



**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**ANÁLISIS DE LOS POSIBLES IMPACTOS  
POR EXTRACCIÓN DE AGUA  
EN EL ACUÍFERO DE CALAMA.  
SEGUNDA REGION**

**REALIZADO POR:**

**DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION**

**S.D.T. N° 216**

**Santiago, Junio de 2005**

Carlos Salazar M  
Ingeniero Civil  
Jefe Dpto. Estudios y Planificación

Luis Rojas Badilla  
Ingeniero Civil  
Dpto. Estudios y Planificación

## 1. INTRODUCCIÓN

En el acuífero de Calama se han constituido a junio 2005 derechos de agua subterránea por un total de 594 l/s, de los cuales sólo 242,8 l/s se encuentran actualmente en ejercicio, iniciando su explotación a partir del año 2001. De estos, 207,8 l/s pertenecen a la Compañía Contractual Minera Leonor y los 35 l/s restantes a la Compañía Minera Lomas Bayas, según se detalla en cuadro siguiente:

Pozo	Caudal (l/s)	Titular	Res. DGA		
			N°	Fecha	Tipo
PPR-5	50	Compañía Contractual Minera Leonor	319	11.07.1995	Constitución
PPR-2	47	Compañía Contractual Minera Leonor	322	11.07.1995	Constitución
PPR-3	45	Compañía Contractual Minera Leonor	219	13.02.1998	Constitución
N°21	65.8	Compañía Contractual Minera Leonor	55	26.01.2001	Cambio punto de Captación
CMG-1	35	Compañía Minera Lomas Bayas	981	24.12.1999	Constitución

Las resoluciones 319, 322 y 55 identificadas en el cuadro anterior, contienen dentro de su parte resolutive la indicación de que “el derecho se ejercerá de modo de evitar daños en las vertientes del sector”.

En este marco se visto la necesidad de efectuar un análisis de la situación actual del acuífero, en consideración a que los caudales de las vertientes del sector, y principalmente la vertiente Opache, han presentando durante los últimos dos años una tendencia sostenida a la disminución. Específicamente se hace necesario analizar si la tendencia observada es producto de las extracciones de agua o si se trata de una condición natural dentro del balance del acuífero.

Por otra parte, de constatarse que la disminución de caudales en las vertientes es producto de la explotación actual del acuífero, se ha solicitado también la indicación de las medidas administrativas correspondientes para rectificar dicha situación. Lo anterior, considerando que en un escenario futuro se agregarán a la explotación actual la totalidad de las extracciones autorizadas, más los eventuales efectos producto del drenaje del acuífero asociado al proyecto minero "Mansa Mina", actualmente en evaluación ambiental.

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El presente informe tiene como objetivo general realizar una evaluación de la situación actual del acuífero de Calama, tendiente a establecer si las extracciones de agua autorizadas y actualmente en operación, han producido una disminución de los caudales de las vertientes del sector.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Análisis del comportamiento de las vertientes
- Desarrollo y aplicación de una modelación hidrogeológica mas detallada

## 3. ANTECEDENTES CONSIDERADOS

Para la realización del presente informe se ha tenido en consideración los siguientes antecedentes:

- ORD. N° 144 de la DRA, II Región, de fecha 11-02-2005
- Antecedentes de Monitoreo de Pozos, RCA 0298-2001, CMLB
- Informe Técnico, "Análisis de Monitoreos Presentados por CCML", Departamento de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos, junio-2004.
- Antecedentes e informe de análisis de Monitoreo de Pozos, Res DGA, N° 315, 316, 319 y 322 de julio-1995, CCML, 27.01.2005
- Antecedentes de Caudales de Aforos, BNA, DGA

Informe Técnico DGA SIT N° 85, "Evaluación de los Recursos Hídricos, Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa", mayo 2003.

#### 4. ANÁLISIS

##### 4.1 Estadística Hidrológica

Un primer análisis de la situación consultada se relaciona con la condición de balance natural del acuífero en relación con la oferta hidrológica del sector y en el período en cuestión. Para ello en el gráfico N°1, se han *ploteado* simultáneamente el caudal medio móvil de 12 meses, tanto de la estación de control fluviométrico DGA "Loa en Yalquincha", como la secuencia de aforos mensuales de la vertiente Opache en la estación de control ENAEX. Ambas estaciones pertenecen a la red de monitoreo de la DGA y son representativas de la condición de estado natural del acuífero de Calama, la primera, porque representa la oferta hidrológica al ingreso del sector, y la segunda, la condición de descarga del acuífero.

A pesar que el registro de la estación de control fluviométrico río Loa en Yalquincha se interrumpe en el período entre febrero del 2001 y abril del 2002, para los efectos del análisis se asume que al menos durante ese período, la oferta hidrológica se mantiene en un nivel similar al período inmediatamente anterior, lo cual es una aproximación conservadora considerando los aportes de las crecidas ocurridas durante ese intervalo. A partir de lo anterior, una revisión de ambas tendencias nos permite verificar que existe una diferenciación de comportamientos, ya sea se trate del período anterior o posterior al año 2001. En el período previo ambas tendencias son al aumento, y en el período posterior sólo el promedio móvil de la vertiente Opache muestra una disminución, alcanzando valores incluso inferiores a los observados en todo el período de registro. Evidentemente este comportamiento puede tener relación con diversos factores, entre los cuales se identifican principalmente los siguientes:

- a.) Una disminución sostenida de las recargas al acuífero (infiltraciones desde el río, recargas de riego).

- b.) El inicio de la explotación intensiva del acuífero superior a partir del año 2001.
- c.) Un período transiente entre la recarga y la descarga del acuífero mayor al período de registro disponible para su análisis.

De acuerdo con lo anterior, podría entonces tratarse del efecto conjunto de más de uno de estos factores, interviniendo individualmente con mayor o menor importancia. En este sentido, en adelante, el análisis de los antecedentes tomará en consideración cada uno de estos factores.

Como se ha indicado, la DGA mantiene un registro de aforos mensuales de la vertiente Opache en la estación de control ENAEX desde octubre de 1997, por su parte y en este mismo sector, la CCML también mantiene un registro mensual de aforos a partir de enero del 2000. La importancia de este sector radica en que el caudal medido corresponde al total de aporte por concepto de esta vertiente al río San Salvador, no existen antecedentes que permitan inferir mayores aportes por afloramiento bajo la cota de esta estación. Un primer análisis permite observar que existe una significativa diferencia entre ambas series registros. Partiendo de la hipótesis que no existe sesgo en la medición de cada serie, la comparación de los caudales medidos en un mismo mes tendrán que estar necesariamente correlacionados.

Para efecto de comprobar esta hipótesis se confeccionó la figura N° 2, a partir del cual se puede concluir que no existiría una correlación significativa entre ambas series, más bien existe un quiebre de tendencia entre los registros previos y posteriores al inicio de la explotación. En otras palabras, existe por parte de la serie de CCML, una menor estimación de los caudales hasta antes del inicio de la explotación, y una mayor, durante el período de operación con respecto de la serie de la DGA. A la luz de estos resultados se estima inconveniente combinar ambos registros mientras no exista una claridad respecto de las posibles fuentes de error existentes.

En adelante, el análisis estará basado íntegramente en la serie de aforos de la DGA, considerando que ésta corresponde a una medición oficial, posee un mayor

registro de datos, y porque ha sido obtenida en su totalidad por un equipo de técnicos especialistas calificados.

La serie de aforos mensuales de la DGA en la estación de control ENAEX, como se indicó anteriormente, posee a la fecha un número de 89 registros. En la figura n° 3 se puede observar el total de esta serie, en conjunto con la media acumulada y el promedio móvil de 12 meses, se ha indicado también el número de aforo a partir del cual es iniciada la explotación.

Desde un punto de vista estadístico es factible iniciar el análisis de la serie completa bajo la hipótesis de que se trata de valores no influenciados por las extracciones, para ello, y tratándose de una serie hidrológica con valores distintos de cero y sin grandes fluctuaciones, se ajustará a una distribución del tipo Normal. Cabe señalar que se trata de un criterio bastante conservador, puesto que de considerarse sólo el período anterior a la explotación, necesariamente se requeriría un ajuste distinto a la distribución Normal debido a que la distribución de frecuencias estaría desplazada hacia los valores mayores, considerando que se trata de un período de aumento en el caudal medio acumulado. En una distribución Normal, el aumento del número de registros permite mejorar la definición de la distribución de frecuencias, situación que se traduce principalmente a través de un mejoramiento del coeficiente de asimetría del ajuste. En la figura N° 4, se ha planteado la evolución del coeficiente de asimetría en función del número de registros con el objeto de identificar un cambio en el comportamiento general de la serie.

De la figura indicada se desprende que existe un quiebre en el ajuste a la distribución normal a partir de la medición número 85, correspondiente a octubre del 2004. Para verificar que dicho quiebre corresponda efectivamente al ingreso de mediciones fuera de la distribución normal se han confeccionado los gráficos 5 y 6. En ellos se indica el resultado del ajuste hasta la medición número 85 y como afecta el ingreso de las últimas 4 mediciones. En otras palabras, estadísticamente se puede observar que las últimas cuatro mediciones se encuentran fuera del

rango de confiabilidad asociada al 95% de la distribución normal previamente ajustada.

Cabe señalar, que el resultado estadístico anteriormente señalado no significa que los caudales de la vertiente OPACHE no estén influenciadas con anterioridad a octubre del 2004, sino que, corresponde al resultado de considerar como hipótesis inicial una distribución Normal para la serie completa.

#### 4.2 Análisis de correlaciones

Se dispone de un número significativo de registros piezométricos mensuales, iniciados a partir de 1993, en pozos de observación situados en las cercanías de los pozos de explotación de la CCML. Estos pozos, denominados LE, tienen una ubicación referencial según la figura N° 7. De estos registros se ha seleccionado la evolución piezométrica del pozo LE-4, ubicado aguas debajo del conjunto de pozos de producción, para identificar alguna tipo de relación entre la variable caudal de la vertiente Opache y descenso piezométrico. Para ello se ha considerado distintas series de datos, que van desde la comparación entre los registros individuales de ambas variables en el mismo mes, hasta el promedio de 12 meses de ambas series desfasadas en 12 meses, es decir, considerando que una variación piezométrica media de un determinado número de meses, puede estar relacionada con una variación media en el caudal de la vertiente, y que por cierto podría darse con un cierto grado de desfase. En la tabla N° 1 se presenta la matriz resultante de aplicar esta metodología, y en ella se han marcado con color rojo aquellas correlaciones que tuvieron un grado de ajuste  $r^2$  igual y superior al 0.9 .

Cabe señalar que cada fila de la matriz es el resultado del ajuste de un mismo número de datos, y que necesariamente éste va disminuyendo hacia abajo en la matriz debido a que se aumenta el período promediado, así para la primera fila se comparan los 86 registros mensuales de la vertiente y para la última los 7 promedios anuales disponibles. Si bien, existe el riesgo de que exista un aumento artificial del ajuste relacionado con el menor número de pares de datos, los

resultados de la matriz arrojan el mejor ajuste en una situación intermedia que corresponde a la serie de promedios de 10 meses, con desfase de 8 meses. Estos resultados estarían indicando que existiría una fuerte correlación entre el promedio de la evolución piezométrica de 10 meses en el pozo LE-4 con el caudal promedio de 10 meses de la vertiente ojos de Opache ocho meses después. Ver figura N° 8.

De acuerdo con los resultados anteriores, es posible desestimar la alternativa c) como uno de los factores que intervienen en la disminución de caudales de la vertiente Opache, debido a que claramente corresponde a un anomalía que se produce dentro del período de registro y porque existe una fuerte relación entre la variación piezométrica de los pozos de observación con los caudales de la vertiente. Más aún, existiría un desfase medio entre ambas situaciones de sólo algunos meses, indicando que las conductividades hidráulicas en el sentido del flujo subterráneo serían mucho mayores a las estimadas en evaluaciones previas, y más de acuerdo con las características cársticas del acuífero superior. Evidentemente en este tipo de acuíferos no es aplicable la estimación de radios de influencia mediante metodologías desarrolladas sobre medios isotrópicos, por cuanto el cono de depresión se extiende preferencialmente en el sentido del flujo subterráneo, propagándose tan rápidamente cuanto mayor es la conductividad hidráulica del medio cárstico. El volumen almacenado o la porosidad efectiva pasa a tener un rol secundario en la evaluación de la disponibilidad de recursos de largo plazo, principalmente porque frente a cualquier explotación el sistema busca rápidamente su equilibrio sobre la base de la escorrentía subterránea, disminuyendo las descargas naturales del acuífero como vertientes, evapotranspiración y flujo subterráneo de salida. De esta misma manera, un cambio en las condiciones de recarga, como un cambio en los patrones de riego, también producirá rápidas modificaciones en las descargas del acuífero.

De acuerdo con lo anterior, determinar el grado de impacto de las extracciones de agua sobre las descargas del acuífero es una tarea compleja, más aún, cuando la información existente no permite reproducir en su totalidad las condiciones transientes del acuífero en el período en cuestión, específicamente en lo relativo a

las condiciones de recarga. Más aún cuando la herramienta de modelación actualmente disponible en la DGA, el código VISUAL MODFLOW, tiene limitaciones para la representación de acuíferos cársticos.

No obstante lo indicado anteriormente, y bajo supuestos que se detallarán en su oportunidad, en la sección siguiente se describe el trabajo de modelación desarrollado con el objeto de realizar una evaluación general del sistema y su respuesta a la explotación en una condición de balance promedio.

## 5. Modelación Hidrogeológica del Acuífero de Calama.

Para el presente trabajo de modelación hidrogeológica se ha tomado como base el Informe Técnico DGA SIT N° 85. En éste se propuso la modelación del sistema mediante el código MODFLOW, contando para ello con toda la información hidrológica e hidrogeológica disponible hasta el año 2002, logrando establecer claramente la geometría y distribución de los dos acuíferos y el acuitardo medio que conforman el sistema hidrogeológico de Calama, sin embargo, en esa oportunidad no se dispuso de suficiente data de monitoreo piezométrico de respuesta a las explotaciones de agua iniciadas a partir del año 2001, por lo que la representación del sistema cárstico y del acuífero confinado inferior no fue posible efectuarla y se optó por una representación equivalente del sistema.. Actualmente dicha información se encuentra disponible gracias a que fue generada por CCML y por CMLB en los años siguientes. La nueva información ha permitido reevaluar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema permitiendo una modelación matemática con un mayor nivel de detalle que el original.

### *5.1 Principales modificaciones al modelo conceptual*

Conforme a los nuevos antecedentes, el modelo conceptual sobre el funcionamiento del sistema posee las siguientes modificaciones respecto del Informe Técnico DGA SIT N° 85.

- El acuífero inferior posee un fuerte confinamiento y una altura de carga inferior en 20 metros aproximadamente con respecto al acuífero superior. Esta diferencia de altura corresponde a una situación de equilibrio establecida por la pérdida de carga de un flujo vertical de recarga desde el acuífero superior. En condiciones de equilibrio, esta diferencia de altura piezométrica es interpretada como una desconexión hidráulica, por cuanto no existiría recarga desde el acuífero superior y las líneas de flujo serían paralelas.
- La escorrentía subterránea por el acuífero inferior es mínima con respecto al acuífero superior. Prácticamente toda la escorrentía renovable circula por el acuífero superior y descarga a través de las vertientes, la evapotranspiración y como recuperaciones en el río Loa. Esto confirmaría el alto contenido de sales en la napa del acuífero inferior, que habría llegado a su estado de sobresaturación debido a su larga residencia e interacción con los sedimentos salinos.
- El acuífero superior posee características anisotrópicas de origen cárstico, con conductividades hidráulicas en dos y tres ordenes de magnitud superiores en el sentido del flujo subterráneo, salvo en los sectores con riego intensivo en donde la conductividad hidráulica es alta pero isotrópica.

## *5.2 Modelación en Régimen Estacionario*

Aplicadas las modificaciones impuestas por el nuevo modelo conceptual, en las figuras N° 9 y 10 se indican los resultados de la calibración de la modelación en régimen estacionario, las constantes elásticas y las condiciones de borde determinadas para cada uno de los acuíferos del sistema.

En el cuadro siguiente se señalan los flujos de entrada y salida del balance arrojadas por la modelación en régimen estacionario.

		REGIMEN ESTACIONARIO
	Componentes de Flujo	
ENTRADAS (l/s)	INFILTRACION LOA	110
	RECARGA RIEGO	320
	ENTRADAS SUBT	546
SALIDAS (l/s)	RECUPERACION LOA	248
	SALIDAS SUBT	47
	SALIDAS DRENES	539
	ET	142
	Recuperación Neta río Loa	138

Las diferencias más significativas respecto del modelo anterior corresponden a las entradas y salidas subterráneas, siendo inferiores en 200 l/s y 400 l/s respectivamente. No obstante cabe señalar que parte de la disminución de las salidas subterráneas (200 l/s) corresponden al aumento de la salida de drenes por concepto de la vertiente Opache principalmente, por lo que la disminución efectiva en la escorrentía subterránea corresponden a los 200 l/s que dejan de ser recarga subterránea del sistema.

A partir de estos resultados se realiza la calibración en régimen transiente incorporando el bombeo de los pozos de extracción de agua, cuyos resultados se indican en las figuras N° 11 y 12.

El ajuste obtenido en ambos casos es significativamente superior al logrado con el modelo conceptual anterior, aún considerando que se han agregado mayor número de pozos de observación en el acuífero inferior y la mayor cantidad de datos en los pozos de observación monitoreados por CCML a la fecha.

Las pequeñas diferencias observadas en la evolución de los pozos afectados por las extracciones del acuífero superior, son atribuibles a que la situación real difiere con las condiciones medias impuestas en el balance del sistema, como por ejemplo, es esperable que las recargas reales por concepto de riego hayan sido superiores a la recarga media supuesta en los años 2001 y 2002, debido a que se contó con gran disponibilidad de agua en el río Loa, amortiguando con esto la

caída piezométrica en esos años. No obstante lo anterior, la modelación nos entrega un marco general del comportamiento del sistema a partir del cual se pueden extraer los siguientes resultados:

- Las extracciones de agua efectuadas en el acuífero superior, rápidamente producen modificaciones en las descargas del sistema. El almacenamiento juega un rol secundario debido a las características cársticas del acuífero que busca su equilibrio sobre la base de la disminución de la esorrentía subterránea. En la figura N° 13 se observa la disminución media que se produce en las vertientes del sector producto de las extracciones de agua.
- De acuerdo con lo anterior, una modificación en los patrones de recarga en el riego también produce rápidas modificaciones en las descargas del acuífero, sin embargo, la cuantía de los caudales que efectivamente disminuyen en las vertientes por concepto de una disminución de 50Há de riego apenas alcanzan los 5 l/s. Esta comparación puede observarse en la Tabla N° 2, en donde se ha simulado en régimen estacionario ambos escenarios. La mayor pérdida es asumida por una disminución en la evapotranspiración.

## 6. SITUACIÓN ADMINISTRATIVA

Tal como se indico en la introducción del presente informe, las resoluciones DGA N° 319 y 322 de 1995 constituyeron derechos de agua por 50 y 47 l/s a CCML, en los pozos PPR-5 y PPR-2 respectivamente. Estas resoluciones dentro de su parte resolutive contienen la indicación que “el derecho se ejercitará de modo de evitar daños en las vertientes del sector”. La indicación precedente también es parte de la resolución DGA N° 55 del 2001, que autoriza el cambio de punto de captación de 17.5 y 48.3 l/s desde los pozos PPR-1 y PPR-4 respectivamente, al pozo P-21, todos pertenecientes a CCML. Por otra parte, CCML mantiene en operación el pozo PPR-3, con derechos constituidos por 45 l/s mediante resolución DGA N° 219 de 1998, la cual fue ejecutoriada por resolución judicial sin incluir indicación alguna respecto de las vertientes del sector.

Adicionalmente, CCML mantiene compromisos ambientales adquiridos mediante la resolución exenta COREMA II REGIÓN N° 31 de 1997, que aprueba ambientalmente el proyecto “El Tesoro”, en la cual se autoriza la explotación de 140 l/s de agua desde los pozos anteriormente señalados, considerando que la extracción se traducirá en una reducción poco significativa del embalse subterráneo (pág.5-16 EIA original)”. No obstante se establecen las siguientes medidas de mitigación en el caso que se viera afectada la vertiente Ojos de Opache:

- Explotar los 5 pozos (posteriormente se reducen a 4 por cambio de punto de captación) a una tasa no superior al 70% del caudal autorizado o en un extremo disminuir o suprimir la extracción del pozo PPR-3.
- Construir un nuevo pozo en reemplazo de PPR-3, que tenga un radio de influencia menor, de tal manera, que no afecte a la vertiente Ojos de Opache.

El agua que actualmente consume MET alcanza a 95 l/s, valor cercano al 70% del caudal autorizado, por lo que esa medida mitigatoria no tendría mayores beneficios en el escenario actual. Por otro lado, la construcción de un nuevo pozo, de acuerdo a las características cársticas del acuífero superior tampoco tendría los efectos esperados.

De acuerdo con lo anterior, se está frente a un escenario en donde a pesar de que la explotación alcanza un 70% del caudal autorizado se detecta una reducción significativa del caudal en las vertientes, por lo cual las medidas de mitigación propuestas en el EIA no parecen resultar efectivas. Administrativamente, y desde el punto de vista ambiental cabe analizar la ocurrencia de impactos ambientales no previstos en el EIA, asumiendo las acciones necesarias para controlarlos y mitigarlos. Por otra parte, y desde el punto de vista de las resoluciones que constituyen los derechos de agua, con la disminución de los caudales de las vertientes producto de las extracciones se debe analizar si se configura un impacto sobre derechos de agua de terceros, de ocurrir debe tomarse las acciones y medidas tendientes a subsanar dicha situación.

Cabe señalar que un incremento de los niveles de extracción de agua provocará proporcionalmente mayores efectos sobre los caudales de las vertientes, debido a que la amortiguación producida por la evapotranspiración será cada vez menor.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .

- A partir del análisis estadístico de la serie de caudales de aflujos de la vertiente Opache en la Estación de control ENAEX, se concluye que a partir de Octubre del 2004, las mediciones se encuentran fuera del rango estadísticamente esperable de la serie estadística, considerando un 95% de confiabilidad.
- La tendencia observada en los caudales de la vertiente Opache, se encuentran estrechamente correlacionados con la evolución piezométrica del pozo de observación L-4, ubicado aguas abajo del campo de pozos de extracción.
- De acuerdo con lo anterior, las extracciones de agua que CCML realiza en el acuífero superior de Calama, están produciendo efectos perceptibles y cuantificables en la vertiente Opache.
- La información piezométrica actualizada permite asumir que el modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrogeológico de Calama debe ser actualizado para que se pueda representar de mejor forma el efecto de las extracciones desde el acuífero superior.
- Un modelo conceptual actualizado del funcionamiento del sistema hidrogeológico de Calama ha sido propuesto de acuerdo con los siguientes argumentos:
  - El acuífero inferior posee un fuerte confinamiento y una altura de carga inferior en 20 metros aproximadamente con respecto al acuífero superior.

Esta diferencia de altura corresponde a una situación de equilibrio establecida por la pérdida de carga de un flujo vertical de recarga desde el acuífero superior. En condiciones de equilibrio, esta diferencia de altura piezométrica es interpretada como una desconexión hidráulica, por cuanto no existiría recarga desde el acuífero superior y las líneas de flujo serían paralelas.

- La escorrentía subterránea por el acuífero inferior es mínima con respecto al acuífero superior. Prácticamente toda la escorrentía renovable circula por el acuífero superior y descarga a través de las vertientes, la evapotranspiración y como recuperaciones en el río Loa. Esto confirmaría el alto contenido de sales en el napa del acuífero inferior, que habría llegado a su estado de sobresaturación debido a su larga residencia e interacción con los sedimentos salinos.
- El acuífero superior posee características anisotrópicas de origen cárstico, con conductividades hidráulicas en dos y tres ordenes de magnitud superiores en el sentido del flujo subterráneo, salvo en los sectores con riego intensivo en donde la conductividad hidráulica es alta pero isotrópica.
- La modelación matemática del nuevo modelo conceptual nos entrega un marco general del comportamiento del sistema a partir del cual se pueden extraer los siguientes resultados:
  - Las extracciones de agua efectuadas en el acuífero superior, rápidamente producen modificaciones en las descargas del sistema. El almacenamiento juega un rol secundario debido a las características cársticas del acuífero que busca su equilibrio sobre la base de la disminución de la escorrentía subterránea.
  - De acuerdo con lo anterior, una modificación en los patrones de recarga en el riego también produce rápidas modificaciones en las descargas del acuífero, sin embargo, la cuantía de los caudales que efectivamente disminuyen en las vertientes por concepto de una disminución de 50 Há de riego apenas

alcanzan los 5 l/s. La mayor pérdida es asumida por una disminución en la evapotranspiración.

- El sistema hidrogeológico de Calama se encuentra en un escenario en donde la explotación de agua actualmente se encuentra en un 70% del caudal autorizado y generando impactos significativos sobre la vertientes, por lo cual las medidas de mitigación propuestas dentro del EIA no parecen resultar efectivas.
- La disminución de caudales en las vertientes producidas por las extracciones actuales se traducen en un claro efecto sobre los caudales aguas abajo.
- Un incremento de los niveles de extracción de agua debiera provocar en proporción mayores efectos sobre los caudales de las vertientes, debido a que la amortiguación producida por la evapotranspiración es cada vez menor.
- Se requiere la estudiar la implementación de medidas administrativas de carácter ambiental o sectoriales para revertir la situación.
- Se estima que es necesaria la implementación de una estación fluviométrica para el control de caudal con registro continuo en el lugar donde se ubica actualmente la estación de control ENAEX.

# **ANEXO**

## A.1 FIGURAS

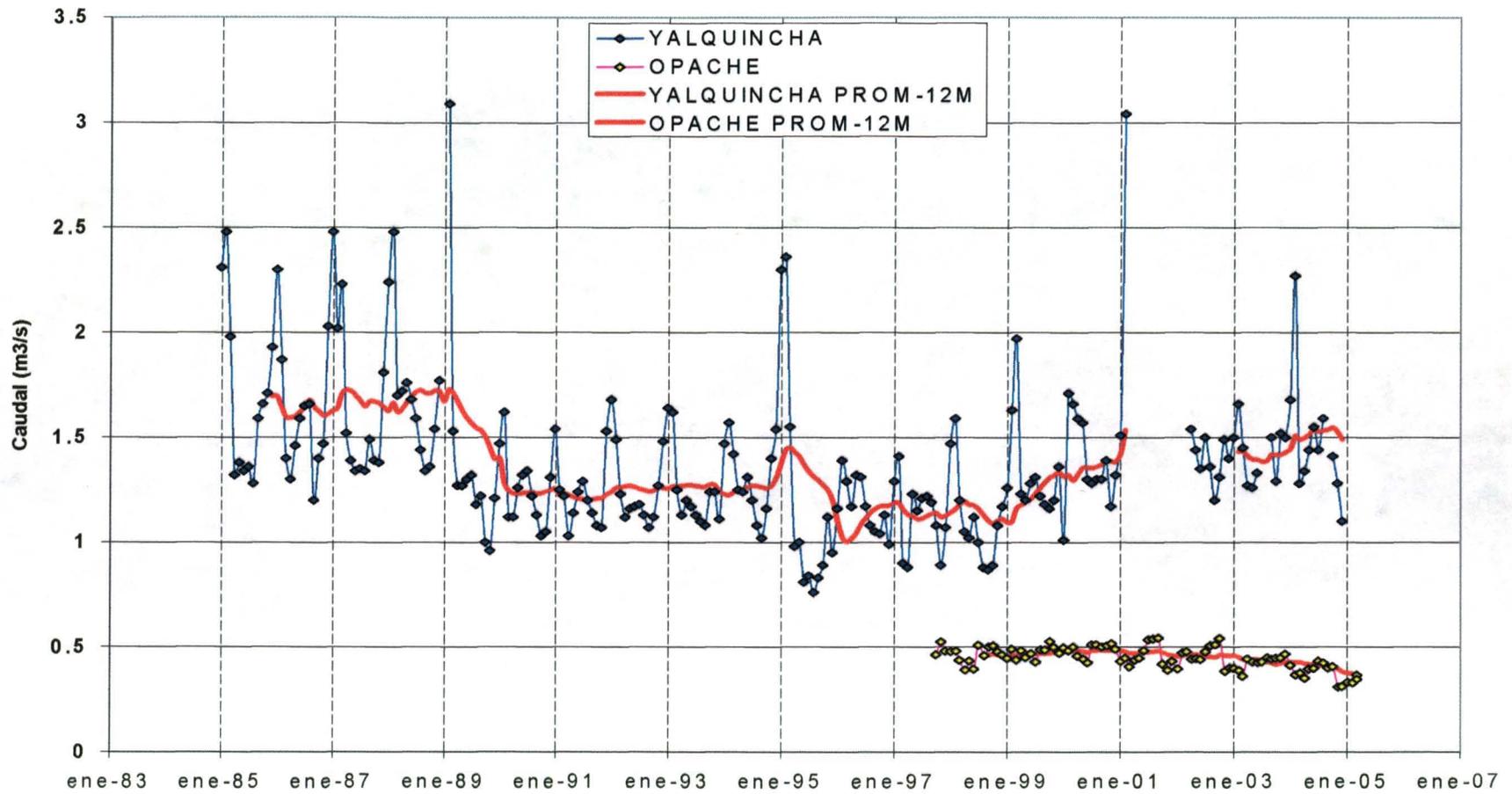


Figura N°1 Gráfico comparativo de caudales medios móviles de 12 meses, entre la Estación de Control Fluiométrico Río Loa en Yalquincha y los aforos mensuales en la estación de control Vertiente Opache en ENAEX

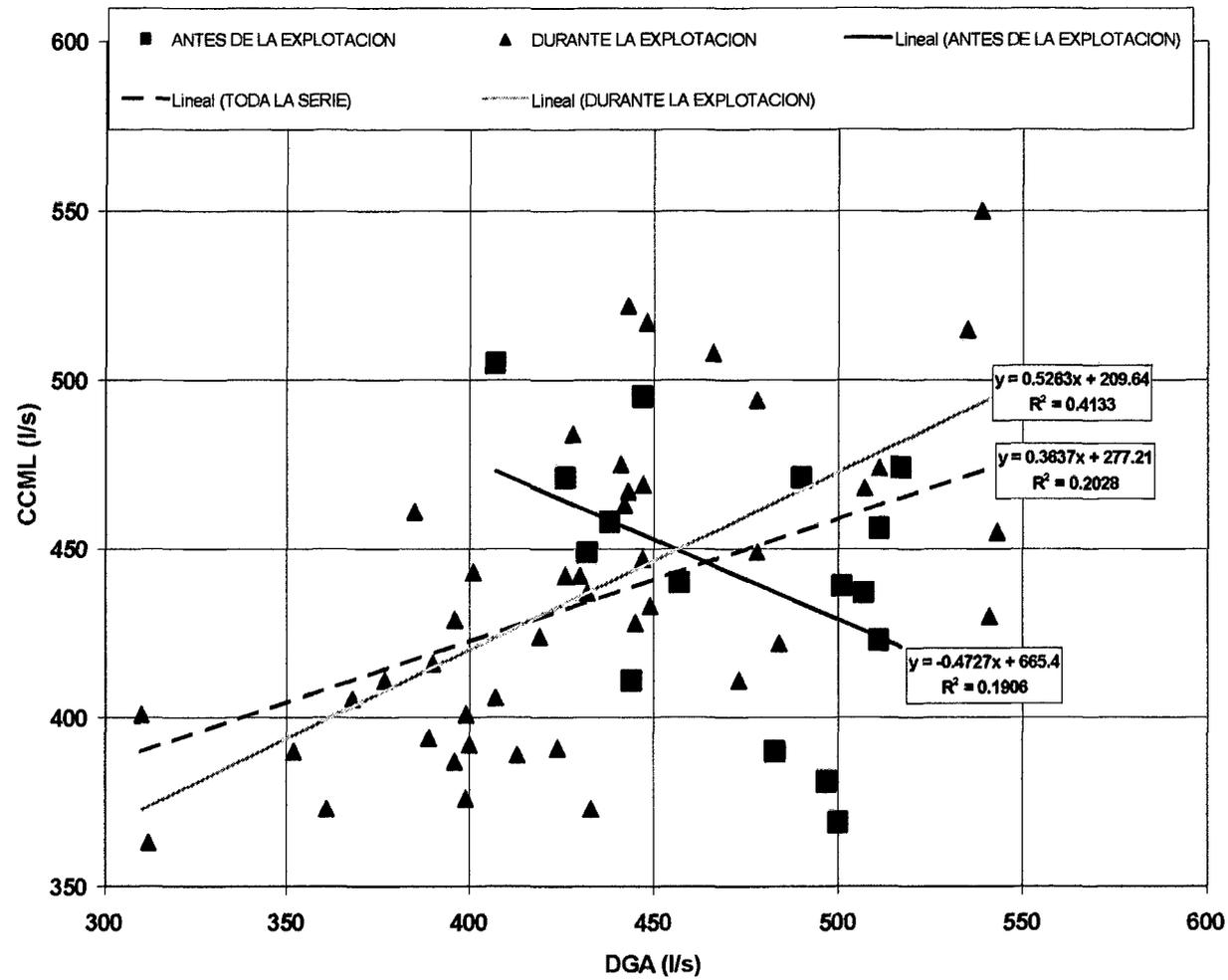


Figura N° 2

Gráfico comparativo entre las series de aforos mensuales disponibles en la vertiente Opache en la Estación de Control ENAEX.

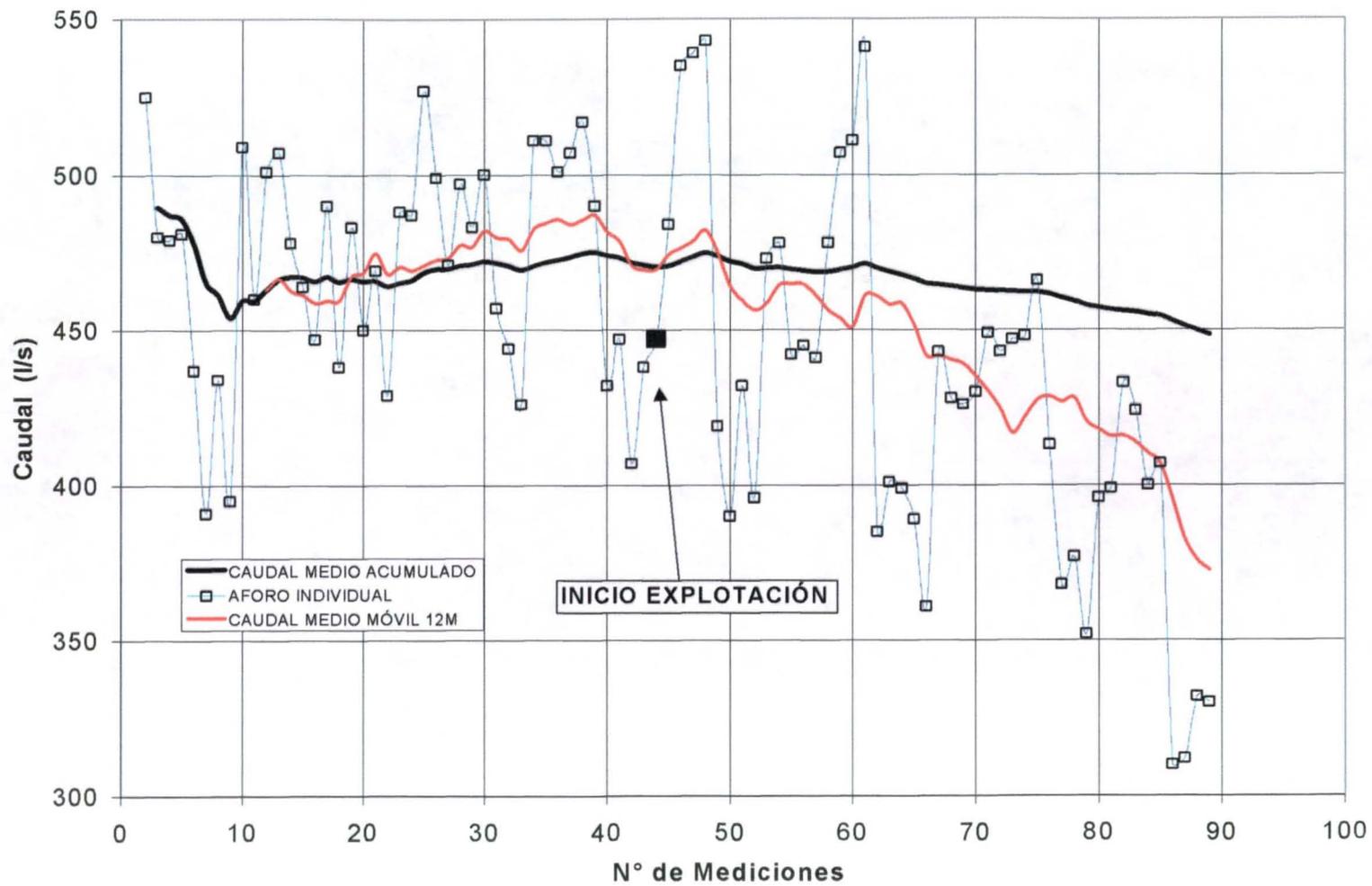


Figura N°3

Serie de Aforos de la DGA en estación de Control ENAEX

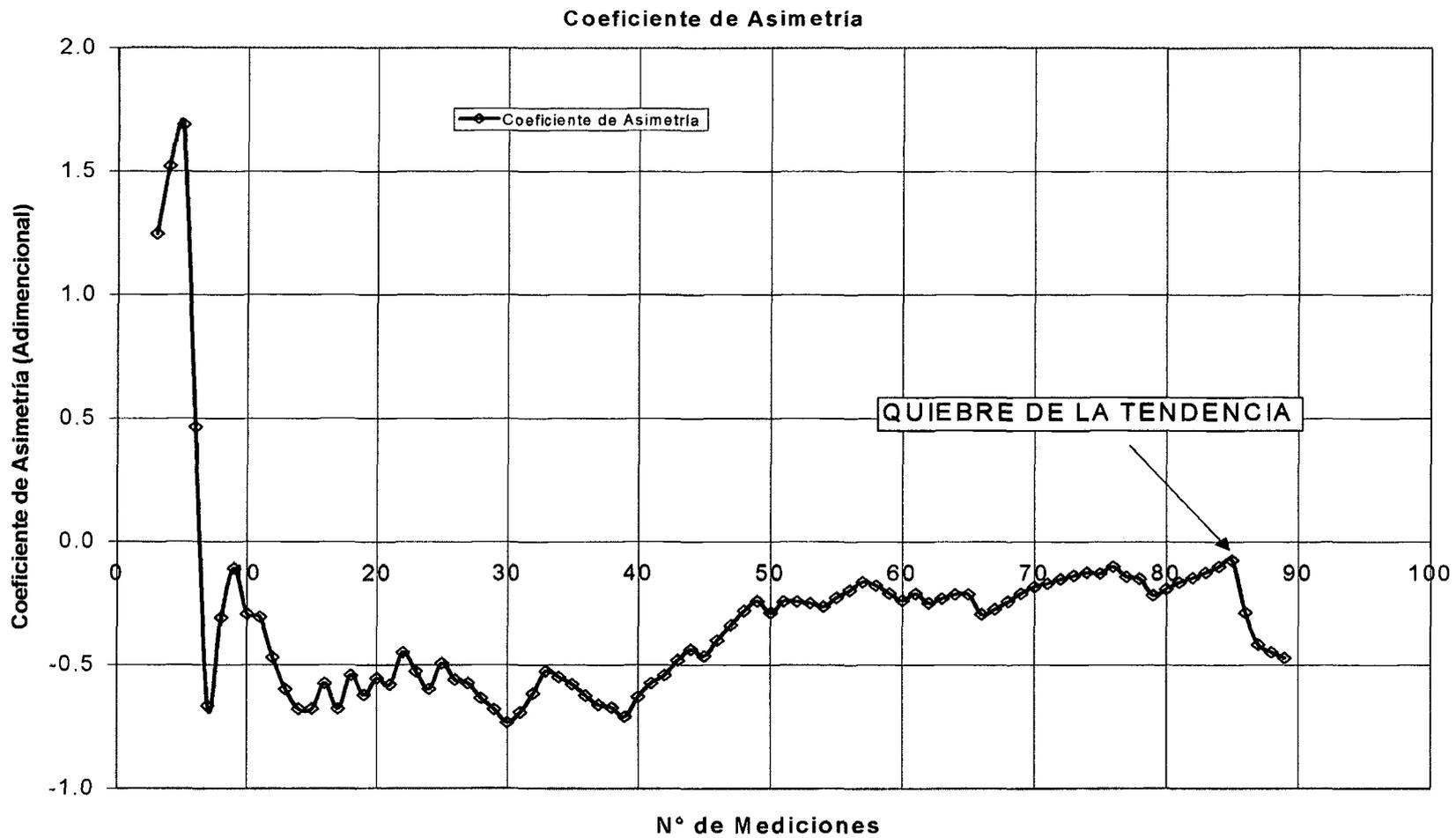


Figura N° 4 Evolución del coeficiente de asimetría de la serie de aforos DGA en ENAEX

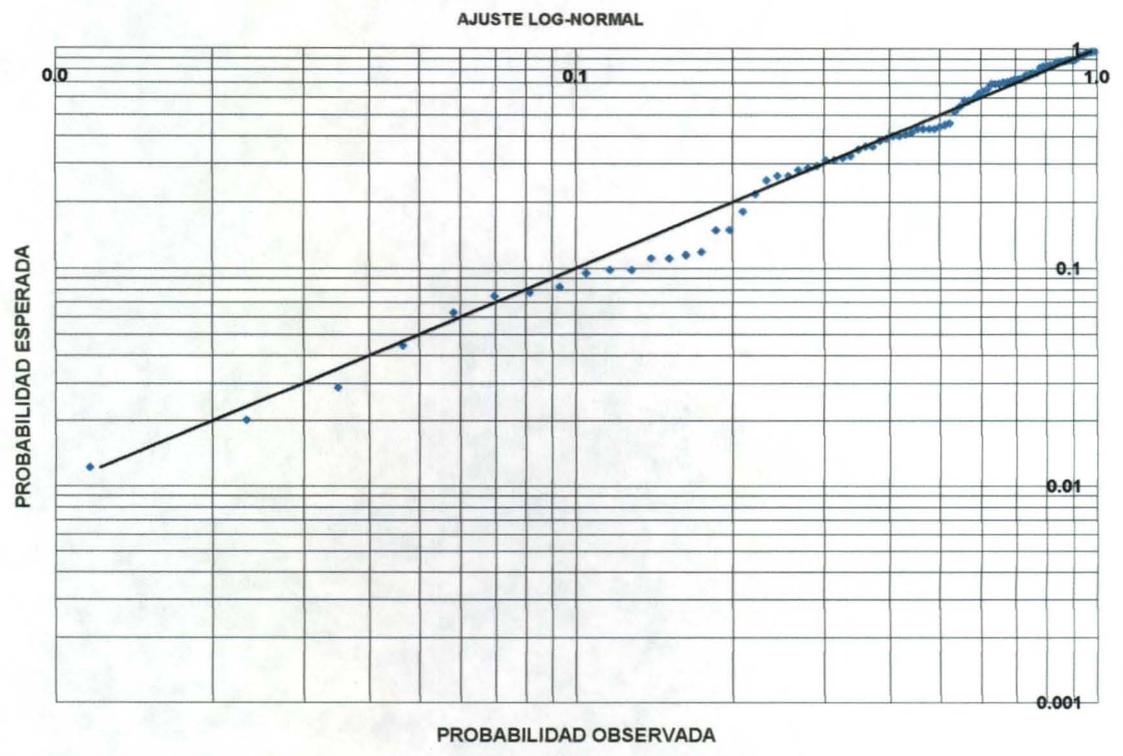
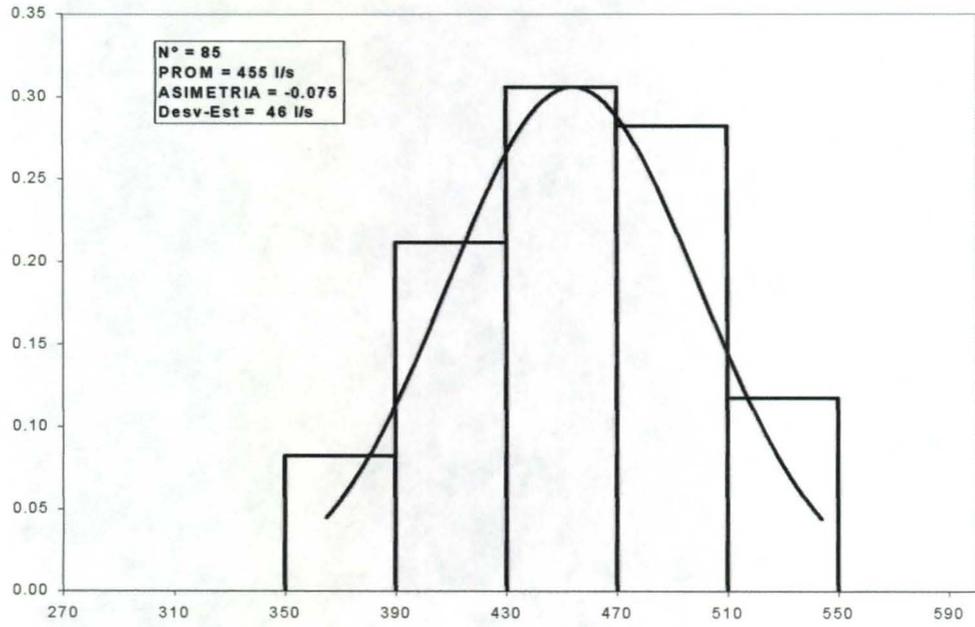


Figura N° 5 Ajuste Normal de la serie de aforos de la vertiente Opache en ENAEX hasta octubre del 2004

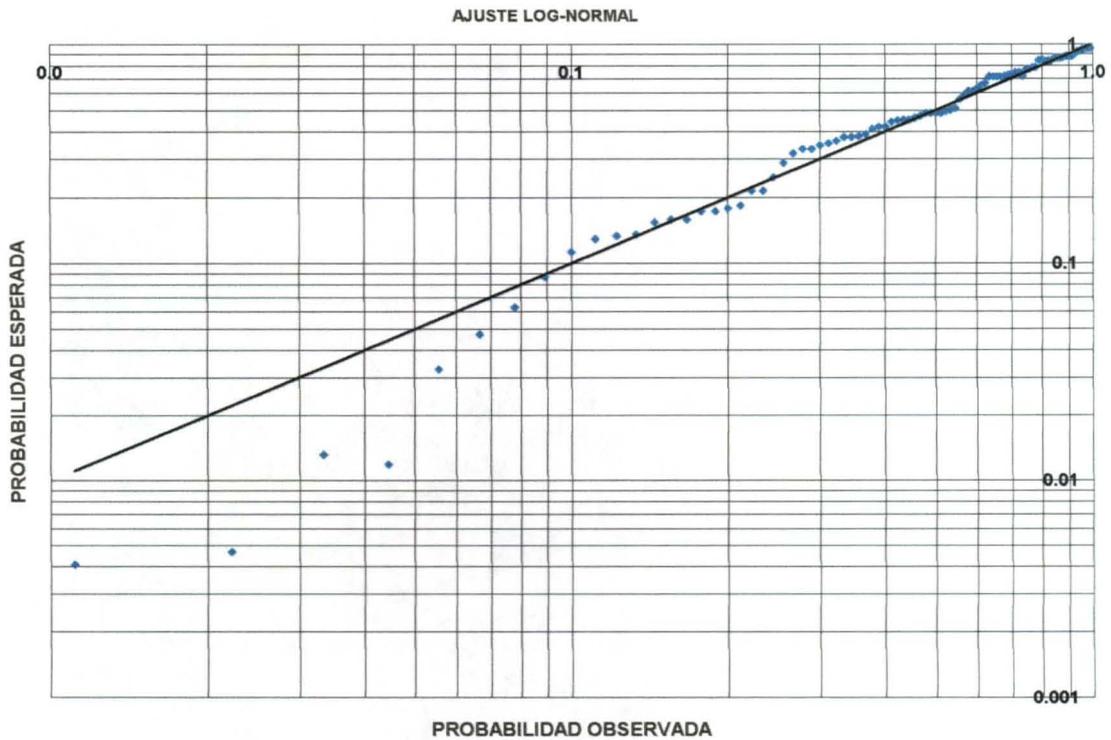
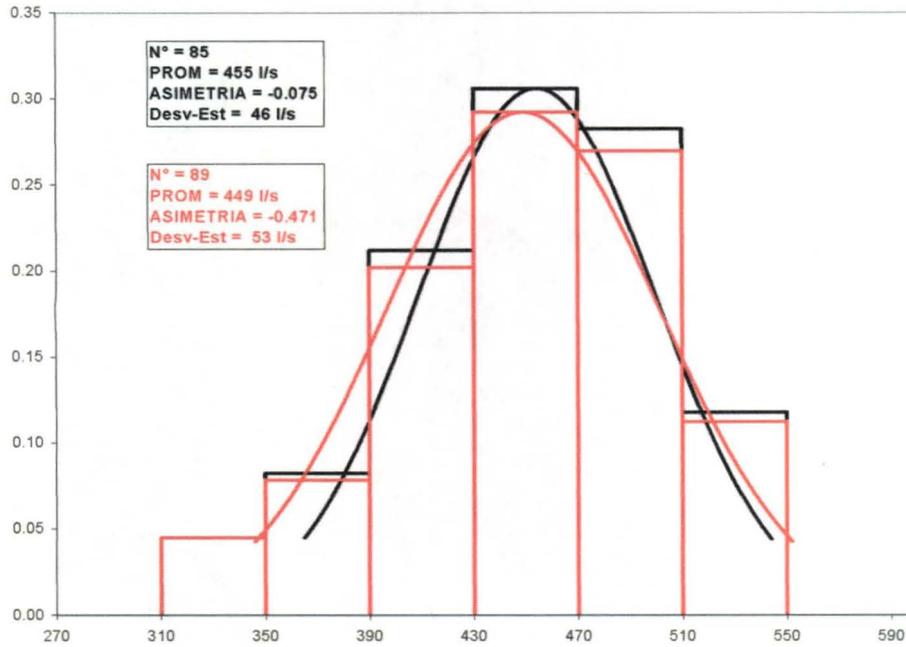


Figura N° 6 Gráfico comparativo entre el Ajuste Normal de la serie de aforos de la vertiente Opache en ENAEX, previo y posterior a octubre del 2004.

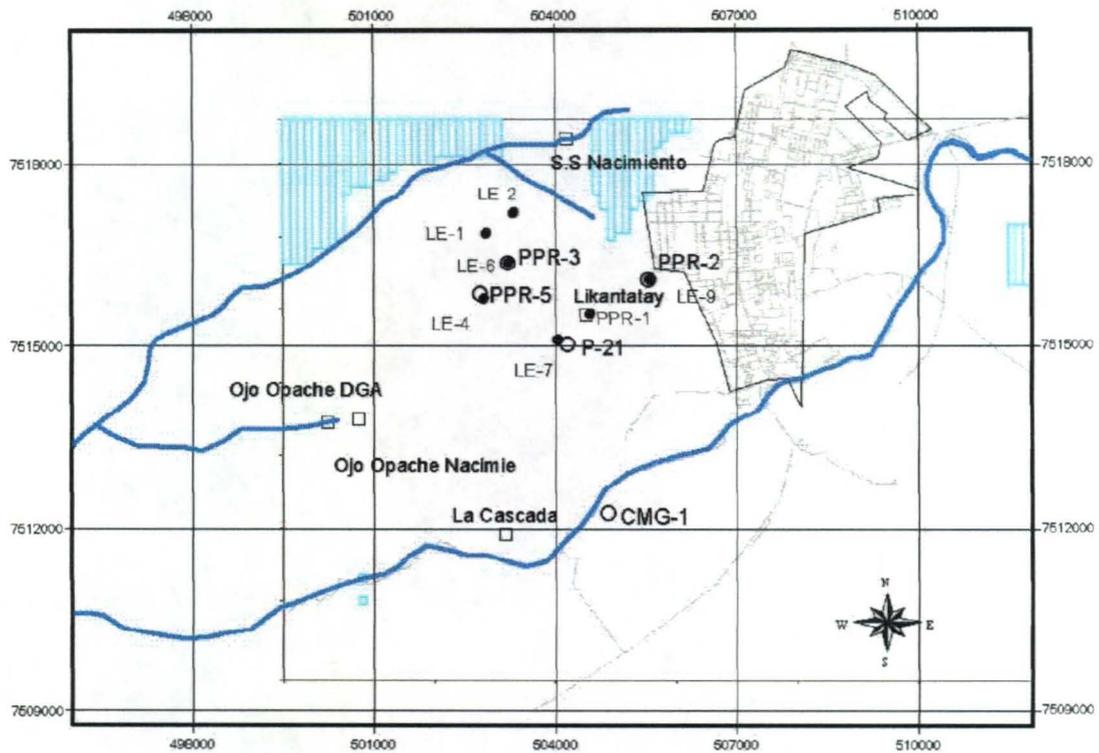


Figura N° 7 Ubicación referencial de pozos de producción (PPR) y de observación (LE) de CCML, y de vertientes del sector del acuífero de Calama.

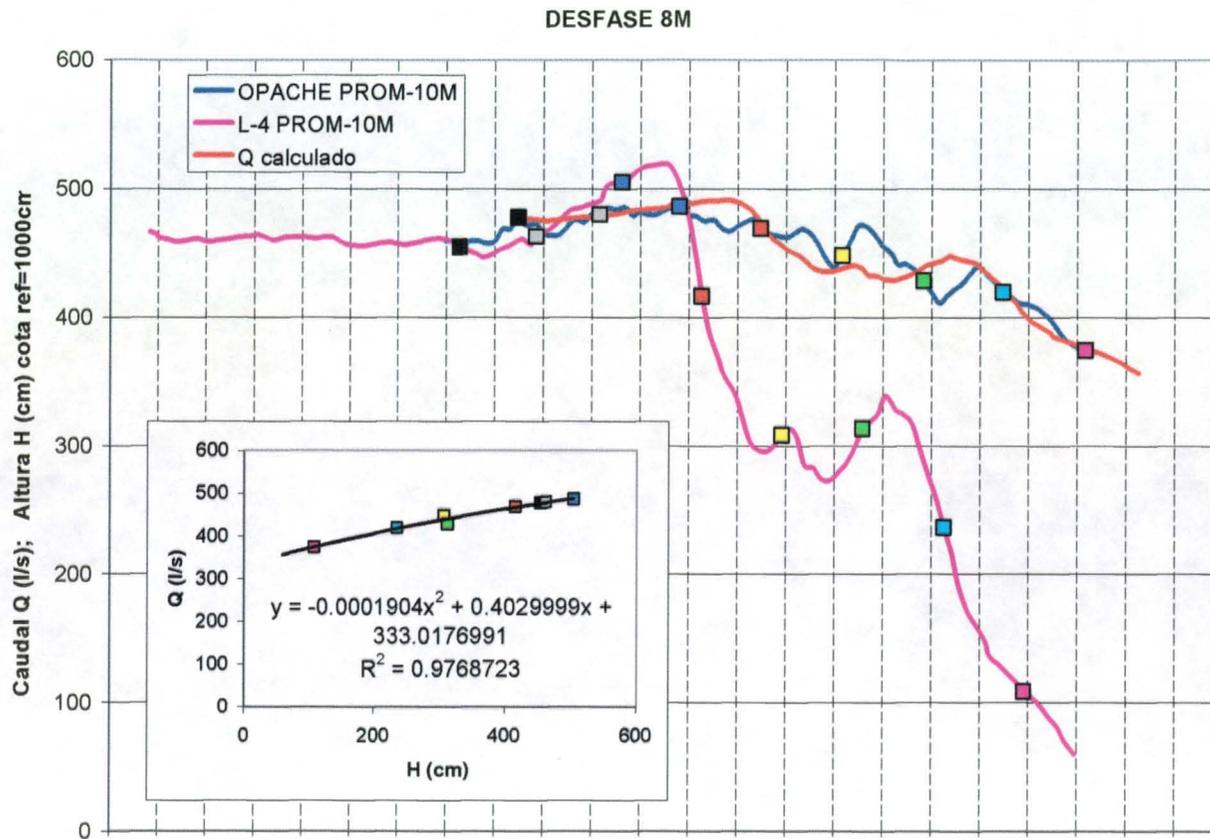
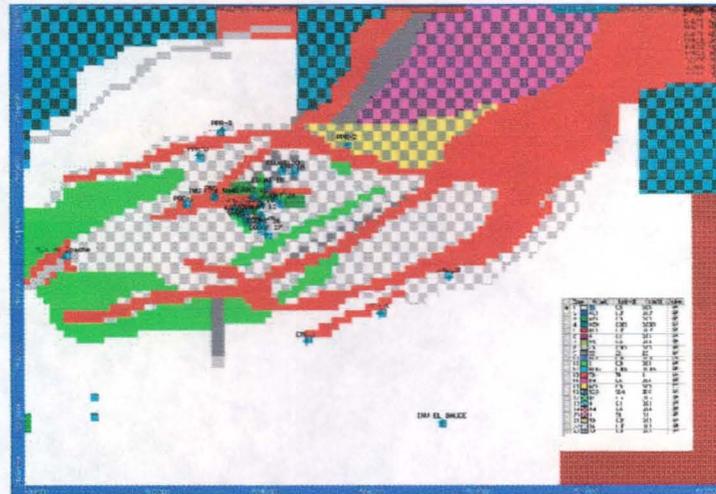
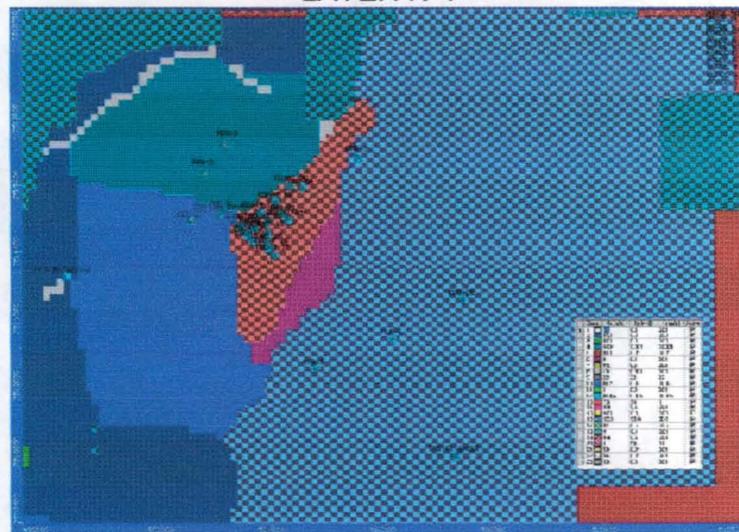


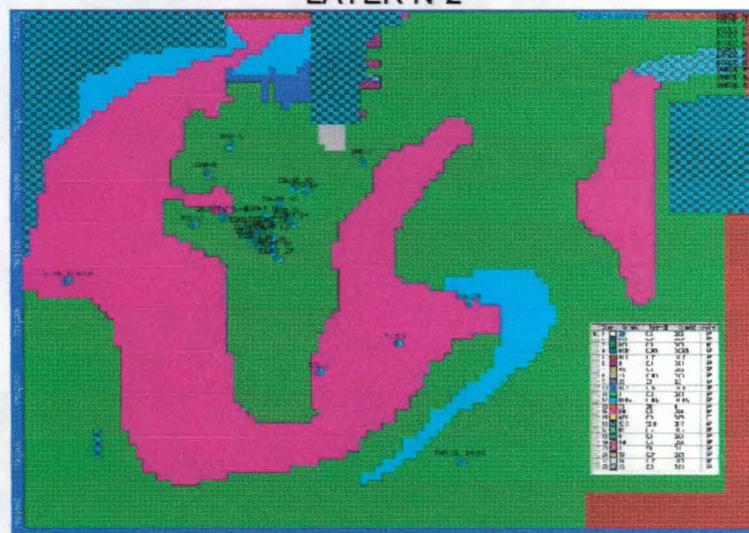
Figura N°8 Correlación observada entre el promedio de 10 meses consecutivos de la altura referencial del pozo LE-4 y el promedio de aforos de 10 meses consecutivos en ENAEX, con desfase temporal de ocho meses.



LAYER N°1



LAYER N°2



LAYER N°3

Figura N° 9 Conductividades hidráulicas de ajuste en Régimen Estacionario

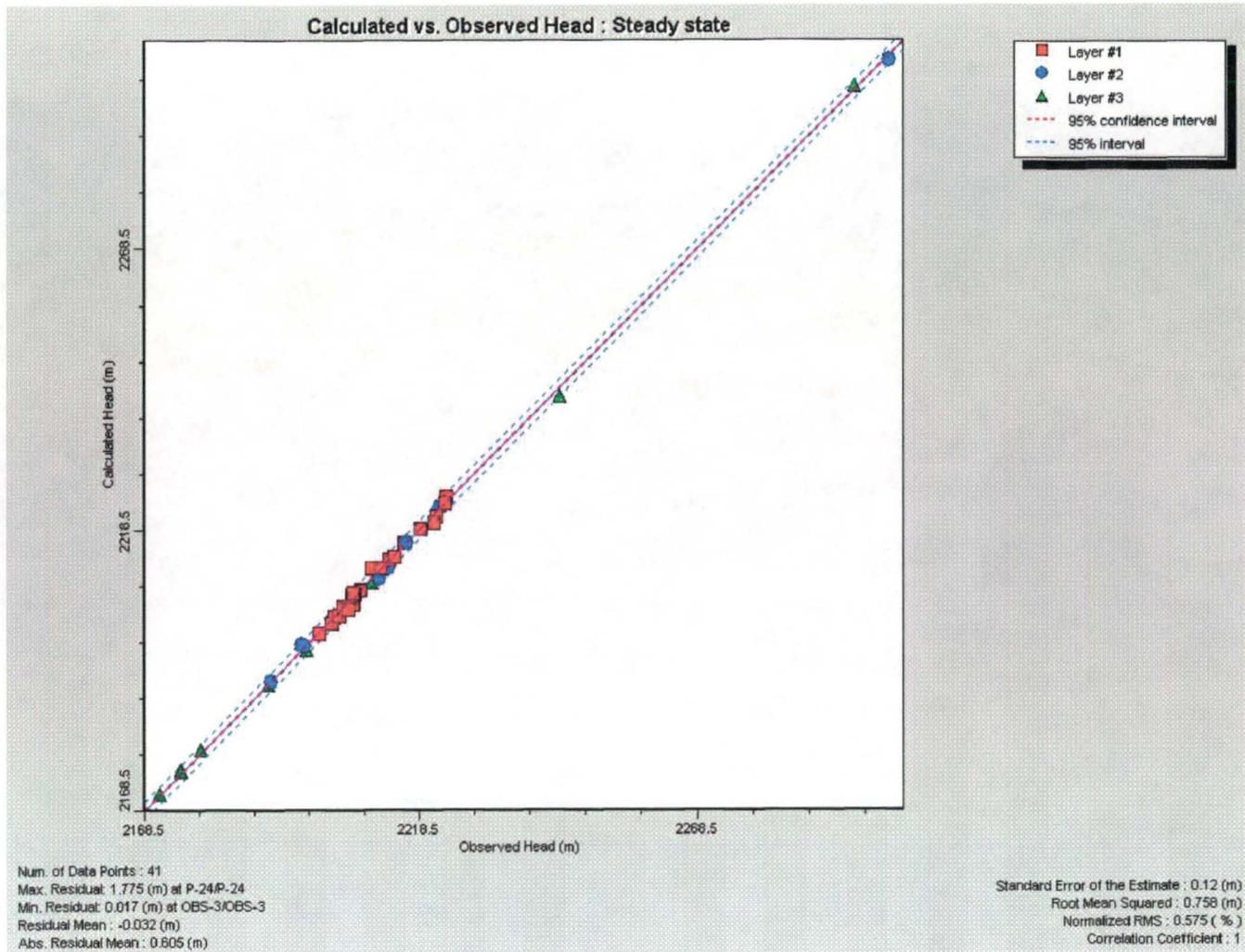
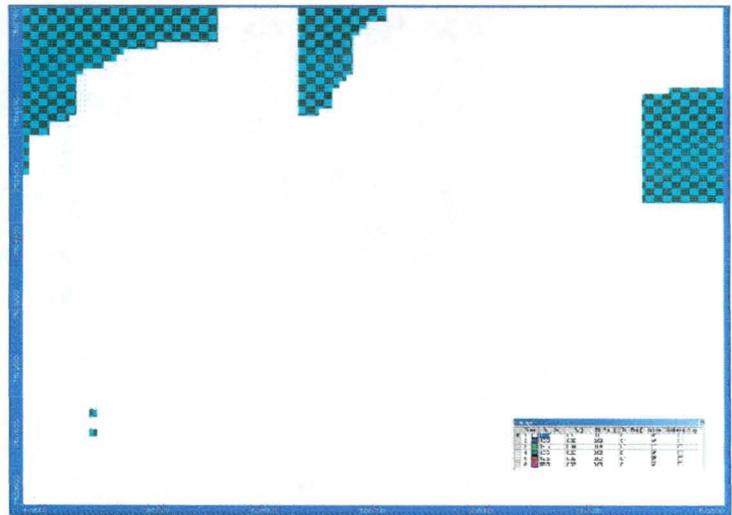
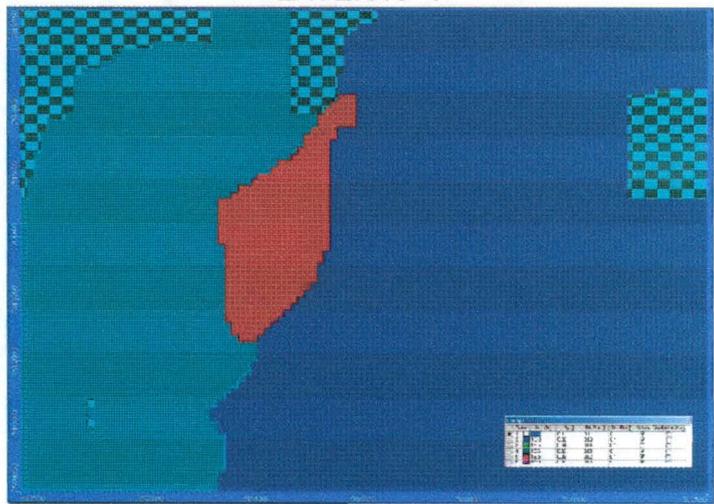


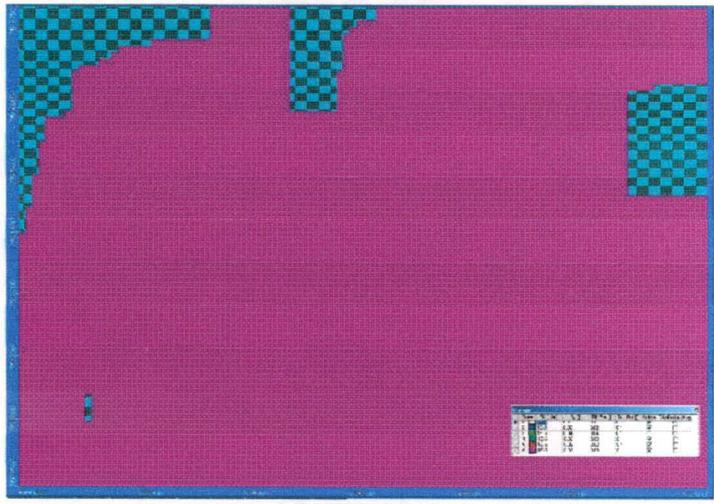
Figura N° 10 Ajuste piezométrico Régimen Estacionario



LAYER N° 1



LAYER N° 2



LAYER N° 3

Figura N° 11 Coeficientes de Almacenamiento, ajuste en régimen Transiente

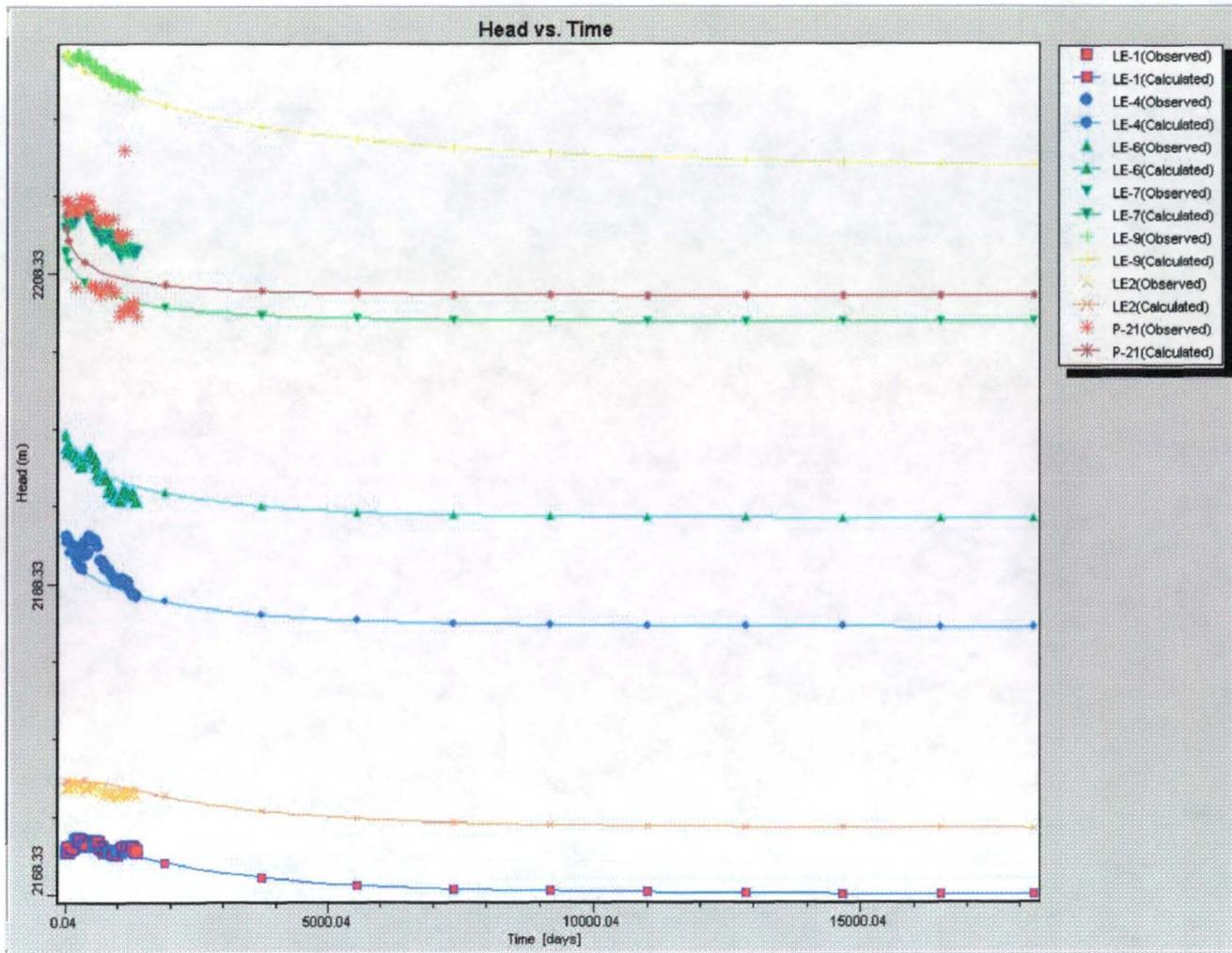


Figura N° 12 Ajuste piezométrico Régimen Transiente

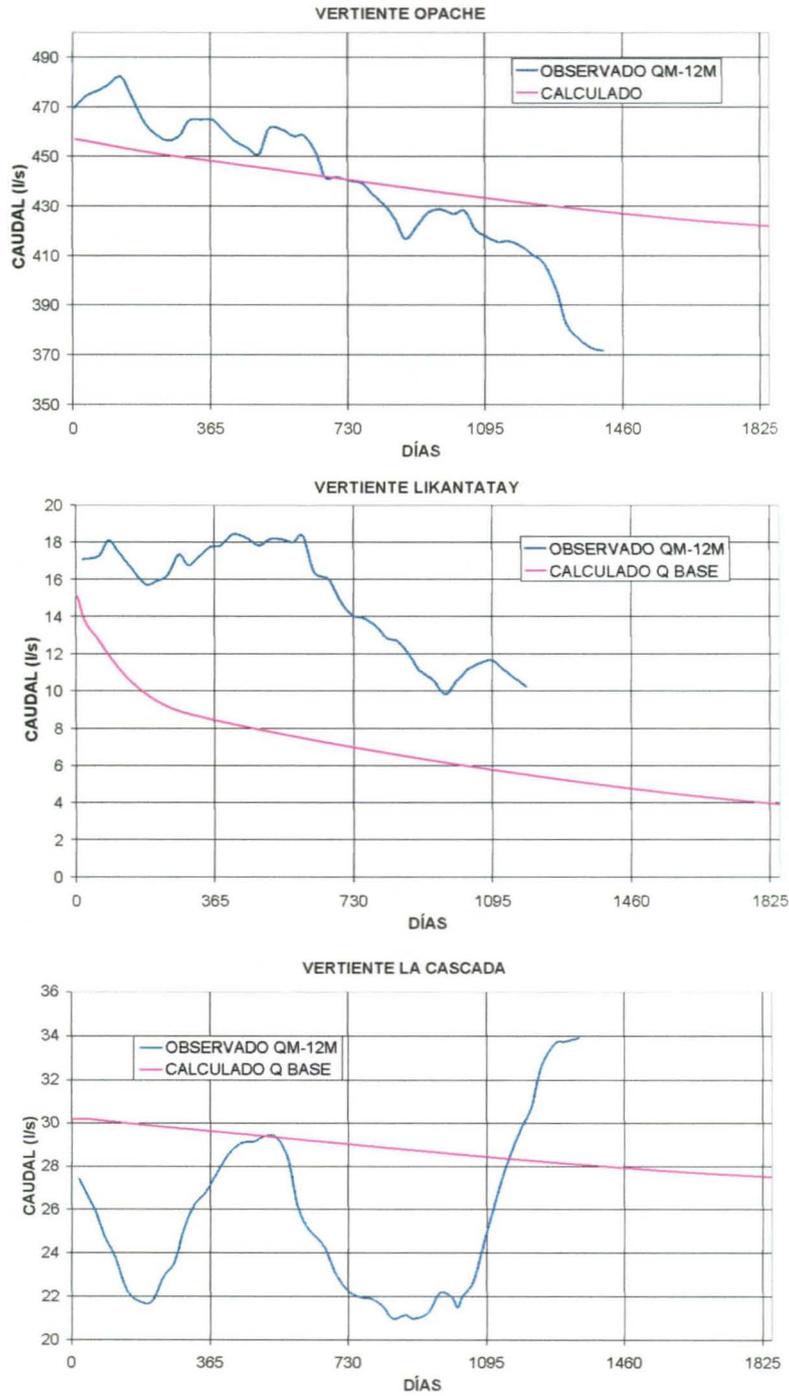


Figura N° 13 Caudales simulados y observados de las vertientes del sector de Calama. Durante los primeros 5 años de explotación del acuífero superior.

## A.2 TABLAS

DESFASE D													
	D-0M	D-1M	D-2M	D-3M	D-4M	D-5M	D-6M	D-7M	D-8M	D-9M	D-10M	D-11M	D-12M
PROM-1M	0.35	0.40	0.42	0.38	0.30	0.25	0.22	0.22	0.29	0.38	0.40	0.44	0.44
PROM-2M	0.41	0.43	0.48	0.45	0.35	0.30	0.28	0.27	0.34	0.40	0.46	0.50	0.52
PROM-3M	0.50	0.53	0.59	0.54	0.46	0.38	0.37	0.40	0.44	0.52	0.58	0.59	0.60
PROM-4M	0.38	0.40	0.51	0.49	0.43	0.39	0.35	0.31	0.36	0.43	0.50	0.56	0.59
PROM-5M	0.49	0.53	0.64	0.62	0.55	0.46	0.41	0.39	0.44	0.53	0.59	0.65	0.66
PROM-6M	0.58	0.58	0.67	0.65	0.64	0.63	0.67	0.70	0.72	0.74	0.78	0.79	0.81
PROM-7M	0.47	0.45	0.60	0.59	0.55	0.57	0.61	0.63	0.68	0.70	0.72	0.77	0.79
PROM-8M	0.67	0.70	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83	0.83	0.84	0.87	0.88	0.86	0.87
PROM-9M	0.73	0.71	0.81	0.78	0.72	0.66	0.64	0.64	0.65	0.71	0.74	0.77	0.80
PROM-10M	0.83	0.80	0.85	0.86	0.88	0.88	0.93	0.95	0.97	0.97	0.94	0.91	0.89
PROM-11M	0.72	0.74	0.82	0.85	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88
PROM-12M	0.82	0.85	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88	0.90	0.89	0.89

Tabla N°1 Coeficiente de ajuste r2 entre la serie de aforos de la DGA en ENAEX y el descenso piezométrico observado en el pozo de observación LE-4.

	Componentes de Flujo	REGIMEN ESTACIONARIO		DIFERENCIA
		SIN MODIFICACIONES	MENOS 50 Há DE RIEGO	
ENTRADAS (l/s)	INFILTRACION LOA	110	111	1
	RECARGA RIEGO	320	292	-28
	ENTRADAS SUBT	546	547	1
SALIDAS (l/s)	RECUPERACION LOA	248	244	-4
	SALIDAS SUBT	47	45	-2
	BOMBEO EFECT.	0	0	0
	SALIDAS DRENES	539	534	-5
	ET	142	127	-15
	Recuperación Neta río Loa	138	134	-4

Tabla N°2 Cuadro comparativo de escenarios con modificaciones en los patrones de Riego. Disminución de 50 Há de Riego en el sector aguas abajo de Calama .