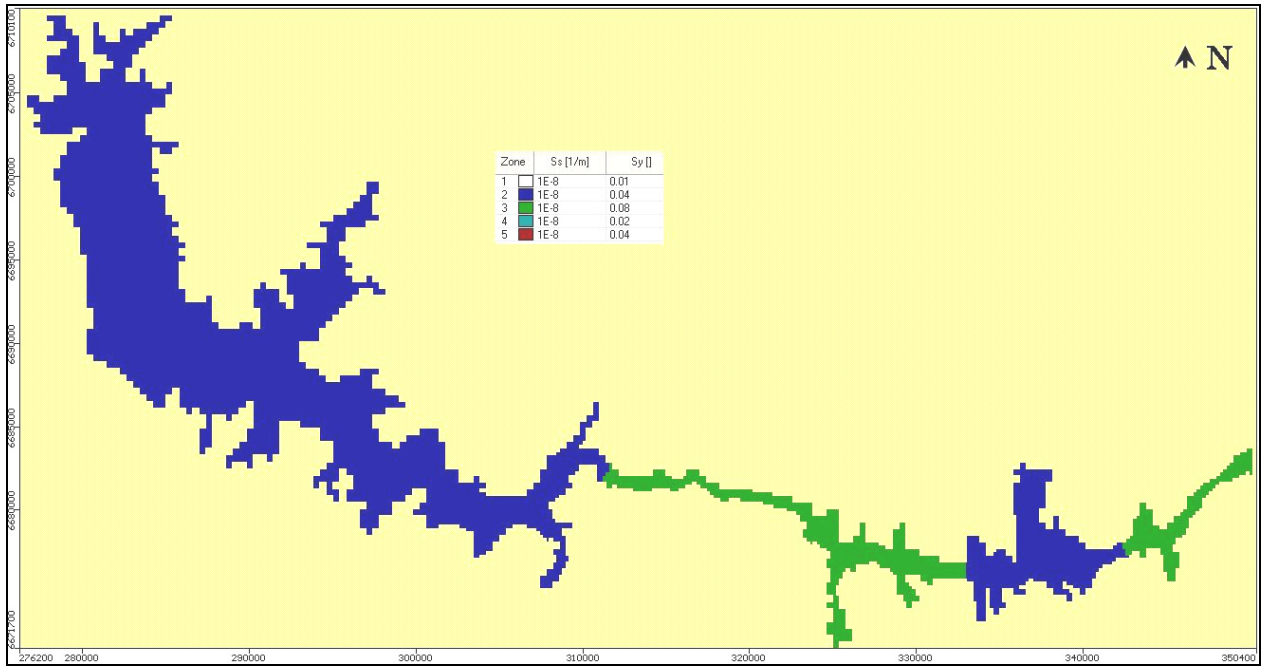


Figura 4-11 Distribución del coeficiente de almacenamiento en el estrato superior.

Fuente: DGA, 2006.

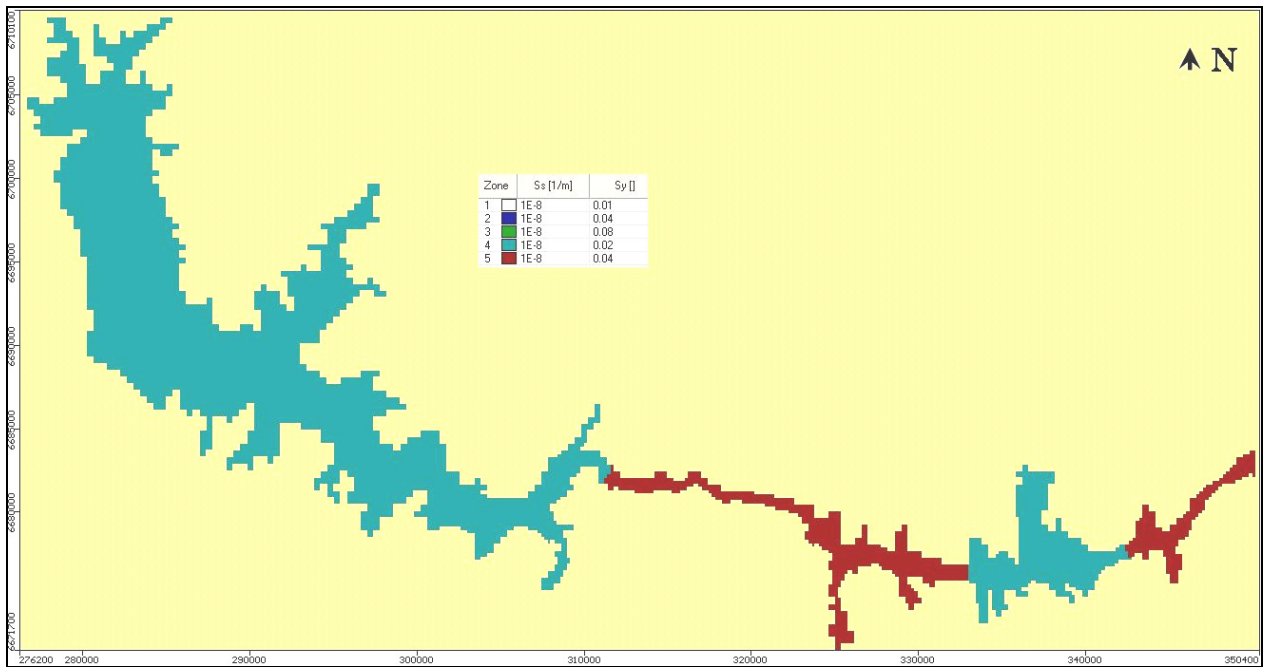


Figura 4-12 Distribución del coeficiente de almacenamiento en el estrato inferior.

Fuente: DGA, 2006.

4.2.4 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del sistema, indicadas en la Figura 4-13, están determinadas por el embalse Puclaro, el nivel del mar y el río Elqui:

Embalse Puclaro: Este es representado mediante una condición de altura o carga constante. No obstante, como es conocido el nivel del embalse durante el periodo de calibración, coincidente con el proceso de llenado del embalse, estos varían mes a mes durante la calibración. Es por esto que se consideran áreas distintas para el periodo de calibración y escenarios de operación, las que se indican en la Tabla 4-1:

- *Calibración:* La carga considerada se muestra en la Figura 4-14, obtenida a través de la curva de embalse y el volumen embalsado obtenido de Cazalac-Rodhos (2006). Por esto, se considera un área reducida como representativa de la superficie del embalse durante el proceso de llenado.
- *Escenarios:* En los escenarios de operación el nivel en el embalse se mantiene constante en todo el tiempo de simulación en su cota máxima de aguas normales (508,8 m.s.n.m). Se considera la máxima área que puede abarcar el embalse.

Tabla 4-1

Superficie Embalse Puclaro		
Simulación	Celdas	Área [km ²]
Calibración	71	2,84
Escenarios	197	7,88

Nivel del mar: Se representa mediante un borde de altura constante con carga igual a 0 m en la calibración y escenarios de operación. Esta condición no fue modificada respecto al modelo original.

Río Elqui: La recarga ó descarga generada por la condición de borde tipo río es función de la posición del nivel freático en las celdas adyacentes, de la conductancia del lecho y la altura del agua en el río durante el periodo de simulación. Esta corresponde a una descarga del acuífero en aquellos puntos en que el nivel de la napa es mayor que la altura en el río. El río se modelo con una altura de 0,5 m en toda su extensión y la conductancia varía entre 250 y 500 m²/día, conservando los valores del modelo original.

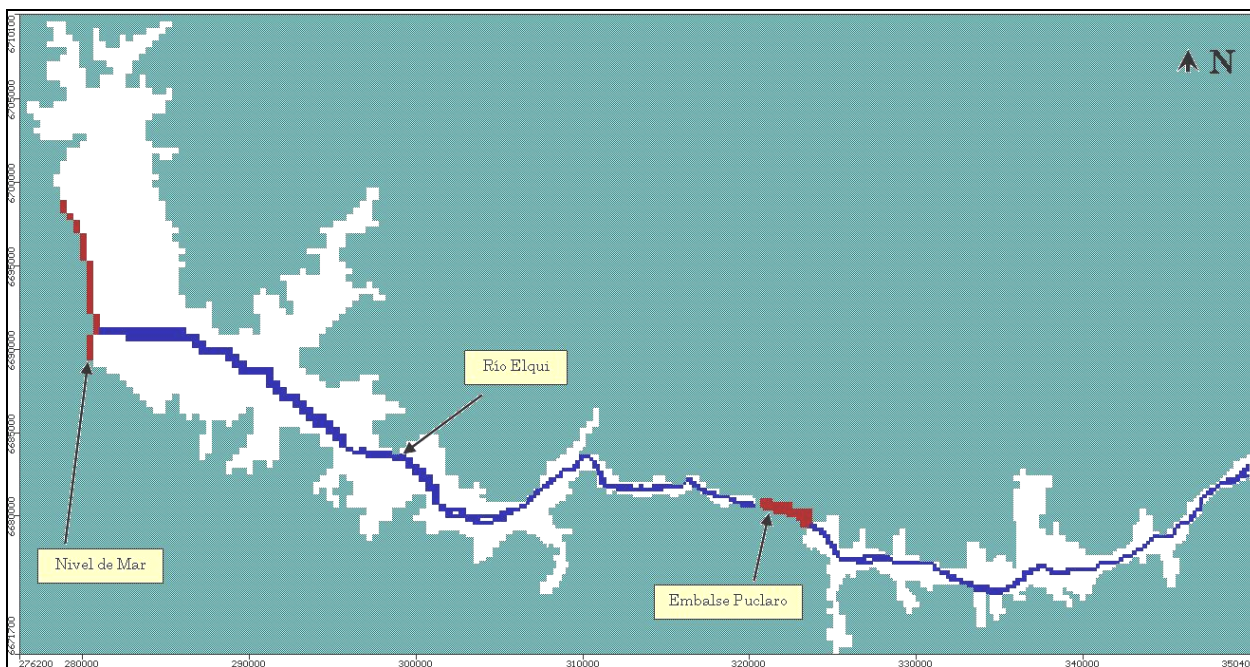


Figura 4-13 Condiciones de borde en modelo de simulación.

Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow

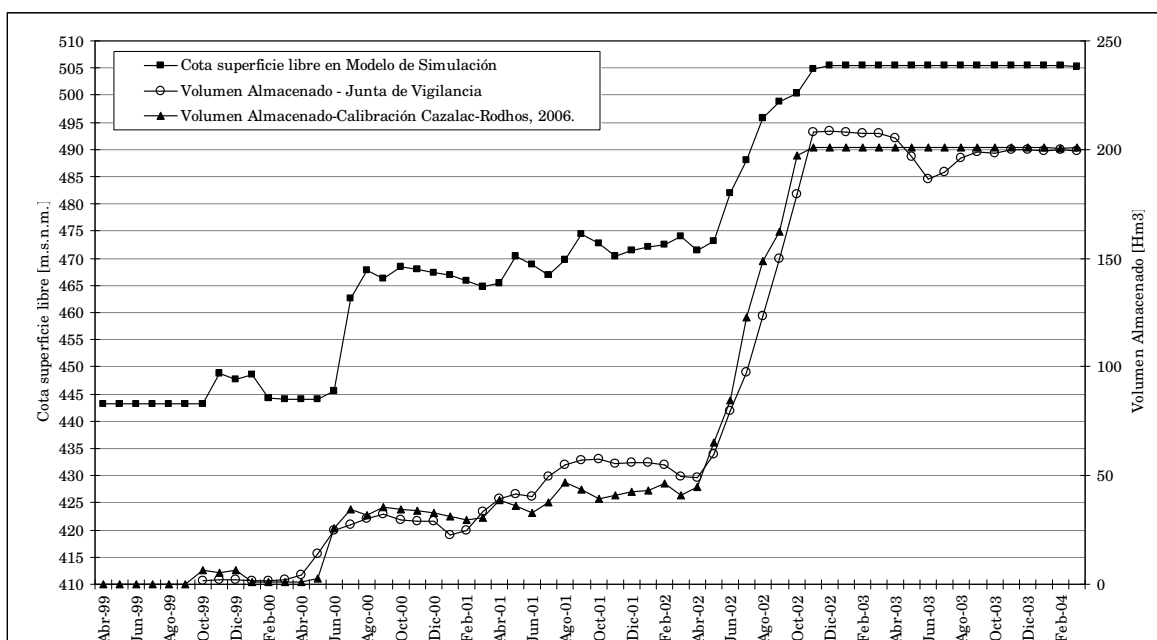


Figura 4-14 Altura de agua en embalse Puclaro en modelo de simulación durante calibración.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Sectores de Balance Hídrico Subterráneo

Los sectores de balance hídrico subterráneo fueron modificados del modelo original (DGA, 2003) conservando los bordes impermeables. En el modelo implementado en Visual Modflow en el presente trabajo de título, los límites entre zonas o sectores acuíferos son los que se definen en el estudio Cazalac-Rodhos, 2006. Esta sectorización no tiene relación con las propiedades hidrogeológicas que se

presentan en el valle, sino con la simplicidad en la forma en que se entregan los resultados del estudio de Cazalac-Rodhos en cuanto a recargas y extracciones.

La sectorización se muestra en la Figura 4-15 , en donde es importante mencionar que el embalse Puclaro está considerado dentro del sector Elqui Alto y el límite Oeste de este sector corresponde al muro del embalse.

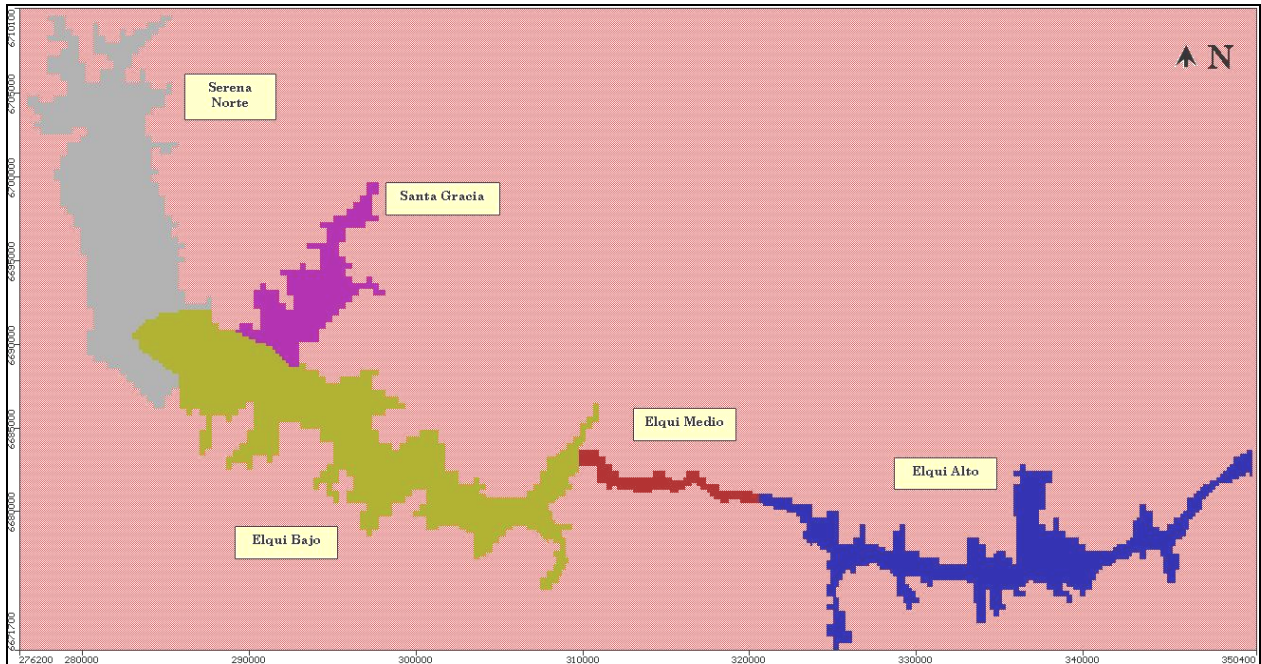


Figura 4-15 Sectores de balance hídrico subterráneo.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.2.6 Acciones Externas: Recarga y Extracción

La recarga y extracción son las dos acciones externas que se deben considerar en un modelo de simulación hidrogeológico (Espinoza, 2008). Estas acciones que se ingresan al modelo son extraídas del estudio de Cazalac-Rodhos (2006).

En el caso de la recarga, en este estudio el modelo conceptual considera una recarga subterránea y superficial para el acuífero. El origen de estas, en conjunto con la extracción por pozos de bombeo, es detallado a continuación.

4.2.6.1 Recarga Subterránea

La recarga subterránea que posee el acuífero en su cabecera, en el sector de Elqui Alto, proveniente de los acuíferos Turbio y Claro-Paihuano (AC-01 y AC-06 en Figura 3-3), cuyo valor es obtenida de los resultados del estudio de Cazalac-Rodhos (2006), es implementada mediante pozos de inyección cuyas cribas se extienden a través de toda la potencia del relleno. Estos pozos de inyección suministran al acuífero durante todo el horizonte de simulación, tanto en la calibración como en los escenarios de operación.

4.2.6.2 Recarga Superficial

En el estudio de Cazalac-Rodhos, 2006, la recarga superficial en los distintos acuíferos está compuesta por tres factores: percolación en zonas de riego, percolación en canales y percolación en cauces. Considerando que el modelo original implementado en Visual Modflow incorpora la condición de borde que impone el río Elqui, en el modelo que se implementa en el presente trabajo de título, en base al estudio de Cazalac -Rodhos, la recarga superficial es suministrada por la percolación en las zonas de riego y la percolación en canales. Esta recarga se implementa uniformemente en cada sector acuífero.

En la Figura 4-16 se indican las 5 zonas de recarga superficial, en donde se distingue que la recarga superficial ocupa toda el área activa del modelo, excepto las celdas ocupadas por las condiciones de borde (nivel constante y condición de río). Las superficies que abarcan estos sectores se indican en la Tabla 4-2.

Es importante hacer presente que en el estudio de Cazalac-Rodhos, el área considerada para el sector Serena Norte es mayor que el área utilizada para este sector en el modelo original implementado en Visual Modflow, representando esta última el 35% de la superficie del primer caso, el cual se extiende más al sur de la ciudad de La Serena. Por consiguiente, bajo el supuesto de que existe uniformidad en las condiciones de riego, las recargas superficiales obtenidas del estudio de Cazalac-Rodhos para este sector son reducidas al 35% al ser ingresadas al modelo implementado en Visual Modflow.

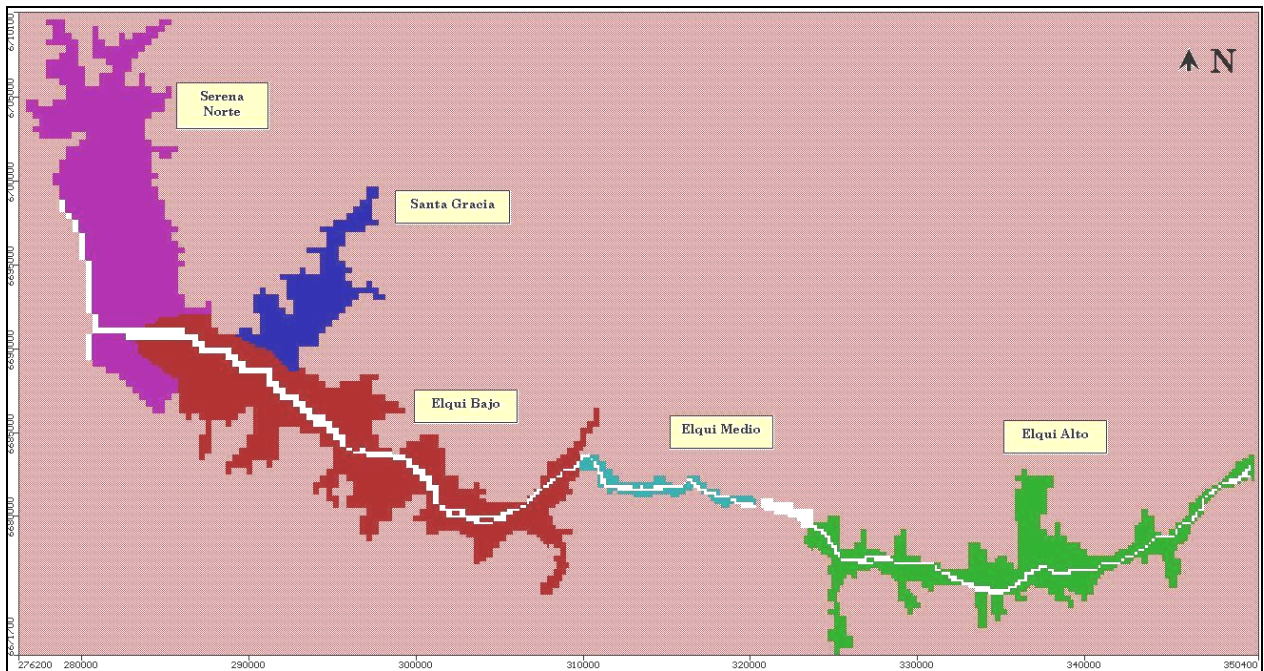


Figura 4-16 Zonas de distribución de recarga superficial.

Fuente: elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4-2

Superficies Recarga Superficial		
Sector	Celdas	Área [km ²]
Elqui Alto (en Calibración)*	1592	63,68
Elqui Alto (en Escenarios)*	1488	59,52
Elqui Medio	175	7
Elqui Bajo	2847	113,88
Santa Gracia	791	31,64
Serena Norte	2779	111,16

* Debido al cambio de área en el embalse Puclaro en las simulaciones

4.2.6.3 Extracción por Pozos de Bombeo

En el estudio de Cazalac-Rodhos (2006), las zonas de riego se alimentan con aguas superficiales desde canales, tranques nocturnos, embalses, y derrames desde otras zonas de riego (si corresponde), pero también se alimentan de lluvias, y finalmente desde pozos con aguas subterráneas cuando todo lo anterior no alcanza a cubrir las necesidades.

De los pozos de bombeo que se indican en la base de datos del estudio de referencia, sólo son incluidos en el presente modelo de simulación aquellos pozos que se ubican sobre el relleno (representado por celdas activas) y aquellos pozos que se encontraban fuera del área del modelo, pero a muy poca distancia de celdas activas, los cuales fueron desplazados y ubicados dentro del modelo.

En cuanto a la explotación de los acuíferos, los resultados del estudio de Cazalac-Rodhos muestran las tasas de extracción en conjunto por tipo de uso para cada sector acuífero, y no la extracción asociada a cada pozo en particular.

Dado lo anterior, la tasas de extracción que se imponen a cada pozo y en cada simulación considerada en el modelo implementado en Visual Modflow, según el sector acuífero y tipo de uso correspondiente, son proporcionales a su derecho asignado (caudal máximo), considerando como total la suma de todos los derechos asignados a los pozos indicados en la base de datos del estudio de Cazalac-Rodhos, para cada acuífero y tipo de uso correspondiente. Lo anterior queda representado de la siguiente forma:

$$q_{ac,t,p}^{a,m} = Qmagic_{ac,t}^{a,m} \cdot \frac{qd_{ac,t,p}}{\sum_p qd_{ac,t,p}} \quad (4.2)$$

donde,

- $q_{ac,t,p}^{a,m}$: caudal que extrae el pozo p , con tipo de uso t , del acuífero ac , en el año a y mes m .
Este es el caudal que se impone a un pozo de bombeo en el modelo de simulación que se implementa en Visual Modflow.
- $Qmagic_{ac,t}^{a,m}$: caudal que entrega el estudio de Cazalac-Rodhos, 2006, a través del modelo Magic, correspondiendo al caudal que se extrae para el tipo de uso t , en el acuífero ac , en el año a y mes m .
- $qd_{ac,t,p}$: derecho asignado como caudal máximo al pozo p , con tipo de uso t , en el acuífero ac .

Respecto a los tipos de uso, en la Tabla 4-3 se indican los factores de uso previsible utilizados en el estudio de Cazalac-Rodhos para los cuales es necesario mencionar algunas consideraciones, puesto que en este se trató de representar la operación del sistema lo más cercana posible a la realidad.

Respecto al factor de uso para el tipo de uso de riego, en el estudio de referencia no se aplica una reducción de los derechos asignados porque en general se trabaja con la opción de bombear sólo el déficit que persiste después de usar las aguas superficiales disponibles, lo cual fue implementado en el modelo MAGIC.

En cuanto al agua potable, tanto rural como urbana, la estadística utilizada en el estudio mencionado corresponde los caudales efectivamente utilizados, por lo cual el factor de uso es igual a 1.

Para el tipo de uso minero, en el estudio de Cazalac-Rodhos se menciona que no se pudo obtener datos de las propias empresas del sector, de modo que asumen un factor de uso en función de la cantidad de agua que requieren los procesos y la cantidad de producto que obtienen las empresas mineras. Este factor de uso calculado con un valor de 0,25 contrasta con el valor de 0,75 considerado por la DGA en sus estudios. No obstante, para efectos de este trabajo de título, esto no se considera relevante por cuanto, como se muestra más adelante (Tablas 4-4 y 4-5), los derechos comprometidos por este tipo de uso en la zona de estudio no es significativo.

Para el caso del uso industrial en el estudio de referencia no se obtuvo información acerca del factor real de uso, de modo que se consideró un factor de uso 0,25, cercano al 0,3 que considera la DGA.

Tabla 4-3 Factores de uso de derechos subterráneos.

Tipo de Uso	Factor de Uso
Riego	1
Potable	1
Minero	0,25
Industrial	0,25

Fuente: Cazalac-Rodhos, 2006.

En las Tablas 4-4 y 4-5 se indica la cantidad de pozos de bombeo considerados luego de la selección previamente descrita, y el total de derechos comprometidos por estos pozos por cada sector acuífero considerado, respectivamente.

Tabla 4-4 Cantidad de pozos de bombeo considerados en simulación

Sector Acuífero	Riego	Agua Potable	Minería	Industria	Total
Elqui Alto	30	3	-	-	33
Elqui Medio	1	1	-	-	2
Elqui Bajo	23	47	3	-	73
Santa Gracia	8	4	-	-	12
Serena Norte	6	1	1	1	9
Total	68	56	4	1	129

Tabla 4-5 Derechos comprometidos de los pozos considerados en simulación

Sector Acuífero	Riego [l/s]	Agua Potable [l/s]	Minería [l/s]	Industria [l/s]	Total [l/s]
Elqui Alto	1462,7	104	-	-	1566,7
Elqui Medio	16	10	-	-	26
Elqui Bajo	396,5	1064,9	102	-	1563,4
Santa Gracia	177	30	3	-	210
Serena Norte	28	87	45	75	235
Total	2080,2	1295,9	150	75	3601,1

En la Figura 4-17 se muestra la distribución de todos los pozos de extracción y los pozos de inyección ubicados en la cabecera del acuífero que representan la recarga subterránea.

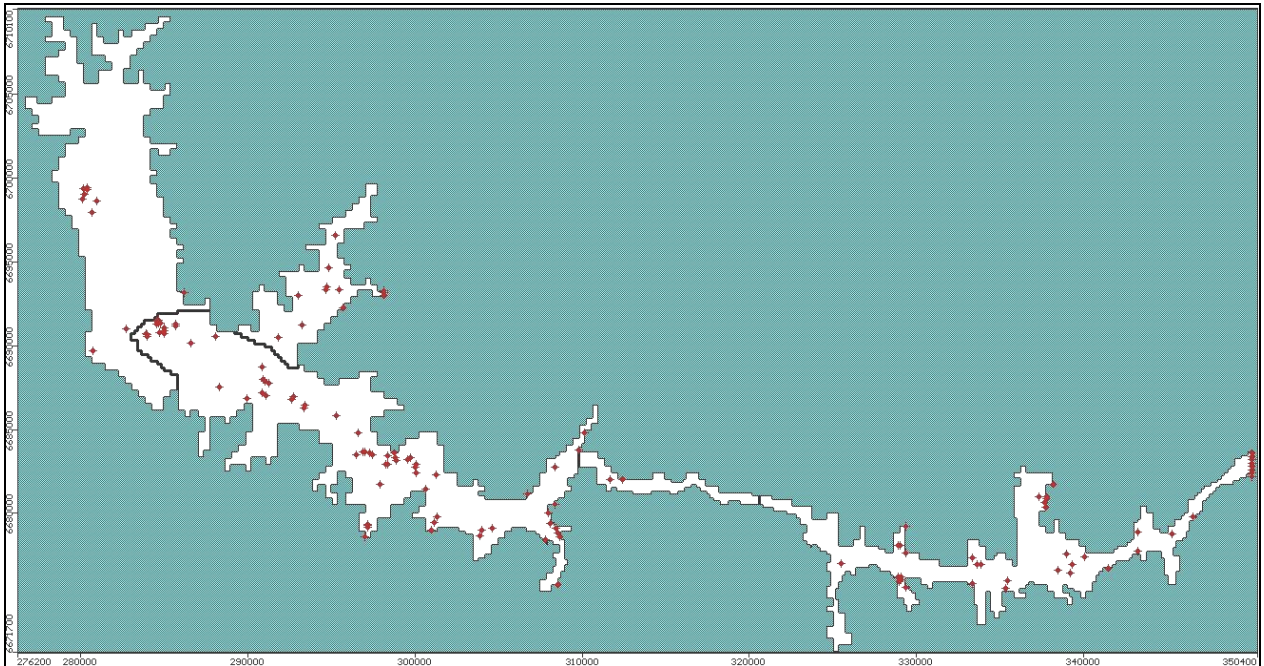


Figura 4-17 Distribución de pozos de bombeo ingresados al modelo de simulación.

Fuente: Visual Modflow

Como el modelo de simulación considera dos estratos o capas, los pozos de bombeo definidos sólo consideran criba en el estrato inferior, debido a la restricción que impone Visual Modflow en cuanto a utilizar el largo de la criba intersectado con cada estrato del modelo para determinar la proporción de la tasa de bombeo total asignada al pozo para determinar el caudal a extraer por cada celda como una condición de borde (WMI, 2006), lo cual es definido de la siguiente forma:

$$Q_i = \frac{L_i K_{x_i}}{\sum (LK_x)_i} Q_T \quad (4.3)$$

donde,

- Q_i : Caudal a extraer del estrato i en un pozo en particular, en un tiempo dado.
- Q_T : Caudal a extraer asignado al pozo
- L_i : Largo de la criba en el estrato i .
- K_x : Conductividad hidráulica en la dirección x en la celda.
- $\sum (LK_x)_i$: Representa la suma de los productos del largo de la criba y la conductividad hidráulica de todos los estratos penetrados por el pozo.

En definitiva se decide considerar cribas sólo en el estrato inferior para asegurar la extracción total del caudal impuesto en el caso de que la celda superior se encuentre seca.

4.3 Calibración del Modelo de Simulación

La calibración en régimen transiente consistió en ajustar las conductividades hidráulicas en distintas zonas del acuífero con el objeto de reproducir las cotas piezométricas a nivel mensual en los pozos de observación durante el periodo de Abril 1999 – Marzo 2004, teniendo 60 intervalos de tiempo en total. Las conductividades hidráulicas finales obtenidas de la calibración fueron expuestas en la sección 4.2.3.1.

Respecto a los coeficientes de almacenamiento, como se indicó en la sección 4.2.3.2, los valores del modelo original no fueron modificados, por considerar que los resultados obtenidos representaban de buena forma los niveles observados.

En cuanto a las recargas, descargas y condiciones de borde del modelo, estas se consideran como entradas al modelo de simulación.

4.3.1 Pozos de Observación

Los pozos de observación considerados en la calibración en régimen transiente en el periodo abril 1999 – marzo 2004, fueron extraídos de la base de datos incluida en el estudio de Cazalac – Rodhos, (2006), siendo seleccionados aquellos cuyas coordenadas Norte y Este pertenecían al dominio de la zona activa del modelo de simulación y aquellos pozos de observación fuera del modelo, pero que se encontraban en la cercanía de la frontera impermeable, los cuales fueron ingresados al modelo. Finalmente fueron 27 los pozos de observación considerados en la calibración, cuya distribución se muestra en la Figura 4-18.

Una mención especial es necesaria para la cota de referencia de cada pozo de observación considerado por cuanto esta fue fundamental al momento de analizar los resultados de la calibración, ya que los datos entregados en las bases de datos corresponden a la profundidad del nivel freático respecto a la superficie del terreno, mientras que el proceso de calibración en Visual Modflow se realiza considerando la cota piezométrica, respecto a la cual en este modelo se considera como *datum* el nivel del mar (nivel de referencia global del modelo).

En el estudio se consideraron preliminarmente tres opciones en la elección de la fuente de la cota de referencia para el conjunto de pozos de observación seleccionados: (1) según Cazalac, cota entregada en la base de datos del estudio Cazalac-Rodhos, 2006; (2) según Visual Modflow, cota que se obtiene de la superficie interpolada que representa el nivel del terreno en el modelo de simulación; y (3) según Google Earth, programa informático que permite visualizar imágenes satelitales en 3D del planeta, permitiendo obtener la cota de terreno en cualquier punto.

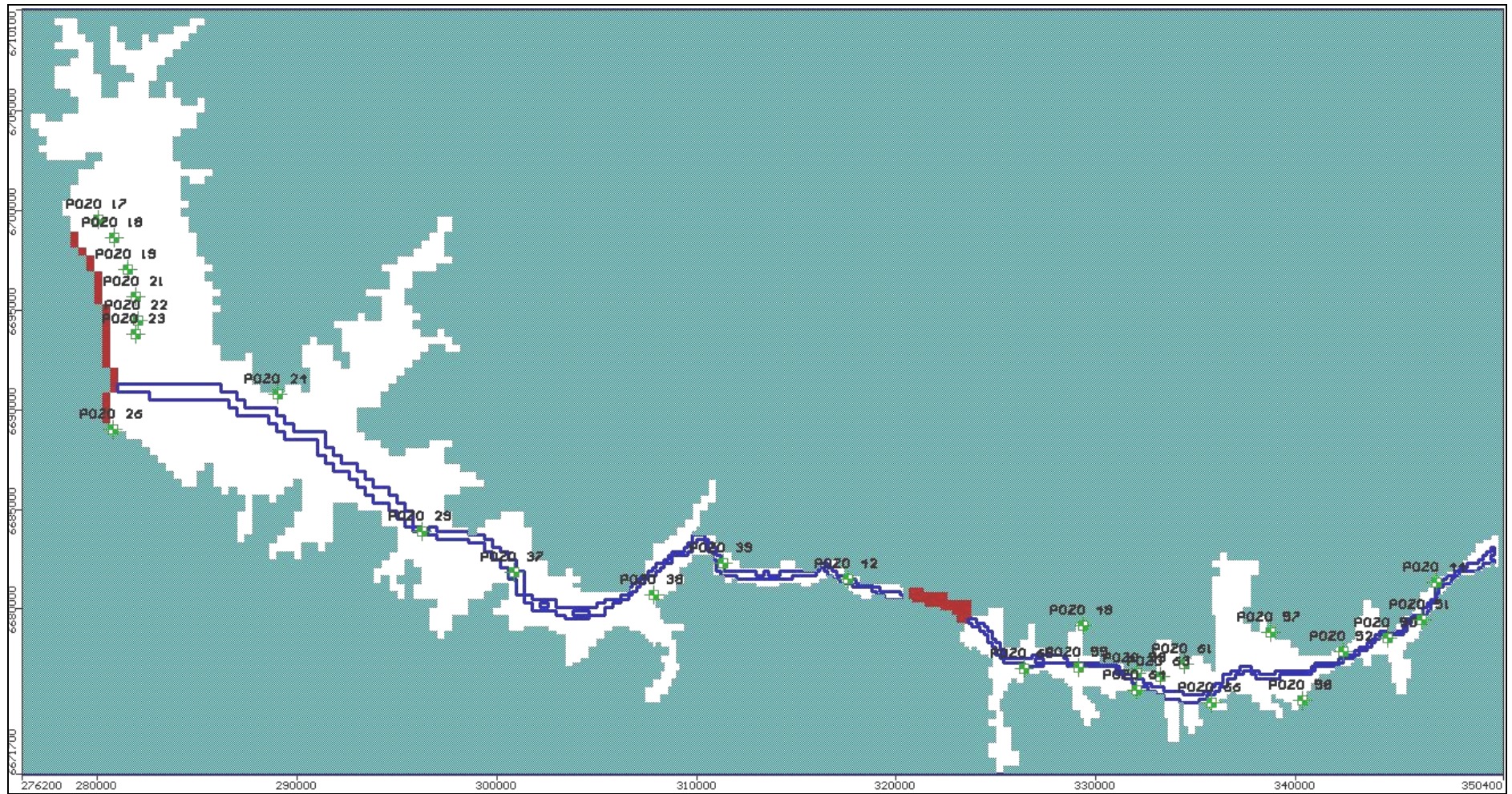


Figura 4-18 Distribución de pozos de observación considerados en calibración.

Fuente: Visual Modflow

En la Figura 4-20 se muestra el perfil de niveles piezométricos promedio en los 27 pozos de observación a lo largo del valle principal, incluyendo el sector de Serene Norte. De ella se puede inferir que la fuente más confiable en cuanto a coherencia en la cota de referencia de los pozos de observación y la geomorfología del lugar, y en consecuencia los niveles piezométricos observados, corresponde a la cota de terreno obtenida a través del programa Google Earth.

Las cotas de referencia de terreno que se entregan en la base de datos del estudio de Cazalac-Rodhos carecen de coherencia, lo que se puede explicar en la poca rigurosidad en la elección del método para determinar la altitud de referencia del pozo al momento de llevar a cabo el registro de este, y en consecuencia se decide descartar esta información.

En definitiva, los valores de los niveles observados en cada pozo se obtuvieron a través de cota de referencia del terreno que entrega el programa Google Earth. Estas cotas de referencia se incluyen en anexos.

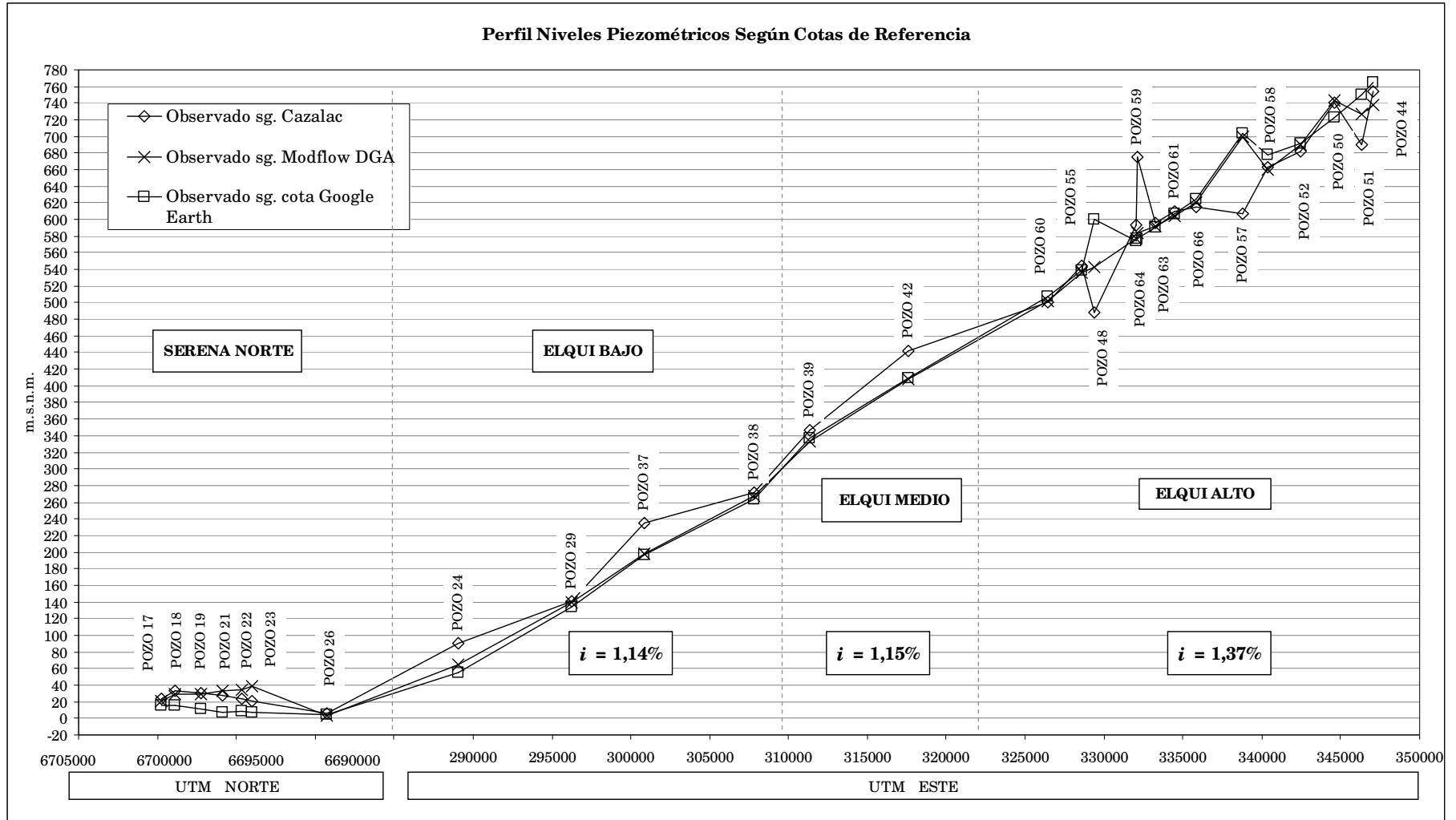
De la Figura 4-20, al considerar los niveles piezométricos promedio observados en los sectores de Elqui Bajo, Elqui Medio y Elqui Alto, se obtiene una estimación para el gradiente hidráulico regional de un valor de 1,22 %.

Los niveles piezométricos observados y calculados en los 27 pozos de observación en el periodo de calibración en régimen transiente, además de la comparación de los niveles obtenidos en otros pozos de observación considerados con respecto a los niveles obtenidos del estudio DGA (2003) en la calibración en régimen permanente se muestran en anexos.



Figura 4-19 Secuencia de pozos según como se indican en perfil de niveles piezométricos en Figura 4-20.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.



Nota: Los gradientes hidráulicos que se muestran consideran los niveles observados según cota de referencia de Google Earth, y en el caso del sector Elqui Alto se excluyen los pozos 48 y 57 por ubicarse en bordes del valle.

Figura 4-20 Perfil de niveles piezométricos en pozos de observación: calculados en calibración (promedio) y observados según cota de referencia .
Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Acciones Externas: Recarga y Extracción

En esta sección se muestran las series de tiempo de las acciones externas consideradas en el periodo de calibración, correspondientes a recarga subterránea, recarga superficial y extracciones por bombes nominales. Las series mencionadas, tanto para el acuífero global y los sectores de balance definidos, se muestran en la Figura 4-21 en una escala común.

Los valores promedio de estas acciones externas durante el periodo de calibración se muestran en la Figura 4-22 y Tabla 4-6.

En la Tabla 4-7 se muestra la participación que tienen la percolación desde canales de distribución y la percolación desde zonas de riego en la recarga superficial. De esta destaca que un 74 % de la recarga superficial global se debe a la percolación desde canales, siendo la principal fuente de recarga superficial en los sectores de balance, excepto en el sector Santa Gracia.

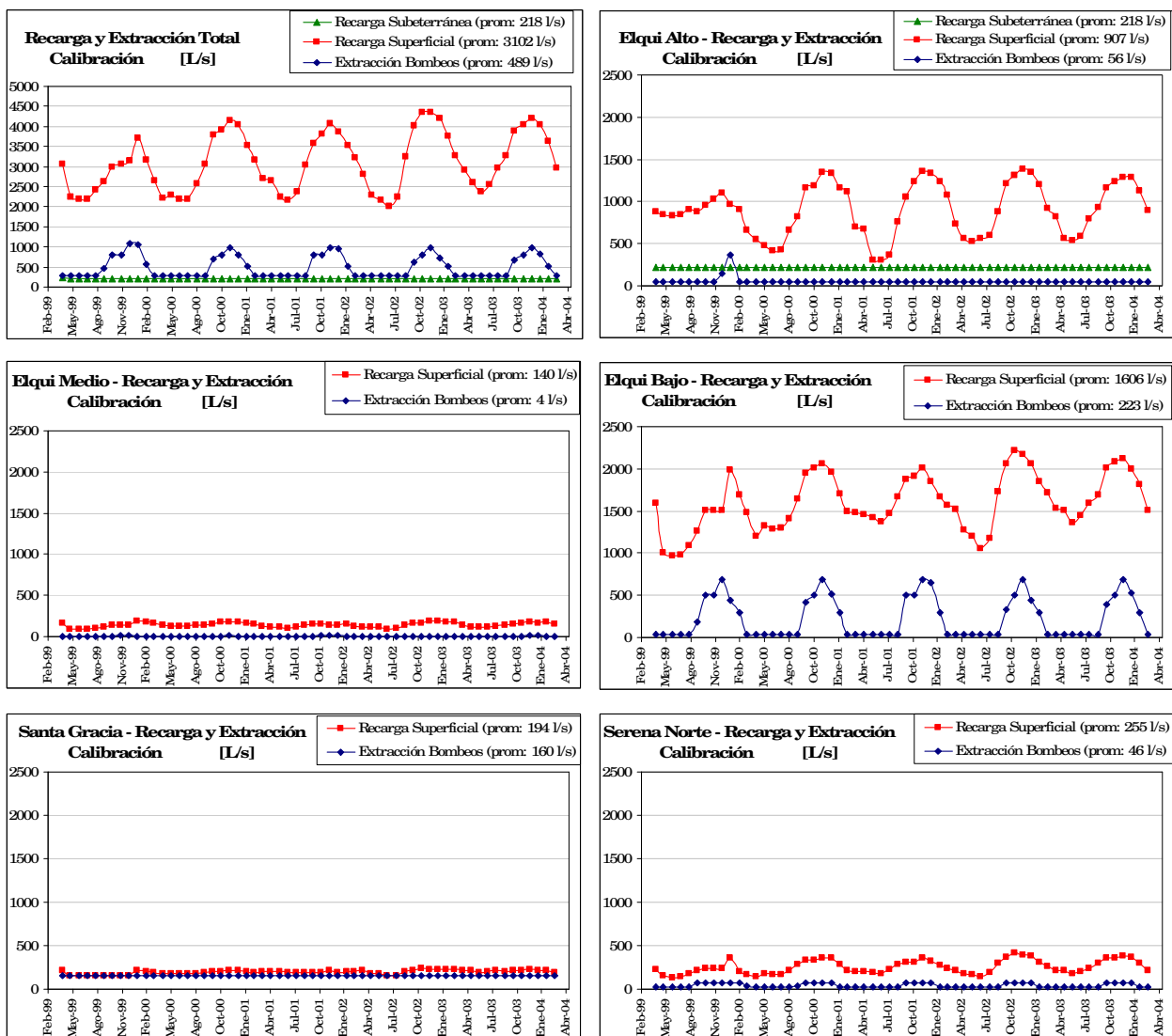


Figura 4-21 Serie de bombeos nominales, recarga subterránea y recarga superficial impuestas el modelo de simulación en su calibración para el acuífero total y sus sectores de balance.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Cazalac – Rodhos, 2006.

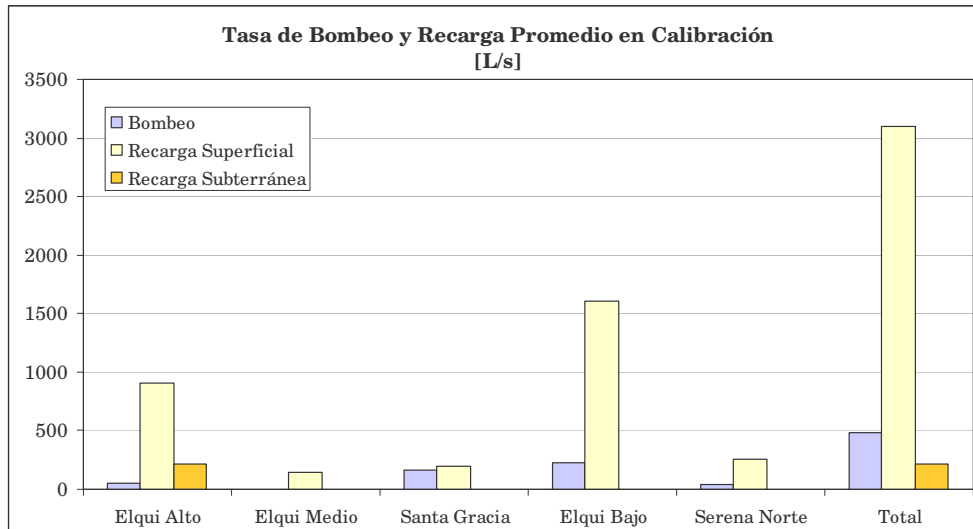


Figura 4-22 Acciones externas nominales en periodo de calibración

Tabla 4-6 Tasa de bombeo y recarga promedio nominal en periodo de calibración

Acción Externa	Elqui Alto [l/s]	Elqui Medio [l/s]	Santa Gracia [l/s]	Elqui Bajo [l/s]	Serena Norte [l/s]	Total [l/s]
Bombeo	56	4	160	223	46	489
Recarga Superficial	907	140	194	1613	255	3109
Recarga Subterránea	218	-	-	-	-	218

Tabla 4-7 Componentes de la recarga superficial en calibración.

Sector	Percolación Canales [l/s]	Percolación Zonas de Riego [l/s]	Percolación Total [l/s]
Elqui Alto	755 (83%)	152 (17%)	907 (100%)
Elqui Medio	110 (79%)	30 (21%)	140 (100%)
Elqui Bajo	1245 (77%)	368 (23%)	1613 (100%)
Santa Gracia	53 (27%)	141 (73%)	194 (100%)
Serena Norte	136 (54%)	118 (46%)	255 (100%)
Global	2299 (74%)	810 (26%)	3109 (100%)

Fuente: Cazalac-Rodhos, 2006.

4.3.3 Condición Inicial

Como condición inicial definitiva para la calibración en régimen transiente, se considero como tal la condición a la cual tiende el sistema, de manera de representar una condición de equilibrio y no condicionar o perturbar los estadísticos utilizados como criterio de calibración como consecuencia de la influencia de la condición inicial en los niveles calculados.

En este proceso iterativo inicialmente se considero como condición inicial la obtenida del estudio DGA (2003), la que fue obtenida de la calibración en régimen permanente y para una condición natural de la cuenca (sin embalse ni explotación).

Las equipotenciales correspondientes a la condición inicial se indican en el acápite 4.3.7, en donde se muestran las equipotenciales obtenidas para el último intervalo de simulación de la calibración.

4.3.4 Esquema de Solución o *Solver* Seleccionado y Opciones de Ejecución

§ Esquema de solución de ecuaciones

El esquema o método de solución de las ecuaciones seleccionado correspondió al *solver* SAMG (*Algebraic Multigrid Methods for Systems Solver*), cuyos parámetros utilizados se indican en la Figura 4-23. En este esquema se impuso un error en el balance hídrico de 0,1 % y 0,5% como criterio de cierre para las iteraciones en la calibración y la simulación de escenarios de operación, respectivamente.

Max. iterations (M×ITER) 500
 Max. cycles (M×CYC) 250
 Budget closure criterion (B×CLOSE) 0.1
 Damping factor (DAMP) -2
 Max. damping factor (DUP) 2
 Min. damping factor (DLOW) 0.2

Perform conjugate gradient iterations (ICG = 1)

Print flag (IOUTAMG)
 No printing from the solver to the LIST file (IOUTAMG=0)
 Print scaling for residuals and residuals before and after cycling (IOUTAMG=1)
 Option 1 plus computer storage used and computational times (IOUTAMG=2)
 Option 2 plus solver messages (IOUTAMG=3)

Algebraic Multigrid Methods for Systems Solver (SAMG)

Figura 4-23 Parámetros del *solver* SAMG utilizados en calibración.
 Fuente: Visual Modflow 4.2

§ Tipo de estrato o capa

El tipo de cada uno de los dos estratos definidos en el modelo de simulación no fue modificado del modelo original. Según como muestra la Figura 4-24, el estrato superior (*Layer 1*) funciona como un acuífero no confinado o libre, y el estrato inferior (*Layer 2*) es definido como un acuífero Confinado / No confinado, el cual funciona como confinado mientras la celda superior no se encuentre seca, y funcionando como acuífero libre si la celda superior se encuentra seca.

Layer Settings				
To assign multiple layers select appropriate rows by <Ctrl> or <Shift> click on row indicator bar				
Layer	LAYCON	Interblock transmissivity		Layer type
1	01	00:Harmonic mean		1:Unconfined
2	03	00:Harmonic mean		3:Confined/Unconfined, variable S, T

Figura 4-24 Definición del tipo de estrato o capa.

Fuente: Visual Modflow 4.2

§ Humedecimiento de celdas secas

En vista de que en el modelo de simulación se considera una recarga variable y una extracción por bombeo variable, y la condición (o limitación) de que MODFLOW no permita re-humedecer o no permita que el agua vuelva a ingresar a una celda luego de que esta se haya secado en un período de la simulación anterior, se utilizó la opción de re-humedecimiento (*re-wetting settings*) que incorpora Visual Modflow 4.2 en los escenarios que fue posible la convergencia con esta opción.

Una celda activa del modelo se convierte en una celda seca una vez que la carga hidráulica de esta se encuentra bajo su cota de fondo, y como consecuencia, esta se transforma en una celda inactiva.

Frente a la ausencia de la opción de re-humedecimiento, luego de uno o más periodos en que el bombeo aumenta logrando como consecuencia el secado de alguna(s) celda(s), ya sea debido a su baja capacidad de conducción y almacenamiento, o a su desfavorable ubicación en el acuífero; una vez recuperadas las condiciones de recarga y bombeo normales nominales, el modelo no permite que los pozos ubicados en celdas secas extraigan su demanda, y en consecuencia impide cuantificar una recuperación del volumen almacenado más realista en condiciones de uso u operación normales.

Los parámetros seleccionados en la opción de re-humedecimiento, o humedecimiento de celdas secas, se indican en la Figura 4-25. Si bien es cierto que esta opción de re-humedecimiento representa un avance por cuanto mejora la representación del nivel freático en el acuífero, esto también genera una solución mucho más inestable en algunas situaciones, impidiendo la convergencia de la solución, en cuyo caso no fue posible activar esta opción.

The image shows a dialog box titled "Dry Cell Wetting Options" with the following settings:

- Cell wetting options:**
 - Activate cell wetting (IWDFLG)
 - Wetting threshold: 0.1
 - Wetting interval (IWETIT): 4 iterations
- Wetting method:**
 - From below (WETDRY < 0)
 - From sides and below (WETDRY > 0)
- Wetting head:**
 - Calculated from neighbours (IHDWET = 0)
 - Calculated from threshold (IHDWET > 0)
 - Wetting factor (WETFCT): 1
- Head value in dry cells:**
 - 1e30
 - Cell bottom
- Keep minimum saturated thickness for the bottom layer:
 - 1 [m]

Figura 4-25 Parámetros utilizados en opción "re-humedecimiento de celdas" durante la calibración.
Fuente: Visual Modflow 4.2

4.3.5 Resultados de la Calibración

4.3.5.1 Niveles Observados y Calculados

Como se indicó anteriormente, los parámetros modificados en el proceso de calibración sólo correspondieron a las conductividades hidráulicas presentes en el modelo, las que producto de ligeros cambios en el modelo original, dio como resultado la distribución indicada en la sección 4.2.3.1.

Para dar término al proceso de calibración se consideró un criterio cuantitativo que contempló la comparación de los comportamientos de los niveles observados y calculados, y el cálculo de residuales (diferencia entre el nivel calculado y observado) en los pozos de observación.

De lo anterior, considerando los 27 pozos de observación indicados en la sección 4.3.1, se obtuvieron los estadísticos indicados en la Tabla 4-8, cuyas respectivas definiciones se muestran en anexos.

De los 851 datos de niveles piezométricos observados que comprende el conjunto de los 27 pozos, de la Tabla 4-8 se destaca el *Error Promedio* de -2,26 m, lo cual indica una ligera subestimación general de los niveles observados, y el estadístico *RMS Normalizado* con un valor de 0,9%, el cual incorpora en su definición la magnitud del rango de variación de los niveles observados que se presentan en el modelo regional, cuyo valor obtenido se considera satisfactorio para los objetivos del trabajo de título.

En la Figura 4-26 se muestra la interfaz entregada por Visual Modflow que indica la bondad de ajuste de los valores calculados.

Tabla 4-8 Estadísticos resultantes de la calibración, considerando los 27 pozos de observación

Estimador	Valor
Número de Datos	851
Error Promedio (m)	-2,264
Error Absoluto Promedio (m)	4,005
Error Estándar de Estimación (m)	0,226
RMS (m)	6,960
RMS Normalizado (%)	0,906
Coefficiente de Correlación	0,9998

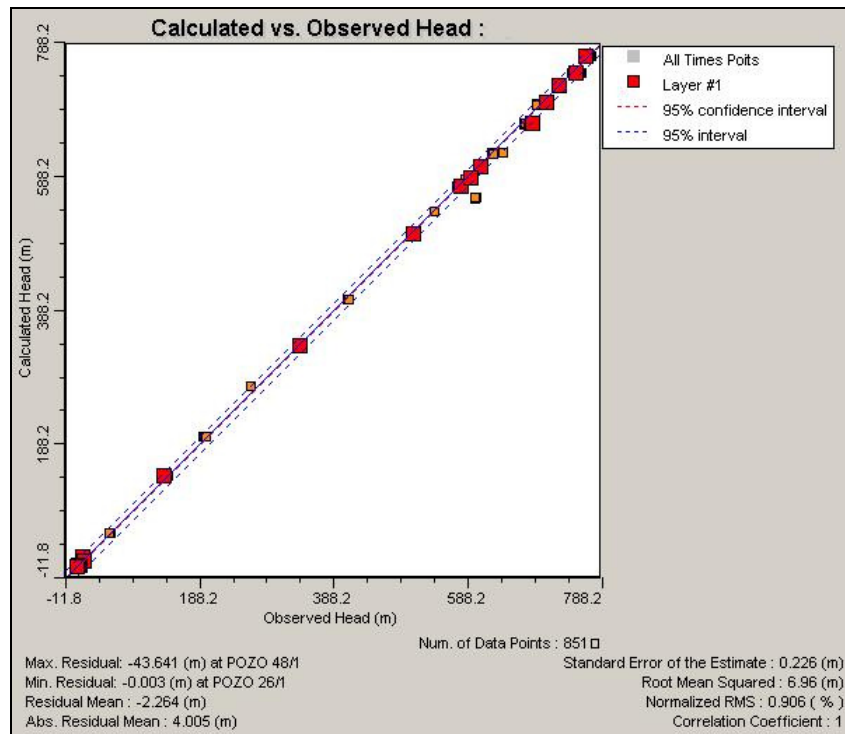


Figura 4-26 Correlación niveles calculados y observados (régimen transiente).
 Fuente: Visual Modflow.

A modo de ejemplo en la Figura 4-27 se muestran los niveles observados y simulados en los pozos 50 (Elqui Alto), 39 (Elqui Medio), 37 (Elqui Bajo) y 22 (Serena Norte), los cuales se consideran representativos de sus respectivas zonas. Se puede observar el buen ajuste entre estos. Los niveles observados y simulados en los 27 pozos de observación se muestran en el Anexo A.

En la Figura 4-28 se muestra un perfil de los niveles piezométricos observados y calibrados promedio a través del Valle, confirmándose una buena representación regional del sistema.

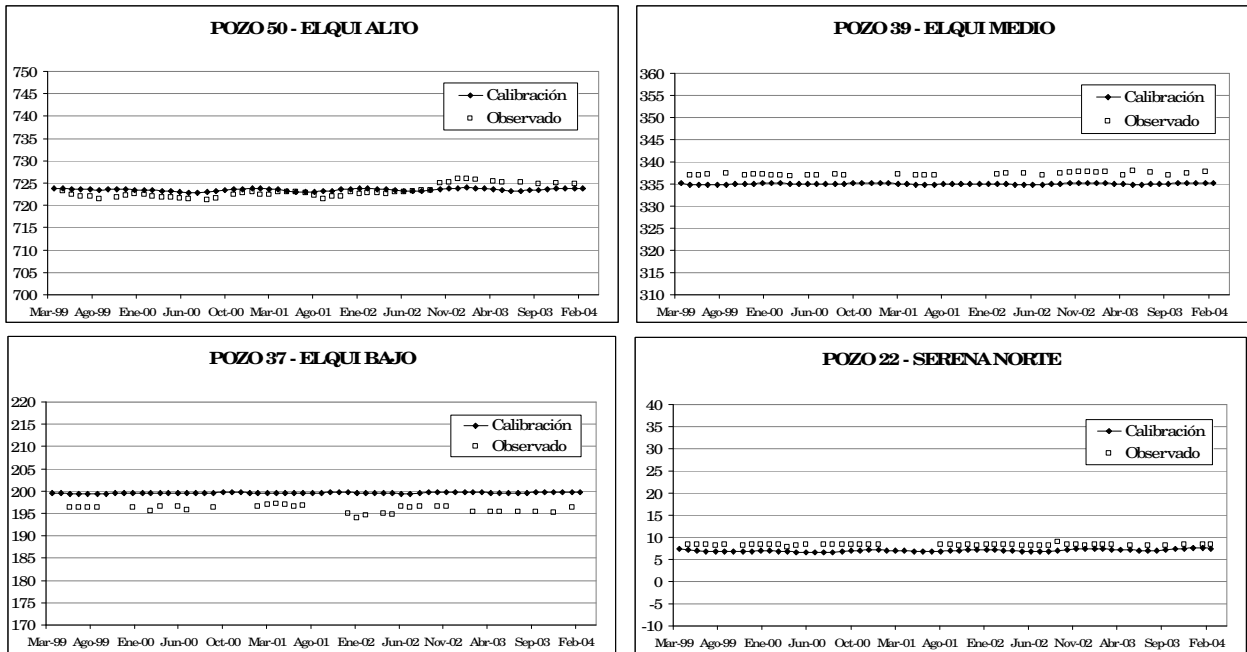


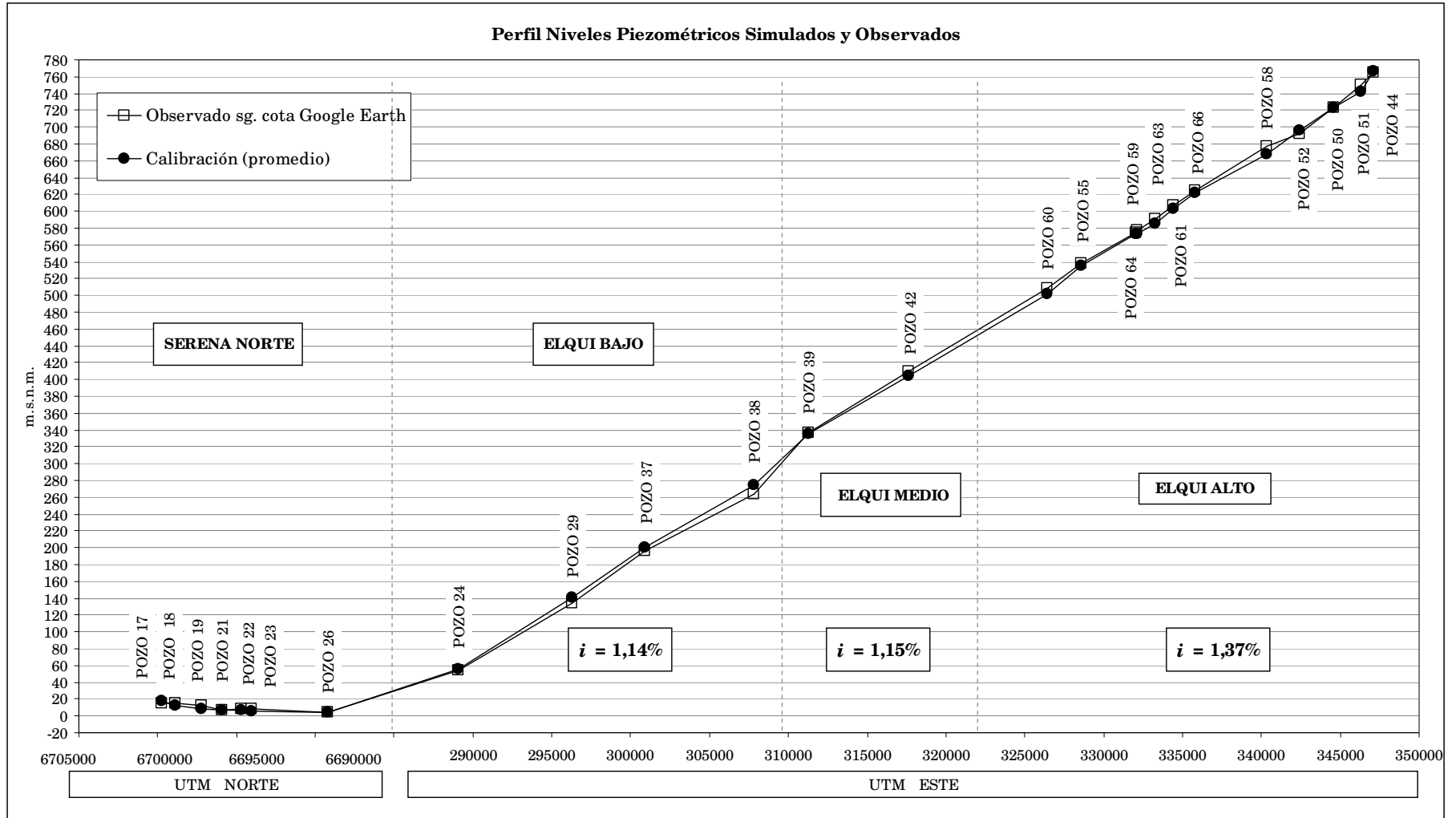
Figura 4-27 Niveles observados y simulados en 4 pozos representativos del modelo

No obstante considerar satisfactorio el ajuste obtenido, es importante mencionar que dentro de los pozos de observación se encuentran pozos ubicados en quebradas, cuyo basamento rocoso y propiedades hidrogeológicas no se encuentran bien representadas, y corresponden a zonas de escaso interés para el presente estudio. En vista de esto, se consideró eliminar del conjunto de pozos de observación los pozos: POZO 48, POZO 57 y POZO 58, de los cuales en el primero se presentaba el mayor error, de aproximadamente -43 m como promedio.

Los estadísticos obtenidos luego de la eliminación de los pozos mencionados se muestran en la Tabla 4-9, destacando el significativo cambio y mejoría del *Error Promedio* (-1,19 m) y el *RMS Normalizado* (0,5%).

Tabla 4-9 Estadísticos resultantes de la calibración, no considerando los pozos 48,57 y 58 (24 pozos en total).

Estimador	Valor
Número de Datos	784
Error Promedio (m)	-1,193
Error Absoluto Promedio (m)	3,082
Error Estándar de Estimación (m)	0,132
RMS (m)	3,894
RMS Normalizado (%)	0,507
Coefficiente de Correlación	0,9999



Nota: Los gradientes hidráulicos que se muestran consideran los niveles observados promedio.

Figura 4-28

4.3.5.2 Balance Hídrico

En la Tabla 4-10 se muestra un resumen del balance hídrico subterráneo global del acuífero durante la calibración en régimen transiente, donde se especifican las componentes correspondientes a condiciones de borde y acciones externas y la ganancia o pérdida de almacenamiento del acuífero. El error o discrepancia promedio del balance hídrico es prácticamente nulo (-0,05%), por lo que se considera que el modelo es consistente en cuanto a los flujos que ingresan y salen del acuífero. Su evolución durante el periodo de calibración se muestra en la Figura 4-29.

En la Tabla 4-11 se muestra el balance hídrico subterráneo promedio en cada sector de balance definido en el acápite 4.2.5.

Tabla 4-10 Balance hídrico subterráneo global promedio en calibración

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	754	588
Pozos Bombeo	-	489
Río Elqui	551	3594
Recarga Superficial	3048	-
Recarga Subterránea	218	-
Total	4571	4670
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-97
Modalidad	Error del Balance	
Entradas - Salidas [l/s]		-2
Porcentaje [%]		-0,05

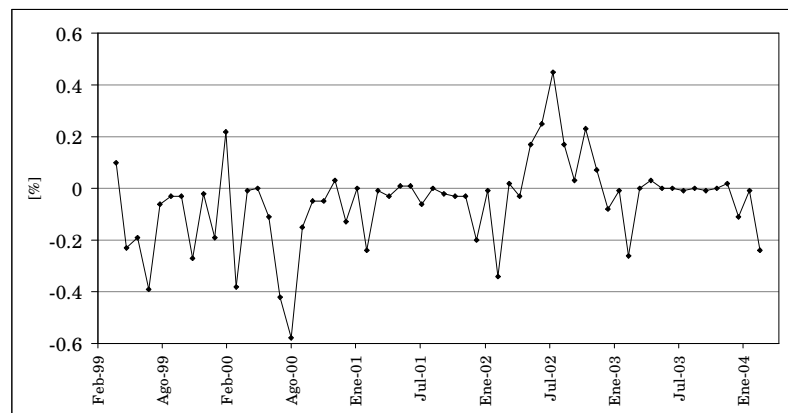


Figura 4-29 Evolución del error o discrepancia porcentual del balance hídrico

Tabla 4-11 Balance hídrico subterráneo promedio en zonas de balance durante la calibración

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	ENTRADAS [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	754	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	275	77	-	195	4
Recarga Subterránea	218	-	-	-	-
Recarga Superficial	868	140	194	1591	255
Subterránea desde Elqui Alto	-	362	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	42	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	41	-	185
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	136	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	40	-
Total	2115	578	235	2003	443
Componentes	SALIDAS [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	279	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	309
Pozo Bombeo	56	4	159	223	46
Río Elqui	1442	534	-	1570	48
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	362	42	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	136	-	40
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	41	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	185	-
Total	2138	579	295	2019	443
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-24	0	-60	-14	0
Modalidad	ERROR DEL BALANCE				
Entrada – Salida [l/s]	1	-1	0	-2	0
Porcentaje (promedio) [%]	0,01	-0,13	-0,09	-0,10	0,01

4.3.6 Aceptación de Recarga Superficial y Extracción por Bombeo

En la Tabla 4-12 se muestra el grado de aceptación de las acciones externas impuestas al modelo de simulación, cuyos valores se indican en el acápite 4.3.2. La recarga superficial se ve ligeramente disminuida producto del secado de celdas en el estrato superior, mientras que la extracción por pozos de bombeo sólo en el sector de Santa Gracia es levemente menor, pese a que no secase ninguna celda en el estrato inferior.

Tabla 4-12 Aceptación de las acciones externas

Acción Externa	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Global
Recarga Superficial [%]	95,73	100,00	100,00	98,60	100,11	98,05
Diferencia promedio [l/s]	-38,74	0,00	0,00	-22,59	0,28	-61,05
Pozos Bombeo [%]	100,00	100,00	99,91	100,00	100,00	99,96
Diferencia promedio [l/s]	0,00	0,00	-0,14	0,00	0,00	-0,14

4.3.7 Equipotenciales

En las Figuras 4-30 y 4-31 se muestran las equipotenciales para el estrato superior e inferior, respectivamente, para el último intervalo de simulación. Se observa que en las zonas de menor permeabilidad los gradientes hidráulicos son mayores, como consecuencia de la mayor pérdida de energía en aquellas zonas, por ejemplo, en cercanías a laderas de los cerros. En estas figuras, las celdas representadas en color verde olivo corresponden a celdas secas. Se observa que en el estrato inferior sólo existen dos pequeñas zonas en las que no existe flujo, correspondientes al término de quebradas.

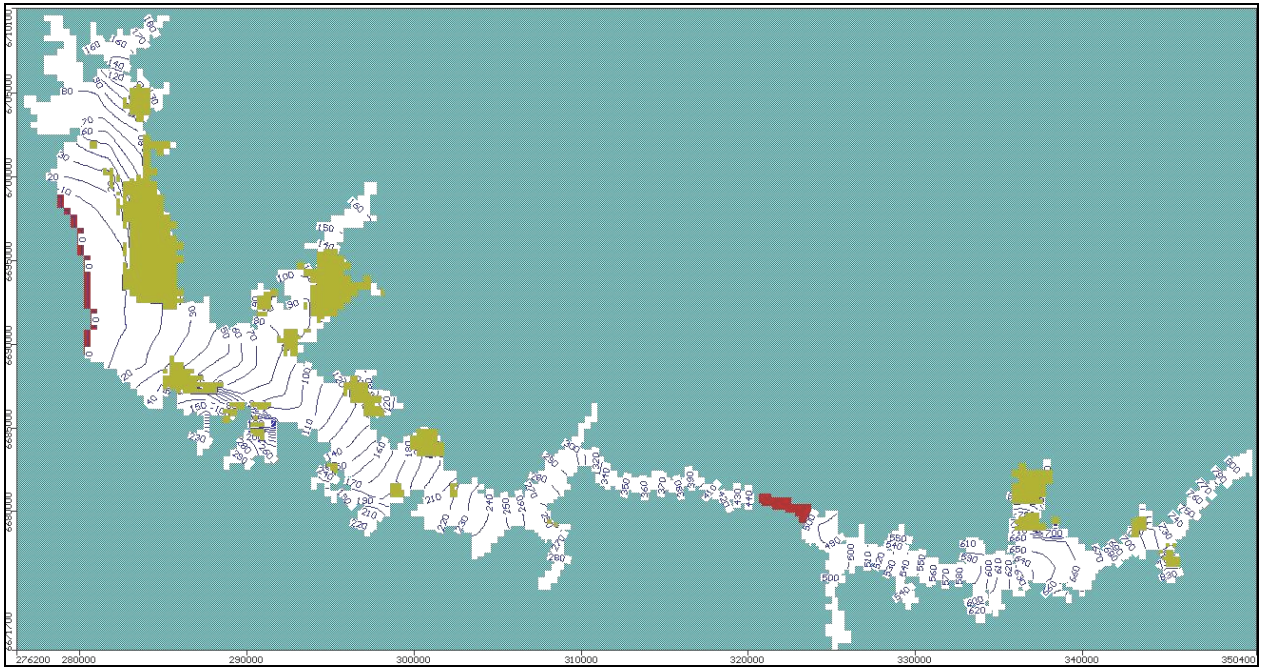


Figura 4-30 Distribución espacial de equipotenciales en estrato superior (periodo 60 de calibración)

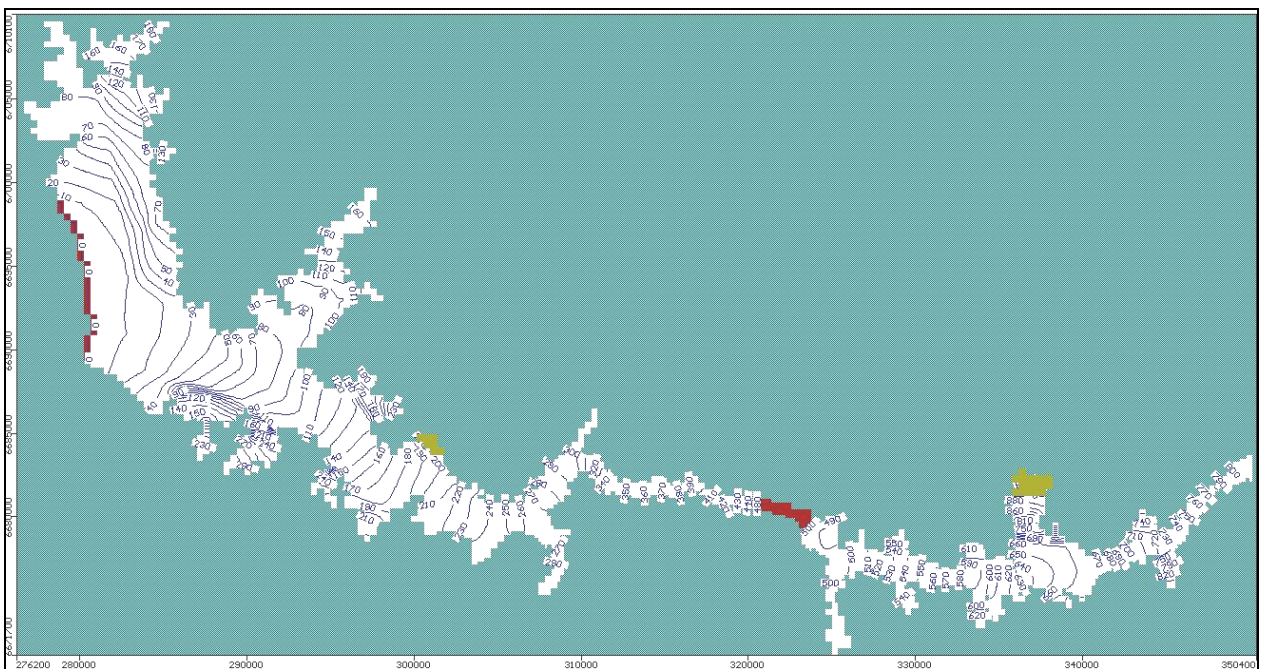


Figura 4-31 Distribución espacial de equipotenciales en estrato inferior (periodo 60 de calibración)

4.3.8 Flujos

La dirección principal del flujo es de Este a Oeste, siendo coherente con las líneas equipotenciales indicadas en el acápite anterior. En las Figuras 4-32 y 4-33 se muestra la dirección del flujo en el estrato superior e inferior en el último intervalo de simulación, respectivamente.

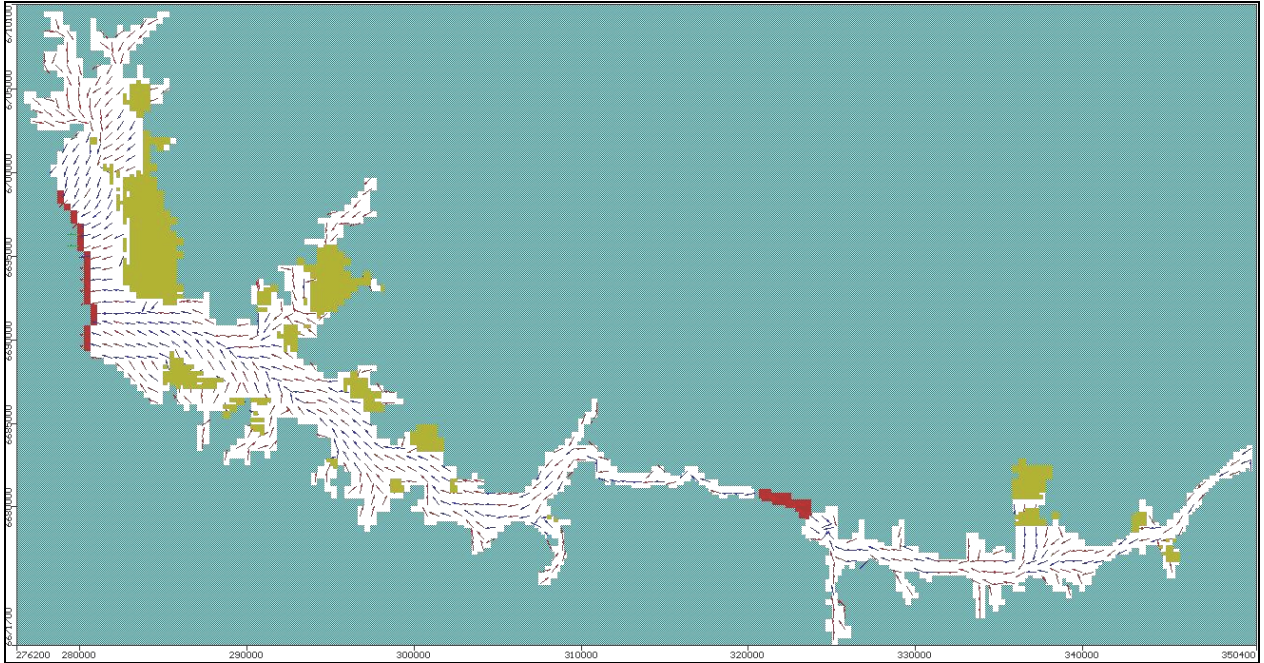


Figura 4-32 Dirección del flujo subterráneo en estrato superior (periodo 60 de calibración)



Figura 4-33 Dirección del flujo subterráneo en estrato inferior (periodo 60 de calibración)

En las Figuras 4-34 y 4-35 se muestra la magnitud del flujo en el acuífero para el estrato superior e inferior en el último intervalo de simulación, respectivamente. Como es de esperar, las velocidades son mayores a lo largo del valle, disminuyendo gradualmente en la cercanía de la costa. En el estrato inferior se observan magnitudes del flujo significativas que tienen su origen en la influencia de los pozos de bombeo que se encuentran en operación en ese intervalo de simulación, como es caso del sector de Santa Gracia, y la influencia del embalse a través del flujo pasante bajo el muro, el cual en el último intervalo de simulación se encuentra cercano a su cota máxima.

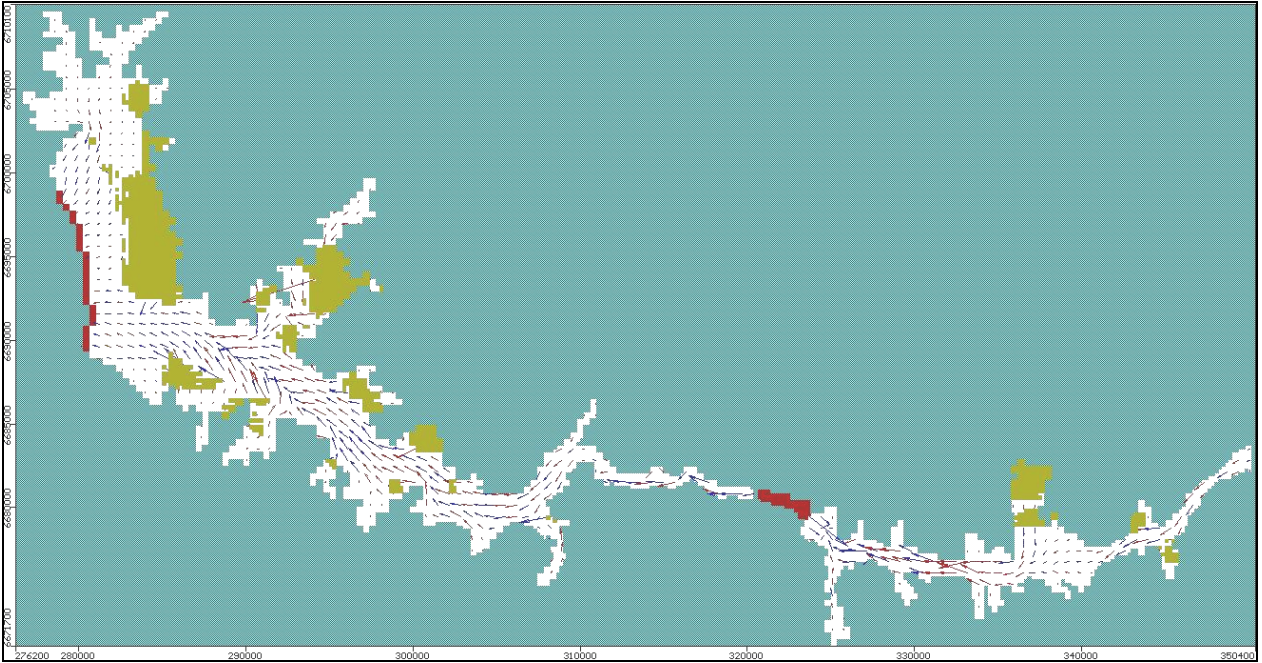


Figura 4-34 Magnitud del flujo subterráneo en estrato superior (periodo 60 de calibración)

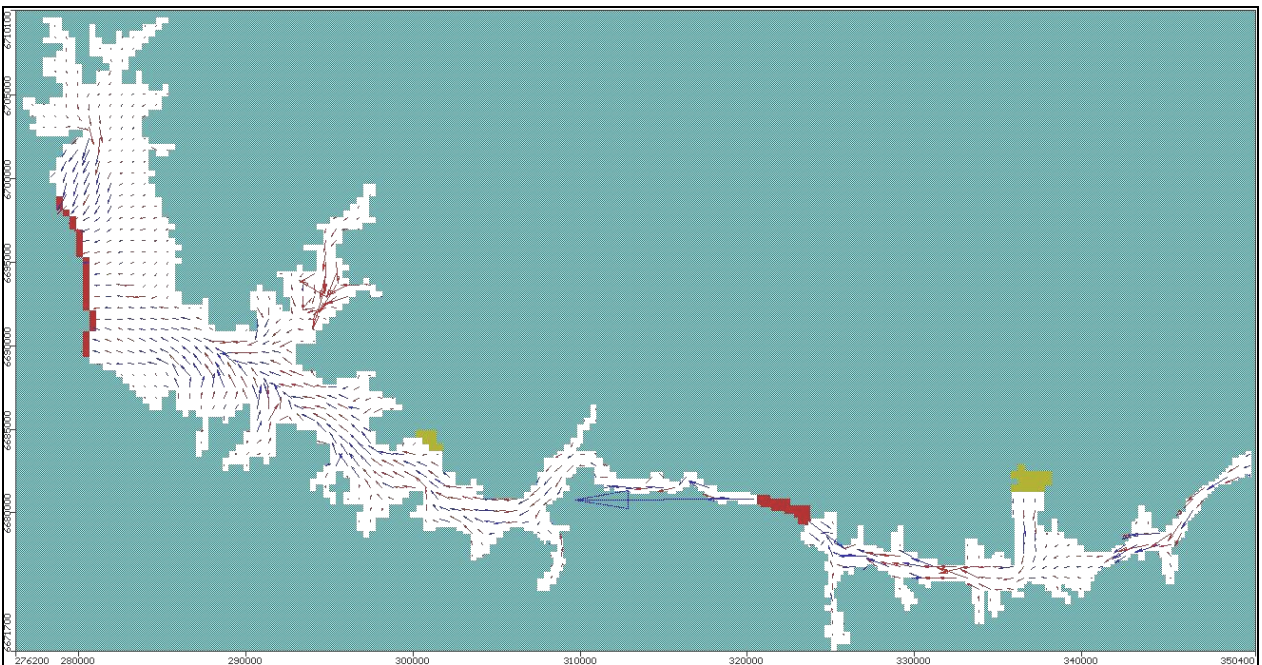


Figura 4-35 Magnitud del flujo subterráneo en estrato inferior (periodo 60 de calibración)

Dada la irregularidad de los sectores de balance en la parte baja del acuífero, específicamente la frontera que presenta Elqui Bajo con Serene Norte y Santa Gracia, definidos en el acápite 4.2.5 y motivada por la definición de las zonas de riego en el estudio de referencia (Cazalac, 2006), resulta de interés conocer el flujo subterráneo pasante a través de las 4 secciones de paso definidas en la Figura 4-36, las cuales se caracterizan por ubicarse en zonas de angostamiento en donde las líneas de flujo se encuentran alineadas.

En la Tabla 4-13 se indican los valores del flujo subterráneo promedio en las 4 secciones de paso definidas. La evolución de estos flujos se muestra en la Figura 4-37, donde destaca el comportamiento del flujo pasante en la sección SP1 (ubicada bajo el muro del embalse Puclaro), el cual está influenciado directamente por el proceso de llenado del embalse Puclaro durante el periodo de calibración, dando cuenta además de la importancia de esta condición de borde en el sistema. El flujo pasante por la sección SP3 presenta una ligera tasa de disminución, mientras que las secciones SP2 y SP4 mantienen un comportamiento estacionario.

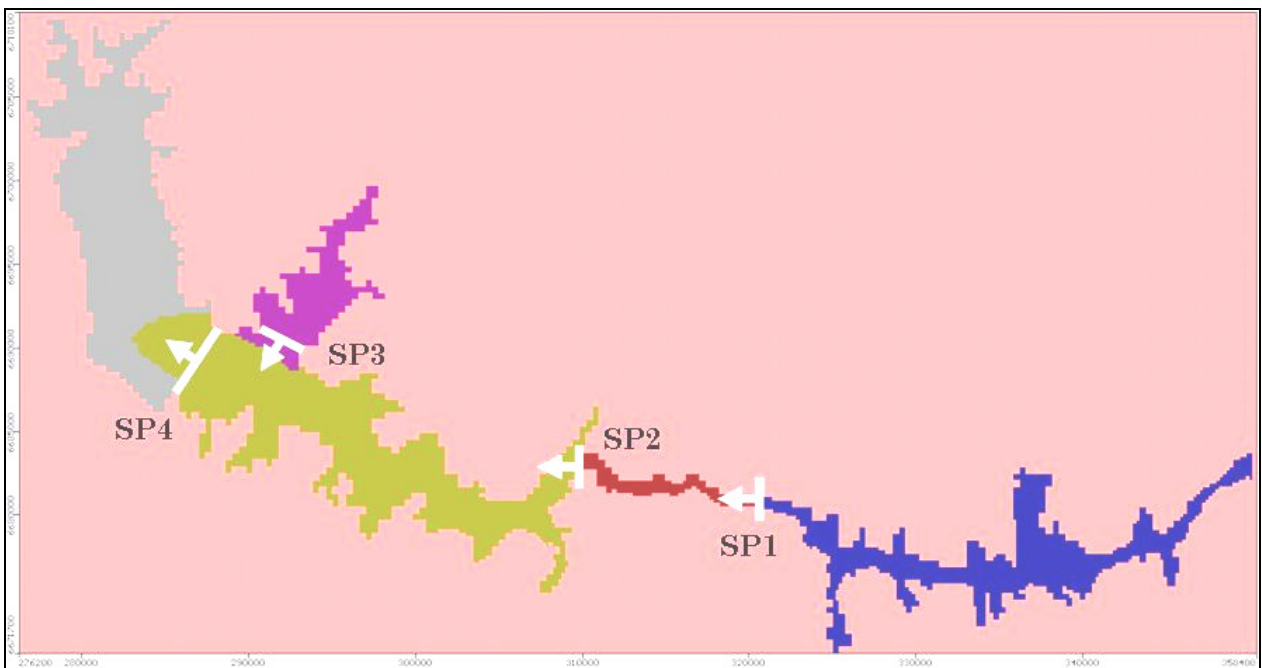


Figura 4-36 Definición de secciones de paso del flujo subterráneo.

Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow

Tabla 4-13 Flujo subterráneo promedio en secciones de paso

Sección de Paso	Promedio [l/s]
SP1	362
SP2	42
SP3	73
SP4	270

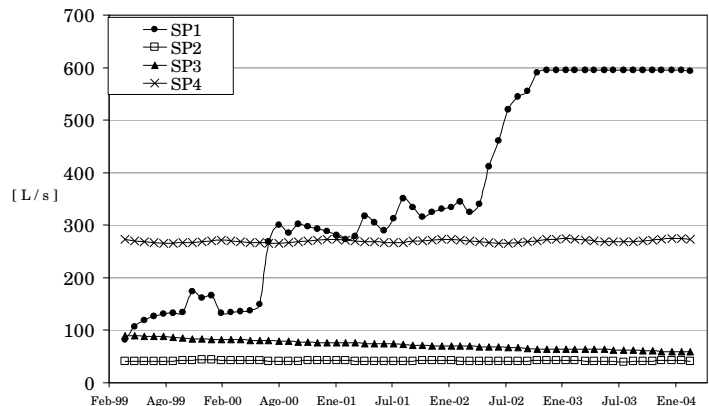


Figura 4-37 Evolución del flujo subterráneo en secciones de paso

5 OPERACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se describen una serie de escenarios de operación que permiten analizar la respuesta del acuífero conforme a los objetivos del trabajo de título. Estos escenarios, que modifican la operación del sistema, tienen como consecuencia cambios directos en la explotación de los acuíferos y en la recarga superficial de estos, por concepto de percolación en canales y percolación en las zonas de riego.

Un aspecto relevante de estos escenarios de operación corresponde al periodo de análisis, el cual se extiende a 15 años, entre abril de 1989 y marzo de 2004, y comprende la sequía hidrológica entre los años 1993 y 1997, permitiendo evaluar la respuesta del embalse subterráneo ante el aumento en las tasas de bombeo debido a la escasez de aguas superficiales para suplir las demandas.

En una primera etapa se consideran cinco escenarios de explotación definidos en el estudio de Cazalac-Rodhos, 2006, en donde se probaron diversas acciones sobre el sistema, para analizar sus efectos y viabilidad técnica, y someter las acciones viables a una evaluación económica.

Los cambios que involucran los escenarios seleccionados tienen relación con los siguientes aspectos:

- Entrega según demandas en lugar de desmarques
- Liberación de los acuíferos, permitiendo una explotación que es mayor que la que permiten los derechos actuales
- Tecnificación del riego
- Entubamiento de canales
- Aumento de áreas de riego

Como segunda etapa, a partir de los escenarios seleccionados del estudio mencionado, en el presente trabajo se exponen cinco escenarios teóricos, los cuales se caracterizan por poseer tasas de explotación de aguas subterráneas más intensas.

5.1 Definición de Escenarios Seleccionados

5.1.1 Escenarios extraídos del estudio Cazalac-Rodhos (2006)

§ Escenario Base 1

Es el escenario que muestra el comportamiento del sistema con una operación cercana a la que actúa en la actualidad, y en consecuencia, permite tener una referencia al momento de comparar con los otros escenarios.

Las características de este escenario son las siguientes:

- En las bocatomas de los canales solamente se solicitan las demandas y no se opera por desmarques, como actualmente ocurre.
- Las restricciones a la explotación de los acuíferos se mantienen, pudiendo sólo ser explotados a través de los derechos existentes.
- Se mantienen las condiciones actuales de tecnificación de riego.
- Se mantienen las condiciones actuales de ineficiencia en conducción.

§ **Escenario Operación 2**

Este escenario de operación trabaja sobre el escenario Base 1, liberando el uso de los acuíferos, dándoles una capacidad límite de extracción de 10 m³/s a cada uno, salvo el acuífero de Santa Gracia, el cual se mantiene la restricción de los derechos actuales.

§ **Escenario Operación 3**

Opera sobre el escenario Base 1, ampliando las áreas de riego en 47% en total, como se muestra en la Tabla 5-1. Los tipos de cultivo que comprende las nuevas áreas corresponden a un 50% de paltos y 50% de cítricos, con riego por goteo. Los sectores Santa Gracia y Serena Norte no poseen aumentos en sus áreas, el primero por presentar problemas de abastecimiento en las condiciones actuales de área, y el segundo, debido a la expansión urbana.

Tabla 5-1 Cambios en las áreas de cultivo en escenario de operación 3 hasta 7.2.

Zona de Riego	Área total de riego Base 1 [ha]	Porcentaje de aumento [%]	Aumento de área [ha]	Área Total Operación 3 a 7.2 [ha]
Elqui Alto	2949	70	2064	5013
Elqui Medio	292	60	175	467
Elqui Bajo	6015	70	4211	10226
Santa Gracia	1352	0	0	1352
Serena Norte	3035	0	0	3035
Total	13643	47	6450	20093

Fuente: Modificado de Cazalac-Rodhos, 2006.

§ **Escenario Operación 4.1**

Este escenario opera sobre la Operación 3, asumiendo que se liberan los acuíferos, salvo el acuífero de Santa Gracia, que queda con su capacidad original de derechos constituidos para riego (203 l/s).

§ **Escenario Operación 7.2**

Las características de este escenario son las que se señalan a continuación:

- Se opera el sistema considerando el aumento en las áreas de riego definidas en la Operación 3.
- Entubamiento de canales bajo el embalse Puclaro.
- Tecnificación de riego en sectores de Elqui Medio, Elqui Bajo y Serena Norte.
- Derechos subterráneos de riego limitados sólo en acuíferos Elqui Alto (1412 l/s) y Santa Gracia (203 l/s).

Este escenario, por el hecho de considerar entubamiento de los canales de distribución y la tecnificación del riego aguas abajo del embalse Puclaro, es el que posee la menor recarga superficial, además de una menor tasa de extracción en comparación con el escenario Base 1, debido a que existe una mayor disponibilidad de aguas superficiales al ser más eficientes en el uso. No obstante, las tasas de bombeo en la Operación 7.2 son mayores en el periodo de sequía ya que considera la liberación de las restricciones de explotación sobre los acuíferos.

5.1.2 Escenarios propuestos

Las acciones externas que definen los escenarios propuestos, luego de evaluar previamente la respuesta del modelo de simulación hidrogeológico frente a los escenarios previamente mencionados, tienen el objeto de analizar la recuperación del volumen de agua almacenado en el acuífero frente a casos de operación del sistema con tasas de extracción de aguas subterránea más intensas. Tres de los cinco escenarios propuestos se señalan a continuación:

§ **Escenario Operación A**

- Demandas de aguas subterráneas del escenario Operación 4.1 aumentadas en un 100 %.
- Recarga superficial del escenario Operación 2.

§ **Escenario Operación B**

- Demandas de aguas subterráneas del escenario Operación 4.1 aumentadas en un 300 %.
- Recarga superficial del escenario Operación 2.

§ **Escenario Operación C**

- Demandas de aguas subterráneas del escenario Operación 4.1 aumentadas en un 500 %, salvo en sector Elqui Bajo, que mantiene la demanda del escenario Operación B por ya presentar un descenso sostenido del volumen almacenado en este escenario.
- Recarga superficial del escenario Operación 2.

Con la finalidad de ver como responde el acuífero en un horizonte de tiempo más extenso, adicionalmente a los escenarios descritos se consideran dos escenarios de operación que contemplan una extensión de 30 años de simulación (359 periodos). Estos escenarios, que son una extensión de la Operación A, se describen a continuación:

§ **Escenario Operación A.1**

- Considera las tasas de bombeo del escenario Operación A hasta el término del periodo de sequía, correspondiente a julio de 1997 (100 periodos de simulación). A partir del mes siguiente no se extraen aguas subterráneas hasta el término de la simulación (febrero de 2019).
- Recarga superficial del escenario Operación 2, extendida para una condición de uso normal y sin nuevos periodos de sequía.

§ **Escenario Operación A.2**

- Existe extracción desde los pozos de bombeo en todo el periodo de simulación (30 años). Considera las tasas de bombeo del escenario Operación A hasta el término de este, extendiendo la serie de bombeo durante los próximos 15 años.
- Recarga superficial del escenario Operación 2, extendida para una condición de uso normal y sin nuevos periodos de sequía.

5.2 Bombeo y Recarga Superficial Nominal de Escenarios

Los cinco escenarios de operación seleccionados del estudio de Cazalac-Rodhos, 2006, los cuales son la base que da origen a los cinco escenarios aquí propuestos, tienen como resultado las series mensuales de bombeo y recarga superficial global del sistema que se muestran en las Figuras 5-1 y 5-2, respectivamente. Las series de bombeo y recarga superficial correspondientes a los sectores de balance definidos en el acápite 4.2.5 se muestran en Anexo D.

El periodo de simulación que se extiende por 15 años, comprende la sequía hidrológica que sufrió la IV Región durante 1993 y 1997, la cual se analiza en Díaz (2007). Las consecuencias de esta sequía se puede observar con claridad entre los años 1995 y 1997, en donde la recarga superficial se ve fuertemente disminuida y las tasas de bombeo intensificadas, presentando en diciembre de 1996 la máxima demanda mensual de aguas subterráneas, para cada uno de los escenarios.

La demanda promedio de aguas subterráneas y la recarga superficial promedio del acuífero, por sector de balance y global de sistema de los escenarios seleccionados y propuestos son comparados gráficamente en las Figuras 5-3 y 5-4, respectivamente.

La especificación de los valores promedio de las tasas de bombeo y recargas superficiales impuestas al modelo de simulación, en cada sector de balance y en los ocho escenarios considerados, se muestran en las Tablas 5-2 y 5-3, respectivamente.

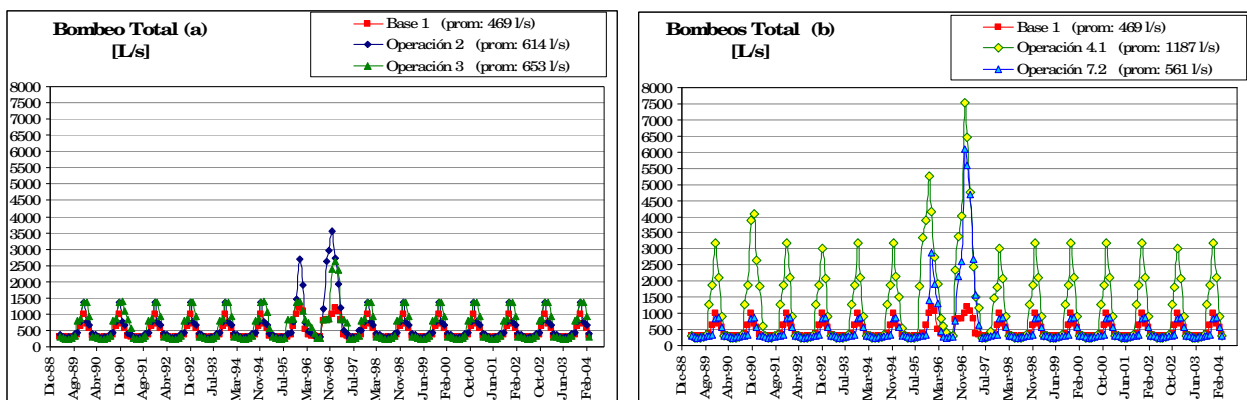


Figura 5-1 Series de bombes de escenarios de operación extraídos de Cazalac-Rodhos (2006).

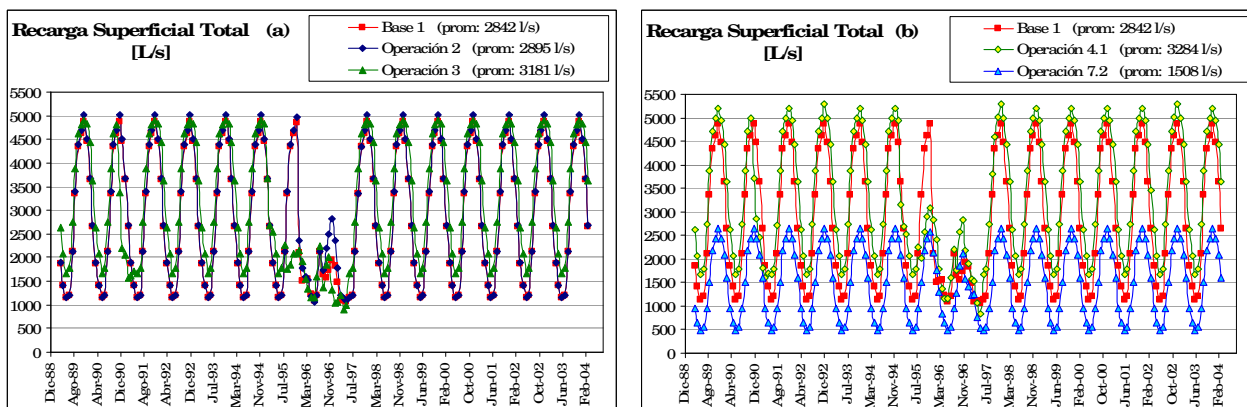


Figura 5-2 Series de recarga superficial de escenarios extraídos de Cazalac-Rodhos (2006).

Para tener una referencia de los valores que alcanzan las demandas de agua subterránea durante la sequía, en la Tabla 5-4 se muestran los valores de la demanda mensual máxima de agua subterránea, correspondiente al mes de diciembre de 1996.

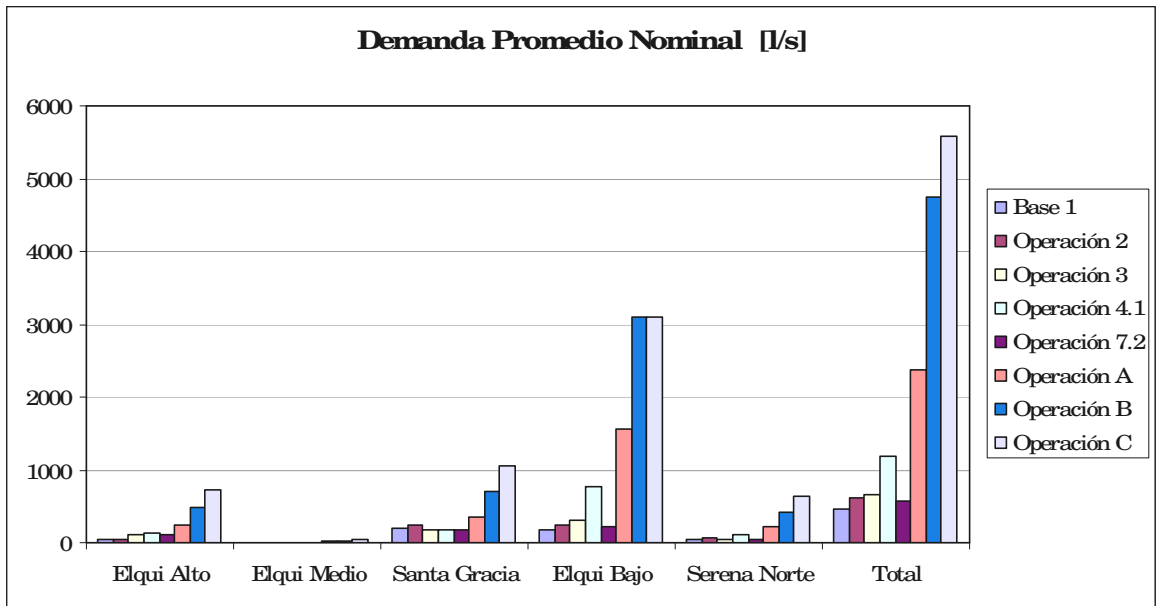


Figura 5-3 Bombeos nominales promedio por escenario de operación

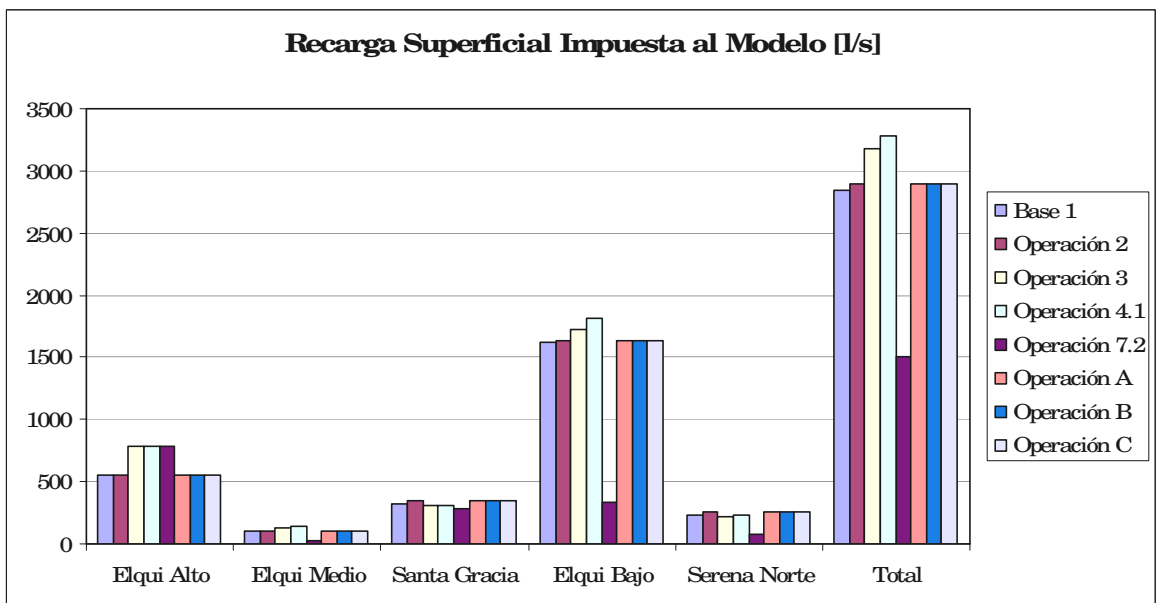


Figura 5-4 Recarga superficial promedio ingresada al modelo por escenario de operación

Tabla 5-2

Escenario	Demanda Nominal Promedio de Aguas Subterráneas [L/s]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	49	4	190	184	42	469
Operación 2	49	4	246	241	74	614
Operación 3	115	5	177	314	43	653
Operación 4.1	122	8	177	775	105	1187
Operación 7.2	116	5	179	221	41	561
Operación A	244	16	354	1550	210	2375
Operación B	489	33	708	3100	420	4750
Operación C	733	49	1062	3100	631	5575

Tabla 5-3

Escenario	Recarga Superficial Nominal Promedio [L/s]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	554	107	324	1620	237	2842
Operación 2	554	107	347	1634	252	2895
Operación 3	789	135	308	1727	222	3181
Operación 4.1	787	136	306	1820	234	3284
Operación 7.2	787	21	289	338	74	1508
Operación A	554	107	347	1634	252	2895
Operación B	554	107	347	1634	252	2895
Operación C	554	107	347	1634	252	2895

Tabla 5-4

Escenario	Demanda mensual máxima de agua subterránea: Diciembre 1996 [L/s]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	49	2	198	682	75	1005
Operación 2	49	2	284	2614	619	3567
Operación 3	1413	18	198	682	75	2385
Operación 4.1	2105	156	198	4458	619	7536
Operación 7.2	1461	149	198	3952	332	6092
Operación A	4210	312	395	8917	1239	15073
Operación B	8420	624	791	17833	2477	30145
Operación C	12630	936	1186	17833	3716	36301

5.3 Resultados de la Simulación

El análisis de los resultados que se expone está principalmente orientado a los escenarios de operación que se extienden durante 15 años, poniendo énfasis en las demandas suplidas por el modelo, el balance hídrico, la evolución del volumen almacenado en el embalse subterráneo y sus tasas de recuperación.

Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de los escenarios con simulaciones de 30 años en términos de la evolución del volumen almacenado.

5.3.1 Escenarios con Simulación de 15 años

5.3.1.1 Demanda Suplida y Recargas Aceptadas por el Modelo

A continuación se muestran las demandas suplidas y las recargas superficiales promedio aceptadas por el modelo y las correspondientes al mes de demanda mensual máxima durante la sequía hidrológica.

§ Valores Promedio Durante Simulación

Como primer resultado de la simulación de los escenarios considerados se tiene la demanda suplida promedio y la recarga superficial aceptada por el modelo de simulación, cuyas comparaciones entre escenarios de operación se indican en las Figuras 5-5 y 5-6, respectivamente.

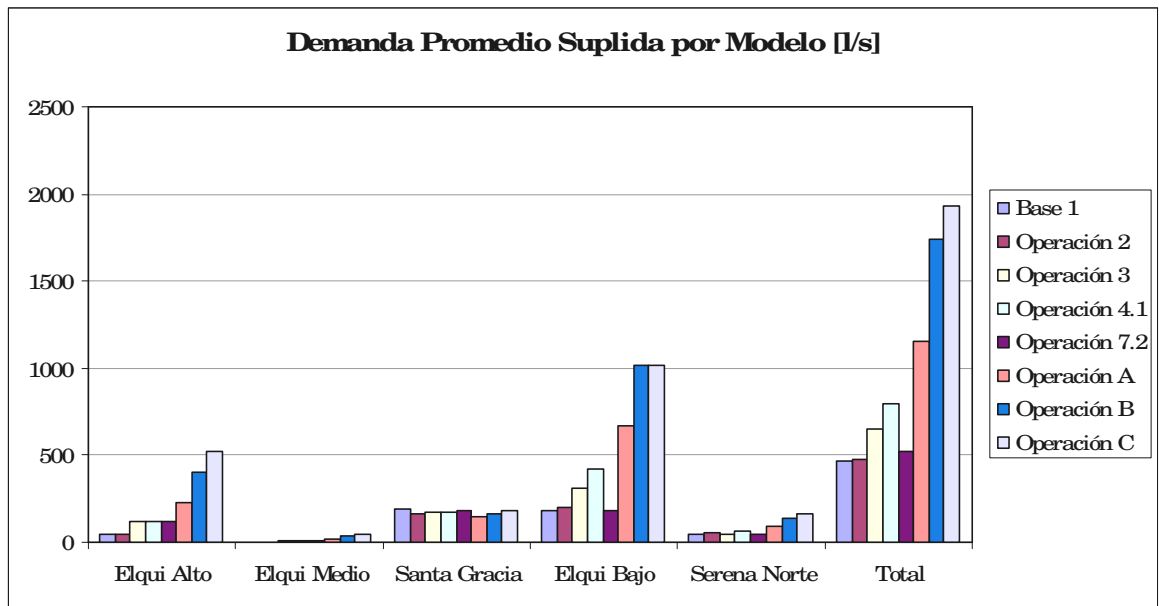


Figura 5-5 Demanda suplida promedio como resultado del modelo de simulación

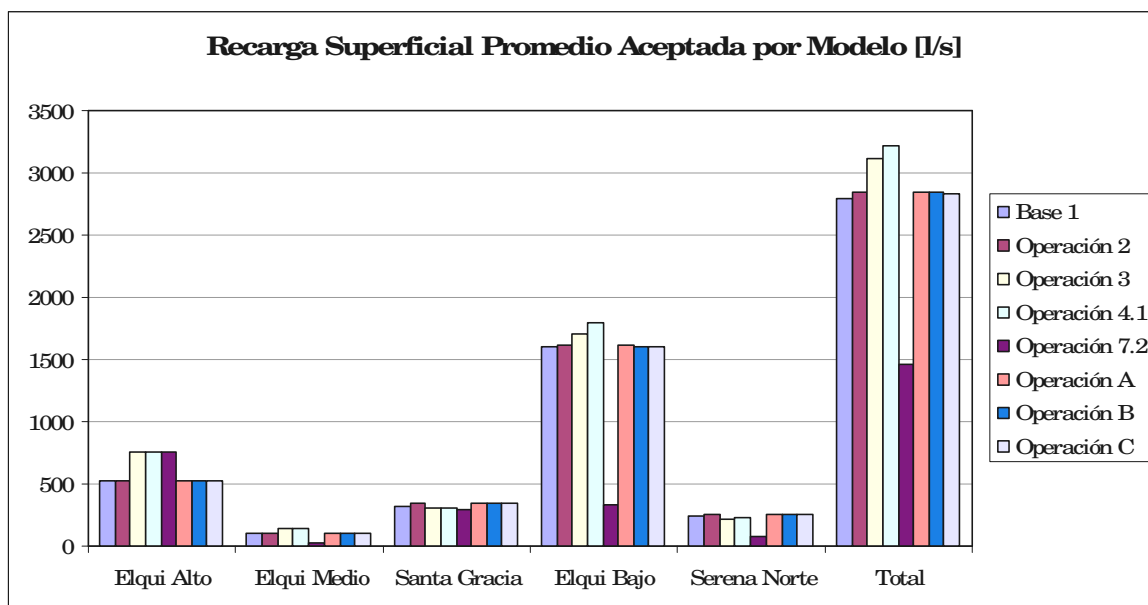


Figura 5-6 Recarga superficial promedio aceptadas por el modelo de simulación

En las Tablas 5-5 y 5-6 se indican los valores específicos de la demanda suplida y la recarga aceptada por el modelo, respectivamente. El porcentaje que estas representan de sus valores nominales se indican en las Tablas 5-7 y 5-8, respectivamente.

Cabe hacer presente que el aumento en las tasas de extracción de aguas subterráneas son aplicadas sobre los mismos pozos considerados en la calibración del modelo (129 pozos). Es por esto que la existencia de una porción de demanda no suplida, no implica una incapacidad del acuífero en su conjunto de entregar un determinado caudal, sino que es una incapacidad de determinadas celdas y sus respectivas vecindades, asociadas a sus constantes de elasticidad correspondientes, debido a que existen pozos con tasas de extracción importantes en magnitud.

De esta forma, para los escenarios que fuese necesario, se procedió a reubicar en un lugar más favorable para la extracción de agua los pozos que por presentar una tasa de bombeo importante y por estar ubicados en quebradas o su cercanía, se secaban durante la simulación.

En consecuencia, el porcentaje que corresponde a la demanda suplida sólo hace referencia a una respuesta del modelo de simulación ante una cantidad y distribución de pozos de bombeo en particular. De esta manera, es factible que el modelo de simulación permita satisfacer una demanda mayor para una mayor cantidad de pozos y una mejor distribución de estos, independientemente de la existencia de un descenso sostenido del volumen almacenado.

Respecto a la recarga superficial aceptada por el modelo, sólo los sectores Elqui Alto y Elqui Bajo no recargan el 100% de lo nominal. El 95% para la primera y 98% para la segunda se explica en las celdas secas que se generan en el estrato inferior, las cuales al convertirse en celdas inactivas impiden el ingreso de la recarga superficial asignada.

Nos obstante lo anterior, es relevante considerar que las demandas efectivamente aceptadas por el modelo de simulación, junto con la recarga superficial, son suficientes para el objetivo de este estudio.

Tabla 5-5

Escenario	Demanda Suplida Promedio de Aguas Subterráneas [L/s]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	49	4	190	184	42	469
Operación 2	49	4	169	200	56	478
Operación 3	115	5	177	313	44	653
Operación 4.1	122	8	177	423	67	797
Operación 7.2	116	5	179	183	41	523
Operación A	230	16	150	671	90	1158
Operación B	400	33	161	1012	135	1740
Operación C	525	49	185	1012	164	1935

Tabla 5-6

Escenario	Recarga Superficial Aceptada Promedio por el Modelo de Simulación [L/s]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	529	107	324	1598	237	2795
Operación 2	529	107	347	1610	252	2845
Operación 3	753	135	308	1703	222	3121
Operación 4.1	751	136	306	1792	234	3220
Operación 7.2	751	21	289	333	74	1467
Operación A	528	107	346	1609	252	2843
Operación B	528	107	345	1609	252	2840
Operación C	526	107	345	1609	252	2838

Tabla 5-7

Escenario	Demanda Suplida Promedio de Aguas Subterráneas [%]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	100	100	100	100	100	100
Operación 2	100	100	69	83	75	78
Operación 3	100	100	100	100	101	100
Operación 4.1	100	100	100	55	64	67
Operación 7.2	100	100	100	83	101	93
Operación A	94	100	42	43	43	49
Operación B	82	100	23	33	32	37
Operación C	72	100	17	33	26	35
Promedio	93	100	69	66	68	70

Tabla 5-8

Escenario	Recarga Superficial Aceptada Promedio por el Modelo de Simulación [%]					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	95	100	100	99	100	98
Operación 2	95	100	100	99	100	98
Operación 3	95	100	100	99	100	98
Operación 4.1	95	100	100	98	100	98
Operación 7.2	95	100	100	99	100	97
Operación A	95	100	100	98	100	98
Operación B	95	100	99	98	100	98
Operación C	95	100	99	98	100	98

○ **Indicador Recarga Superficial / Tasa de Bombeo**

De los valores obtenidos del modelo de simulación hidrogeológico resulta de interés considerar el número adimensional definido por el cociente entre la recarga superficial y la tasa de extracción por bombeo promedio, puesto que permite establecer un claro ordenamiento de los escenarios de operación en términos de cuantificar la intensidad de la explotación del acuífero en relación con su recarga superficial. Los valores obtenidos para este indicador en los sectores de balance y el sistema global, calculados a partir de la recarga superficial y tasas de bombeo efectivamente aceptadas por el modelo, se muestran en la Tabla 5-9 y Figura 5-7.

No obstante, como se verá en los siguientes acápitales, no es posible establecer un criterio general a partir del cociente indicado, puesto que un escenario de operación con un indicador de *recarga superficial / tasa de bombeo* mayor que el de otras operaciones, puede tener un comportamiento diametralmente opuesto en la evolución del volumen almacenado en el embalse subterráneo. Este es el caso de la Operación 7.2, en comparación con las Operaciones A, B y C.

Tabla 5-9

Escenario	Indicador: Recarga Superficial / Bombeo					
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	Total
Base 1	10,77	27,34	1,70	8,70	5,60	5,96
Operación 2	10,77	27,34	2,05	8,04	4,53	5,95
Operación 3	6,57	27,88	1,74	5,44	5,06	4,78
Operación 4.1	6,15	16,67	1,73	4,24	3,47	4,04
Operación 7.2	6,47	4,55	1,61	1,82	1,78	2,80
Operación A	2,30	6,57	2,31	2,40	2,79	2,46
Operación B	1,32	3,29	2,15	1,59	1,86	1,63
Operación C	1,00	2,19	1,87	1,59	1,53	1,47

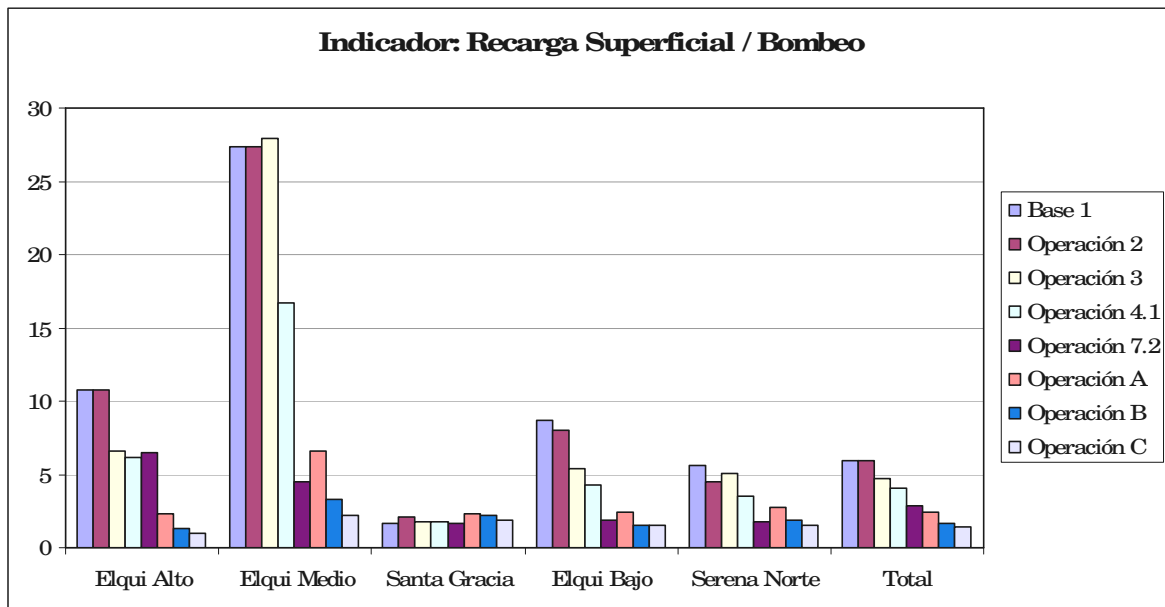


Figura 5-7

§ Satisfacción de Demanda Mensual Máxima

En las Tablas 5-10 y 5-11 se indican las extracciones suplidas durante el mes de diciembre de 1996, correspondiente al de máxima demanda mensual. Destacan los resultados de la simulación de los escenarios Base 1 y Operación 3, en el sentido de satisfacer el 100% de la demanda mensual máxima.

Tabla 5-10

Escenario	Demanda mensual máxima Suplida de agua subterránea: Diciembre 1996 [L/s]					Total
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	
Base 1	49	2	198	680	76	1005
Operación 2	49	2	171	1204	119	1544
Operación 3	1413	18	198	680	76	2385
Operación 4.1	2105	156	198	1964	123	4546
Operación 7.2	1461	149	198	2188	340	4335
Operación A	4210	312	182	2944	247	7895
Operación B	4872	624	181	3854	241	9772
Operación C	4500	936	156	3854	309	9755

Tabla 5-11

Escenario	Demanda Mensual Máxima Satisfecha: Diciembre 1996 [%]					Total
	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte	
Base 1	100	100	100	100	102	100
Operación 2	100	100	60	46	19	43
Operación 3	100	100	100	100	102	100
Operación 4.1	100	100	100	44	20	60
Operación 7.2	100	100	100	55	102	71
Operación A	100	100	46	33	20	52
Operación B	58	100	23	22	10	32
Operación C	36	100	13	22	8	27
Promedio	87	100	68	53	48	61

5.3.1.2 Balance Hídrico Subterráneo

En términos del balance hídrico subterráneo los errores obtenidos en los ocho escenarios de operación de 15 años fluctúan entre -4 l/s (-0,09%) y -55 l/s (-0,97%), valores que se consideran plenamente satisfactorios para los objetivos del estudio.

La relación entre las distintas componentes que tienen lugar en el balance hídrico para el acuífero global se grafican en la Figura 5-8. Sus respectivos valores en los sectores de balance se muestran en el Anexo F. Cabe hacer presente que la componente correspondiente a *pozos*, la entrada corresponde a la recarga subterránea, la cual fue implementada mediante pozos de inyección, mientras que la salida corresponde a pozos de bombeo.

De esta figura destaca la significancia que tiene el flujo desde la condición de borde tipo río en las salidas de los todos los escenarios de operación, la cual comienza a disminuir conforme aumenta la extracción de aguas subterráneas por bombeos.

En cuanto al aporte de las condiciones de borde de altura constante, estas presentan una variación prácticamente nula entre los distintos escenarios.

Un aspecto importante en la comparación de los escenarios es la casi nula variabilidad que presentan en el flujo subterráneo promedio desde Elqui Alto hacia Elqui Medio, el cual tiene un valor de 622 [l/s], salvo para la Operación 7.2, que presenta un valor de 623 [l/s].

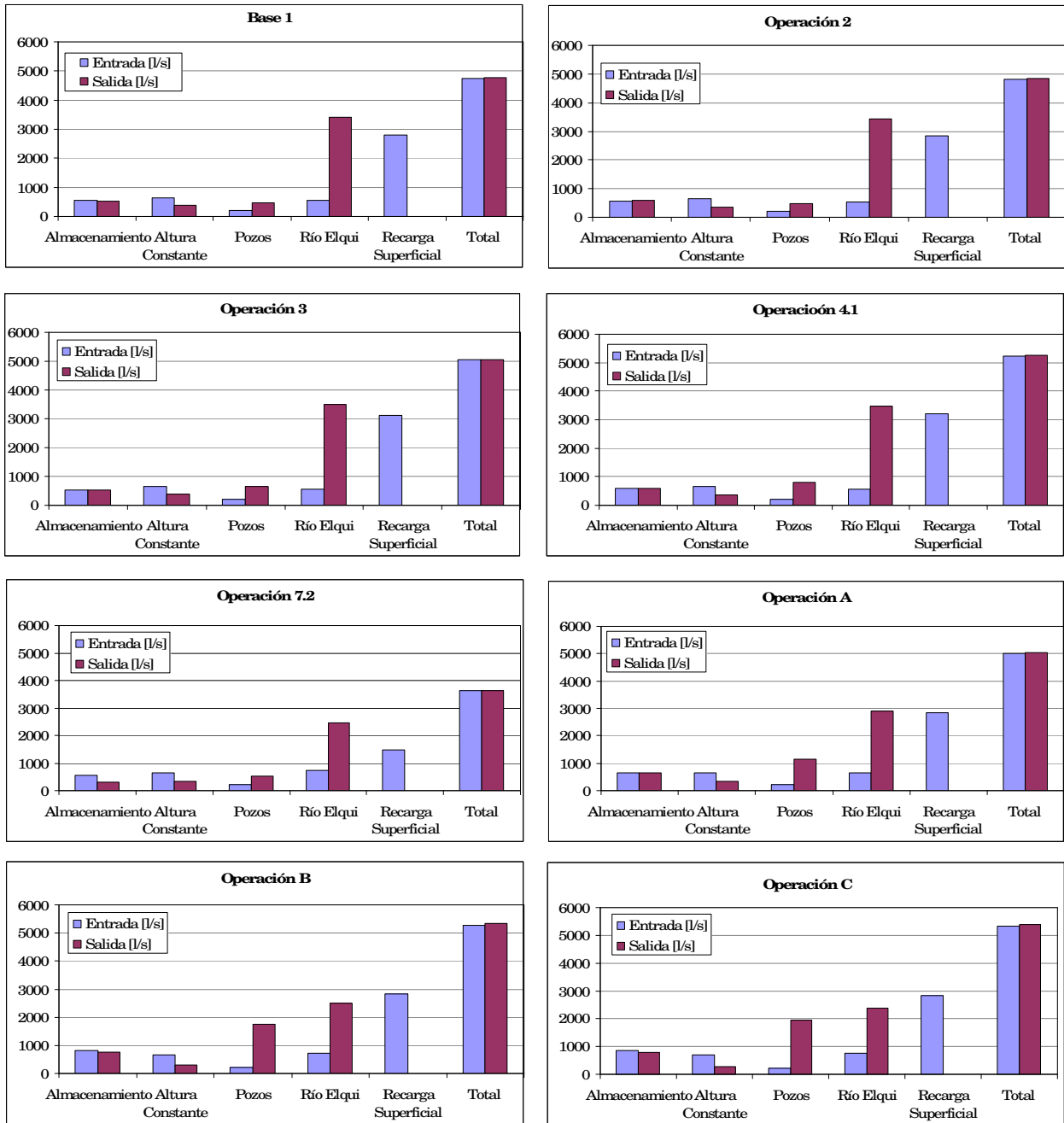


Figura 5-8 Balance hídrico global promedio en escenarios de operación

5.3.1.3 Niveles piezométricos

Parte de los niveles piezométricos obtenidos en los pozos de observación, para 4 de los 8 escenarios de operación considerados se muestran en la Figura 5-9, de los cuales algunos se ven influenciados por pozos de bombeo. Para evitar la superposición de las series, acá se exponen los escenarios y pozos que presentan niveles más representativos en términos de ubicación y comportamiento, abarcando los extremos de las variaciones entre escenarios. Una muestra más extensa se expone en anexos.

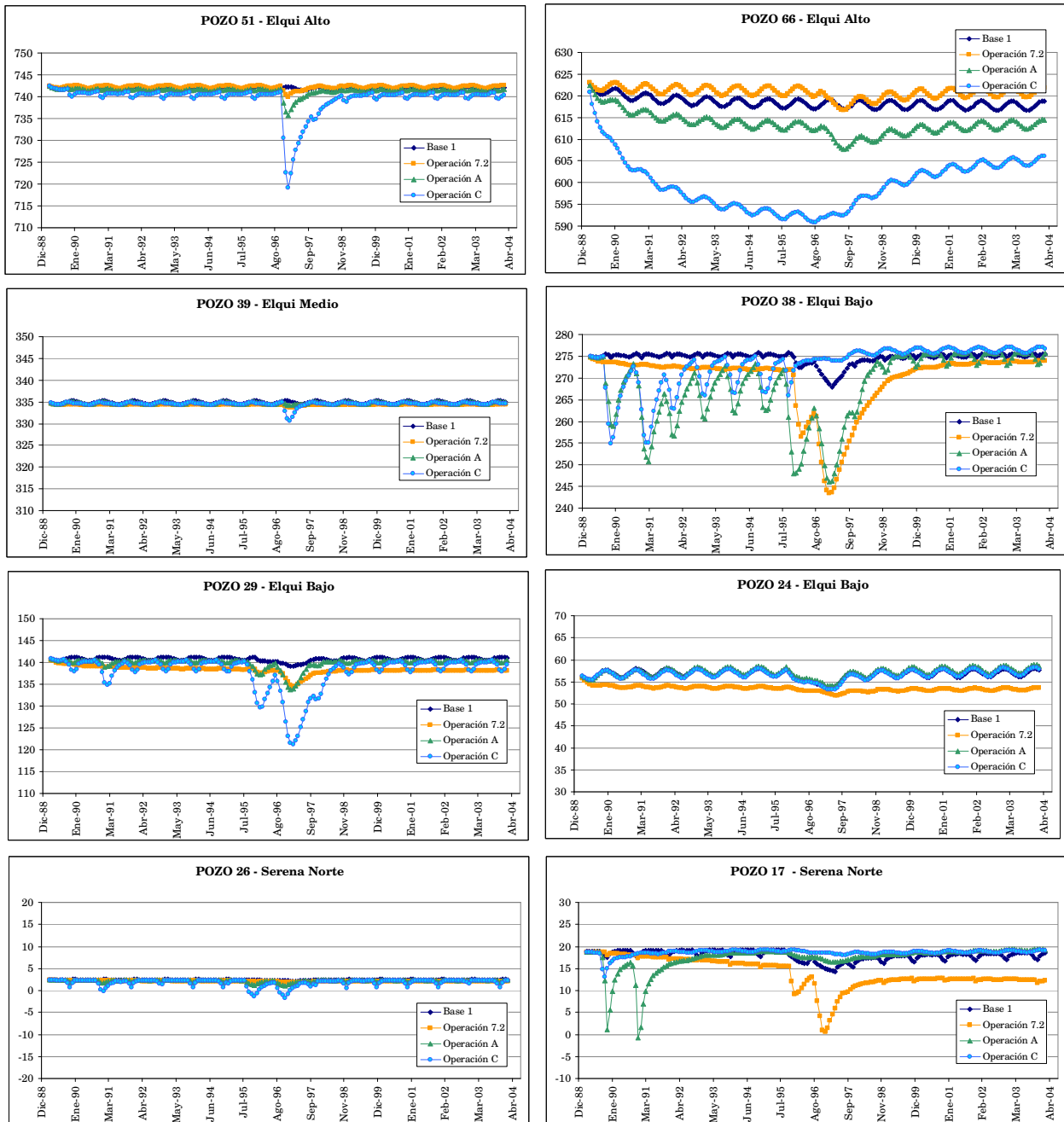


Figura 5-9 Niveles piezométricos representativos en ubicación y comportamiento en escenarios de operación

5.3.1.4 Evolución del Volumen Almacenado en el Acuífero

La evolución del volumen almacenado en el acuífero es obtenida a través del paquete *Zone Budget* de Visual Modflow, que permite obtener el balance hídrico subterráneo del sistema global y los sectores de balance definidos, entregando los caudales afluentes y efluentes en cada periodo de simulación por cada componente, ya sea por concepto de condición de borde o acciones externas. Las componentes que tienen lugar en este modelo son: carga constante, pozos de inyección o extracción, condición de río y recarga superficial.

A partir de lo anterior, considerando la ecuación de continuidad, como se indica en la ecuación (5.1) y la ecuación (5.2), que relaciona el volumen almacenado de un periodo con el anterior, se obtiene la variación del volumen almacenado en cada periodo de simulación i , respecto a volumen inicial V_0 , para el cual se asume $V_0 = 0$ como referencia.

$$\Delta V_i = (Q_i^{Entrada} - Q_i^{Salida}) \cdot \Delta t_i \quad (5.1)$$

$$V_i = V_{i-1} + \Delta V_i \quad (5.2)$$

§ Resultado de escenarios en acuífero global

Luego de la metodología descrita, la evolución del volumen almacenado en el acuífero respecto a la condición inicial de la simulación, para los distintos escenarios de operación se indica en la Figura 5-10. De esta figura se observa que sólo los escenarios de operación 2, 3 y 4.1 alcanzan a recuperar el volumen almacenado del primer periodo de simulación.

El segundo grupo de escenarios que culminan con un volumen almacenado más cercano a del primer periodo de simulación, comprende los escenarios Base 1 y Operación A, que finalizan en el último periodo con -16,5 Millones de m^3 de variación. Estos escenarios tienden a converger a una nueva situación de equilibrio, cuyo volumen es menor que el de la condición inicial, y por consiguiente, con niveles freáticos inferiores.

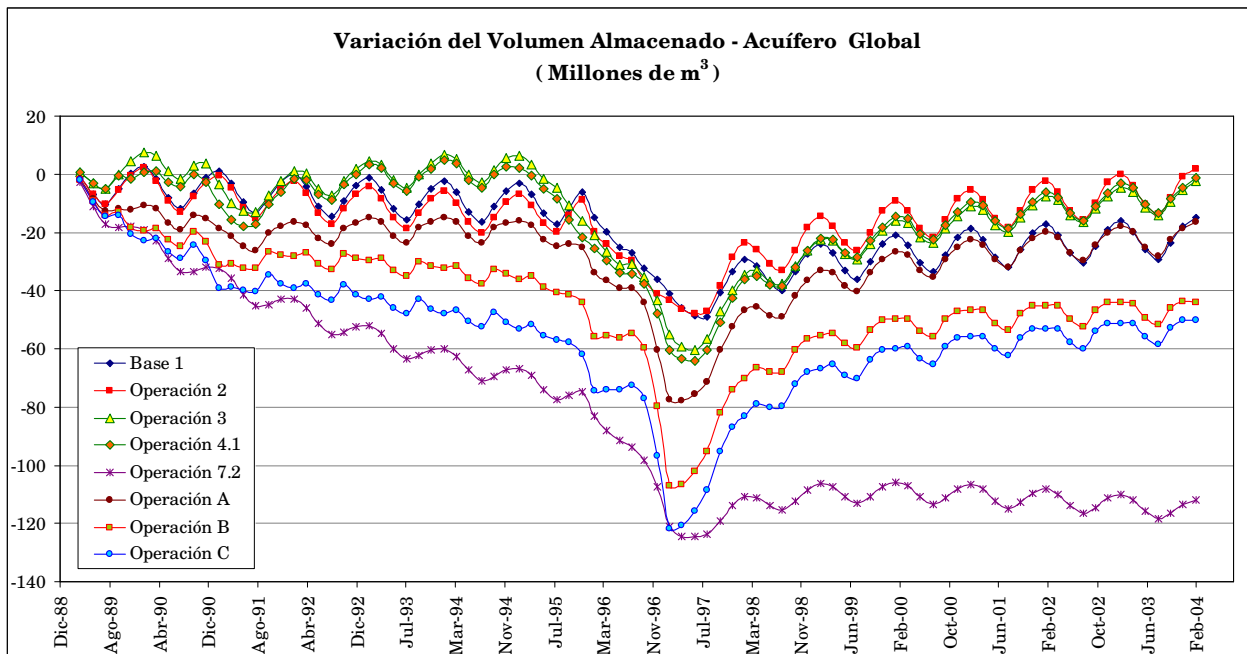


Figura 5-10 Evolución del volumen almacenado en el acuífero respecto a la condición inicial para los escenarios de operación de 15 años.

El siguiente grupo de escenarios corresponde a las operaciones B y C, las que finalizan con -44 y -50 millones de m³, respectivamente, teniendo a un nuevo volumen de equilibrio. Vale la pena decir que estos escenarios corresponden a los que poseen las mayores tasas de extracción de aguas subterráneas.

Los escenarios previamente mencionados presentan tasas positivas de recuperación del volumen almacenado. Por el contrario, el caso del escenario Operación 7.2 presenta una sostenida disminución del volumen, culminando en el último periodo de simulación con -112 millones de m³ de variación, sin mostrar una tendencia a una nueva condición de equilibrio.

Los valores máximos de disminución del volumen almacenado para los escenarios se muestra en la Tabla 5-12, los cuales ocurren justo al término de la sequía hidrológica al momento de recuperarse la recarga superficial.

Tabla 5-12

Disminución Máxima del Volumen Almacenado (Millones de m ³)								
Escenario	Base 1	Operación 2	Operación 3	Operación 4.1	Operación 7.2	Operación A	Operación B	Operación C
Valor	49,7	48,7	61,1	65,1	124,7	78,4	107,8	122,3
Fecha	Jul-97	Jul-97	May-97	May-97	May-97	Mar-97	Mar-97	Mar-97

Resulta de interés observar la significancia que tiene la recarga superficial en el sostenimiento del volumen almacenado al considerar que por efecto de la sequía hidrológica, la disminución de la recarga superficial se manifiesta primero que el aumento de las tasas de extracción de aguas subterráneas.

A modo de ejemplo, en la Figura 5-11 se muestra la variación del volumen almacenado en el acuífero global para el caso del escenario Operación 4.1, en conjunto con las series que definen las acciones externas aceptadas por el modelo de simulación. Para este escenario, el máximo de disminución del volumen almacenado que llega a presentar el acuífero alcanza un valor aproximado de 65 millones de m³, respecto al primer intervalo de simulación.

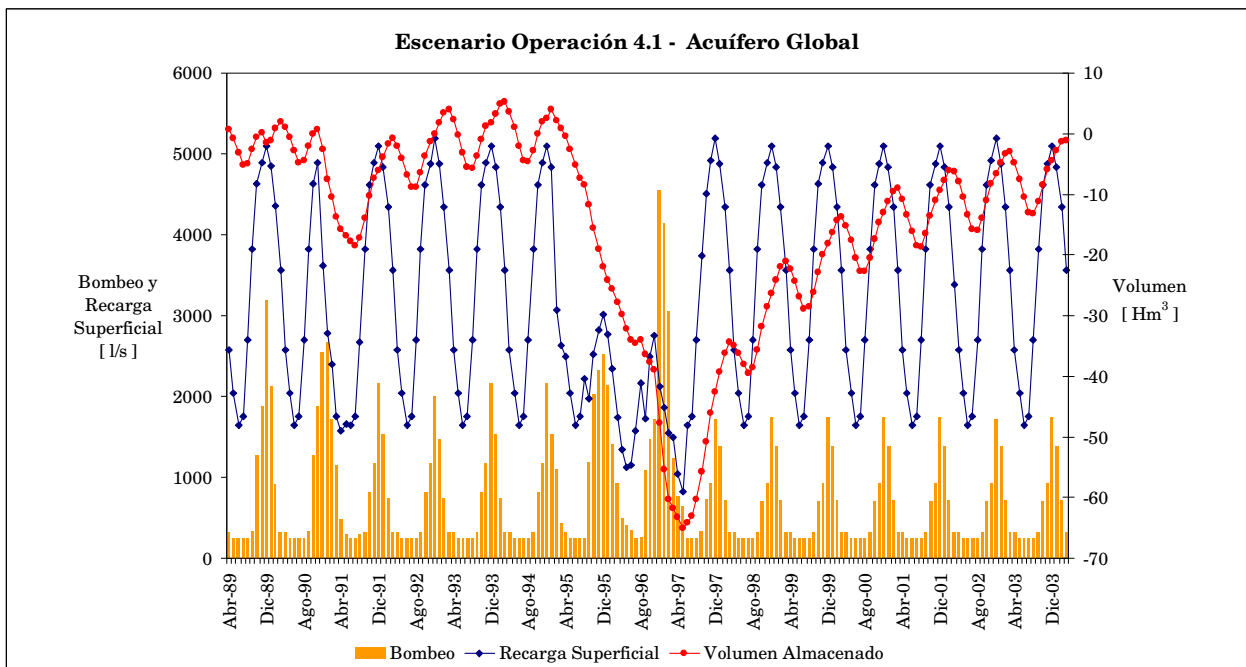


Figura 5-11 Evolución de la variación del volumen almacenado y acciones externas efectivas en acuífero global – Operación 4.1

§ Resultados por escenario de operación

- Base 1

Como se muestra en la Figura 5-12, el comportamiento que describe la variación del volumen en el acuífero global indica que para este escenario el sistema tiende a un nuevo estado de equilibrio con un volumen menor al de la condición inicial de referencia, puesto que previo al evento de sequía la tendencia es a disminuir el volumen almacenado. Esta tendencia a la disminución está forzada por la respuesta del sector Elqui Alto, el cual es el único que presenta una tendencia a la baja durante los 15 años de simulación, además de no verse afectado por la sequía.

Como se indicó previamente, en este escenario se suple el 100% de la demanda de aguas subterráneas durante toda la extensión de la simulación.

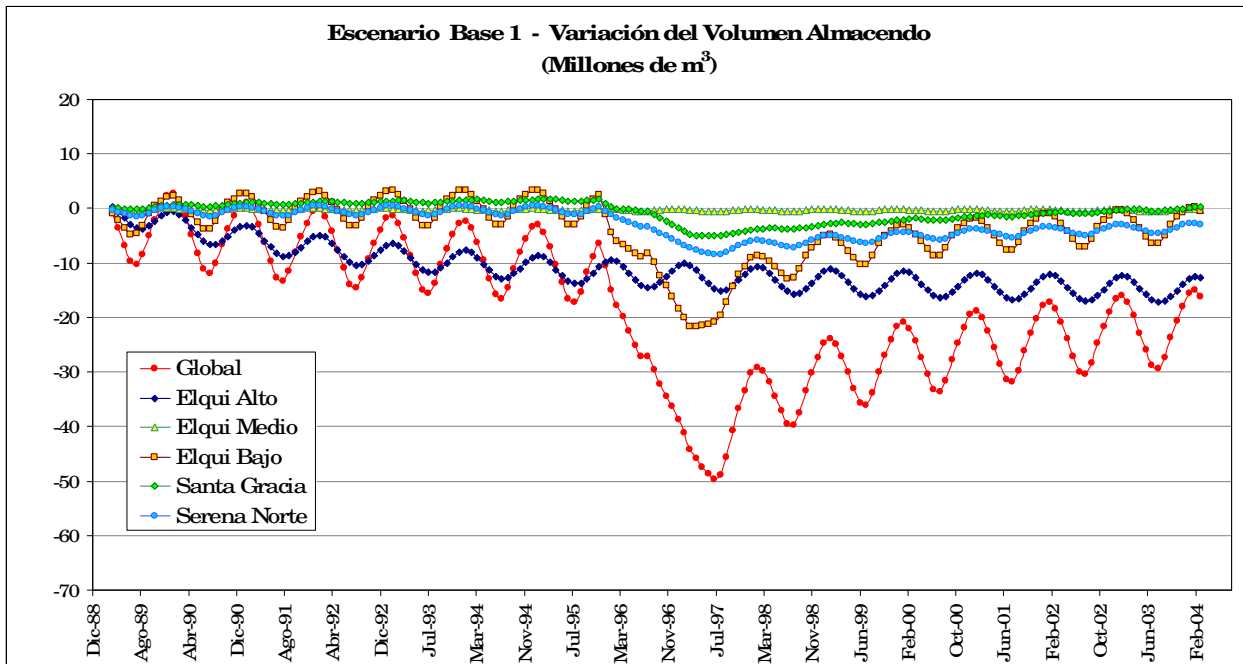


Figura 5-12

- Operación 2

La operación 2 tiende a recuperar el volumen de la condición inicial en el acuífero global. Esta tendencia es seguida por los sectores Elqui Medio, Elqui Bajo y Serena Norte, no obstante, las tendencias de los sectores Elqui Alto y Santa Gracia son distintas. Estas se muestran en la Figura 5-13

En el caso de Elqui Alto, el volumen almacenado tiende a disminuir durante toda la extensión de la simulación, sin verse intensificada por efecto de la sequía hidrológica.

En cuanto al sector Santa Gracia, el volumen sólo tiende a aumentar posteriormente a la ocurrencia de la sequía, lo cual tiene su origen en el hecho que durante esta, algunos pozos se secan, pese a que posteriormente las condiciones de recarga vuelven a la normalidad. Esto se debe a que la activación de la opción de ejecución de Visual Modflow, *re-humedecimiento de celdas secas*, no fue posible durante la simulación, debido a problemas de convergencia en la solución del modelo. Además es preciso mencionar que este sector no posee un mecanismo de descarga como si lo representa la condición de borde del río en los otros sectores de balance.

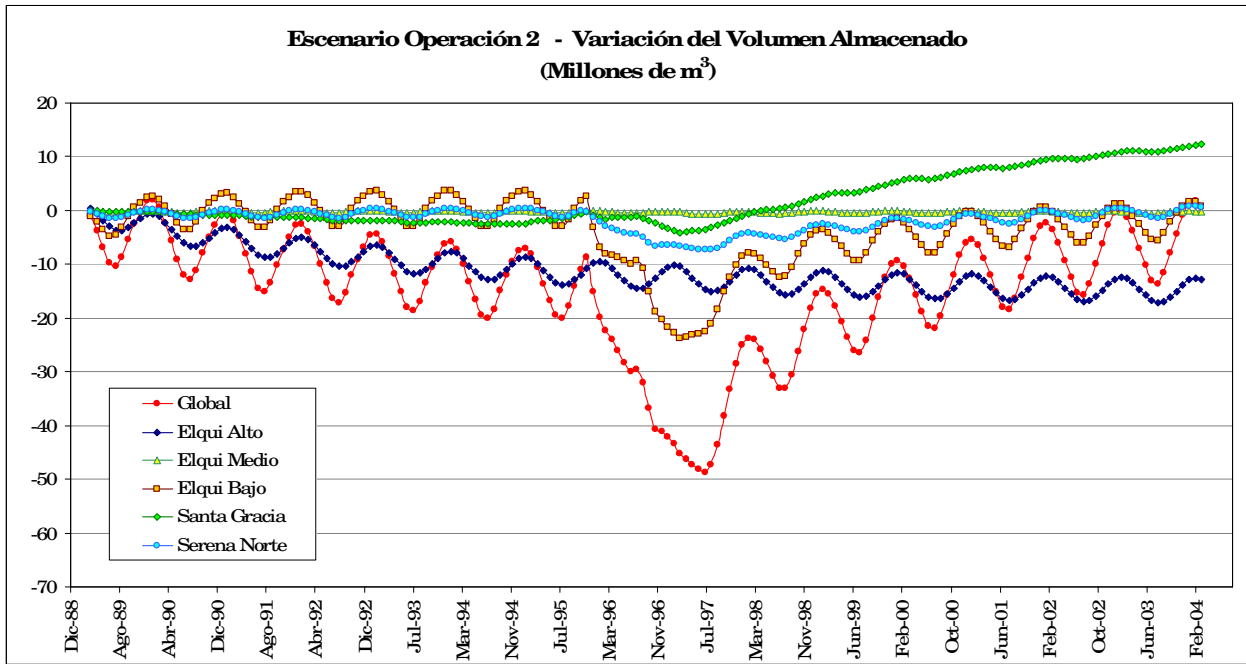


Figura 5-13

- Operación 3

Lo relevante de los resultados obtenidos en este escenario de operación es que todos los sectores de balance tienden a recuperar su condición inicial luego de la sequía (ver Figura 5-14). En este escenario, a diferencia de los dos anteriores, el sector Elqui Alto se mantiene a una condición de equilibrio antes de la sequía, se ve afectado durante esta, y presenta una recuperación del volumen posteriormente. Se destaca además que en este escenario se satisface el 100% de la demanda de aguas subterráneas durante todo el periodo de simulación.

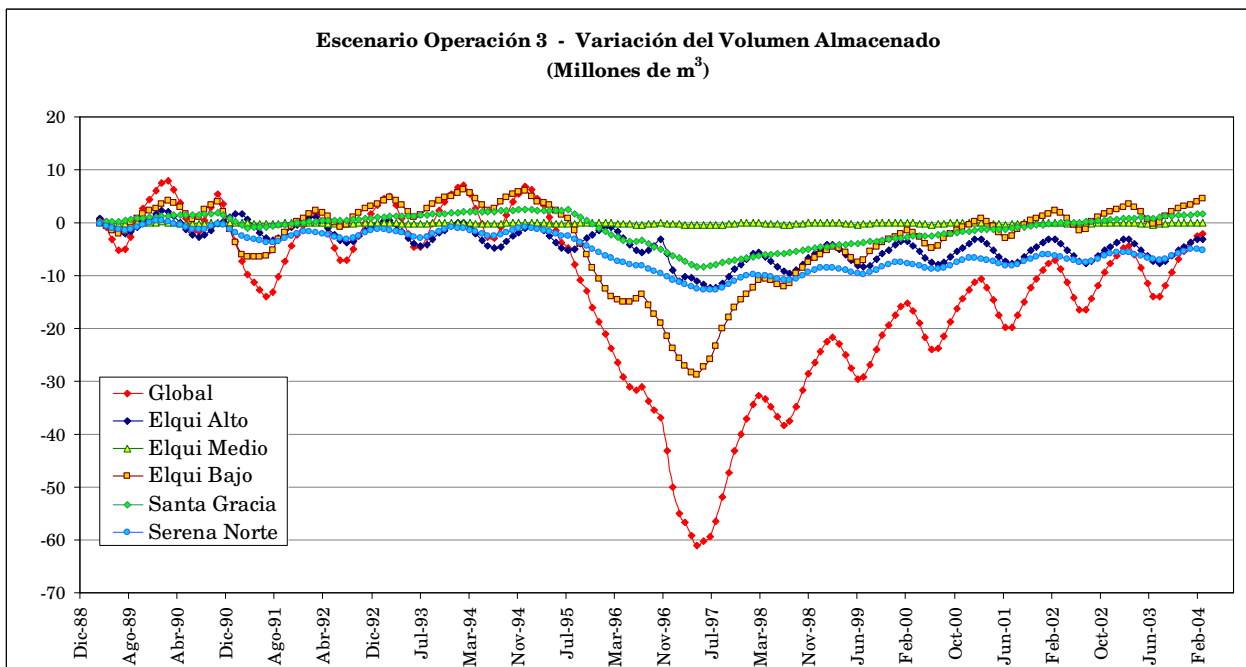


Figura 5-14

- Operación 4.1

En la Figura 5-15 se muestran los resultados del escenario Operación 4.1. Se observa que para los sectores de balance que ven disminuido su volumen por causa de la sequía hidrológica, luego del término de esta, todos tienden a presentar una recuperación del volumen almacenado.

De esta destaca el comportamiento del sector Elqui Bajo y Elqui Medio. El primero por presentar la mayor disminución del volumen de agua (hasta 32 millones de m³) y por recuperar rápidamente el volumen original en comparación con aquellos que se vieron afectados por la sequía. La segunda se destaca por mantener su volumen almacenado en un estado de equilibrio durante todo el tiempo de simulación.

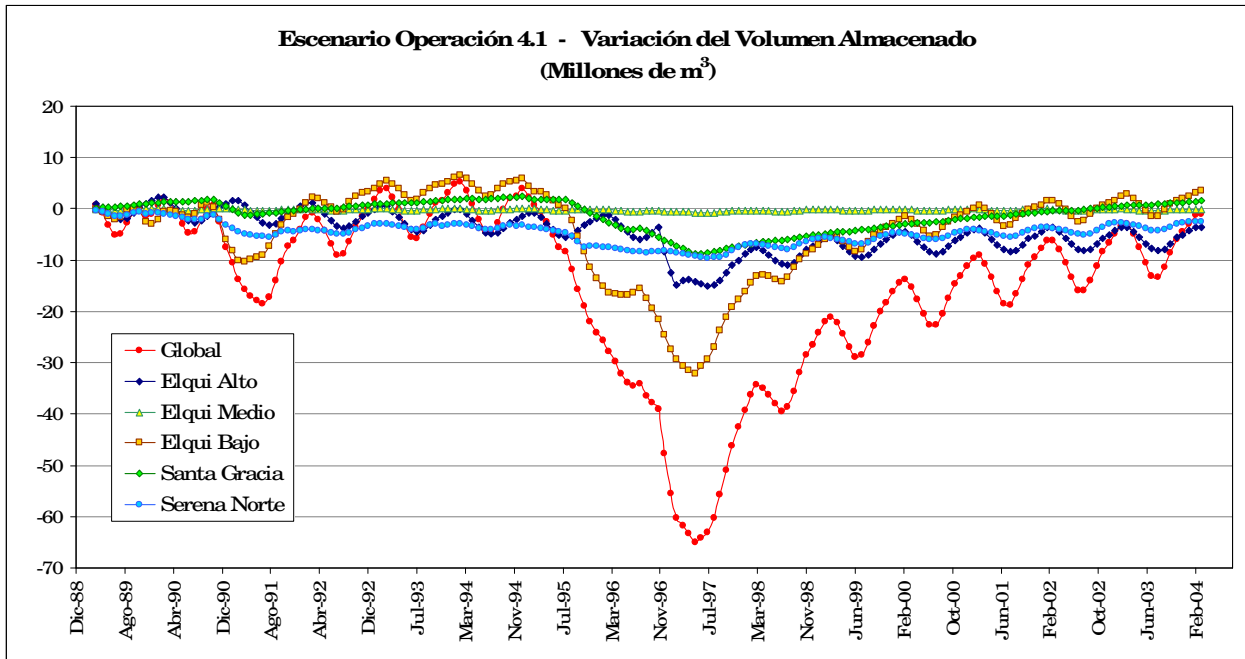


Figura 5-15

- Operación 7.2

De todos los escenarios de operación analizados en este trabajo de título, la Operación 7.2 es el que presenta los resultados más desfavorables en términos de sostenibilidad del volumen almacenado en el acuífero global. La variación del volumen se muestra en la Figura 5-16.

Esta tendencia a la disminución está influenciada por las tasas de descenso de los sectores Elqui Bajo y Serena Norte. No obstante, la tendencia que muestra el sector Elqui Medio es a mantener el volumen inicial, mientras que los sectores Elqui Alto y Santa Gracia, pese a presentar un ligero descenso en el volumen por efecto de la sequía, alcanzan un volumen cercano al inicial al término de la simulación.

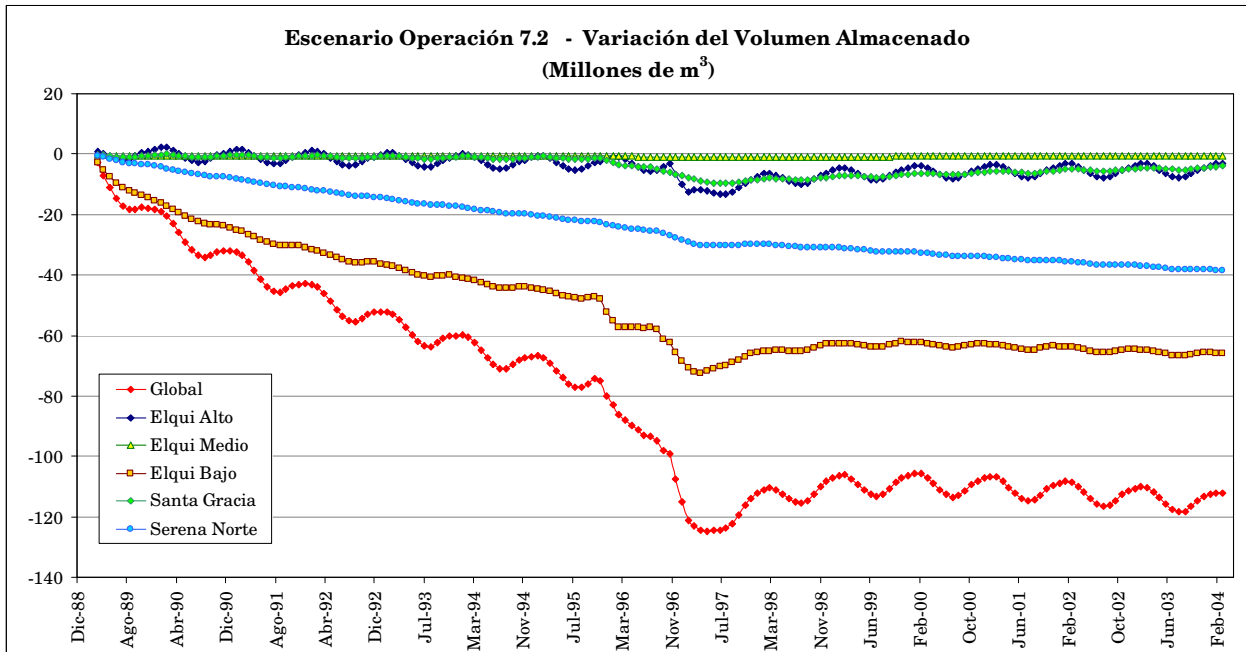


Figura 5-16

- Operación A

Como se puede inferir de la Figura 5-17, la Operación A tiende a una nueva situación de equilibrio para el acuífero global, con aproximadamente menos 20 millones de m³ respecto a la condición inicial. En cuanto a los sectores de balance, son Elqui Bajo y Elqui Alto los que influyen en este nuevo estado de equilibrio, ya que Elqui Medio y Serena Norte mantienen el volumen inicial al término de la simulación. Respecto a Santa Gracia, el volumen en este sector tiene a aumentar debido a que se secan pozos importantes en el sector, al igual que en la Operación 2.

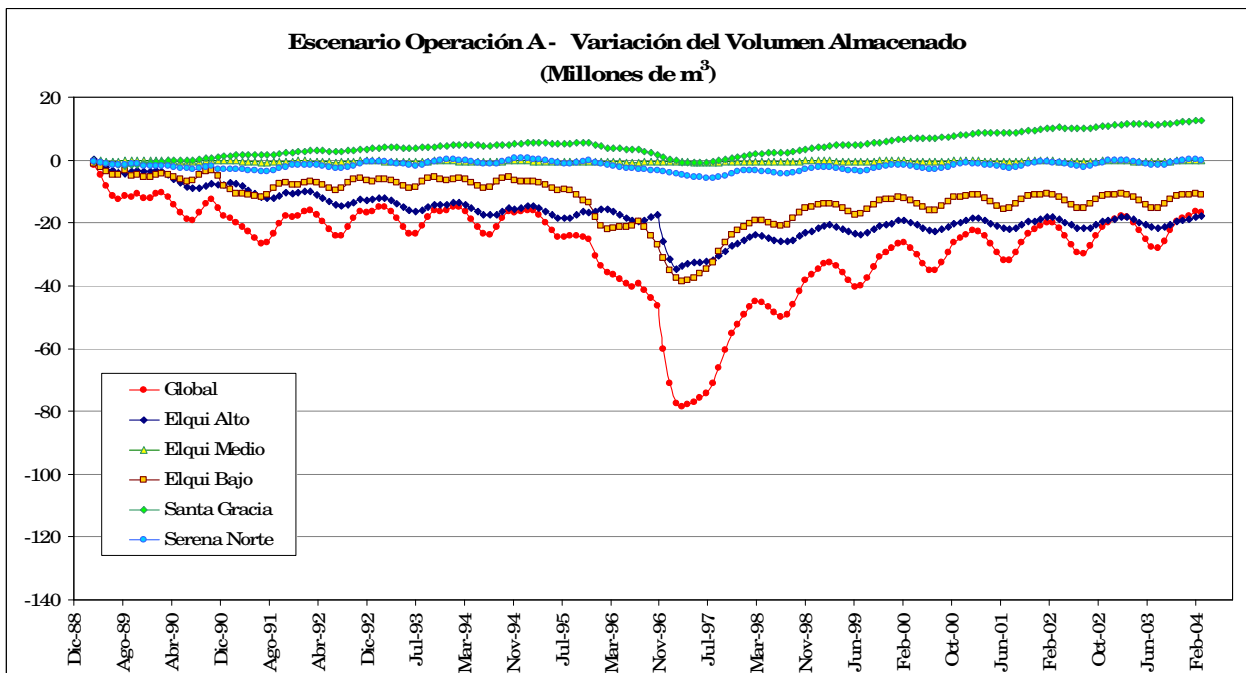


Figura 5-17

- Operación B

Puesto que el escenario Operación B tiene la misma recarga superficial que la Operación A, pero mayor tasa de extracción, la tendencia en el acuífero global y los sectores de balance es similar a este escenario, pero tiende a converger a un estado de equilibrio con menor volumen almacenado, estimado aproximadamente en -40 millones de m³ respecto a la condición inicial.

Del mismo modo que en el escenario Operación A, para obtener una convergencia de la solución no fue posible activar la opción re-humedecimiento de celdas secar de Visual Modflow, lo que genera la tendencia a aumentar el volumen almacenado en el sector Santa Gracia, al no poderse reactivar los pozos secos.

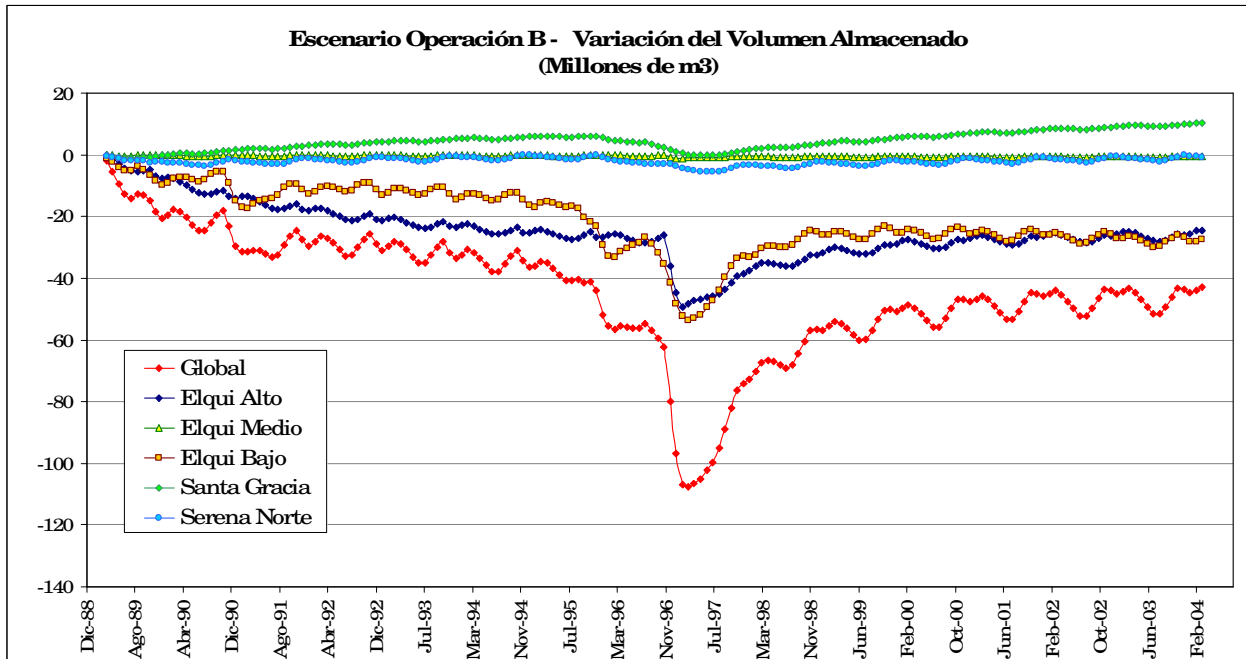


Figura 5-18

- Operación C

Para el escenario Operación C los sectores Elqui Alto y Elqui Bajo tienen a una nueva situación de equilibrio, mientras que los sectores Elqui Medio y Serena Norte mantienen el volumen inicial. Posteriormente a la sequía no es posible reactivar los pozos de bombeo secos del sector Santa Gracia. El comportamiento de este escenario se muestra en la Figura 5-19.

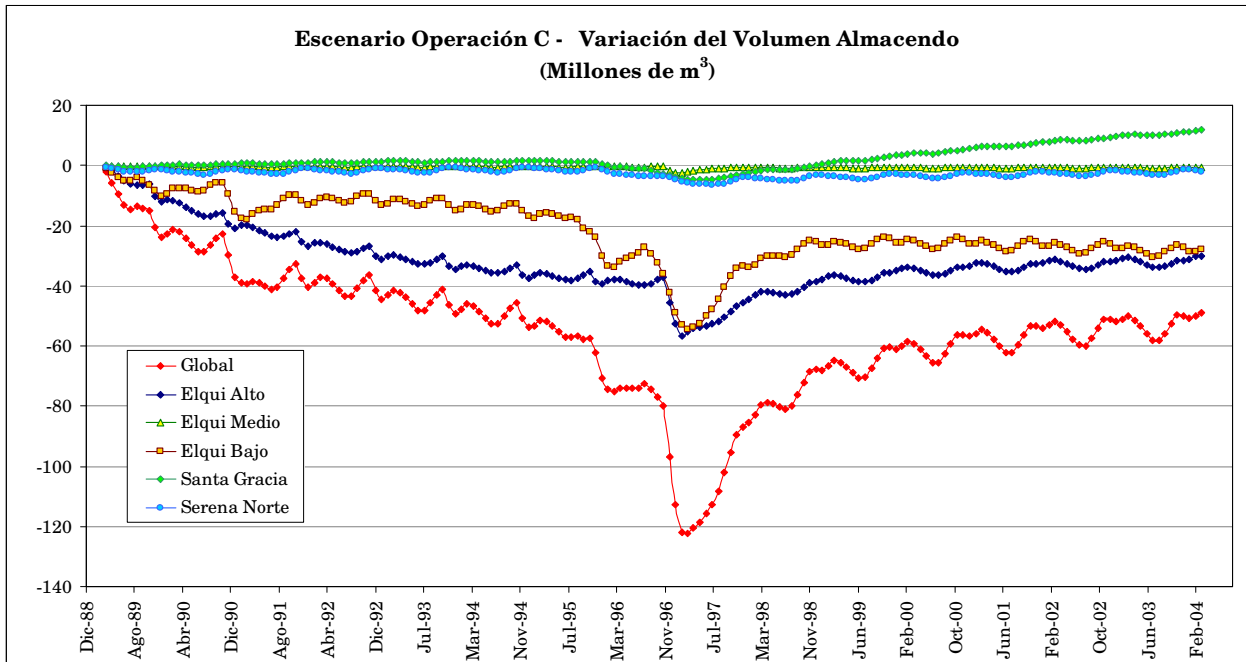


Figura 5-19

5.3.1.5 Tasas de Recuperación

La tasa de recuperación anual del volumen almacenado posterior a la sequía hidrológica se calculó a partir de Enero 1999, mes aproximado para el cual esta tasa adquiere un valor relativamente constante. Las tasas de recuperación (o descenso) para los escenarios con simulación de 15 años, calculadas como el promedio del aumento (o disminución) anual del volumen almacenado en el acuífero se indican en la Tabla 5-13.

Entre los valores que se obtienen destaca la sostenida tasa de descenso del volumen almacenado para el caso del escenario Operación 7.2, correspondiente a $-1,26$ [$\text{Hm}^3/\text{año}$]. En consecuencia, esta tasa negativa permite descartar a este escenario como una operación factible, que contempla un entubamiento de los canales de distribución y tecnificación del riego, por cuanto no presenta ni siquiera una situación de equilibrio dentro de los 15 años.

Respecto a los demás escenarios, todos presentan tasas de recuperación positivas. Un resultado importante es el hecho que, a excepción de la Operación 7.2, todos los escenarios presentan una tasa mayor que la del escenario Base 1, cuyo valor es $1,72$ [$\text{Hm}^3/\text{año}$], siendo la más cercana a esta la del escenario Operación B, con $2,13$ [$\text{Hm}^3/\text{año}$], mientras que la mayor tasa de recuperación es la del escenario Operación 4.1, con un valor de $3,94$ [$\text{Hm}^3/\text{año}$].

Tabla 5-13

Escenario	Tasa de Recuperación Global [Millones de m^3 / año]
Base 1	1,72
Operación 2	3,23
Operación 3	3,88
Operación 4.1	3,94
Operación 7.2	-1,26
Operación A	3,13
Operación B	2,13
Operación C	3,13

5.3.1.6 Equipotenciales

Dada la poca variabilidad que se identifica en la distribución de equipotenciales entre los escenarios de operación, a modo de ejemplo en las Figuras 5-20 y 5-21 se muestran las equipotenciales para el estrato superior e inferior, respectivamente, para el caso de la Operación C en el mes en que genera la máxima disminución de volumen (marzo 1997). En estas figuras, las celdas representadas en color verde olivo corresponden a celdas secas.

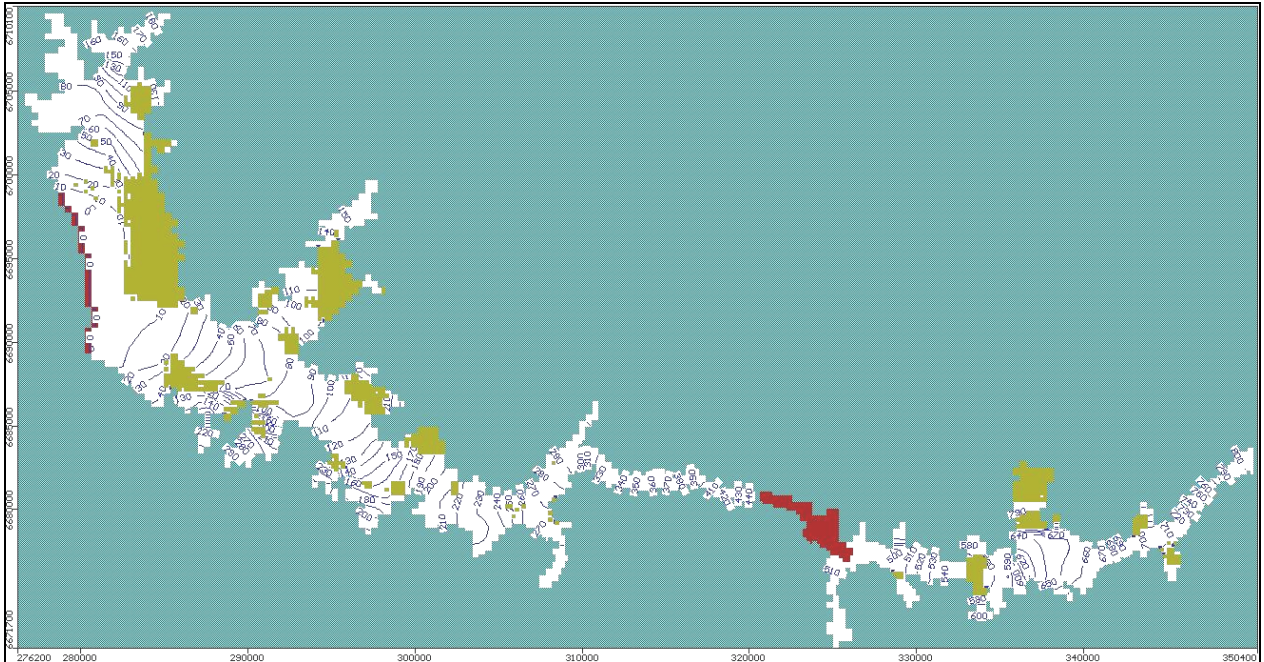


Figura 5-20 Equipotenciales en estrato superior para el mínimo volumen alcanzado en Operación C (Marzo 1997)

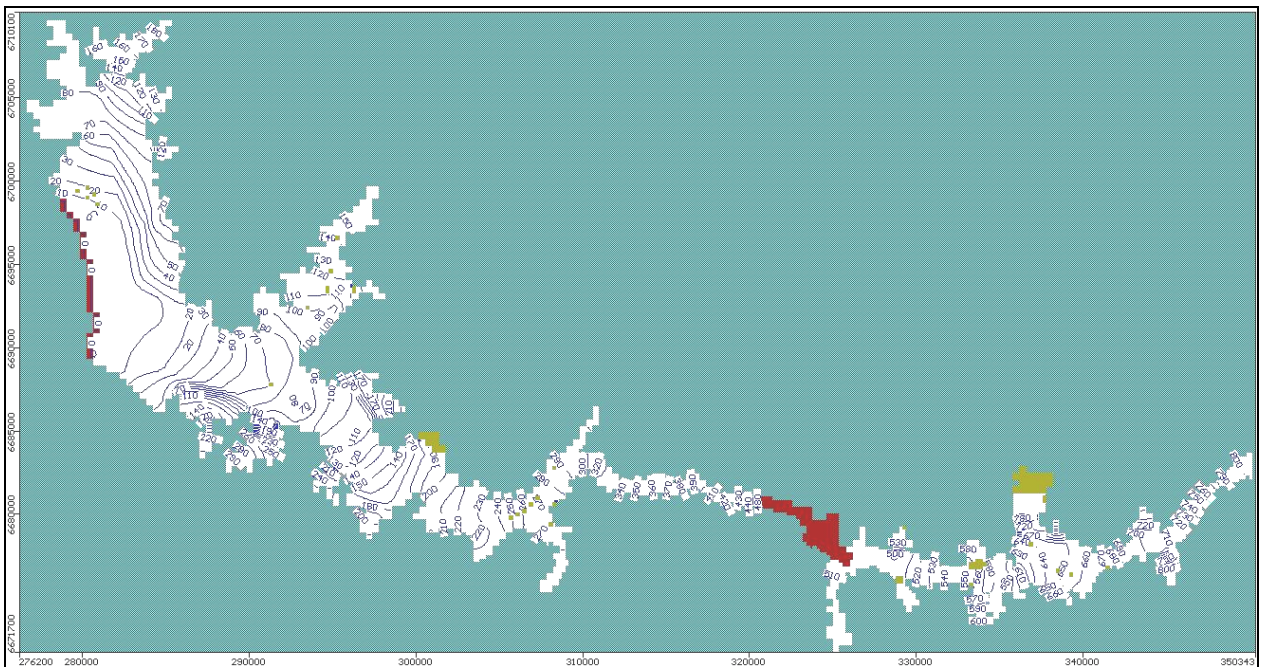


Figura 5-21 Equipotenciales en estrato inferior para el mínimo volumen alcanzado en Operación C (Marzo 1997)

5.3.1.7 Flujos Dependientes de Condiciones de Borde

Como indica el título de este acápite, en este se muestra el efecto que tienen en el balance hídrico subterráneo las condiciones de borde definidas en el modelo, durante la simulación de los escenarios de operación considerados en el análisis.

§ Condición de río

Para el caso del río Elqui, su representación como condición de borde tipo río tiene como resultado el aporte al balance hídrico del acuífero global que se muestra en la Figura 5-22, indicado como flujo neto, esto es, la entrada menos la salida de flujo del acuífero para cada intervalo de tiempo por concepto de percolación o afloramiento, desde o hacia el río, respectivamente.

Con excepción de los escenarios Operación B y C, en todos los demás escenarios y durante toda la simulación el flujo neto es negativo, lo que indica un afloramiento hacia el río. Los valores promedio de los flujos netos de los escenarios fluctúan entre -2941[l/s] (Operación 3) y -1601 [l/s] (Operación C).

Se destaca incluso que la Operación 7.2, la cual mantiene un descenso monótono en el volumen almacenado, es la que posee el menor aporte hacia el río en los últimos 6 años de simulación, cuyo mínimo en este periodo es aproximadamente 1,5 m³/s, manteniendo una diferencia de 1 m³/s respecto al escenario Base 1.

En todos los escenarios se manifiesta un claro carácter estacional de los aportes hacia el río, producto de la variabilidad de las acciones externas, viéndose estos bruscamente disminuidos en el periodo de sequía ocurrido en el periodo 1995/97.

Los escenarios B y C son los únicos que presentan en afluyente desde el río durante los periodos que tiene lugar el máximo de demanda de aguas subterráneas, cuyos valores máximos corresponden a 176 [l/s] y 321 [l/s], respectivamente.

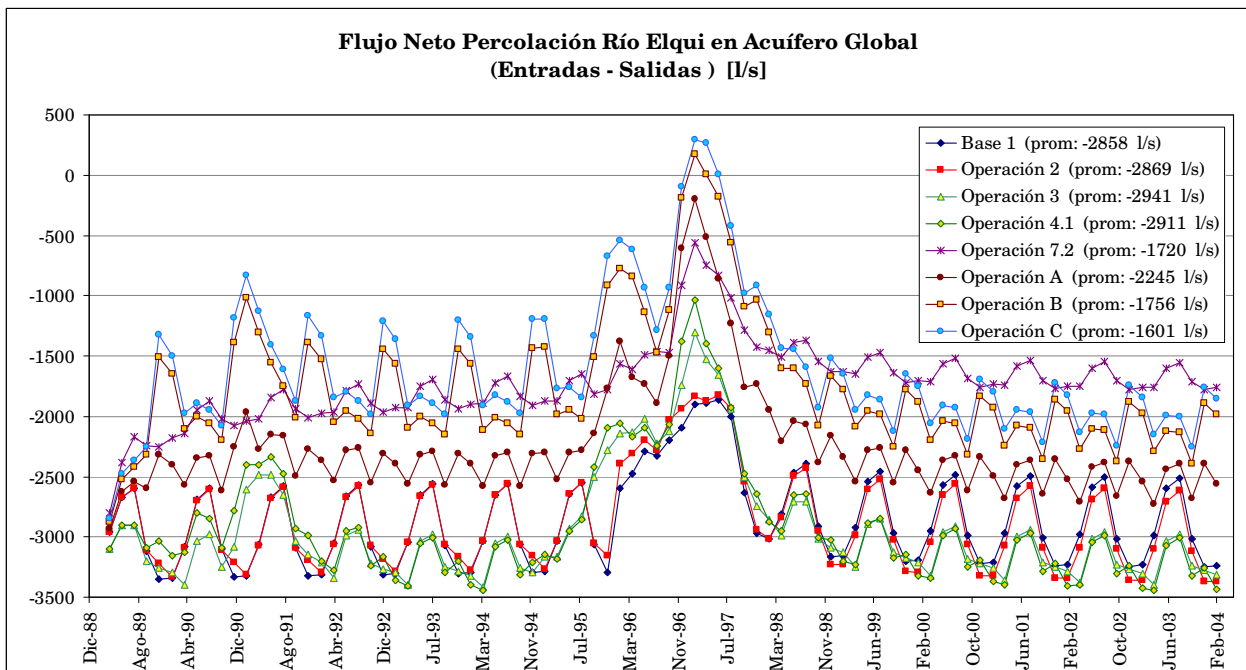


Figura 5-22

A modo de ejemplo, en la Figura 5-23 se muestra el resultado del aporte de esta condición de borde en los sectores de balance para el caso del escenario Operación A. Si bien el escenario Operación A tiene flujos netos negativos por la condición de río en el acuífero global durante los 15 años de simulación, se destaca el comportamiento de tiene el sector Elqui Bajo por ser el único que presenta infiltración durante la sequía, alcanzando un valor máximo de 434 [l/s] en el mes de febrero de 1997. El segundo sector en tener una variación significativa en sus aportes hacia el río corresponde a Elqui Alto. Por el contrario, los sectores de Elqui Medio y Serena Norte mantienen una situación de equilibrio durante la simulación, presentando flujos netos promedios de -668 [l/s] y -31 [l/s], respectivamente.

El comportamiento del flujo neto desde el río Elqui obtenido de los otros escenarios de operación en los sectores de balance se muestra en Anexo H.

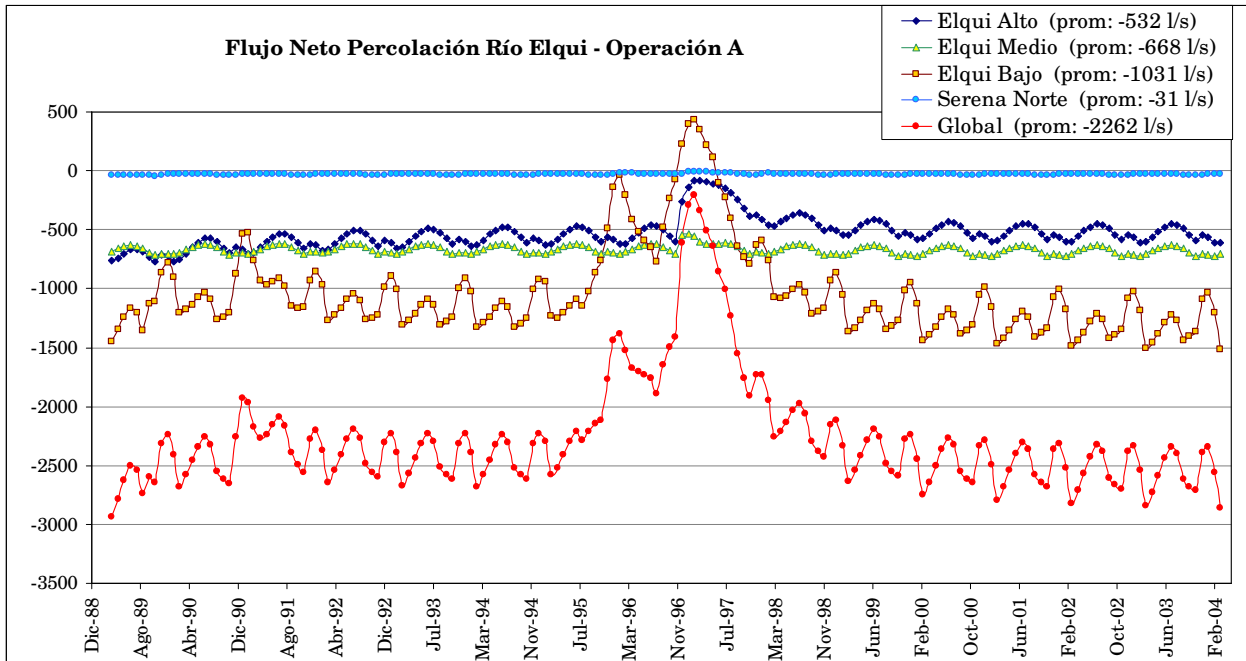


Figura 5-23

§ Condición de altura constante en el mar

El flujo neto promedio de salida hacia el mar que induce la condición de altura constante en el borde Este (Serena Norte) comprende sólo un rango de variación de 67 [l/s] entre los escenarios de operación.

En la Figura 5-24 se muestra el comportamiento del flujo neto de salida hacia el mar, en donde sólo se grafican cinco escenarios puesto que no se observa una diferencia significativa entre los que no se incluyen.

Se destaca que incluso para el escenario Operación 7.2, el más desfavorable en términos de sostenibilidad del volumen almacenado, el modelo no manifiesta en sus resultados la presencia de intrusión salina por cuanto no existe un flujo neto de salida hacia el mar negativo. Se observa que para el caso de la Operación 7.2, el cual presenta un descenso sostenido del volumen almacenado, el flujo neto de salida hacia el mar alcanza una situación de equilibrio de aproximadamente de 220 l/s.

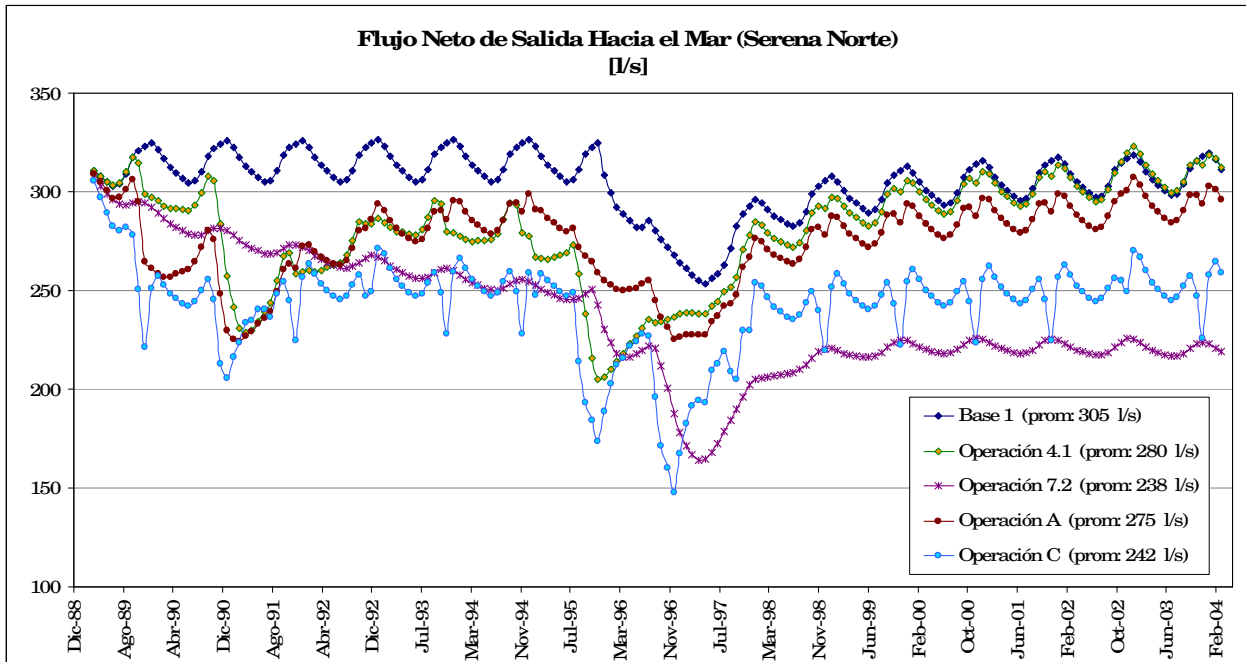


Figura 5-24

§ **Condición de altura constante en embalse Puclaro**

En la Figura 5-25 se muestran los aportes al flujo subterráneo que genera la condición de altura constante en el embalse Puclaro.

Se observa la influencia de la variación estacional de las acciones externas en las fluctuaciones del flujo desde esta condición de borde, el cual varía aproximadamente en un rango de 50 [l/s] bajo condiciones normales de operación.

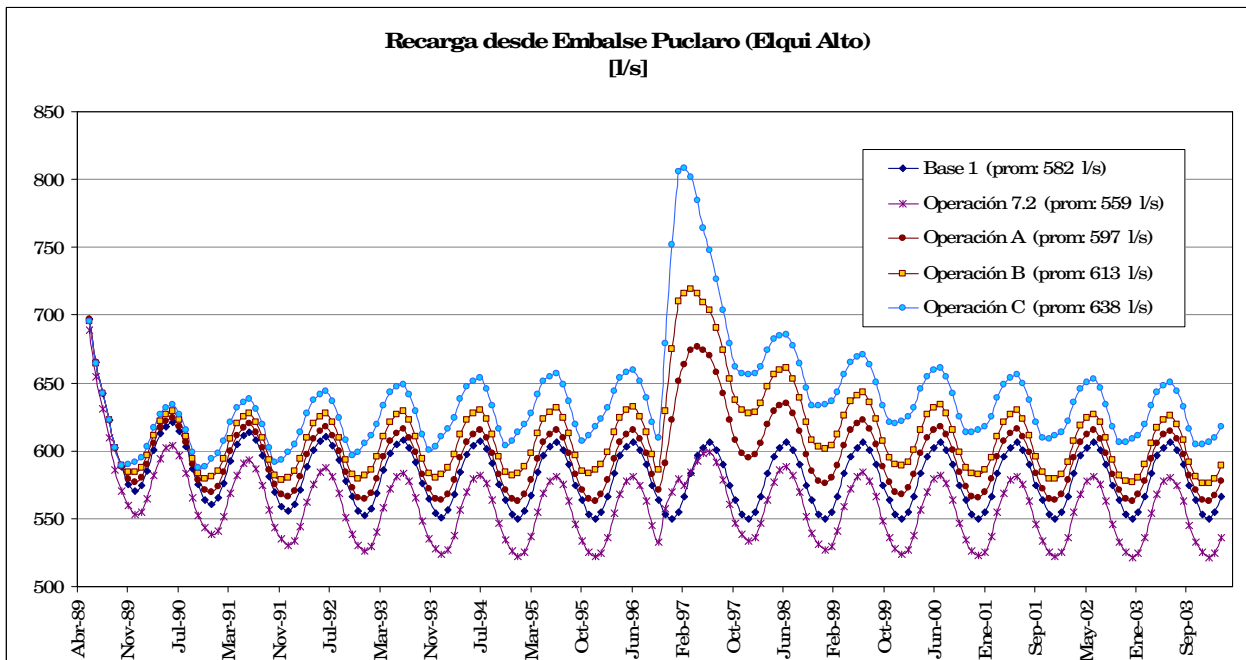


Figura 5-25

En cuanto al aporte del embalse en la sequía hidrológica, se observa un aporte considerable en la Operación C, alcanzando un máximo de 808 [l/s]. Sin embargo, como se muestra en la Figura 5-26 este aporte no influye en el flujo subterráneo pasante desde Elqui Alto hacia Elqui Medio, puesto que el este flujo continua fluctuando entre 621 y 623 [l/s] para todos los escenarios analizados. De esta forma, el máximo de 808 l/s de la Operación C se explica en la demanda de aguas subterráneas aguas arriba del embalse Puclaro.

Para efectos de cualquier análisis de estos resultados es preciso considerar que durante los escenarios el embalse fue representado en el modelo hidrogeológico a través de un nivel constante en su cota máxima de aguas normales, y en consecuencia resulta poco práctico considerar tal nivel en una eventual sequía hidrológica.

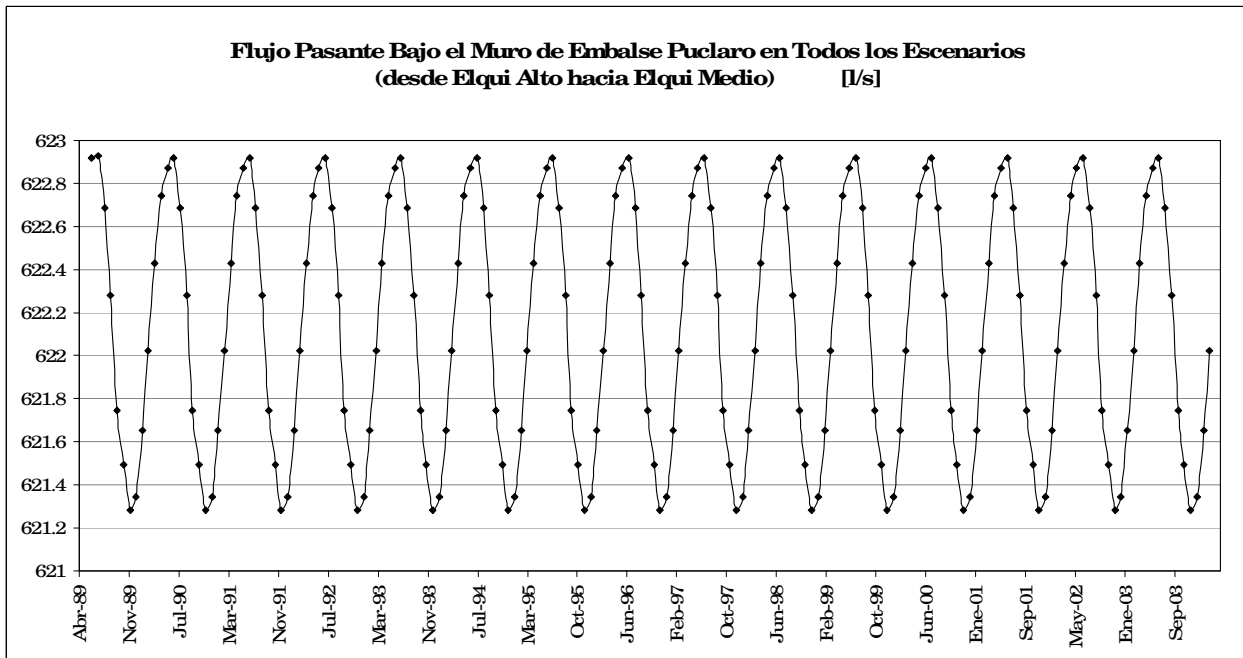


Figura 5-26

5.3.2 Escenarios con Simulación de 30 años

Dado el objeto de los escenarios Operación A.1 y A.2 en cuanto a ver la tendencia del sistema para un horizonte de tiempo más extenso, en esta sección sólo se muestra la evolución de la variación del volumen almacenado. Las series de recarga superficial y bombeo aceptadas por el modelo de simulación en estos escenarios se muestran en el Anexo I.

En la Figura 5-27 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de 30 años para el caso del acuífero global, donde se aprecia una significativa diferencia entre los dos escenarios considerados. Se observa que el escenario Operación A.1, que considera ausencia de extracciones de aguas subterráneas luego de la sequía hidrológica, no alcanza una situación de equilibrio al finalizar los 30 años de simulación, presentando un aumento en el volumen almacenado en aproximadamente 36 millones de m³ sobre el volumen de la condición inicial de referencia. Por el contrario, el escenario Operación A.2, en cuya definición considera la continuidad normal de la explotación de aguas subterráneas luego de la sequía, muestra una condición de equilibrio por debajo la condición inicial, de aproximadamente -20 millones de m³.

En el caso de la Operación A.1, cuya descomposición del volumen almacenado por sectores de balance se muestra en la Figura 5-28, la tendencia a aumentar el volumen almacenado en el embalse subterráneo está influenciada principalmente por el sostenido aumento del volumen en el sector Santa Gracia luego del término de los bombeos.

En términos globales, en la Operación A.1 el volumen de agua del embalse subterráneo según indica la Figura 5-27 es recuperado aproximadamente al cabo de 3 años una vez terminada la sequía hidrológica (aproximadamente julio de 1997). No obstante, es importante considerar que cada sector de balance tiene una tendencia distinta.

En la Operación A.1 el sector Elqui Alto alcanza una nueva situación de equilibrio en torno a 13 millones de m³ bajo la situación inicial. El sector Elqui Medio mantiene el volumen inicial debido a su baja explotación. El sector Elqui Bajo, que previo al evento de sequía alcanza un equilibrio en torno a 7 millones de m³ bajo el volumen inicial, posterior a la sequía alcanza este valor en 2 años, mientras que recupera el volumen inicial aproximadamente en 6 años. El sector Serena Norte recupera el volumen inicial al cabo de 2 años luego de la sequía.

En definitiva, de los resultados obtenidos de la simulación de la Operación A.1 es de interés el hecho que pese a que el sector Elqui Alto tiende a una nueva situación de equilibrio, los demás sectores de balance alcanzan con relativa rapidez el volumen inicial una vez que se suspende la explotación de aguas subterráneas al terminar la sequía hidrológica. Con una recarga superficial global promedio de 2900 l/s, un bombeo global promedio previo a la sequía de 1228 l/s, y un caudal máximo mensual durante la sequía de 7895 l/s, este escenario permite tener un rango de magnitud válido para la libre comparación con los escenarios con duración de 15 años. Los valores de las acciones externas en cada sector de balance para esta escenario se indican en el Anexo I, Tabla I-1.

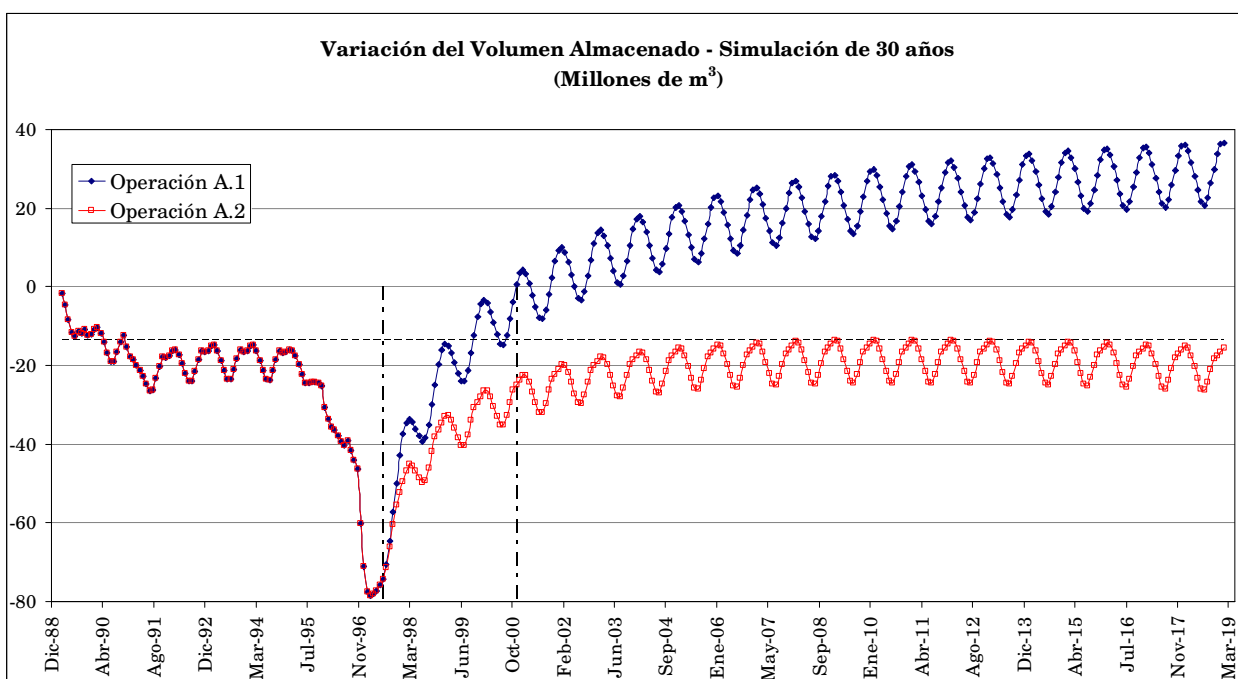


Figura 5-27

En la Figura 5-29 se muestra el caso de la Operación A.2. Si bien el volumen almacenado en el acuífero global alcanza un estado de equilibrio, solamente el sector Elqui Medio mantiene un comportamiento estacionario conservando el volumen inicial. Lo anterior ocurre porque la tendencia a aumentar el volumen almacenado en los sectores Santa Gracia y Serena Norte es compensada por la disminución en Elqui Alto y Elqui Bajo.

En la Operación A.2, escenario que representa una extensión de la Operación A (de 15 años de duración), la divergencia en las tendencias de los volúmenes almacenados en los sectores de balance, excepto para Serena Norte y pese a que es notoria una recuperación del volumen almacenado una vez terminada la sequía hidrológica, sólo permite establecer que para el acuífero global el escenario alcanza aproximadamente en un periodo de 10 años el volumen al cual tiende previamente a la ocurrencia de la sequía hidrológica. A modo de referencia y comparación con la Operación A.1, en la Operación A.2 el sector Serena Norte tarda aproximadamente 7 años en alcanzar el volumen inicial.

El sostenido aumento en el volumen del embalse subterráneo en el sector Santa Gracia, en ambos escenarios, se debe principalmente a dos factores. El primero es el hecho que en este sector se extrae prácticamente lo mismo que se recarga, por lo que al secarse una parte importante de los pozos de bombeo, como ocurre en dos ocasiones durante la simulación, el aumento del volumen es significativo. El secamiento de los pozos se puede observar en el Anexo I, Figura H-2.

El segundo factor es que este sector no posee una condición de borde que permita liberar el exceso de recarga, a diferencia de los otros 4 sectores de balance que poseen el río. Lo anterior se explica en la Figura 5-30, en donde se aprecia un claro aumento en el afloramiento hacia el río una vez que se cesa el bombeo de la Operación A.1

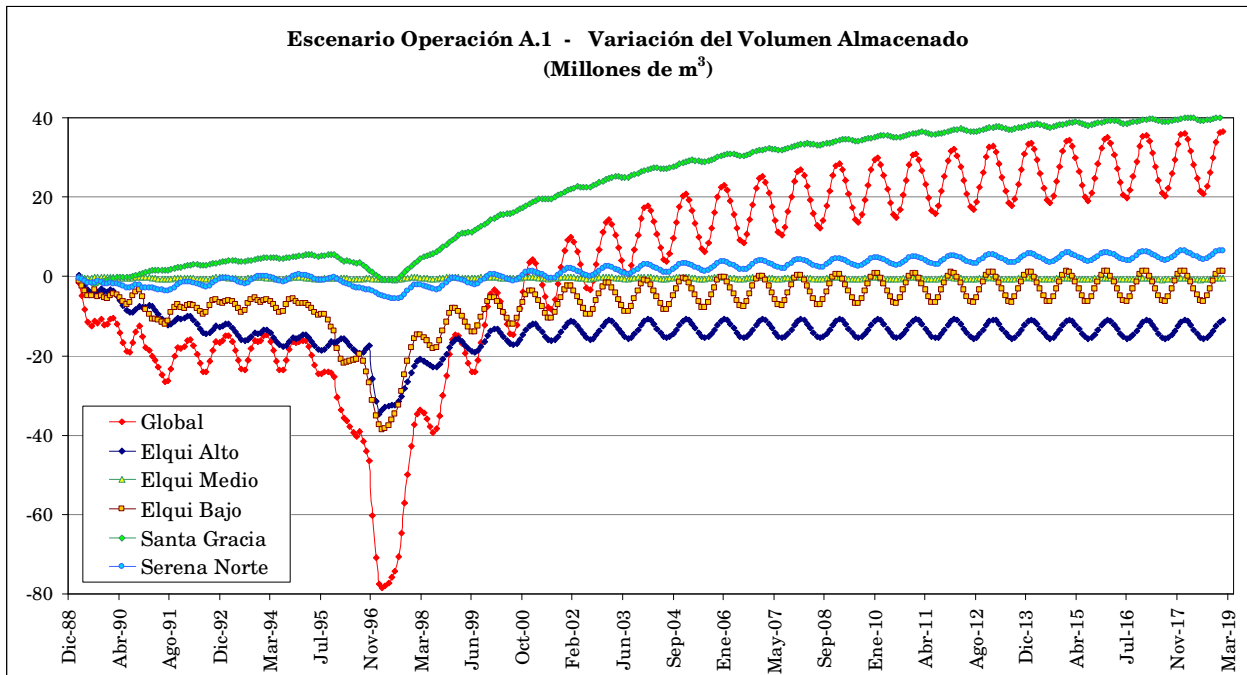


Figura 5-28

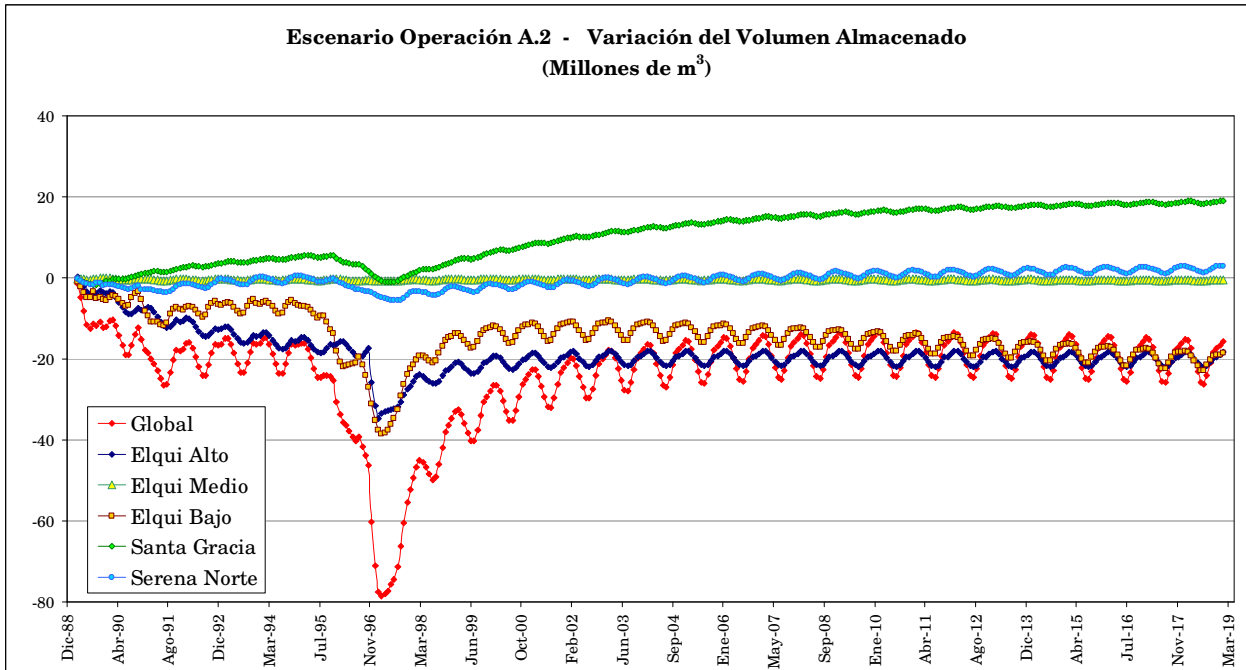


Figura 5-29

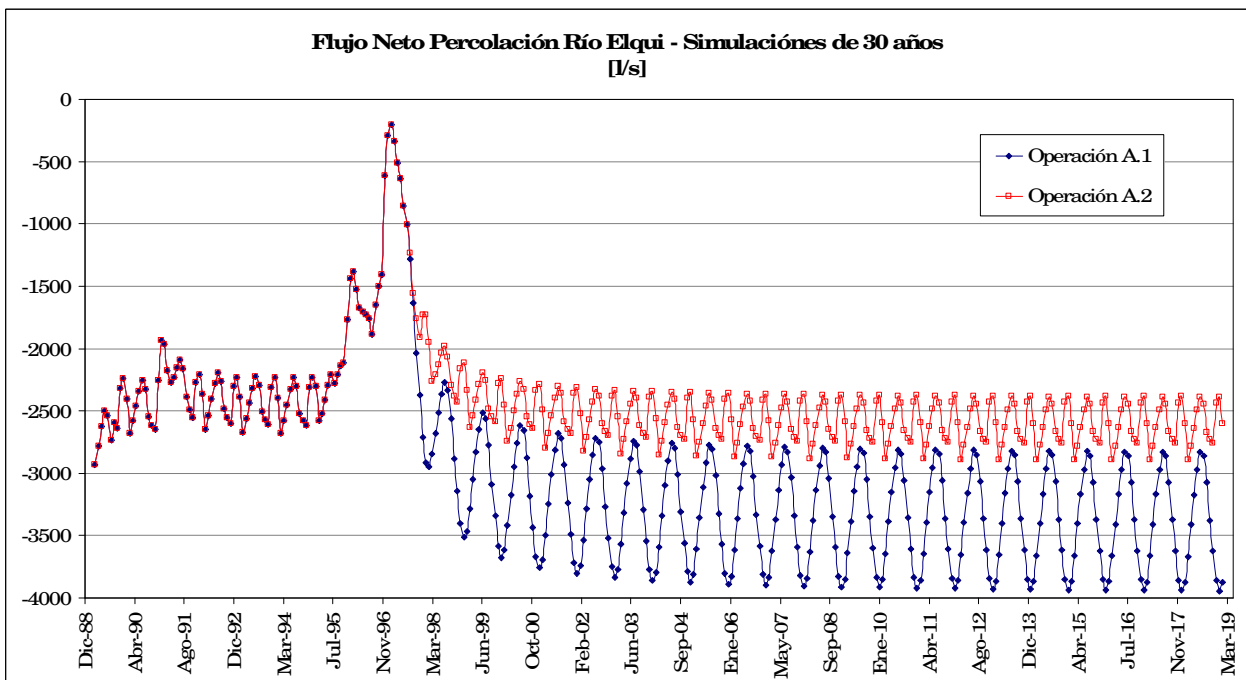


Figura 5-30

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El motivo de este estudio ha sido abordar el concepto del manejo conjunto de los recursos hídricos superficiales y subterráneos a través del análisis de la respuesta del acuífero del Valle del río Elqui frente a escenarios que permiten una mayor tasa de extracción de aguas subterráneas en periodos de sequía y la cuantificación de eventuales tasas de recuperación del volumen almacenado una vez que se reestablecen las condiciones hidrológicas normales.

Así pues, el término *embalse subterráneo*, utilizado como parte del título de este estudio para referirse al acuífero, y que por cierto ha sido acuñado a lo largo de la historia de la hidrogeología para establecer un paralelo al término *embalse superficial*, por cuanto considera el concepto de almacenamiento para una posterior explotación del agua en reserva, ha sido empleado en este trabajo de título puesto que tras él subyace el concepto de explotación óptima, entendido como un uso racional que tiene en cuenta los recursos permanentes, las reservas existentes, la regulación natural de los acuíferos y las condicionantes de la demanda, como puede ser el caso de una sequía hidrológica.

En este estudio se utiliza como base el modelo de simulación hidrogeológico de la Dirección General de Aguas para el acuífero del Valle del Elqui, implementado en Visual Modflow, y los resultados obtenidos del estudio *Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua – Estudio de caso en la Región de Coquimbo*, desarrollado por CAZALAC, el cual, utilizando un modelo hidrológico de balance que incorpora información coherente y representativa de la realidad económica de la zona en estudio, entrega información de su impacto en la utilización del recurso hídrico, representando satisfactoriamente la hidrología superficial y la operación del sistema en su conjunto.

Dicho lo anterior, respecto al trabajo desarrollado se destacan los siguientes comentarios:

§ A partir de la información de entrada, correspondientes a las demandas de aguas subterráneas y recarga superficial y subterránea, y modificaciones al modelo de simulación hidrogeológico implementado en Visual Modflow, se logró calibrar el modelo a nivel mensual entre el periodo Abril 1999 –Marzo 2004, destacando los siguientes resultados:

- Se obtiene un balance hídrico subterráneo con un -0,05% de error y un buen grado de ajuste de los niveles freáticos en 24 pozos de observación distribuidos en el Valle, con un total de 784 observaciones, destacando los estadísticos: *error promedio* con un valor de -1,19 m, el *error cuadrático medio* de 3,89 m y el *error cuadrático medio normalizado* de 0,5%, lo que se considera una satisfactoria representación regional del nivel freático del acuífero, acorde con los objetivos del estudio.
- La percolación desde canales de distribución y percolación desde las zonas de riego constituyen el 74% y 26% de la recarga superficial considerada en el modelo de simulación hidrogeológico, respectivamente.
- Del balance hídrico subterráneo global y de los sectores de balance definidos destaca un afloramiento promedio de 3043 l/s del acuífero global hacia el río Elqui, un flujo promedio de salida hacia el océano de 309 l/s y un flujo pasante bajo el muro del embalse Puclaro con un promedio de 362 l/s y un máximo de 600 l/s que tiene lugar en el último tercio del periodo de calibración, cuando el embalse Puclaro se encuentra cercano a su cota máxima de aguas normales.

§ De los 8 escenarios de operación de 15 años de simulación, que se extienden entre abril de 1989 y marzo de 2004 – periodo que destaca por contener la sequía hidrológica ocurrida entre los años 1993 y 1997 – y cuyas características modifican la operación del sistema teniendo como

consecuencias cambios directos en la explotación de los acuíferos y en la recarga superficial de estos, se menciona lo siguiente:

- El balance hídrico subterráneo de las simulaciones es satisfactorio, obteniendo errores entre -4 l/s ($-0,09\%$) y -55 l/s ($-0,97\%$).
- Respecto a la evolución del volumen almacenado en el embalse subterráneo luego del cese de la sequía hidrológica, se establecen los siguientes grupos de escenarios en función de la variación del volumen de agua alcanzada en los últimos periodos de simulación relativo a la situación inicial:
 - i. *Grupo 1* : Los escenarios de Operación 2 , 3 y 4.1 alcanzan a recuperar el volumen inicial al cabo de 7 años del término de la sequía hidrológica, manteniendo su operación posterior a este evento. Un aspecto que destaca de la simulación de la operación 2, 3 y 4.1 es que son los únicos escenarios que presentan una ganancia de almacenamiento promedio en su balance hídrico, con los valores de 6 , 7 y 10 l/s, respectivamente (Ver Anexo F)
 - ii. *Grupo 2* : Los escenarios Base 1 y Operación A, que terminan en el último periodo de simulación con una diferencia de 16 millones de m^3 bajo el volumen de referencia, mostrando tendencia a alcanzar una situación de equilibrio ligeramente menor a la inicial.
 - iii. *Grupo 3* : Los escenarios de Operación B y C, correspondientes a los que poseen las mayores tasas de extracción de aguas subterráneas, finalizan con una diferencia de 44 y 50 millones de m^3 bajo el volumen de referencia, respectivamente, marcando una tendencia a estabilizarse en una nueva situación de equilibrio con un volumen aproximado de 40 millones de m^3 inferior al inicial.
 - iv. *Grupo 4* : Comprende sólo al escenario de Operación 7.2, que manifiesta un monótono descenso del volumen almacenado en el embalse subterráneo, alcanzando un volumen de 112 millones de m^3 inferior a la situación inicial, lo que permite descartar a este escenario como una operación factible por cuanto la recarga superficial, que sólo considera la percolación desde las zonas de riego, no es suficiente para recuperar el volumen de referencia. Este escenario de operación, que en su definición contempla la entubación de los canales de distribución en los sectores bajo el embalse Puclaro y la tecnificación del riego en los sectores de Elqui Medio, Elqui Bajo y Serena Norte, y que se determina como un escenario viable en el estudio de Cazalac-Rodhos (2006), en función de los resultados obtenidos en este trabajo de título se considera a este como un escenario nocivo para la sustentabilidad de los recursos subterráneos, puesto que intenta independizar el embalse subterráneo de las aguas superficiales limitando significativamente su recarga.
- Entendiendo por tasa de recuperación como el aumento promedio del volumen almacenado en un determinado periodo de tiempo, y a partir de cierto instante, sobre los valores obtenidos para estas tasas en el embalse subterráneo, en términos del acuífero global y considerando sólo las que presentan un valor positivo, estas fluctúan entre $1,72$ $Hm^3/año$ y $3,94$ $Hm^3/año$. Al momento de buscar una explicación a estos valores, es importante considerar que por ejemplo, el escenario Base 1 tiene una tasa de $1,72$ $Hm^3/año$, mientras que el escenario Operación A alcanza un valor de $3,13$ $Hm^3/año$, pese a que ambos terminan la simulación con un volumen almacenado global similar. Lo anterior tiene su explicación en el hecho que el escenario Base 1, con caudales menores, sus pozos tienen una operación continua durante la simulación, mientras que en el caso de la Operación A, con una demanda promedio suplida de 2,47 veces la demanda promedio suplida del escenario Base 1 y una recarga superficial de 1,02 veces el mismo escenario, parte importante de sus pozos de bombeo se secan con el aumento de la demanda por la sequía hidrológica, impidiendo retomar el caudal normal solicitado una vez que termina la sequía; por consiguiente, al no poder continuar con la extracción y volviendo la

recarga superficial a su condición normal, se obtiene una alta tasa de recuperación. Es por esto que se considera fundamental observar las series de bombeo aceptadas por el modelo de simulación al momento de analizar los resultados, con el objeto de no dejarse llevar por el valor promedio durante toda la extensión de la simulación.

- Sobre el comportamiento de las tres condiciones de borde impuestas al modelo de simulación, destaca la situación del río Elqui por la significancia en la magnitud de los flujos que se generan. Los flujos netos promedio (entradas – salidas) en los 8 escenarios de operación para el caso del acuífero global varían entre -1601 l/s y -2911 l/s, cuyos valores absolutos se interpretan como afloramientos hacia el río. El único sector que percibe infiltraciones desde el río corresponde a Elqui Bajo en los escenarios de operación 7.2, A, B y C, donde la infiltración ocurre durante la máxima influencia de la sequía hidrológica, que tiene lugar entre diciembre de 1996 y mayo de 1997, alcanzando como máximo valores cercanos a 500 l/s. Este resultado permite estimar un cambio notorio en el régimen del río durante la fase más nociva de la sequía puesto que su escurrimiento superficial se vería disminuido en 0,5 m³/s.
- La condición de borde de altura constante en el mar presenta una baja variación en los flujos que se generan como salidas hacia el mar en los distintos escenarios, variando entre 238 l/s y 305 l/s como promedio. A modo de referencia, el escenario que presenta el mínimo flujo neto hacia el mar corresponde al escenario de operación C, con un valor aproximado de 150 l/s en el mes de noviembre de 1996.
- La condición de borde de altura constante en el embalse Puclaro genera recargas promedio entre 559 l/s y 638 l/s para el acuífero. En el periodo de sequía hidrológica, el flujo neto máximo lo presenta la Operación C, con un valor aproximado de 800 l/s, sin embargo, estos máximos generados por el aumento de la demanda no se ven reflejados en el flujo pasante bajo el muro del embalse, cuyo valor fluctúa entre 621 l/s y 623 l/s en todos los escenarios de operación considerados debido al carácter estacional de las acciones externas. Es preciso considerar que según datos de la Junta de Vigilancia se estiman filtraciones del embalse Puclaro entorno a 40 l/s para niveles de agua cercanos a su capacidad máxima, por lo que es necesario considerar este factor al momento de analizar los resultados que de aquí se desprenden.

§ De la simulación de los escenarios de 30 años de duración se destaca lo siguiente:

- Operación A.1: En este escenario que considera una suspensión sobre el uso de aguas subterráneas una vez terminada la sequía hidrológica – escenario cuya recarga superficial promedio es de 2900 l/s con un bombeo promedio previo a la sequía de 1228 l/s y un bombeo máximo mensual durante la sequía de 7895 l/s – el resultado de la simulación muestra que en el acuífero global el volumen inicial se recupera aproximadamente en 3 años. El sector Elqui Alto, que tiende a recuperar el volumen almacenado posteriormente a la sequía hidrológica, alcanza una nueva situación de equilibrio en torno a 13 millones de m³ bajo el volumen inicial. No obstante, los sectores Serena Norte y Elqui Bajo alcanzan una recuperación del volumen inicial en un periodo de tiempo aproximado de 2 y 6 años, respectivamente. Los sectores Santa Gracia y Elqui Medio debido a su poca explotación no se ven afectados por la sequía.
- Operación A.2: De este escenario que resulta ser una extensión de la Operación A, la simulación entrega una tendencia del volumen almacenado a estabilizarse en torno a 20 millones de m³ bajo el volumen inicial. No obstante, posteriormente a la sequía este volumen es alcanzado en tiempo aproximado de 10 años.
- De los dos párrafos anteriores se establece una notoria diferencia en el tiempo de recuperación del volumen almacenado en el embalse subterráneo entre considerar una suspensión de la explotación una vez terminada la sequía versus continuar con una operación normal.

- La respuesta de estos escenarios en el modelo de simulación en cuanto a alcanzar un volumen almacenado de equilibrio para el acuífero global, además de las magnitudes de su recarga superficial y explotación, permiten establecer un referencia válida para su comparación con los escenarios de 15 años de duración, de los cuales sólo el Grupo 1 alcanza a recuperar el volumen inicial en un periodo de 7 años aproximadamente.

En definitiva, pese a que en diversos escenarios de operación los resultados obtenidos muestran que el acuífero tiende a alcanzar una nueva situación de equilibrio, al analizar el efecto que induce la sequía hidrológica al hacer posible una mayor explotación del agua subterránea se observa una tendencia a la recuperación del volumen utilizado durante esta una vez que se recuperan las condiciones de recarga normales incluso considerando una continuidad en la explotación normal de este, aunque es necesario precisar que esta recuperación de volumen es significativamente más rápida si se considera una suspensión de la explotación del agua subterránea una vez terminada la sequía con el objeto de reestablecer los niveles piezométricos del acuífero para garantizar la seguridad del sistema frente a una eventual nueva sequía hidrológica.

En este sentido, en base a los resultados del modelo de simulación hidrogeológico implementado se considera como viable la posibilidad de un uso más intensivo del agua subterránea en situaciones como una sequía hidrológica, sobre todo si se considera el aumento de la recarga desde el río ante una disminución del volumen embalsado y frente a la existencia de un caudal vertido al mar en el río Elqui de aproximadamente 6,3 m³/s, siempre y cuando se proteja la disponibilidad de derechos de agua superficiales y se considere la normativa en cuanto a caudales ecológicos.

Finalmente, es esencial tener presente que para que un modelo hidrogeológico pueda entregar tendencias correctas del comportamiento del acuífero, es ineludible la necesidad de disponer de información de buena calidad para la asertividad de los resultados.

6.2 Recomendaciones

De los resultados obtenidos del modelo de simulación hidrogeológico, se consideran de importancia los siguientes aspectos:

- § Incorporar información de interés hidrogeológico que permita mejorar la representación del sector Santa Gracia, puesto que no se posee un registro de pozos de observación ni valores de constantes de elasticidad de su acuífero.
- § Debido a la importancia que representa la percolación desde canales de distribución hacia el acuífero en la recarga superficial de los sectores definidos, correspondiente a un 74% en el acuífero global, se considera importante mejorar la estimación que se tiene de estos flujos, puesto que la recarga superficial es relevante al momento de obtener resultados concluyentes que permitan establecer políticas de explotación a partir de resultados que se obtienen de modelos de simulación.
- § Como se observó en los resultados alcanzados en la calibración, la importancia en magnitud de los flujos que provienen desde el sector Elqui Alto hacia Elqui Medio, condicionados básicamente con la presencia de embalse Puclaro, hace necesario contar con información que permita mejorar la representación de esta condición de borde en el sistema, que al igual que el río Elqui, son factores muy significativos en el modelo conceptual al momento de asegurar la idoneidad de la calibración del modelo de simulación para los objetivos del estudio.
- § Destacan los flujos netos de salida como afloramiento hacia el río Elqui que alcanzan valores cercanos a los 3000 l/s en la calibración del modelo. En consecuencia, se considera apropiado realizar un análisis sobre la representación de la interacción entre el río y el acuífero, con el objeto de confirmar o mejorar los valores que se consideran para la conductancia del río en sus tramos definidos o su conductividad hidráulica vertical y espesor del lecho en estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CAZALAC-RODHOS-GOBIERNO REGIONAL IV REGION CHILE. 2006. Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua – Estudio de caso en la Región de Coquimbo.

CELEDÓN C., E. 2007. La Importancia de los modelos en la evaluación de los recursos hídricos y la administración de cuencas. Revista Vertiente - Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, ALHSUD (10):17-23.

CELEDÓN S., E. y CELEDÓN C., E. 2007. Importancia de los embalses subterráneos. Revista Vertiente - Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, ALHSUD (10):46-52.

CEPEDA J.; CABEZAS R.; BODINI A. y ROBLES M. 2005. Descripción cartográfica de la hoya hidrográfica del Valle del Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile. Universidad de La Serena – Universidad of Regina.

CORFO. 1955. Valle del Elqui, Chile – Investigación de agua subterránea. Informe preparado para la CORFO por del Departamento del Interior de EE.UU., Bureau of Reclamation.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. 1976. Hidrología subterránea. Barcelona, España.

DÍAZ M., J. 2007. Análisis hidrológico de sequías en zonas agrícolas de la IV Región usando técnicas espaciales. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2003. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui, IV^a Región. Informe Técnico SDT N° 161. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad – Cuenca del río Elqui. [en línea]
<http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Elqui.pdf>

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2005. MAGIC: Modelación analítica, genérica e integrada de cuencas - Manual de referencia técnica y de usuario. Ministerio de Obras Públicas.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2006. Evaluación de la explotación máxima sustentable en el acuífero del Valle del Elqui. Informe Técnico SDT DGA N° 87. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

ESPILDORA , B. y PALMA G. 1977. Modelo de simulación hidrológica en la Hoya hidrográfica del Río Elqui. Universidad de Chile, Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

ESPINOZA, C. 2007. Apuntes del Curso: Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento, CI51J, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

ESPINOZA, C. 2008. Apuntes del Curso: Modelación de aguas subterráneas, CI66J, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

GANGAS, A. 2007. Groundwater modeling and comprehensive modeling of the resources in Chile – Cases of application in arid and semiarid regions. International training workshop on groundwater modeling in arid and semi-arid areas, G-Wadi 2007, Lanzhou China.

- HONORES, C. y ALFARO, C. 2002. Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico superficial en los cauces controlados de las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. La Serena, Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería.
- KARZULOVIC, J. y CELEDÓN, E. 1971. Informe hidrogeológico de la región de asentamientos Valle del río Elqui y zona de El Peñón – Cerro Pan de Azúcar. CORA.
- MONSALVE M., A., RETAMAL, D. 1957. Memoria sobre el estudio: Valle del Elqui, Chile – Investigación de agua subterránea. Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas, Junio 1957.
- MPODOZIS, C. y CORNEJO, P. 1988. Carta Geológica de Chile escala 1:250.000. Hoja Pisco Elqui IV Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile.
- NOVOA J. y LÓPEZ, D. 2001. Capítulo 2: IV Región: El escenario geográfico físico. En: SQUEO, F.; ARANCIO, G. y GUTIÉRREZ, J. (Eds.). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena. Chile.
- ORPHANOPOULOS, D.; CHÁVEZ, A. y SOTO, G. 2007. Eficiencia de uso del agua – Metodologías para determinarla. En: XVIII CONGRESO CHILENO de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- PASKOFF, R. 1970. Recherches géomorphologiques Dans le Chili semi-aride. Biscaye Frères. Bordeaux.
- SCIENTIFIC SOFTWARE GROUP (SSG). 2009. Descripción de Visual Modflow. [en línea] <http://www.scisoftware.com/products/visual_modflow_details/visual_modflow_details.html>
- ROMERO, H.; ROVIRA, A. y VÉLIZ G. 1988. Geografía IV Región de Coquimbo. Colección de Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- ROVIRA, A. 1984. Geografía de los Suelos. Colección de Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- SÁNCHEZ, A. y MORALES, R. 1993. Las Regiones de Chile – Espacio Físico y Humano-Económico. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2004. Guidelines for evaluating ground-water flow models. U.S. Department of the Interior, Virginia, EE.UU.
- VON FREY, A. 2004. Modelación del acuífero de la zona norte de Santiago. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC INC. 2006. Visual Modflow User's Manual.
- ZAMBRANO, M.; PAGLIERO, L.; ROJAS, R. y GANGAS, A. 2003. MAGIC: Modelación integrada de cuencas y acuíferos. Revista Vertiente – Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, ALHSUD (8):39 – 44.

ANEXO A NIVELES OBSERVADOS Y CALCULADOS EN PERIODO DE CALIBRACIÓN

En esta sección se indican los niveles piezométricos observados y calculados durante el periodo de calibración de los 27 pozos de observación considerados. Los gráficos se muestran con un rango de 50 m para que el comportamiento de los niveles en los pozos sean comparables.

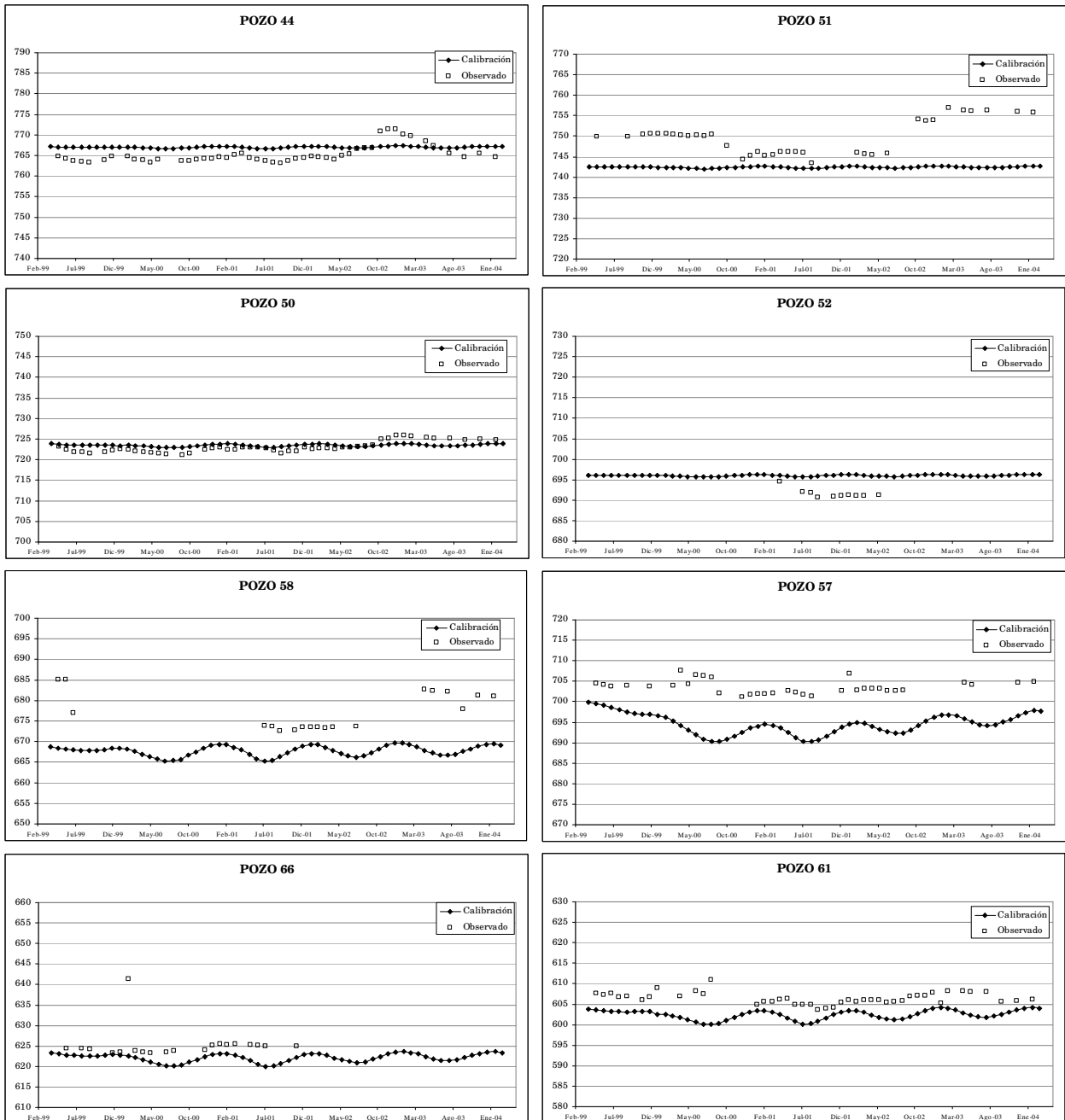


Figura A-1

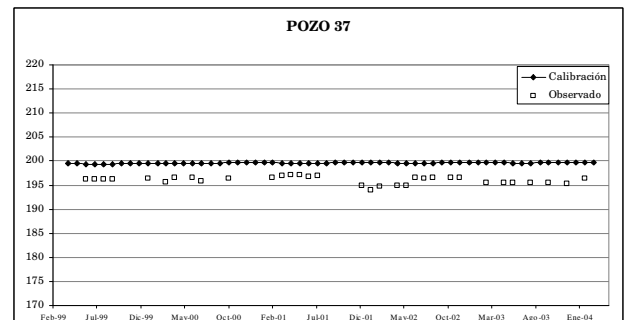
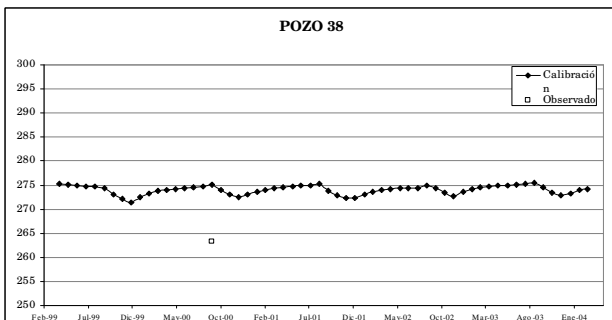
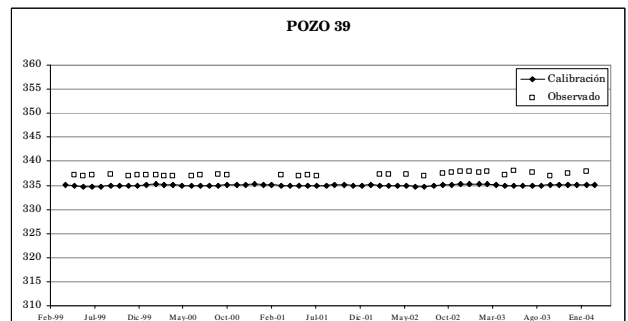
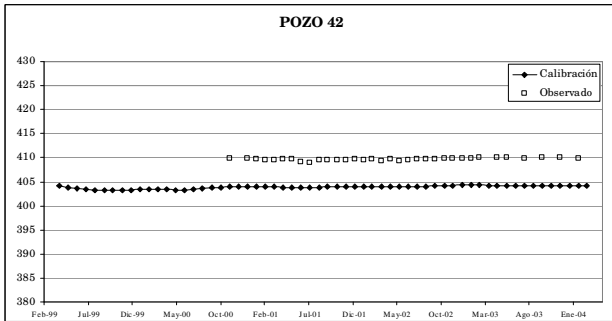
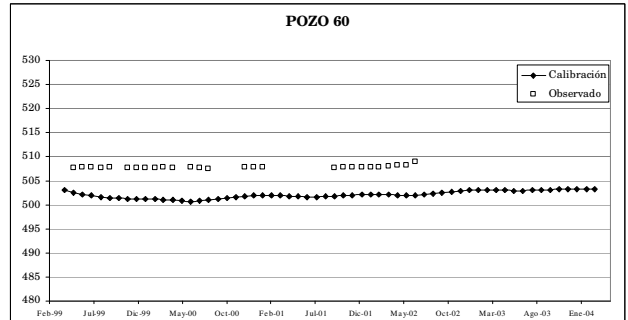
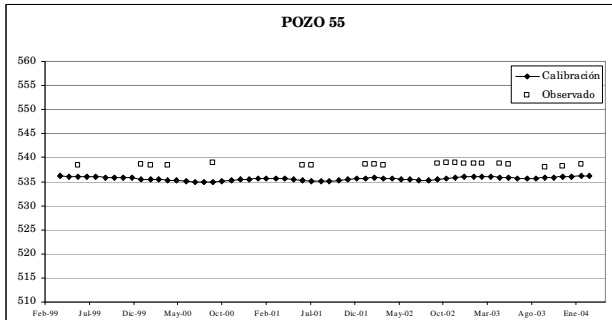
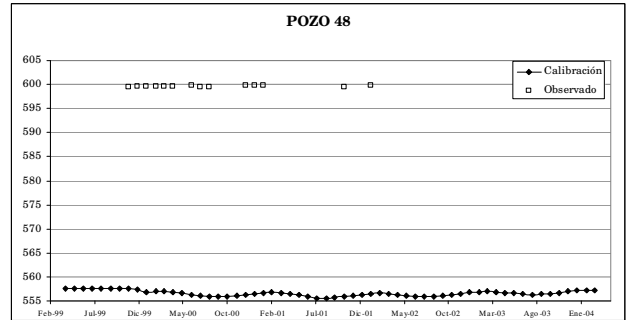
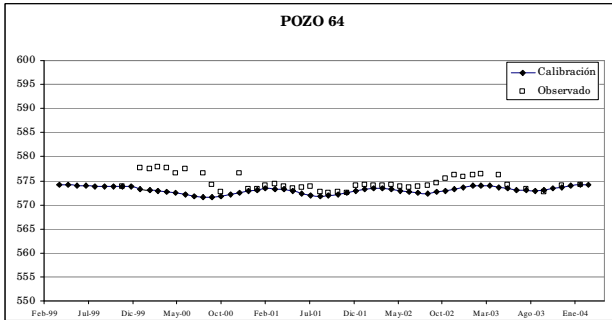
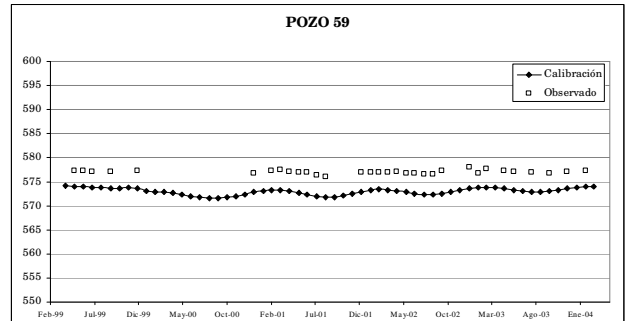
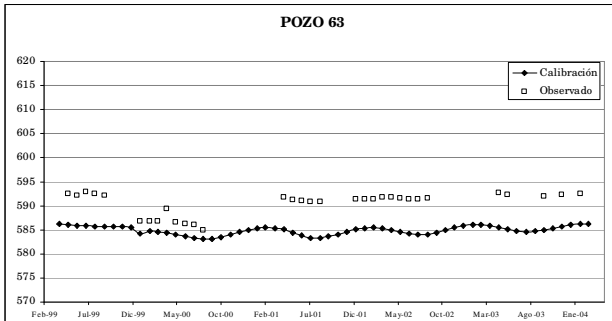


Figura A-2

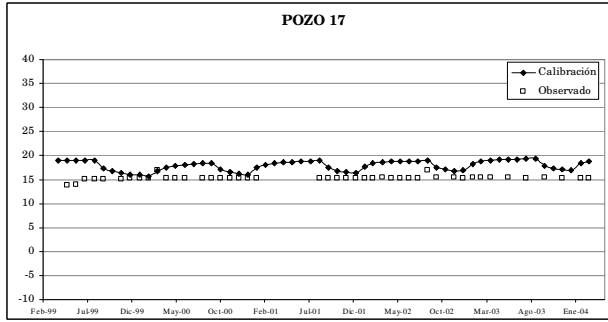
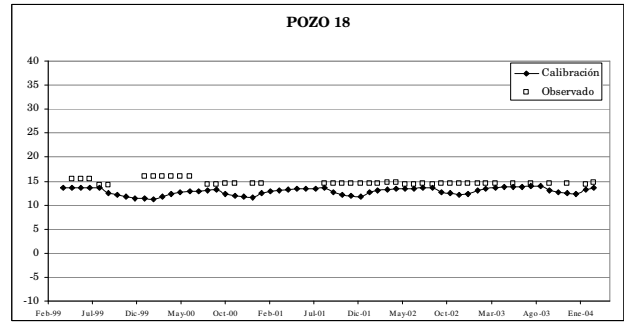
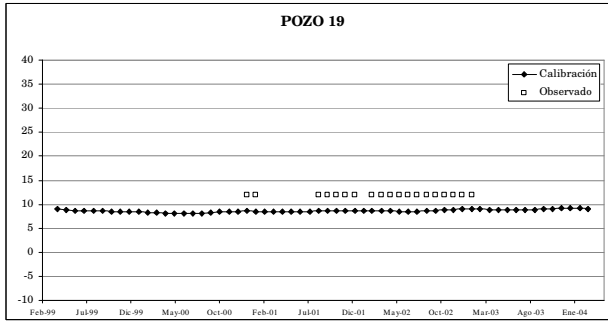
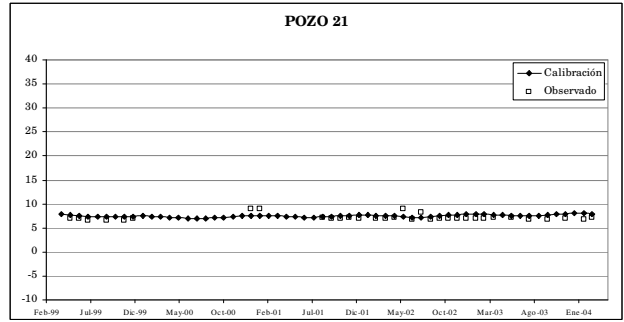
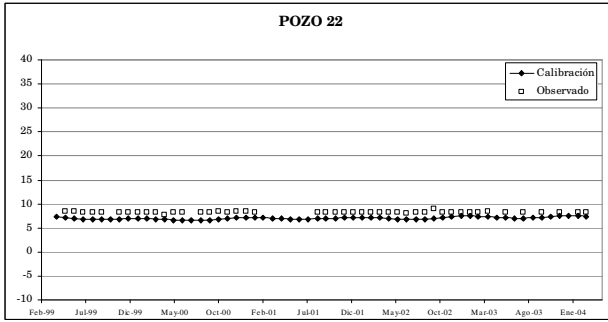
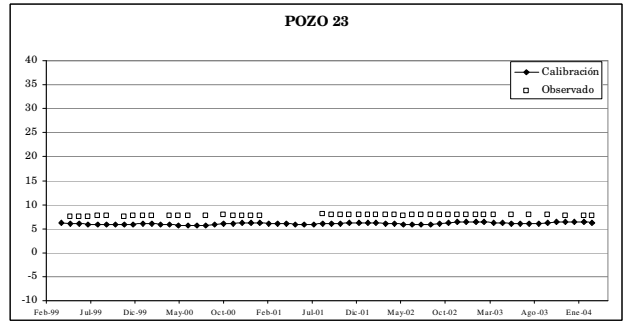
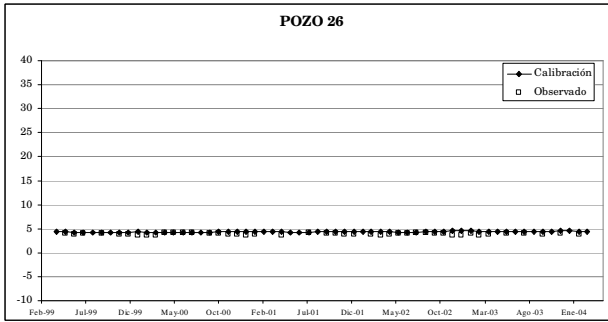
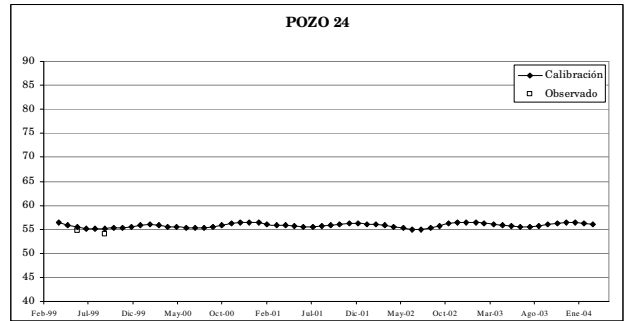
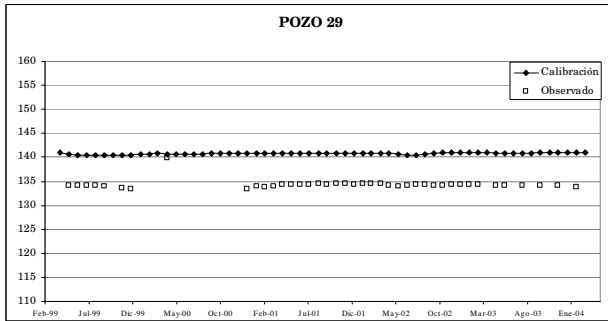


Figura A-3

ANEXO B POZOS DE OBSERVACIÓN

Tabla B-1 Pozos de observación considerados en calibración

Pozo	Ac.	Nombre	Cód. BNA	Coord. Nominales		Desp. en Modelo		Coord. en Modelo	
				UTM E	UTM N	Este [m]	Norte [m]	UTM E	UTM N
POZO 44	EA	Algarrobal	04320004-6	346989	6681338	100	0	347089	6681338
POZO 48	EA	Pueblo Gualliguyaca	04321006-8	329860	6679579	-500	-400	329360	6679179
POZO 50	EA	Pueblo la Campana	04320005-4	344616	6678534	-	-	344616	6678534
POZO 51	EA	Pueblo Andacollito	04320014-3	346345	6679482	-	-	346345	6679482
POZO 52	EA	Diaguitas	04320006-2	342428	6677887	-	-	342428	6677887
POZO 55	EA	Pueblo el Tambo	04321004-1	328559	6677064	-	-	328559	6677064
POZO 57	EA	Huancara b – 17	04320013-5	338770	6678820	-	-	338770	6678820
POZO 58	EA	A.P. Peralillo	04320007-0	340374	6675394	-	-	340374	6675394
POZO 59	EA	Asentamiento Victoria b - 13	04320011-9	332046	6676810	-	-	332046	6676810
POZO 60	EA	Gualligauyca	04321005-K	326415	6677031	-	-	326415	6677031
POZO 61	EA	Hacienda Huancara b - 8	04320016-K	334450	6677339	0	-100	334450	6677239
POZO 63	EA	Hacienda Huancara b - 2	04320015-1	333255	6676613	-	-	333255	6676613
POZO 64	EA	El Tambo b – 9	04321002-5	332060	6675886	0	60	332060	6675946
POZO 66	EA	A.P. Vicuña	04320009-7	335820	6675327	-	-	335820	6675327
POZO 42	EM	Almendral "2"	04323009-3	317596	6681523	-	-	317596	6681523
POZO 39	EM	El Molle	04323011-5	311317	6682327	-	-	311317	6682327
POZO 38	EB	Pelicana	04330001-6	307859	6680727	-	-	307859	6680727
POZO 37	EB	Pueblo las Rojas	04331005-4	300868	6681836	-	-	300868	6681836
POZO 29	EB	P. Punta de Piedra c - 12	04331017-8	296271	6683908	-	-	296271	6683908
POZO 24	EB	Pueblo el Islón	04334002-6	289059	6690796	-	-	289059	6690796
POZO 26	SN	Parcela 48 Cuatro Esquinas	04400037-7	280762	6688232	0	800	280762	6689032
POZO 17	SN	Parcela 123 Vega Norte		280436	6699564	-400		280036	6699564
POZO 18	SN	Parcela 122 Vegas Norte		281231	6698661	-400		280831	6698661
POZO 19	SN	Noria Escuela n 16		281900	6697038	-400		281500	6697038
POZO 21	SN	Parcela 117 Vegas Norte		282321	6695677	-400		281921	6695677
POZO 22	SN	Parcela 114 Vegas Norte		282445	6694467	-400		282045	6694467
POZO 23	SN	Parcela 164 Vegas Norte		282321	6693821	-400		281921	6693821

ANEXO C DEFINICIÓN DE ESTADÍSTICOS EN CALIBRACIÓN (VISUAL MODFLOW)

- Residual o Error:

$$r_i = H_{cal_i} - H_{obs_i}$$

donde,

H_{cal_i} : altura piezométrica calculada para el i -ésimo dato, de un total de n datos.

H_{obs_i} : altura piezométrica observada para el i -ésimo dato, de un total de n datos.

- Promedio del Residual (R):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

- Promedio Residual Absoluto (RA):

$$RA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|$$

- Error Estándar de la Estimación (SEE):

$$SEE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - R)^2}{n}}$$

- Error Cuadrático Medio (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2}$$

- Error Cuadrático Medio Normalizado:

$$RMS \text{ Normalizado} = \frac{RMS}{(H_{obs})_{\max} - (H_{obs})_{\min}}$$

donde, $(H_{obs})_{\max} - (H_{obs})_{\min}$, representa el rango de los valores observados.

- Coeficiente de Correlación (Cor):

El coeficiente de correlación (Cor) es calculado como la covarianza (Cov) entre los valores calculados (H_{cal}) y los valores observados (H_{obs}) dividida por el producto de sus desviaciones estándar:

$$Cor(H_{cal}, H_{obs}) = \frac{Cov(H_{cal}, H_{obs})}{\sigma_{cal} \cdot \sigma_{obs}}$$

La covarianza es calculada a través de la siguiente ecuación:

$$Cov(H_{cal}, H_{obs}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{cal_i} - \mu_{cal})(H_{obs_i} - \mu_{obs})$$

donde,

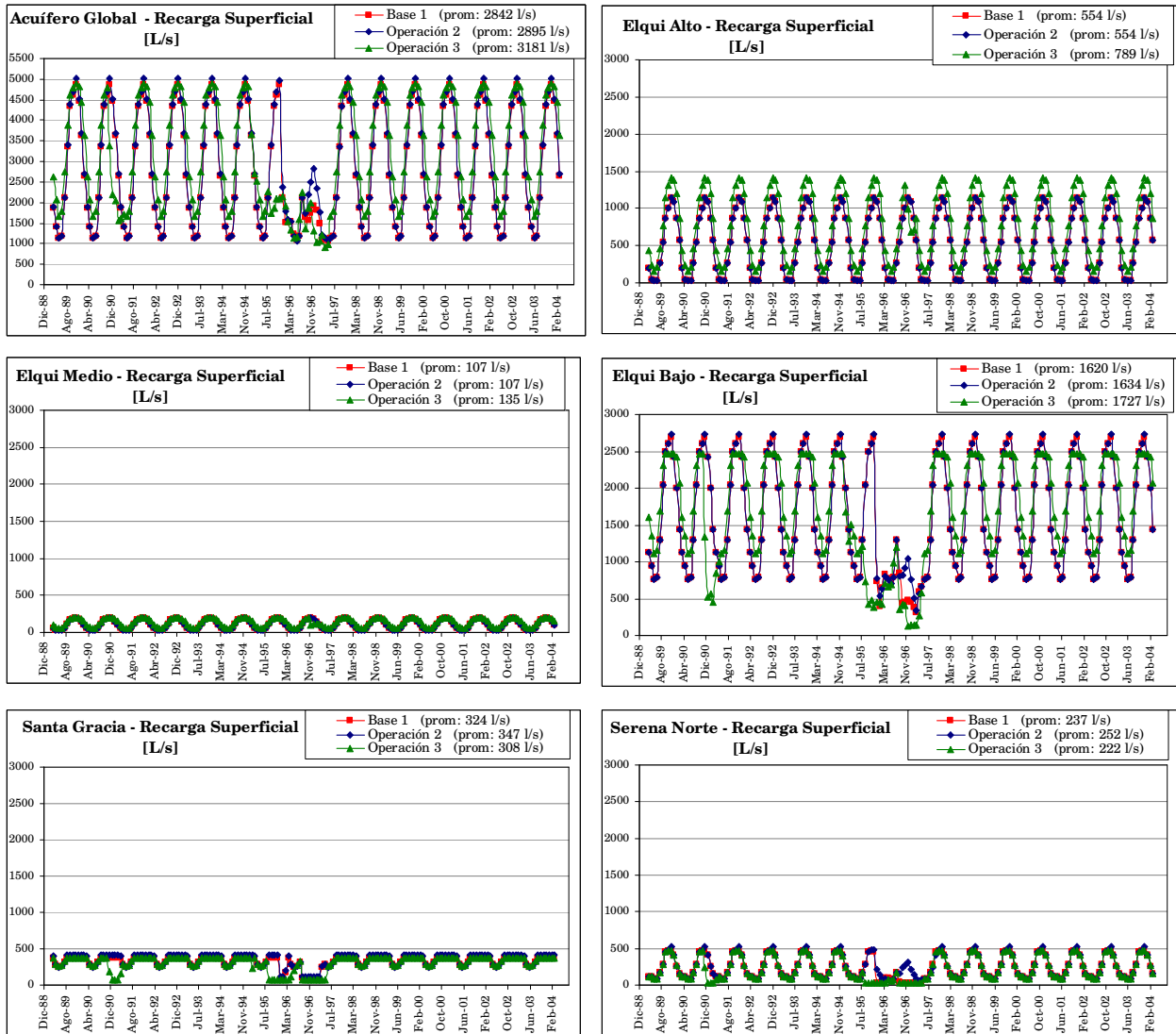
$$\mu_{cal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{cal} \quad ; \quad \mu_{obs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{obs}$$

Las desviaciones estándar son calculadas por las ecuaciones:

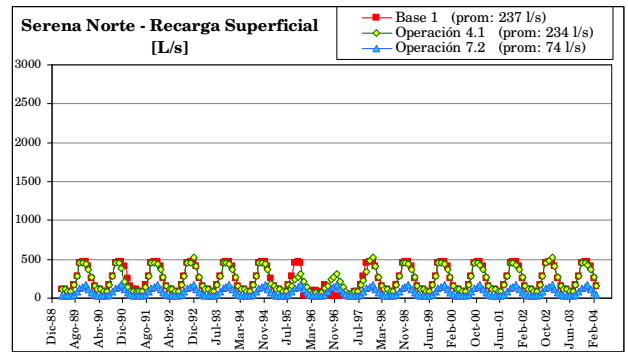
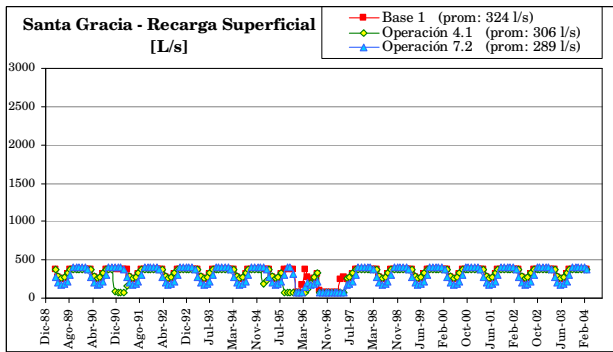
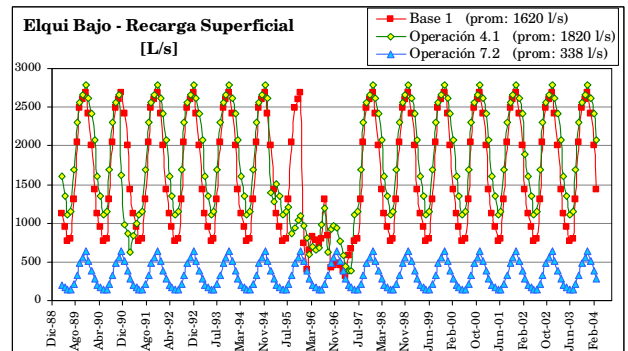
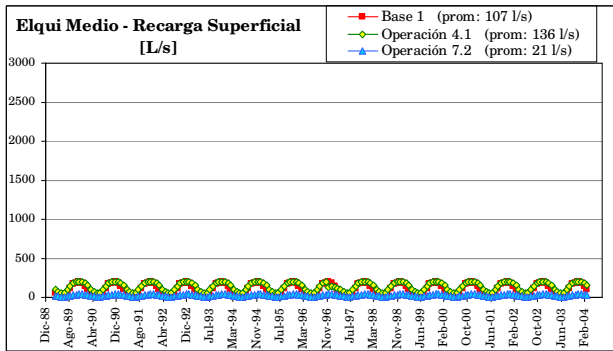
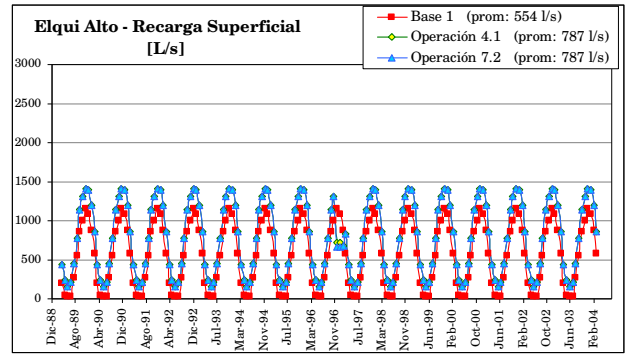
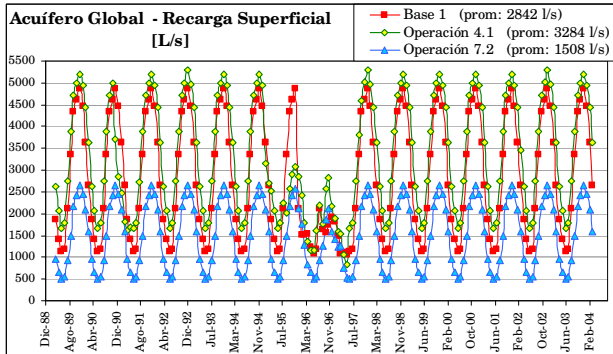
$$\sigma_{cal} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{cal} - \mu_{cal})^2} \quad ; \quad \sigma_{obs} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs} - \mu_{obs})^2}$$

ANEXO D RECARGA SUPERFICIAL Y BOMBEO NOMINALES

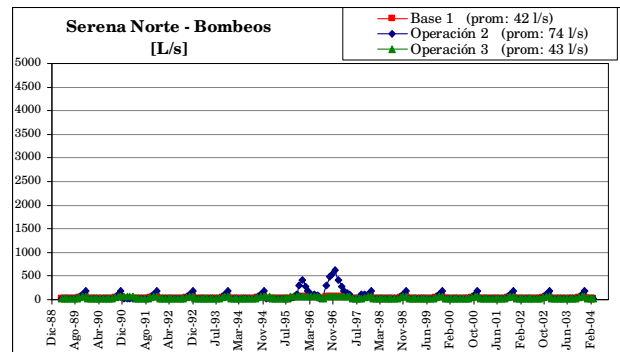
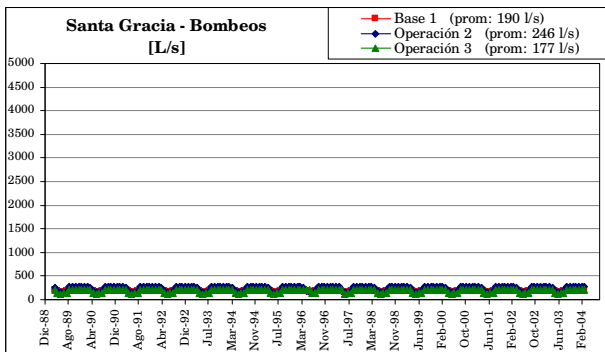
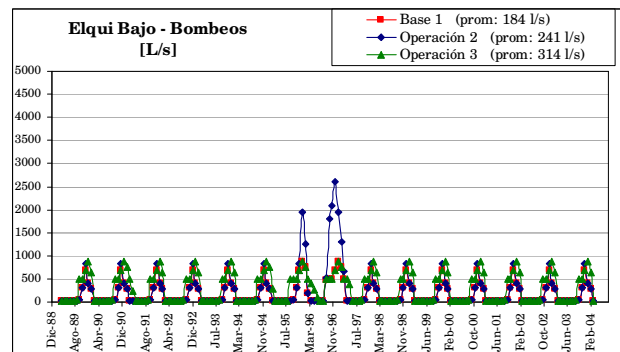
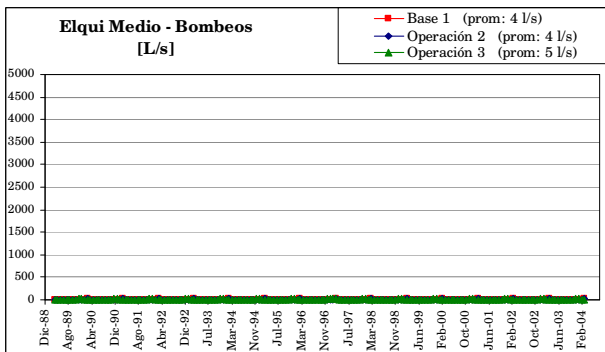
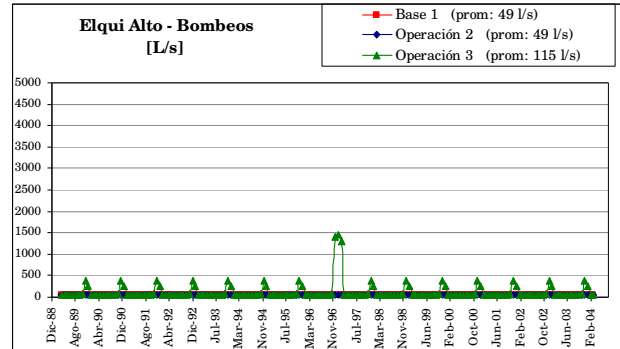
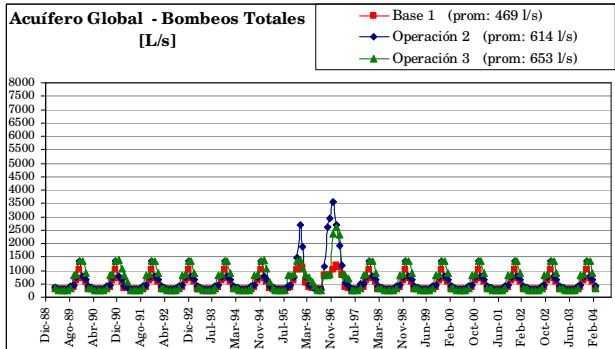
En esta sección de anexos se muestran las series que representan la recarga superficial y tasas de bombeo nominales de los 5 escenarios que constituyen la base de los escenarios que se proponen adicionalmente en este estudio para el análisis. Tanto las recargas como extracciones se muestran en dos grupos de gráficos para una mejor comparación entre escenarios, teniendo como referencia el escenario Base 1, en las Figuras D-1, D-2, D-3 y D-4.



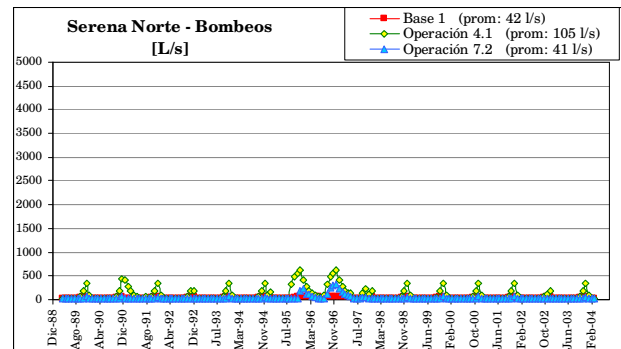
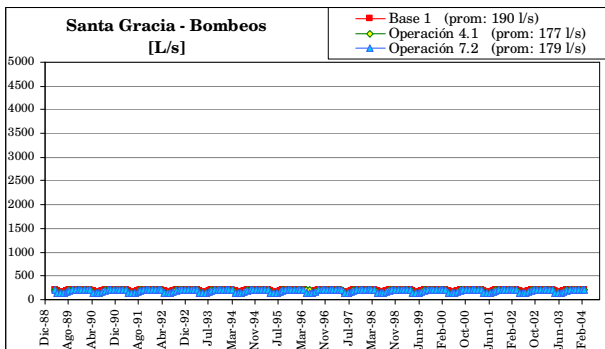
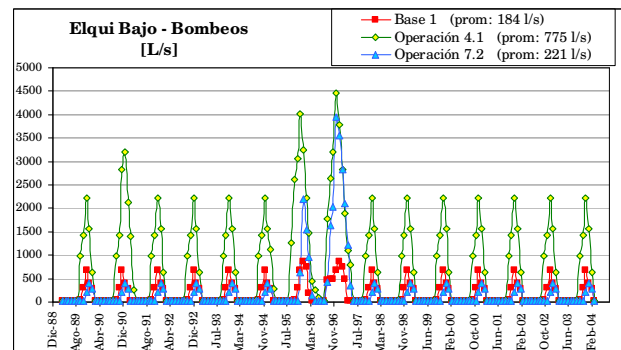
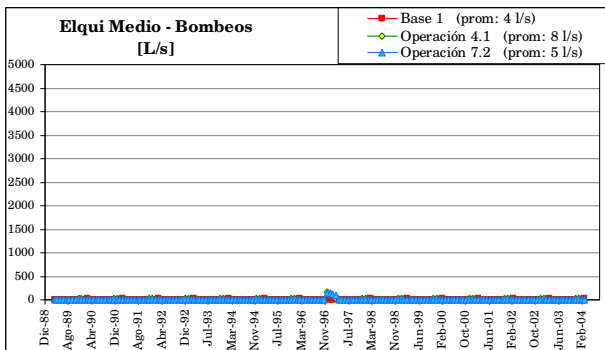
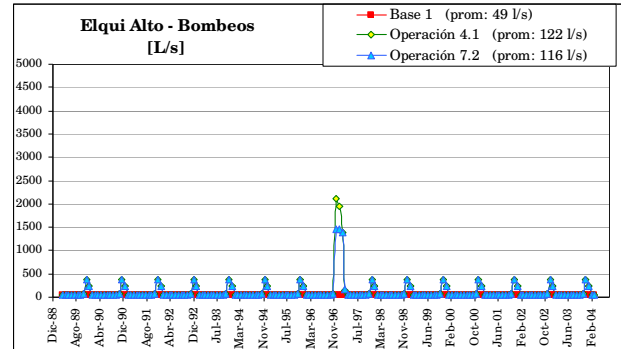
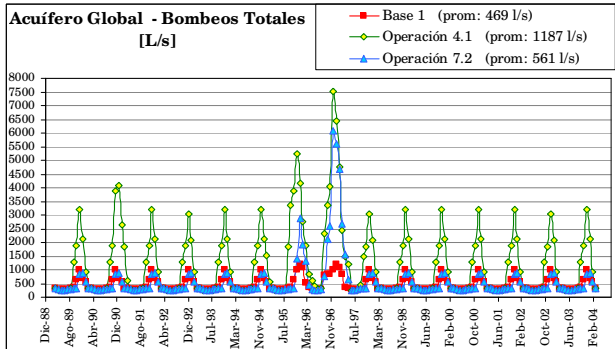
Figuras D-1 Recarga superficial nominal escenarios: Base 1, Operación 2 y Operación 3



Figuras D-2 Recarga superficial nominal escenarios: Base 1, Operación 4.1 y Operación 7.2



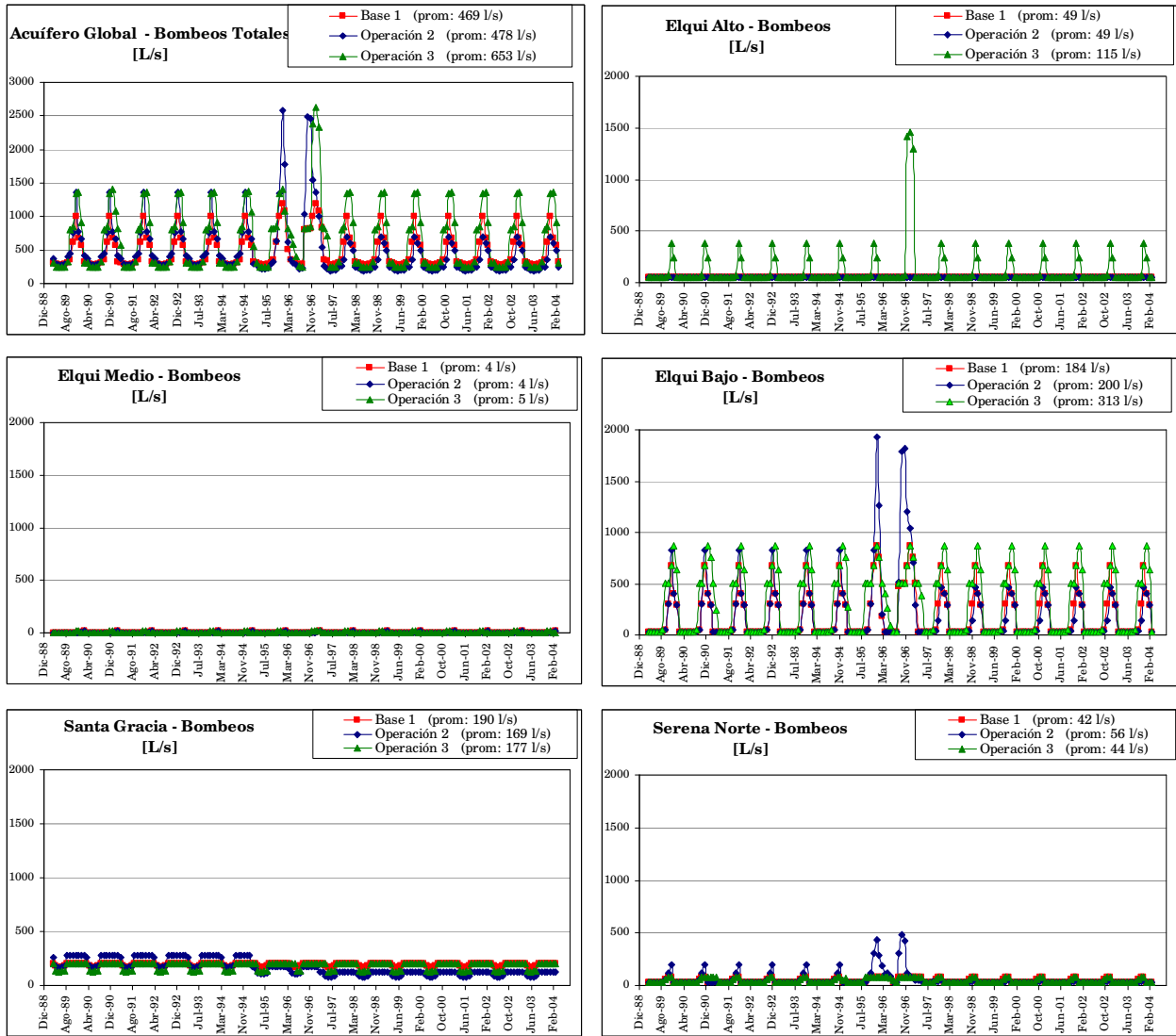
Figuras D-3 Bombeos nominales escenarios: Base 1, Operación 2 y Operación 3



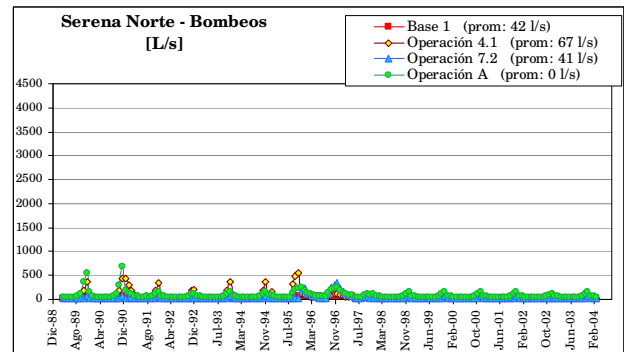
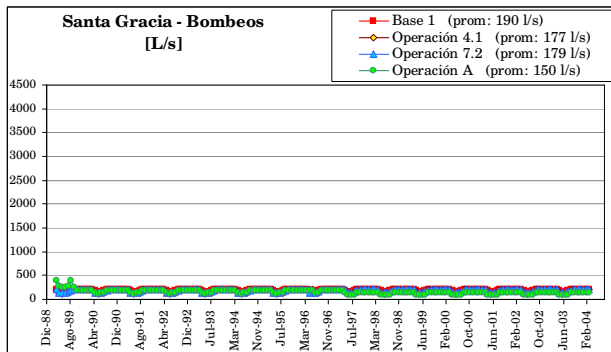
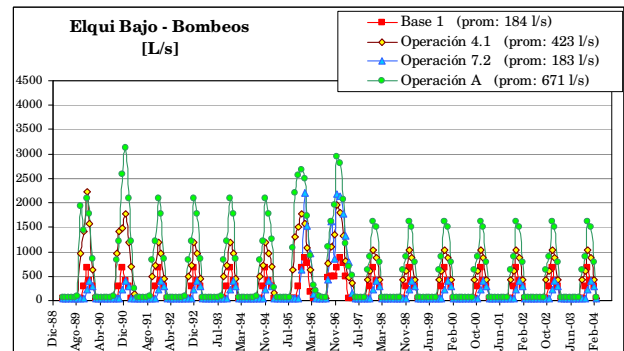
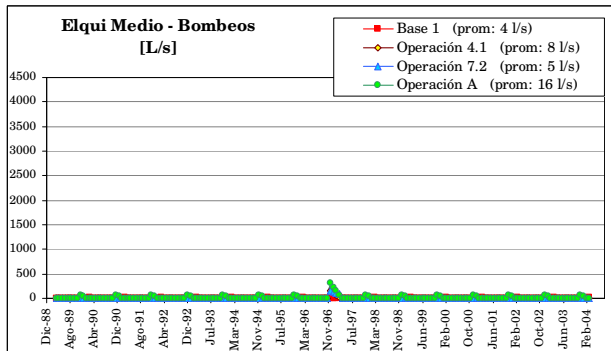
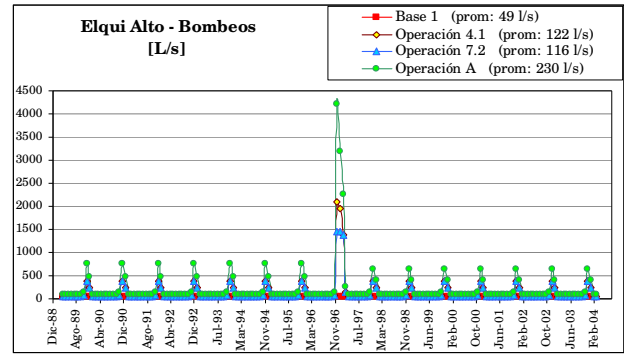
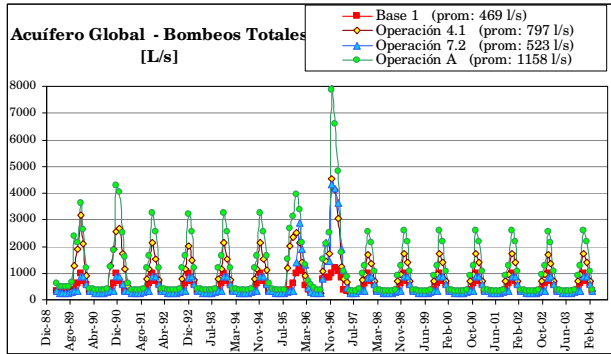
Figuras D-4 Bombeos nominales escenarios: Base 1, Operación 4.1 y Operación 7.2

ANEXO E DEMANDA SUPLIDA EN ESCENARIOS DE OPERACIÓN

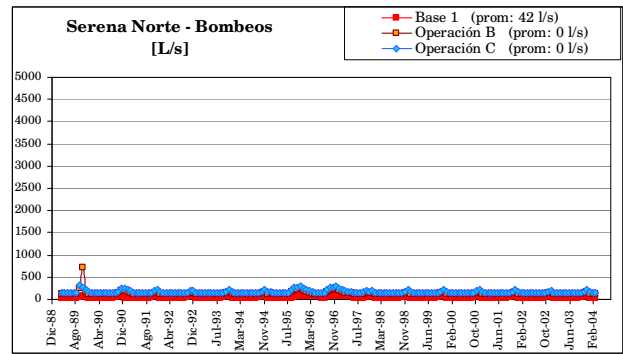
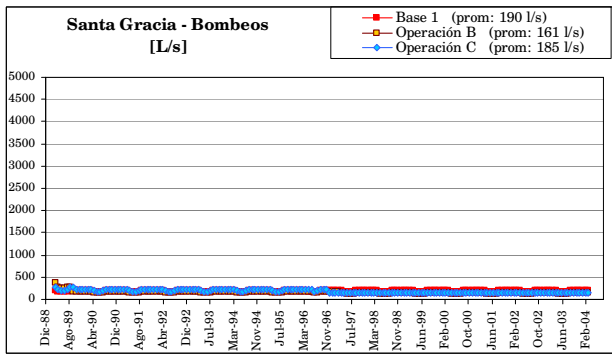
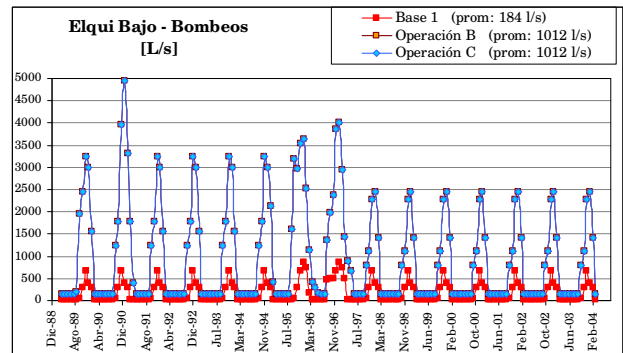
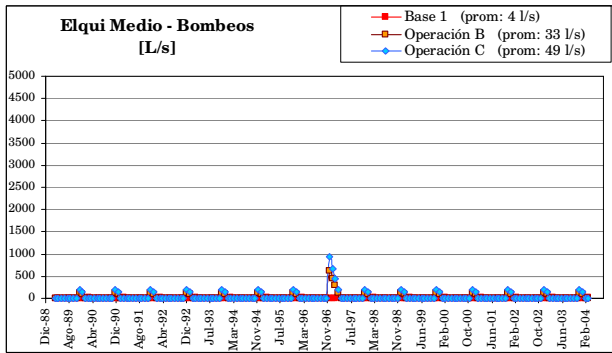
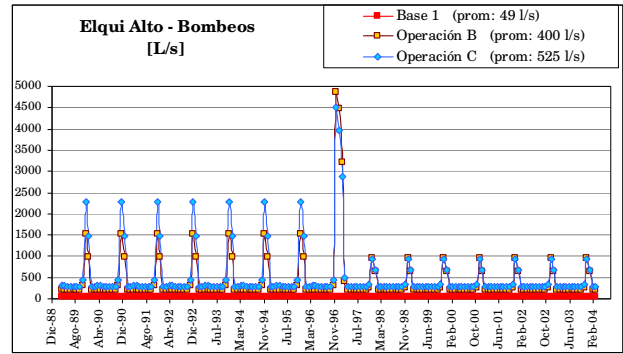
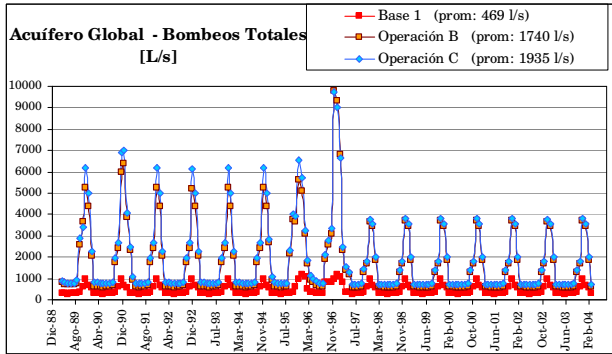
Las extracciones aceptadas por el modelo de simulación se indican en tres grupos de gráficos, en las Figuras E-1, E-2 y E-3, en donde se comparan con el escenario Base 1 como referencia.



Figuras E-1 Demanda suplida escenarios: Base 1, Operación 2 y Operación 3



Figuras E-2 Demanda suplida escenarios: Base 1, Operación 4.1, Operación 7.2 y Operación A



Figuras E-3 Demanda suplida escenarios: Base 1, Operación B y Operación C

ANEXO F BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO DE ESCENARIOS DE OPERACIÓN

§ Escenario Base 1

Tabla F-1 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante del escenario Base 1

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	653	372
Pozos Bombeo	-	469
Río Elqui	541	3400
Recarga Subterránea	218	-
Recarga Superficial	2795	-
Total	4207	4241
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-30
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-4	
Porcentaje [%]	-0,09	

Tabla F-2 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante del escenario Base 1

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	653	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	284	65	-	189	4
Recarga subterránea	218	-	-	-	-
Recarga superficial	529	107	324	1598	237
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	40	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	32	-	186
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	164	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	39	-
Total	1684	794	355	2030	427
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	67	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	305
Pozo Bombeo	49	4	190	184	42
Río Elqui	972	750	-	1631	47
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	40	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	164	-	39
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	32	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	186	-
Total	1710	794	355	2032	433
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-26	0	1	3	-6
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	0	0	0	-4	0
Porcentaje (promedio) [%]	-0,01	-0,05	0,00	-0,18	0,03

§ **Escenario Operación 2**

Tabla F-3 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación 2

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	653	364
Pozos Bombeo	-	478
Río Elqui	543	3417
Recarga Subterránea	218	-
Recarga Superficial	2845	-
Total	4260	4258
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento	6	
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-5	
Porcentaje [%]	-0,09	

Tabla F-4 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación 2

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	653	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	284	65	-	191	4
Recarga subterránea	218	-	-	-	-
Recarga superficial	529	107	347	1610	252
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	41	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	28	-	185
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	180	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	40	-
Total	1684	794	375	2062	441
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	67	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	297
Pozo Bombeo	49	4	169	200	56
Río Elqui	972	750	-	1647	48
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	41	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	180	-	40
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	28	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	185	-
Total	1710	795	349	2061	440
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-26	0	25	8	0
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	0	0	1	-6	1
Porcentaje (promedio) [%]	0,00	-0,04	0,25	-0,25	0,16

§ **Escenario Operación 3**

Tabla F-5 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación 3

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	650	386
Pozos Bombeo	-	653
Río Elqui	546	3499
Recarga Subterránea	218	-
Recarga Superficial	3121	-
Total	4535	4538
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento	7	
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-10	
Porcentaje [%]	-0,20	

Tabla F-6 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación 3

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	650	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	271	61	-	209	4
Recarga subterránea	218	-	-	-	-
Recarga superficial	753	135	308	1703	222
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	42	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	33	-	189
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	161	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	39	-
Total	1893	818	341	2153	415
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	89	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	297
Pozo Bombeo	115	5	177	313	44
Río Elqui	1073	771	-	1608	47
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	42	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	161	-	39
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	33	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	189	-
Total	1898	818	338	2143	426
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-4	0	4	19	-11
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	-1	0	0	-9	0
Porcentaje (promedio) [%]	-0,04	-0,02	0,00	-0,41	0,03

§ **Escenario Operación 4.1**

Tabla F-7 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación 4.1

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	651	368
Pozos Bombeo	-	797
Río Elqui	552	3474
Recarga Subterránea	217	-
Recarga Superficial	3220	-
Total	4640	4640
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		10
Modalidad		Error del Balance
Entradas – Salidas [l/s]		-10
Porcentaje [%]		-0,19

Tabla F-8 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación 4.1

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	651	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	273	63	-	211	4
Recarga subterránea	217	-	-	-	-
Recarga superficial	751	136	306	1792	234
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	46	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	33	-	192
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	160	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	41	-
Total	1892	821	340	2250	430
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	88	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	280
Pozo Bombeo	122	8	177	423	67
Río Elqui	1066	767	-	1594	48
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	46	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	160	-	41
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	33	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	192	-
Total	1899	821	336	2241	436
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-5	0	3	18	-6
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	-1	0	0	-9	0
Porcentaje (promedio) [%]	-0,06	-0,03	-0,03	-0,34	0,08

§ **Escenario Operación 7.2**

Tabla F-9 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación 7.2

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	652	326
Pozos Bombeo	-	523
Río Elqui	750	2472
Recarga Subterránea	217	-
Recarga Superficial	1467	-
Total	3086	3322
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-229
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-7	
Porcentaje [%]	-0,18	

Tabla F-10 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación 7.2

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	652	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	272	82	-	387	8
Recarga subterránea	217	-	-	-	-
Recarga superficial	751	21	289	333	74
Subterránea desde Elqui Alto	-	623	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	44	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	31	-	170
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	149	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	24	-
Total	1892	727	320	937	252
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	88	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	238
Pozo Bombeo	116	5	179	183	41
Río Elqui	1070	679	-	693	31
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	623	44	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	149	-	24
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	31	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	170	-
Total	1897	728	328	1077	334
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-5	-1	-8	-133	-82
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	-1	0	0	-7	0
Porcentaje (promedio) [%]	-0,03	0,00	0,00	-0,50	0,00

§ **Escenario Operación A**

Tabla F-11 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación A

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	661	334
Pozos Bombeo	-	1158
Río Elqui	638	2900
Recarga Subterránea	217	-
Recarga Superficial	2843	-
Total	4359	4391
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-13
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-19	
Porcentaje [%]	-0,40	

Tabla F-12 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación A

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	661	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	0
Río Elqui	304	69	-	259	7
Recarga subterránea	217	-	-	-	-
Recarga superficial	528	107	346	1609	252
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	46	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	24	-	187
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	193	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	43	-
Total	1710	798	370	2150	446
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	59	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	275
Pozo Bombeo	230	16	150	671	90
Río Elqui	836	736	-	1290	37
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	46	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	193	-	43
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	24	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	187	-
Total	1746	798	343	2172	446
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-36	0	25	0	-2
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	0	-1	1	-22	2
Porcentaje (promedio) [%]	0,00	-0,06	0,30	-0,92	0,26

§ **Escenario Operación B**

Tabla F-13 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación B

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	671	302
Pozos Bombeo	-	1740
Río Elqui	738	2511
Recarga Subterránea	217	-
Recarga Superficial	2840	-
Total	4466	4554
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-35
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-53	
Porcentaje [%]	-0,95	

Tabla F-14 Balance hídrico subterráneo promedio en sectores de balance resultante de la Operación B

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	670	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	1
Río Elqui	330	67	-	324	17
Recarga subterránea	217	-	-	-	-
Recarga superficial	528	107	345	1609	252
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	42	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	23	-	188
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	185	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	55	-
Total	1744	796	368	2215	458
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	52	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	250
Pozo Bombeo	400	33	161	1012	135
Río Elqui	720	723	-	1049	20
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	42	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	185	-	55
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	23	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	188	-
Total	1794	797	346	2272	460
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-48	0	20	-4	-3
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	-1	-1	2	-53	1
Porcentaje (promedio) [%]	-0,07	-0,11	0,29	-1,90	0,11

§ **Escenario Operación C**

Tabla F-15 Balance hídrico subterráneo promedio global resultante de la Operación C

Componente	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Borde altura constante	689	289
Pozos Bombeo	-	1935
Río Elqui	753	2372
Recarga Subterránea	217	-
Recarga Superficial	2838	-
Total	4497	4597
Ganancia (+) / Pérdida (-) de almacenamiento		-45
Modalidad	Error del Balance	
Entradas – Salidas [l/s]	-55	
Porcentaje [%]	-0,97	

Tabla F-16 Balance hídrico subterráneo promedio resultante de la Operación C

Componentes	Elqui Alto	Elqui Medio	Santa Gracia	Elqui Bajo	Serena Norte
	Entradas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	685	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	4
Río Elqui	334	69	-	327	24
Recarga subterránea	217	-	-	-	-
Recarga superficial	526	107	345	1609	252
Subterránea desde Elqui Alto	-	622	-	-	-
Subterránea desde Elqui Medio	0	-	-	42	-
Subterránea desde Elqui Bajo	-	0	28	-	194
Subterránea desde Santa Gracia	-	-	-	163	-
Subterránea desde Serena Norte	-	-	-	55	-
Total	1762	798	372	2196	473
Componentes	Salidas [l/s]				
Altura Constante (Puclaro)	43	-	-	-	-
Altura Constante (Mar)	-	-	-	-	246
Pozo Bombeo	525	49	185	1012	164
Río Elqui	631	708	-	1020	13
Subterránea hacia Elqui Alto	-	0	-	-	-
Subterránea hacia Elqui Medio	622	42	-	0	-
Subterránea hacia Elqui Bajo	-	-	163	-	55
Subterránea hacia Santa Gracia	-	-	-	28	-
Subterránea hacia Serena Norte	-	-	-	194	-
Total	1822	799	347	2254	478
Ganan.^a (+) / Pérd.^a (-) de almacenamiento	-58	0	23	-5	-6
Modalidad	Error del Balance				
Entrada – Salida [l/s]	-3	-1	2	-54	1
Porcentaje (promedio) [%]	-0,14	-0,13	0,25	-1,92	0,17

ANEXO G NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN ESCENARIOS DE OPERACIÓN

En este anexo se muestran los niveles piezométricos obtenidos en algunos pozos de observación para 4 de los 8 escenarios de operación considerados. Para evitar la superposición de las series, acá se exponen los escenarios y pozos que presentan niveles más representativos en términos de ubicación y comportamiento, abarcando los extremos de las variaciones.

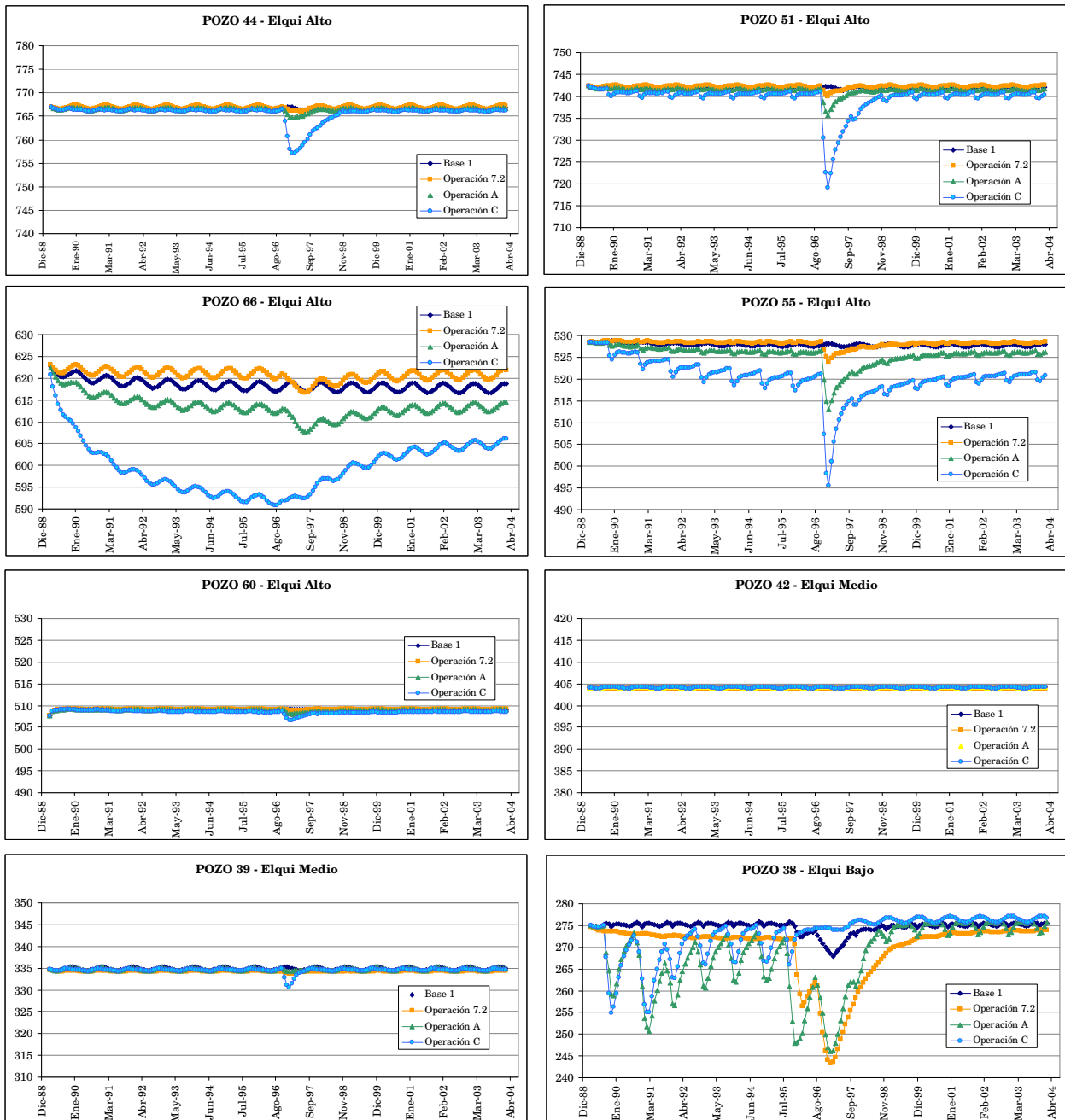


Figura G-1

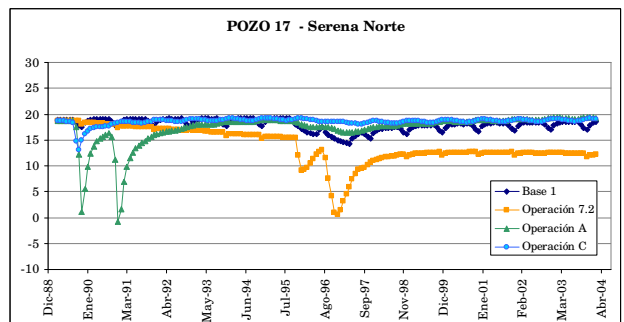
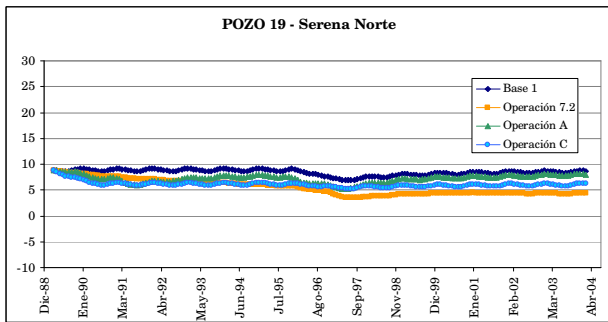
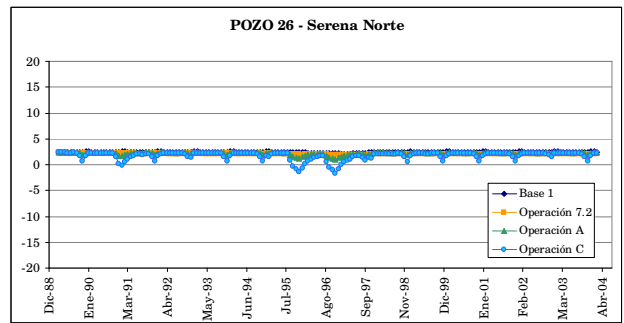
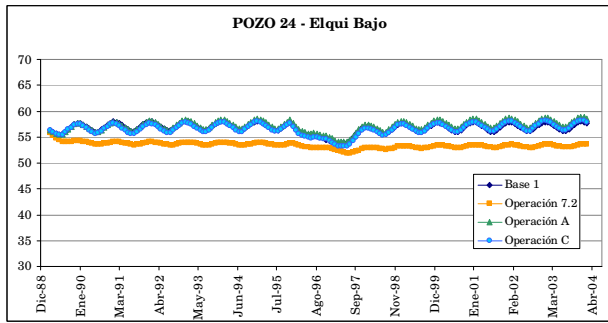
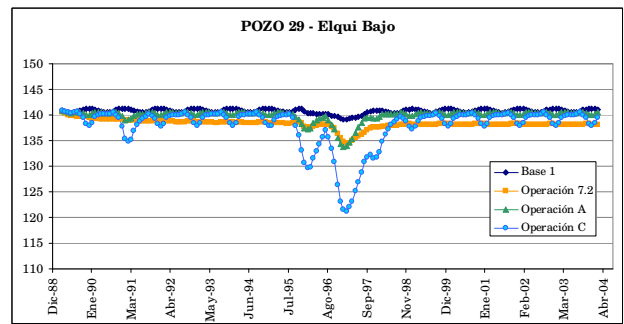
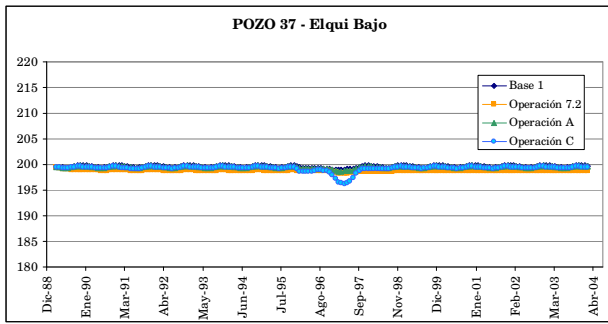


Figura G-2

ANEXO H FLUJOS NETOS EN ACUÍFERO POR CONCEPTO DE CONDICIÓN DE BORDE DEL RÍO ELQUI

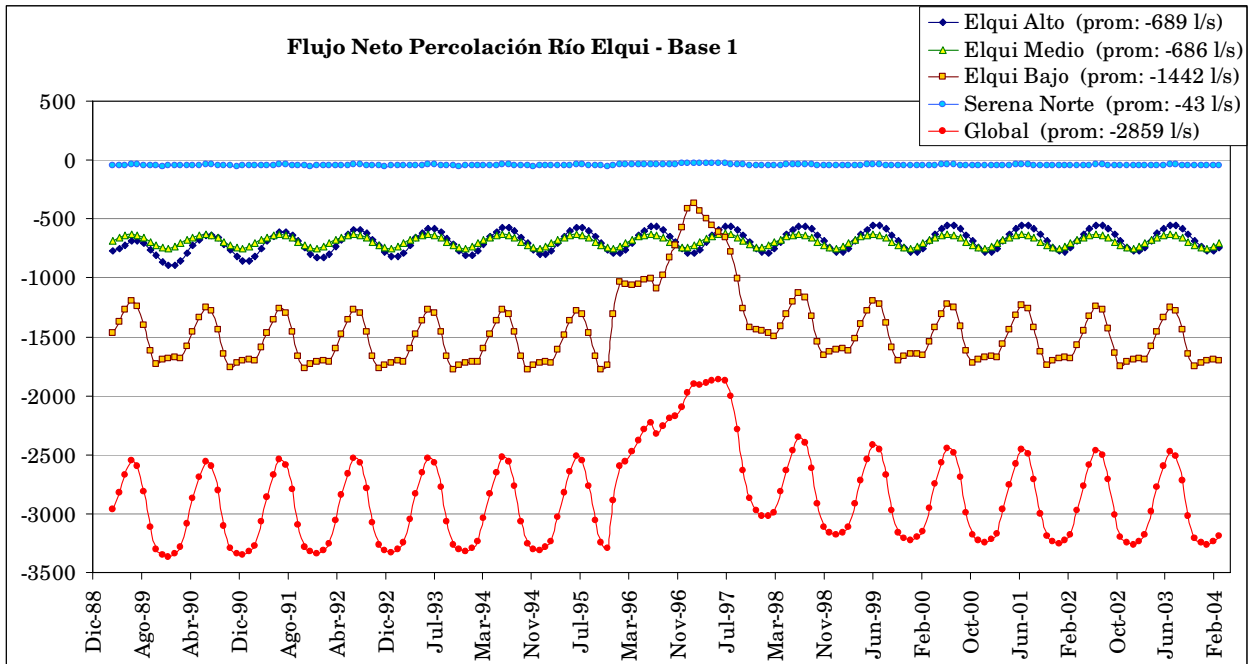


Figura H-1

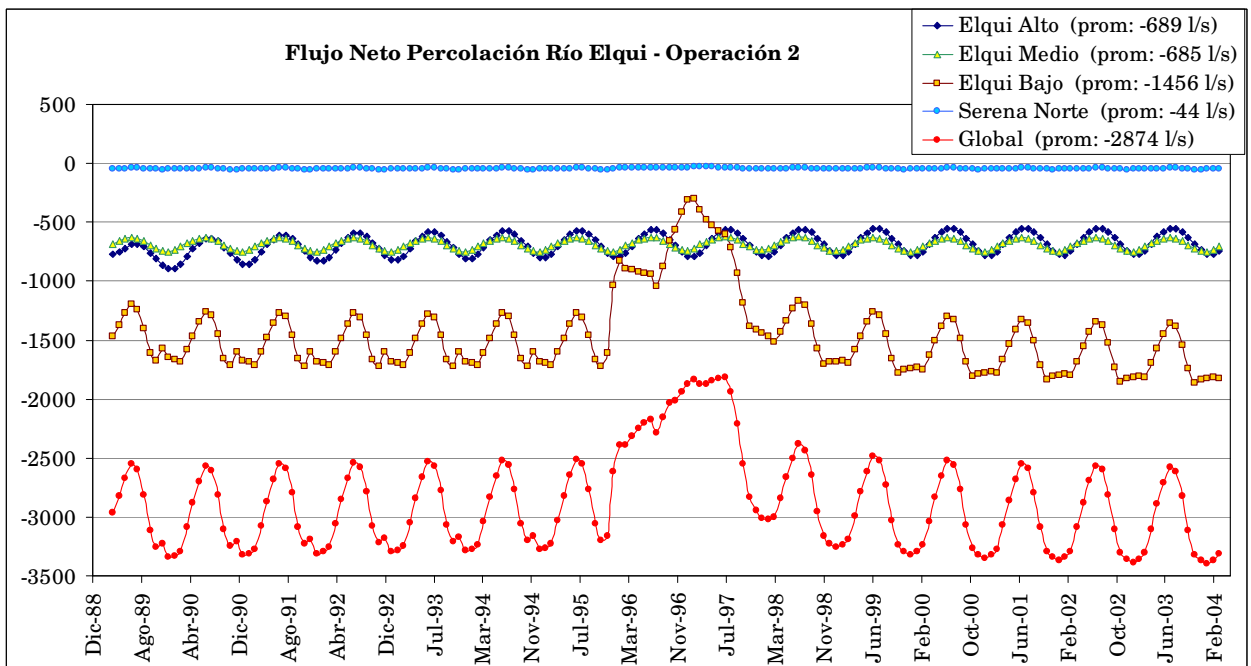


Figura H-2

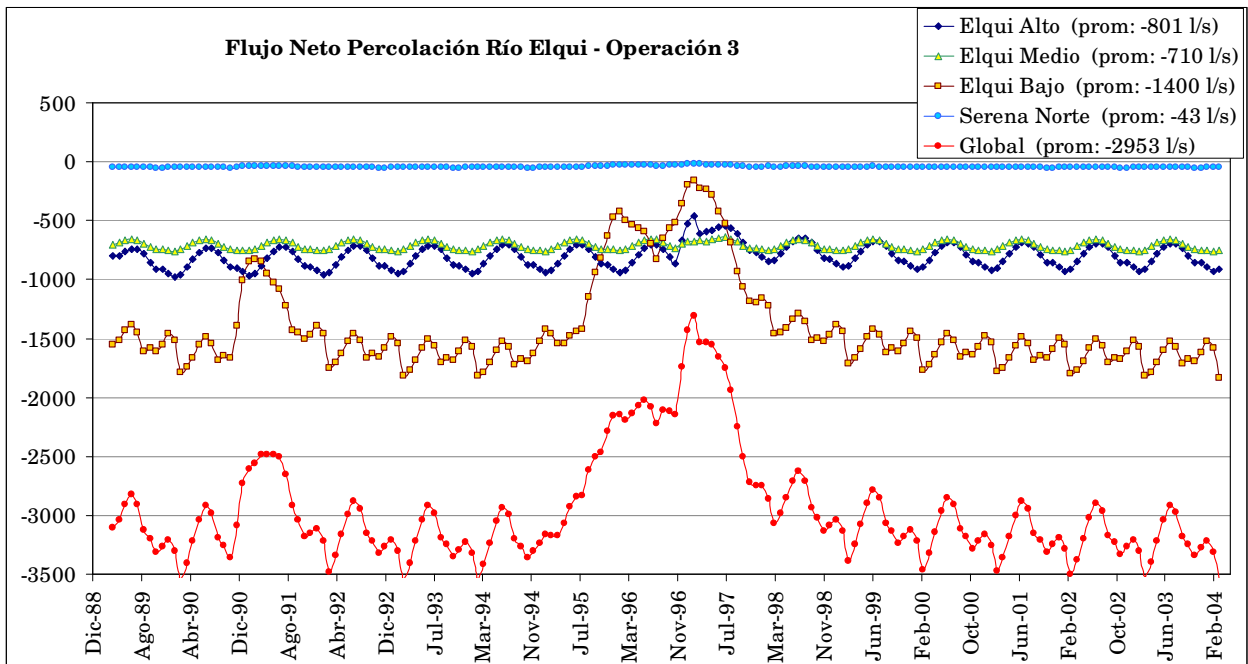


Figura H-3

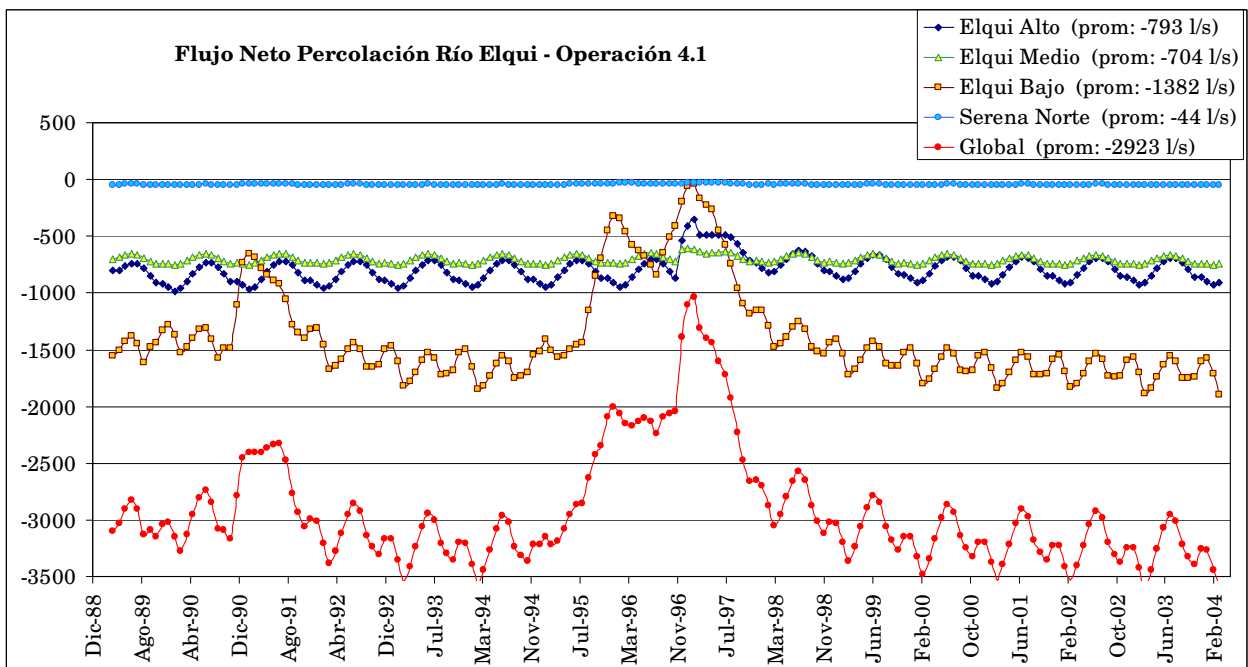


Figura H-4

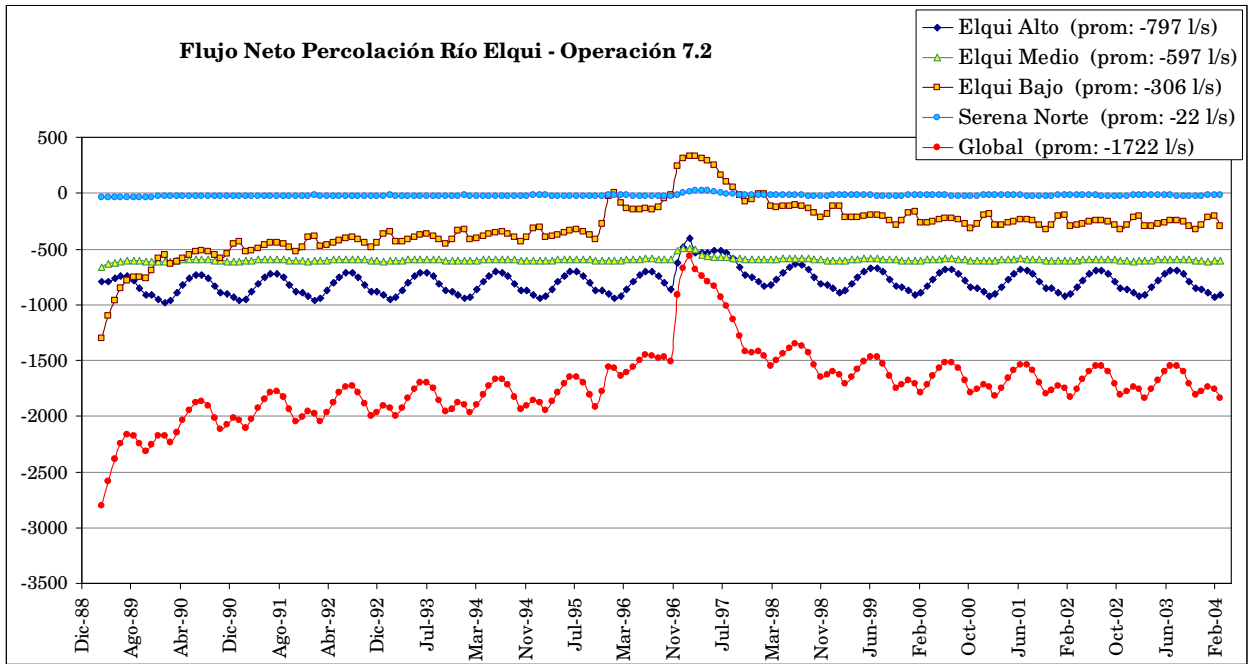


Figura H-5

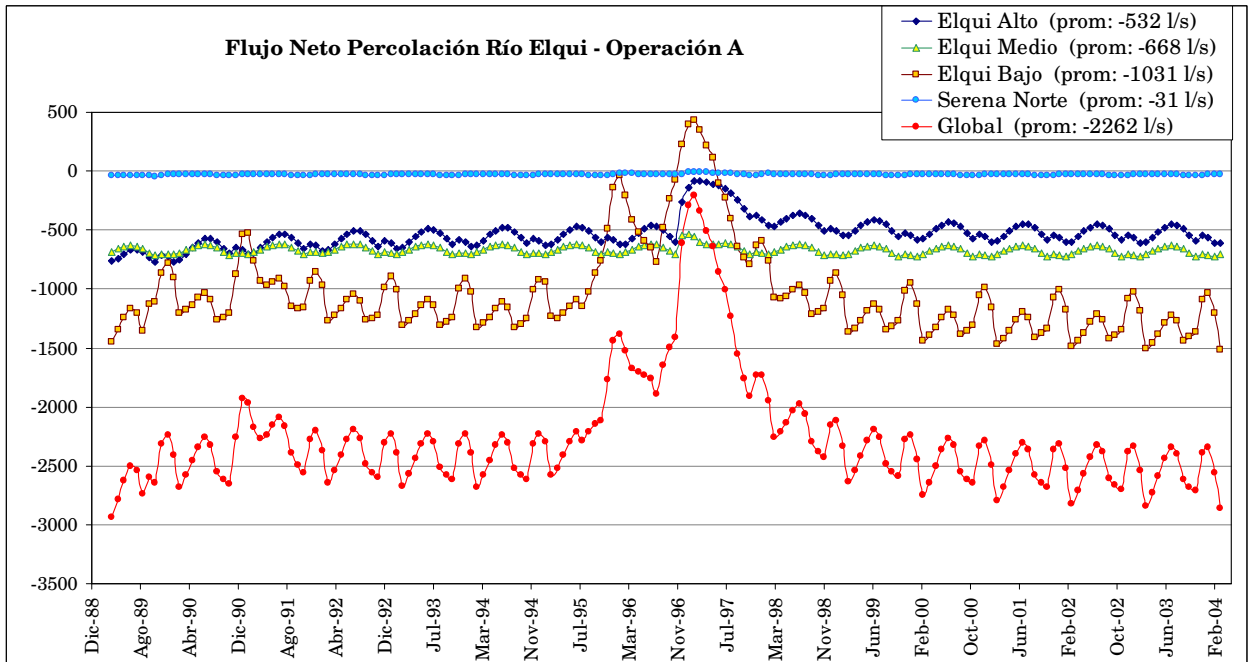


Figura H-6

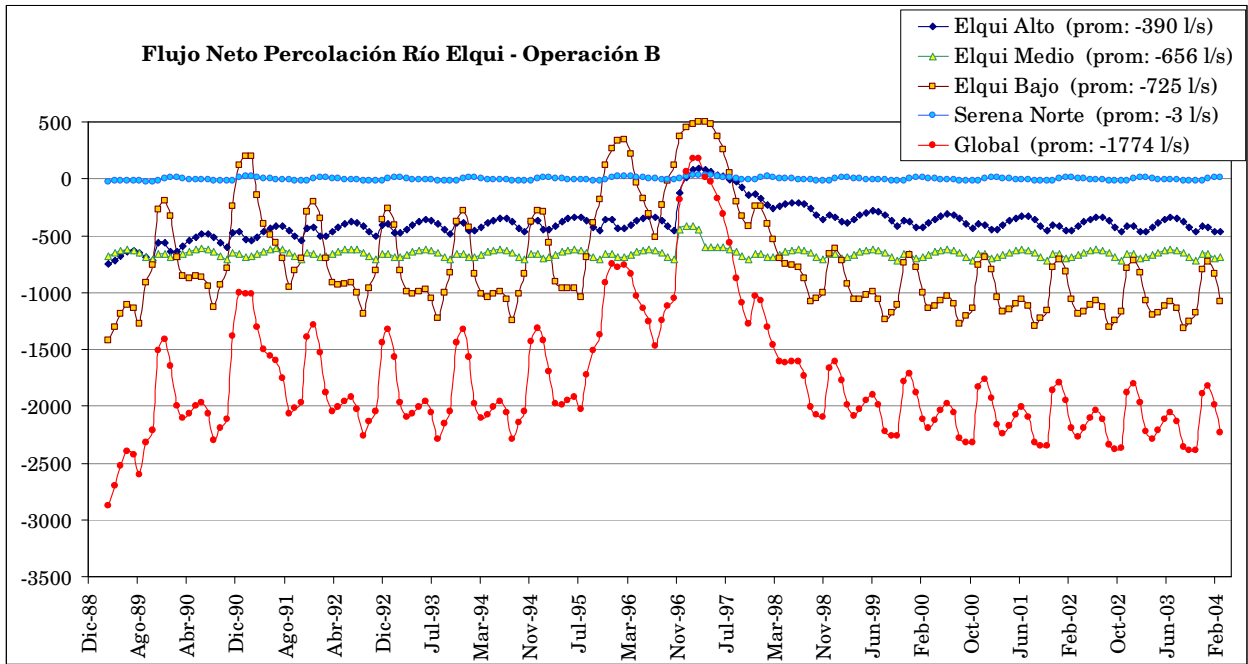


Figura H-7

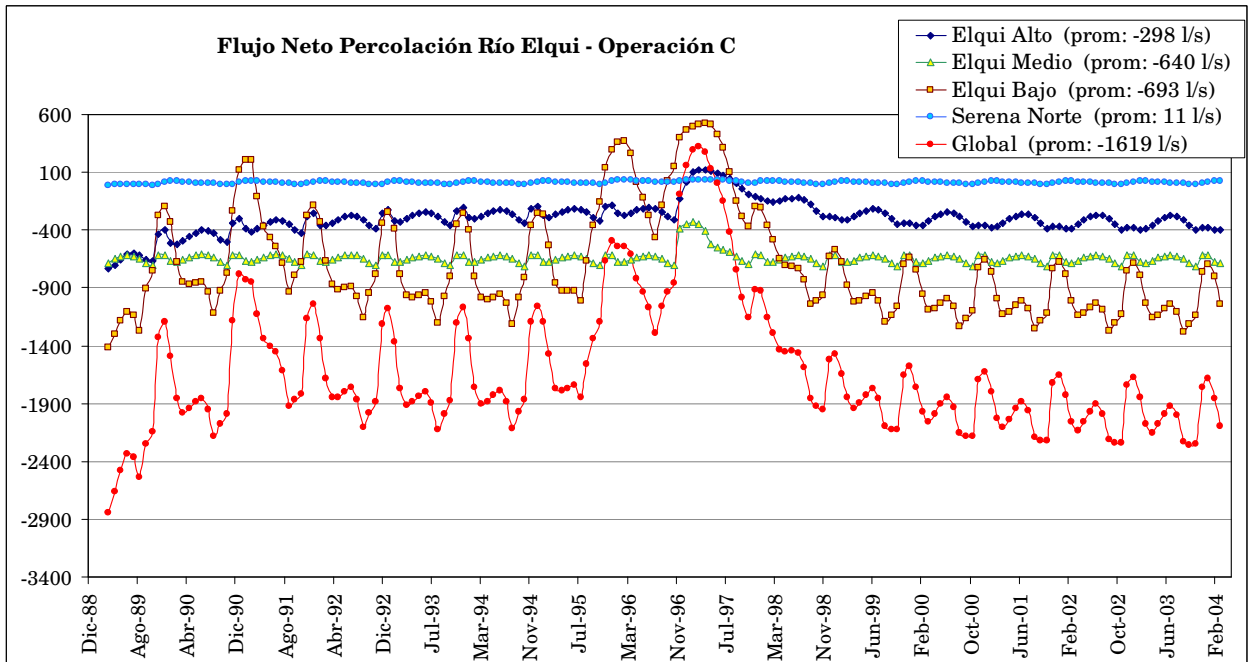


Figura H-8

ANEXO I RECARGA SUPERFICIAL ACEPTADA Y DEMANDA SUPLIDA EN SIMULACIONES DE 30 AÑOS

Las acciones externas de los escenarios de operación A.1 y A.2, aceptadas por el modelo de simulación, se muestran en las Figuras I-1 y I-2, respectivamente.

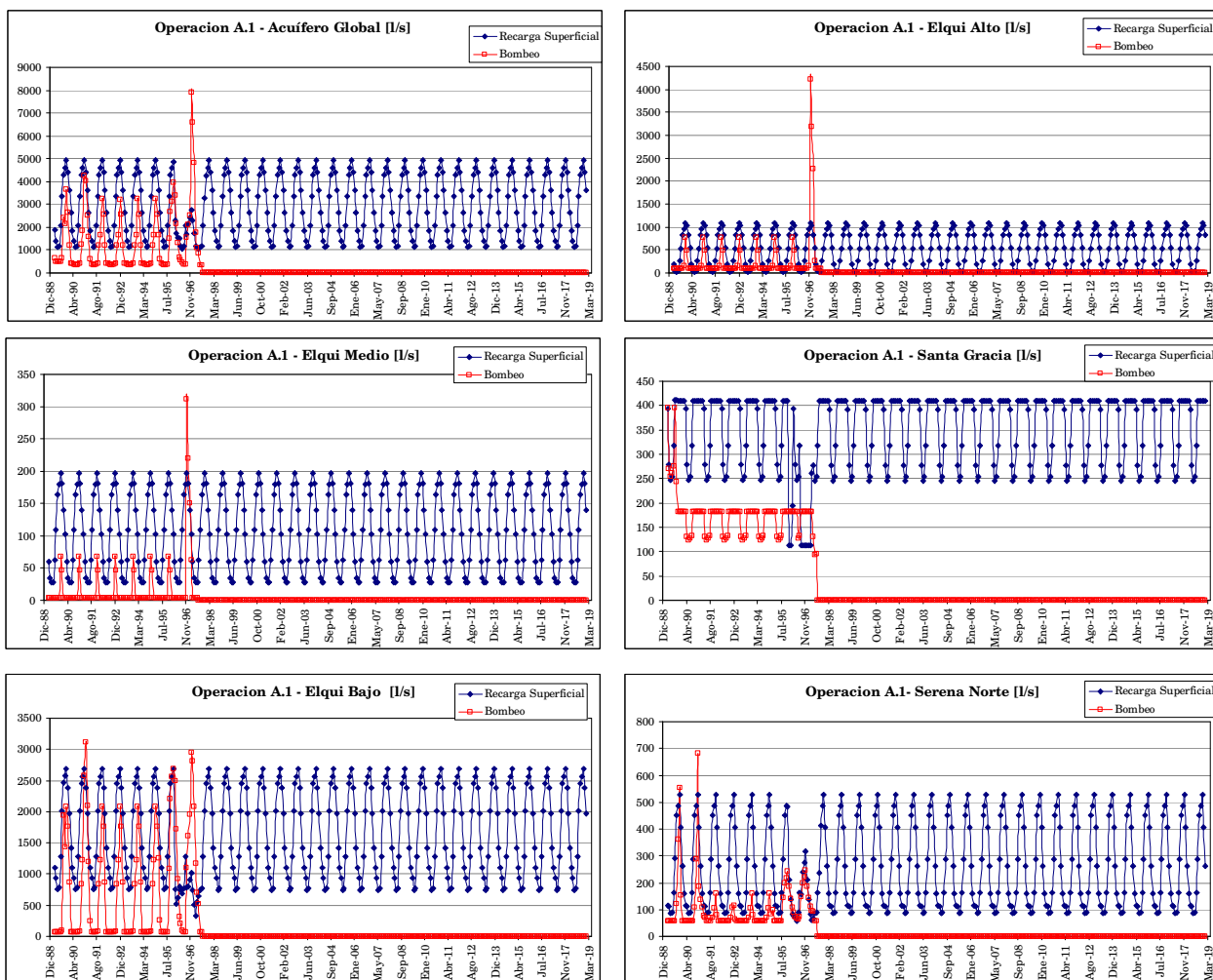


Figura I-1 Acciones externas aceptadas por el modelo en escenario Operación A.1

Tabla I-1 Acciones Externas promedio

Acción Externa	Operación A.1					
	Global	Elqui Alto	Elqui Medio	Elqui Bajo	Santa Gracia	Serena Norte
Recarga Promedio [l/s]	2900	528	107	1653	354	257
Bombeo promedio antes de sequía [l/s]	1228	183	12	754	176	103
Bombeo máximo en sequía [l/s]	7895	4210	312	2943	182	247

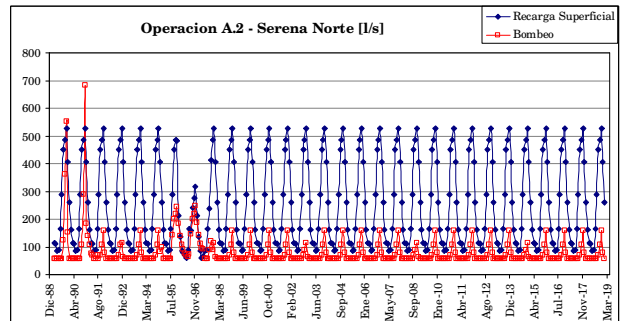
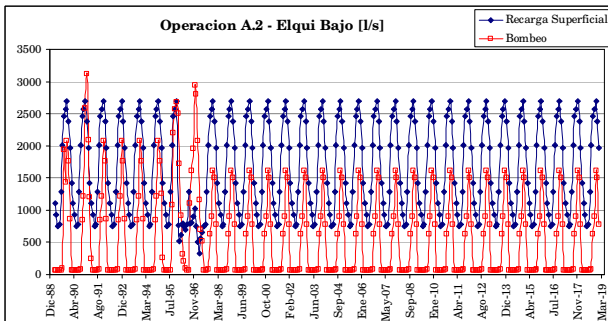
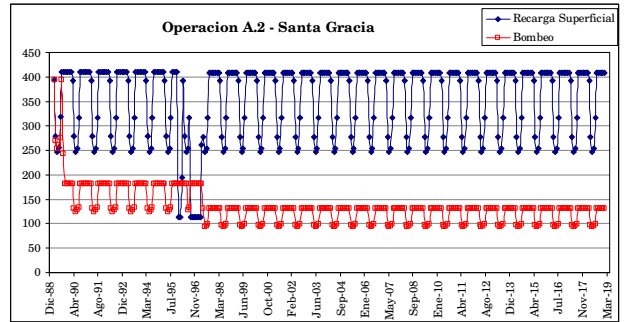
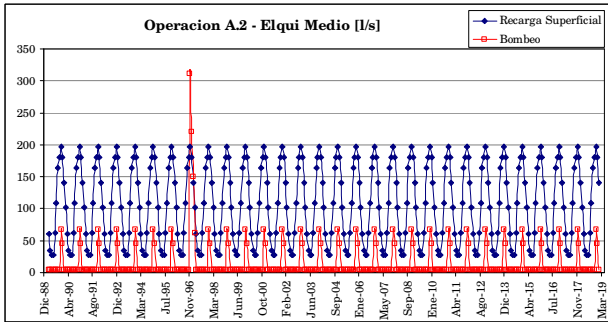
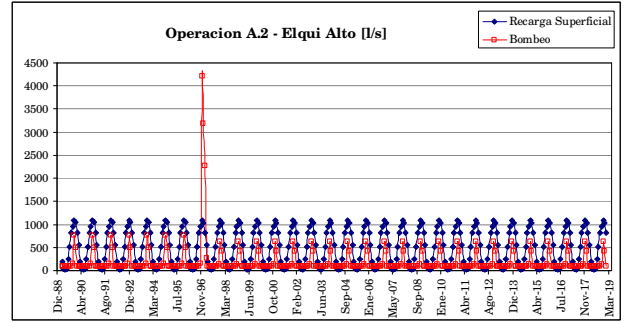
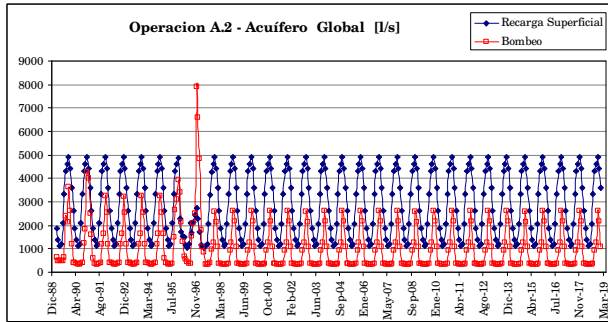


Figura I-2 Acciones externas aceptadas por el modelo en escenario de Operación A.2

ANEXO J COMPARACIÓN DE NIVELES OBTENIDOS ENTRE EL PRESENTE ESTUDIO Y EL ESTUDIO DGA, 2006.

En este anexo se muestra la comparación entre los niveles piezométricos obtenidos en la calibración del modelo original en régimen permanente en condición de escurrimiento natural (DGA, 2006) y el promedio de los niveles obtenidos en la calibración en régimen transiente (presente estudio). Los niveles piezométricos que se muestran corresponden a pozos de observación utilizados en la calibración del modelo original en régimen permanente. La distribución de estos se indica en la Figura J-1

Los niveles piezométricos observados corresponden al periodo de Octubre – Noviembre de 1953, en el cual prácticamente no existían extracciones.

Los valores de los niveles observados y calculados se indican en la Tabla J-1 , se grafican esquemáticamente a lo largo del valle en la Figura J-2 y sus respectivas diferencias se grafican en la Figura J-3

Pese a que los modelos a los cuales hacen referencia los niveles presentan condiciones de recarga y extracción distintas, se considera que las diferencias entre los niveles no son significativas, en donde en general los niveles calculados entregados por la calibración en régimen transiente (promedio) son menores que los niveles observados, salvo en la porción alta del sector Elqui Alto, en donde los primeros son mayores en aproximadamente 20 m (pozos 23N y 23S).

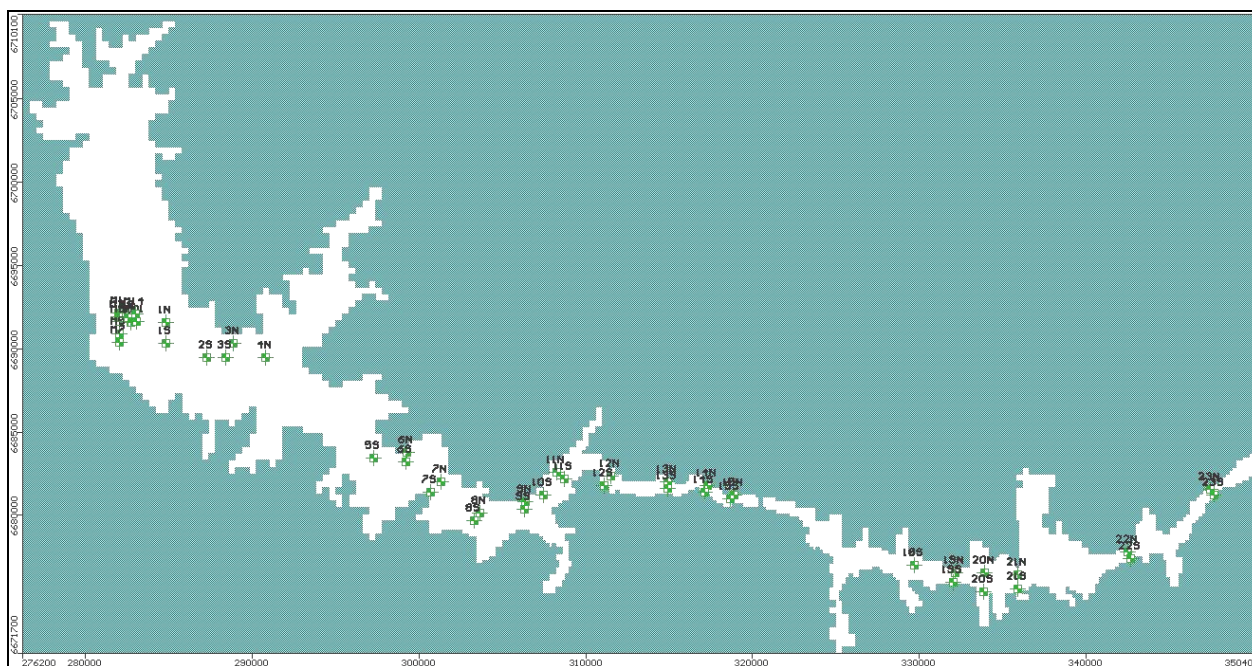


Figura J-1 Distribución de pozos de observación considerados en calibración del modelo original (DGA, 2006).

Fuente: Visual Modflow.

Tabla J-1 Niveles observados y calculados en calibración en régimen permanente (DGA,2006), y calculados (indicado como promedio) en calibración en régimen transiente (presente estudio)*

Zona	Pozo	Nivel Observado Oct-Nov 1953 [m]	Calibración Rég. Permanente DGA 2006 [m]	Calibración Transiente Promedio [m]	Máximo [m]	Mínimo [m]	Diferencia [m]
Serena Norte	M3	6,81	5,76	7,24	7,24	5,76	1,48
	M2	7,99	5,63	6,28	7,99	5,63	2,36
	M1	8,71	5,61	7,22	8,71	5,61	3,10
	M5	9,42	5,95	7,66	9,42	5,95	3,47
	M8	11,65	8,61	9,13	11,65	8,61	3,04
	M10	11,72	9,37	10,04	11,72	9,37	2,35
	M7	12,67	6,6	8,52	12,67	6,60	6,07
	M14	13,2	10,79	10,97	13,20	10,79	2,41
	M11	13,75	11,25	11,94	13,75	11,25	2,50
Elqui Bajo	1N	19,55	19,57	20,01	20,01	19,55	0,46
	1S	22,78	20,73	21,77	22,78	20,73	2,05
	2S	39,99	37,31	40,40	40,40	37,31	3,09
	3S	46,71	45,48	48,11	48,11	45,48	2,63
	3N	48,04	48,94	50,67	50,67	48,04	2,63
	4N	73,5	71,23	72,55	73,50	71,23	2,27
	5S	152,32	151,19	154,81	154,81	151,19	3,62
	6S	180,02	175,47	177,56	180,02	175,47	4,55
	6N	180,42	175,58	177,42	180,42	175,58	4,84
	7N	198,57	200,81	202,16	202,16	198,57	3,59
	7S	199,21	200,39	201,17	201,17	199,21	1,96
8N	233,87	233,06	233,76	233,87	233,06	0,81	
8S	235,54	231,43	231,87	235,54	231,43	4,11	
Elqui Medio	9S	260,16	260,88	259,09	260,88	259,09	1,79
	9N	260,51	261,43	259,82	261,43	259,82	1,61
	10S	275,07	274,47	273,39	275,07	273,39	1,68
	11S	290,05	288,16	286,79	290,05	286,79	3,26
	11N	291,31	288,99	287,28	291,31	287,28	4,03
	12N	342,02	338,9	340,33	342,02	338,90	3,12
	12S	342,1	336,91	337,51	342,10	336,91	5,19
	13S	372,05	371,8	370,39	372,05	370,39	1,66
	13N	372,26	371,19	369,65	372,26	369,65	2,61
	14S	396,69	398,97	400,06	400,06	396,69	3,37
	14N	396,99	397,43	398,03	398,03	396,99	1,04
15S	411,16	411,26	419,86	419,86	411,16	8,70	
15N	414,39	412,65	422,20	422,20	412,65	9,55	
Elqui Alto	18S	545,56	541,94	542,07	545,56	541,94	3,62
	19N	581,75	574,32	573,03	581,75	573,03	8,72
	19S	581,77	573,36	573,07	581,77	573,07	8,70
	20N	593,13	587,93	588,78	593,13	587,93	5,20
	20S	593,77	589,06	591,46	593,77	589,06	4,71
	21S	627,5	622	622,37	627,50	622,00	5,50
	21N	627,96	623,46	624,38	627,96	623,46	4,50
	22S	703,4	698,69	695,16	703,40	695,16	8,24
	22N	703,48	699,27	695,98	703,48	695,98	7,50
	23S	751,85	748,79	770,84	770,84	748,79	22,05
23N	751,85	749,24	771,86	771,86	749,24	22,62	
						Máximo:	22,62
						Mínimo:	0,46

* Cabe mencionar que los niveles indicados hacen referencia a modelos que consideran condiciones de recarga superficial y explotación distintas.

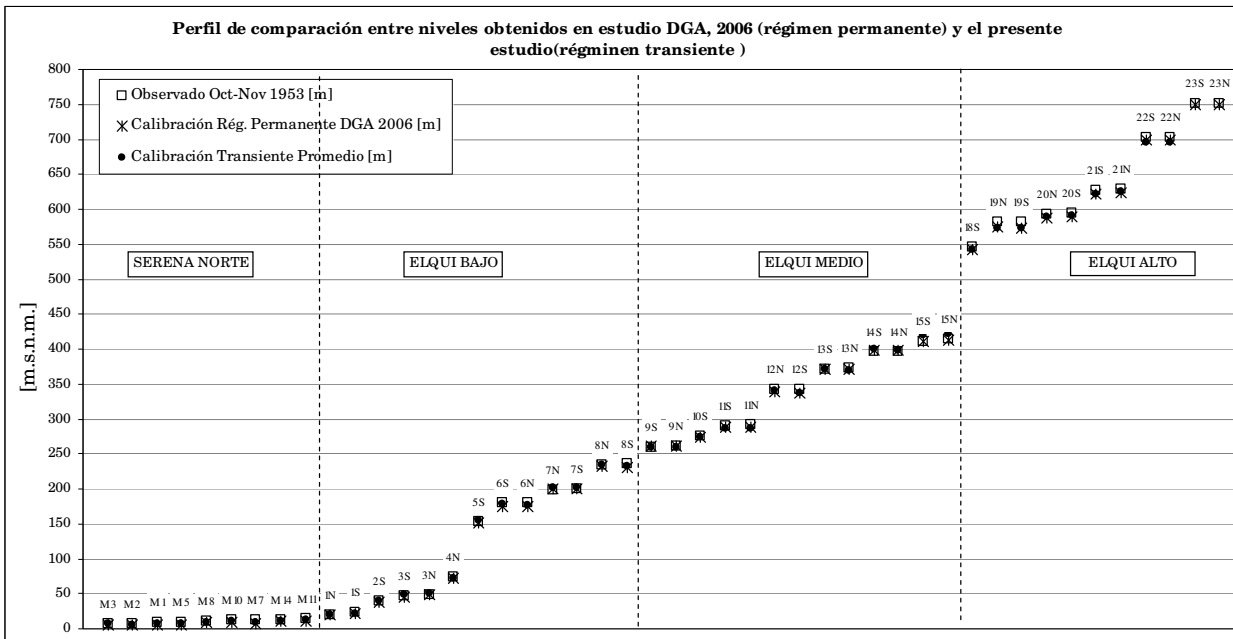


Figura J-2

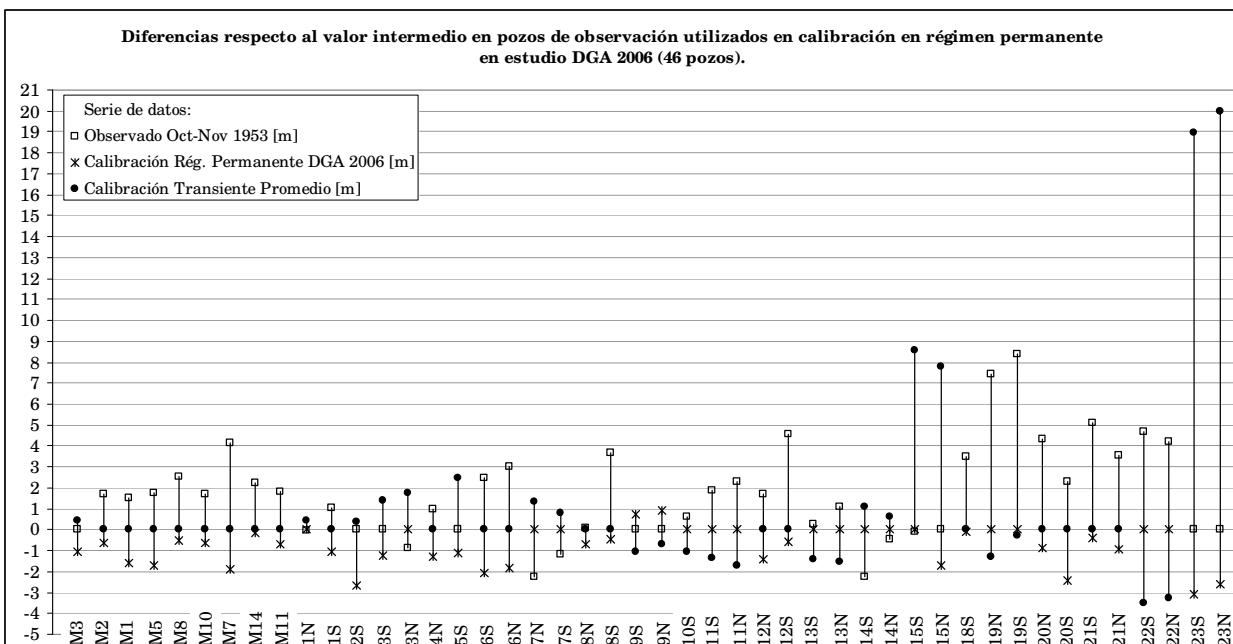


Figura J-3

ANEXO K RELLENO SEDIMENTARIO DEL RÍO ELQUI ENTRE ALGARROBAL Y ALTOVALSOL

Tabla K-1 Relleno Sedimentario del Río Elqui Entre Algarrobal y Altovalsol

Perfil Geofísico	Sector	Kilometraje	Todo el relleno		Ancho del relleno a la prof. De:					Prof. Máx. [m]	Cubos parciales entre profundidades [millones m3]					
			Sección Transv. [m2]	Cubos parcial [mill. m3]	[m]						0 - 10 m	10 - 25 m	25 - 50 m	20 - 100 m	100 m - máx.	
					0 m	10 m	25 m	50 m	100 m							
27	Algarrobal	0	31.25	-	467	445	405	335	100	105	-	-	-	-	-	
26'	Pte. Algarr.	1,75	51.5	72.406	575	550	510	450	290	135	8.912	12.534	18.594	25.703	4.659	
26	Diaguitas	5,22	92.061	249.077	867	830	870	555	-	70	24.481	34.613	49.556	41.727	5.87	
25	Peralillo	9,57	124.125	470.204	1725	1675	1625	1450	0	100	55.43	79.931	119.625	119.081	0	
-	Q. Rincon	11,96	72.5662	235.041	1240	1125	975	710	165	115	34.446	48.397	71.102	69.459	0.985	
24	-	13,5	96.436	130.128	1137	1080	1015	895	420	148	17.641	24.226	34.602	42.157	8.714	
-	Vicuña	15,17	138.25	195.963	1750	1625	1500	1190	660	155	23.347	32.69	49.682	66.069	23.572	
23	Huancara	16,77	62.186	160.349	760	725	651	545	300	143	19.44	27.006	38.86	53.9	19.68	
22	-	18,85	125.625	195.323	1175	1130	1055	935	685	180	19.708	27.776	41.418	64.09	35.204	
-	El Tambo	20,75	103.5	217.669	1450	1325	1160	900	420	150	24.13	33.274	48.094	69.825	36.005	
21	-	21,93	50.25	90.712	825	795	740	590	-	82	12.965	17.788	25.001	24.98	4.13	
20	Q. Sn. Carlos	24,56	63.061	149.004	820	770	690	560	280	142	21.106	29.538	42.409	39.897	5.155	
18	Puclaro	29,28	25.125	208.119	405	375	335	260	0	100	27.966	38.409	54.427	64.9	9.251	
17	Porotal	32,26	32.125	85.875	615	565	500	350	-	87	14.7	19.969	27.094	19.462	0	
16	-	35,79	45.311	135.9	645	605	560	445	175	121	21.323	29.352	40.694	38.566	2.15	
15	El Molle	38,02	21.75	74.773	545	505	440	180	-	57	12.822	17.645	22.648	17.985	1.366	
14	El Molle	39,88	27.062	45.395	820	740	550	100	-	53	12.136	15.589	14.764	0.725	0	
13	Marquesa	41,35	24.187	37.668	610	565	465	220	-	59	10.051	12.789	12.265	0.838	0	
11	Pelicana	44,83	43.311	117.446	1090	975	810	400	-	85	28.188	36.736	41.216	13.903	0	
10	Titon	46,81	36.75	79.26	1300	990	600	300	-	72	21.557	25.059	26.111	10.197	0	
9	Q. Talca	48,23	118.625	110.316	2565	2400	1970	1075	-	95	25.755	31.737	35.012	19.515	0	
8	-	50	75.937	172.187	1600	1425	1170	690	-	87	35.356	46.23	56.695	32.702	0	
7'	Hinojal	51,22	83.5	97.256	1900	1635	1280	800	-	95	20.008	25.208	31.72	18.767	0	
7	las Rojas	52,3	57.5	76.275	850	805	720	565	220	110	14.013	17.982	21.031	20.317	0.396	
7"	-	53,57	123.437	115.054	2320	2220	1610	1225	225	120	19.669	25.503	32.702	35.48	2.127	
6'	Saturno	55,6	109.75	236.685	1335	1307	1265	1150	380	146	36.449	48.735	66.609	75.617	11.155	
4	Altovalsol	60,93	241.562	936.246	2190	2100	1925	1785	1240	185	92.369	132.657	205.371	201.54	163.737	
											4.694.331	653.968	909.018	1.227.302	1.187.402	335.156

- Notas:
- Las profundidades se han tomado desde el nivel del río
 - Las profundidades observadas de la napa frática son las siguientes: Algarrobal, 8m; Huancara, 7 m ; Puclaro, 8 m; Pelicana, 9m; Altovalsol, 7,5.
 - Las secciones transversales son los perfiles levantados por sísmica de refracción, con excepción de las marcadas, que fueron tomadas del plano general con curvas de nivel de la roca fundamental.
 - El kilometraje corresponde al eje de erosión del valle (fondo de la roca fundamental).

Fuente: MONSALVE, 1957.