



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

INFORME TÉCNICO

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, CUENCA
DEL RÍO LIGUA, V REGIÓN**

TOMO I

**ELABORADO POR:
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

S.I.T. N° 80

Mayo 2002

EQUIPO DE TRABAJO

Departamento de Estudios y Planificación (DEP)

Jefe Depto. Ing. Sr. Carlos Salazar

Ingenieros: Srta. Liliana Pagliero
 Sra. Ana María Gangas

Asesora: Ing. Sra. Damaris Orphanópoulos

Consultor Externo: Ing. Sr. Pablo Isensee

INDICE

TOMO I

1.	INTRODUCCION Y OBJETIVO	1
2.	ANTECEDENTES	4
3.	REVISIÓN COMPLETA DEL MODELO MOS	6
4.	RECALIBRACION Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	7
	4.1. Calibración de parámetros de los acuíferos	7
	4.2. Contraste con caudales en Estación Fluviométrica	15
	4.3. Contraste con caudales aforados.....	17
	4.4. Comparación de datos del modelo con información reciente.....	19
5.	OPERACIÓN DEL MODELO.....	25
	5.1. Escenarios de derechos	25
	5.2. Escenarios de referencia	27
6.	RESULTADOS PARA ESCENARIOS DE DERECHOS	28
	6.1. Efecto del aumento de bombeo sobre los almacenamientos en los acuíferos.....	28
	6.2. Efecto del aumento de bombeo sobre los caudales captados por los canales	41
	6.3. Efecto del aumento de bombeo sobre los caudales en el río	56
	6.4. Análisis de la afección a las aguas superficiales	70
7.	BALANCE GLOBAL Y DE LOS ACUÍFEROS	72
	7.1. Balance Global.....	72
	7.2. Balance de los acuíferos.....	74
8.	CONCLUSIONES	78

ANEXOS

- A1. Listado de los Archivos de Entrada del Modelo MOS Ligua, revisados y corregidos
- A2. Gráficos de información recopilada, Aforos DGA v/s Caudal Captado por Canales del Modelo MOS Ligua.
- A3. Gráficos Volúmenes y Niveles Escenarios F1B, F4B y H00.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVO

El presente informe contiene el análisis de la cuenca del río Ligua realizado en base a una modelación hidrológica. La concepción original del modelo utilizado proviene del estudio: Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos de las Cuencas de los Ríos Petorca y Ligua, realizado por IPLA Ltda – AC Consultores para la DGA en septiembre 1998. El estudio contenido en el presente informe tiene por objetivo evaluar los recursos hídricos subterráneos con el fin de analizar la factibilidad de escenarios de derechos de aprovechamiento subterráneos en el valle del río Ligua.

El presente estudio generó la necesidad de revisar y actualizar el Modelo Operacional del Sistema MOS-Ligua, que la DGA ha utilizado en la evaluación de los recursos de la cuenca del río Ligua.

El estudio que a continuación se presenta, consiste fundamentalmente de cinco partes:

- 1° una revisión completa del modelo mismo, de los conceptos de modelación y de los datos de entrada,
- 2° una recalibración completa del modelo
- 3° la operación del modelo, consistente en una serie de simulaciones en las que se analizan diferentes escenarios de derechos y de demandas subterráneas, en cuanto a su viabilidad, a sus efectos sobre el acuífero y sobre los caudales superficiales
- 4° los balances resultantes para el valle completo y para el acuífero en los escenarios analizados
- 5° las conclusiones

El análisis se orienta a evaluar los efectos del bombeo sobre el acuífero y también a evaluar el efecto del bombeo sobre los caudales en el río y sobre los caudales captados por los canales. La versión utilizada del modelo MOS incorpora actualizaciones y mejoras realizadas dentro de la DGA y sugerencias del consultor externo.

Para facilitar la comprensión del trabajo, en la Figura N°1 adjunta se presenta un plano de ubicación del cuenca. La Figura N°2 presenta un esquema lógico del funcionamiento del modelo.

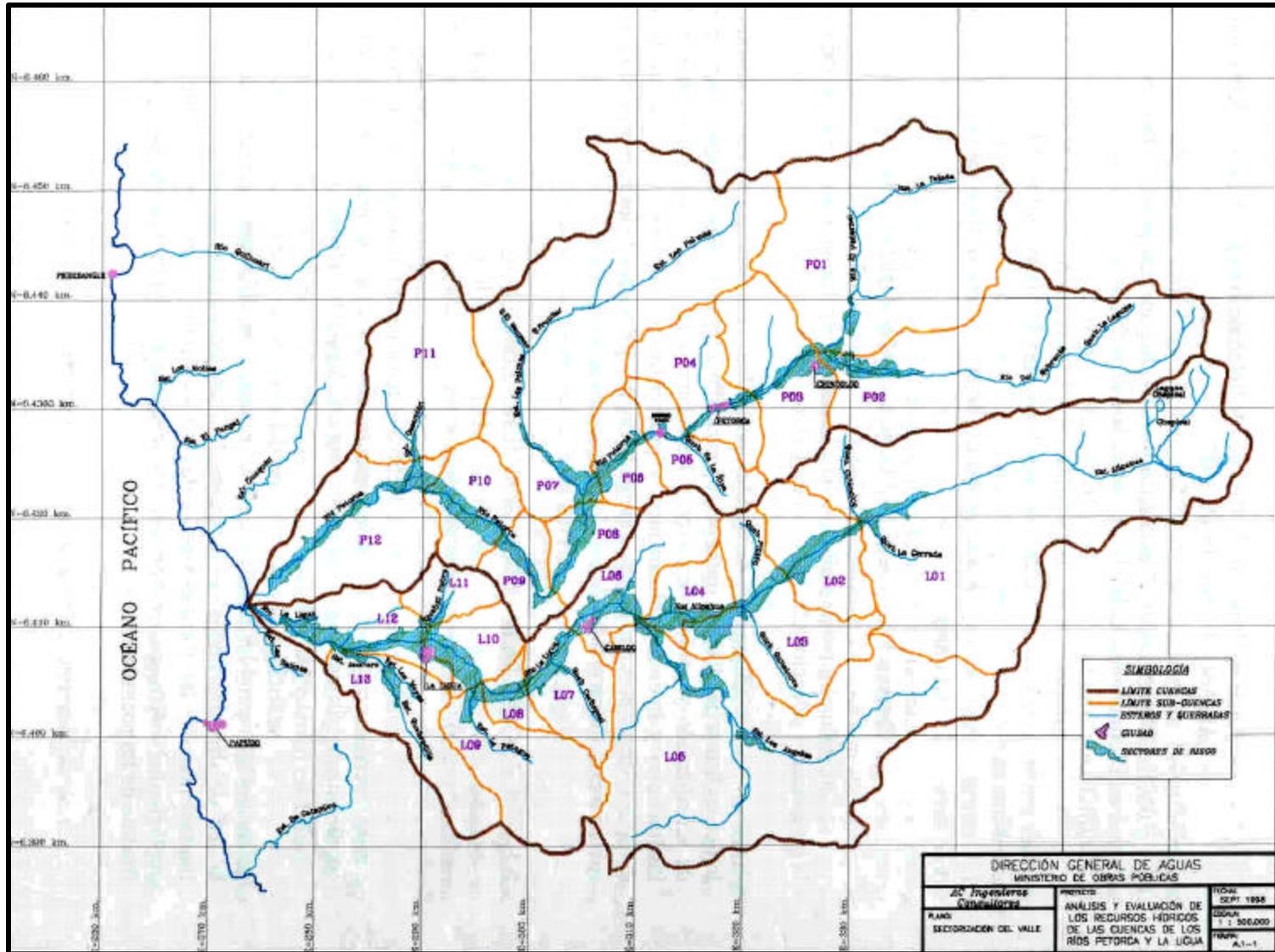


Figura N°1: Ubicación de la cuenca

VALLE DEL RÍO LA LIGUA ESQUEMA DE MODELACIÓN DEL SISTEMA

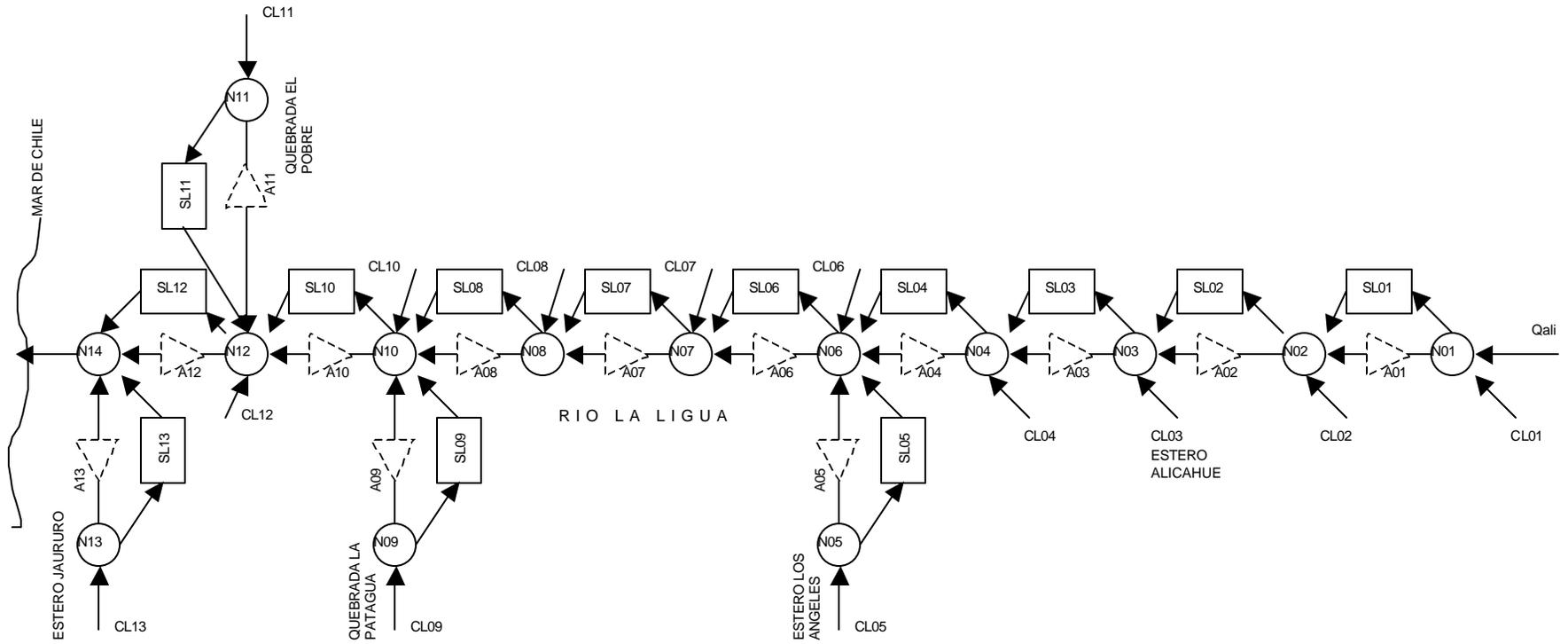


Figura N°2

2. ANTECEDENTES

El trabajo se basó, como punto de partida, en el MOS del Ligua con que contaba la DGA, y que corresponde al resultado del estudio “Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos de las Cuencas de los Ríos Ligua y Petorca”, IPLA 1998.

El modelo MOS opera con 13 sectores de riego, 13 acuíferos correspondientes, y 14 nodos. Todos estos elementos están vinculados entre sí de acuerdo a su particular realidad, como se ve en el esquema de la Figura N°2.

El modelo MOS requiere, como datos de entrada, los caudales de entrada de las cuencas de cabecera y de las cuencas laterales asociadas a los sectores de riego que aparecen en el esquema de la Figura N°2. Todos estos caudales son generados de manera previa con el Modelo de Generación de Caudales en Cuencas Pluviales MPL. Dicho modelo utiliza como datos, la precipitación y evapotranspiración mensual sobre la cuenca, y un conjunto de parámetros que permiten calcular los caudales pluviales aportados por tales cuencas. El modelo MOS requiere además, información de entrada acerca de los sectores de riego, acuíferos y bombeos, todos los cuales se ingresan en forma de archivos de entrada, que se presentan a continuación:

- Cprio.dat : Coeficientes de percolación de río.
- Dlluvia.pmm : Precipitaciones medias mensuales Estación La Ligua (mm).
- Infsec76.dat : Datos de los sectores de riego, situación 1976.
- Infsec95.dat : Datos de los sectores de riego, situación 1995.
- Insub.dat : Datos de los acuíferos.
- Nnmsec76.nmm : Necesidad predial (mm), situación 1976.
- Nnmsec95.nmm : Necesidad predial (mm), situación 1995.
- Qali.qmm : Estero Alicahue en Colliguay, Caudales medios mensuales (m³/s).
- Simsec.prm : Parámetros de Simulación para la Generación Sintética de caudales en los sectores de riego.
- Qcslig.qad : Archivo binario que contiene caudales medios mensuales sintetizados de cada cuenca lateral obtenidos del MPL.
- Qbslig.qad : Archivo binario que contiene la extracción para riego desde cada sector acuífero.
- Qbtlig.qad : Archivo binario que contiene la extracción total desde cada sector acuífero.

El modelo MOS permite representar un período de 48 años en dos condiciones: histórica y futura. La condición histórica utiliza la información hidrológica del período 1950 a 1998, las áreas y condiciones de riego de 1976 para el período 1950 a 1990, las áreas y condiciones de riego de 1995 desde 1991 hasta 1998, y la explotación histórica de los acuíferos según el estudio antecedente. En esta condición histórica se efectúa la calibración del modelo.

En la condición futura, el modelo abarca igualmente 48 años, repite la hidrología del período 1950 a 1998, pero usa como áreas y condiciones de riego la situación de 1995, como una constante para todo el período futuro. Como explotación de los acuíferos, usa el patrón de bombeo que se imponga según el escenario que desee analizarse, que puede ser de derechos o de demandas. En esta condición futura, se realiza la operación del modelo, para el análisis de los diferentes escenarios.

El enlace entre un escenario histórico y futuro se hace a través del estado de los acuíferos en marzo de 1998, que es el estado final del escenario histórico, e inicial del escenario futuro.

El modelo entrega, como resultados, en forma de matrices, con datos de cada mes y cada año, los valores de todas las variables que caracterizan tanto los ríos como los sectores de riego y los sistemas acuíferos.

3. REVISIÓN COMPLETA DEL MODELO MOS

El modelo MOS fue revisado íntegra y exhaustivamente por el equipo de trabajo. Esta revisión llevó a realizar los siguientes mejoramientos de fondo sobre la versión original:

- inclusión de los aportes de la lluvia sobre los sectores de riego
- revisión y corrección de los parámetros que representan las percolaciones de la lluvia hacia el acuífero
- consideración del grado de saturación del suelo no saturado en función de la lámina de riego aplicada y de la lluvia
- revisión completa de las áreas de riego, tanto para la situación histórica como para la situación actual de desarrollo. Para este último caso, se incluyó las áreas sobre cota de canal que se desprenden del último censo Agropecuario de 1997
- revisión completa de los patrones de cultivo y de las necesidades netas de agua por sectores
- revisión y corrección de las eficiencias prediales por sector
- revisión y corrección de los coeficientes de percolación y de derrame, de acuerdo a las publicaciones más recientes de FAO que aportan material sobre el tema
- revisión y corrección de todos los parámetros que caracterizan el tamaño y la capacidad de los acuíferos (archivo infacuif_ligua.XLS – en anexos)
- inclusión de una modalidad de bombeo según demanda, en que el bombeo es un resultado, en vez de un dato de entrada. En esta modalidad, los derechos son considerados como un límite a la capacidad de bombeo, pero no como un bombeo obligado de todos los años, sino que el bombeo obedece a la demanda real de agua subterránea cuando el agua superficial no cubre toda la demanda.

Además, se procedió a realizar los siguientes mejoramientos en la forma de entrega de los resultados:

- se entrega todos los resultados ligados a los acuíferos, a los sectores de riego y al río, antes se entregaban sólo algunos
- se entrega los resultados en forma de vectores, como series de tiempo, además de las matrices que entrega la versión original, lo que facilita su representación gráfica.

En el Anexo A1 se presenta toda la información de entrada al modelo MOS, revisada y corregida de acuerdo a lo señalado.

4. RECALIBRACION Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo se calibró para todo el período analizado (1950-1998), operando con los bombeos históricos, con las áreas cultivadas históricas, y con sus correspondientes evoluciones, tomadas del estudio antecedente, según se explica en el punto anterior.

El proceso de calibración consistió en variar el parámetro de permeabilidad de los acuíferos, dentro de los rangos establecidos en el estudio Integral de Riego, CICA 1982, hasta lograr el mejor ajuste de los niveles modelados con las variaciones de niveles medidos de los pozos. Además se contrastó el caudal modelado con el caudal medido en una estación fluviométrica (Ligua en Quínquimo) y en aforos realizados para diversos canales.

4.1. Calibración de parámetros de los acuíferos

Los parámetros adoptados para los acuíferos, una vez finalizado el proceso de calibración, y los volúmenes de agua resultantes, son los siguientes:

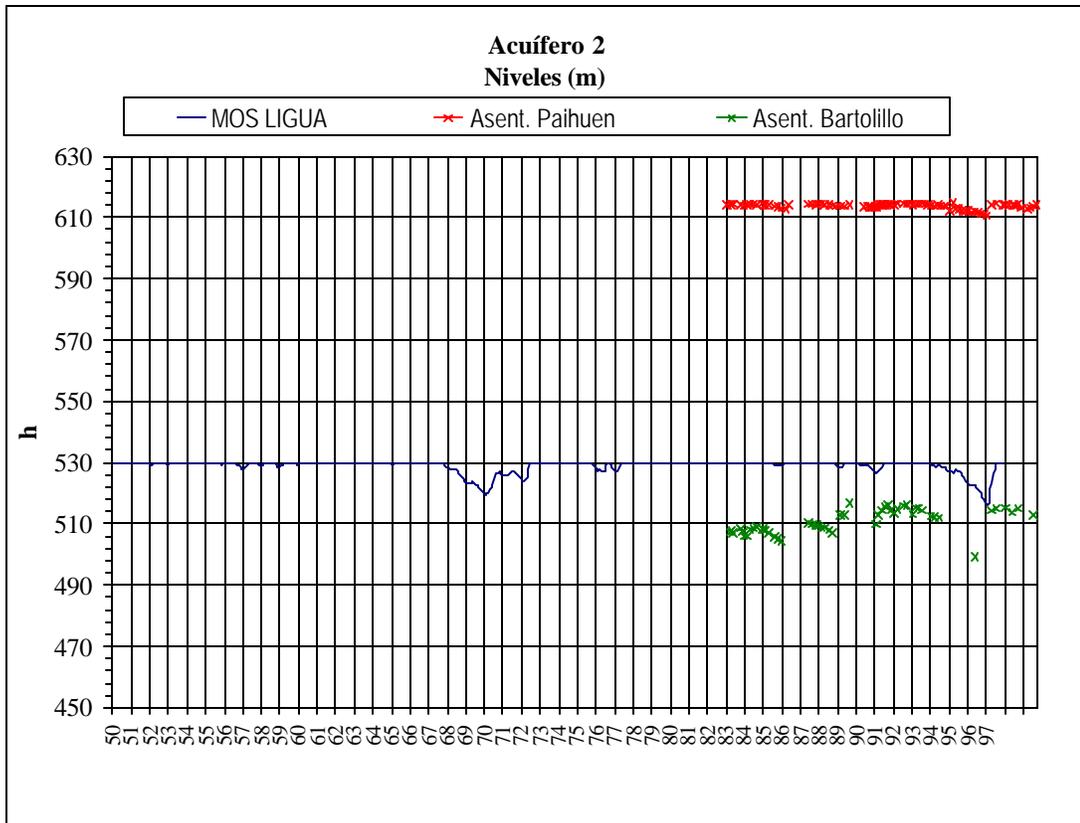
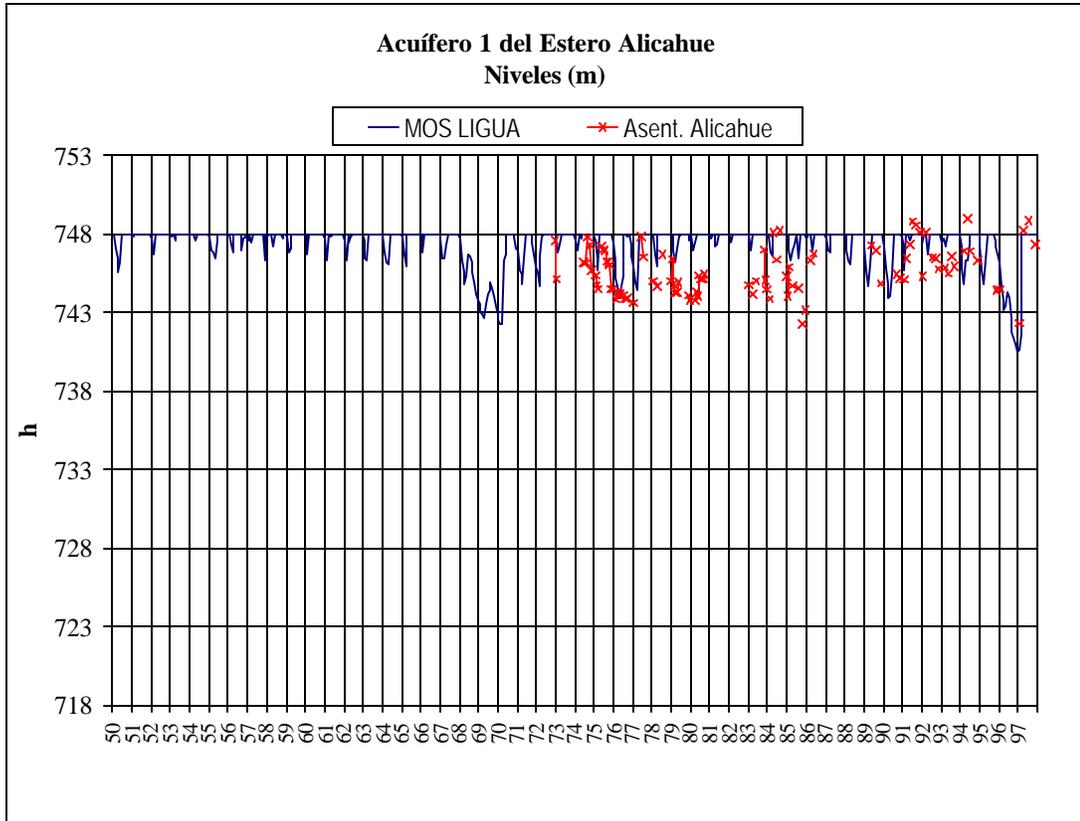
ACUÍFERO N°	Grad. Entrada %	Grad. Salida %	Ss °/1	K m/mes	Volumen agua MMm ³
1	2.50	2.50	0.090	1800	3.38
2	2.50	1.60	0.090	1000	37.22
3	1.60	1.50	0.090	900	50.02
4	1.50	1.00	0.090	1200	20.25
5	1.00	1.00	0.070	300	22.30
6	1.00	0.80	0.120	1500	42.00
7	0.80	0.50	0.100	1500	47.50
8	0.50	1.00	0.100	1300	14.00
9	2.50	2.50	0.090	150	9.45
10	1.50	0.40	0.100	800	84.00
11	3.00	3.00	0.100	600	0.20
12	0.40	0.16	0.100	2700	127.40
13	0.50	0.50	0.090	300	5.22
Total					462.94

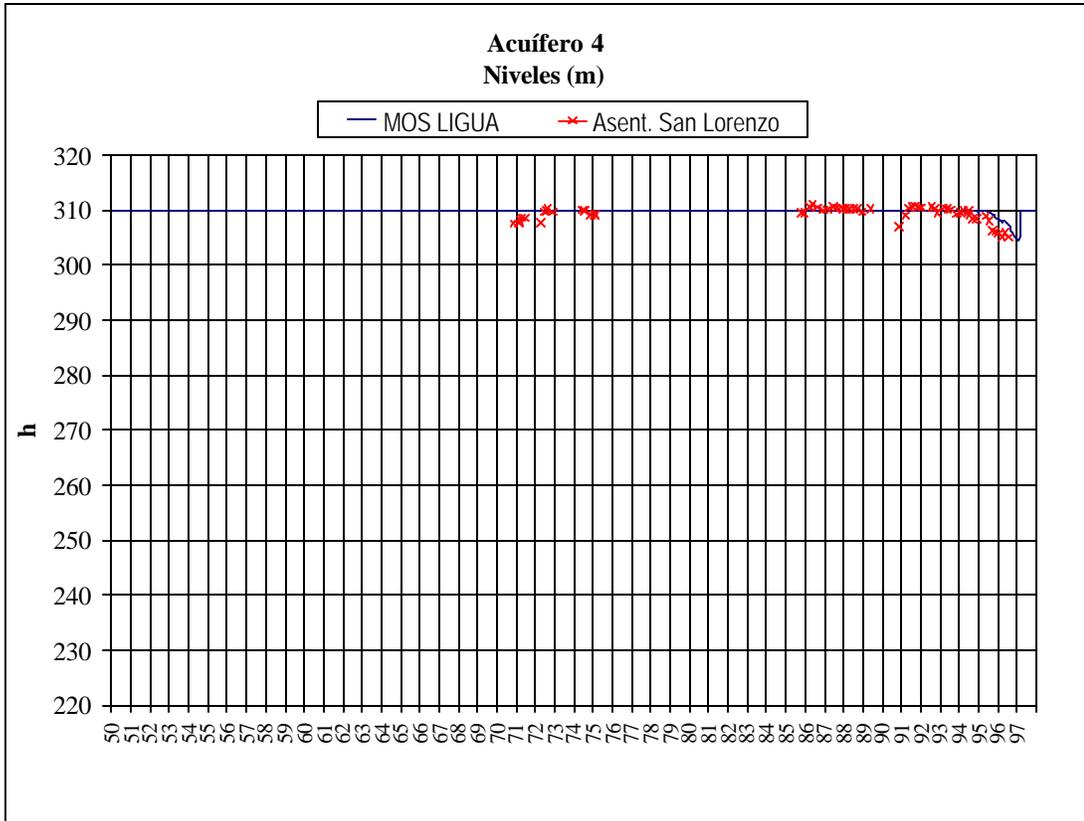
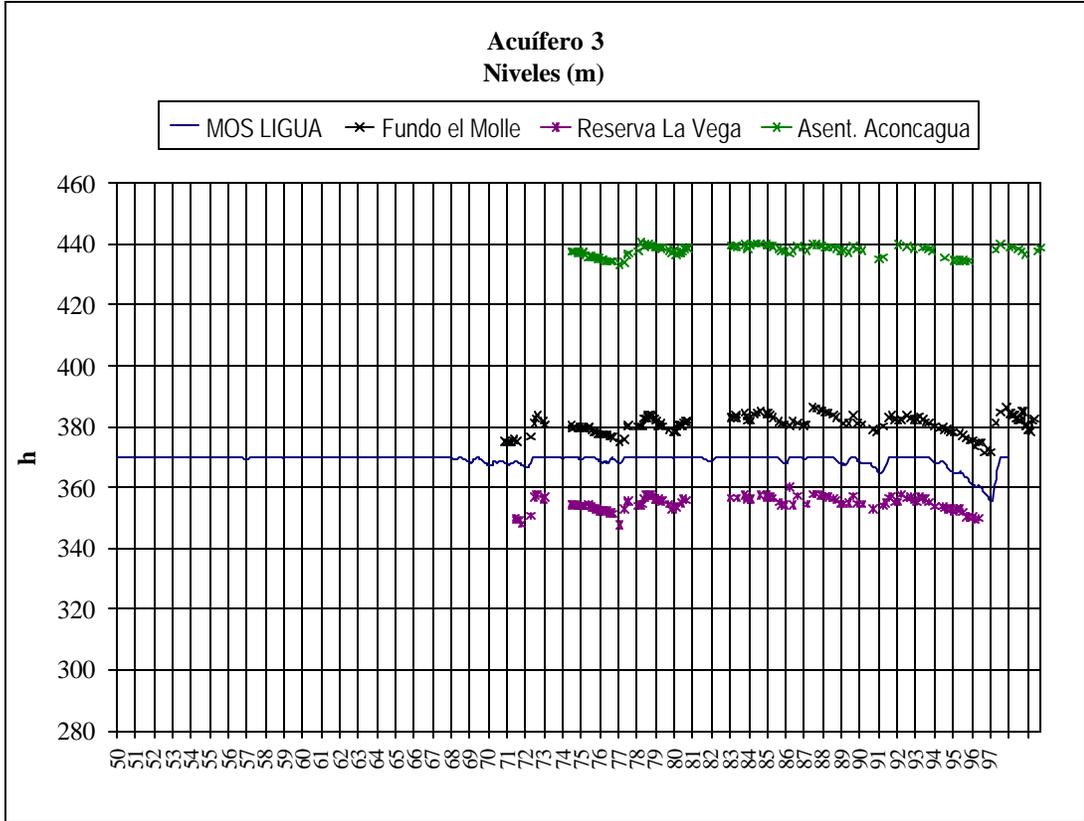
Todos los demás datos de entrada al modelo, revisados, corregidos y/o recalibrados, se presentan en el Anexo A1.

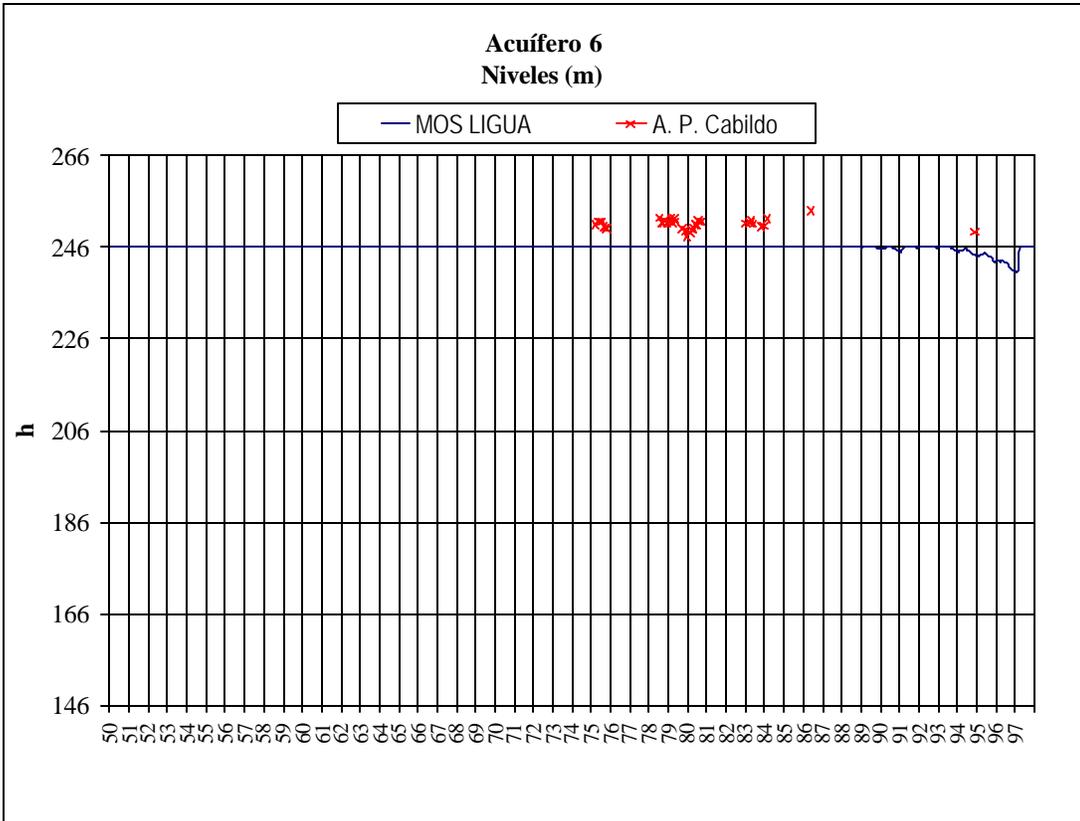
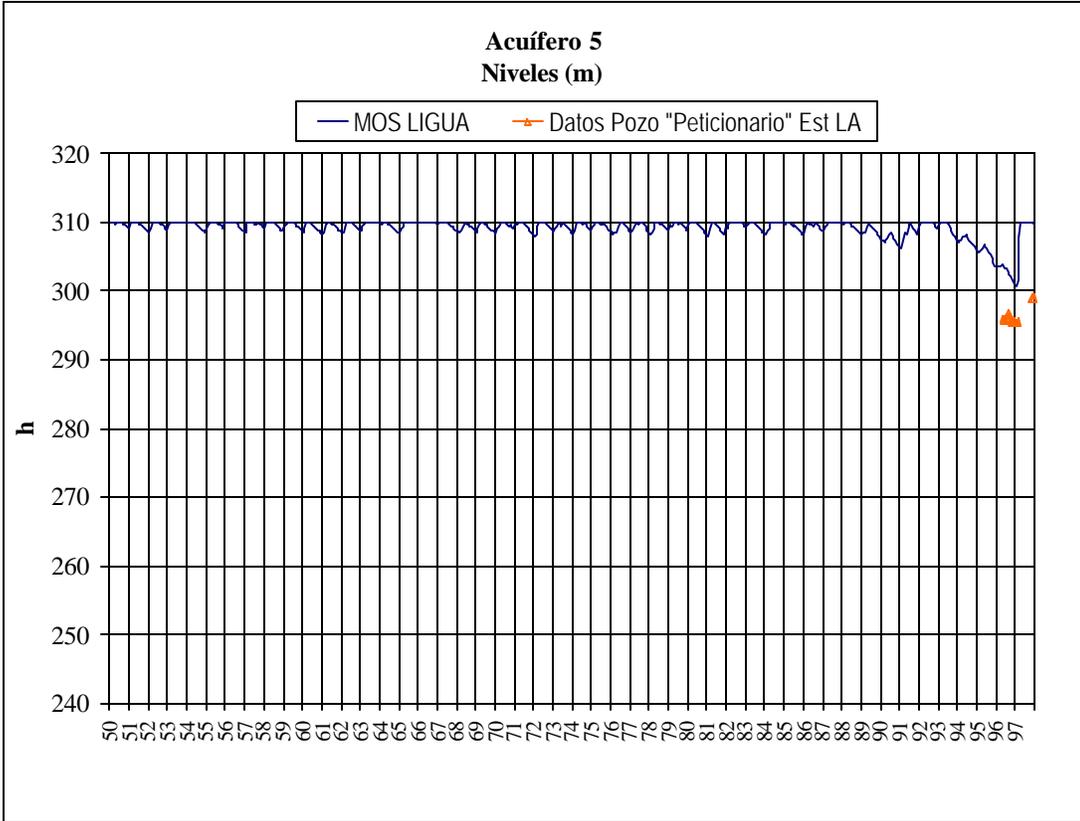
El ajuste logrado se presenta para todos los acuíferos, en los gráficos adjuntos. Debe tenerse en consideración que los niveles presentados son una aproximación obtenida del traspaso de volúmenes resultantes del MOS Ligua a información de nivel, considerando el acuífero como un cuerpo ideal de sección triangular, con

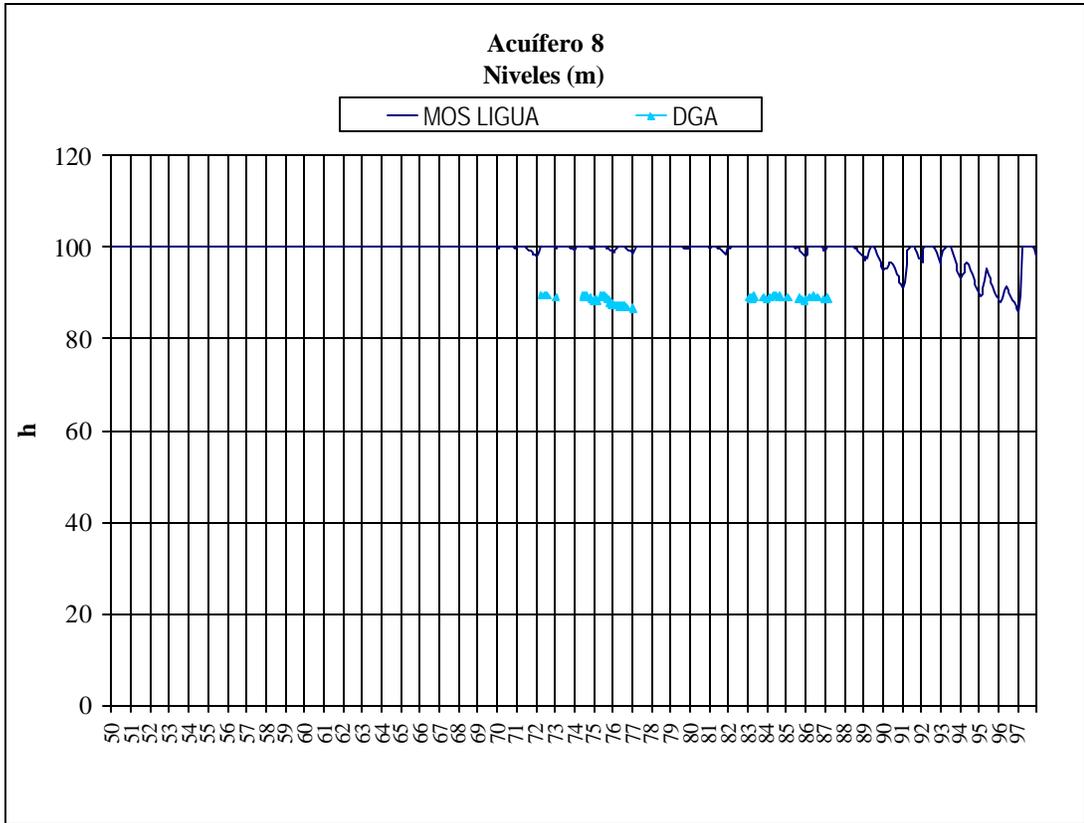
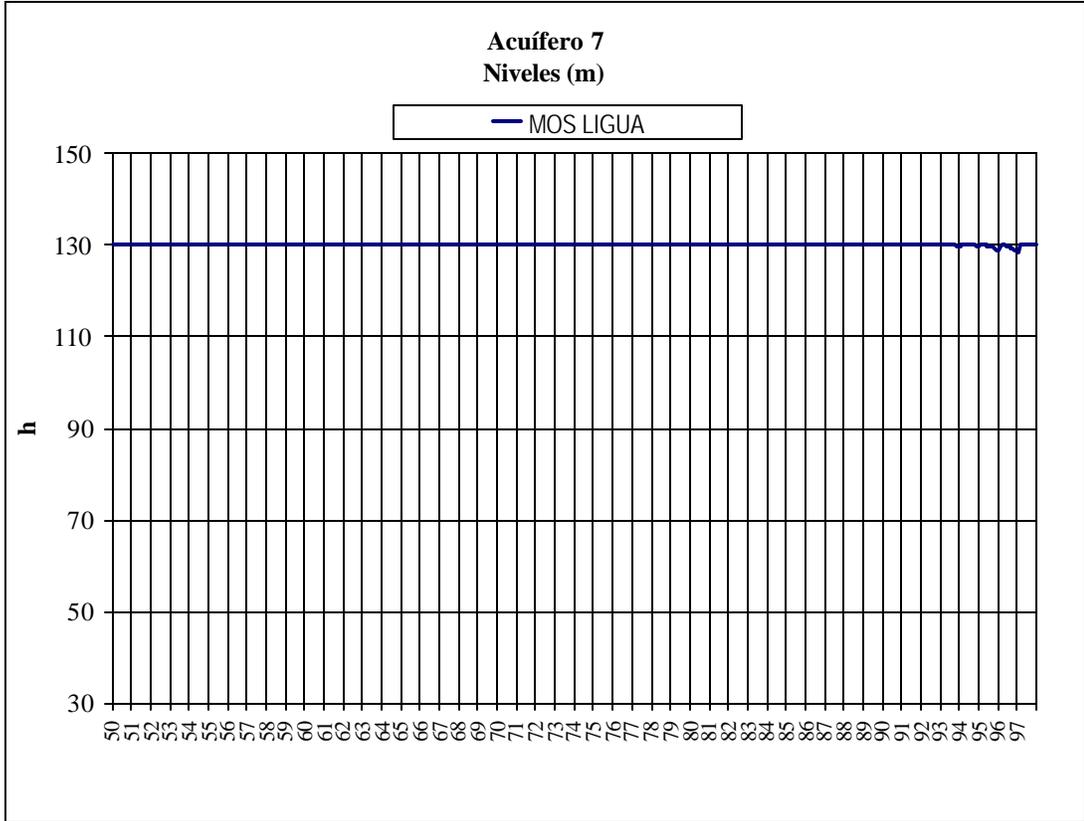
características homogéneas e isotrópicas en todo su volumen. En los gráficos los niveles simulados representan el espesor medio del acuífero considerando que el espesor medio del acuífero se ubica en la cota base del gráfico. Los gráficos buscan reproducir la señal de las variaciones de nivel medidas, y no necesariamente la cota, pues los pozos pueden encontrarse más arriba o más abajo en el mismo sector acuífero, por lo cual las mediciones pueden caer por sobre o por debajo del comportamiento simulado.

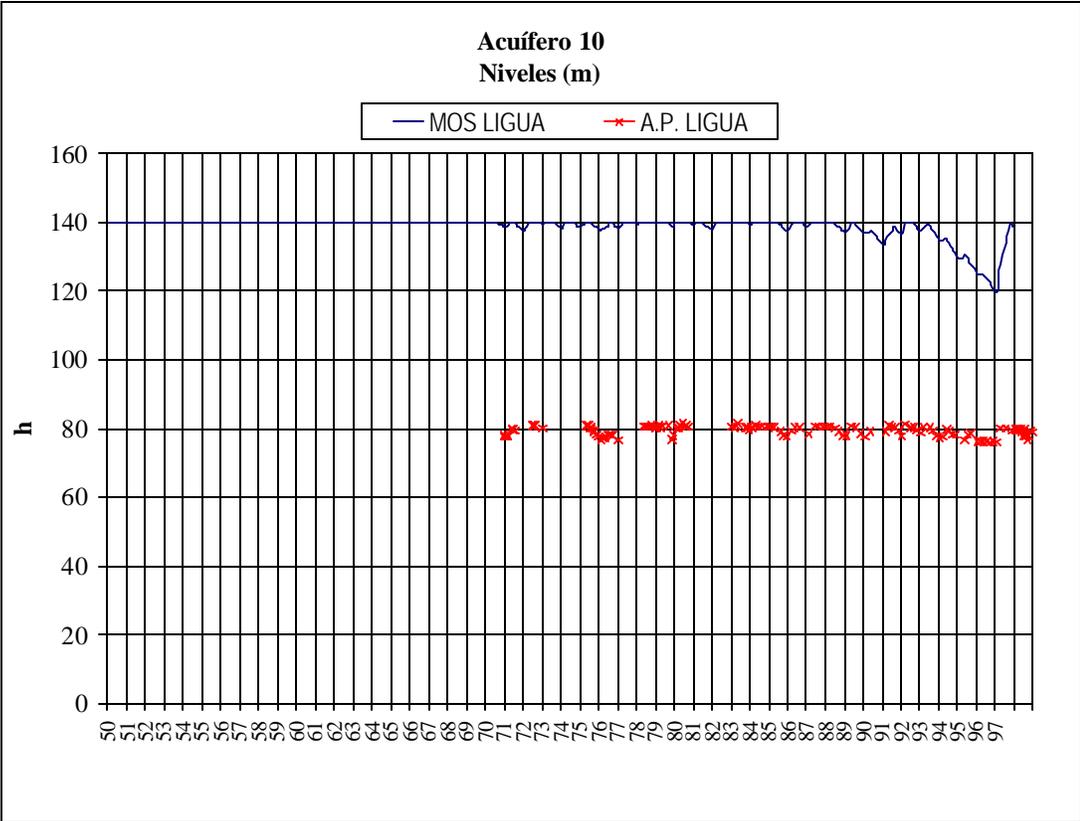
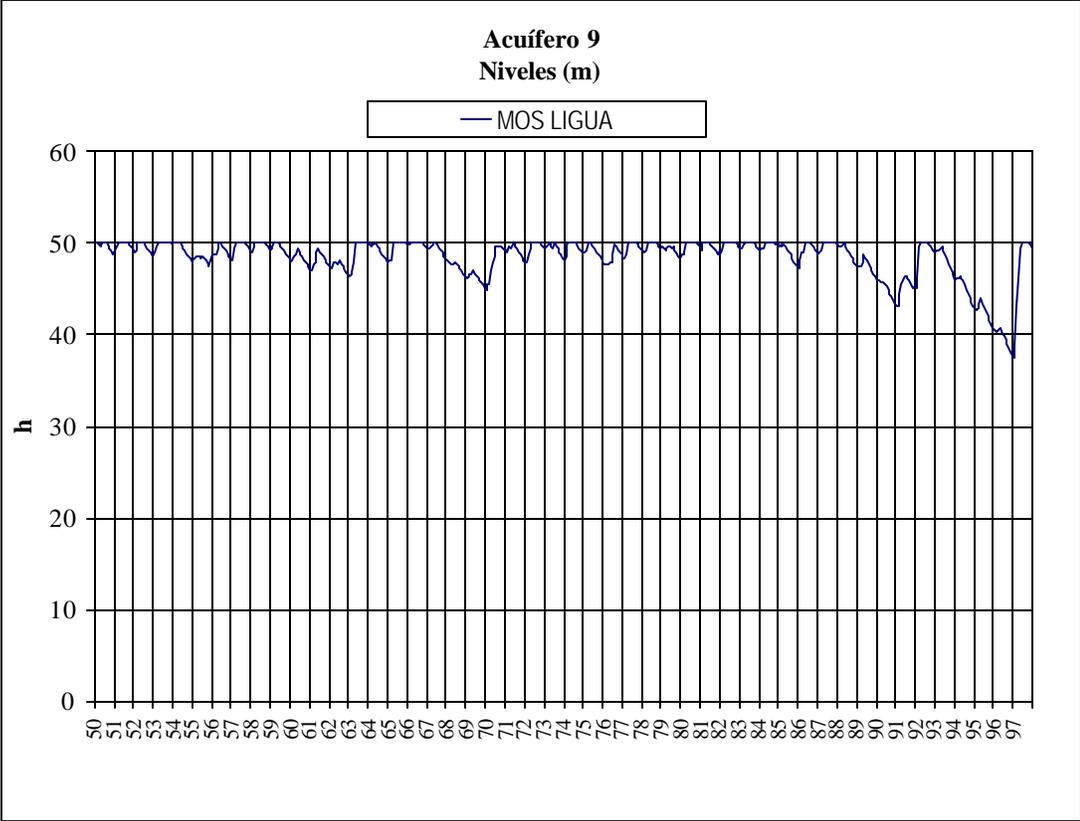
Lamentablemente, no hay pozos de observación de la DGA en los acuíferos 7, 9, 10, 11 y 13. Sin embargo, en todos los demás acuíferos, el ajuste logrado se considera satisfactorio.

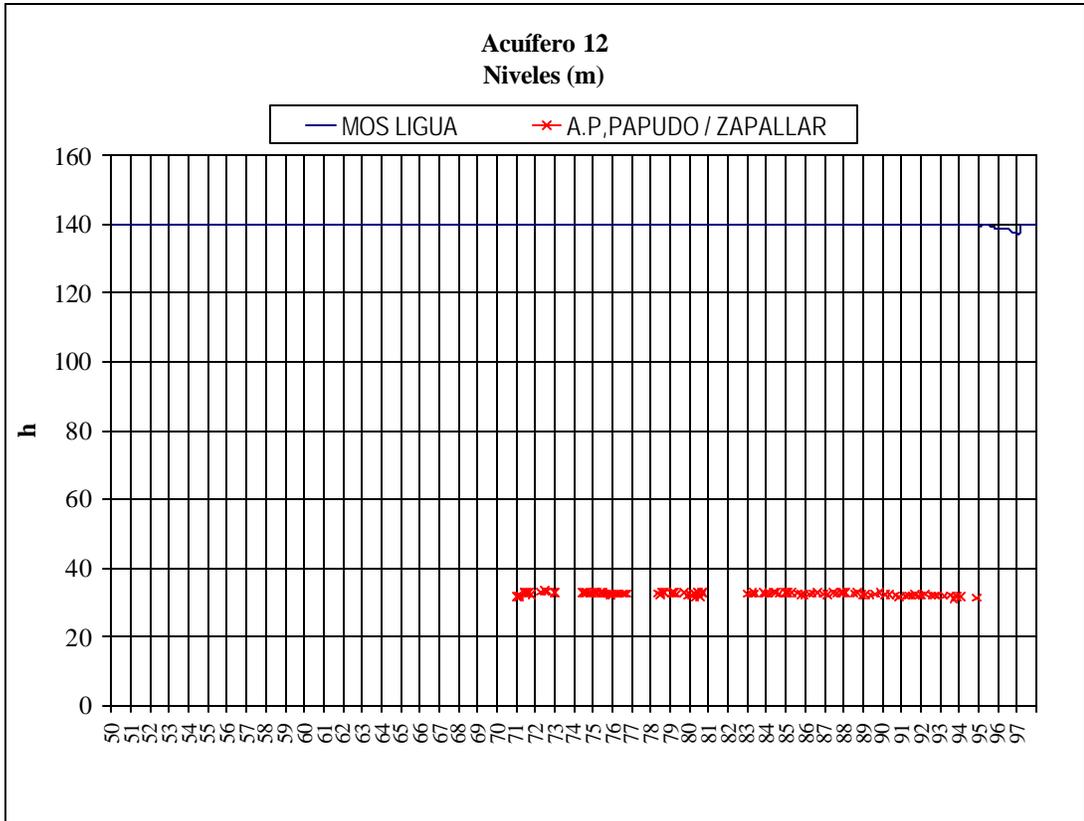
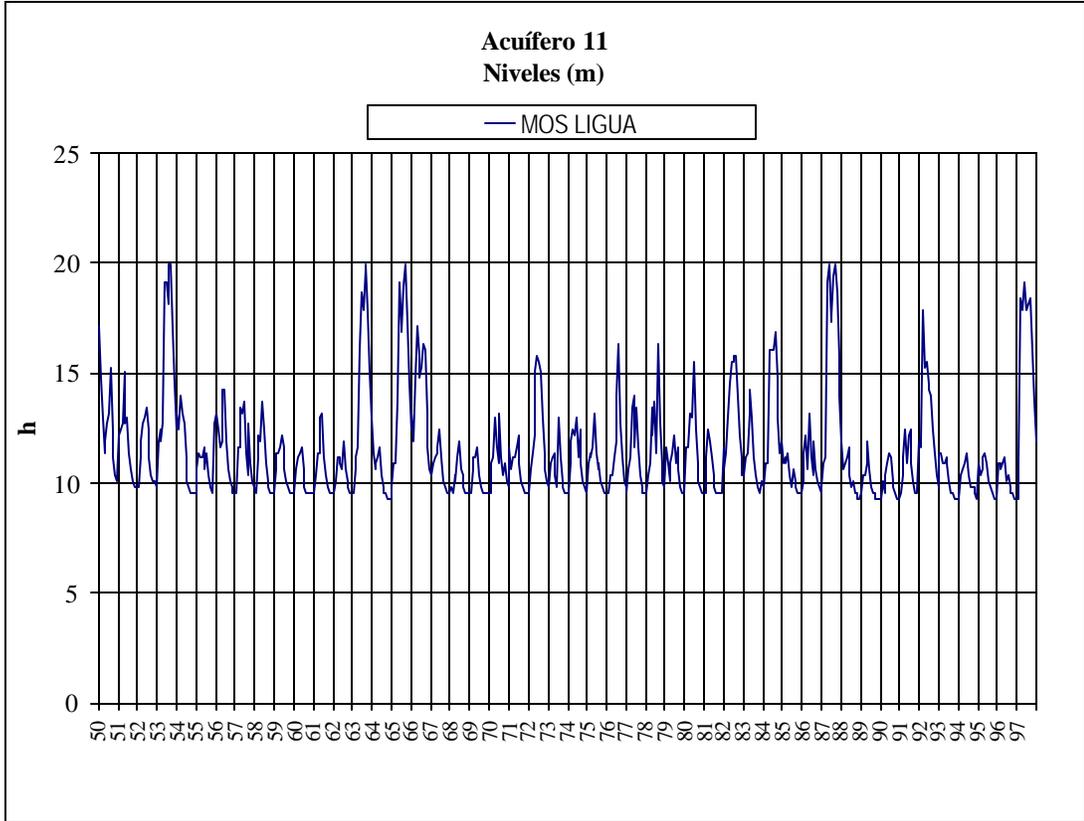


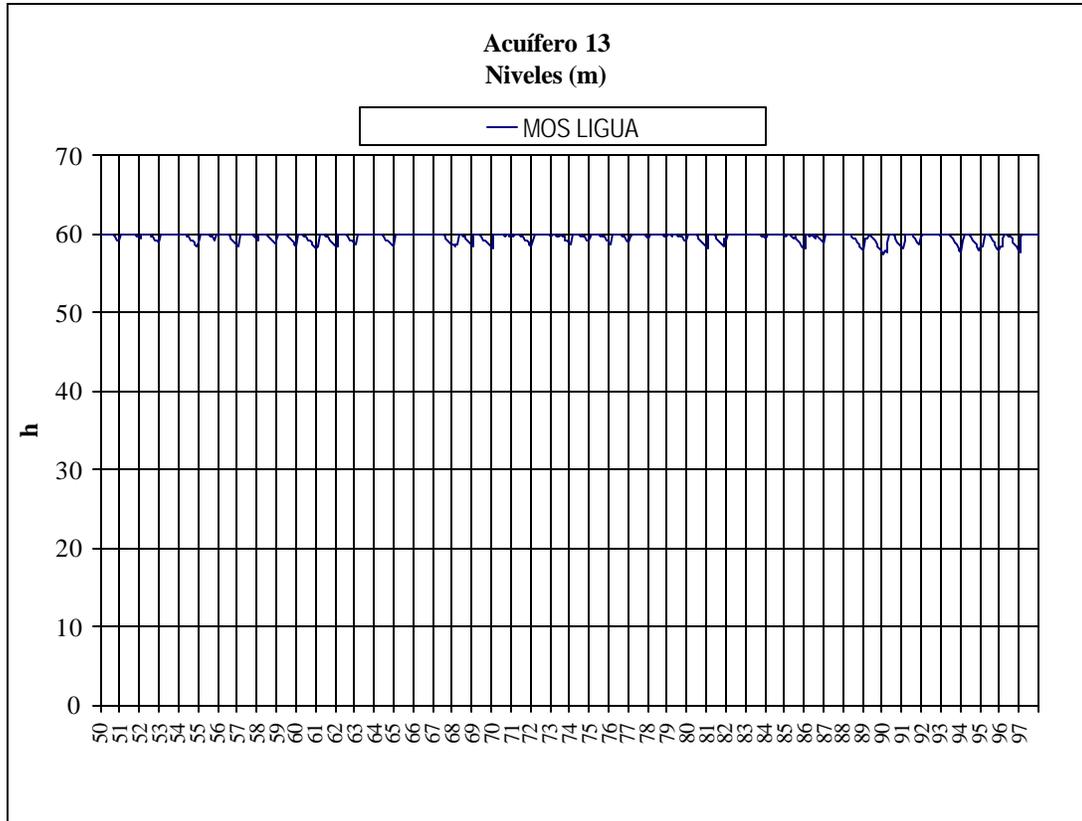






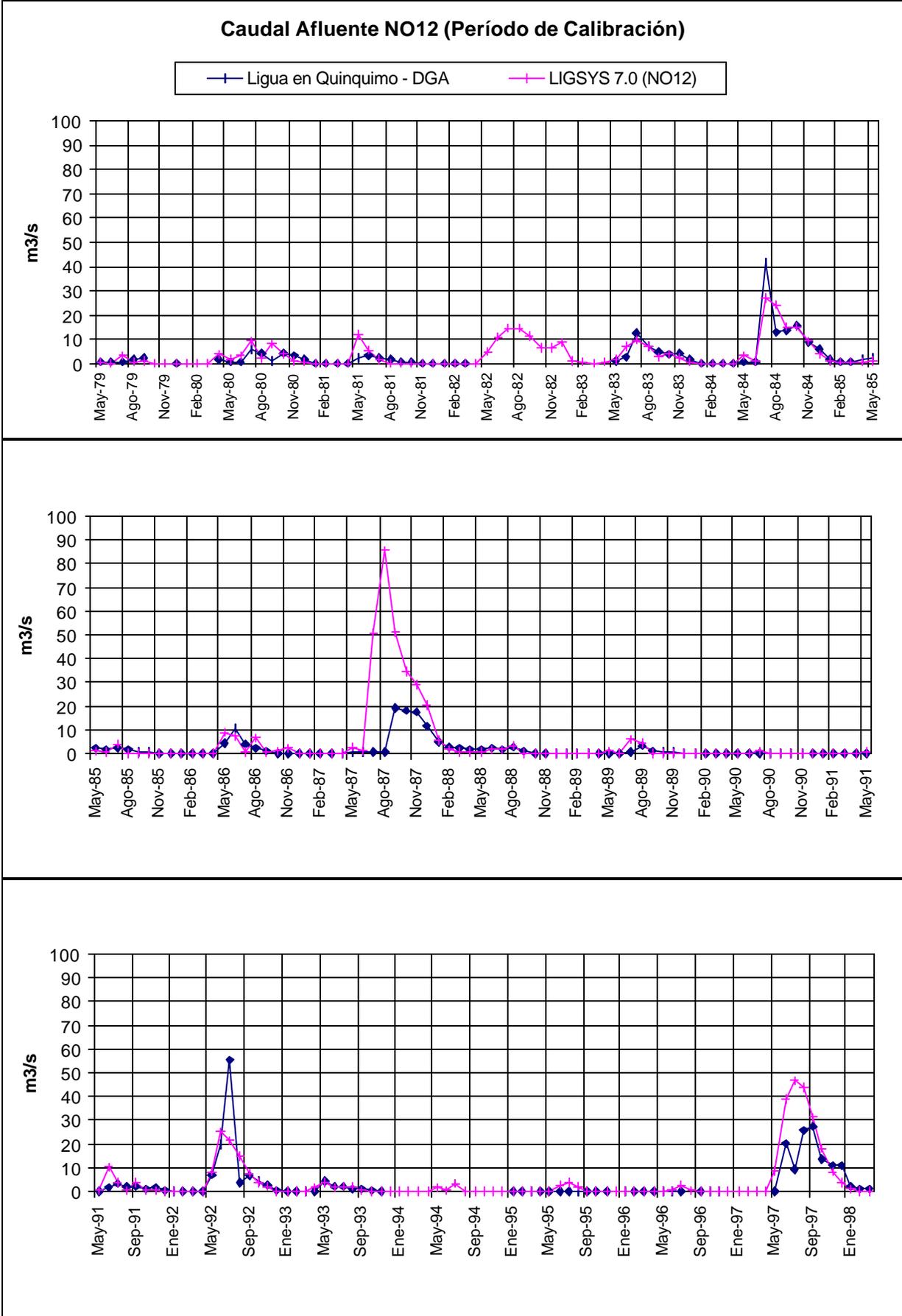






4.2. Contraste con caudales en Estación Fluviométrica

También se contrastaron los caudales superficiales que el modelo entrega para el nodo 12, con los de la estación Ligua en Quínquimo. Esta estación corresponde, aunque no exactamente, al punto representado en el modelo por el nodo 12. Se obtuvieron aproximaciones bastante razonables para la reproducción de los caudales superficiales. El gráfico correspondiente se encuentra adjunto.



4.3. Contraste con caudales aforados

Para tener otro parámetro de contraste de los resultados del MOS Ligua, se recopiló la información de aforos de los canales de la zona con que cuenta el Departamento de Hidrología de la D.G.A., además de la contenida en el Informe “Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos de las cuencas de los ríos Petorca y Ligua” de IPLA – AC que incluye los aforos realizados para el estudio y los de PROAS 1968.

Para hacer comparables los datos simulados con los aforos, se desagregaron los valores de *Caudal captado por canales (archivos del tipo XXXSecYY.cnl)*, de cada sector, que agrupa como un solo caudal todos los canales considerados por el modelo para el sector, en los caudales constituyentes de cada canal, usando para esto el valor de sus respectivas capacidades.

Los canales modelados por MOS, por sector de riego, se presentan a continuación:

SECTOR	CAPTACIONES
1	Canal Alicahue – La Vega* Canal Los Rincones 1 Canal Los Rincones 2 Canal Las Canchas y Vertiente Sauzal
2	Canal Alicahue – La Vega* Canal Cajón de Paihuén
3	Canal Alicahue – La Vega* Dren El Corte – Canal Hospital Vertiente El Pidén
4	Canal Toma Ño Polo o La Arena Canal Toma San Isidro Vertiente Coltahues Vertiente El Sauce Canal El maitenal Vertiente Las Cardas Canal Serrano Vertiente Los Arrayanes Vertiente El Peral*
5	Canal Guayacán* Canal Las Puertas* Canal La Mora* Canal El Culén Canal Toma El Cerro Canal Toma El Bajo Canal El Quemado
6	Canal El Peumo* Canal Del Medio o La Sirena* Canal Del Bajo o Del Hambre* Canal La Laja*
7	Canal La Laja Canal Dren Cabildo – Monte grande Canal El Ingenio* Pozo Dren Cabildo Dren El Pajonal

8	Canal Dren Cabido – Monte grande* Canal La Palma* Canal Las Garzas*
9	Pozo Las Diucas
10	Canal Dren Cabildo – Monte grande* Canal La Palma Canal Los Loros de La Ligua Vertiente El Monte* Vertiente La Pirca Canal Valle Hermoso* Canal Aguas Claras Canal Toma Abel Zamora
11	Canal Toma Liguenses Oriente Canal Toma Liguenses Poniente Canal Toma Puntilla Canal Toma Piedra Grande Canal Toma Represita Canal Del Tranque
12	Canal Lobino Vertiente Prieto Canal Pullalli o Illalolen* Canal Comunero* Canal Ex Salineros Canal Las Salinas* Canal Bomba Maitenal
13	Canal Jaururo Canal Bomba Jaururo Canal Quebradilla Canal Las Bombas de Quebradilla

En la tabla anterior, los canales que aparecen con asterisco cuentan con información de aforos.

La información recopilada se contrastó gráficamente y se presenta en el Anexo A2.

Como se observa de estos gráficos, los resultados son bastante aceptables teniendo en cuenta que se contrastan valores instantáneos de caudal con valores medios mensuales, que son los que entrega el modelo.

En el Anexo A2, se presentan graficados en primer lugar los caudales captados por canales de sector para todo el rango de años, y luego, a mayor escala los años en los cuales existen aforos.

De los gráficos, se destacan el sector 3 y el sector 6 con errores máximos entre lo simulado y aforado de hasta 400 l/s. Salvo estos casos aislados, para el resto de los aforos, el resultado de la simulación es satisfactorio, teniendo en cuenta la limitación antes señalada.

4.4. Comparación de datos del modelo con información reciente

De acuerdo a lo señalado, la recalibración del modelo MOS del Ligua fue realizada sobre la base de los informes: Estudio Integral de Riego CICA 1982, Proyecto Maipo IPLA 1984, con datos más actuales y con un mejoramiento sustancial de la programación y rutinas del modelo en los aspectos que fue necesario. No obstante lo anterior, también se quiso validar los datos que el modelo maneja, con estudios más recientes y en este caso, con el estudio de **“Diagnóstico del Riego para la provincia de Petorca, CICA 2001”** realizado para la DOH.

En el estudio CICA 2001 se hace un análisis a nivel comunal y otro a nivel de secciones (que coinciden con las secciones legales en proyecto en la cuenca). La subdivisión por secciones es utilizada para proyecciones a futuro, llamadas situaciones 2000, 2010, 2020 y 2030.

Relación entre secciones y sectores del modelo Ligua:

Cica 2001	Modelo Ligua
Sección 1	sectores de riego S01 → S05
Sección 2	sectores de riego S09 → S10
Sección 3	sectores de riego S11 → S13

Kc, Coeficiente de cultivo

Los coeficientes de cultivos no son comparables. Ambos estudios se basan en la misma fuente (FAO N°24) pero llegan a valores diferentes de Kc para cada tipo de cultivo, y además, ambos estudios manejan cultivos diferentes.

ET y ETP, Evapotranspiración y Evapotranspiración Potencial de los cultivos

En el estudio CICA 2001, se adoptó la Etp presentada en el Atlas Agroclimático de Chile (Santibañez 1990) porque los distritos agroclimáticos son más detallados, lo que permite establecer las condiciones y características particulares que posee cada zona de interés. Esta evapotranspiración se presenta como Evapotranspiración Potencial Ponderada en el cuadro N°4 pág 27 del estudio Cica, a nivel de “comuna” expresada en mm.

Por otra parte, el modelo MOS del Ligua adopta la Evapotranspiración utilizada en el Estudio Integral de Riego Cica 1982, que corresponde a la fórmula de Blaney y Criddle. Las ETP son agrupadas por zonas: litoral, interior y central. Pág D39. Esta evapotranspiración se presenta por “clima”: central, interior y litoral; y denominada evapotranspiración de referencia ETo expresada en mm.

Si bien el nombre que se les da en ambos estudios es distinto, ambas son las que se utilizan para calcular la evapotranspiración de los cultivos según la fórmula

$$ET_c = K_c \times E_{to} \quad (1)$$

Al comparar el cuadro N° 4 Cica 2001 con el cuadro D.1.2-5 del informe modelo Ligua, ambas evapotranspiraciones caen dentro de un mismo rango en toda la provincia de Petorca.

Cica 2001	Informe Ligua modelo
1044 – 1298 mm/año	933 – 1375 mm/año

Como ambos estudios fueron desarrollados con diferentes finalidades, en la obtención de la evapotranspiración de los cultivos no se logra una comparación uno a uno de los datos. Al comparar ET_c de la sección 1 del estudio Cica 2001 con ET_c del clima central presentado en el informe del modelo Ligua, tenemos que los valores no son similares, pero el valor anual obtenido para los cultivos está dentro del mismo rango.

EFP, Eficiencia a nivel predial

Las eficiencias utilizadas en ambos estudios, de Cica 2001 y del modelo, son respectivamente:

Surco	(35-40%)	(45 – 50%)
Goteo	(90%)	(90%)
Californiano	(50-70%)	(60%)
Tendido	(25 – 30%)	(35%)

En el estudio Cica 2001, se manejan además de las antes descritas, otras técnicas como: Microaspersión, Tazas, Hidropónico y Aspersión, es decir, hay un mayor detalle.

El modelo Ligua trabaja con una eficiencia predial ponderada total de la cuenca de 45% (obtenido del archivo Infsec95.dat) y del estudio CICA 2001 se obtiene una eficiencia predial ponderada para la cuenca del río Ligua del 51% (obtenida del anexo 5 de dicho estudio).

EFC, Eficiencia a nivel de conducción de canales

Los valores de las eficiencias EFC, son presentadas en las páginas 104 y 109 del estudio Cica 2001 y resultan menores que los adoptados en el modelo.

La eficiencia de conducción ponderada en el estudio Cica 2001 para toda la cuenca del Ligua alcanza el 67% (año 2000), pág. 109 y en el modelo se trabaja con 81%, (infsec.dat).

Estructura de Cultivos

El estudio Cica 2001 presenta tablas confeccionadas en base a los censos agropecuarios 1965, 1976 y 1997 del INE, con las áreas sembradas o plantadas de grandes grupos de cultivos para las comunas de la Provincia de Petorca.

Ahora bien, en el modelo Ligua se adoptó un área que considera como base tres estudios anteriores (Catastro Usuarios 1984, EDIC 1995 y REG) cuya estructura para cada cultivo se presenta en los cuadros D.1.2-3 y D 1.2-4 del estudio “Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos de las cuencas de los ríos Petorca y Ligua” de AC Ingenieros Consultores, 1998.

Para poder establecer cierta comparación, se calculó el porcentaje comunal en la cuenca del Ligua, esto es, la representatividad de las comunas de la provincia de Petorca en la cuenca del Ligua. A la vez se representó la estructura de cultivos del modelo de acuerdo al formato que entrega el estudio de Cica 2001. Dentro del estudio Cica, las comunas de Catemu, Nogales y Putaendo no fueron consideradas dentro de la cuenca del río Ligua, sin embargo también constituyen una parte, aunque menor, en la cuenca.

En la tabla “Comparación Comunal vs. Modelo Ligua” adjunta, se presentan los resultados de esta comparación. Se puede ver que las áreas no corresponden y no son similares ni siquiera dentro de un rango. Para la situación 1976, el modelo considera un área total de casi 2000 ha más y, para la situación de 1995, de 2800 ha más que las consideradas en el estudio CICA 2001.

Para la situación que se plantea en el estudio de Cica, resulta extraño que las hectáreas cultivadas disminuyan en la actualidad (1997), en relación con las de 1976, lo que genera cierta duda sobre la calidad de la información, comparándola con los estudios de catastro, EDIC y REG, que señalan un aumento del área cultivada entre estos años.

En el estudio Cica 2001, también se presenta una estimación de áreas actuales por sección en las cuencas del Ligua y Petorca. Estas áreas estimadas se obtienen a partir de:

- (1) información recopilada en terreno de acuerdo con los intereses de los agricultores,
- (2) evaluación de las tendencias de los diferentes grupos de cultivos presentes en el área de estudio a partir de los antecedentes de los censos agropecuarios de los años 1965, 1976 y 1997 y (3) considerando los intereses de los agricultores con los cuales se tomó contacto. *(fuente: página 64 informe Cica 2001)*

COMPARACIÓN COMUNAL VS MODELO LIGUA

CULTIVOS	Area (has)			
	CICA 2001		Modelo Ligua	
	1976	1997	sit 1976	sit. 1995
CEREALES Y CHACRAS				
Arveja grano seco	70.2	6.8	48.7	43.5
Avena grano seco	0.3	0.7		
Cebada cervecera	105.2	9.8	1529.4	1121.8
Chicharo	5.3	0.3		
lentyeja	40.1	0.3		
Maiz	444.4	30.7	441.4	343.2
papa	559.8	587.4	759.3	661
frejol grano seco	192.6	33.3	300.7	247.4
trigo Blanco	1587.4	53.3		
trigo candeal	534.7	15.4		
otros	2.8	0.3		
CULTIVOS INDUSTRIALES	0.0	3.4		
HORTALIZAS				
Aji	10.0	3.7		
ajo	0.2	0.0		
alcachofa	0.7	3.5		
arveja verde	169.6	46.6	51	44.8
cebolla de guarda	16.6	2.7		
cebolla temprana	3.9	0.3		
choclo	23.0	19.0	43.1	38.2
flores	4.2	26.6		
frejol	141.3	72.7	280.7	249.1
haba	131.3	15.0		
lechuga	0.9	103.1		
melón	2.0	2.8		
pepino dulce	27.4	2.4		
pimentón	25.2	2.5		
repollo	0.2	0.8		
sandía	4.4	3.3		
tomate consumo fresco	2.3	8.4		
zapallo temprano y guarda	5.6	8.6		
zapallo itaiano	0.1	0.8		
huerta casera	27.5	8.3	272.8	241.5
FRUTALES				
almendro	21.2	122.6		
chirimoyo	16.4	43.8		
cerezo y quindo	0.4	0.0		
ciruelo	3.3	0.2		
damasco	20.7	11.0		
duraznero	94.7	47.3	167	85
berries	0.3	24.5		
higuera	3.0	0.0		
limonero	294.2	426.3	279.1	688.7
manzano	8.0	5.1		
membrillo	0.0	0.1		
naranja	42.8	69.2		
níspero	0.0	2.7		
nogal	121.2	173.9	107	316.8
olivo	67.9	34.0		
palto	249.2	2095.0	243	2190.8
papayo	0.0	35.3		
peral europeo	1.6	0.1		
tuna	5.9	9.7		
otros (entre...uva de mesa)	0.0	173.7	113.9	45.3
FORRAJERAS				
alfalfa	611.1	279.0	723	569.4
avena forrajera	5.5	8.7		
cebada forrajera	0.8	6.5		
mezcla	4.7	625.8		
maiz para silo	20.7	5.4		
trebol rosado	2.2	0.1		
otros	0.1	2.5		
VIÑAS Y PARRONALES	3.9	0.0		
FORESTALES	338.8	412.4	2602	1575.8
TOTAL	6077.5999	5687.3765	7962.1	8462.3

La comparación de las áreas actuales en cada sección, situación 1995 del modelo versus situación estimada 2000 (Cica 2001), se presenta en la tabla “comparación secciones vs modelo ligua”, adjunta. De ésta se desprende nuevamente que, las áreas consideradas en el modelo a nivel de cuenca son mayores que las áreas cultivadas del estudio Cica, 8.462 y 6.118 ha respectivamente, y que son muy pocos los cultivos que coinciden en el rango de sus áreas.

Cabe destacar que en el modelo se ha considerado el área cultivada igual al área potencialmente cultivable, de 8462,3 ha, mientras que en el estudio Cica 2001 el área potencialmente cultivable es de 9700 ha, y el área regada o cultivada, de solo 6118 ha.

COMPARACIÓN SECCIONES VS MODELO LIGUA

CULTIVOS	Area (has)	
	Cica sit 2000 proy	Modelo ligua sit 1995
Sección 1	2524.34	3332.9
Praderas	98.64	891.2
Leguminosas de grano	13.7	9.1
Cereales	65.05	927.6
Papas	342.49	81
Hortalizas G1	41.18	53.7
Hortalizas G2	51.87	38.8
Hortalizas G3	13.28	
Otros Cultivos	2.37	
Frutales Perennes G1	1182.29	641.7
Frutales Perennes G2	353.82	312.2
Frutales Perennes G3	34.64	
Frutales Hoja Caduca G1	210.61	257.5
Frutales Hoja Caduca G2	114.4	120.1
Sección 2	1986.8	3185.9
Praderas	368.75	779.5
Leguminosas de grano	20.55	84.3
Cereales	60.17	159.5
Papas	223.25	130
Hortalizas G1	73.18	58
Hortalizas G2	46.49	42.4
Hortalizas G3	12.97	
Otros Cultivos	1.44	
Frutales Perennes G1	777.89	1507.1
Frutales Perennes G2	194.49	357.9
Frutales Perennes G3	41.99	
Frutales Hoja Caduca G1	103.04	57
Frutales Hoja Caduca G2	62.59	10.2
Sección 3	1607.45	1943.5
Praderas	662.23	474.5
Leguminosas de grano	28.83	197.5
Cereales	59.9	377.9
Papas	122.74	450
Hortalizas G1	110.17	220.4
Hortalizas G2	44.7	160.3
Hortalizas G3	13.63	
Otros Cultivos	0.64	
Frutales Perennes G1	438.57	42
Frutales Perennes G2	52.38	18.6
Frutales Perennes G3	52.38	
Frutales Hoja Caduca G1	4.95	2.3
Frutales Hoja Caduca G2	16.33	0
Total Cuenca del río Ligua	6118.59	8462.3

Demanda Hídrica

La demanda hídrica es posible de comparar en términos de volumen de agua al mes o m³/mes.

En el Tomo II de Anexos del Informe Cica 2001, anexo IX.1.2, se presentan en los cuadros N°7, los requerimientos hídricos en términos de volumen de agua, para cada una de las 3 secciones. Éstas se encuentran para la situación actual, es decir, año 2000 y para el resto de los años proyectados. La situación actual del estudio Cica 2001 se compara con la tabla elaborada para este informe, que proviene de las bases de áreas usadas en la modelación, que resume las demandas hídricas que maneja el modelo para la sección 1, que es la suma de las demandas a nivel mensual de los sectores de riego 1 al 5.

Para efectos de comparación, sólo se elaboraron las demandas de la sección 1, y del análisis se concluye que las demandas hídricas volumétricas a nivel mensual guardan relación con las áreas de cultivo consideradas en cada estudio. A nivel TOTAL anual el modelo presenta una demanda hídrica de 59.555.146,00 m³/año que equivale a 1489 m³/mes/ha (0,6 l/s/ha), y en el estudio Cica es de 40.765.642,1 m³/año, lo que equivale a 1345,7 m³/mes/ha (0,5 l/s/ha).

Conclusiones sobre la comparación

Al realizar la comparación de la información utilizada en el estudio del modelo Ligua, con el estudio “Diagnóstico del Riego - Cica Julio2001, versión preliminar”, podemos concluir claramente lo siguiente:

- Las evapotranspiraciones potenciales o de base para el cálculo de la demanda hídrica de los cultivos, son similares.
- Las eficiencias intraprediales en general son similares, salvo para los dos métodos: surco y tendido, que en el modelo son mayores. La eficiencia predial ponderada es mayor en el estudio Cica 2001 (51% vs 45%).
- Las eficiencias de conducción consideradas son mayores en el estudio del modelo Ligua (81% vs 67%).
- En cuanto a los tipos de cultivo, para algunos de ellos hay grandes diferencias en las áreas.
- En cuanto al total de áreas cultivadas, en el estudio del modelo son aproximadamente 25% mayores que en el estudio Cica 2001.
- En relación con el punto anterior, las demandas hídricas globales del modelo son también correspondientemente mayores (aprox. 25%).

5. OPERACIÓN DEL MODELO

Una vez recalibrado y validado el modelo, se procedió a analizar los escenarios que interesaban al Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH). Todos los antecedentes de derechos y caudales efectivos para el establecimiento de los escenarios de interés fueron entregados al DEP directamente por el DARH. Estos caudales se trabajaron en dos tipos de escenarios: Escenarios de derechos y escenarios de demandas. Adicionalmente, se trabajó un escenario de referencia; H00, que se detalla en el punto 5.2.

Los escenarios de derechos se presentan a continuación, mientras que los de demanda se tratan en el Tomo II de este estudio.

5.1. Escenarios de derechos

En primer lugar, se establecieron los **escenarios de derechos**, los cuales están basados en el bombeo de los caudales efectivos. Los caudales efectivos corresponden a los derechos afectados por un factor de uso, el que también fue entregado por el DARH.

En el modelo, en los escenarios de derechos, los caudales son un dato de entrada. Se asume que los usuarios bombean estos caudales todos los años, en forma independiente de los requerimientos reales. Los caudales efectivos correspondientes a los usos de agua potable, industria y minería se bombean en forma permanente y continua. Para el uso en riego, se bombea el doble del caudal efectivo en los seis meses de riego y cero los demás seis meses.

Los escenarios de interés que se establecieron, son los siguientes:

Escenario F1B:

Caudales efectivos correspondientes a derechos de aguas subterráneas otorgados en todo el valle hasta Diciembre 1995

Escenario F2B:

Caudales efectivos correspondientes a derechos de aguas subterráneas totales, otorgados más solicitados, en todo el valle, hasta Septiembre 1996

Escenario F4B:

Caudales efectivos correspondientes a derechos de aguas subterráneas totales, otorgados más solicitados, en todo el valle, hasta marzo 2001.

La letra B se refiere a que en cada escenario se han incluido, repartidos proporcionalmente a los derechos de cada sector, 120 l/s efectivos sobre los cuales el DARH no posee información de ubicación.

El escenario F3B fue un escenario intermedio de análisis, cuyos resultados quedan superados por el escenario F4B, por lo cual no se presentan aquí.

Los derechos subterráneos efectivos, por sector de riego, en cada uno de los escenarios analizados, se presentan en el Cuadro N°1.

Cuadro N°1
Caudales efectivos correspondientes a los derechos de
aguas subterráneas en el valle de La Ligua.
Evolución diciembre 1995 a marzo 2001

Sector	Esc. F1B Dic.1995		Esc. F2B Sept.1996		Esc. F4B Marzo 2001	
	Total Der. l/s	Der. Riego l/s	Total Der. l/s	Der. Riego l/s	Total Der. l/s	Der. Riego l/s
1	0	0	0	0	13	13
2	36	36	37	37	95	95
3	176	142	187	152	190	156
4	95	95	95	95	95	95
5	20	12	28	20	85	67
6	216	69	216	69	242	72
7	271	271	271	271	252	252
8	57	57	57	57	64	64
9	30	30	30	30	28	28
10	286	85	294	93	279	93
11	0	0	0	0	0	0
12	123	66	123	66	134	64
13	65	65	65	65	92	78
Total	1375	928	1403	955	1569	1077

Fuente: Departamento Administración de Recursos Hídricos, DARH.

En esta tabla se puede observar que entre 1995 (escenario F1B) y 2001 (escenario F4B), no ha habido gran desarrollo de las aguas subterráneas en el valle del río Ligua. En toda la cuenca, los 928 l/s efectivos para riego constituidos hasta 1995, hasta marzo 2001 sólo se incrementan con solicitudes por 149 l/s efectivos, llegando a un total para riego de 1077 l/s efectivos.

También se puede observar que el aumento de solicitudes se produce fundamentalmente en los sectores 2, 5 y 13.

5.2. Escenarios de referencia

El escenario de referencia H00 se refiere a un escenario sin explotación subterránea. Para definirlo se asumió la situación agrícola de 1976, y la situación de bombeo antes de la gran sequía de 1968, cuando todavía no había desarrollo de pozos en la cuenca.

Este escenario se concibió con el objetivo de aislar el efecto de la hidrología sobre el comportamiento de los acuíferos, y poder así distinguir entre las variaciones de almacenamiento atribuibles a los eventos normales y a los atribuibles a la explotación artificial del acuífero.

En el Anexo A3 se presentan los gráficos que muestran la variación del Volumen Almacenado y de los Niveles en el tiempo, para los escenarios H00, F1B y F4B (ambos escenarios de derechos, a diciembre 1995 y marzo 2001, respectivamente).

Al respecto se observa que las sequías hidrológicas tienen un efecto sensible sobre el volumen almacenado en los sectores acuíferos 1 y 2, cuyos niveles reflejan el efecto de la hidrología. El resto de los sectores de cabecera de la cuenca, sectores 5, 9, 11 y 13 presentan variaciones casi imperceptibles correspondientes a la hidrología. Por su parte los sectores del valle central se observan a máxima capacidad todo el período de simulación. Por lo tanto, en los sectores 3 al 13, la reducción del volumen almacenado que se observa en los otros escenarios simulados es fundamentalmente atribuible a la explotación. A medida que se intensifica la explotación, aumenta el efecto sobre el acuífero, especialmente en períodos de sequía.

6. RESULTADOS PARA ESCENARIOS DE DERECHOS

Para los escenarios estudiados, se analizaron los siguientes resultados:

- (a) efecto del aumento del bombeo sobre los volúmenes almacenados en los acuíferos,
- (b) efectos del aumento del bombeo sobre los caudales captados por los canales.
- (c) efecto del aumento del bombeo sobre los caudales superficiales en cada uno de los tramos del río, y
- (d) Análisis de afección a las aguas superficiales

6.1. Efecto del aumento de bombeo sobre los almacenamientos en los acuíferos

En este acápite se analizan los efectos de la extracción de aguas subterráneas, según derechos, sobre el volumen embalsado en los acuíferos, en el largo plazo.

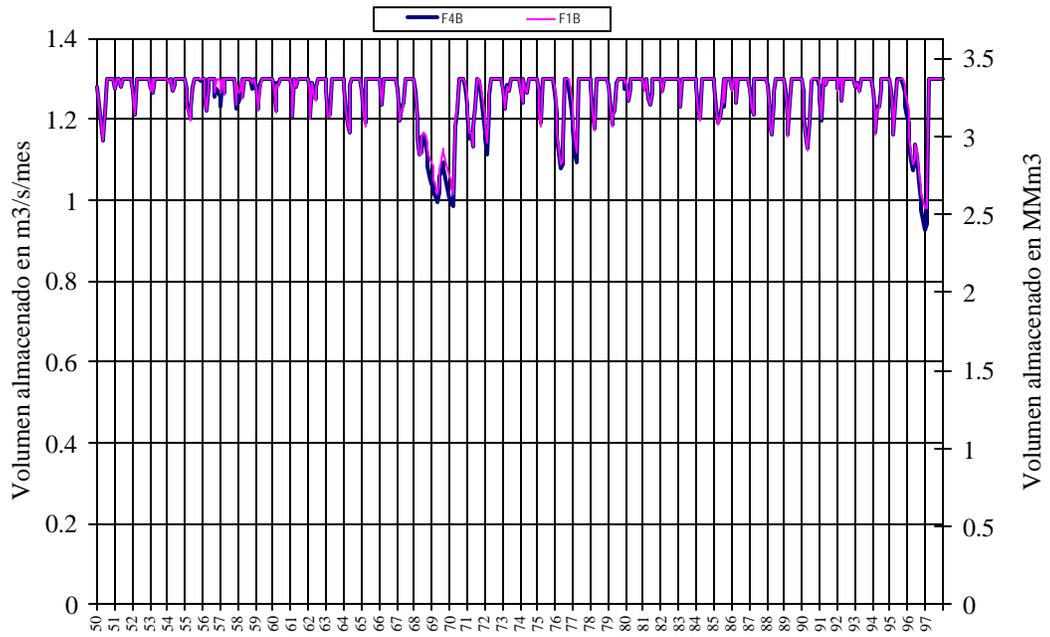
Para analizar este efecto, se corrió los escenarios F1B, F2B y F4B, en condición futura (de ahí la letra F) (hidrología 1950-1998, condición agrícola desarrollada 1995) y modalidad de bombeo considerando el bombeo de riego como dato de entrada. En esta modalidad, se bombea cada verano el doble de los derechos efectivos para riego más los derechos efectivos para otros usos, y cada invierno, sólo los derechos efectivos para otros usos.

Dado que los escenarios F1B y F2B son muy parecidos, los resultados de volumen subterráneo embalsado casi no difieren entre ambos escenarios. Por esta razón sólo se presenta la comparación de volumen embalsado entre los escenarios F1B (escenario de derechos realmente constituidos hasta la fecha) y F4B (escenario futuro que considera constituidos los derechos solicitados hasta marzo 2001). Esta comparación se presenta en forma de una serie de tiempo, en los gráficos adjuntos.

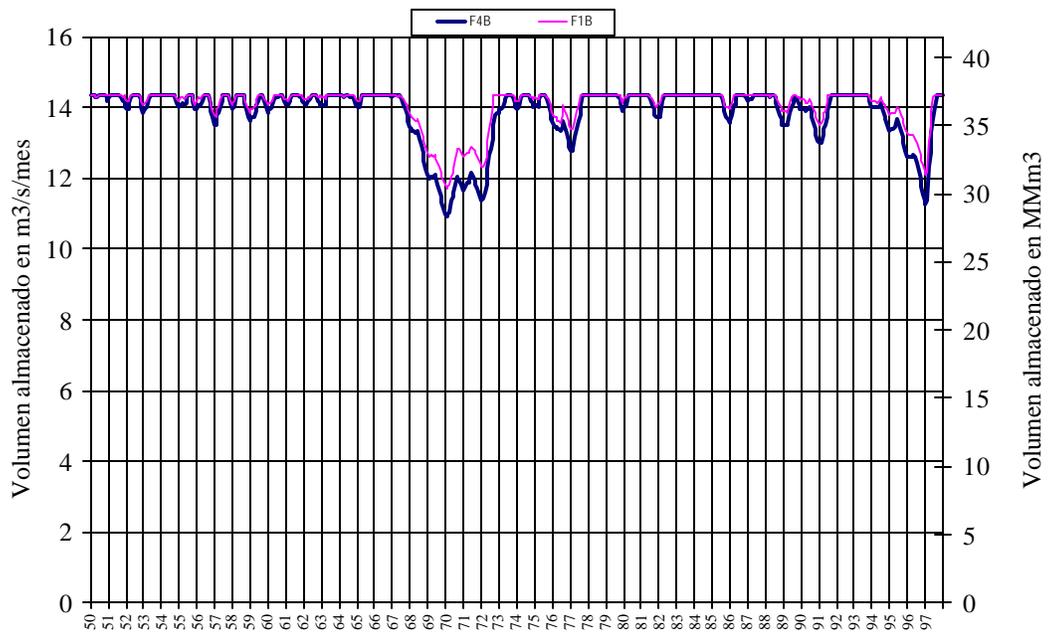
Cabe señalar que en estos gráficos, la variable Volumen Almacenado comienza en cero, por lo que el eje y representa visualmente el volumen del acuífero y sus variaciones.

Debe tenerse en consideración que los niveles presentados son una aproximación obtenida del traspaso de volúmenes resultantes del MOS Ligua a información de nivel, considerando el acuífero como un cuerpo ideal de sección triangular, con características homogéneas e isotrópicas en todo su volumen. Por esta razón, estos niveles deben considerarse sólo como una aproximación para las tendencias del comportamiento de los acuíferos del valle de La Ligua.

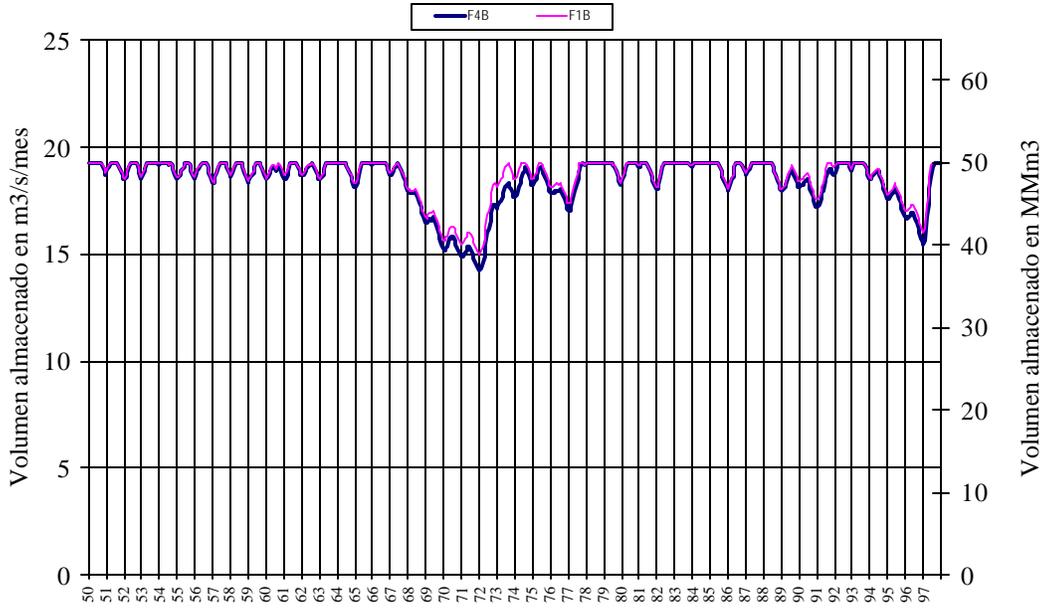
Acuífero 1 del Estero Alicahue Volumen almacenado a fin de mes



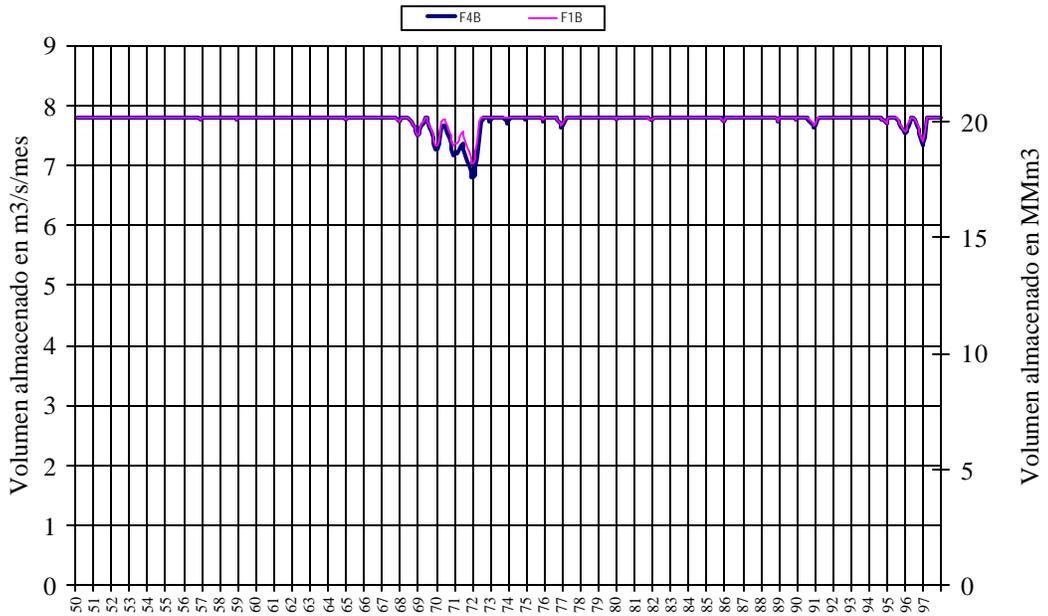
Acuífero 2 Volumen almacenado a fin de mes



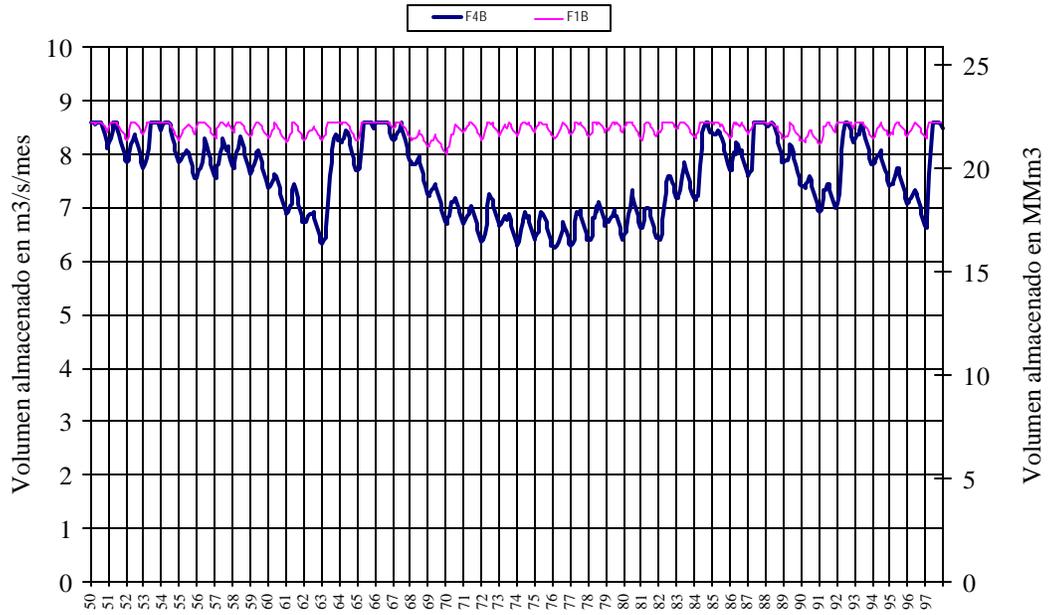
Acuífero 3 Volumen almacenado a fin de mes



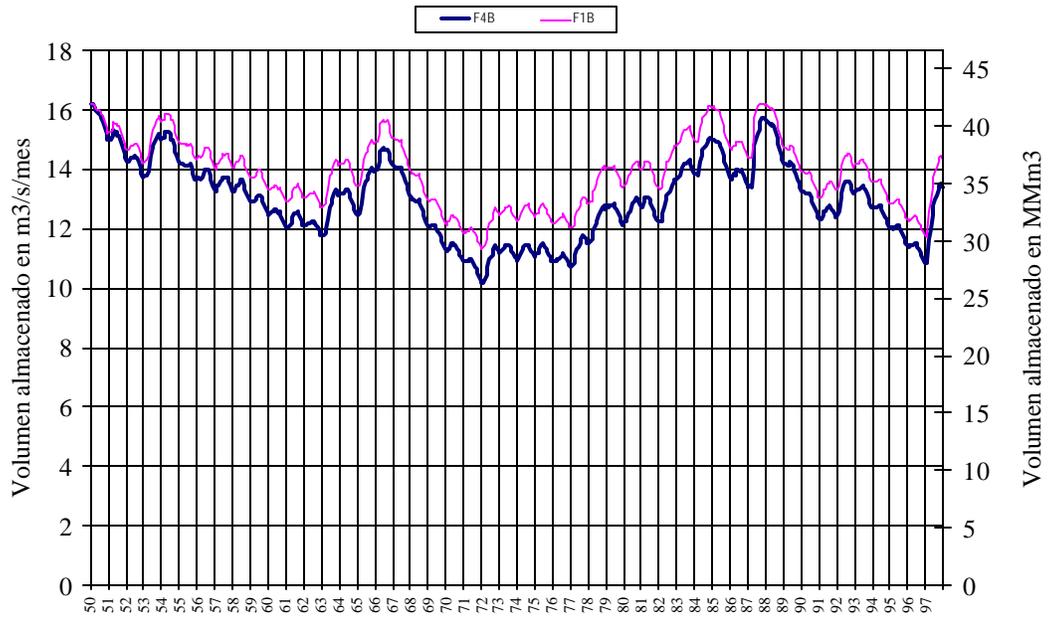
Acuífero 4 Volumen almacenado a fin de mes



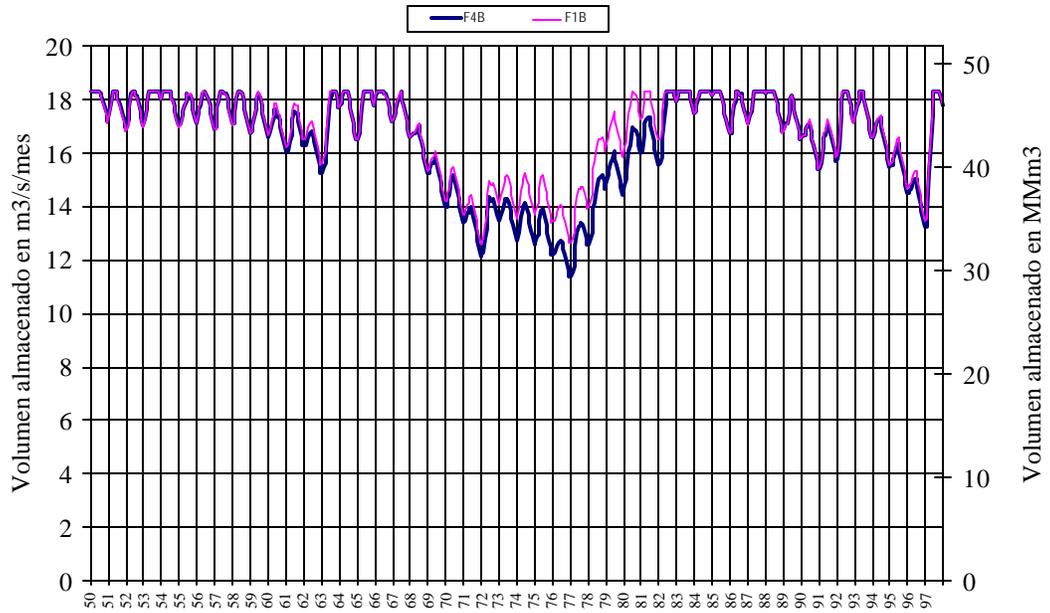
Acuífero 5 Volumen almacenado a fin de mes



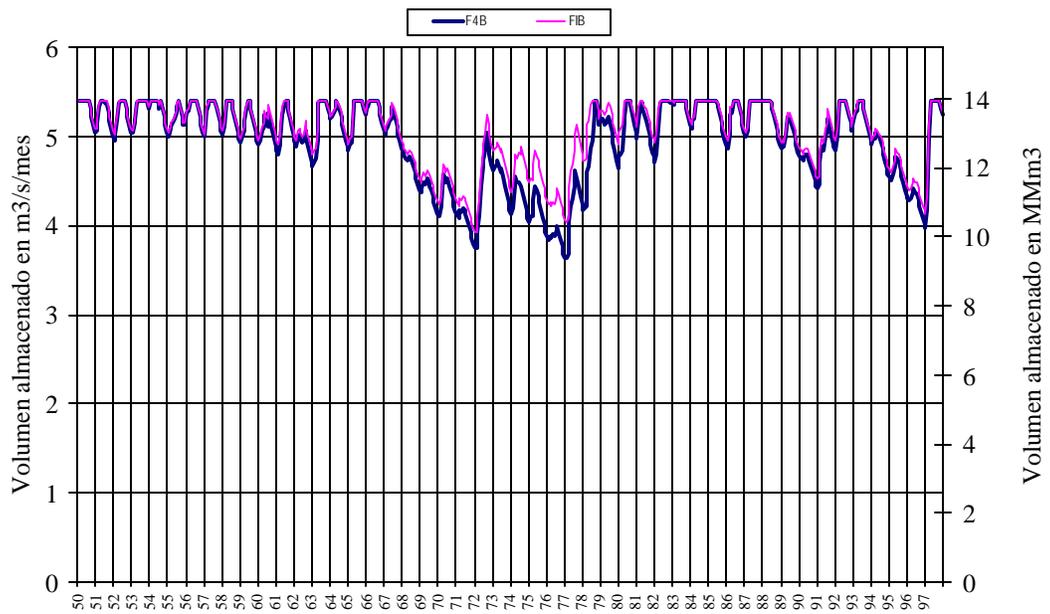
Acuífero 6 Volumen almacenado a fin de mes



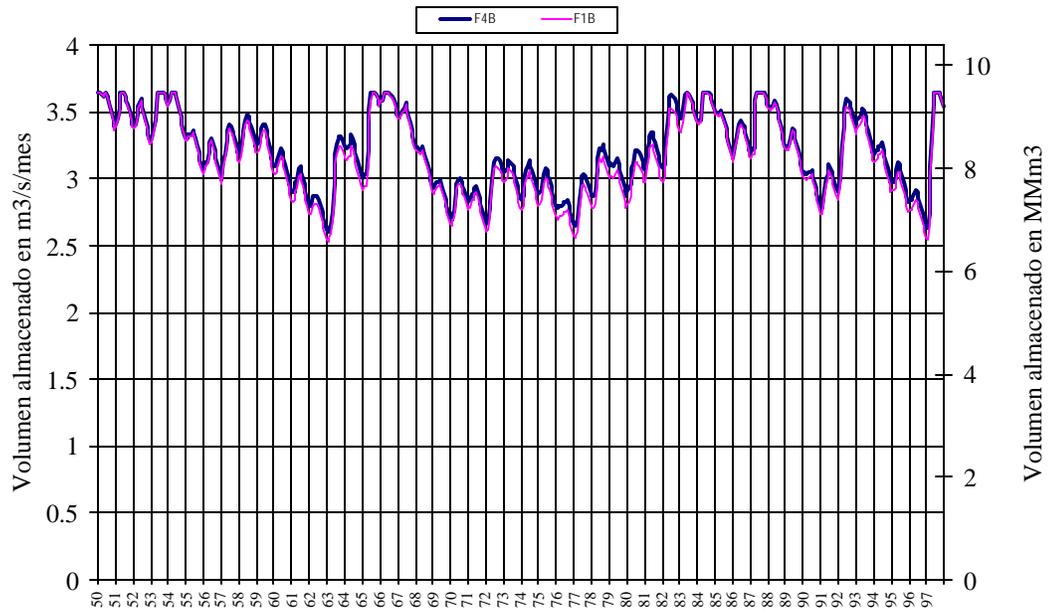
Acuífero 7 Volumen almacenado a fin de mes



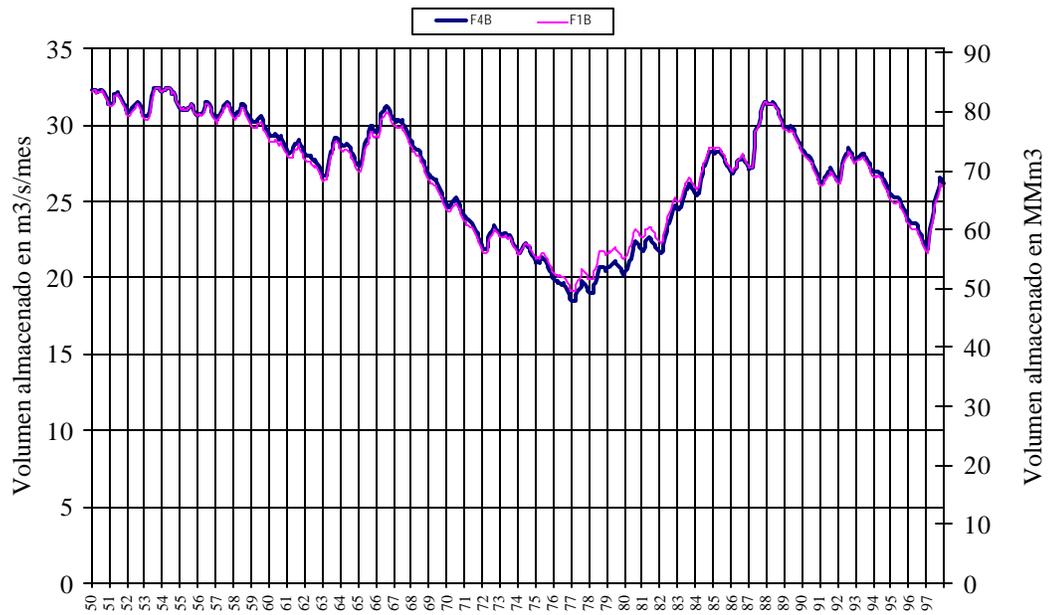
Acuífero 8 Volumen almacenado a fin de mes



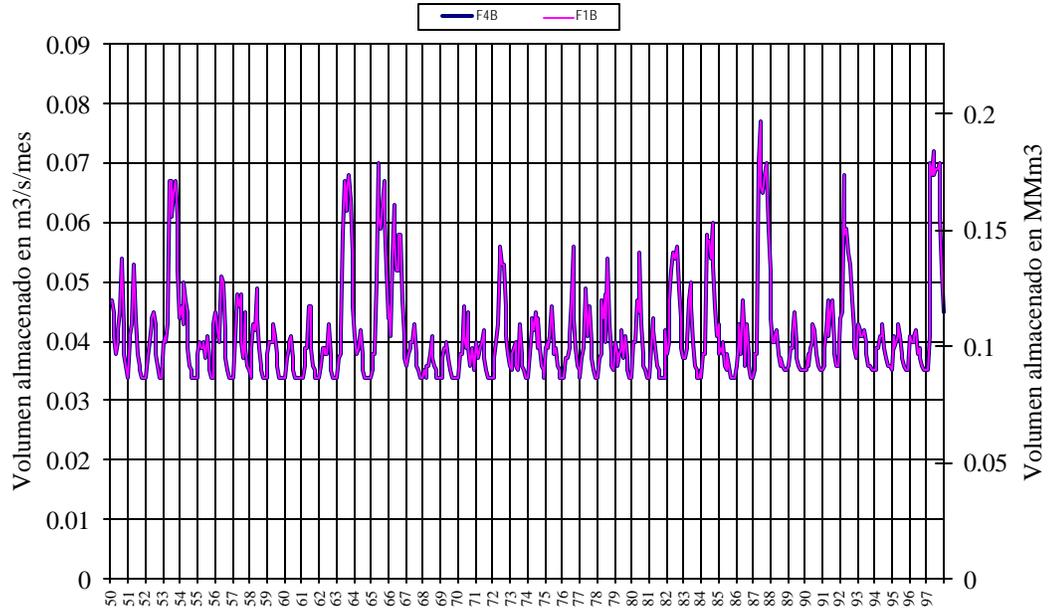
Acuífero 9 Volumen almacenado a fin de mes [m3/s/mes]



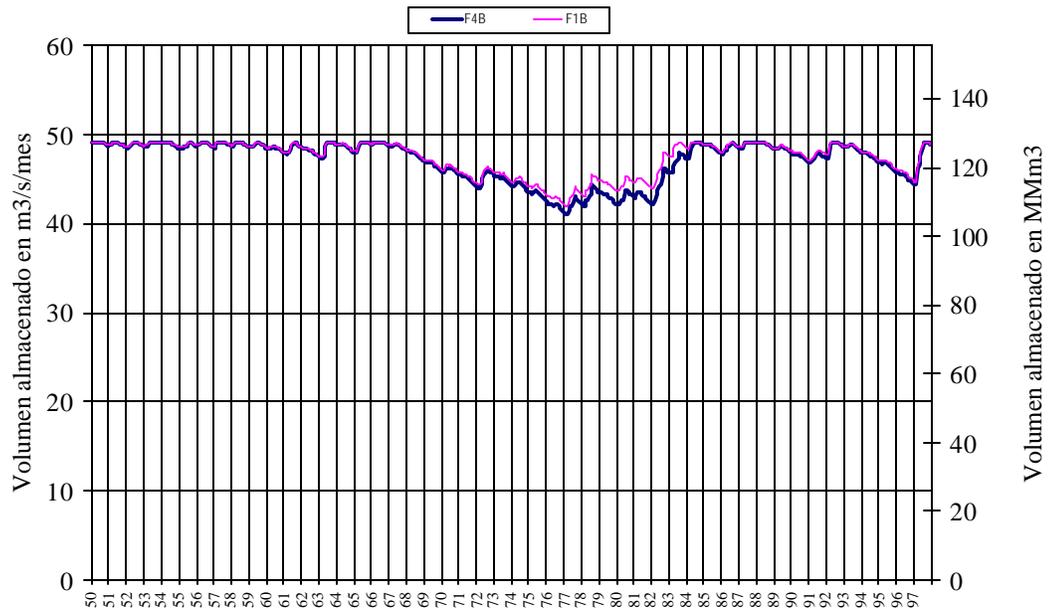
Acuífero 10 Volumen almacenado a fin de mes



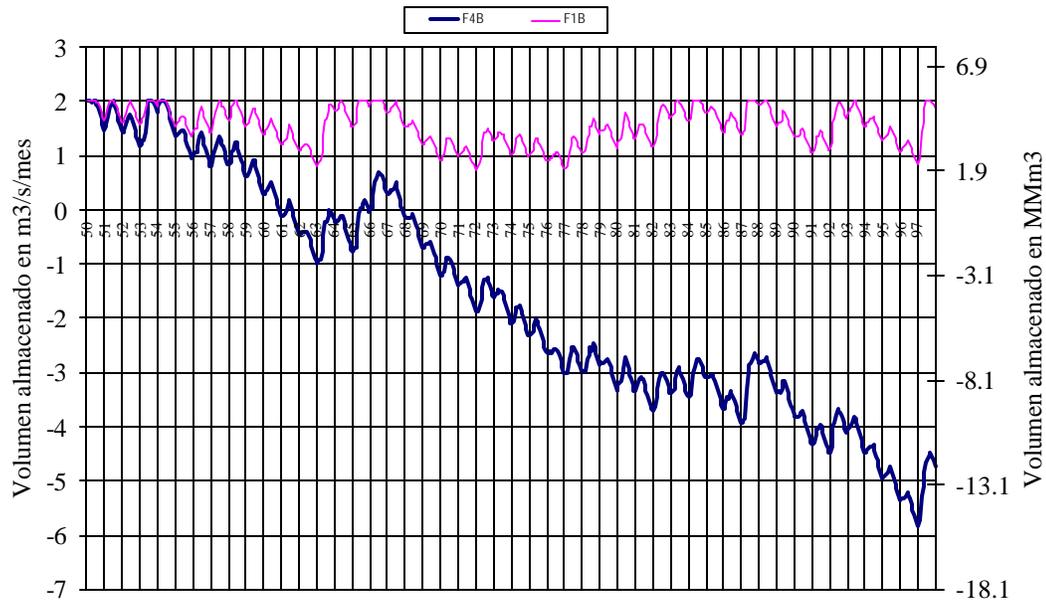
Acuífero 11 Volumen almacenado a fin de mes



Acuífero 12 Volumen almacenado a fin de mes



Acuífero 13 Volumen almacenado a fin de mes



De los gráficos presentados, se desprende que, los acuíferos 1, 2, 3 y 4 no presentan variaciones de importancia entre los escenarios F1B y F4B, y los niveles en relación al escenario sin bombeo (H00 del anexo A3) tampoco se ven mayormente afectados marcando bajas entre 2 m y 20 m sólo en períodos de sequía

El acuífero 5, estero Los Ángeles, casi no afectado en el escenario F1B, presenta variaciones de hasta 2 m³/s/mes (25% de su capacidad total) en el escenario F4B, pero vuelve a recuperarse. El acuífero 6 tiene variaciones pequeñas con respecto al escenario F1B, pero en este escenario ya presenta grandes variaciones en su volumen almacenado y de niveles. No obstante esto, también presenta una tendencia a la recuperación.

Los acuíferos 7, 8 y 9 tienen variaciones pequeñas con respecto al escenario F1B, más marcadas en las sequías, pero siempre vuelven a recuperarse.

El acuífero 10 es uno de los acuíferos más afectados por la explotación, en ambos escenarios F1B y F4B, ya que presenta variaciones en el nivel y volumen de agua almacenada, que perduran en el tiempo, es decir que la hidrología natural no es capaz de revertir. Los niveles de bombeo de ambos escenarios, hacen que los niveles demoren muchos años en recuperar su valor inicial

El acuífero 11 es el más pequeño y por lo mismo es muy sensible, sin embargo se logra mantener dentro de un rango estable, de volumen almacenado.

El acuífero 12 es el acuífero más grande, por lo que las variaciones de volumen (de hasta 10% del volumen total almacenado) no constituyen un problema, sin embargo después de los años de sequía, los niveles demoran una cantidad de años considerable en recuperarse.

El acuífero 13, afluyente Jaururo, es más pequeño y presenta una alta sensibilidad frente a los usos actuales del recurso y a las condiciones hidrológicas. En el escenario de bombeo F4B, la explotación no es sustentable.

En general, en el escenario F4B los acuíferos no se ven mucho más solicitados que en el escenario F1B. Las excepciones son los acuíferos 5 (Los Angeles) y 13 (Jaururo), que justamente corresponden a los sectores donde hay gran aumento de solicitudes. Sólo en el acuífero 2 donde también hay un aumento significativo de solicitudes, este no se refleja mayormente en el comportamiento del acuífero.

El sector 2 corresponde a un acuífero relativamente grande, para el cual el aumento de solicitudes (F4B) no genera ninguna diferencia sensible en relación con la situación de origen F1B.

Diferente es el caso del acuífero 5, valle Los Angeles, donde la explotación correspondiente al escenario F4B sí denota un uso importante de la capacidad de almacenamiento. Sin embargo, en la nueva condición, el acuífero 5 aún no presenta características críticas de explotación, y se recupera totalmente después de las sequías. El escenario F4B se considera viable, aunque casi extremo, desde el punto de vista del acuífero 5, pero inofensivo para los acuíferos de aguas abajo.

Hay que considerar, eso sí, que esta explotación genera descensos de nivel de hasta 15 m (Anexo A3), que pueden reducir localmente la presencia de aguas superficiales en el estero Los Ángeles. El agua superficial está disponible, pero probablemente habrá que captarla a mayor cota.

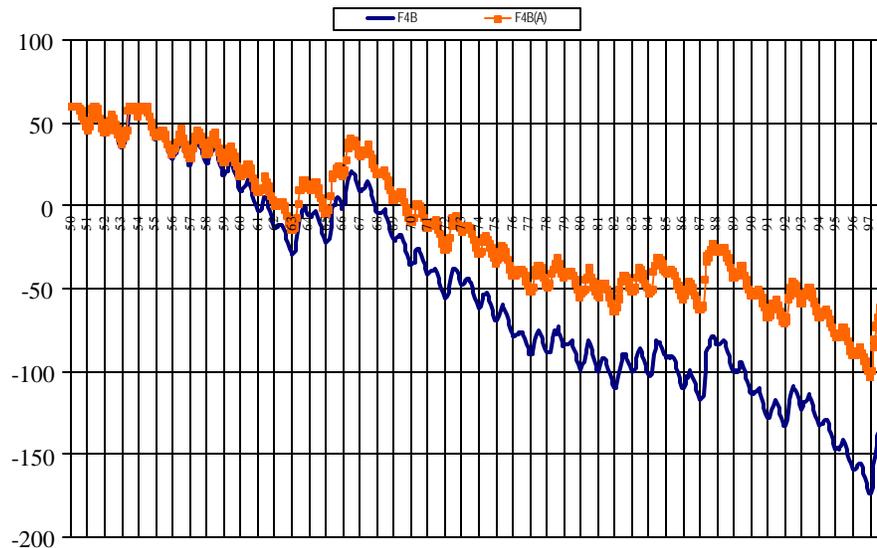
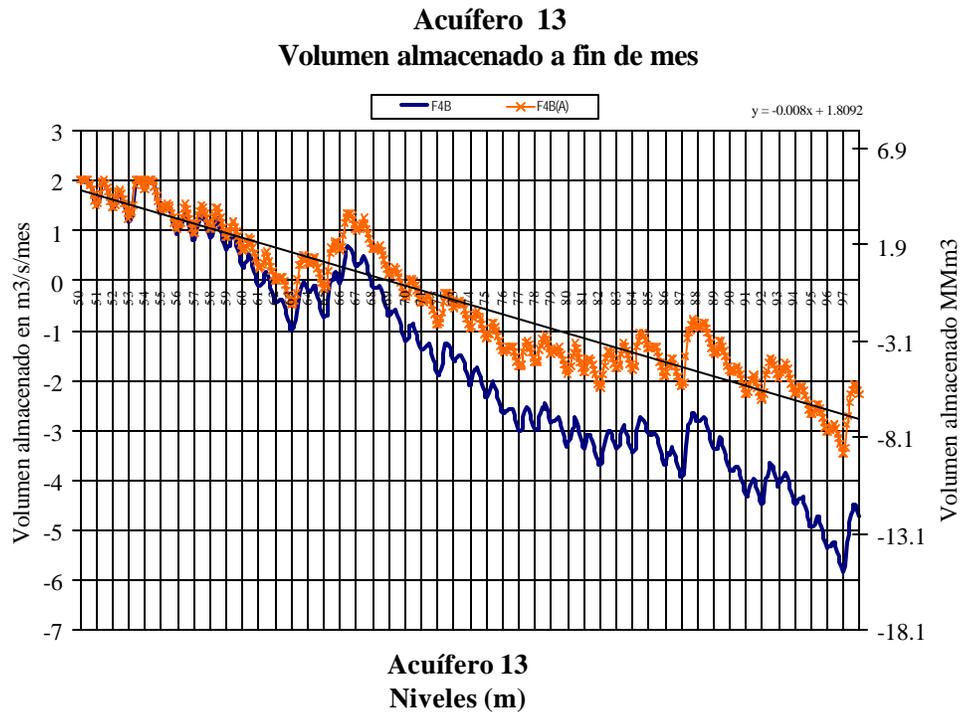
La única excepción clara dentro del valle es el acuífero del Estero Jaururo, el cual no tolera la explotación de 92 l/s efectivos (78 l/s para riego) del escenario F4B. Este acuífero se analiza en el acápite siguiente.

En resumen, de acuerdo con los resultados de los escenarios de derechos, y observando el comportamiento de los acuíferos, la explotación subterránea del escenario F4B no produce efectos notables ni muy excesivos por sobre los efectos que produce el bombeo del escenario F1B, con la sola excepción del valle de Jaururo. Para el acuífero del estero Los Ángeles, probablemente el escenario de derechos F4B se encuentre cerca del límite de sus posibilidades de explotación.

Análisis del acuífero Jaururo (Sector 13)

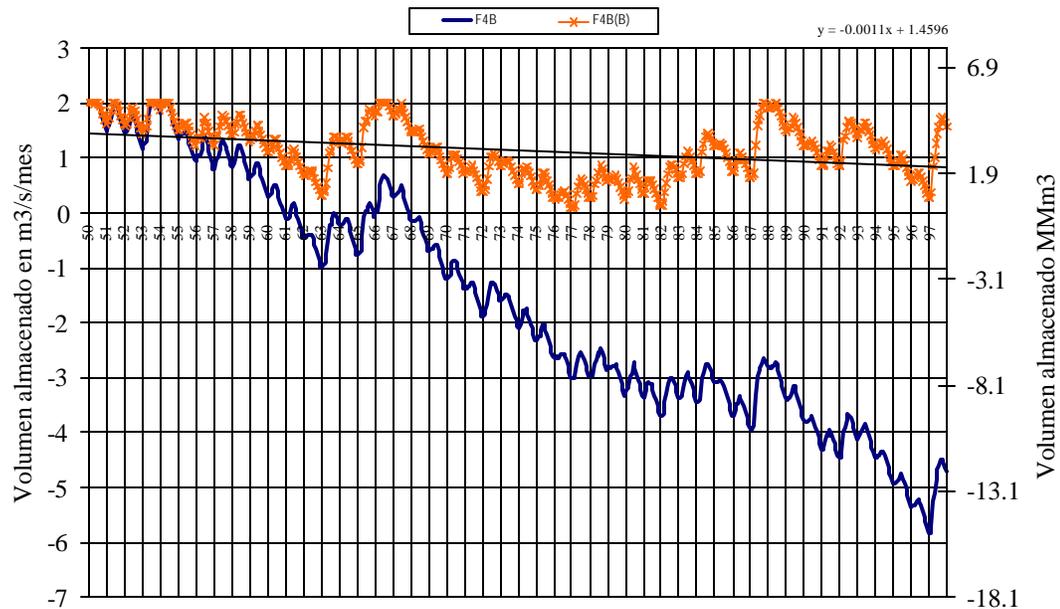
Este acuífero no tolera la extracción del caudal efectivo de 92 l/s efectivos, correspondiente a los derechos del escenario F4B, aunque sí tolera la extracción de 65 l/s del escenario F1B. Por esta razón, se efectuó un análisis más exhaustivo de este acuífero, buscando el caudal máximo efectivo explotable que no produzca el agotamiento permanente del acuífero.

En la primera simulación, la extracción en Jaururo es de 84 l/s efectivos (escenario F4B(A)), y se compara con el escenario F4B. Se observa que la tendencia es todavía claramente descendente y no hay recuperación del acuífero.

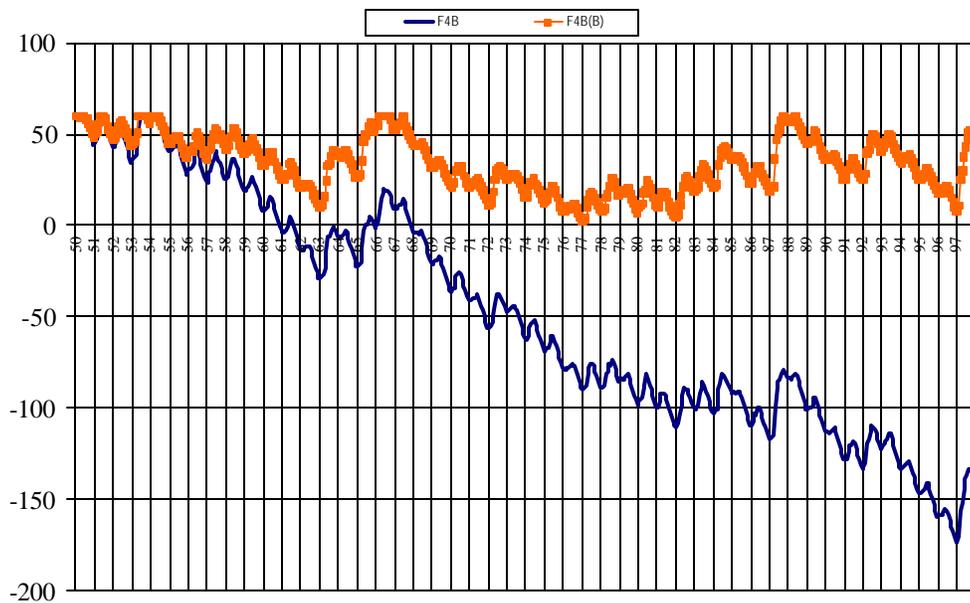


En la siguiente simulación, la extracción en Jaururo es de 70 l/s efectivos, escenario F4B(B). En este caso, aunque la tendencia general es levemente descendente, el acuífero logra recuperarse después de los períodos de sequía. Este caudal efectivo de extracción sería sustentable.

Acuífero 13 Volumen almacenado a fin de mes

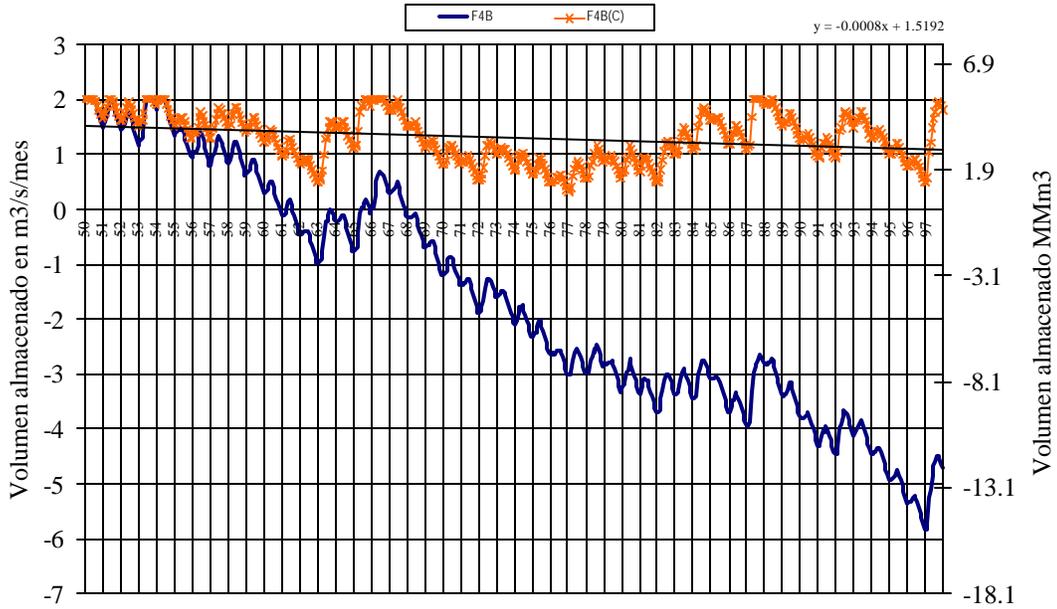


Acuífero 13 Niveles (m)

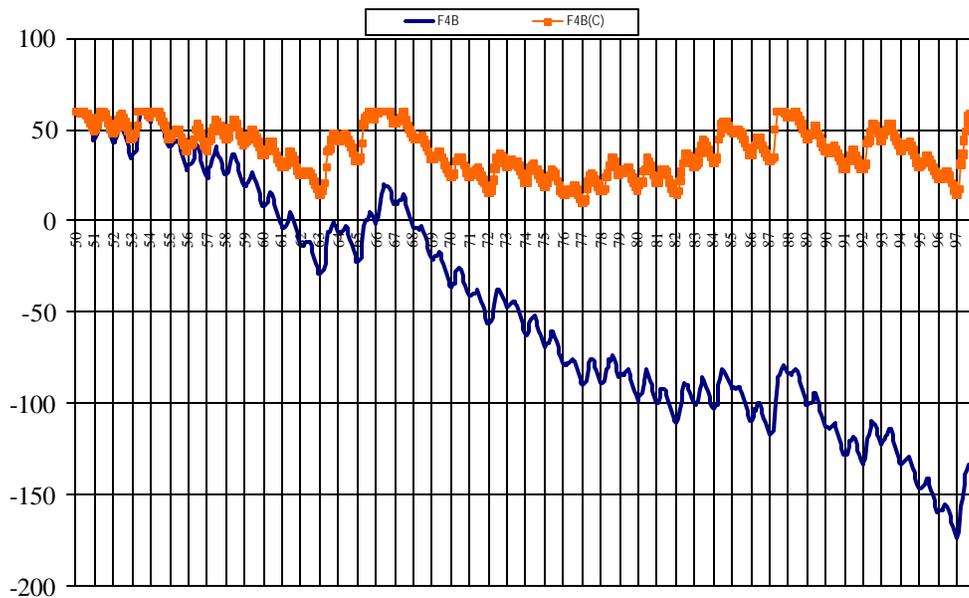


En la siguiente simulación, el caudal extraído del acuífero de Jaururo es de 66 l/s efectivos: La situación es similar a la actual.

Acuífero 13 Volumen almacenado a fin de mes



Acuífero 13 Niveles (m)



Del análisis se desprende que el acuífero tolera un caudal efectivo máximo de alrededor de 70 l/s. Se puede observar, además, que este caudal significa una utilización de toda la capacidad de regulación del acuífero.

6.2. Efecto del aumento de bombeo sobre los caudales captados por los canales

El modelo MOS da la posibilidad de analizar el efecto que el aumento de la explotación subterránea tiene sobre los caudales captados por los canales. A continuación se analiza el comportamiento de las aguas captadas por los canales en cada tramo del modelo, para saber si hay una merma que pudiera ser de consideración.

Los resultados de las simulaciones se presentan mediante dos gráficos para cada tramo de río. El primero muestra el caudal captado por los canales del tramo en ambos escenarios F1B y F4B, y el segundo, la diferencia porcentual de caudales captados entre ambos escenarios. Porcentajes negativos significan una merma de caudal captado en el escenario F4B, en relación con el escenario F1B.

Se observa en dichos gráficos, lo siguiente:

Los tramos 1, 5, 9, 11 y 13, por ser tramos de cabecera o afluentes, tienen siempre el mismo caudal afluente, independiente del escenario, por lo cual tienen siempre el mismo caudal disponible para los canales, debido a que en la topología del modelo la extracción de canales se efectúa inmediatamente aguas abajo del nodo de entrada al tramo de cabecera. Por este motivo, en estos tramos no hay diferencia para el caudal captado por los canales, entre los escenarios analizados F1B y F4B. De esta forma, a través de este modelo no es posible evaluar la merma de aguas superficiales que produciría la explotación del escenario F4B en los mencionados sectores. Esto significa que la eventual merma en los canales de los sectores mencionados, no es evaluable con este modelo.

Los canales del tramo 2, normalmente no sufren mermas, sino que más bien aumentos de caudal. Sólo hay mermas menores muy ocasionales. Las mermas, cuando las hay, se producen en la temporada de riego, y en los años más secos llegan hasta un 10%.

Los canales del tramo 3 generalmente ven aumentado su caudal, especialmente en invierno. Sufren merma sólo ocasionalmente, generalmente al inicio de la temporada de riego, de entre 20 y 40% de su caudal original.

Los canales del tramo 4 tienen casi siempre un superávit cercano al 20%, pero con ocasión de las sequías, una merma que alcanza entre 5 y 40% de su caudal. Esta merma generalmente se produce antes de la temporada de riego, en invierno.

Los canales del tramo 6 presentan generalmente superávit en el período de riego, salvo ocasionalmente en períodos de sequía. Las mermas son muy variables, y pueden llegar al 100%.

Para los canales del tramo 7 se observa lo mismo que para el tramo 6: presentan generalmente superávit en las épocas de riego, y mermas en los períodos de sequía, muy variables, de entre 20 y 100%.

Los canales del tramo 8 presentan una merma sistemática de 15% en plena temporada de riego, y mermas ocasionales mayores, cuando hay sequía, muy variables, que pueden llegar hasta 100%.

Los canales del tramo 10 presentan mermas sistemáticas bajo 2%, y ocasionales, de entre 5 y 40%, generalmente en el invierno.

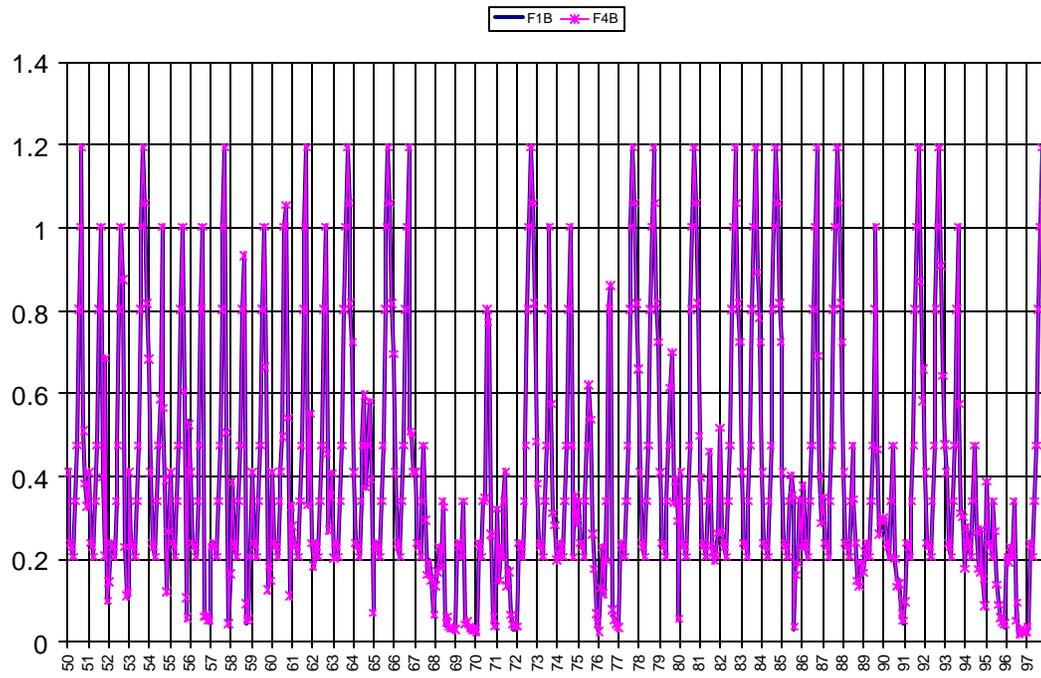
Los canales del tramo 12 presentan un aumento sistemático de caudal, de un 10%, en plena época de riego. Ocasionalmente, y por lo general en invierno, hay disminución de caudal, de entre 20% y 100%.

Como conclusión del análisis anterior, se puede señalar que el bombeo tiene efectos en ambos sentidos sobre los caudales disponibles para ser captados por los canales: Hay aumentos y mermas. Los tramos más afectados por las mermas, en general las viven en invierno, fuera de la temporada de riego. El tramo más afectado por las mermas, dentro de la temporada de riego, es el tramo 8, con una merma sistemática de 15%. Las mermas de los tramos 2 y 3 se consideran poco importantes.

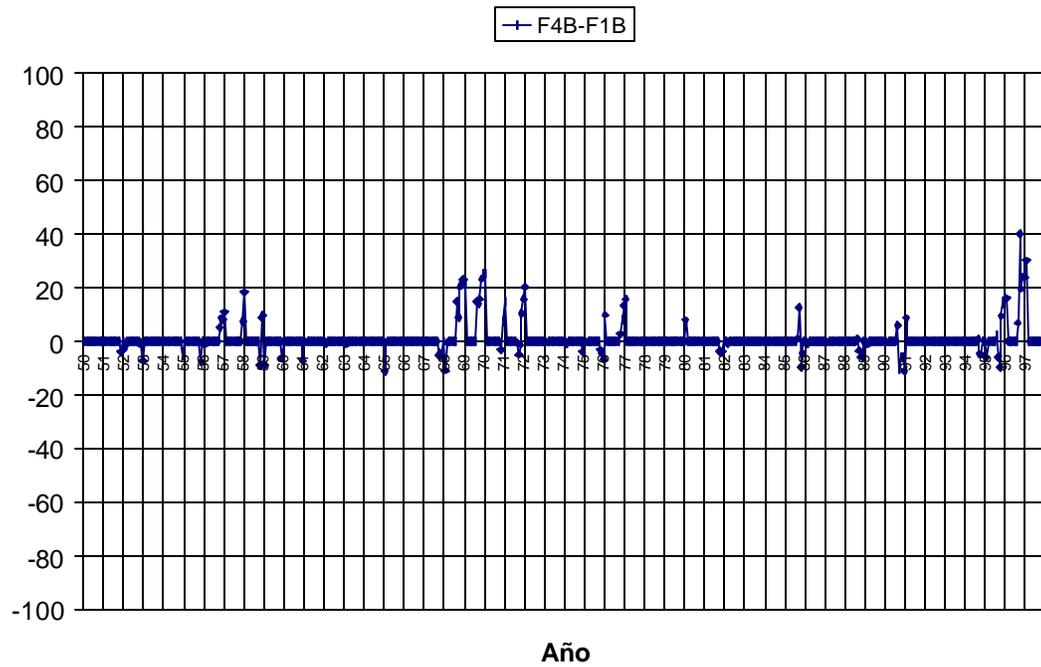
Caudal captado por canales sector 01 (m3/s)



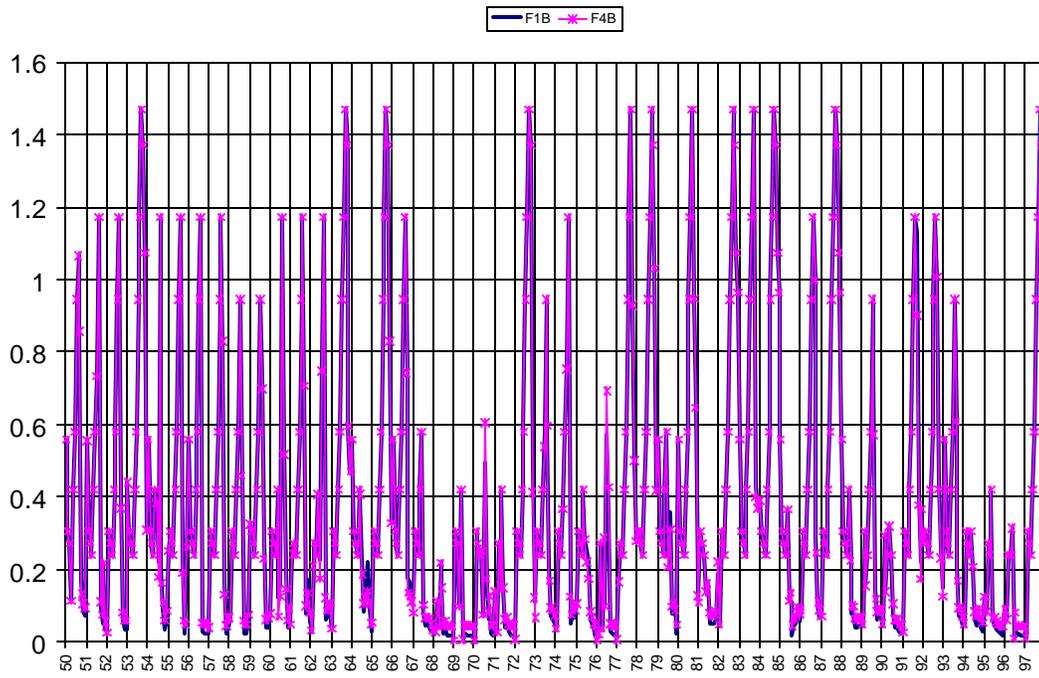
Caudal captado por canales sector 02 (m3/s)



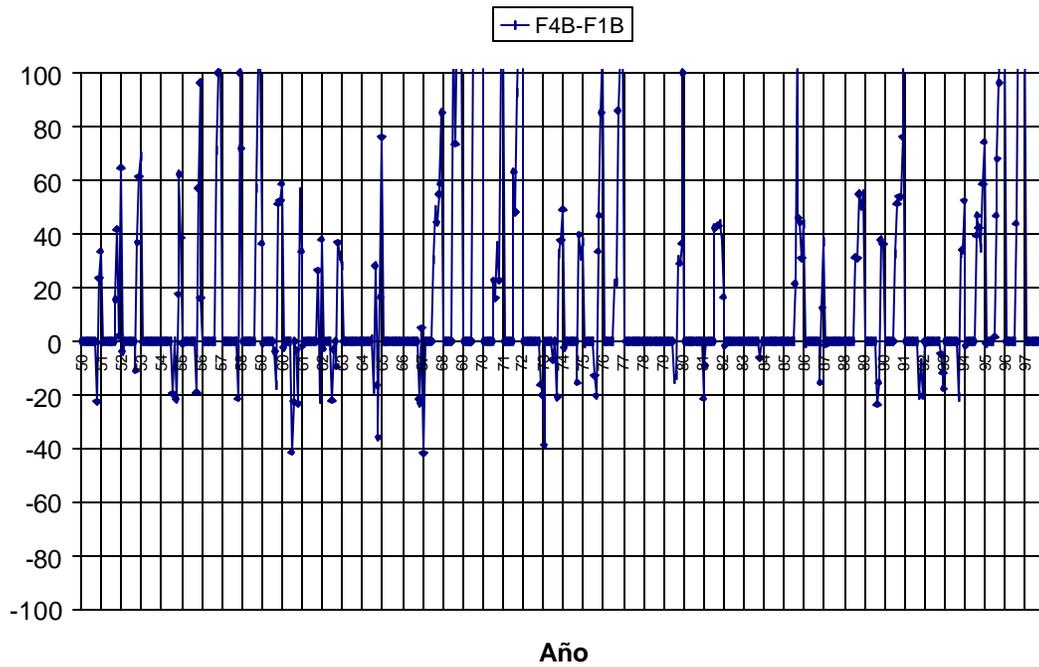
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 2



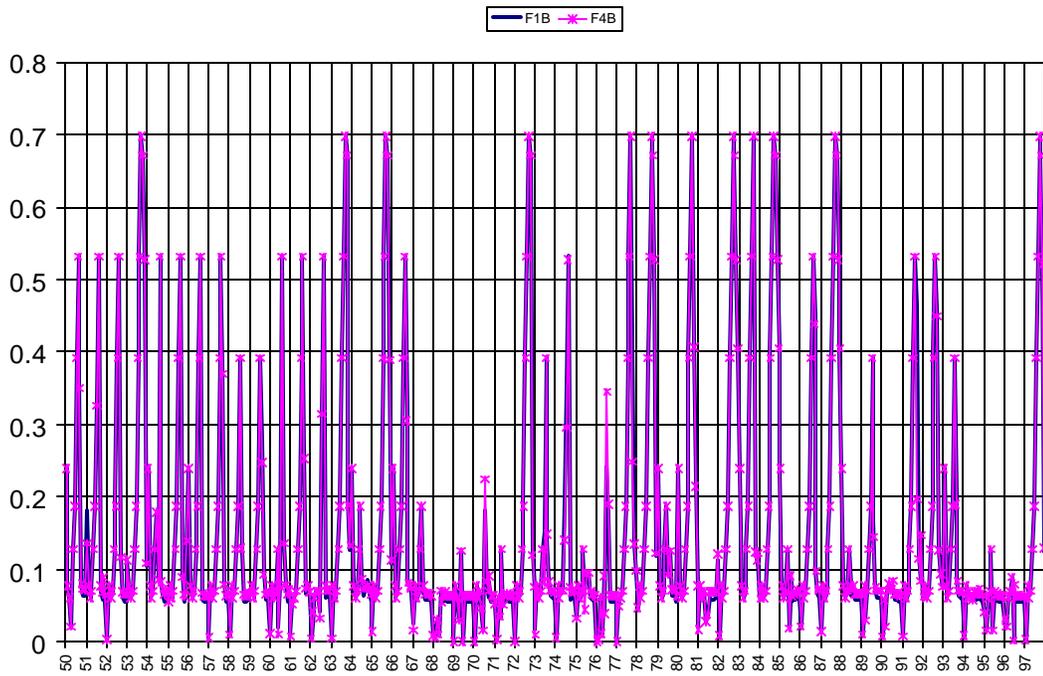
Caudal captado por canales sector 03 (m3/s)



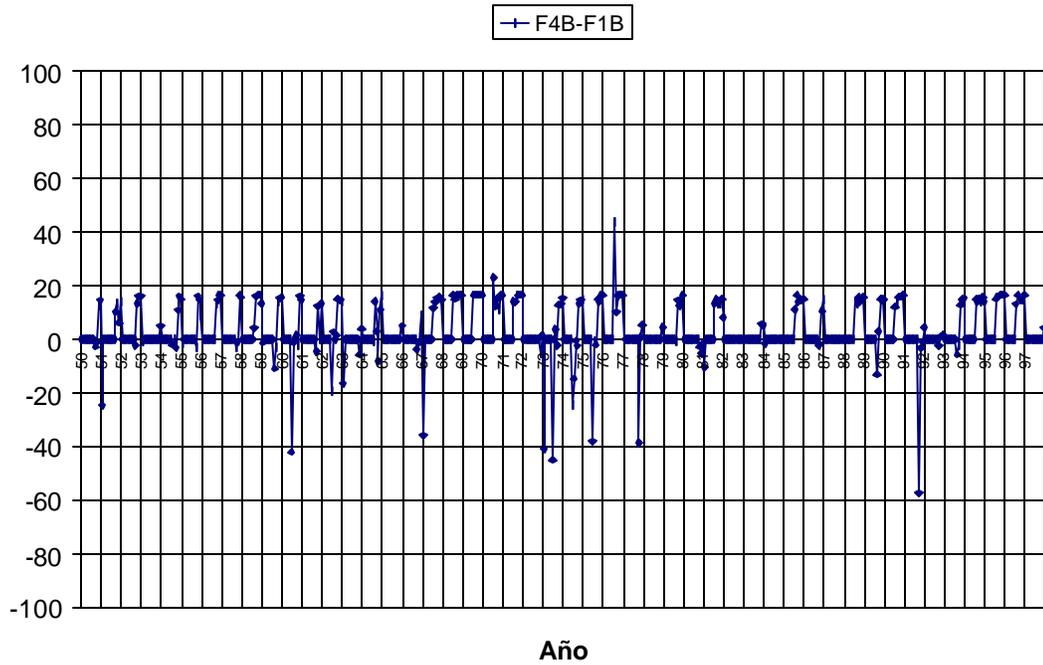
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo3



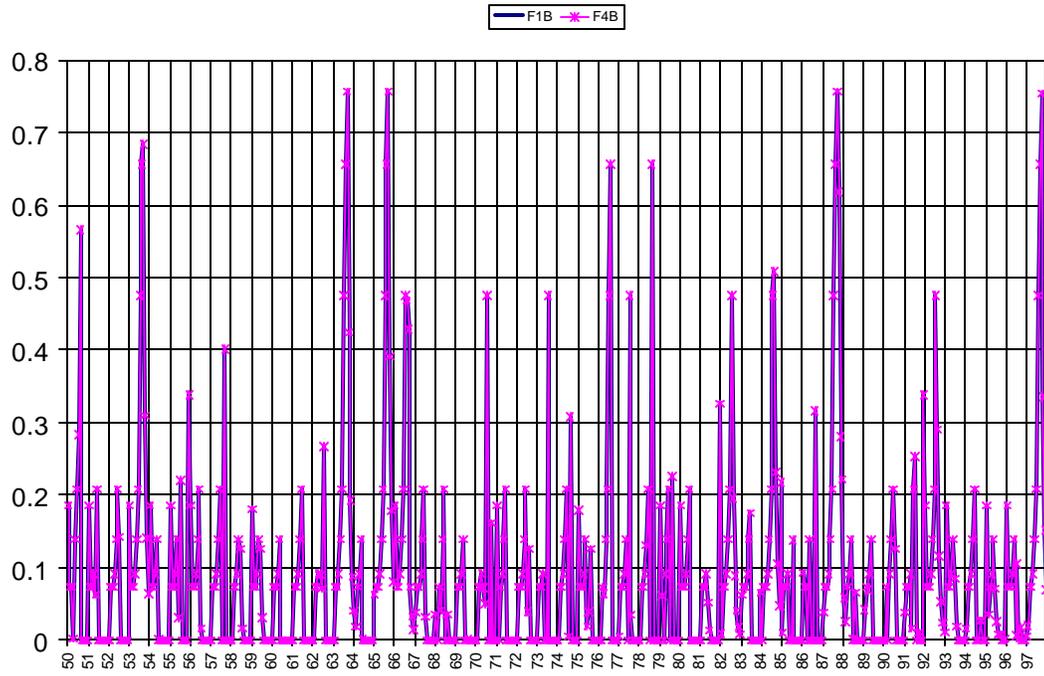
Caudal captado por canales sector 04 (m3/s)



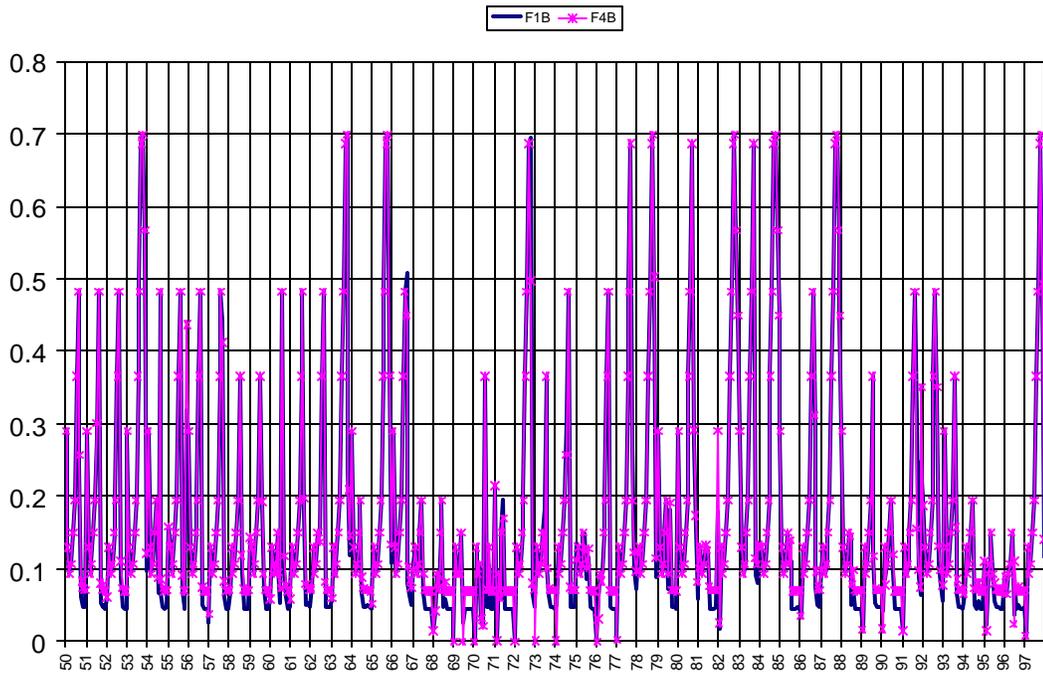
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 4



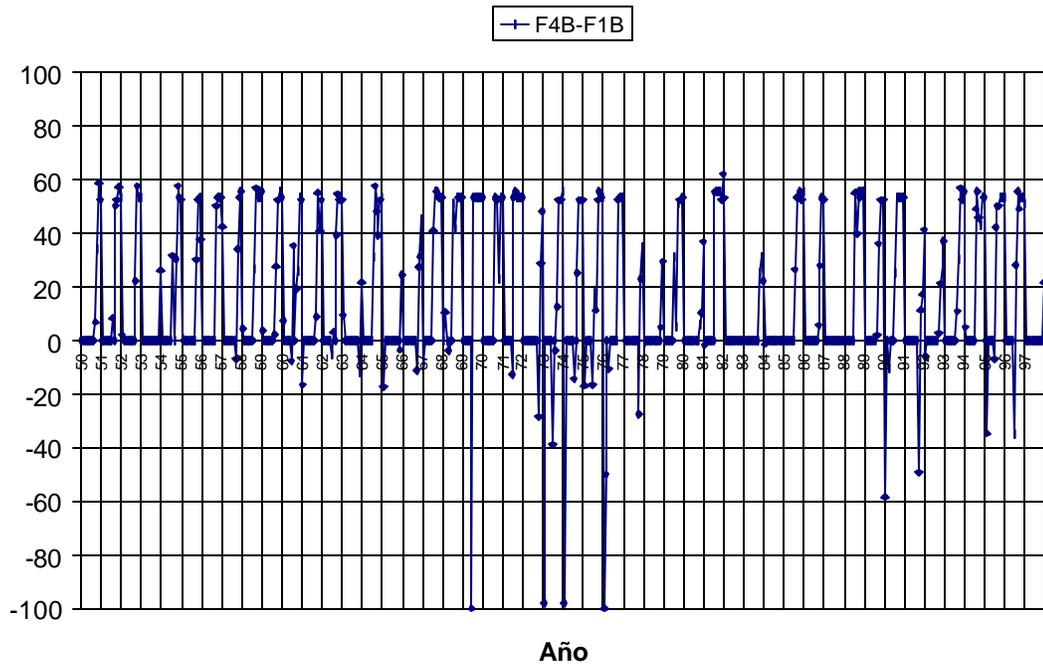
Caudal captado por canales sector 05 (m³/s)



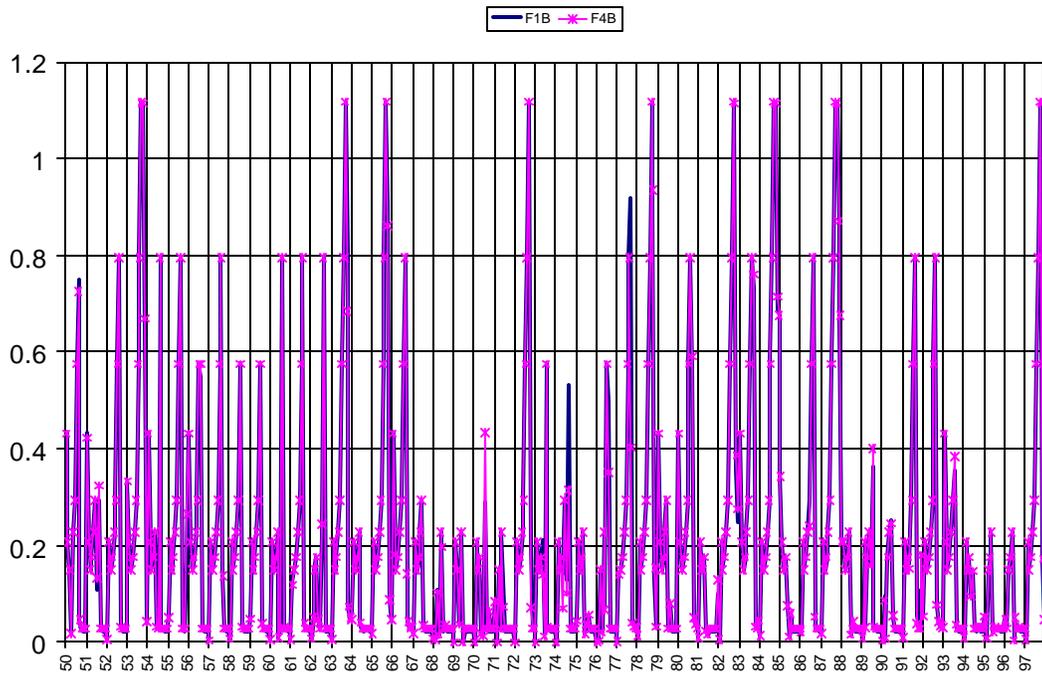
Caudal captado por canales sector 06 (m3/s)



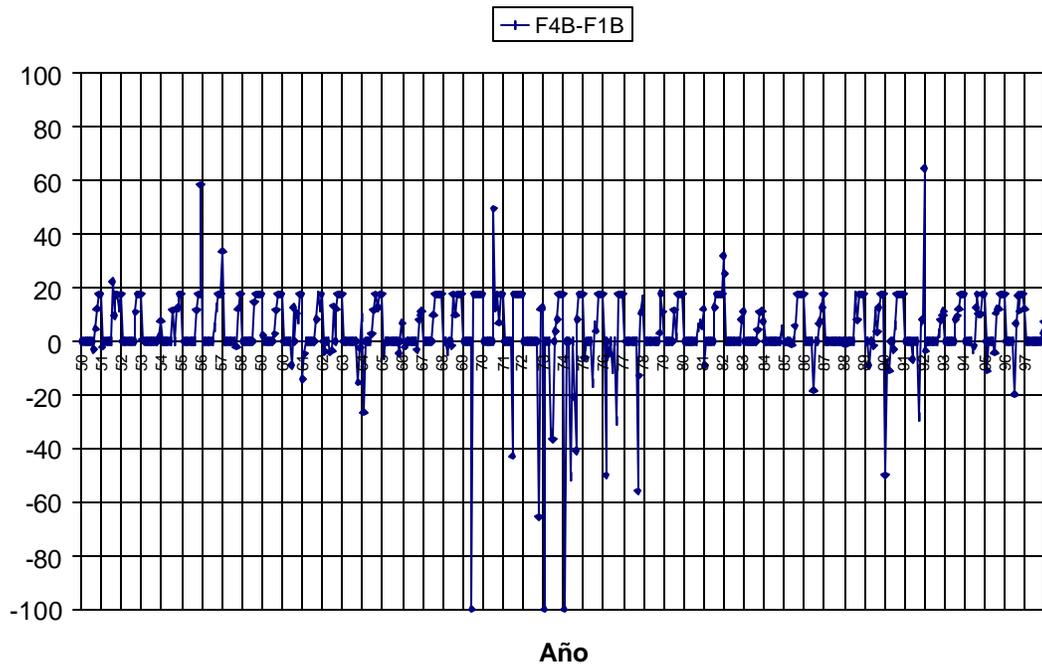
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 6



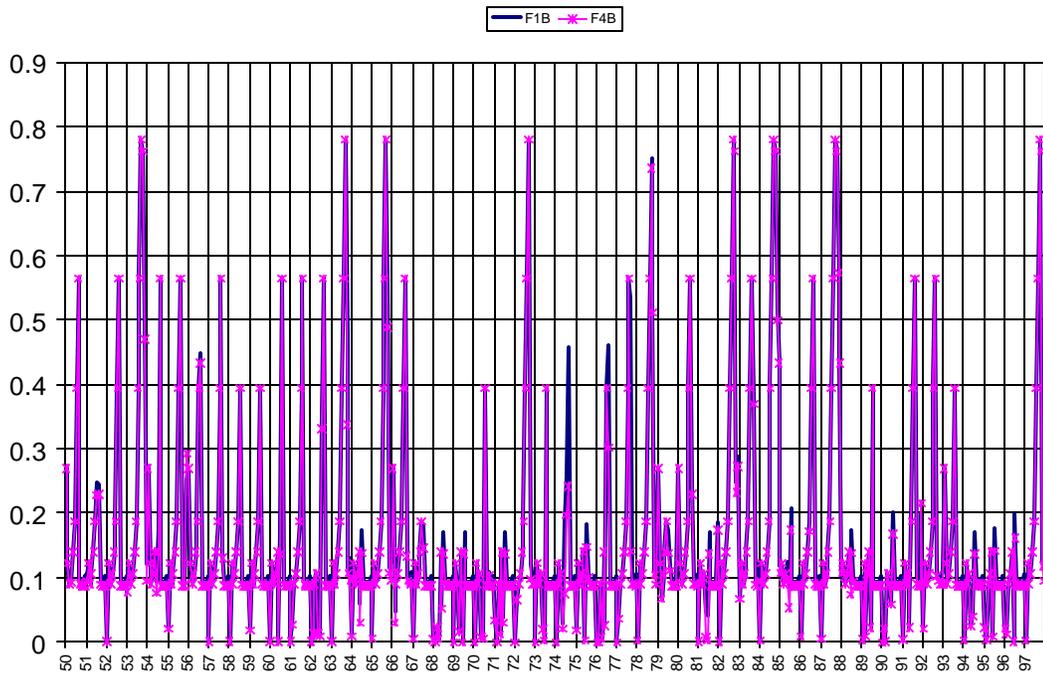
Caudal captado por canales sector 07 (m3/s)



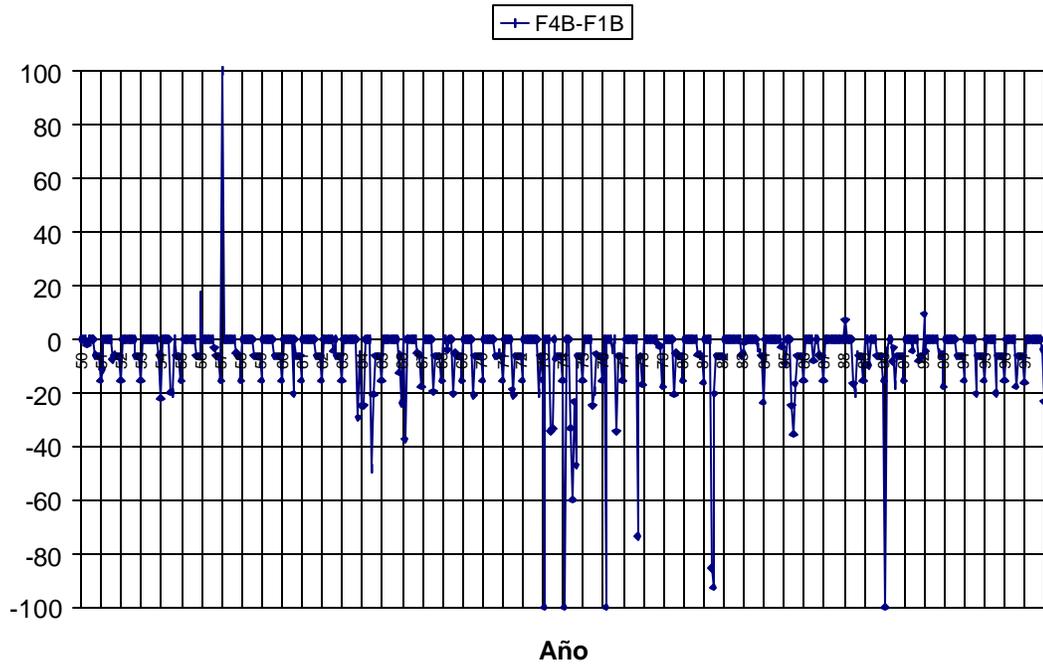
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 7



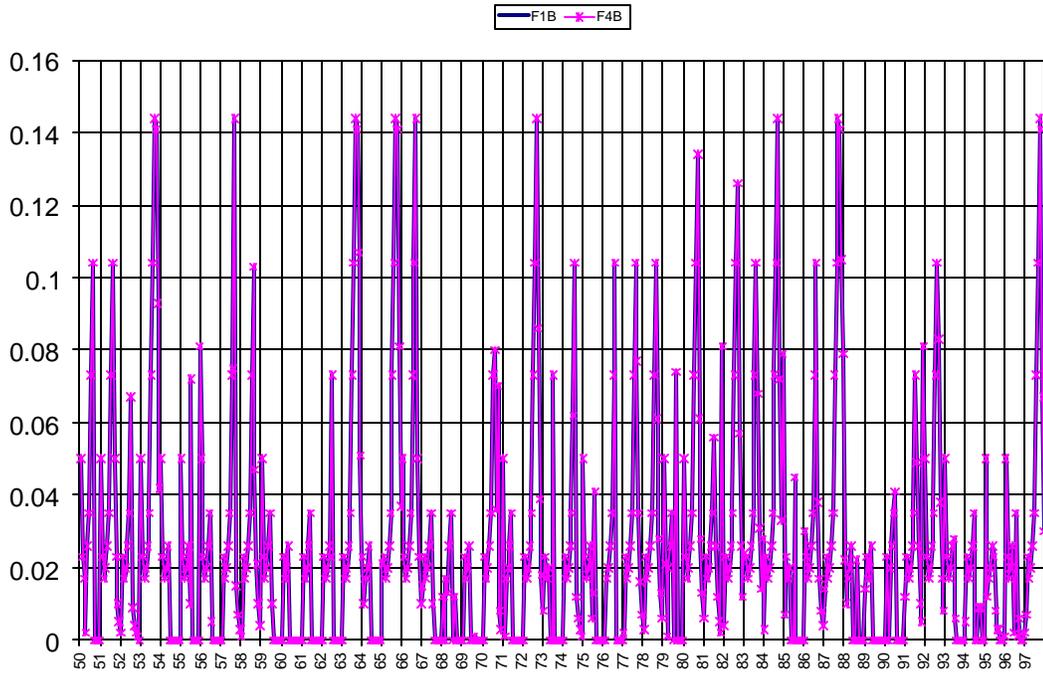
Caudal captado por canales sector 08 (m3/s)



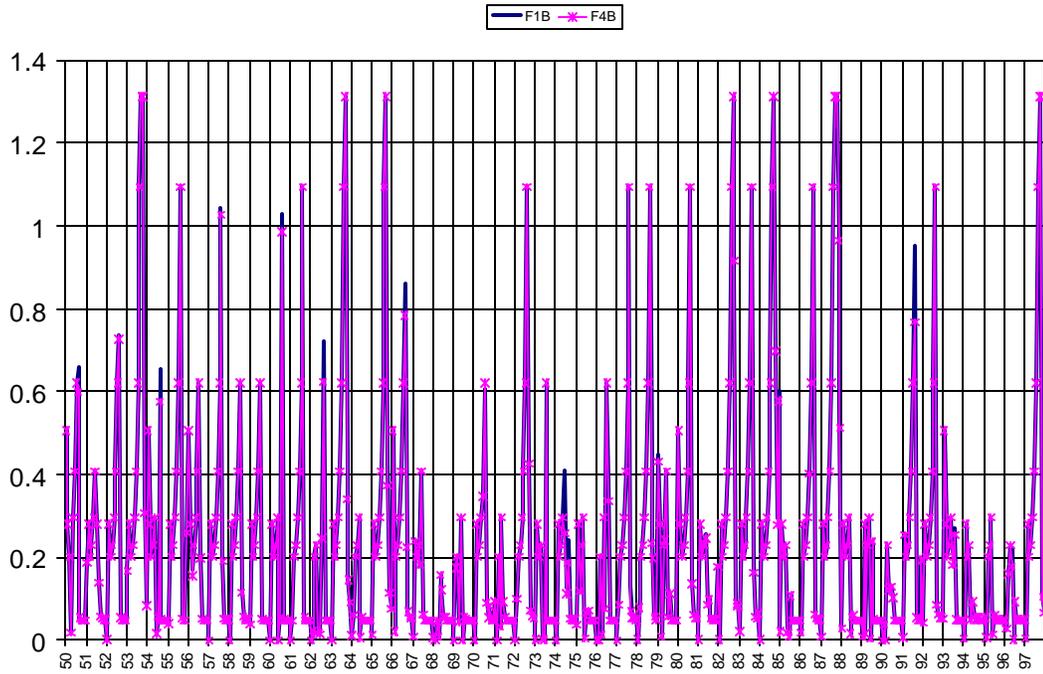
Diferencia porcentual caudal captado canales tramo 8



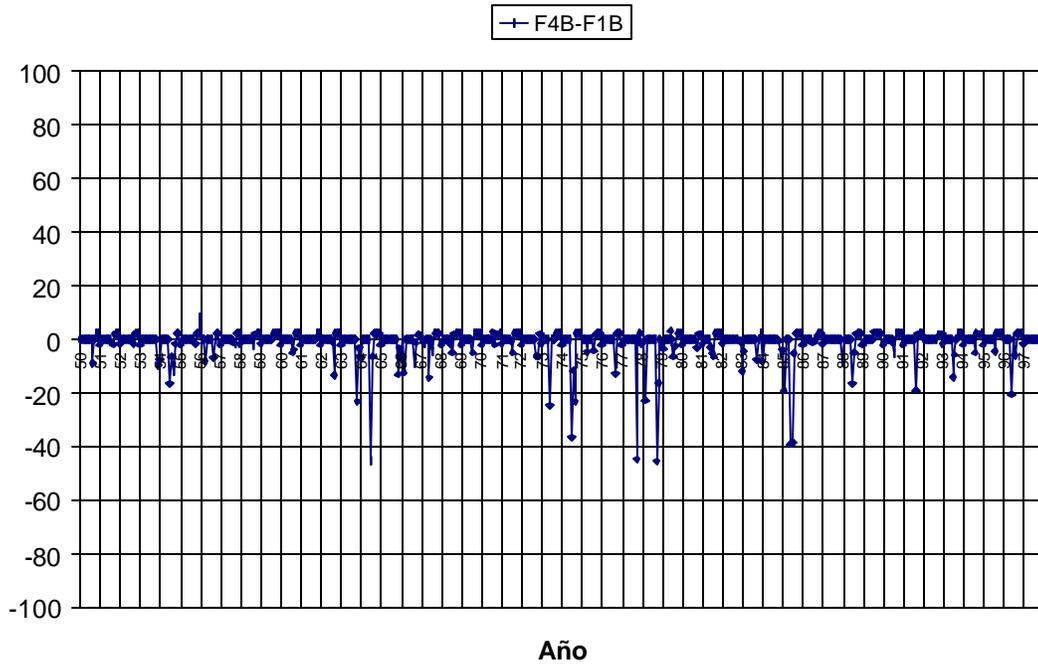
Caudal captado por canales sector 09 (m3/s)



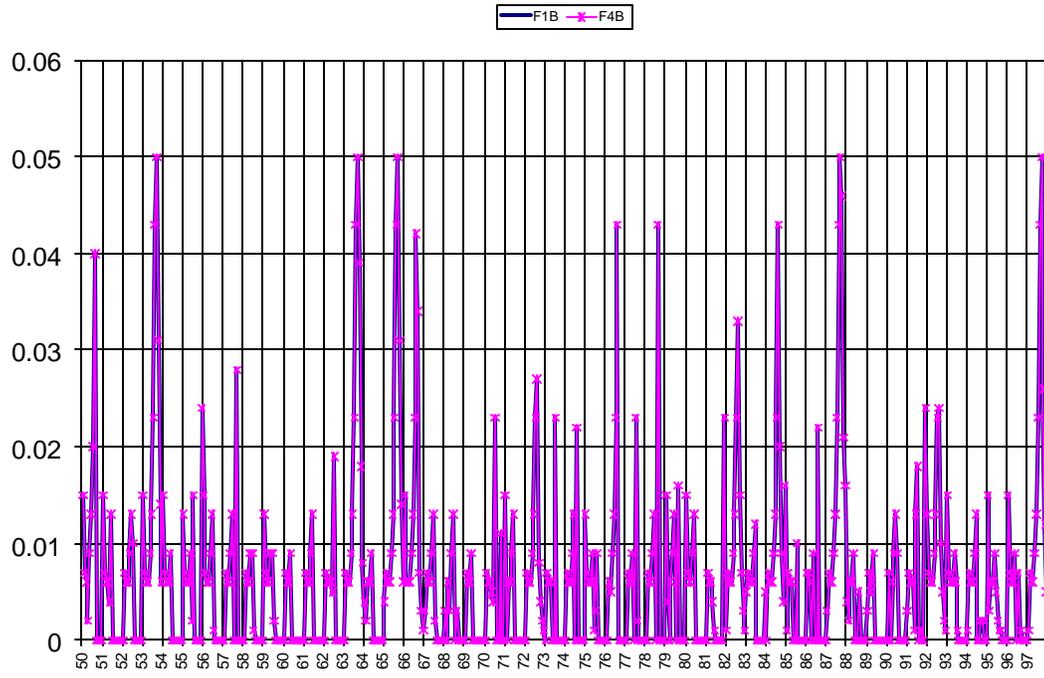
Caudal captado por canales sector 10 (m3/s)



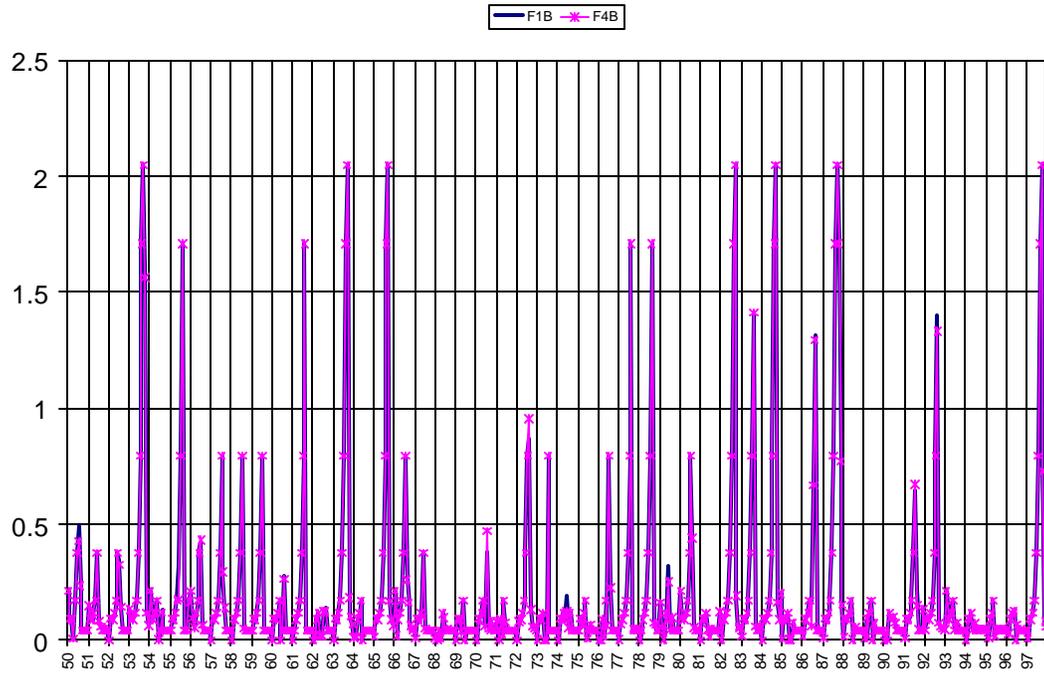
Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 10



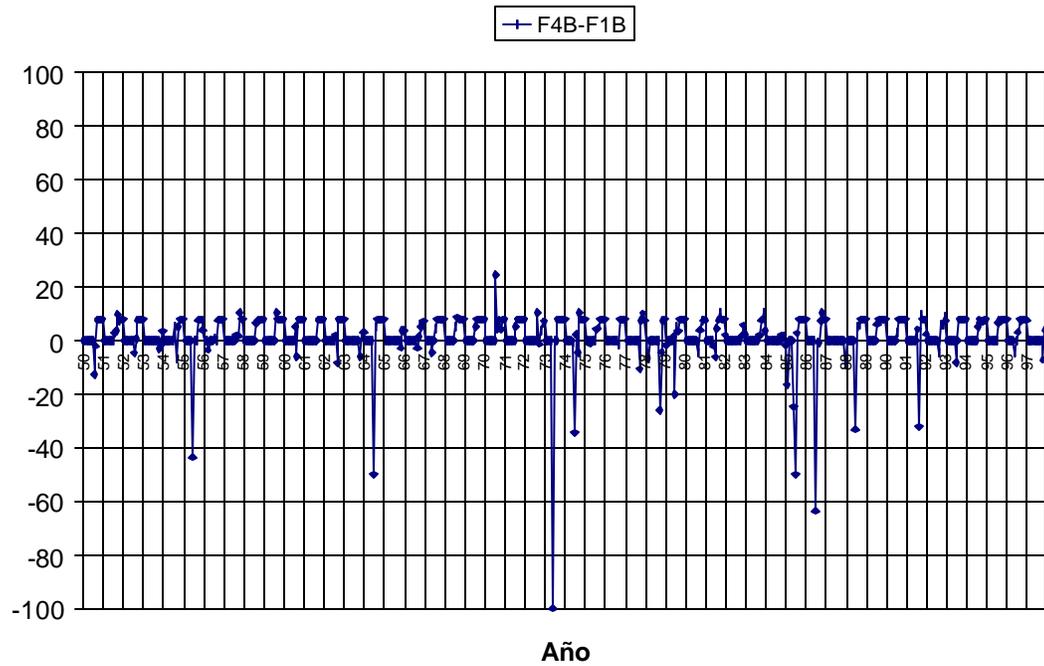
Caudal captado por canales sector 11 (m3/s)



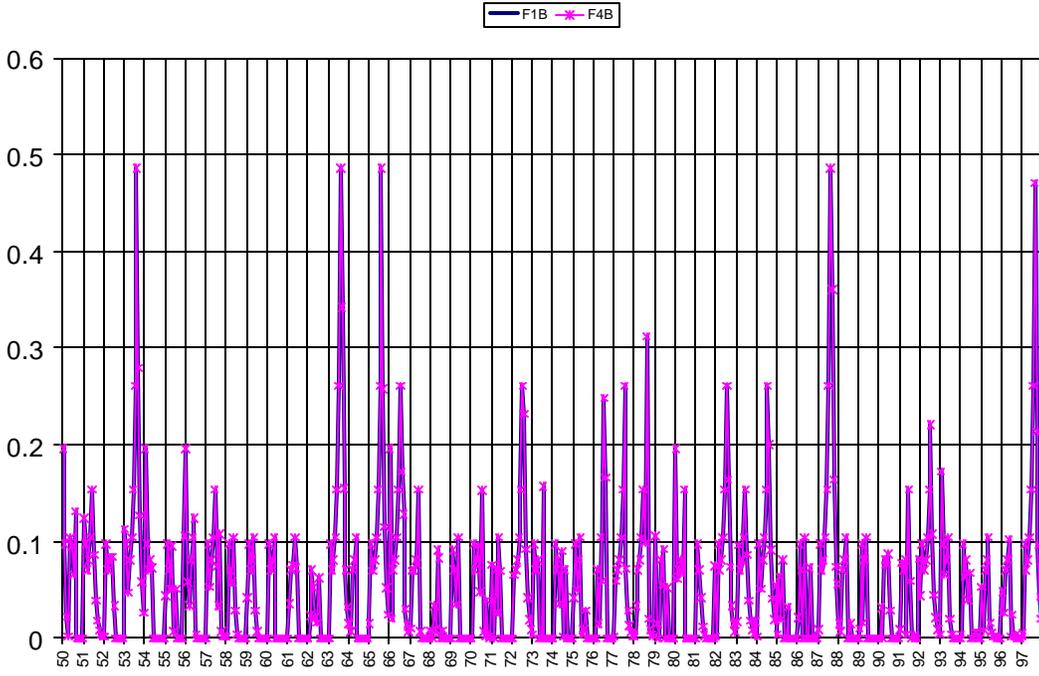
Caudal captado por canales sector 12 (m3/s)



Diferencia porcentual caudal captado por canales tramo 12



Caudal captado por canales sector 13 (m3/s)



6.3. Efecto del aumento de bombeo sobre los caudales en el río

A continuación se analiza el efecto del aumento del bombeo sobre los caudales en el río, en cada tramo del modelo. Los resultados de las simulaciones se presentan en forma gráfica en las figuras adjuntas.

Se presentan dos figuras para cada tramo de río: La primera muestra los caudales totales en el tramo, comparando los escenarios F1B y F4B. En la segunda se grafica directamente la diferencia porcentual entre ambos escenarios, debido a que permite tener una clara visión de la magnitud de las consecuencias del incremento de bombeo en los flujos superficiales. La figura de las diferencias no se presenta para los sectores de cabecera; tramos 1, 5, 9, 11 y 13, pues para ellos, como ya se explicó en el ítem 6.1.2, los caudales de entrada resultan ser los mismos en ambos escenarios.

Al igual que el punto anterior, diferencias positivas significan caudales mayores en el escenario F4B que en el F1B y diferencias negativas significan disminución de caudal en el escenario F4B.

Observando las figuras en detalle, se observa lo siguiente.

En el tramo 2 sólo se observan diferencias en la temporada de riego, con disminuciones puntuales que no superan el 10%, y aumentos también puntuales del orden del 20% con respecto a los flujos del escenario F1B.

En el tramo 3, generalmente hay aumento de caudal, especialmente en invierno. Se aprecian también en la temporada de riego, disminuciones frecuentes, del orden del 20%. En invierno las disminuciones puntuales alcanzan el 40%.

En el tramo 4 se observa en general un aumento sostenido de aproximadamente 18% en la temporada de riego, y algunas disminuciones ocasionales. Las disminuciones ocasionales se presentan generalmente en invierno, y alcanzan hasta 40%.

En el tramo 6 se aprecian aumentos sostenidos de caudal del 58% en la temporada de riego, salvo disminuciones ocasionales. En invierno se observa una disminución promedio del 4% con respecto al caudal del escenario F1B.

En el tramo 7 generalmente se observan aumentos en la temporada de riego, que en promedio alcanzan el 18%. Sin embargo, en las épocas más secas, hay disminuciones del caudal durante la temporada de riego, que pueden llegar a ser muy importantes.

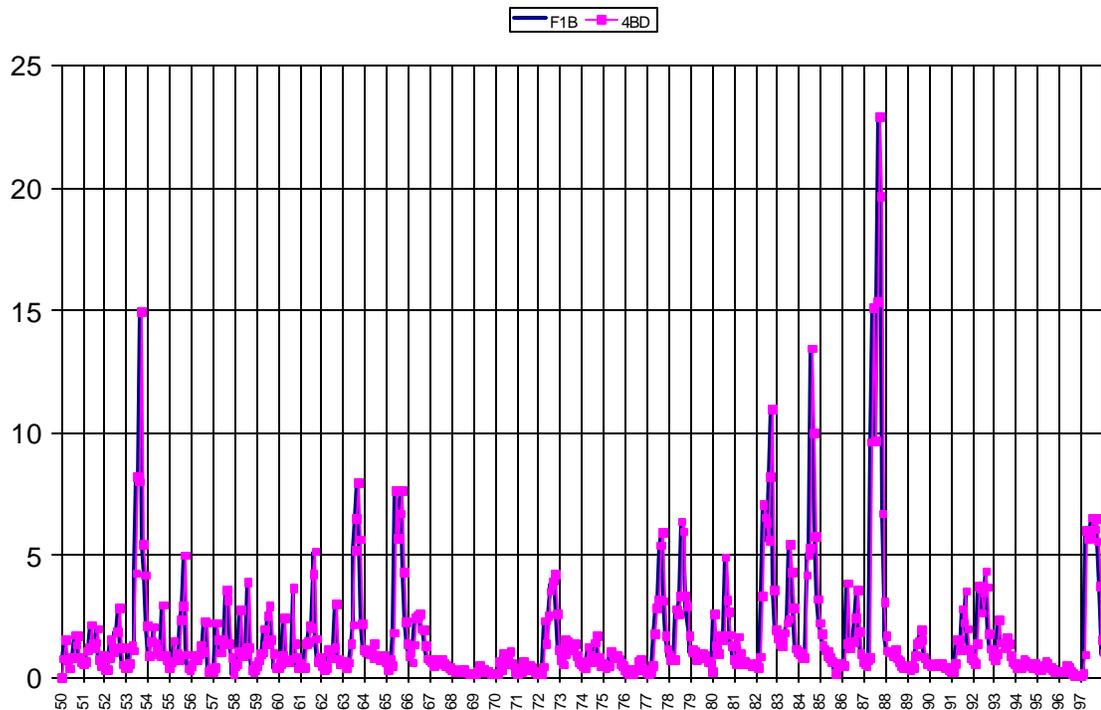
En el sector 8 prácticamente no hay variaciones de caudal durante los meses de invierno, pero se observa una disminución casi sistemática, de hasta un 20%, en los meses de la temporada de riego.

En el tramo 10 se aprecia un leve aumento de caudal en el período de verano y algunas disminuciones ocasionales. En la temporada de invierno hay disminuciones, ocasionales, que llegan hasta un 40%.

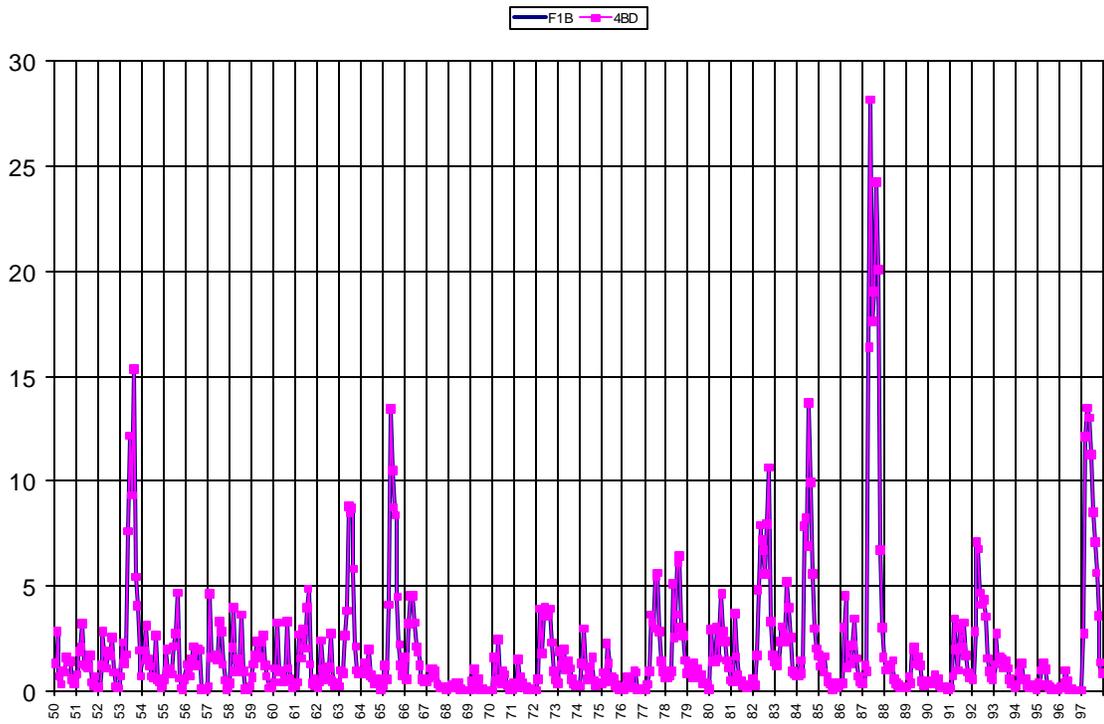
En el tramo 12 generalmente se observan aumentos de caudal durante la temporada de riego, de hasta un 10%. Las disminuciones de caudal son ocasionales, se presentan fundamentalmente en los meses de invierno, y son muy variables.

En general, y observando sólo la temporada de riego, se puede decir que en los tramos superiores 2, 4 y 6, no hay disminuciones importantes de caudal en el escenario definido como F4B. En los tramos 7 a 10 se producen disminuciones ocasionales. En el sector 3, las disminuciones durante la temporada de riego son frecuentes, y alcanzan el 20%. El sector más afectado durante la temporada de riego, es el sector 8, que muestra una disminución casi sistemática de alrededor de 20%.

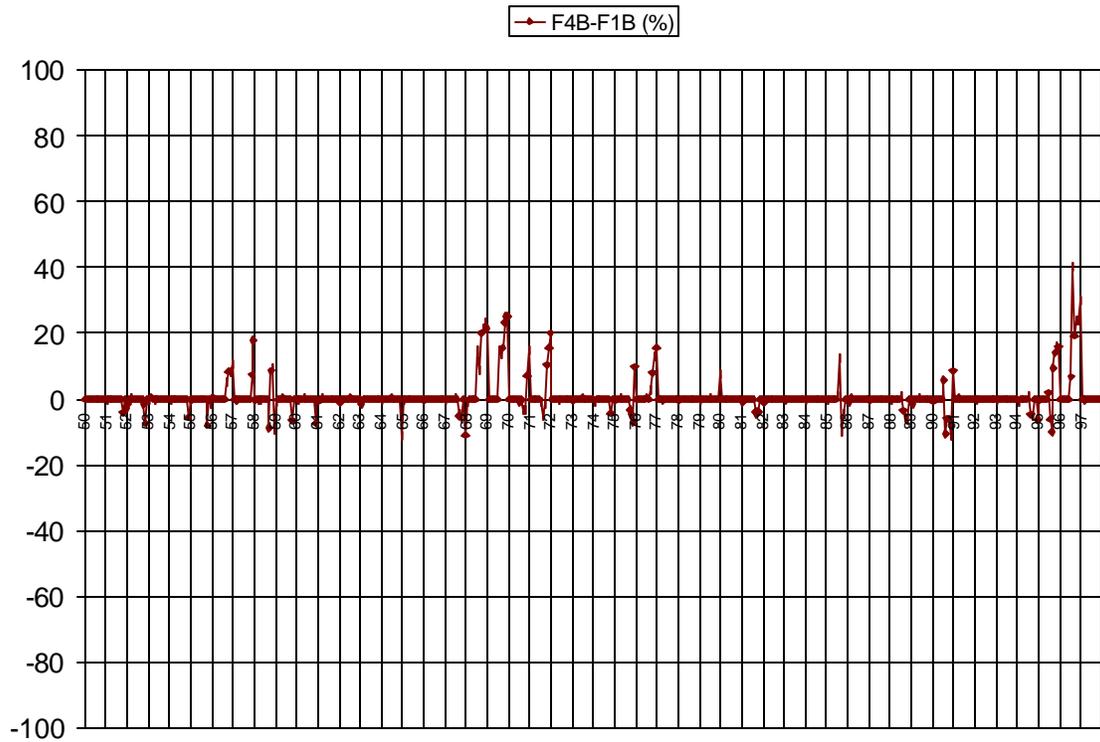
Caudal afluente (m³/s) tramo 1



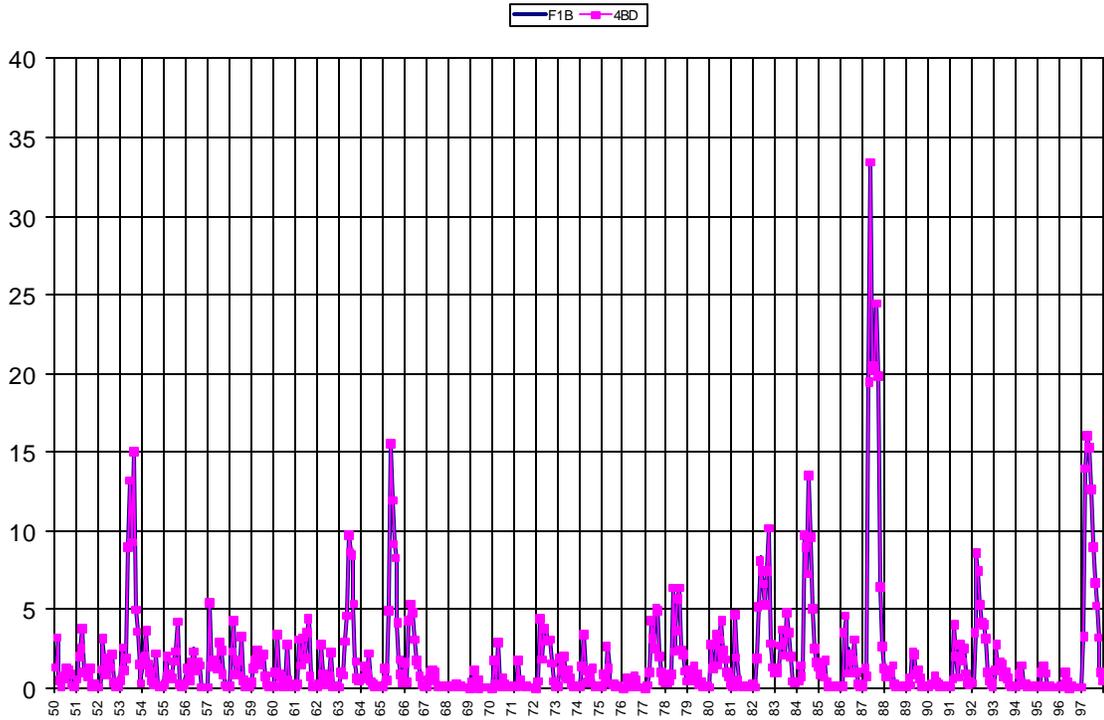
Caudal afluente (m3/s) tramo 2



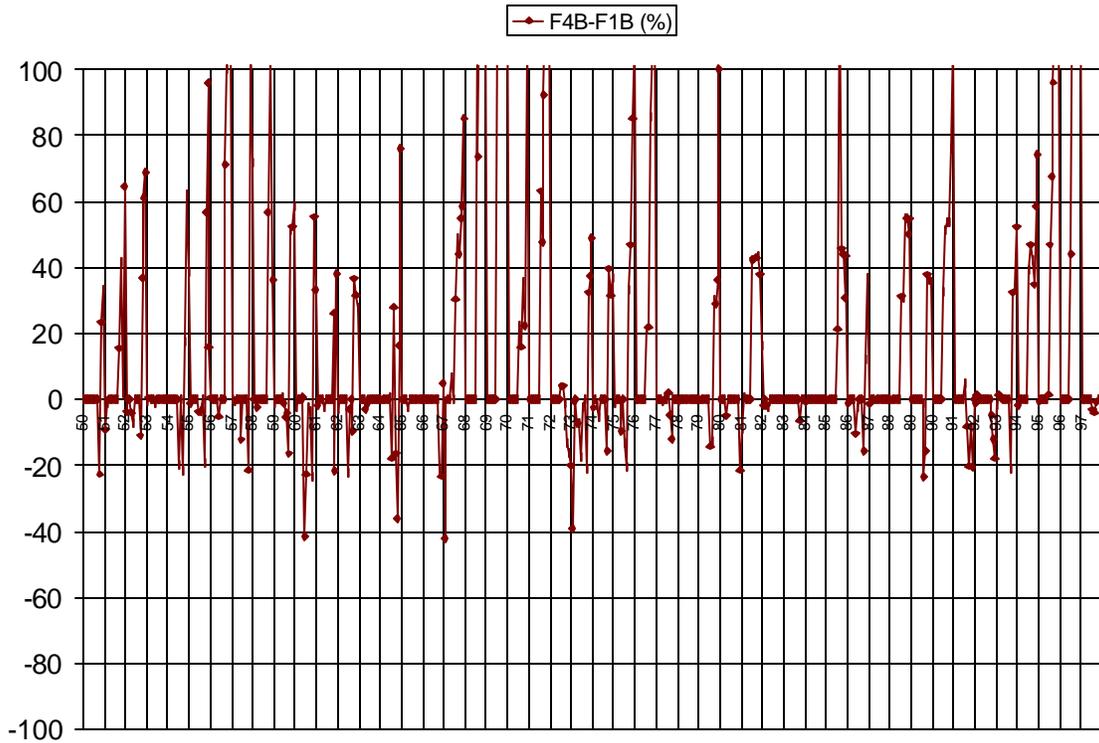
Diferencia porcentual caudal afluente al tramo 2



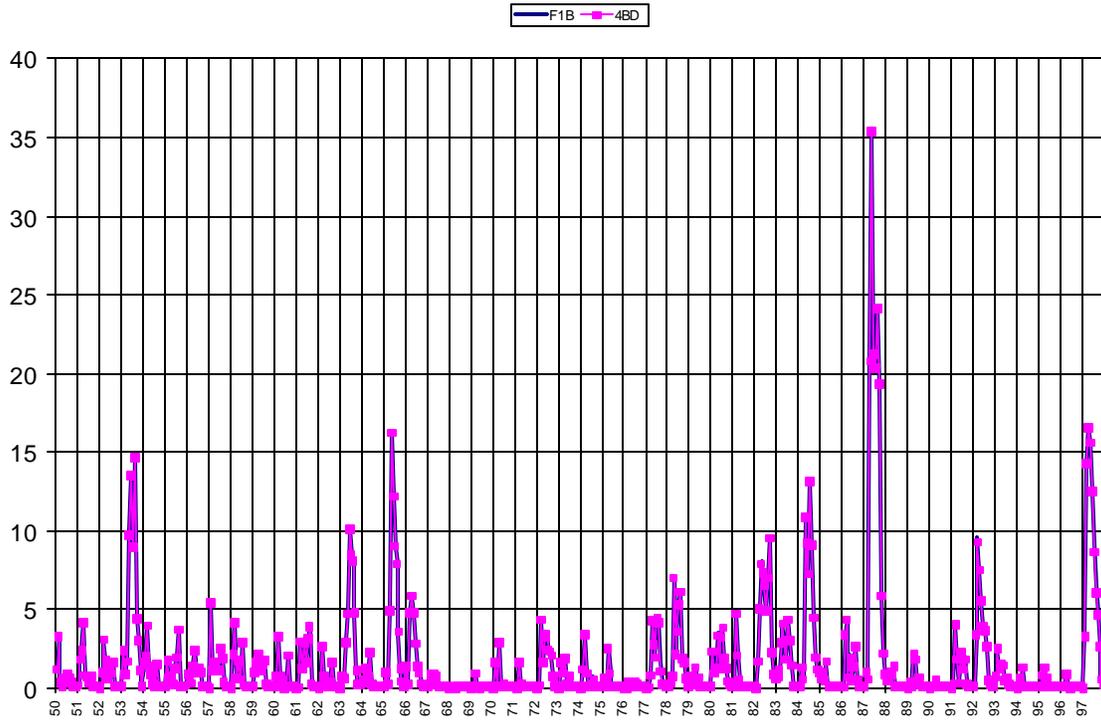
**Caudal afluente (m3/s)
tramo 3**



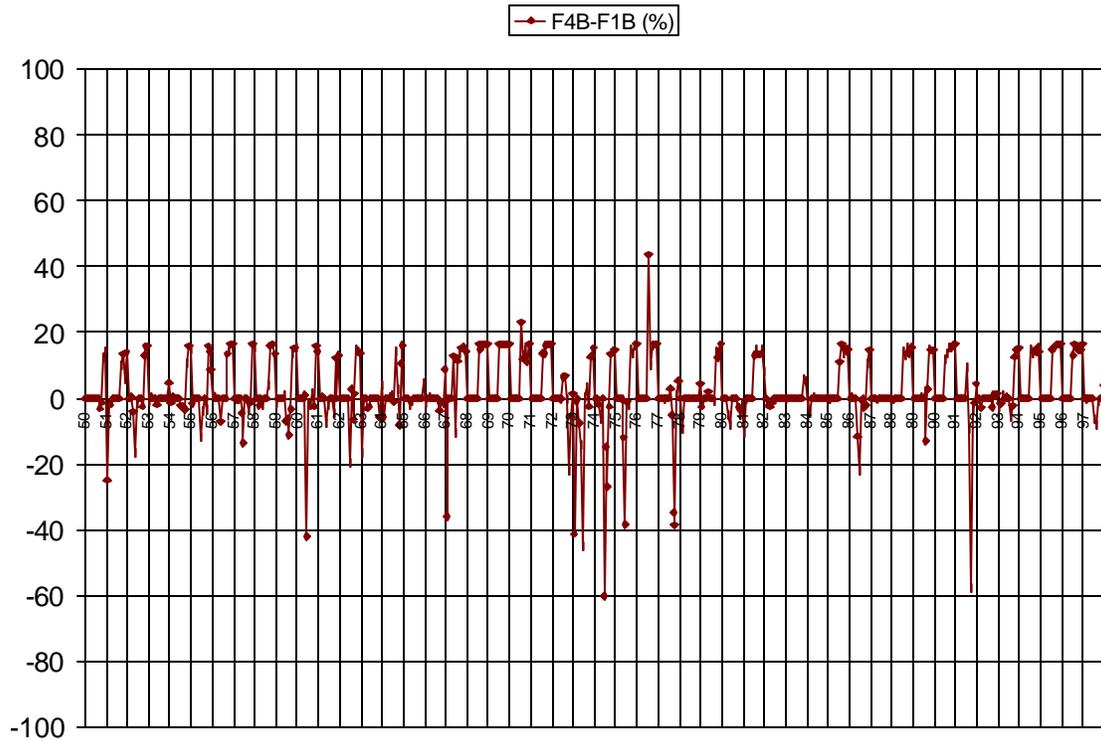
Diferencia porcentual caudal afluente tramo 3



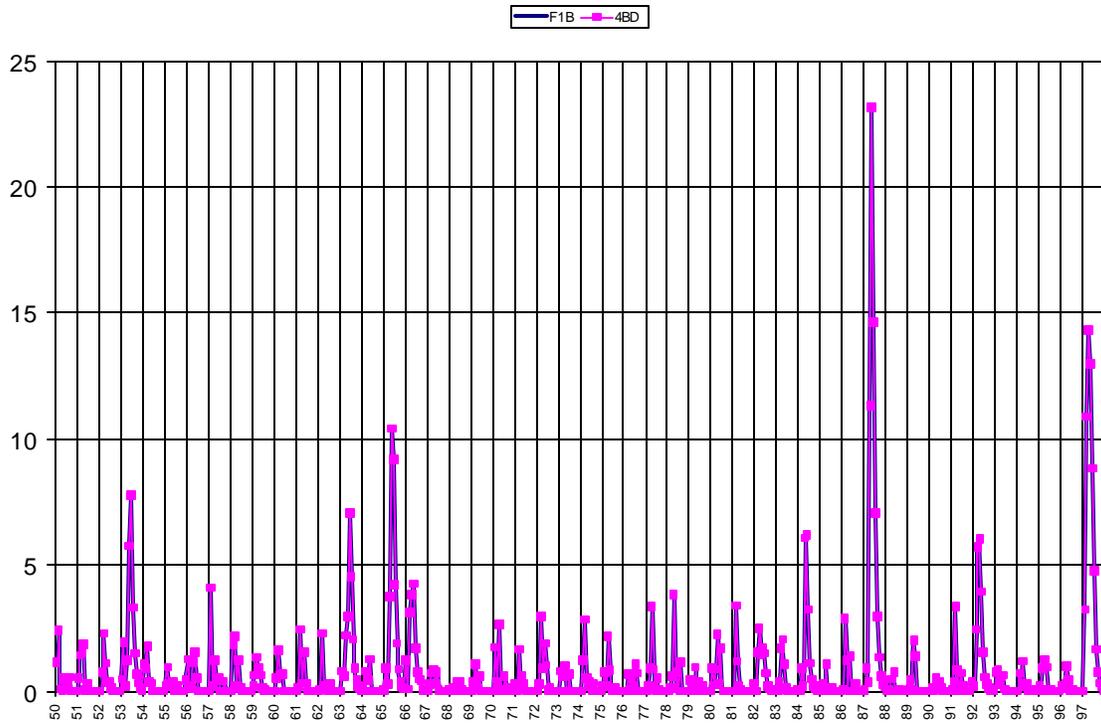
Caudal afluyente (m3/s) tramo 4



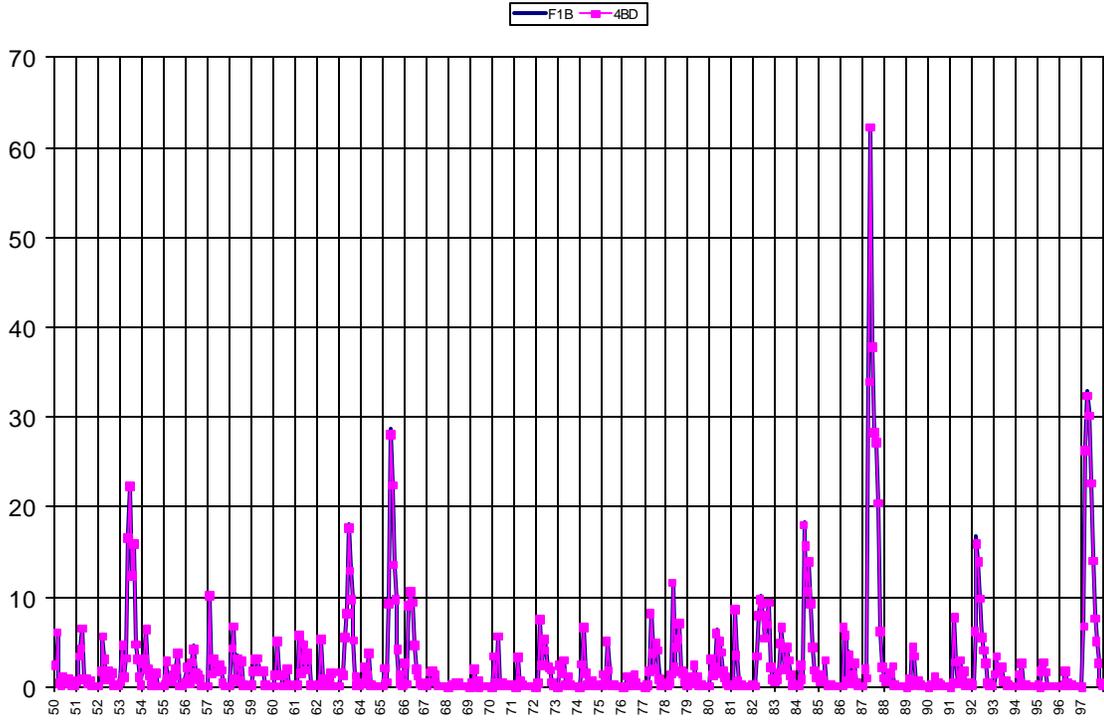
Diferencia porcentual caudal afluyente tramo 4



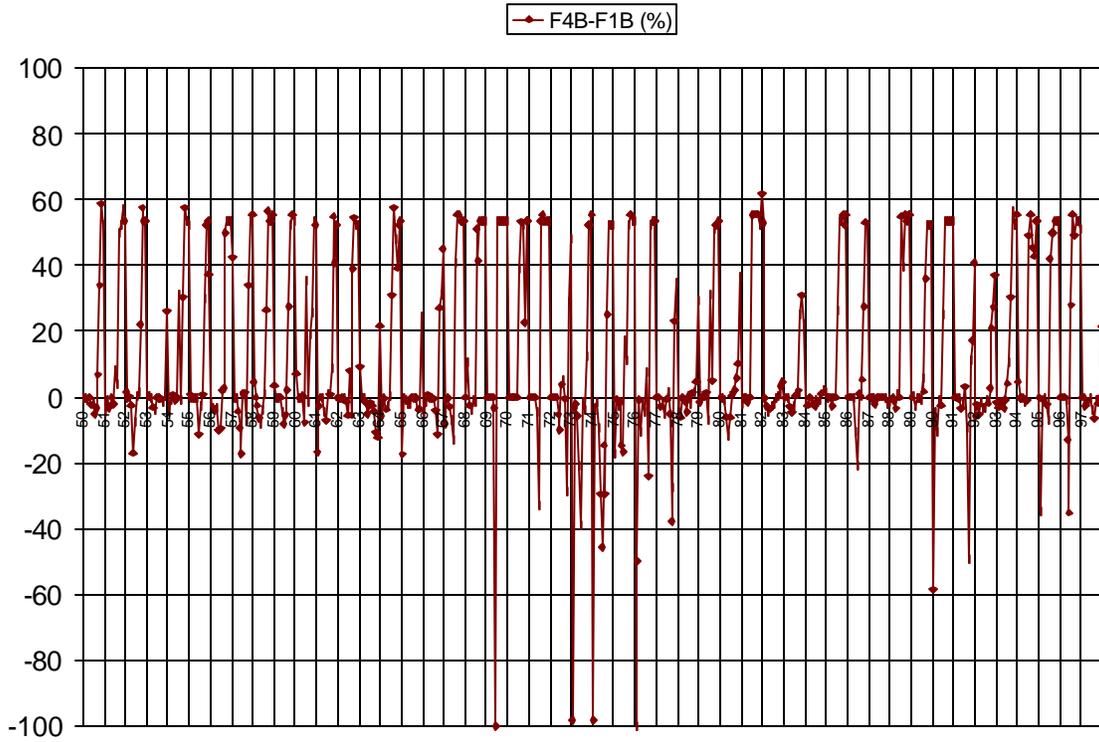
Caudal afluyente (m3/s) tramo 5



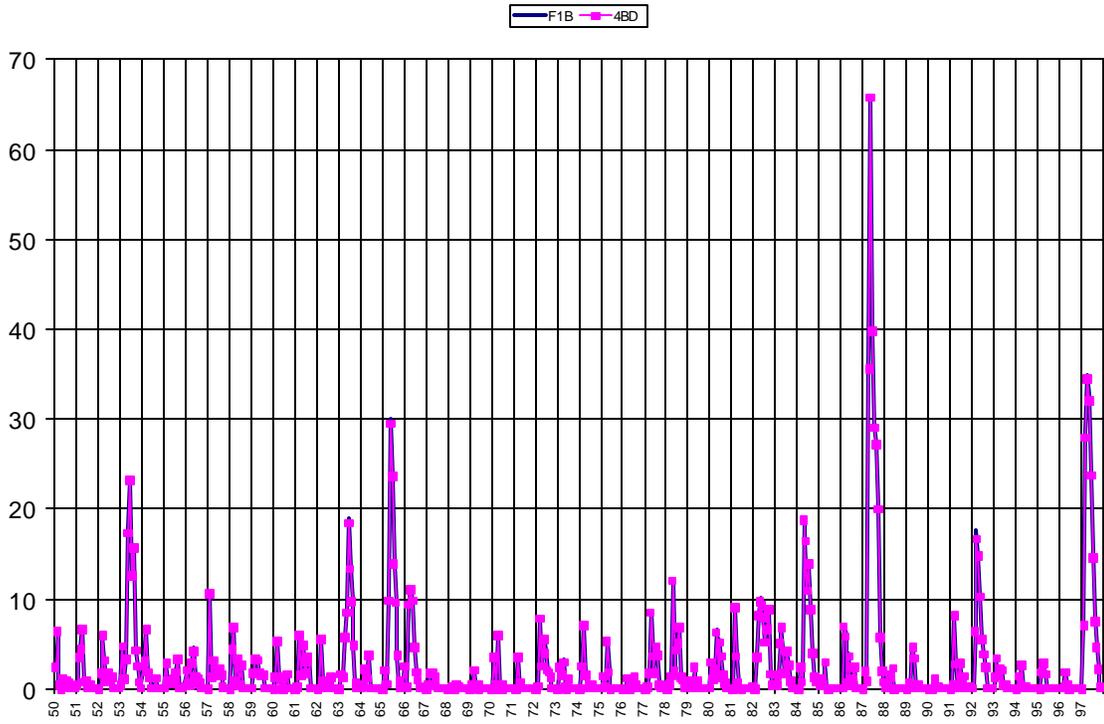
Caudal afluente (m3/s) tramo 6



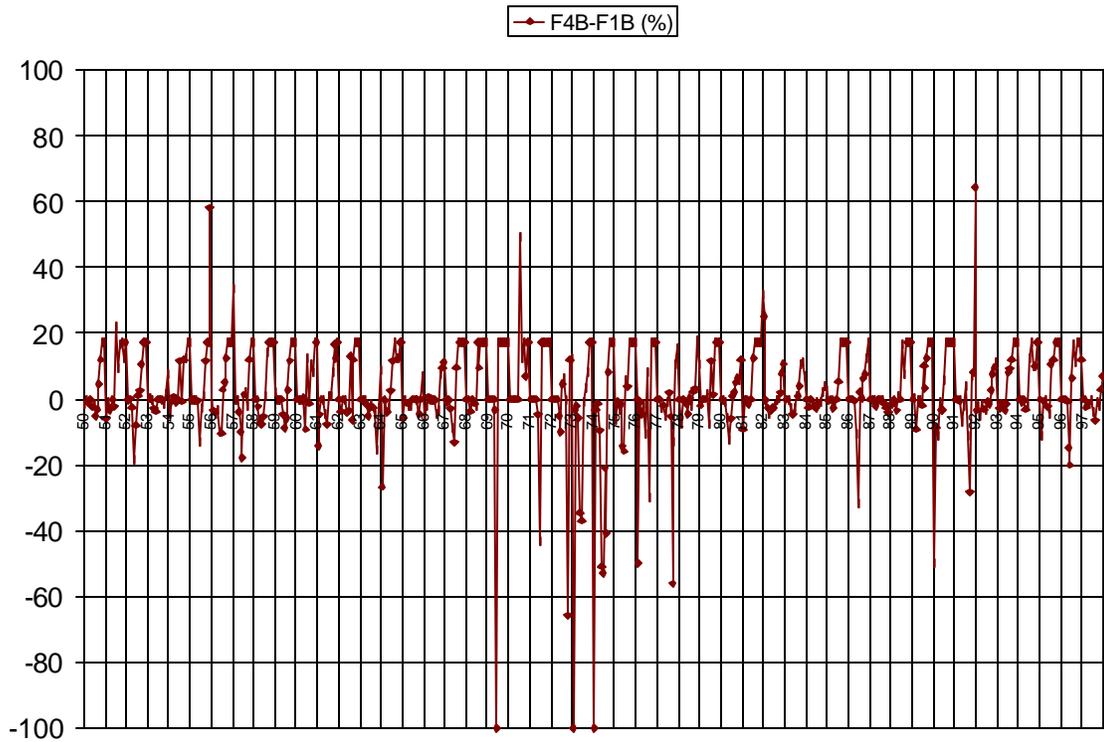
Diferencia porcentual caudal afluente tramo 6



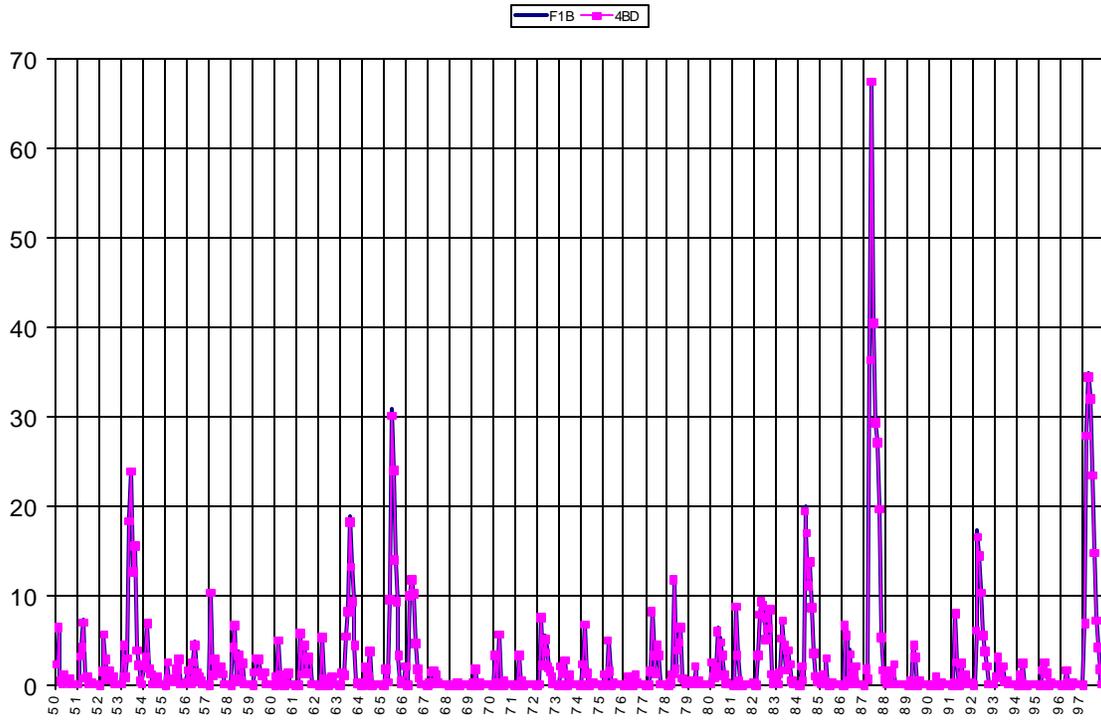
Caudal afluente (m3/s) tramo 7



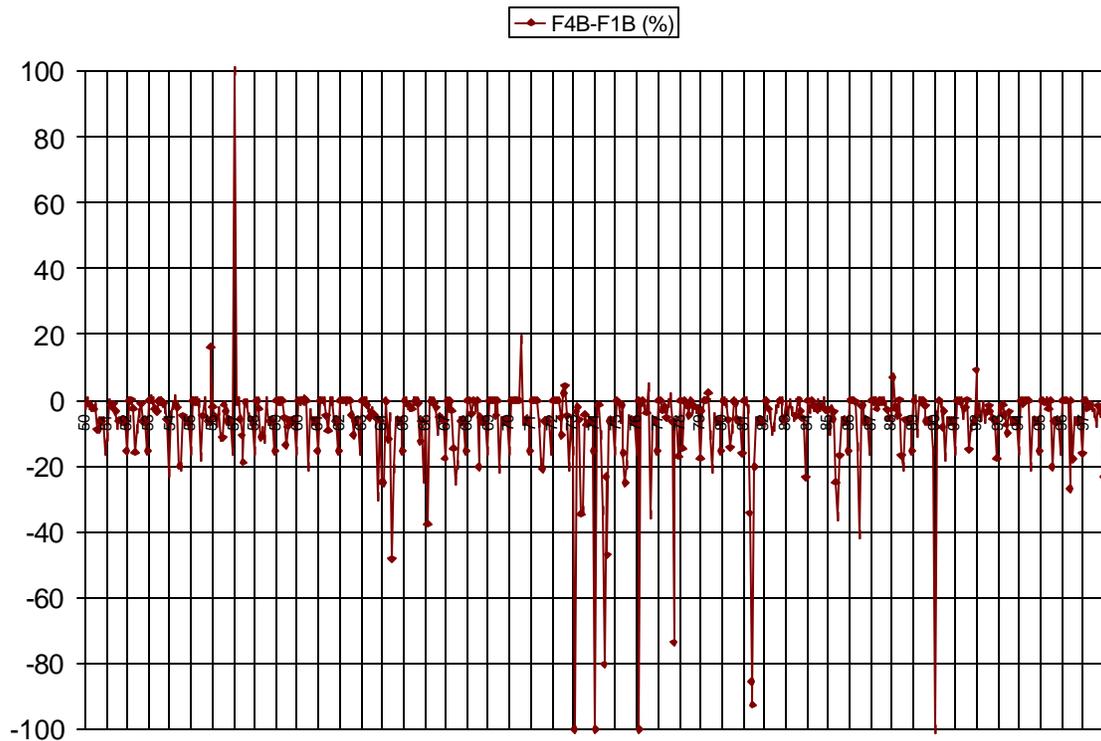
Diferencia porcentual caudal afluente tramo 7



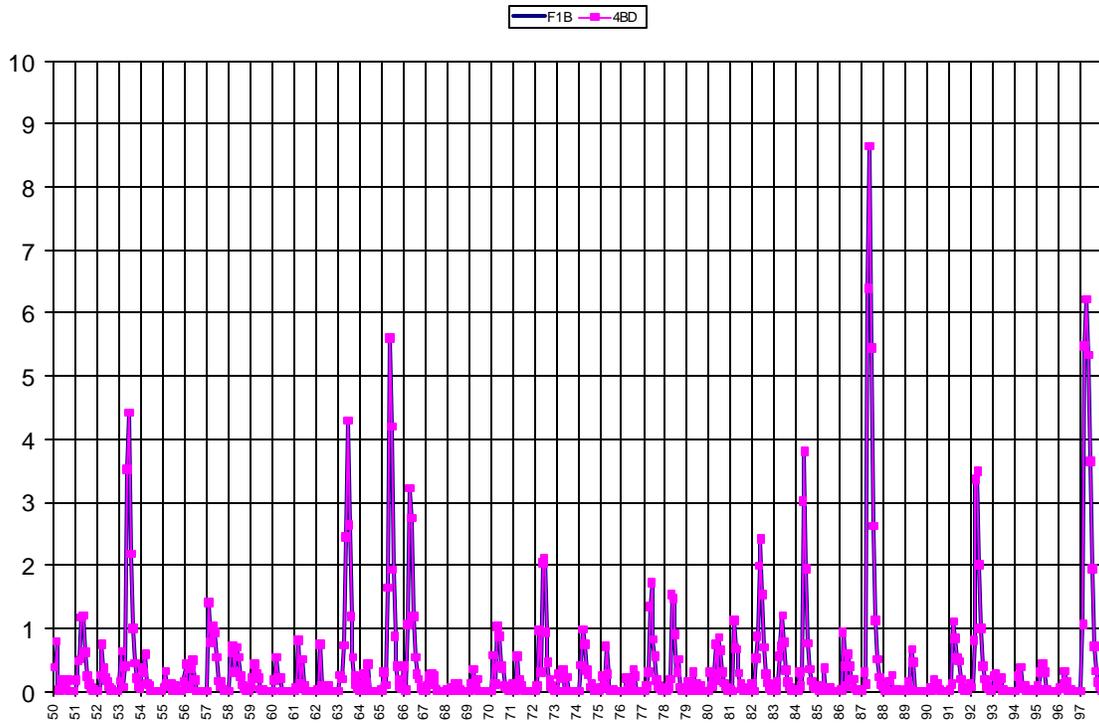
Caudal afluyente (m3/s) tramo 8



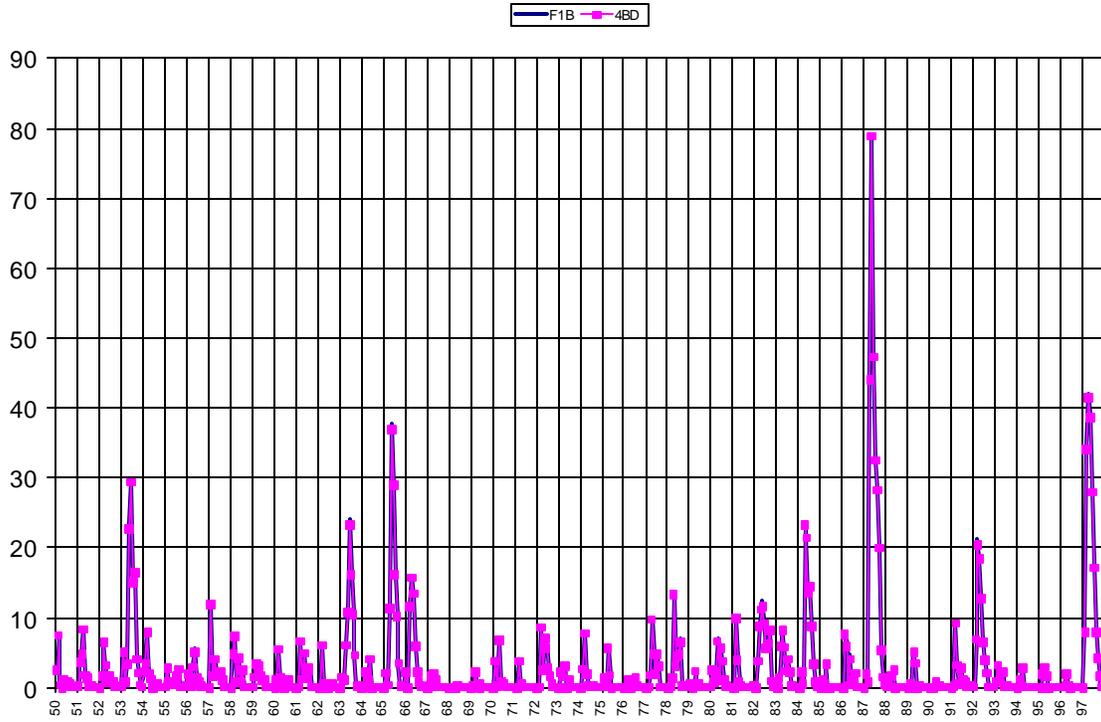
Diferencia porcentual caudal afluyente tramo 8



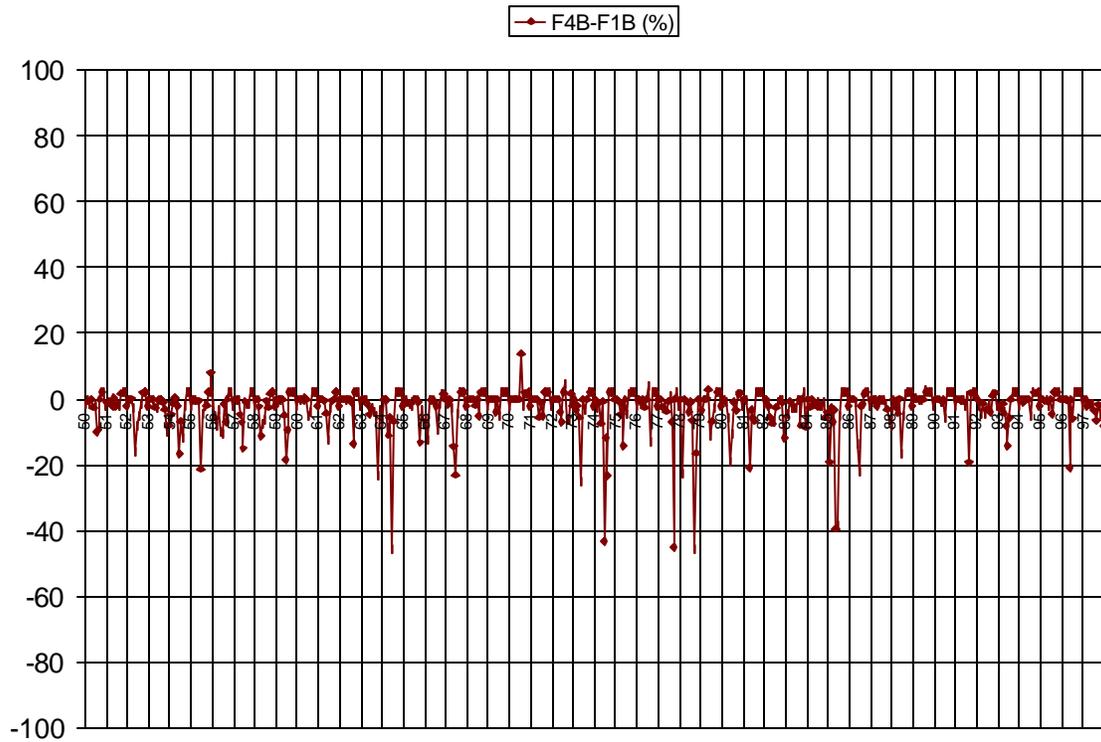
Caudal afluyente (m3/s) tramo 9



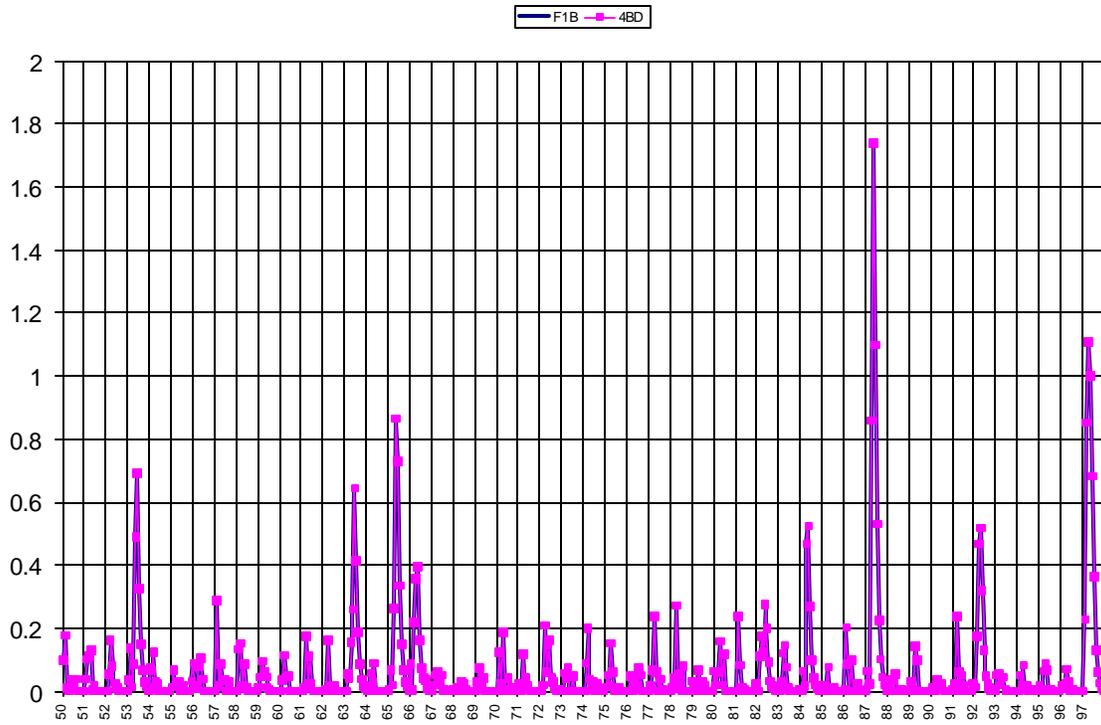
Caudal afluente (m3/s) tramo 10



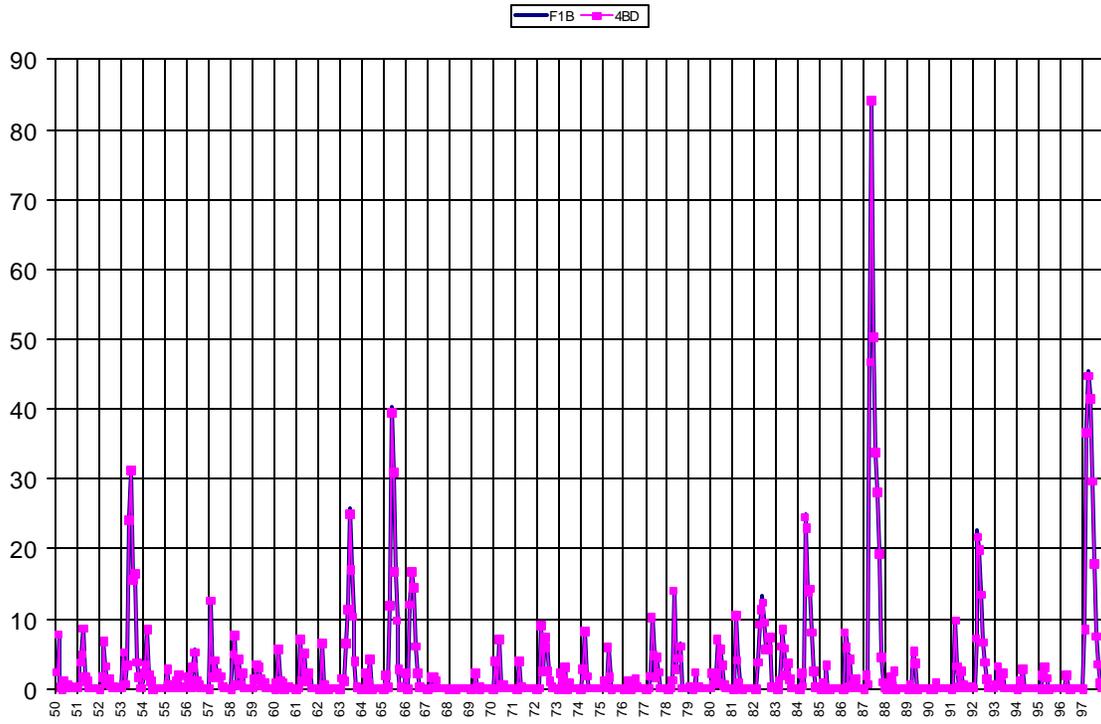
Diferencia porcentual caudal afluente tramo 10



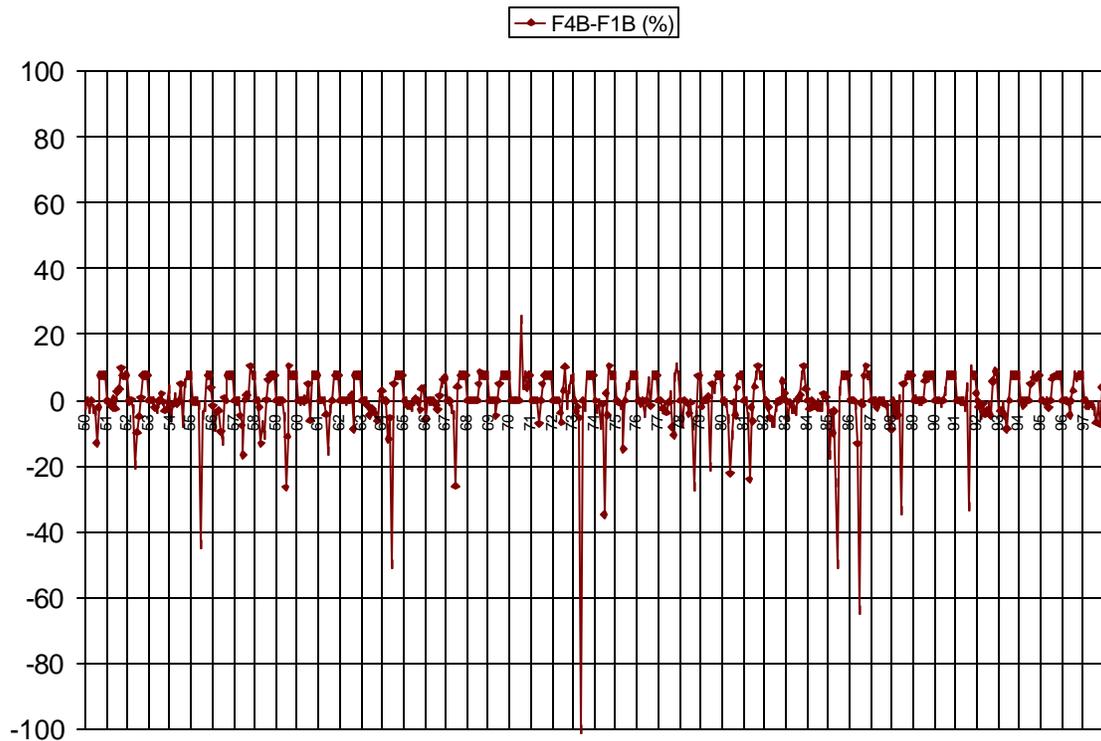
Caudal afluyente (m3/s) tramo 11



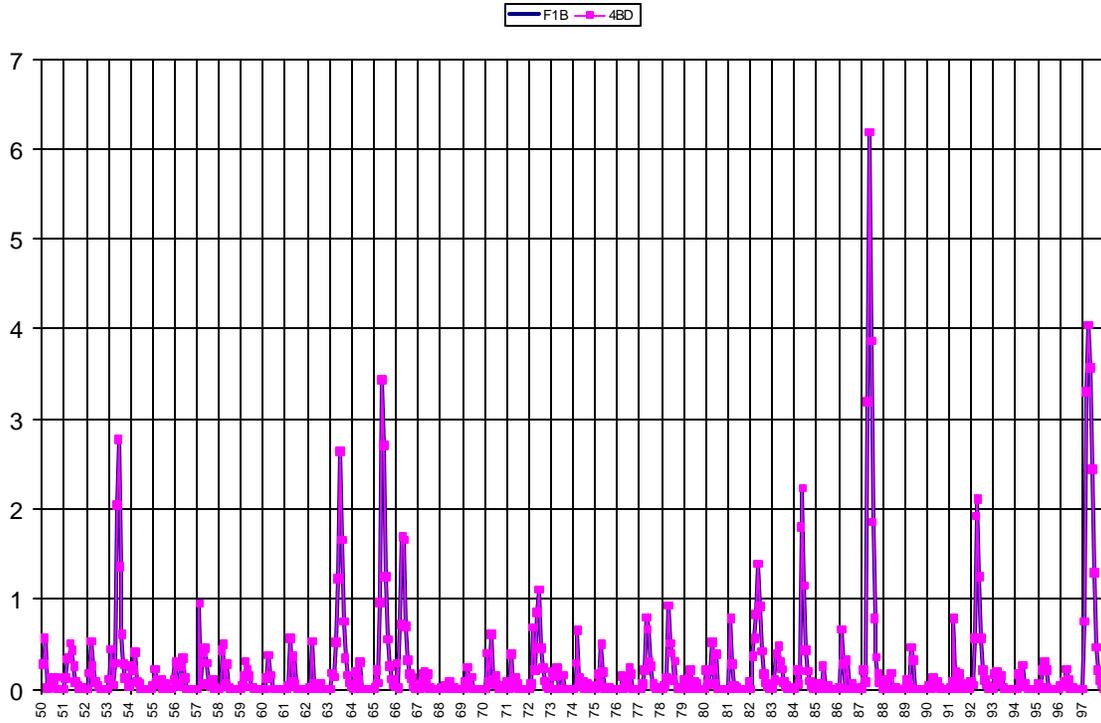
Caudal afluente (m3/s) tramo 12



Diferencia porcentual caudal afluente tramo 12



Caudal afluyente (m3/s) tramo 13



6.4. Análisis de la afección a las aguas superficiales

El análisis presentado hasta aquí muestra que el bombeo, aumentado desde el escenario F1B al escenario F4B, tiene efectos muy menores y tolerables sobre el acuífero (salvo en el sector 13, para el cual se determinó una situación intermedia entre F1B y F4B, hasta la cual puede expandirse el bombeo), y tiene también, como era de esperarse, algunos efectos sobre las aguas superficiales. En este subcapítulo se presenta un análisis enfocado a resumir y calificar los efectos detectados sobre las aguas superficiales. Para ello se aplicará las siguientes consideraciones:

1. Se considera que no existe afección a los caudales superficiales cuando el porcentaje de merma es menor que un 10%. Este criterio se justifica por el hecho de que el error esperable de medidas y simulaciones puede llegar al 10%.
2. La ocurrencia de mermas comprendidas en el rango de 10% a 50%, serán calificadas de la siguiente manera:
 - sin afección, si las mermas no superan el 5% del tiempo de riego, durante los 48 años.
 - con afección menor, si las mermas se observan entre el 5 y el 20% del tiempo de riego
 - con afección mayor si las mermas se observan entre el 20% y el 50% del tiempo de riego
 - con afección severa si las mermas se observan durante más del 50% del tiempo.
3. Finalmente, las mermas mayores o iguales al 50% serán consideradas de la siguiente manera:
 - sin afección, si no superan el 2% del tiempo de riego durante los 48 años de análisis
 - con afección menor, si se observan entre el 2% y el 5% del tiempo de riego
 - con afección mayor, si se observan entre el 5% y el 20% del tiempo de riego,
 - con afección severa en caso de superar el 20% del tiempo de riego.

El tiempo de riego se consideró comprendido entre octubre y abril de cada año, lo que corresponde a un universo de 336 meses (7 meses por 48 años).

El análisis de afección a los caudales superficiales se realiza sólo en los sectores del río del valle principal, ya que en los sectores de cabecera el caudal afluente no varía en función del escenario simulado.

Para esto y basado en los resultados del capítulo 6.3, se trabajó con los caudales afluentes a los nodos del río que representan el caudal pasante por el río.

Considerando como base el flujo superficial resultante del escenario F1B, se calcularon las diferencias tanto en caudal como en porcentaje relativo del escenario F4B en relación con el escenario F1B. A partir de aquí se clasificaron las afecciones en rangos de 10% a 50% y mayores que 50%. Las afecciones menores que 10% no se tomaron en cuenta.

Con esta información se confeccionó la siguiente tabla:

Tramos								
	T02	T03	T04	T06	T07	T08	T10	T12
N° meses afecciones entre 10 % y 50 %	5	36	12	13	10	68	15	6
% afección en relación al N° total de meses de riego	1,5%	10,7% Afección menor	3,6%	3,9%	3,0%	20,2% afección Menor/ mayor	4,5%	1,8%
N° meses afecciones mayores al 50%	0	0	1	4	4	4	0	0
% afección En relación al N° Total de meses De riego	0	0	0,3%	1,2%	1,2%	1,2%	0	0

De acuerdo con lo anterior, se concluye que en el escenario F4B, las afecciones al río serían, en la práctica, despreciables, con excepción de dos sectores:

- el sector 3, donde habría afección entre 10 y 50% del caudal durante el 10% del tiempo, lo que se califica como una afección menor, y
- el sector 8, donde habría afección entre 10 y 50% del caudal durante el 20% del tiempo de riego. Esta última se considera una afección mayor, aunque no severa.

7. BALANCE GLOBAL Y DE LOS ACUÍFEROS ESCENARIOS DE DERECHO

7.1. Balance Global

Para obtener una idea gruesa pero clara acerca de lo que ocurre con los recursos hídricos en el valle, se efectuó un balance hídrico global para el valle del Ligua, el cual presenta las siguientes características:

Tiene por entradas:

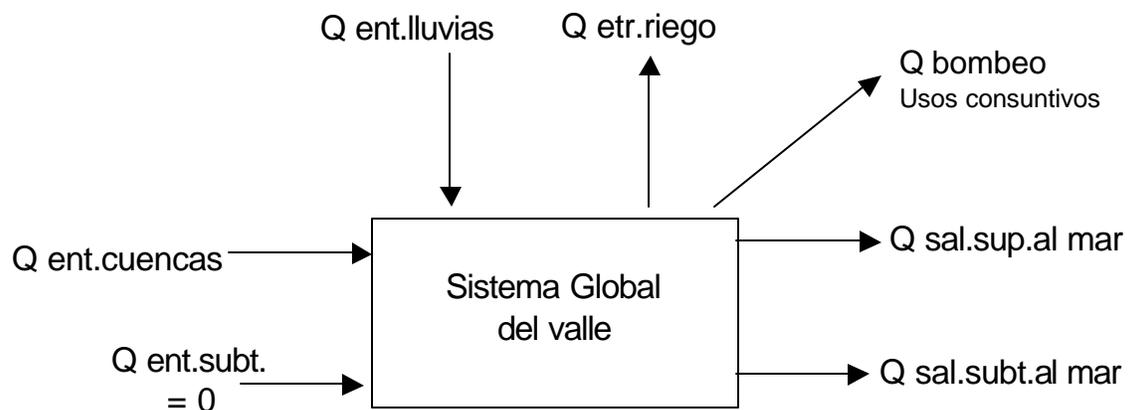
- Los caudales superficiales entrantes desde las cuencas de cabecera, más los caudales superficiales entrantes desde las cuencas aportantes de cada sector de riego.
- Los aportes de la lluvia directa sobre los sectores de riego
- Las entradas subterráneas que son = 0.

Tiene por salidas:

- La evapotranspiración desde los sectores de riego
- Las salidas superficiales al mar
- Las salidas subterráneas al mar
- Los bombeos que no son para riego, que se suponen consuntivos

La diferencia entre entradas y salidas representa las variaciones del almacenamiento, tanto en el suelo no saturado como en el acuífero.

A continuación se presenta un esquema del balance hídrico global del valle:



Los valores resultantes para los escenarios F1B y F4B son los siguientes:

Caudales del balance global, en l/s		
Item	Escenario F1B	Escenario F4B
Entradas		
Q entrada cuencas aportantes	4.091	4.091
Q aportes de lluvia	0.786	0.786
Q entrada subterránea	0.000	0.000
Total entradas	4.876	4.876
Salidas		
Evapotranspiración	1.487	1.520
Salida superficial al mar	2.800	2.739
Salida subterránea al mar	0.146	0.141
Uso Consumo	0.447	0.492
Total salidas	4.880	4.893
Variación de Almacenamiento.	-0.004	-0.016

En la tabla se observa que en ambas situaciones se obtiene una variación de almacenamiento negativa, lo que significa un vaciamiento del sistema de 4 l/s en el escenario F1B y 16 l/s en el escenario F4B como promedio para el período simulado. El hecho que se acentúe este vaciamiento en el escenario F4B, está determinado por el acuífero Jaururo, que colapsa frente a la explotación del escenario F4B.

7.2. Balance de los acuíferos

A continuación se presenta el balance de los acuíferos en los escenarios F1B y F4B.

Los componentes de este balance son los siguientes:

Entradas

- Caudal de entrada subterránea: se considera igual a cero en las cabeceras y afluentes, pero es distinta de cero en los demás sectores acuíferos. De hecho, en tales acuíferos, la entrada subterránea es igual a la salida subterránea del acuífero inmediatamente superior.
- Recarga: la recarga a los acuíferos se compone de tres partes:
 - recarga desde ríos
 - recarga desde sectores de riego y canales
 - recarga por infiltración de la lluvia

La suma de las tres constituye la recarga potencial o disponible para cada sector acuífero.

Salidas

- bombeos,
- salidas subterráneas y
- vertidos.

Los vertidos incluyen las aguas en exceso, es decir, aquella parte de la recarga que no puede entrar al acuífero cuando éste está “lleno”.

En las tablas a continuación, se presentan los balances completos promedio de todo el período de análisis, para cada acuífero, y para el acuífero completo de todo el valle, de las simulaciones según derechos, que son los escenarios F1B y F4B.

En una columna adicional, se presentan los caudales superficiales afluentes a cada tramo, para registrar la variación que ellos sufren entre un escenario y otro.

Balance de los sectores acuíferos y del acuífero completo, en m3/s

Escenario F1B

Acuífero	Entradas subterráneas	Percolación Río	Percolación Lluvia	Percolación Riego	Total Recargas	Total Entrada	Salidas Subterráneas	Vertidos	Bombeos	Total Salidas	Caudal afluente
1	0.000	0.025	0.027	0.150	0.202	0.202	0.123	0.079	0.000	0.202	1.613
2	0.123	0.032	0.032	0.214	0.278	0.401	0.261	0.104	0.036	0.401	1.843
3	0.261	0.037	0.030	0.224	0.291	0.552	0.284	0.092	0.176	0.552	1.753
4	0.284	0.032	0.018	0.098	0.148	0.432	0.206	0.131	0.095	0.432	1.602
5	0.000	0.032	0.015	0.050	0.097	0.097	0.027	0.050	0.020	0.097	0.740
6	0.233	0.032	0.018	0.096	0.146	0.379	0.166	0.001	0.216	0.383	2.402
7	0.166	0.085	0.036	0.169	0.290	0.456	0.120	0.065	0.271	0.456	2.381
8	0.120	0.035	0.022	0.101	0.158	0.278	0.175	0.046	0.057	0.278	2.346
9	0.000	0.022	0.008	0.020	0.050	0.050	0.016	0.004	0.030	0.050	0.372
10	0.192	0.016	0.039	0.148	0.203	0.395	0.117	0.002	0.286	0.405	2.668
11	0.000	0.001	0.001	0.003	0.005	0.005	0.005	0.000	0.000	0.005	0.057
12	0.123	0.021	0.060	0.129	0.210	0.333	0.141	0.069	0.123	0.333	2.679
13	0.000	0.003	0.016	0.059	0.078	0.078	0.005	0.008	0.065	0.078	0.219
Acuífero completo	0.000	0.373	0.322	1.461	2.156	2.156	0.146	0.651	1.375	2.172	
										Balance Acuífero	-0.016

Balance de los sectores acuíferos y del acuífero completo, en m3/s

Escenario F4B

Acuífero	Entradas subterráneas	Percolación Río	Percolación Lluvia	Percolación Riego	Total Recargas	Total Entrada	Salidas Subterráneas	Vertidos	Bombes	Total Salidas	Caudal afluente
1	0.000	0.025	0.028	0.151	0.204	0.204	0.122	0.069	0.013	0.204	1.613
2	0.122	0.032	0.034	0.228	0.294	0.416	0.253	0.068	0.095	0.416	1.843
3	0.253	0.037	0.030	0.230	0.297	0.550	0.279	0.082	0.190	0.551	1.748
4	0.279	0.032	0.018	0.098	0.148	0.427	0.205	0.126	0.095	0.426	1.591
5	0.000	0.032	0.018	0.071	0.121	0.121	0.021	0.015	0.085	0.121	0.740
6	0.227	0.032	0.018	0.100	0.150	0.377	0.140	0.000	0.242	0.382	2.368
7	0.140	0.084	0.035	0.165	0.284	0.424	0.115	0.057	0.252	0.424	2.342
8	0.115	0.035	0.022	0.099	0.156	0.271	0.168	0.040	0.064	0.272	2.290
9	0.000	0.022	0.008	0.019	0.049	0.049	0.017	0.004	0.028	0.049	0.372
10	0.185	0.015	0.039	0.150	0.204	0.389	0.118	0.003	0.279	0.400	2.615
11	0.000	0.001	0.001	0.003	0.005	0.005	0.005	0.000	0.000	0.005	0.057
12	0.123	0.021	0.060	0.127	0.208	0.331	0.139	0.059	0.134	0.332	2.631
13	0.000	0.003	0.017	0.064	0.084	0.084	0.003	0.001	0.092	0.096	0.219
Acuífero completo	0.000	0.371	0.328	1.505	2.204	2.204	0.142	0.524	1.569	2.235	
Balance Acuífero										-0.031	

En las tablas antecedentes se puede observar que el aumento de bombeo en los diferentes acuíferos tiene un efecto menor sobre los flujos subterráneos entre los acuíferos, pero genera una reducción de los vertidos dentro de cada uno de los sectores.

Por otro lado, se observa que, a medida que aumenta el bombeo, aumentan también las recargas. Sin embargo, el aumento de las salidas por bombeo es mayor, de modo que de todas maneras hay una mayor exigencia hacia el acuífero.

Cabe hacer hincapié en el siguiente hecho:

En el balance para el acuífero completo, las cifras de las entradas y salidas subterráneas no corresponden a la suma de los valores de todos los acuíferos. Las entradas subterráneas al acuífero son cero (suma de las entradas en las cabeceras), y las salidas son la suma de los caudales subterráneos de salida de los sectores 12 y 13, que en el modelo son los que salen al mar.

El balance del acuífero completo muestra que en el escenario F1B, el acuífero se vacía a razón de 16 l/s, mientras que en el escenario F4B se vacía a razón de 31 l/s.

Para el escenario F1B, la cifra no es significativa, pues la tendencia es siempre a la recuperación. En el escenario F4B, el responsable de esta baja es el acuífero Jaururo, puesto que en los demás sectores, los niveles vuelven prácticamente a su punto de partida, sin excepción, y los caudales de salida igualan a los de entrada en el período considerado. El acuífero 13 es el único en el cual las salidas superan significativamente las entradas, hecho que genera la desestabilización que se observa en los gráficos del capítulo 6.1.1.

8. CONCLUSIONES

Del análisis desarrollado para los escenarios de derechos F1B y F4B, se puede concluir lo siguiente:

1. El aumento de demanda entre los escenarios F1B, derechos otorgados a diciembre de 1995, y el escenario F4B, derechos comprometidos a marzo del 2001, no es significativa: aumenta de 1375 l/s a 1569 l/s efectivos, y se concentra en los sectores 2, 5 y 13 del modelo MOS.
2. En relación con el escenario de referencia H00, sin bombeo, y los escenarios de explotación (Anexo A3), se observa que las sequías hidrológicas tienen un efecto sensible sobre el volumen almacenado en los sectores acuíferos 1 y 2, cuyos niveles reflejan el efecto de la hidrología. El resto de los sectores de cabecera de la cuenca, sectores 5, 9, 11 y 13 presentan variaciones casi imperceptibles correspondientes a la hidrología. Por su parte los sectores del valle central se observan a máxima capacidad durante todo el período de simulación, es decir, no reflejan bajas en función de la hidrología. Por lo tanto, en los sectores 3 al 13, la reducción del volumen almacenado que se observa en los escenarios con bombeo, es fundamentalmente atribuible a la explotación. A medida que se intensifica la explotación, aumenta el efecto sobre el acuífero, especialmente en períodos de sequía.
3. En relación con el efecto del bombeo sobre el volumen de los acuíferos, se puede decir que, en general, los acuíferos 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11 y 12 no presentan variaciones de nivel importantes entre los escenarios F1B y F4B. Las variaciones que se generan son producto de la explotación y de las sequías. Además, algunos acuíferos son pequeños, por lo que tienden a ser más sensibles frente a las explotaciones, pero en general, vuelven a recuperarse, y no mantienen una tendencia a la baja en sus niveles.

El acuífero 5, estero Los Ángeles, casi no afectado en el escenario F1B (la explotación era muy pequeña) presenta variaciones de volumen de hasta 2 m³/s/mes (25% de su capacidad total) en el escenario F4B, pero también vuelve a recuperarse. El acuífero 6 tiene variaciones pequeñas con respecto al escenario F1B, pero en este último ya presentaba grandes variaciones de su volumen almacenado y de niveles. No obstante, también presenta una tendencia a la recuperación. El acuífero 10 es uno de los acuíferos más afectados por la explotación, pero ya sufría fuertes bajas de volumen almacenado en el escenario F1B. Para el caso del acuífero 13, afluente Jaururo, éste presenta una alta sensibilidad frente a los usos actuales del recurso (escenario F1B) y frente a las condiciones hidrológicas. Para el escenario de bombeo F4B, de 92 l/s efectivos, la explotación no es sustentable.

4. El acuífero del estero Jaururo (Sector 13), en el que la demanda por derechos suma un total de 92 l/s efectivos en el escenario F4B, se ve sobreexplotado en esta condición. Los 65 l/s efectivos constituidos hasta Diciembre 1995 sólo debieran aumentar hasta 70 l/s efectivos para mantener un acuífero viable en este valle. El caudal de 92 l/s generaría el agotamiento irreversible del acuífero en un plazo de 10 años.
5. De todos los demás sectores acuíferos, el más exigido por los derechos a marzo 2001 con respecto al escenario de derechos a diciembre de 1995 es el del valle de Los Ángeles (sector 5). No obstante, la explotación asumida de estos derechos resulta sustentable.
6. De acuerdo con lo anterior, se tiene que el acuífero del Ligua admite los caudales efectivos de bombeo a que fue sometido en el escenario F4B, y que son los siguientes:

Zona	Sector	Total Der. Efectivos l/s
1	1	13
	2	95
	3	190
2	4	95
4	5	85
3	6	242
	7	252
	8	64
	9	28
	10	279
	11	0
	12	134
13	70	
Total		1547

Los acuíferos del Ligua, salvo el sector Jaururo, que es el único que resulta restringido bajo este análisis, tolerarían aún una explotación mayor, la que quedaría limitada por las eventuales afecciones superficiales.

7. El efecto del aumento del bombeo sobre los caudales captados por los canales, se considera menor, considerando los gráficos de caudal y diferencias porcentuales presentados en el subcapítulo 6.1.2. El bombeo tiene efectos en ambos sentidos sobre los caudales disponibles para ser captados por los canales, ya que se producen aumentos y mermas. Los tramos más afectados por las mermas, en general se viven en invierno, fuera de la temporada de riego, siendo el tramo más afectado por las mermas, dentro de la temporada de riego, el tramo 8, con una merma casi sistemática de hasta 15% en algún mes de la temporada de riego. Las mermas de los tramos 2 y 3 se consideran poco importantes.
8. Sólo es posible realizar el análisis de afección a los caudales superficiales en los sectores del río del valle principal, ya que en los sectores de cabecera, como es el caso de la zona 4 (Sector 5, Estero Los Angeles), se tiene siempre el mismo caudal afluente independiente del escenario simulado.
9. Acerca del efecto del aumento de bombeo sobre los caudales en el río, se puede decir que en general, y observando sólo la temporada de riego, los efectos de reducción pueden calificarse de despreciables, porque son muy bajos, o porque el efecto de reducción ocurre en pocas oportunidades. Lo anterior es válido para todos los sectores, salvo dos: en el sector 3, hay efectos de alrededor de un 20%, aunque ocasionalmente menores o mayores, durante el 10% de los meses de la temporada de riego, y en el sector 8, hay reducciones de 15%, y ocasionalmente mayores, durante el 20% de los meses de la temporada de riego.
10. No obstante lo anterior, en el acuífero de Los Ángeles, Sector 05, las explotaciones del escenario F4B podrían generar efectos locales de merma sobre las aguas superficiales, puesto que están ligados a descensos de unos 15 m en sequías.