GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA QUEBRADA LOS CHOROS IV REGION

INFORME TECNICO

REALIZADO POR:

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS

S.D.T. Nº 184

Santiago, Noviembre de 2004

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPTO. ADM. DE RECURSOS HIDRICOS
CGZ/cgz

M.O.P.
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
OFICINA DE PARTES
RESOLUCION TRAMITADA
Fecha 23 NOV 2004

MINISTERIO DE HACIENDA
OFICINA DE PARTES

RECIBIDO

CONTRALORIA GENERAL
TOMA DE RAZON

RECEPCION

DEPART. JURIDICO		
DEP. T. R. Y REGIST.		
DEPART. CONTABIL.		
SUB DEP. C. CENTRAL		
SUB DEP. E. CUENTAS		
SUB DEP. C.P.Y. BIENES NAC.		
DEPART. AUDITORIA		
DEPART. V.O.P.,U. y T.		
SUB.DEP. MUNICIP.		

REFRENDACION

REF. POR $
IMPUTAC.
ANOT. POR $
IMPUTAC.

DEDUC. DTO.
147977

REF.: Aprueba El Estudio "Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada de Los Choros, IVª Región".

SANTIAGO, 23 NOV 2004

D.G.A. Nº 1756

VISTOS : El estudio "Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada de Los Choros, IVª Región", S.D.T. Nº 184 de fecha noviembre de 2004; y las atribuciones que me confiere el artículo 300 letra c) del Código de Aguas.

EXENTA RESUELVO:

1.- **APRUEBASE** el Estudio denominado "Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada de Los Choros, IVª Región", S.D.T. Nº 184 de fecha noviembre de 2004.

2.- **COMUNIQUESE** la presente resolución al Sr. Secretario Regional Ministerial de Obras Públicas de la IVª Región, a los Departamentos, Subdepartamentos de la Dirección General de Aguas y Oficina Regional de la Dirección General de Aguas de la IVª Región.

ANOTESE Y COMUNIQUESE

HUMBERTO PEÑA TORREALBA
INGENIERO CIVIL
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS

INDICE

I INTRODUCCIÓN 4
II OBJETIVOS 7
III ANTECEDENTES GENERALES 7
III.1 HIDROLOGIA 7
III.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGIA 11
III.3 HIDROGEOLOGÍA 15
IV MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA 26
IV.1 Metodología para el Cálculo de Caudales de Recarga hidrológica. 26
IV.2 Datos de Entrada 33
IV.3 Funcionamiento de la Planilla 35
IV.4 Escenarios de Simulación 39
IV.5 Resultados 40
V RESULTADO DE LA MODELACION 47
VI DERECHOS DE APROVECHAMIENTO 48
VI.1 Demanda de Aguas Subterráneas 48
VI.2 Determinación de los Derechos de Aprovechamientos Sustentable a Explotar en el Acuífero. 49
VII CONCLUSIONES 54
VIII REFERENCIA 55
IX ANEXOS 56

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Ajuste precipitación, en función de la altitud. 8
Figura N°2: Estaciones Pluviométricas Quebrada Los Choros 9
Figura N°3: Geología sector Quebrada Los Choros. 14
Figura N°4: Puntos de Monitoreo Niveles DGA. 17
Figura N°5: Situación explotación 1971 24
Figura N°6: Situación explotación 2004. 25
Figura N°7: Esquema conceptual para estimación de Recarga hidrológica 31
Figura Nº 8. Fluctuación de niveles estable bajo una explotación sustentable 49

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N°1: Precipitaciones Anuales registradas en cuenca Los Choros 10
Gráfico N°2: Niveles Observados DGA en sector 2 Choros Bajos 18
Gráfico N°3: Niveles Observados DGA en sector 3 Choros Alto 19
Gráfico N°4: Niveles Observados DGA en sector 3 Choros Alto 20
Gráfico N°5: Niveles Observados DGA en sector 4 Punta Colorada 21
Gráfico N°6: Niveles Observados DGA en sector 5 Tres Cruces 22
Gráfico N°7: Relación Precipitación-Escorrentía 29
Gráfico N°8: Variación de Niveles Escenario 1 41
Gráfico N°9: Variación de Niveles Escenario 2 43
Gráfico N°10: Variación de Niveles Escenario 3 45

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Estaciones de medición de niveles DGA. 16
Tabla N° 2: Permeabilidades estimadas por Sector 23
Tabla N° 3: Evaporación mensual (mm) 26
Tabla N° 4: Parámetros utilizados por el Modelo MPL 27
Tabla N° 5: Estadística Pluviométrica Estación Base 28
Tabla N° 6: Factores de Transposición "A" por Sector 29
Tabla N° 7: Resultados balance hídrico Qda Los Choros 30
Tabla N° 8: Valores de los parámetros utilizados en el MPL 30
Tabla N° 9: Resumen caudales generados por MPL 30
Tabla N° 10: Cálculo de tasas de infiltración 33
Tabla N° 11: Características Geométricas y Permeabilidades 34
Tabla N° 12: Ejemplo de formato de los valores de Datos de Entrada del Modelo Los Choros 37
Tabla N° 13: Ejemplo de formato de los valores de Resultados del Modelo Choros. Hoja "Modelo" 38
Tabla N° 14: Caudales Otorgados. Escenario 1 39
Tabla N° 15: Caudales Otorgados más solicitados 39
Tabla N° 16: Resultados Escenario 1, derechos constituidos a agosto 2002. 40
Tabla N° 17: Resultados Escenario 2, derechos constituidos y solicitados hasta diciembre 2003 42
Tabla N° 18: Resultados Escenario 3. Caudal Sustentable. 44
Tabla N° 19: Resumen Caudales Factibles de Explotar. 44
Tabla Nº 20. Resumen demanda vigente zona de estudio 48
Tabla Nº 21. Derechos (l/s) susceptibles de constituirse en el acuífero de la Cuenca Quebrada Los Choros. 51
Tabla Nº 22. Cuadro comparativo Derechos susceptibles de constituirse v/s Demanda vigente en el acuífero de la Cuenca de Quebrada Los Choros al 30 de Junio de 2004 52

I INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene por objeto realizar una evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de la Quebrada Los Choros, IVª Región y determinar la factibilidad de constituir derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, sin producir perjuicios a derechos de terceros.

La IVª Región de Coquimbo tiene una superficie total de 40.656,3 km^2, se ubica aproximadamente entre los 29°10' y 32°10' de Latitud Sur y entre los 71°30' y 70°15' de Longitud Oeste. Esta región está constituida por 3 cuencas importantes, a saber, Elqui, Limarí y Choapa y otras cuencas menores entre ellas las cuencas costeras.

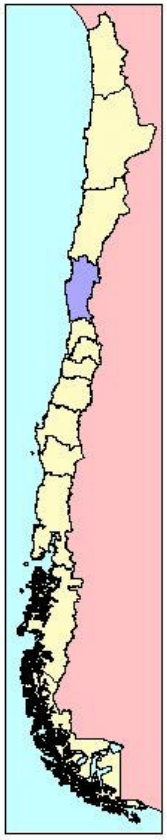
La zona de estudio denominada Quebrada Los Choros, se ubica entre las coordenadas UTM Norte 6.720.000 y 6.780.000, y UTM Este 360.000 y 270.000, Datum PSAD 56, Huso 19, en el mapa N°1 se puede apreciar la ubicación espacial del área.

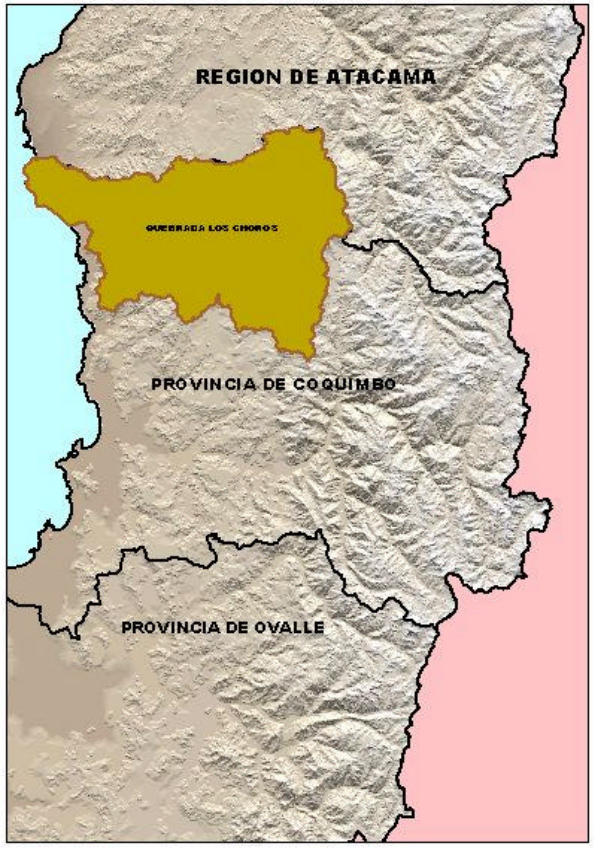
El área total de la cuenca Quebrada Los Choros es de 4.058 km^2 (ver mapa N°2). Esta cuenca tiene una precipitación media anual considerando el Balance Hídrico de Chile 1987 que varía entre 50 y 150 mm/año. La Temperatura media anual en la cuenca, obtenida por interpolación con estaciones vecinas (Balance Hídrico de Chile 1987) y mediante la curva temperatura-elevación, varía en el rango de 0°C a 16°C.

Dadas las características de la zona estudiada nos encontramos con que el aporte superficial se encuentra comprometido en los usos actuales, es decir, agotados para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento consuntivos de aguas superficiales, es por ello que el interés por conocer el recurso subterráneo ha aumentado considerablemente, por lo tanto, debe ser evaluado para determinar cual es su comportamiento frente a distintos niveles de extracción, en el marco de una explotación sustentable, sin provocar menoscabo a derechos de terceros ni al medio ambiente.

En el presente informe se ha trabajado con la demanda vigente ingresada a tramitación hasta el 30 de junio de 2004. Incluye las solicitudes constituidas, en trámite y aquellas solicitudes que corresponden ser regularizadas según el Art. 2 Transitorio del Código de Aguas.

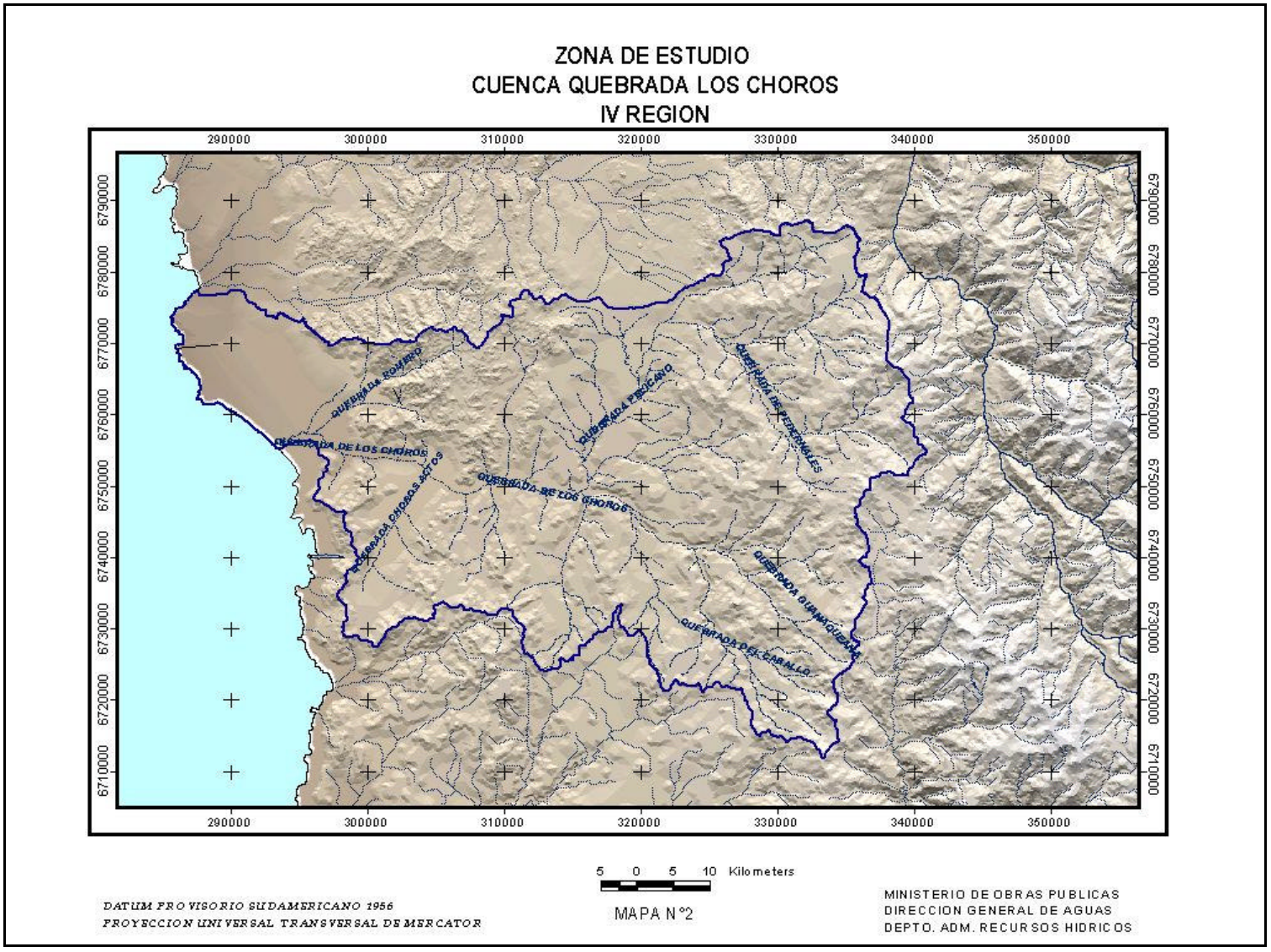
MAPA N°1
UBICACION DE LA ZONA DE ESTUDIO





MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPTO. ADMINISTRACION DE RECURSOS HIDRICOS

DATUM PROVISORIO SUDAMERICANO 1956
PROYECCION UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR UTM


ZONA DE ESTUDIO
CUENCA QUEBRADA LOS CHOROS
IV REGION
290000
300000
310000
320000
330000
340000
350000
6790000
6780000
6770000
6760000
6750000
6740000
6730000
6720000
6710000
QUEBRADA ROMERO
QUEBRADA DE LOS CHOROS
QUEBRADA CHOROS ALTOS
QUEBRADA PELICANO
QUEBRADA DE LOS CHOROS
QUEBRADA DE PEDERNALES
QUEBRADA GUANAQUEANA
QUEBRADA DEL CABALLO
5 0 5 10 Kilometers
MAPA N°2
DATUM PROVISORIO SUDAMERICANO 1956
PROYECCION UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPTO. ADM. RECURSOS HIDRICOS

II OBJETIVOS

Para determinar si es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento en la cuenca de la Quebrada Los Choros, la Dirección General ha desarrollado el Informe "*Modelo de Simulación Quebrada Los Choros. Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IVª Región de Coquimbo", SIT N° 96 de septiembre de 2004*. El objetivo principal de dicho estudio fue evaluar el recurso hídrico subterráneo analizando escenarios futuros de explotación utilizando el modelo elaborado en el *"ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA QUEBRADA LOS CHOROS*" [1].

El informe "Modelo de Simulación Quebrada Los Choros. Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IVª Región de Coquimbo", incluye los resultados del balance hídrico de la cuenca por sectores, para lo cual se simularon tres escenarios:

1. Evaluación del efecto de la explotación del acuífero de los derechos de agua actualmente constituidos por la Dirección General de Aguas en toda la Cuenca de Quebrada Los Choros.
2. Evaluación del efecto del bombeo de la explotación del acuífero con los derechos otorgados y en trámite hasta diciembre de 2003.
3. Determinación del caudal sustentable máximo admisible por el acuífero de Quebrada Los Choros.

El Informe "Modelo de Simulación Quebrada Los Choros. Evaluación de los Recursos Hídricos en la quebrada Los Choros, IVª Región de Coquimbo", SIT N°96 de 2004 ha servido de base para la elaboración del presente informe, cuyo objetivo principal es determinar si es posible constituir derechos de aprovechamientos subterráneos en calidad de permanentes y definitivos, en la cuenca de Quebrada Los Choros, basado en los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas en el informe antes señalado.

III ANTECEDENTES GENERALES

III.1 *HIDROLOGIA*

Pluviometría

En la cuenca, existen 3 estaciones con control pluviométrico por parte de la DGA, estas son: Incahuasi, El Tofo y El Trapiche. Antiguamente existía una estación en el sector de Tres Cruces, mencionado en el Estudio *"Hidrogeología de la Quebrada de Los Choros, CORFO – Peralta, F ; 1971*.

En la Figura N°2, se presenta la ubicación espacial de las estaciones. En los gráficos N°1 adjuntos, se presentan los rangos de variación para registros anuales de medición.

[1] Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros, presentado en marzo de 2004 por Construcciones y Maquinarias BSF Ltda., elaborado por GCF Ingenieros Consultores Ltda.

De manera general se puede señalar que la estación El Tofo tiene un régimen local, con precipitaciones que son mayores que el resto de la cuenca y esto se debe al microclima que existe debido a la morfología del sector. La estación el Tofo no es representativa de la cuenca Los Choros, punto muy importante de considerar al momento de estimar las precipitaciones medias de la cuenca.

Las estaciones Incahuasi y Trapiche, presentan precipitaciones medias anuales menores a los 50 mm/año, con variaciones temporales en años secos y húmedos que tienen un rango de 0 hasta más de 100 mm/año.

La figura 1 muestra la variación espacial de las precipitaciones en la cuenca de la Qda. Los Choros en relación con la altitud.

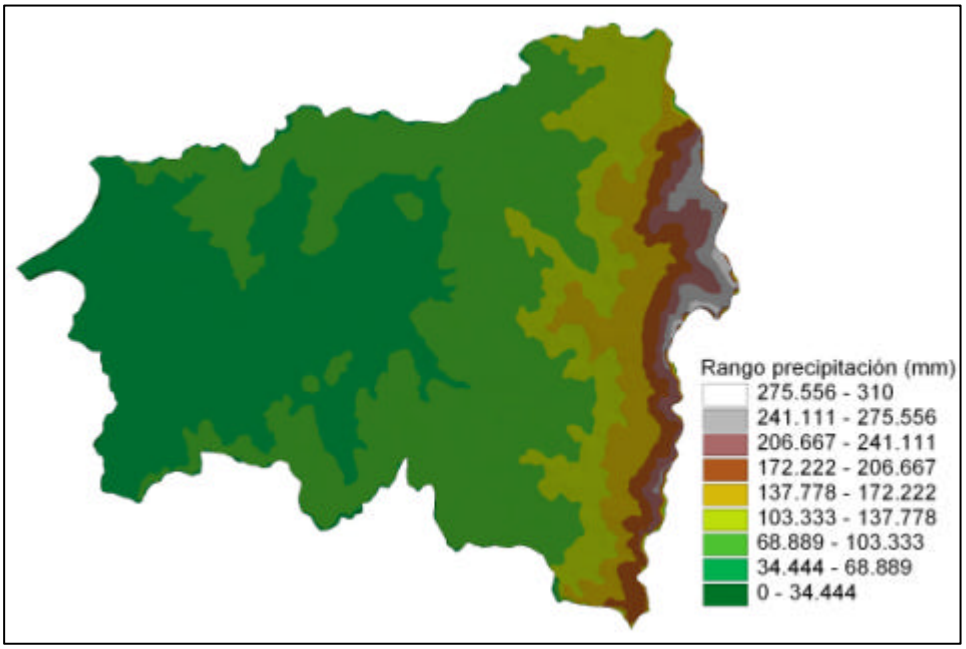


Figura N°1: Ajuste precipitación, en función de la altitud.
Fuente: SIT N°96, 2004. DGA, Departamento de Estudios y Planificación

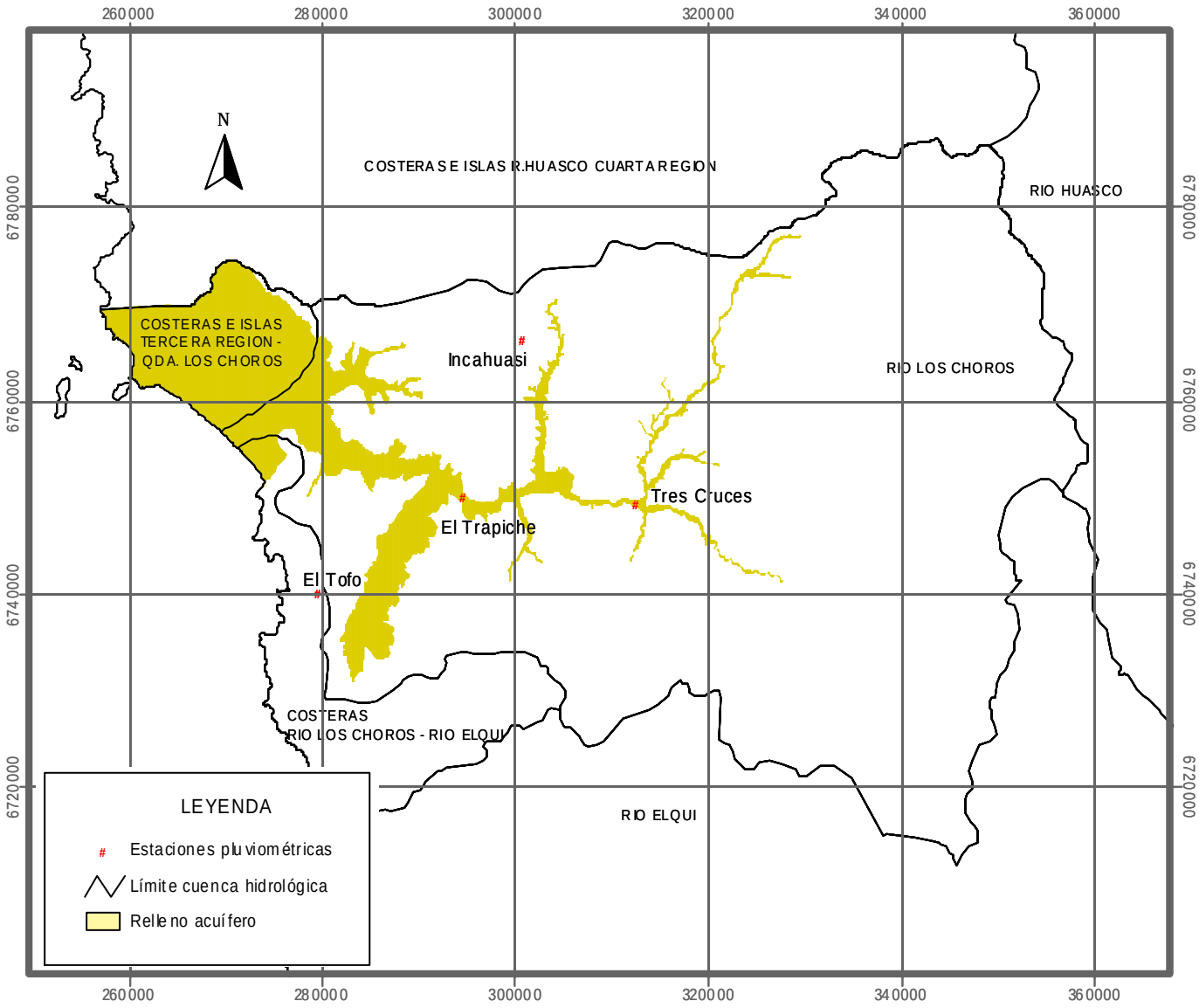
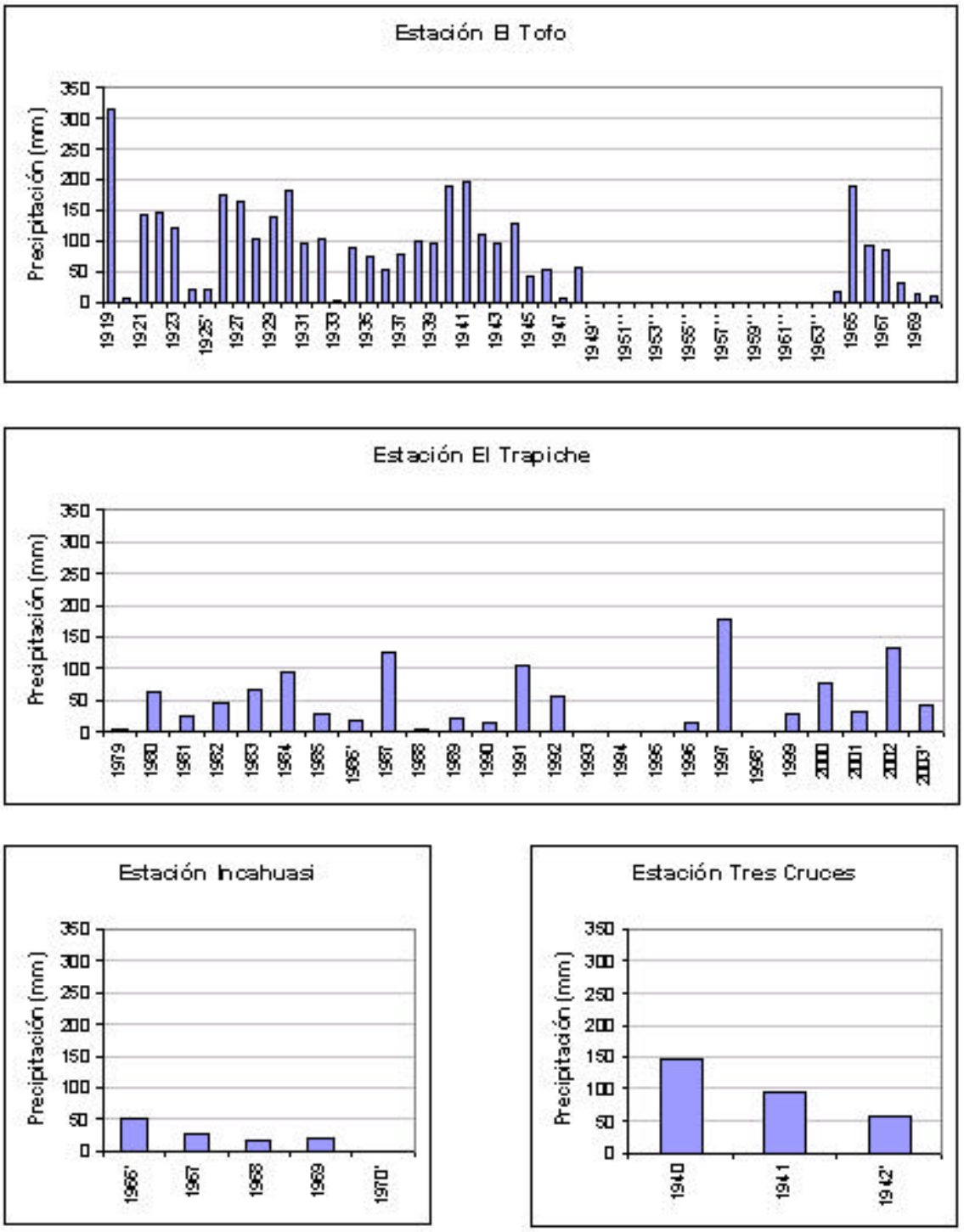


Figura N°2: Estaciones Pluviométricas Quebrada Los Choros

Gráfico N°1: Precipitaciones Anuales registradas en cuenca Los Choros



Fuente: SDT N°96, 2004. DGA, Departamento de Estudios y Planificación.

Fluviometría

No existen escurrimientos superficiales sostenidos en el tiempo a lo largo del cauce de la quebrada, sólo algunos tramos en los que ocurren afloramientos del escurrimiento subterráneo. Estos afloramientos tienen lugar especialmente en la parte alta de la cuenca, sector denominado Junta Chincoles y en la parte media-baja de la confluencia de Choros Altos con la Quebrada principal de Los Choros.

La DGA no posee control fluviométrico en la Quebrada, los únicos registros que existen corresponden a aforos aislados en los sectores mencionados anteriormente realizados en marzo del 2004 con caudales que varían entre los 15 y los 30 l/s. Se cuenta con información de aforos para los períodos entre octubre 1999 y noviembre 2000, con caudales que varían entre los 13 y los 28 l/s en el sector de Junta Chincoles.

Estos valores si bien permitirán tener un rango de validación para los caudales en el modelo de flujo, resultan ser insuficientes para poder caracterizar la cuenca en términos de valores medios mensuales.

III.2 *GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGIA*

Geomorfología

La Quebrada Los Choros, se encuentra inserta en un área en la que se destacan tres entidades morfológicas principales: Planicies Costeras, Cordillera de la Costa y Valles Transversales.

El Clima del sector obedece a: Desierto Costero con abundante nubosidad en la zona de la costa, Desértico Transicional y Desértico frío de Montaña, en la parte más alta. La cuenca posee cotas máximas de 4.000 msnm.

Las planicies costeras se desarrollan en el norponiente de la desembocadura y constituyen las terrazas marinas existentes, presentándose casi planas, con alturas de 40 a 50 m sobre el lecho actual de la quebrada. (Niemeyer 1971)

Los altos topográficos de Sierra del Pleito y Cordón del Sarco, al norte y sur de la desembocadura respectivamente, en sentido N-S, corresponden a la Cordillera de la Costa (Börgel 1983) y las cimas varían entre 500 y 1440 m.s.n.m.

Los cordones transversales quedan caracterizados por la cadena de cerros dispuestos hacia el Este de Quebradas de la Higuera y Pajonales, hasta los valles de los río Carmen y Turbio, en donde destacan los cordones del Rosario y de las Perdices cuyas alturas varían entre los 400 y 2000 m.s.n.m. El sector más oriental de Quebrada Los Choros, en donde destacan la Cordillera La Punilla, Altos de Peralta y Sierra Cóndor, tienen alturas que alcanzan los 4.000 m.s.n.m. denominados como sector de media montaña, según Paskoff en 1993.

La Quebrada Los Choros no tiene su cabecera en la Cordillera de Los Andes, sino que en la Cordillera de la Punilla, donde las cumbres más altas no superan los 4.000 m.s.n.m., lo que limita el aporte de aguas producto del derretimiento de nieves. Debido a lo anterior, la

quebrada de Los Choros no posee un régimen de escurrimientos continuo a lo largo del año, y las precipitaciones normales infiltran rápidamente en el relleno sedimentario, generalmente en el curso superior y medio de la quebrada.

Geología

En la Figura N° 3, se presenta la configuración regional de la geología de la Cuenca de la Quebrada Los Choros.

Entre las distintas unidades geológicas allí observadas, adquieren mayor importancia del punto de vista hidrogeológico, depósitos del Cuaternario (Qal) correspondientes a depósitos aluviales modernos, compuestos por ripios, gravas, arenas y escombros de falda que conforman el acuífero principal de la Quebrada Los Choros. En menor escala y hacia el sector de la costa, se ubican los depósitos eólicos (Qe) también recientes, compuestos básicamente por arenas modernas.

También adquieren importancia hidrogeológica, el conjunto de sedimentos, medianamente consolidados, de origen fluvio-aluvial Gravas de Atacama (Tega), las cuales incluyen conglomerados de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones limosas, acumulados sobre unidades de roca preexistentes que entregan menores capacidades de transmisibilidad que los menos consolidados. Las Gravas de Atacama corresponden a depósitos que se acumulan en valles y depresiones, como resultados de los procesos de agradación y sedimentación, asociados al último solevantamiento de Los Andes.

Dentro de las estructuras cabe destacar el sistema de fallas con orientación NS y NNE que pertenecen al sistema de la Falla de Atacama, el cual controla la morfología local y regional, asociada también a los yacimientos de fierro más importantes del país. (Minera el Tofo por ejemplo)

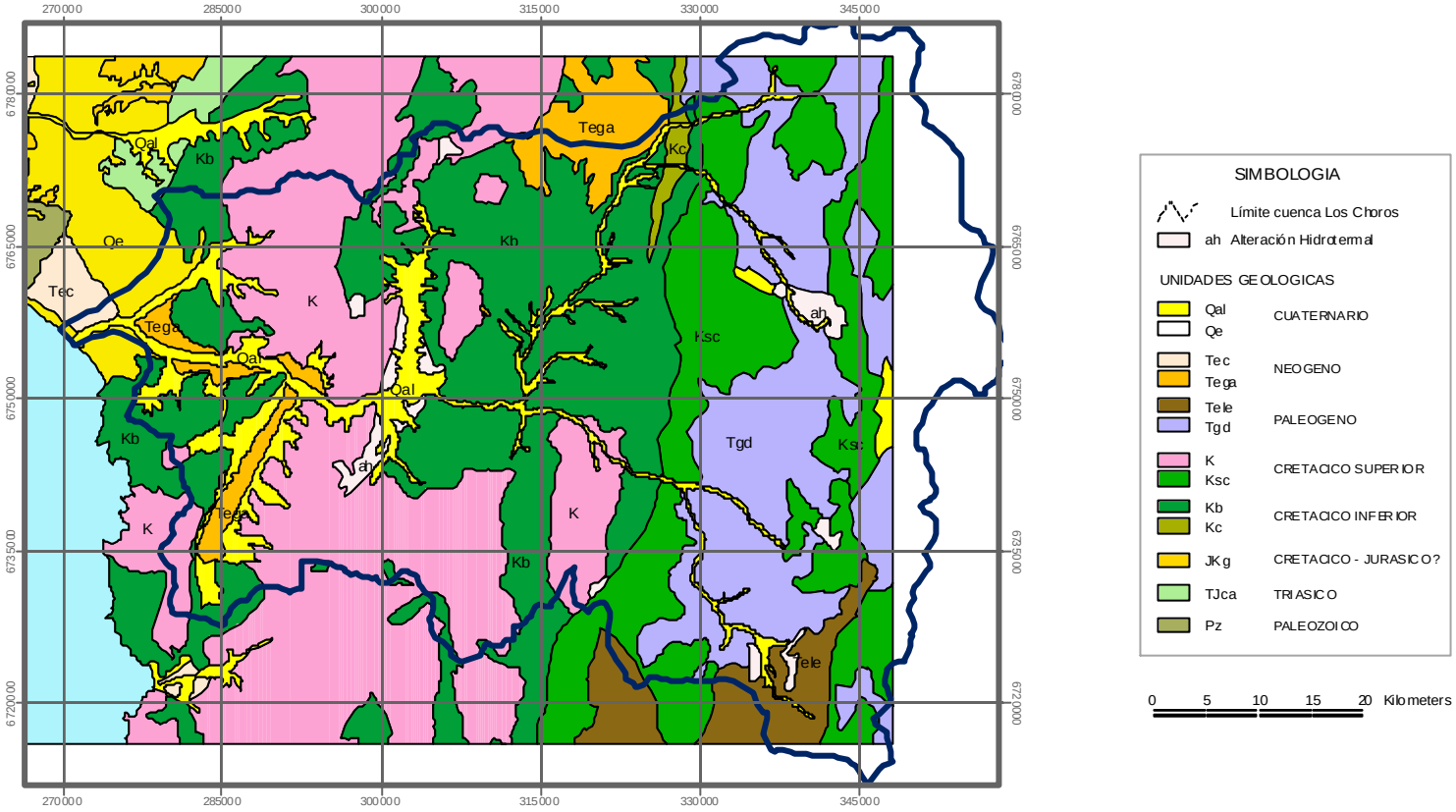
Geofísica

Seis son las fuentes que existen con información geofísica que indican la profundidad donde se ubica el basamento rocoso y por lo tanto, ayudan a estimar rangos de delimitación del espesor del acuífero propiamente tal. Estos estudios corresponden a: Universidad Católica 1968, Geodatos 2003, Geodatos 2004, Serplac 1995, DOH-AC 1998 y Sernageomin-Cazalac-DGA 2004.

De todos los estudios mencionados anteriormente, se puede señalar lo siguiente:
(Ver figura N°4)

- Para el sector alto, de Tres Cruces hacia arriba, la profundidad o potencia del acuífero estaría en rangos que varían desde los 40 hasta los 100 metros, haciéndose menores hacia las laderas del relleno sedimentario.
- Para el sector de Tres Cruces propiamente tal, se encuentran potencias desde los 60 hasta los 150 m.
- Entre Tres Cruces y Choros Altos, los depósitos principales varían su espesor entre 15 y 70 m.

- Choros Altos, si bien posee un mayor ancho del relleno sedimentario, corresponde en gran parte a las gravas de Atacama, con un acuífero más débil y espesores que fluctúan entre los 10 y 90 m.
- El sector occidental, desde Choros Altos hacia la Costa, presenta potencias que varían entre los 70 y los 180 m, considerando el relleno principal.



LEYENDA

Qe : Depósitos eólicos. Arenas modernas.

Qal : Depósitos aluviales modernos.
Ripios, gravas, arenas, incluyen escombros de falda.

Tec : Formación Coquimbo.
Sedimentos marinos aterrazados: areniscas, calcarenitas, coquinas y conglomerados; incluyen cubierta cuaternaria de poco espesor.
Mioceno-Pleistoceno?

Tega: Gravas de Atacama.
Gravas, conglomerados poco consolidados, incluyen depósitos aterrazados.
Mioceno-Pleistoceno?

Tele: Formación Los Elquinos.
Volcánica andesítica, con intercalaciones de lavas riolíticas y rocas sedimentarias.
Paleógeno.

Tgd: Intrusivos de la Franja Oriental.
Granodioritas. Terciario.

K : Intrusivos de la Franja Central.
Granitos, dioritas y granodioritas.
Cretácico Superior-Teciario Inferior.

Ksc: Formación Cerrillos.
Sedimentos clásticos, continentales, con intercalaciones andesíticas en su sección inferior y andesitas porfíricas con intercalaciones sedimentarias en su sección superior.
Cretácico Superior.

Kb : Grupo Bandurrias.
Rocas volcánicas, andesíticas, con intercalaciones sedimentarias, clásticas y calcáreas.
Neocomiano.

Kc : Grupo Chañarcillo.
Calizas, calcarenitas y margas.
Neocomiano.

JKg: Intrusivos de la Franja Occidental.
Granitos. Jurásico-Cretácico?

TJca: Formación Canto del Agua.
Sedimentos clásticos marinos. Areniscas y conglomerados cuarcíferos.
Anísico-Lías.

Pz: Metamorfitas de la costa.
Esquistos, filitas, cuarcitas.
Paleozoico.

Figura N°3: Geología sector Quebrada Los Choros.
Fuente: SIT N°96, 2004. DGA, Departamento de Estudios y Planificación.

III.3 *HIDROGEOLOGÍA*

Sectorización

El "Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros" definió una división hidrogeológica para el área de estudio, definiendo 5 sectores denominados:

a) Playa Los Choros
b) Los Choros Bajos
c) Los Choros Altos
d) Punta Colorada
e) Tres Cruces

En la figura N°4 se puede observar su ubicación espacial dentro de la zona de estudio.

Formaciones Acuíferas

Los rellenos cuaternarios que conforman los sedimentos de la cuenca de Quebrada Los Choros, van adquiriendo mayor volumen desde aguas arriba hacia aguas abajo. Este mayor volumen se manifiesta tanto en una potencia creciente como en un mayor ancho de los sedimentos a medida que se avanza hacia el oeste. Sin embargo, asociado a este mayor volumen de rellenos está un empeoramiento de los parámetros elásticos del acuífero. En los sectores más altos de la cuenca (Tres Cruces), los rellenos presentan escaso porcentaje de finos y se muestran como un solo acuífero libre, formado por material relativamente grueso. Hacia aguas abajo aumenta paulatinamente el porcentaje de finos, de modo que en el sector de Punta Colorada aparecen estratos impermeables. Particularmente, para el sector de Choros Alto hay varios acuíferos de escasa potencia (2-6 m) separados por estratos arcillosos. (*Fuente "Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros", 2004*)

El Sector de Tres Cruces (figura 4), se conforma por la zona de descarga de las Quebradas Pelícano y el Carrizo por el norte y Quebrada Grande por el sur. De acuerdo con los resultados del estudio geofísico realizado por Geodatos en este sector, el relleno cuaternario presenta una potencia media de 60 m. La interpretación de los sondeos mediante transiente electromagnético indicaría un modelo de tres capas o estratos. El superior con espesor variable entre 53 y 138 m con una media de 60 m, fue correlacionado con gravas, ripios y arenas que corresponden a un acuífero que en su extremo superior se encuentra drenado. El segundo estrato presenta un espesor que varía entre 23 m y 48 m, identificado como roca basal alterada, que también podría corresponder a un acuífero. El estrato más profundo se identifica como el basamento rocoso sano. La estratigrafía aportada por los informes de construcción de 9 pozos profundos y 4 norias de Tres Cruces analizadas para el Estudio de GCF 2004 confirmarían este modelo.

El sector de Punta Colorada, situado aguas abajo del Sector de Tres Cruces, presenta rellenos de mayor volumen que el anterior. En este sector el valle se amplía hasta tener

un ancho medio de 1500 m. De acuerdo con el estudio geofísico realizado para la DOH en 1998, el basamento rocoso se encontraría a una profundidad máxima de 280 m hacia el eje del cauce, sin embargo, desde el punto de vista estratigráfico, se verifica la presencia de capas con diversos contenidos de arcilla. De acuerdo con el estudio geofísico realizado por el Sernageomin en marzo del 2004, el basamento rocoso estaría ubicado a los 70 m de profundidad, en la parte más oriental del sector.

El sector de Quebrada Choros Altos, abarca tanto la parte principal del valle, como un sector transversal formado principalmente por las Gravas de Atacama. Para el sector del valle principal, entre El Trapiche y Angostura, presenta características similares a las existentes entre Tres Cruces y Punta Colorada, rellenos constituidos por sedimentos cuaternarios gruesos. Para el sector de la Quebrada de Choros Altos, existen varios estratos acuíferos de escaso espesor separados por estratos de arcilla mucho más potentes.

Finalmente, el Sector de Choros Bajos, presenta espesores del relleno acuífero que fluctúan entre los 10 y los 200 m de profundidad, separados internamente por estratos impermeables constituidos principalmente por limo.

Niveles de agua subterránea

La Dirección General de Aguas posee 17 estaciones de monitoreo de niveles de agua subterráneas, las cuales se indican a continuación.

Tabla N° 1: Estaciones de medición de niveles DGA.

N° estación	CODBNA	NOMBRE	ESTE	NORTE	ALTURA	VIGENCIA
1	04100002-3	OBSERVATORIO LA SILLA C-5	324480	6773015	0.0	VIGENTE
2	04100001-5	OBSERVATORIO LA SILLA C-4	323359	6772772	0.0	SUSPENDIDA
3	04120009-K	LOS CHOROS C-1 N° 2	274382	6758398	48.5	VIGENTE
4	04120008-1	PUEBLO LOS CHOROS C-4	276425	6757843	75.0	VIGENTE
5	04120006-5	LOS CHOROS N1	276523	6757610	75.0	VIGENTE
6	04120010-3	QUEBRADA LOS CHOROS C-5	278102	6756015	100.0	VIGENTE
7	04120007-3	EL TOFO N° 5 A-1	291506	6752187	0.0	VIGENTE
8	04120016-2	EL TOFO N° 4 AN-5	291409	6751969	238.7	VIGENTE
9	04120015-4	EL TOFO N°3 AN-4	291231	6751884	240.0	VIGENTE
10	04120002-2	PUNTA COLORADA B-5	304721	6751044	400.0	VIGENTE
11	04120005-7	LOS CHOROS N° 4 B-2	300124	6750296	325.0	SUSPENDIDA
12	04120003-0	LOS CHOROS 3	300099	6750177	325.0	VIGENTE
13	04120013-8	SANTA FE AN-2	294243	6749719	275.0	VIGENTE
14	04120012-K	GUILLERMO CORTES A N - 1	295158	6749686	275.0	VIGENTE
15	04120014-6	El Tofo 2	291319	6751792	241.95	
16	04120004-9	El Tofo 6	291571	6752222	235.5	
17	04120017-0	Los Choros 4B	304321	6751478	400	

En los gráficos adjuntos (Gráfico N°2 hasta Gráfico N° 6), se puede apreciar la variación de los niveles en el tiempo.

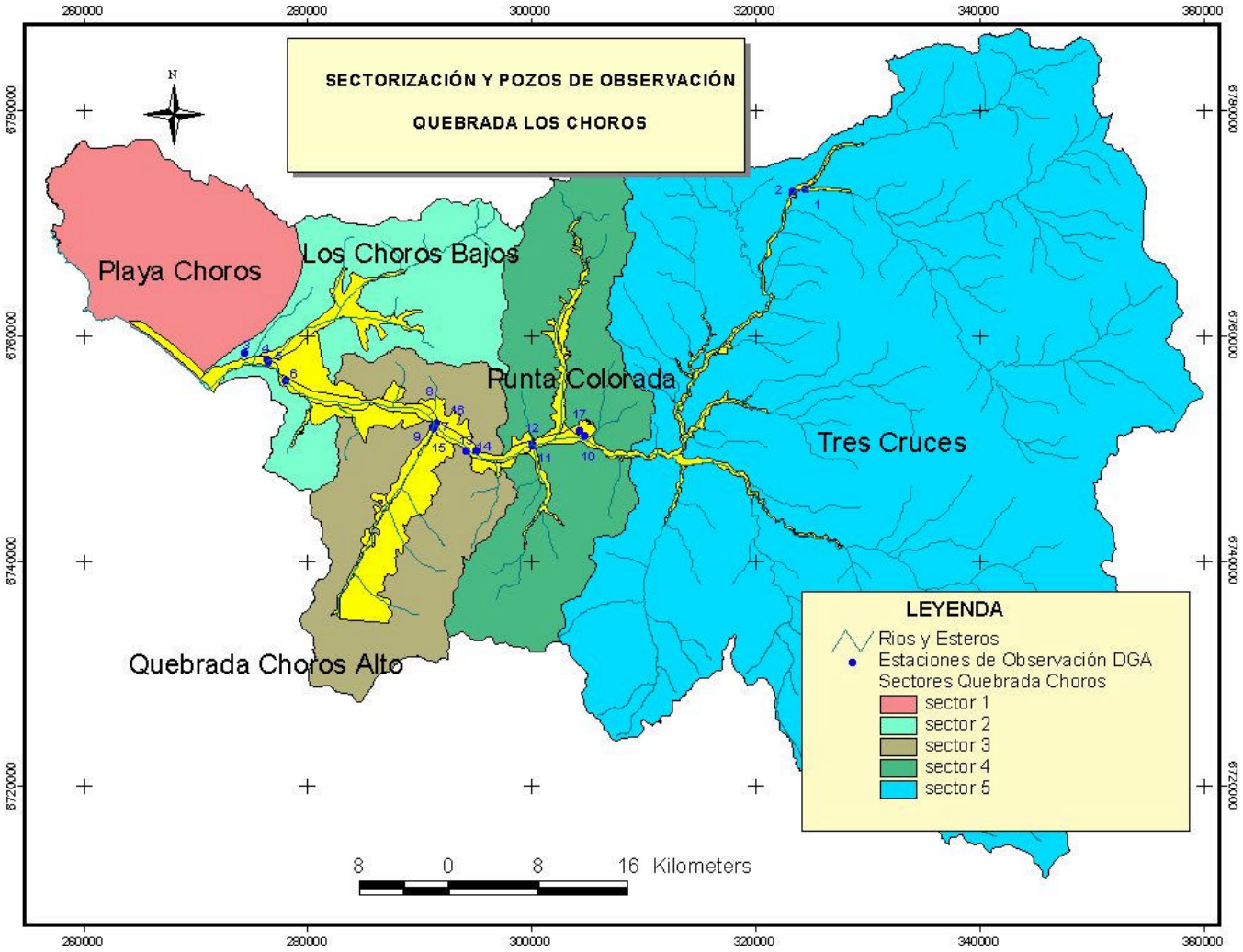
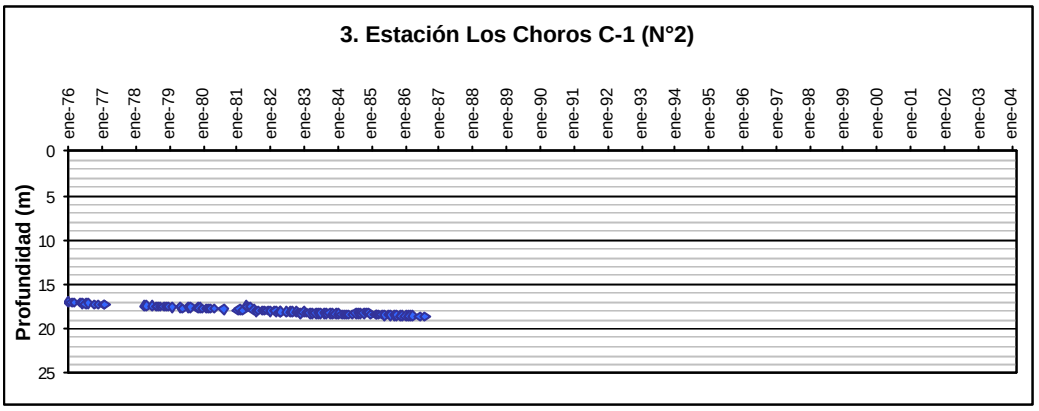


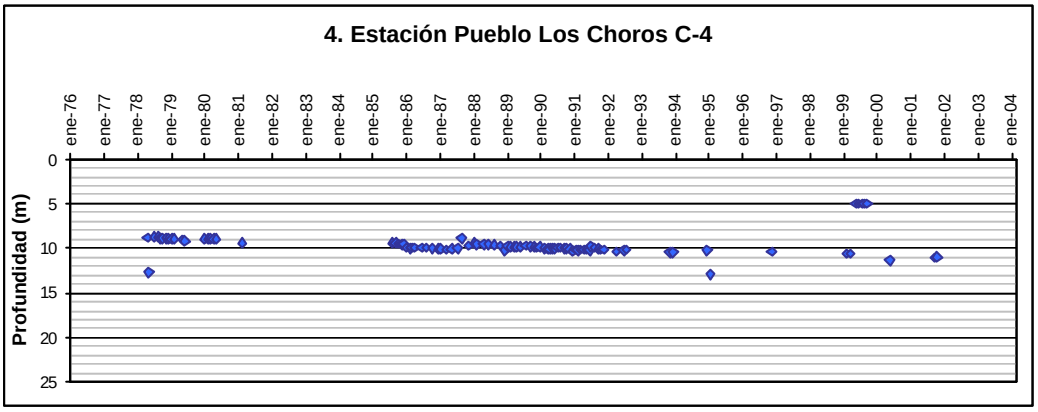
Figura N°4: Puntos de Monitoreo Niveles DGA.

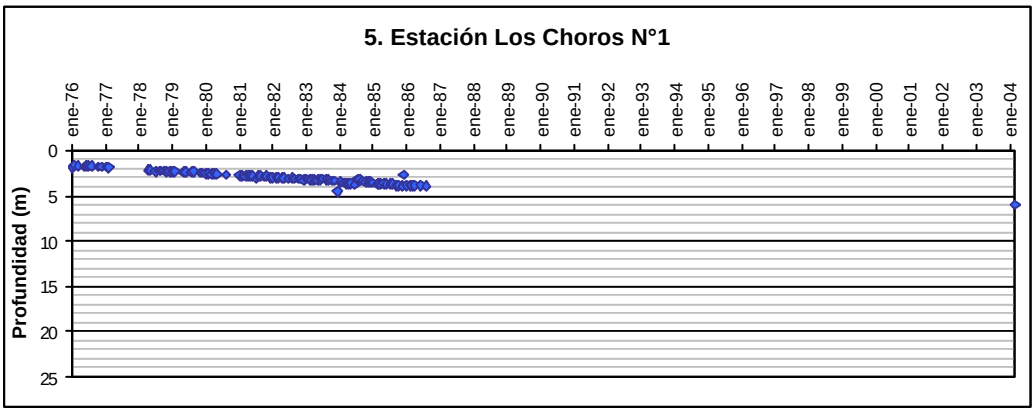
Fuente: SIT N°96, 2004. DGA, Departamento de Estudios y Planificación.

Gráfico N°2: Niveles Observados DGA en sector 2 Choros Bajos

SECTOR 2: LOS CHOROS BAJOS



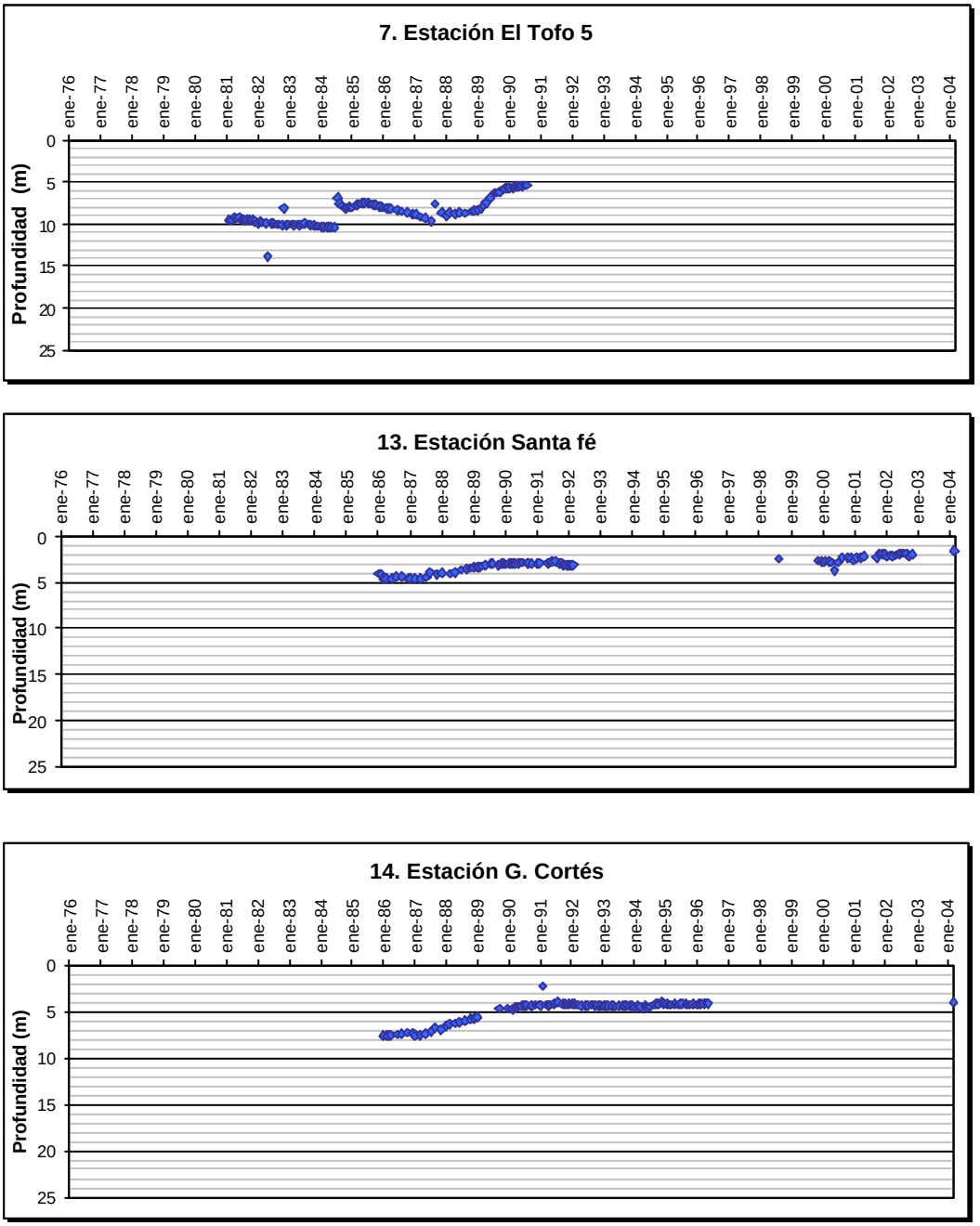




Fuente: SIT N°96, 2004. DGA, Departamento de Estudios y Planificación

Gráfico N°3: Niveles Observados DGA en sector 3 Choros Alto

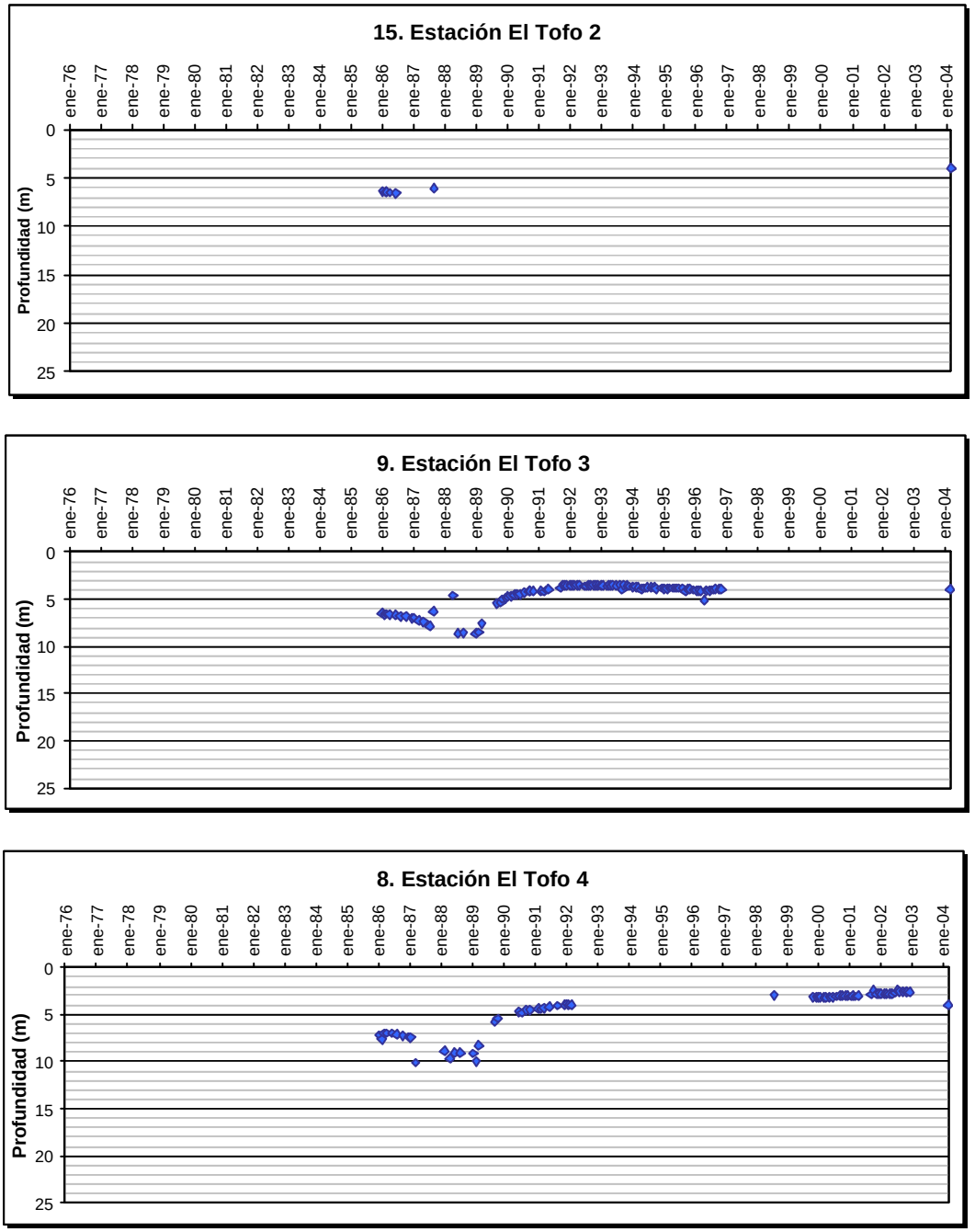
SECTOR 3: LOS CHOROS ALTO



Fuente: SIT N°96, 2004. DGA Departamento de Estudios y Planificación

Gráfico N°4: Niveles Observados DGA en sector 3 Choros Alto

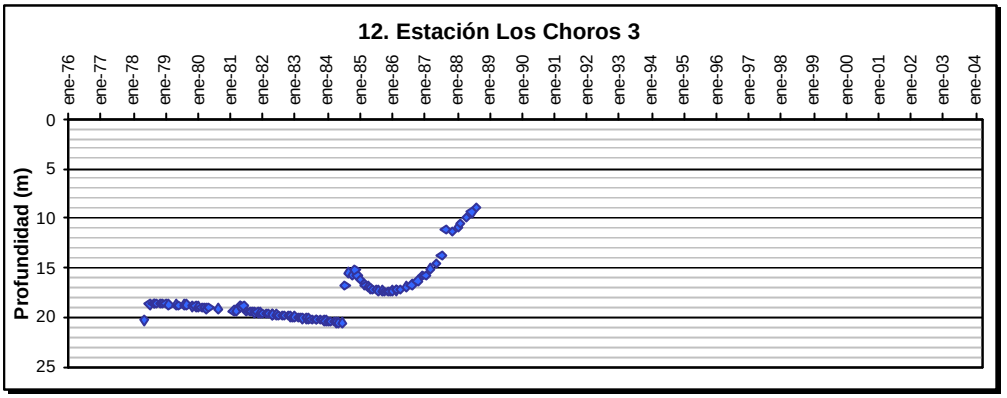
SECTOR 3: LOS CHOROS ALTO

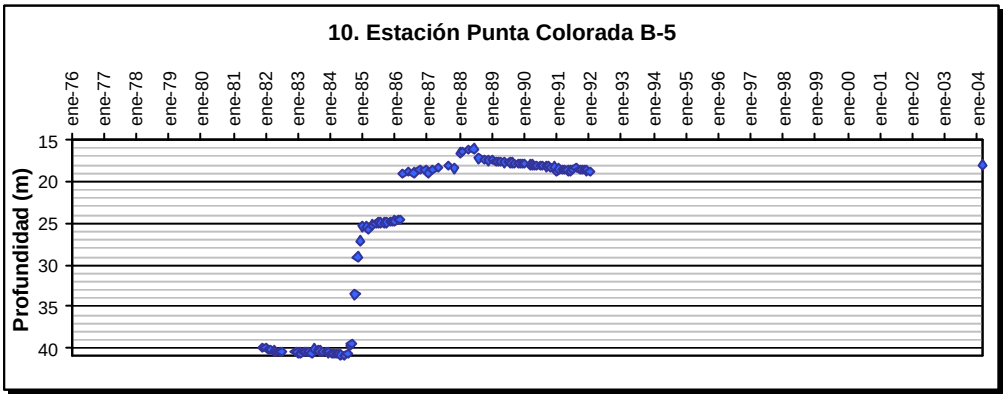


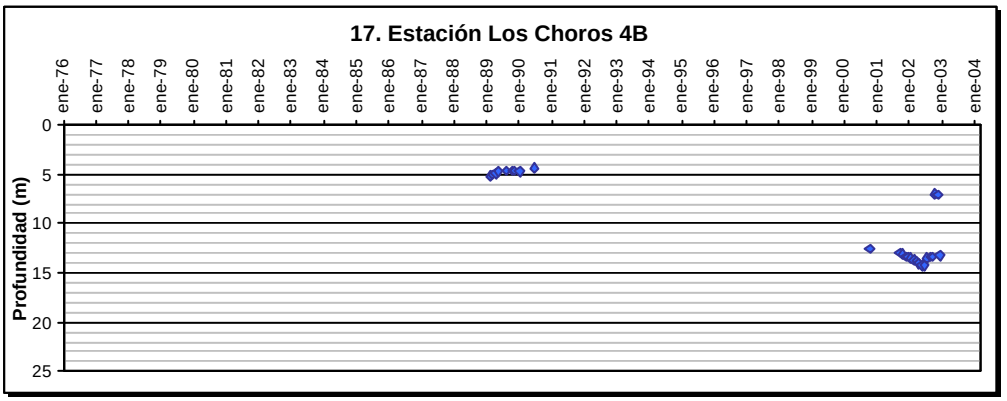
Fuente: SIT N°96, 2004. DGA Departamento de Estudios y Planificación

Gráfico N°5: Niveles Observados DGA en sector 4 Punta Colorada

SECTOR 4: PUNTA COLORADA



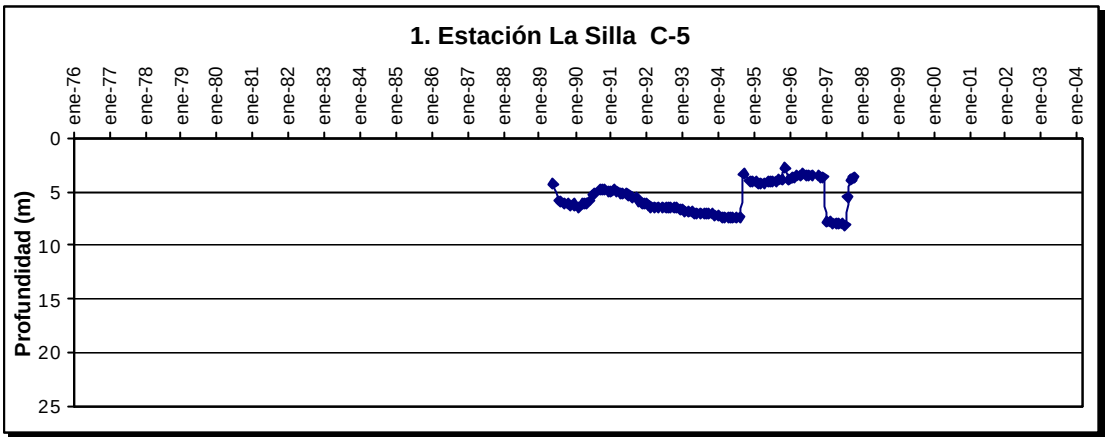


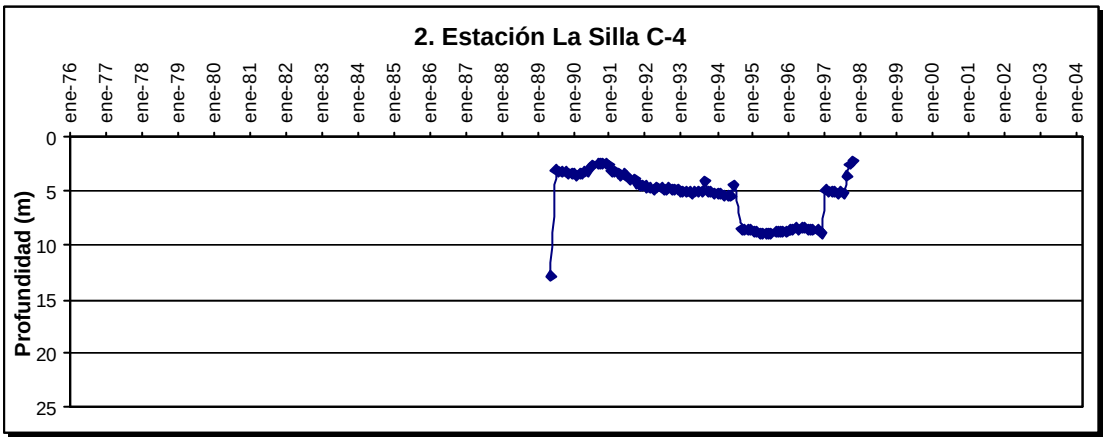


Fuente: SIT N°96, 2004. DGA Departamento de Estudios y Planificación

Gráfico N°6: Niveles Observados DGA en sector 5 Tres Cruces

SECTOR 5: TRES CRUCES (ALTO)





Fuente: SIT N°96, 2004. DGA Departamento de Estudios y Planificación

Los niveles de la cuenca Quebrada Los Choros, se presentan sólo para algunas estaciones con datos actuales, y lo que se desprende de ellos es lo siguiente:

- Para el sector 1, no existen registros de niveles, pero seguramente el nivel de la napa está muy cerca del nivel de terreno, al tener en cuenta los niveles del sector 2 y por estar en el sector de la costa.

- Para el sector 2, Choros Bajos - pozos 3,4,5 y 6 – la profundidad de la napa se encuentra entre los 3 a 15 m del nivel de terreno y presenta una leve tendencia al descenso. El pozo 4, indicaría para esta zona una leve recuperación para los años más actuales.

- El sector3, Choros Alto –pozos 7,8,9,13,14,15,16- presentan una profundidad del nivel freático que varía entre los 3 y 10 m de profundidad. Los niveles indican que ha habido una tendencia a la recuperación para los años más actuales, dejando la profundidad al borde de los 5 metros solamente.

- El sector 4, Punta Colorada –pozos 10, 11, 12 y 17- presentaban profundidades de alrededor de los 20 a 40 a mediados de los 80s, sin embargo, los niveles se han recuperado sustancialmente llegando en la actualidad a rangos que varían entre los 5 y 15 m.

- Para el sector 5, Tres Cruces, lamentablemente se tienen sólo 2 pozos de observación, y en la parte alta de la subcuenca, La Silla 1 y La Silla 2, que estando ubicados muy cerca presentan una inconsistencia en sus niveles observados, ya que cuando para La Silla 1 los niveles suben, en ese mismo período para La Silla 2, los niveles bajan. El rango en que se mueven los niveles freáticos es de 2 a 10 m.

Parámetros elásticos

Del análisis de 37 sondajes y norias existentes en la cuenca de Los Choros realizados en el "Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros" se obtuvieron los valores medios de los parámetros elásticos de transmisividad y permeabilidad. Este último, fue trabajado y estimado espacialmente con el fin de lograr una mejor representación del valor medio de la permeabilidad por sector.

Tabla N° 2: Permeabilidades estimadas por Sector

SECTOR	Permeabilidad (m/s)
Tres Cruces	$8,6 \times 10^{-5}$
Punta Colorada	$4,2 \times 10^{-5}$
Quebrada Choros Altos	$1,3 \times 10^{-4}$
Choros Bajos	$5,0 \times 10^{-5}$
Playa Los Choros	$5,0 \times 10^{-5}$

Recargas y Descargas

Dado que la cuenca de la quebrada Los Choros no tiene su límite oriental en la Cordillera de los Andes, sino en cadenas montañosas de menor altura, como es la Cordillera de La Punilla cuyas cumbres más altas no superan los 4.000 m.s.n.m., el aporte de aguas provenientes del derretimiento de nieves es muy limitado. Por lo tanto, la casi exclusiva recarga actual de los acuíferos proviene de las percolaciones producto de las precipitaciones.

Dado que el área cubierta por sedimentos (212 km^2) representa sólo un 5,2% del área total de la cuenca de la quebrada Los Choros, que alcanza a 4.058 km^2, y considerando que en general los acuíferos existentes son libres, las ocasionales precipitaciones ocurridas sobre la cuenca escurren sobre las zonas montañosas impermeables para infiltrarse en la zona de rellenos y recargar los acuíferos. Sólo con ocasión de lluvias especialmente intensas la quebrada Los Choros presenta escurrimientos superficiales.

Asimismo, la casi exclusiva descarga de los acuíferos de la quebrada Los Choros, corresponde a la explotación de las captaciones existentes. Éstas se describen a continuación.

EXPLOTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

Las extracciones del recurso hídrico en la cuenca de la quebrada Los Choros, con fines de satisfacer las necesidades de alguna actividad económica en particular, ocurren únicamente como explotación de aguas subterráneas mediante pozos o norias; no existen infraestructura alguna para el riego superficial (canales ni embalses). No existen escurrimientos superficiales sostenidos en el tiempo a lo largo del cauce de la quebrada, sólo algunos tramos en los que ocurren alumbramientos del escurrimiento subterráneo. Estos alumbramientos tienen lugar especialmente en la parte alta de la cuenca, sector denominado Junta Chincoles y en la parte media-baja de la confluencia de Choros Altos con la Quebrada principal de los Choros.

Históricamente, el uso del recurso queda determinado considerando como fuente el Estudio (REF 3) *"Mejoramiento del riego en Choros Bajos* (Niemeyer, 1971)" en donde se señala que el uso en riego para esa época ascendía tan sólo a 73 l/s de un total de 103 l/s utilizados para éste y otros fines, como doméstico y minero.

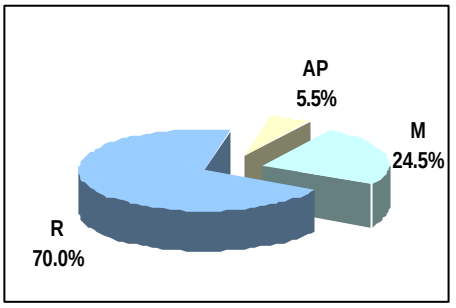


Figura N°5: Situación explotación 1971
Fuente: Niemeyer 1971.

La situación actual 2004, no está tan alejada de la realidad de 1971. En marzo del 2004, la Dirección General de Aguas llevó a cabo una campaña de terreno en la Qda. Los Choros, enmarcada dentro del Estudio “Modelación Hidrogeológica de la Quebrada Los Choros” desarrollada como parte de una Tesis de Grado de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, en la cual se hizo un completo catastro de la situación actual de pozos y riego de la cuenca. Este catastro arroja una situación mucho más marcada de riego, con un total de 120 pozos en la cuenca, de los cuales realmente sólo 60 están en uso, con exclusividad de riego y uso doméstico la mayoría. El caudal en uso equivale a 66l/s. En la figura N° 6 se puede apreciar gráficamente esta situación.

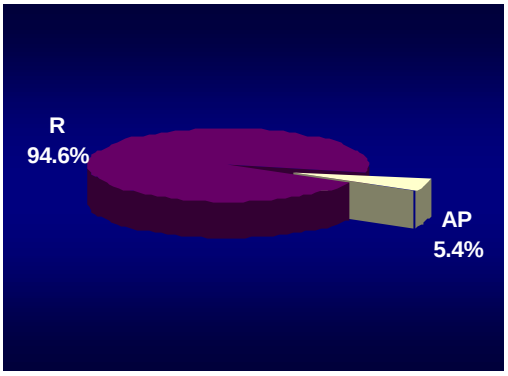


Figura N°6: Situación explotación 2004.
Fuente DEP-DGA 2004

Actualmente en la cuenca de han otorgado derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas por un caudal de 1596 l/s (hasta agosto de 2002), de los cuales un 81 % estarían destinados al uso en Riego.

IV MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El Modelo de Simulación para la Quebrada Los Choros, se encuentra diseñado en ambiente Excel, fue desarrollado en el Informe *"Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros"* . El Modelo es un modelo de balance, que trabaja con sectores los cuales tienen: caudales de entrada, caudales de salida, propiedades hidráulicas, recargas y descargas asociadas a cada uno de ellos, un caudal de bombeo asociado al sector, etc. No considera evapotranspiración de sectores de riego, pues son despreciables y la evapotranspiración natural ya está considerada en el cálculo de la recarga en base a la escorrentía que entrega el modelo pluvial MPL.

IV.1 *Metodología para el Cálculo de Caudales de Recarga hidrológica.*

La recarga del sistema acuífero se estima en función de los caudales de escorrentía superficial. Éstos fueron generados mediante el modelo pluvial de generación de escorrentía para cuencas no controladas MPL (para mayor detalle sobre este modelo pluvial ver Anexo A de Informe *"Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IV Región".SIT N°96 de 2004*).

La evaporación se estimó con el método de Turc, corregido según los resultados obtenidos en el estudio (REF 4) *"Hidrogeología de la Quebrada Los Choros, Corfo, 1971*". Debido a que el método de Turc sobreestima la evapotranpiración real, ésta fue corregida en un 22,9%. Este porcentaje se definió en función de la relación EVTP/PP (Evapotranspiración real/ precipitación) obtenida del estudio antes mencionado (REF 4) equivalente a 0,84.

En la tabla 3, se muestran los valores de evaporación mensual adoptados para la modelación.

Tabla N° 3: Evaporación mensual (mm)

ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
98,5	60,7	33,1	23	33,1	60,8	98,5	136,3	163,9	174	163,9	136,2

La estación pluviométrica base utilizada para el cálculo de los caudales fue la estación Junta del Carmen, con una precipitación media anual de 55.4 mm/año en el período comprendido entre abril de 1965 y marzo 2004. Tabla 5.

En el *"Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros"*, GCF 2004, se correlacionaron las estaciones: La Serena Aeropuerto, Vicuña, Rivadavia y Junta de El Carmen con El Trapiche, ubicada en la zona de estudio, pero con un registro limitado. Los resultados más favorables de ese proceso, se obtuvieron con Vicuña y Junta del Carmen, pero se eligió esta última porque cubre un extenso período de tiempo que incluye hasta el presente año, se ubica al norte del área de estudio (condición más desfavorable) y se encuentra en una elevación semejante a la del valle de la Quebrada Los Choros en el sector Tres Cruces. El ajuste de la correlación lineal entregó un coeficiente de correlación igual a 0.8445.

El modelo MPL requiere además de una serie de otros parámetros, que se describen a continuación, en la tabla 4:

Tabla N° 4: Parámetros utilizados por el Modelo MPL

Parámetro	Descripción
AREA	Area de la cuenca o subcuenca, en Km2
Si	Grado de humedad inicial, condición inicial de modelación = 0,01
Ezi	Escorrentia subterránea inicial, condición inicial de modelación =0,001 m3/s
A	coeficiente de precipitación. (adimensional), Factor de transposición. Multiplica el dato de lluvia de la estación base o patrón , con el fin de obtener la lluvia media sobre la cuenca o sector
B	coeficiente de evapotranspiración (adimensional) Cuociente entre la evapotranspiración potencial de la sub cuenca o sector y la Evaporación media del evaporímetro (base o patron representativa de toda la cuenca)
FC	Tasa de infiltración correspondiente a suelo saturado (s=1) (mm/día)
ALFA	Variación de la tasa de infiltración por unidad de variación del grado de humedad
Smin	Grado de humedad correspondiente al punto de marchitez permanente
Scrit	Grado de humedad crítico bajo el cual se restringe la evapotranspiración
Scc	Grado de humedad correspondiente a la capacidad de campo
Hmáx	Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado (mm)
K	Constante de tiempo del embalse subterráneo (días)
Pmín	Porcentaje de la lluvia que se manifiesta como escorrentía superficial inmediata

*Los valores con **negrita** son parámetros de calibración*

El valor del Área es estimado a partir de medición directa desde la cobertura de los sectores en Arcview.

El valor del coeficiente A, se calcula para cada sector como el cuociente entre la precipitación media mensual al sector y la precipitación media de la estación base. El cálculo de la precipitación media mensual del sector se estimó en base a una relación precipitación elevación, desarrollada por *"Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Los Choros",* GCF 2004 y que consiste en definir un perfil de precipitaciones medias

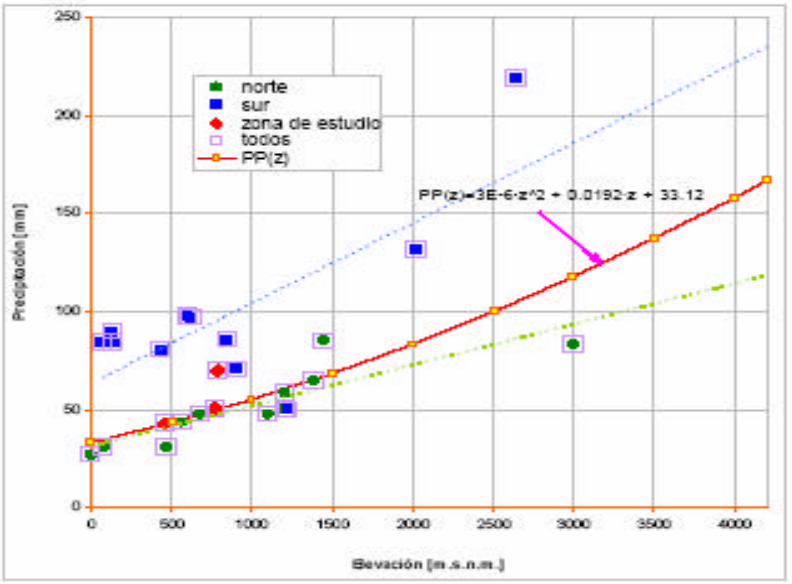
mensuales considerando 24 estaciones pluviométricas que abarcan desde la III a IV regiones. El gráfico N° 7 muestra el ajuste de la curva.

Tabla N° 5: Estadística Pluviométrica Estación Base

ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES MENSUALES [mm]
ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA DGA---JUNTA EL CARMEN

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
65/66	1	11	5,1	80,1	16,9	0	0	0	0	0	0	0	114,1
66/67	0	0	22,5	0	4,5	0	0	0	0	0	0	0	27
67/68	0	0	30,3	0	0,8	11,5	0	0	0	0	0	0	42,6
68/69	0	0	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5
69/70	0	0	2,5	0	20,8	0	0	0	0	0	0	0	23,3
70/71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71/72	0	0	4,5	0	31,3	25,7	0	0	0	0	0	0	61,5
72/73	0	0	12	32	34	0	0	0	0	0	0	0	78
73/74	9,5	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	12,5
74/75	0	0	6,5	0	0	10	0	0	0	0	0	0	16,5
75/76	0	32	12	0	4,5	0	0	0	0	0	3	0	51,5
76/77	0	38	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	62
77/78	2,5	0	2	27	16	0	0	0	0	0	0	0	47,5
78/79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79/80	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	1,5
80/81	31,9	0	1,5	58	10,5	0	0	0	0	0	0	0	101,9
81/82	0	0	0	5,5	7	3	0	0	0	0	0	0	15,5
82/83	0	11,5	11,5	11	0	0	0	0	0	0	0	0	34
83/84	1	0	27	50	23	6	1,5	0	0	0	0	33	141,5
84/85	0	0	6	164,5	0	0	0	0	0	0	0	0	170,5
85/86	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	27
86/87	0	17,5	0	4	26	0	2,6	0	0	0	0	0	50,1
87/88	0	36	0	125,4	4	0	1,5	0	0	0	0	0	166,9
88/89	0	0	0	0	0	4,5	0	0	0	0	0	0	4,5
89/90	1	1	0	4,7	31	0	0	0	0	0	0	0	37,7
90/91	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	14
91/92	0	0	129,5	23,5	0	0	0	0	6,9	0	0	65	224,9
92/93	8	19,4	42	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	70,9
93/94	0	0	0	0	12,5	0	0	0	0	0	0	0	12,5
94/95	0	0	0,3	3	1,5	0	0	0	0	0	0	0	4,8
95/96	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5
96/97	0	0	0	0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	1,5
97/98	0	0	87,5	0	147	0	0	0	0	0	0	0	234,5
98/99	0	0	26	14	0	0	0	0	0	0	0	0	40
99/00	0,1	0	4	0	0	5,4	5,5	0	0	0	0	0	15
00/01	0	23,5	48	32,5	0	0	0	0	0	0	0	0	104
00/02	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4
00/03	4,5	53,5	13,7	42,5	27	0	0	0	0	0	0	0	141,2
00/04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,1	2,1
PROMEDIO	1,5	6,2	12,7	18,6	11,5	1,7	0,3	0,0	0,2	0,0	0,1	2,6	55,4

Gráfico N°7: Relación Precipitación-Escorrentía



Así entonces, se estin

Tabla N° 6: Factores de Transposición "A" por Sector

SECTOR	PP(z) (mm)	Factor Transposición A
Playa Los Choros	36.1	0.652
Choros Bajos	47.9	0.865
Quebrada Choros Altos	36.1	0.652
Punta Colorada	51.6	0.932
Tres Cruces	49.4	0.891

El resto de los parámetros son asumidos en base a la experiencia de aplicación del modelo MPL en otras cuencas y corresponden a parámetros calibrables. La forma de validar dichos parámetros es en base a la metodología de cálculo de escorrentía usada en el Balance Hídrico de Chile - DGA 1987, y que ha sido desarrollada por GCF Ingenieros Consultores. Allí se determinan la evapotranspiración, mediante un perfil de temperaturas, antecedentes morfométricos de la cuenca, y todos los cálculos se desarrollan en función de la altura. A continuación se presenta un cuadro resumen con los valores medios obtenidos para cada sector.

Tabla N° 7: Resultados balance hídrico Qda Los Choros.

Sector	Elev Prom (m.sn.m.)	Area Total (Km2)	Temp °C	Precipit. mm	EVPT. mm	VPT cor mm	Esc mm	Qesc l/s	Qesc (mm) (m3/s)
S1-Playa Los Choros	150	302.5	15.9	36	40	30.9	5.2	50	0.050
S2-Los Choros Bajos	673	332	15.9	48	53	40.9	7	74	0.074
S3-Quebrada Choros Alto	545	398.8	15.9	45	49	38.1	6.5	82.4	0.082
S4-Punta Colorada	843	450.7	15.9	51.6	57.2	44.1	7.6	108	0.108
S5-Tres Cruces	1817	2688	14.4	79.6	87	66.9	12.7	1082	1.082
							Total	1396.4	1.40

Elev Prom *Elevacion Promedio*
EVPT. *Evapotranspiración*
EVPT corrg *Evapotranspiración corregida*
Esc *Escorrentia Total*
Qesc *Caudal de Escorrentía Total*
Qesc (mm) *Caudal de Escorrentía media mensual (promedio)*

A continuación, en la Tabla 8, se presenta el resumen de los parámetros utilizados por sector para la obtención de los caudales generados por el Modelo MPL.

Tabla N° 8: Valores de los parámetros utilizados en el MPL

Sector	AREA	Si	Ezi	A	B	Pmin	Hmax	K	FC	ALFA	Smin	Scrit	Scc
	Km2	°/1	m3/s	adim	adim	%	mm	dias	mm/dia	adim	°/1	°/1	°/1
1	302.5	0.01	0.01	0.652	0.5	0.142	250	18	0.7	35.0	0.3	0.8	0.9
2	332.0	0.01	0.01	0.865	0.5	0.143	250	18	0.7	35.0	0.3	0.8	0.9
3	302.5	0.01	0.01	0.652	0.5	0.142	250	18	0.7	35.0	0.3	0.8	0.9
4	450.7	0.01	0.01	0.932	0.5	0.143	250	18	0.7	35.0	0.3	0.8	0.9
5	2668.0	0.01	0.01	0.891	0.5	0.255	250	18	0.7	35.0	0.3	0.8	0.9

En el Anexo B del Informe "Evaluación de los Recursos Hídricos en la quebrada Los Choros, IVª Región de Coquimbo", SIT N°96 DE 2004, se presentan los valores a escala mensual de los caudales generados sintéticamente por el Modelo MPL, que se resumen como sigue:

Tabla N° 9: Resumen caudales generados por MPL

Sector	Qesc (prom) Balance Hidrico	MPL		
		Vólumenes totales	Vólumenes Promedio	Q promedio
	(m3/s)	[Mm3]	[Mm3]	(m3/s)
S1-Playa Los Choros	0.050	1341	0.13	0.050
S2-Los Choros Bajos	0.074	134	0.19	0.073
S3-Quebrada Choros Alto	0.082	62	0.13	0.050
S4-Punta Colorada	0.108	91	0.29	0.108
S5-Tres Cruces	1.082	62	2.87	1.080
	1.396	1690	3.61	1.361

La forma de validar el modelo de generación de caudales de escorrentía MPL, y de calibrar los parámetros al no contar con estaciones fluviométricas en toda la cuenca, se realiza en base a los caudales de escorrentía obtenidos mediante la metodología del Balance Hídrico, cuyos resultados se presentaron en la tabla 7 y tabla 9. Así se puede ver que los valores medios por sector tienen un buen ajuste.

Los caudales de recarga asociados a cada sector dependen de las características hidrogeológicas de cada uno y del escenario de explotación supuesto. La regla de extracción adoptada influye en la cuantía de la recarga, dado que el bombeo produce un vaciamiento del volumen almacenado y por consiguiente, genera una disponibilidad espacial para admitir flujos de recarga.

Considerando las capacidades de conducción e infiltración del acuífero, la escorrentía superficial y los caudales de bombeo, se elaboró en el Informe de GCF 2004, la metodología que se expone a continuación.

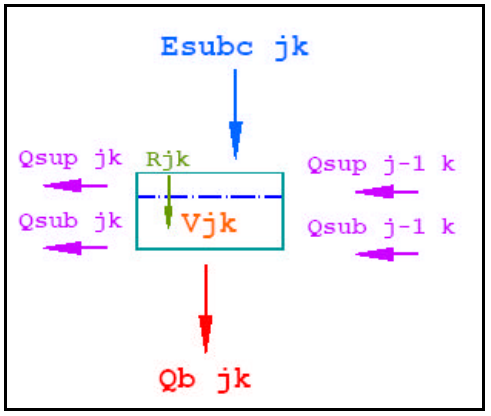


Figura N°7: Esquema conceptual para estimación de Recarga hidrológica.

En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo representativo de cada sector. La recarga se calculó según el siguiente algoritmo válido para los meses k = 1,..., 480 y los sectores j = 1, 2, 3, 4 y 5.

Volumen de escorrentía Total Sector j:

$$(E)_{jk} = (E_{subc})_{jk} + (Q_{sub})_{j-1\,k} + (Q_{sup})_{j-1\,k}$$

con:

$(E_{subc})_{jk}$: Volumen de escorrentía generada en el tramo j
$(Q_{sub})_{j-1\,k}$: Volumen de escorrentía subterránea saliente generada el tramo j-1 (tramo de aguas arriba)
$(Q_{sup})_{j-1\,k}$: Volumen de escorrentía superficial saliente generada el tramo j-1 (tramo de aguas arriba)

Volumen inicial para admitir recarga en mes k:

$$\text{Si } [V_{j\,k-1} - (Q_b)'_{jk} - (V_{cce})_{jk}] > (V_j)_{min} \rightarrow V'_{jk} = [V_{j\,k-1} - (Q_b)'_{jk} - (V_{cce})_{jk}]$$
$$\text{y } (Q_b)_{jk} = (Q_b)'_{jk}\text{ ; si no } \rightarrow V'_{jk} = [(V_j)_{min} \text{ y } (Q_b)_{jk} = V_{j\,k-1} - (V_j)_{min}]$$

con

$V_{j\,k-1}$: Volumen final mes k-1 (mes anterior)
$(Q_b)'_{jk}$: Volumen de bombeo en sector j y mes k
$(V_{cce})_{jk}$: Volumen asociado a la capacidad de retención de agua del suelo en sector j y mes k (ver más adelante)
$(Q_b)_{jk}$: Volumen de bombeo factible en sector j y mes k

Volumen de recarga al sector j en mes k:

$$\text{Si } (E)_{jk} > \min\{(R_j)_{max}; (V_{j\,max} - V'_{jk})\} \rightarrow R_{jk} = \min\{(R_j)_{max}; (V_{j\,max} - V'_{jk})\}$$
$$\text{si no } \rightarrow R_{jk} = (E)_{jk}$$

con

R_{jk} : Volumen de recarga hidrológica al sector j en mes k
$(R_j)_{max}$: Volumen asociado a capacidad de conducción vertical máxima del tramo de acuífero correspondiente al sector j
$V_{j\,max}$: Volumen del acuífero a plena capacidad
V'_{jk} : Volumen inicial para admitir recarga en mes k
$(E)_{jk}$: Escorrentía Total Sector j

Debido a la extracción de aguas por el bombeo desde los pozos, se induce una recarga por recuperación que vuelve a la napa (recarga inducida). Es decir, la recarga total final se calcula como la suma de la recarga hidrológica y la recarga inducida. Por lo tanto:

$$(R_{jk})_{total} = R_{jk} + (R_{jk})_{ind}$$

con

$(R_{jk})_{total}$: Volumen de recarga total al sector j en mes k
R_{jk} : Volumen de recarga hidrológica al sector j en mes
$(R_{jk})_{ind}$: Volumen de recarga inducida al sector j en mes k

Volumen final mes k

$$V_{jk} = (R_{jk})_{total} + V'_{jk}$$

con

$(R_{jk})_{total}$: Volumen de recarga total al sector j en mes k
V'_{jk} : Volumen inicial para admitir recarga en mes k

Se consideró la capacidad de retención de agua del suelo (S_{cc}) igual a un 5% del volumen no saturado de cada sector. Aquel valor corresponde a un porcentaje intermedio entre los valores asociados a suelos arenosos (2%) y suelos arcillosos (9%)[‡]. El volumen de capacidad de retención se calculó según la siguiente función:

$$\text{Si } (R_{j\,k-1} > (V_{ccp})_{j\,k-1}) \rightarrow (V_{cce})_{jk} = 0\text{ ; si no } \rightarrow (V_{cce})_{jk} = (V_{ccp})_{j\,k-1} - R_{j\,k-1}$$

con

$(V_{ccp})_{j\,k-1} = S_{cc} \cdot (V_{stot} - V'_{jk})$
$(V_{ccp})_{j\,k-1}$: Volumen de capacidad de retención máxima del sector j en mes k-1
V_{stot} : Volumen saturado total (volumen de relleno · almacenamiento)
V'_{jk} : Volumen inicial para admitir recarga en mes k
$(V_{cce})_{jk}$: Volumen asociado a la capacidad de retención del sector j en mes k

IV.2 *Datos de Entrada*

Los datos base utilizados en la estimación de las recargas se definieron en función de los antecedentes disponibles y siguiendo criterios conservadores. (Fuente GCF 2004)

El relleno fluvial del área es bastante grueso, luego la porosidad efectiva puede alcanzar valores de hasta un 13%; conservadoramente se adoptó un valor de un 10 %, para ese parámetro, para todos los sectores.

Porosidad efectiva (coeficiente de almacenamiento): **S = 0.10**

La permeabilidad vertical no debería diferir demasiado de la permeabilidad horizontal, dado que el relleno no ha sufrido procesos de estratificación importantes que hayan alterado su isotropismo. A pesar de ello, se optó por utilizar una permeabilidad vertical equivalente al 10 % de la permeabilidad horizontal.

Factor para relacionar Kh con Kv: Fk = 0.10

Kv = 0.1 · Kh

La capacidad de conducción vertical del medio se calculó en función de tasas de infiltración estimadas utilizando el método de Green-Ampt. En la tabla 10 se muestran las tasas obtenidas.

Tabla N° 10: Cálculo de tasas de infiltración

CALCULADAS CON EL MÉTODO DE GREEN AMPT

$f = k_v \cdot F_0 / (F_0 - S_f \cdot (F - ?_i) \cdot Ln(1 + F_0 / [S_f \cdot (F - ?_i)])$

Green Ampt Model

Sector	k_h	k_v	F_0	S_f	F	$?_i$	f_p	
	[m/s]	[m/s]	[m]	[1]	[1]	[1]	[m/s]	[l/s/Ha]
Tres Cruces	8.6E-05	8.599E-06	1.7	0.0495	0.1	0.05	8.681E-06	87
Punta Colorada	4.2E-05	4.167E-06	2.7	0.0495	0.1	0.05	4.194E-06	42
Qda. Choros Altos	1.3E-04	1.273E-05	7.9	0.0495	0.1	0.05	1.276E-05	128
Choros Bajos	5.0E-05	5.000E-06	5.3	0.0495	0.1	0.05	5.018E-06	50
Playa Los Choros	5.0E-05	5.000E-06	3.6	0.0495	0.1	0.05	5.025E-06	50

Nota: Los valores de F_0 se estimaron de manera iterativa de utilizando los resultados del modelo y varían para cada escenario.

k_h: permeabilidad horizontal k_v: permeabilidad vertical F_0: longitud media entre nivel de terreno y nivel freático $f = k_v \cdot F_0 / (F_0 - S_f (\Phi - \theta_i) Ln(1 + F_0 / [S_f (\Phi - \theta_i)])$	S_f: succión efectiva Φ: porosidad efectiva θ_i: humedad inicial

§ Expresión y valores de parámetros obtenidos de "Handbook of Hydrology, David R. Maidment, 1993"

** Sf: succión efectiva = 0.0495, corresponde a un valor medio del rango asociado a la succión en terrenos arenosos (entre 0.0097 y 0.2536 m), obtenido de referencia 1. La succión en arena es menor que la se produciría en terrenos con más arcilla, por lo tanto, el asumir un relleno arenoso es más conservador.

Para realizar una **calibración** del modelo se necesita contar con un registro histórico de niveles, desagregados por sector y con una distribución histórica mensual durante los años 1965 hasta 2004. Como ello no se cuenta, lo que se hizo para verificar que la variación del volumen almacenado fuese realista, se utilizó como referencia el limnigrama registrado en un pozo de control de niveles de la D.G.A., ubicado en Punta Colorada B-5 Estación Nº10.

Del gráfico, considerado como referencia, se puede concluir que la máxima variación de nivel en ese pozo es de 25 m y el nivel freático más superficial alcanza los 15 m de profundidad. El relleno en ese sector tiene un espesor del orden de 100 m; por lo tanto, el volumen almacenado ha variado entre un 60% (40 m de profundidad) y un 85% (15 de profundidad) del volumen total, en el período de medición.

Dado que el sistema modelado será sometido a una extracción más intensa que la verificada históricamente en Punta Colorada, se ha adoptado como límite inferior un 35% de volumen almacenado (en vez de un 60%) y se ha mantenido el 85%, como límite superior. Es decir, el acuífero, según la representación elaborada, se puede deprimir hasta un 35% de su volumen total y se puede llenar hasta un 85% de éste. Por lo tanto, los escenarios evaluados consideran entre los aportes que sustentan la extracción, parte del volumen almacenado en cada sector.

Porcentaje mínimo de saturación (c/r al volumen máximo disponible): PSmin = 35 [%]
Porcentaje máximo de saturación (c/r al volumen máximo disponible): PSmax = 85 [%]

Se estimó la geometría y la permeabilidad del relleno existente en cada sector. Las extensiones de las superficies de relleno consideradas, se limitaron de manera conservadora, para no sobreestimar el área de relleno. Las permeabilidades horizontales se adoptaron en función de los valores obtenidos de los datos registrados en las pruebas de bombeo realizadas en los pozos existentes en el área. Los parámetros asociados a cada sector se presentan en la Tabla 11.

Tabla N° 11: Características Geométricas y Permeabilidades

Sector	Kh [m/s]	i [1]	L [Km]	S [1]	H [m]	NEi [m]	Ar [m2]
S5-Tres Cruces	8.6E-05	0.019	44.60	0.10	35	5	2.29E+07
S4-Punta Colorada	4.2E-05	0.010	12.98	0.10	60	9	1.66E+07
S3-Quebrada Choros Alto	1.3E-04	0.010	16.61	0.10	55	8	2.70E+07
S2-Los Choros Bajos	5.0E-05	0.010	9.16	0.10	40	6	4.09E+07
S1-Playa Los Choros	5.0E-05	0.010	11.31	0.10	25	4	1.05E+08

Kh [m/s]	Coeficiente de permeabilidad horizontal
i [1]	Gradiente flujo subterráneo
L [Km]	Largo del cauce principal
S [1]	Coeficiente de almacenamiento
H [m]	Espesor medio de relleno
NEi [m]	Nivel estático inicial (actual)
Ar [m2]	Área de relleno (planta)

IV.3 *Funcionamiento de la Planilla*

El modelo fue desarrollado en ambiente Excel, tiene incorporado 8 hojas de cálculo, las cuales corresponden a:

Hoja 1: Modelo. Detalle de los cálculos de la Modelación
Hoja 2: Tasas de Infiltración. Obtención de las infiltraciones máx.
Hoja 3: Q generado. Detalle de los Caudales y Volúmenes Generados con el MPL
Hoja 4: Data. Datos de resultados por sector ordenados vectorialmente para facilitar la obtención de gráficos, referenciados a la hoja Modelo.
Hoja 5: Gráficos Recarga
Hoja 6: Gráficos Escorrentía
Hoja 7: Gráficos Niveles
Hoja 8: Gráficos Bombeo

La Hoja 1: Modelo, que es la hoja principal para la modelación, resulta ser muy explicativa para el usuario, pues se encuentra desarrollada de tal manera que están separados los datos de entrada básicos de los resultados directos, y de los procesos a nivel mensual, tal como se muestra de ejemplo en la tabla 12.

Así mismo, en la misma hoja de cálculo se encuentran descritos el significado de cada uno de los parámetros, como los cálculos a nivel promedio por sector, Tabla 13.

Para los datos de entrada, hay algunos que son independientes y otros que son función de los demás valores de entrada. Existe un análisis más detallado para el Sector de Tres Cruces y se debe a que por un lado existe mayor interés, el cual fue el motivo del estudio de GCF y por otro lado porque el sector es mucho más grande que el resto.

En la misma hoja, se encuentran los cálculos de los procesos mensuales de:

- Volumen de escorrentía total en tramo [Mm^3]
- Volumen en tramo (sin recarga) [Mm^3]
- Volumen de Capacidad de Campo Potencial [Mm^3]
- Volumen de Capacidad de Campo Efectiva [Mm^3]
- Volumen de extracción efectiva [Mm^3]
- Volumen de recarga máxima admisible [Mm^3]
- Volumen de recarga efectiva [Mm^3]
- Volumen final (sin descontar caudal pasante) [Mm^3]
- Volumen Pasante Subterráneo [Mm^3]
- Volumen final [Mm^3]

Todos los cálculos se encuentran para cada uno de los sectores a nivel mensual, para luego ser traspasados a caudal y como valores promedios.

El “Volumen de escorrentía total en tramo [Mm^3]” corresponden a los valores entregados por el MPL pero en términos de volumen, que los obtiene mediante una fórmula de referencia con la Hoja 3: Qgenerado.

Todos los cálculos de los volúmenes y estados de los sectores acuíferos, se encuentran hidráulicamente conectados tanto superficial como subterráneamente, por lo que, cualquier efecto en un sector aguas arriba, tendrá implicancias en el sector de aguas abajo.

El cálculo del "Volumen de recarga máxima admisible [Mm^3]", se encuentra en parte de su metodología de cálculo, referenciado a la "Hoja 2:Tasas de Infiltración", la cual tiene explicado completamente en forma muy didáctica cada uno de los datos, ecuaciones y resultados utilizados para la modelación.

El "Volumen de recarga efectiva [Mm^3]" corresponde al menor valor entre el "Volumen de escorrentía total en tramo [Mm^3]" y "Volumen de recarga máxima admisible [Mm^3]. Así la recarga efectiva mensual de cada sector, dependerá del caudal disponible y del bombeo que en la zona se haya impuesto.

El volumen de escorrentía total que llega al sector, corresponde a lo que hay disponible en el sector con sus propios recursos y el volumen sobrante del sector de aguas arriba.

El "Volumen final mensual" corresponde a el "Volumen en tramo" más "Volumen de recarga efectiva" menos "Volumen Pasante Subterráneo".

Dentro de las hojas se encuentran de manera muy ordenada los gráficos de: recargas, escorrentía, niveles y bombeos. Para el fin de este estudio, de evaluar la sustentabilidad de los acuíferos de quebrada Los Choros, el que más interesa considerar son los gráficos de los niveles y que ellos no sobrepasen el umbral definido como aceptable.

Los bombeos se consideraran bombeando todos los meses el caudal otorgado o solicitado total por sector.

En la metodología de evaluar los recursos hídricos, en el modelo sólo se debe indicar el **Caudal Demandado Inicial "Qd [m^3/s]**" y este debe ser comparado con el **Caudal Demandado Factible "Qd-f [m^3/s]"** calculado inmediatamente en las celdas conjuntas. Para que el caudal **Qd** sea factible de explotar, **Qd-f** no debe ser nunca menor que el valor impuesto en **Qd**, en caso contrario se debe intentar con un bombeo demandado inicial menor.

Tabla N° 12: Ejemplo de formato de los valores de Datos de Entrada del Modelo Los Choros.

Modelo de generación de caudales de recarga

Parámetros Bases

Factor para relacionar Kh con permeabilidad vertical (Fk=Kv/Kh)	0.10
Porcentaje mínimo de saturación	0.35
Porcentaje máximo de saturación	0.85

Datos de Entrada
Distribución de Relleno en sector Tres Cruces

ZONA	AREA [m2]	PROF [m]	NE [m]	k [m/s]	Zmin [m.s.n.m.]	Zmax [m.s.n.m.]	DL [m]	L [m]	i [1]
Los Choros	7212824	25	10	0.00010	600	1150	19294	20615	0.02851
Pelícano-Carrizo	8034358	30	12	0.00005	525	650	9246	9800	0.01352
Quebrada Grande	2043890	25	15	0.00003	525	600	4680	5250	0.01603
Tres Cruces	5600018	60	18	0.00014	450	575	7980	8930	0.01566

Datos de Entrada

Sector	Kh [m/s]	i [1]	L [Km]	S [1]	H [m]	NEi [m]	Ar [m2]	T [m2/s]
S5-Tres Cruces	8.6E-05	0.019	44.60	0.10	35	5	2.29E+07	
S4-Punta Colorada	4.2E-05	0.010	12.98	0.10	60	9	1.66E+07	0.0025
S3-Quebrada Choros Alto	1.3E-04	0.010	16.61	0.10	55	8	2.70E+07	0.0070
S2-Los Choros Bajos	5.0E-05	0.010	9.16	0.10	40	6	4.09E+07	
S1-Playa Los Choros	5.0E-05	0.010	11.31	0.10	25	4	1.05E+08	

Resultados directos en función de datos de entrada

Sector	Vrt [m3]	Vrsi [m3]	Vsi [m3]	Ars [m2]	Vsmin [Mm3]	Vsmax [Mm3]
S5-Tres Cruces	8.1E+08	6.9E+08	68.7	15409	28.3	68.7
S4-Punta Colorada	1.0E+09	8.5E+08	84.7	65247	34.9	84.7
S3-Quebrada Choros Alto	1.5E+09	1.3E+09	126.2	75947	52.0	126.2
S2-Los Choros Bajos	1.6E+09	1.4E+09	137.9	150561	57.3	139.1
S1-Playa Los Choros	2.6E+09	2.2E+09	219.5	194051	91.5	222.1

Tabla N° 13: Ejemplo de formato de los valores de Resultados del Modelo Choros. Hoja "Modelo"

Sector	Vol. de esc. tot. gen. en cuenca aport. a sector [Mm3]	Vol. de Esc. total que llega a sector [Mm3]	Vol. de Esc. tot. de salida del sector [Mm3]	Vol. de Esc. subt. de salida del sec. [Mm3]	Vol. de Esc. sup. de salida del sector [Mm3]	Volumen de bombeo ef. del sector [Mm3]	Volumen de rec. ef. del sector [Mm3]	Balance [Mm3]	Volumen final en sector [Mm3]	Volumen inicial en sector [Mm3]
S5-Tres Cruces	1341	1341	1225	11	1214	121	127	-4.7278	64	69
S4-Punta Colorada	134	1359	1193	12	1181	174	178	-7.3135	77	85
S3-Quebrada Choros Alto	62	1255	884	41	843	388	412	-17.1430	109	126
S2-Los Choros Bajos	91	975	969	35	934	6	41	-0.0557	138	138
S1-Playa Los Choros	62	1031	1030	45	984	1	47	0.0577	220	220
Total	1690							-29.1821		

Sector	Qbi [m3/s]	Qb-f [m3/s]	Et [m3/s]	Rind [m3/s]	R [m3/s]	Rtot [m3/s]	Qsubt [m3/s]	Qsup [m3/s]	Balance (m3/s)
S5-Tres Cruces	0.327	0.327	1.089	0.229	0.103	0.332	0.009	0.986	-0.004
S4-Punta Colorada	0.188	0.188	1.104	0.047	0.145	0.192	0.010	0.959	-0.006
S3-Quebrada Choros A	1.129	1.129	1.020	0.814	0.334	1.149	0.033	0.685	-0.014
S2-Los Choros Bajos	0.013	0.013	0.792	0.008	0.034	0.042	0.029	0.759	0.000
S1-Playa Los Choros	0.001	0.001	0.838	0.000	0.038	0.038	0.037	0.800	0.000
Total	1.658	1.658	4.843	1.098	0.654	1.752	0.118	4.189	

Sector	Qd [m3/s]	Qd-f [m3/s]
S5-Tres Cruces	0.098	0.098
S4-Punta Colorada	0.141	0.141
S3-Quebrada Choros A	0.315	0.315
S2-Los Choros Bajos	0.005	0.005
S1-Playa Los Choros	0.001	0.001
Total	0.560	0.560

Datos de entrada

Qbi [m3/s	Caudal de bombeo inicial
Qd [m3/s]	Caudal demandado inicial

Qb-f [m3/s]	Caudal de bombeo factible	S [1]	Coeficiente de almacenamiento
Qd-f [m3/s]	Caudal demandado factible	H [m]	Espesor medio de relleno
Et [m3/s]	Escorrentía total que llega al sector	NEi [m]	Nivel estático inicial (actual)
Rind [m3/s]	Caudal de recarga Inducida	Ar [m2]	Área de relleno (planta)
R [m3/s]	Caudal de recarga hidrológica	T [m2/s]	Coeficiente de transmisibilidad horizontal
Rtot [m3/s]	Caudal de recarga total	Vrt [m3]	Volumen total (relleno): Vrt = Ar·H
Qsubt [m3/s]	Caudal subterráneo saliente del sector	Vrsi [m3]	Volumen saturado inicial (agua almacenada): Vrsi = (H-NE)·Ar·S
Qsup [m3/s]	Caudal superficial saliente del sector	Vsi [m3]	Volumen saturado inicial (relleno): Vsi = (H-NE)·Ar
Kh [m/s]	Coeficiente de permeabilidad horizontal	Ars [m2]	Área sección transversal saturada inicial (relleno): Ars = (H-NE)·Ar/(L·100
i [1]	Gradiente flujo subterráneo	Vsmin [Mm3]	Volumen saturado mínimo (agua almacenada): Vsmin = Ar·H·S·PSmin/10
L [Km]	Largo del cauce principal	Vsmax [Mm3]	Vol. máx. disp. (agua alm., acuífero lleno hasta nivel de terr.): Vsmax = A

IV.4 *Escenarios de Simulación*

El período de simulación corresponde a los mismos que tiene la estación base Junta el Carmen, equivalente a 39 años de simulación, período abril 1965- abril 2004.

Los escenarios a simular corresponden a:

1. Escenario de Derechos Constituidos (hasta agosto 2002)
2. Escenario de Derechos Constituidos y Solicitados hasta diciembre 2003.
3. Escenario Sustentable de explotación futura.

En Anexo C del SIT N° 96 de 2004, se muestra un resumen con los derechos otorgados y solicitados ubicados según el sector de Modelación, para facilitar la comprensión de los escenarios de Modelación.

Escenario 1: Bombeo de los Derechos actualmente Constituidos. De fecha Agosto 2002.

En la planilla de Cálculo, se impone el bombeo de los derechos otorgados.

Tabla N° 14: Caudales Otorgados. Escenario 1

Sector	Nombre	Q otorgado (l/s)
S1	Playa Choros	0
S2	Los Choros Bajos	7
S3	Quebrada Choros Altos	1130
S4	Punta Colorada	365
S5	Tres Cruces	100
	Total	1602

Escenario 2: Explotación con los bombeos de Derechos Constituidos y solicitados a diciembre del 2003.

Tabla N° 15: Caudales Otorgados más solicitados.

Sector	Nombre	Q otorgado más solicitado (l/s)
S1	Playa Choros	0
S2	Los Choros Bajos	7
S3	Quebrada Choros Altos	1160
S4	Punta Colorada	451
S5	Tres Cruces	933
	Total	2551

Escenario 3: Explotación máxima sustentable.

En este escenario se intenta estimar el caudal máximo de bombeo por sector que es factible de bombear, sustentables en el tiempo.

IV.5 *Resultados*

Escenario 1: Bombeo de los Derechos actualmente Constituidos. De fecha Agosto 2002.

Los resultados del escenario 1 resumen se muestran en la tabla 16.
Los resultados gráficos de este escenario se muestran en el Anexo 2.

Tabla N° 16: Resultados Escenario 1, derechos constituidos a agosto 2002.

Sector	Vol. de esc. tot. gen. en cuenca aport. a sector [Mm3]	Vol. de Esc. total que llega a sector [Mm3]	Vol. de Esc. tot. de salida del sector [Mm3]	Vol. de Esc. subt. de salida del sec. [Mm3]	Vol. de Esc. sup. de salida del sector [Mm3]	Volumen de bombeo ef. del sector [Mm3]	Volumen de recarga. ef. del sector [Mm3]	Volumen final en sector [Mm3]	Volumen inicial en sector [Mm3]
S5-Tres Cruces	1341	1341	1225	11	1214	121	127	64	69
S4-Punta Colorada	134	1359	1191	12	1179	175	180	77	85
S3-Ouebrada Choros Al	62	1253	881	41	840	390	413	109	126
S2-Los Choros Baios	91	972	965	35	930	6	41	138	138
S1-Plava Los Choros	62	1027	1027	45	982	0	46	220	220
Total	1690							608	637

Para el escenario de derechos constituidos la situación se presenta bien para el estado de los acuíferos. Ver Gráfico 8. Los niveles logran recuperarse, siendo el acuífero más explotado a agosto del 2002, el del sector de Choros Alto.

De los resultados de la tabla 16 se puede señalar que la recarga hidrológica asciende a 656 l/s para toda la cuenca de Quebrada Los Choros, con un cierre del balance negativo, pero muy pequeño, para los sectores de cabecera.

Sector / m3/s	Bombeo Inicial	Bombeo factible	Esc Total en el sector	Recarga Inducida	Recarga Hidrológica	Recarga Total	Qsubt saliente	Qsup saliente	Balance
S5-Tres Cruces	0.100	0.100	1.089	0.002	0.103	0.105	0.009	0.986	0.100
S4-Punta Colorada	0.365	0.365	1.104	0.223	0.146	0.369	0.010	0.958	0.140
S3-Oda. Choros Alto	1.130	1.130	1.018	0.814	0.336	1.150	0.033	0.682	0.322
S2-Los Choros Baios	0.007	0.007	0.789	0.002	0.034	0.035	0.029	0.756	0.034
S1-Playa Los Choros	0.000	0.000	0.835	0.000	0.037	0.037	0.037	0.798	0.037
Total	1.602	1.602	4.836	1.040	0.656	1.697	0.118	4.180	0.633

El uso bajo estas condiciones, presenta un desembalse de apenas 24 l/s, que con la estabilización de niveles da cada uno de los sectores, es aceptable.

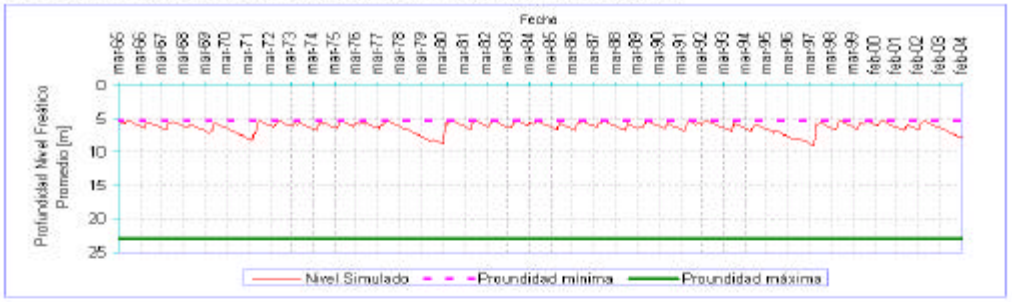
De los gráficos presentados en el Anexo 3, se puede señalar que la variación de la recarga efectiva es mucho mayor en los sectores 3, 4 y 5, mostrando ciertas épocas con recarga nula, debido a la señal de precipitaciones de la estación base escogida. Esta señal se considera realista si se toma en cuenta que en Quebrada Los Choros la lluvia es escasa y cuando la hay tiene carácter torrencial.

La escorrentía total entrante a cada uno de los sectores, permite que si exista caudal disponibles para los sectores de más abajo, que corresponde al caudal sobrante desde aguas arriba.

La señal de bombeo es pareja en todo el tiempo de simulación, considerando que los derechos son continuos y permanentes.

Gráfico N°8: Variación de Niveles Escenario 1

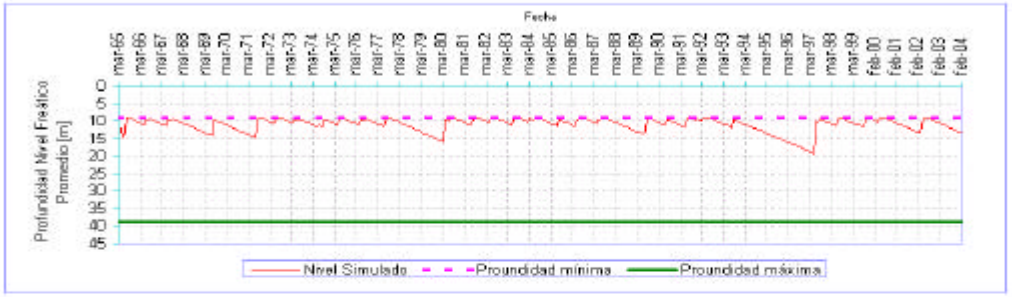
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 5: Tres Cruces



Q (m3/s)

0.1

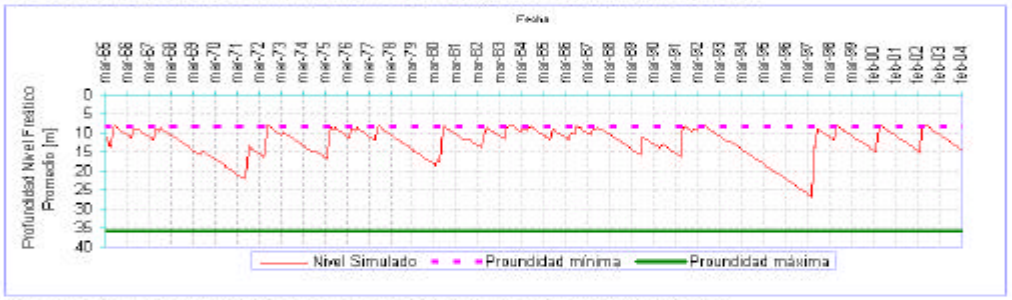
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 4: Punta Colorada



Q (m3/s)

0.365

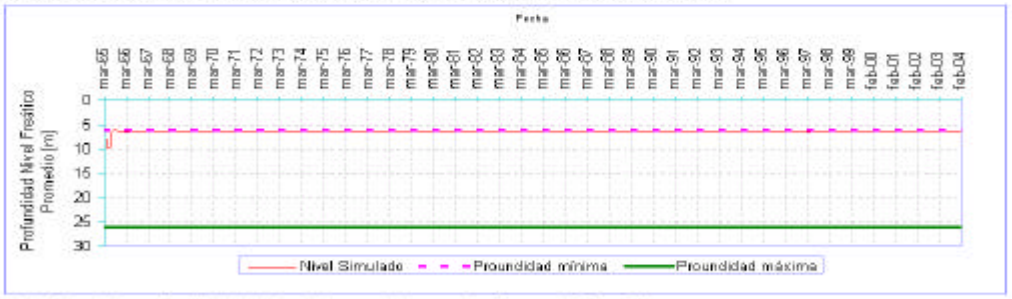
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 3: Quebrada Choros Alto



Q (m3/s)

1.130

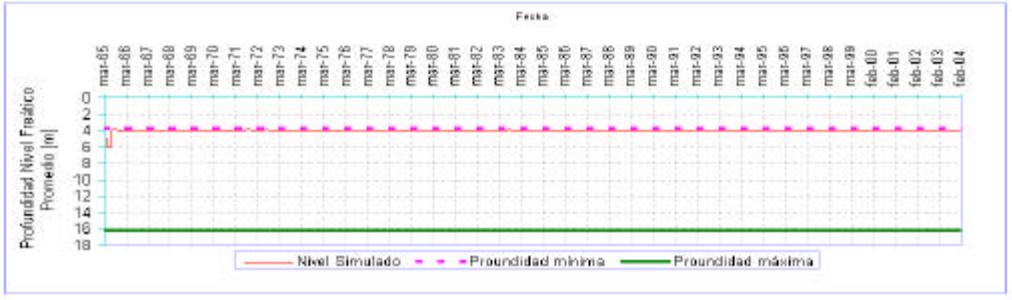
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 2: Los Choros Bajos



Q (m3/s)

0.007

Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 1: Playa Choros



Q (m3/s)

0.000

Escenario 2: Explotación con los bombeos de Derechos Constituidos y solicitados a diciembre del 2003.

Los resultados del escenario 2 resumen se muestran en la tabla 17.
Los resultados gráficos de este escenario se muestran en el Anexo 2.

Tabla N° 17: Resultados Escenario 2, derechos constituidos y solicitados hasta diciembre 2003.

Sector	Vol. de esc. tot. gen. en cuenca aport. a sector [Mm3]	Vol. de Esc. total que llega a sector [Mm3]	Vol. de Esc. tot. de salida del sector [Mm3]	Vol. de Esc. subt. de salida del sec. [Mm3]	Vol. de Esc. sup. de salida del sector [Mm3]	Volumen de bombeo ef. del sector [Mm3]	Volumen de recarga. ef. del sector [Mm3]	Volumen final en sector [Mm3]	Volumen inicial en sector [Mm3]
S5-Tres Cruces	1341	1341	1031	11	1021	322	320	57	69
S4-Punta Colorada	134	1165	979	12	967	194	198	77	85
S3-Quebrada Choros A	62	1041	659	40	619	400	422	109	126
S2-Los Choros Bajos	91	750	744	35	709	6	41	138	138
S1-Playa Los Choros	62	806	806	45	760	0	46	220	220
Total	1690							599	637

Sector / m3/s	Bombeo Inicial	Bombeo factible	Esc Total en el sector	Recarga Inducida	Recarga Hidrológica	Recarga Total	Qsubt saliente	Qsup saliente	Balance Total
S5-Tres Cruces	0.933	0.933	1.089	0.672	0.260	0.932	0.009	0.829	0.250
S4-Punta Colorada	0.451	0.451	0.947	0.293	0.161	0.455	0.010	0.786	0.154
S3-Oda. Choros Alto	1.160	1.160	0.846	0.835	0.343	1.178	0.032	0.503	0.328
S2-Los Choros Bajos	0.007	0.007	0.609	0.002	0.034	0.035	0.029	0.576	0.034
S1-Playa Los Choros	0.000	0.000	0.655	0.000	0.037	0.037	0.037	0.618	0.037
Total	2.551	2.551	4.146	1.802	0.835	2.637	0.116	3.312	0.804

Para el escenario de derechos constituidos más los solicitados hasta diciembre del 2003 la situación se presenta aceptable desde el punto de vista de la evolución de los niveles de los acuíferos y también desde el punto de vista de los caudales iniciales y los factibles a explotar. Ver Gráfico 9. Los niveles logran recuperarse, siendo el acuífero más explotado también el del sector de Choros Alto.

De los resultados de la tabla 17 se puede señalar que la recarga hidrológica asciende a 835 l/s para toda la cuenca de Quebrada Los Choros, la cual depende de los bombeos impuestos dejando un delta de recarga mayor que el escenario anterior, con un cierre del balance negativo de 31 l/s para todo el acuífero de Quebrada Los Choros.

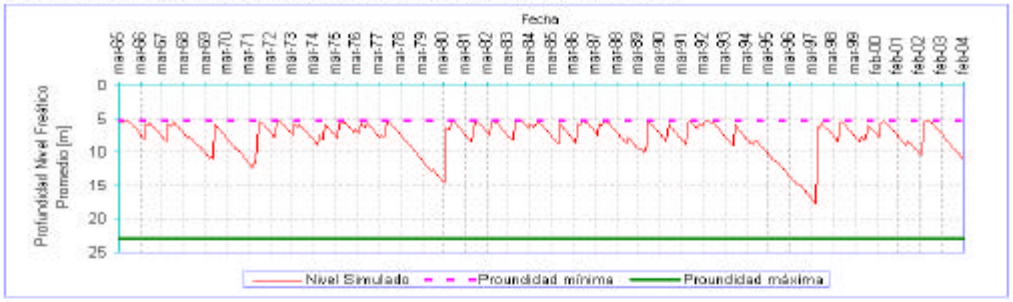
De los gráficos presentados en el Anexo 3, la variación de la recarga efectiva es similar al caso anterior.

La escorrentía total entrante a cada uno de los sectores, permite que si exista caudal disponible para los sectores de más abajo, que corresponde al caudal sobrante desde aguas arriba.

El volumen de escorrentía que llega a cada uno de los sectores disminuye para este escenario, con respecto al escenario 1, debido fundamentalmente que la mayor explotación hace que recargue más al acuífero y deje pasar menos escorrentía superficial.

Gráfico N°9: Variación de Niveles Escenario 2

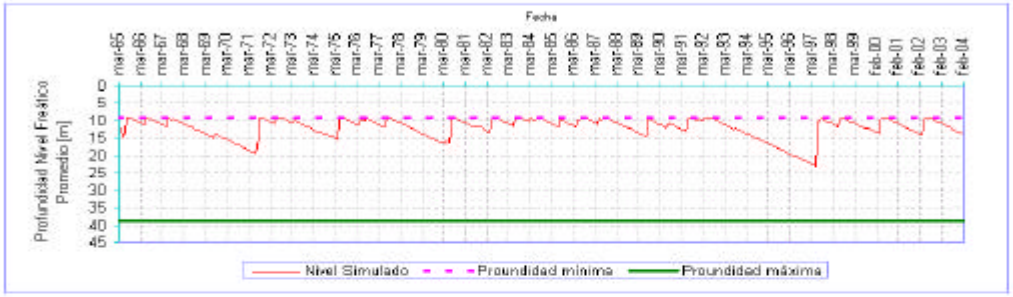
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 5: Tres Cruces



Q (m3/s)

0.933

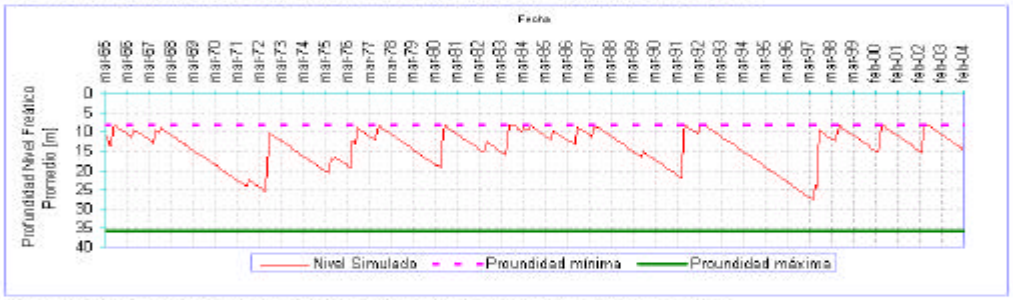
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 4: Punta Colorada



Q (m3/s)

0.451

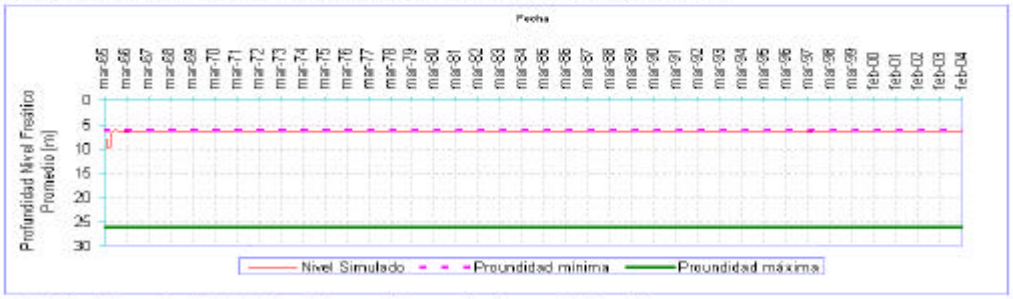
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 3: Quebrada Choros Alto



Q (m3/s)

1.160

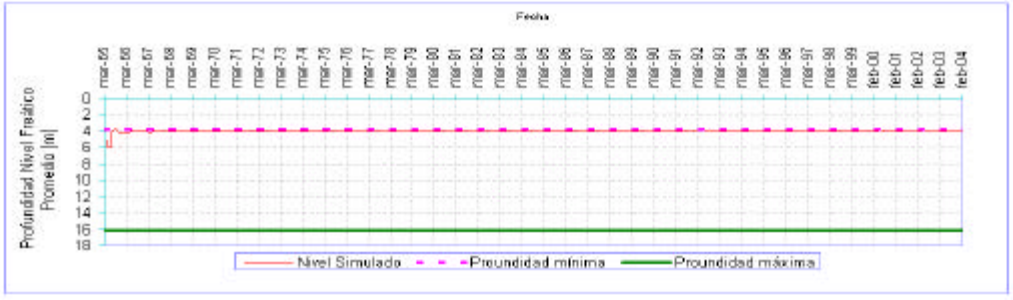
Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 2: Los Choros Bajos



Q (m3/s)

0.007

Variación de la profundidad del nivel piezométrico medio, Sector 1: Playa Choros



Q (m3/s)

0.000

Escenario 3: Explotación máxima sustentable.

Los resultados del escenario 3 resumen se muestran en la tabla 18.
Los resultados gráficos de este escenario se muestran en el Anexo 2.

Tabla N° 18: Resultados Escenario 3. Caudal Sustentable.

Sector	Vol. de esc. tot. gen. en cuenca aport. a sector [Mm3]	Vol. de Esc. total que llega a sector [Mm3]	Vol. de Esc. tot. de salida del sector [Mm3]	Vol. de Esc. subt. de salida del sec. [Mm3]	Vol. de Esc. sup. de salida del sector [Mm3]	Volumen de bombeo ef. del sector [Mm3]	Volumen de recarga. ef. del sector [Mm3]	Volumen final en sector [Mm3]	Volumen inicial en sector [Mm3]
S5-Tres Cruces	1341	1341	1009	11	999	345	342	56	69
S4-Punta Colorada	134	1143	854	11	843	302	301	72	85
S3-Quebrada Choros A	62	916	534	36	498	400	418	109	126
S2-Los Choros Bajos	91	625	447	31	416	185	209	131	138
S1-Playa Los Choros	62	508	331	41	290	185	218	212	220
Total	1690							581	637

Sector / m3/s	Bombeo Inicial	Bombeo factible	Esc Total en el sector	Recarga Inducida	Recarga Hidrológica	Recarga Total	Qsubt saliente	Qsup saliente	Balance Total
S5-Tres Cruces	1.000	1.000	1.089	0.720	0.278	0.998	0.009	0.811	0.267
S4-Punta Colorada	0.700	0.700	0.929	0.455	0.244	0.699	0.009	0.685	0.234
S3-Oda. Choros Alto	1.160	1.160	0.744	0.835	0.339	1.175	0.029	0.405	0.325
S2-Los Choros Bajos	0.200	0.200	0.508	0.050	0.170	0.220	0.025	0.338	0.164
S1-Playa Los Choros	0.500	0.500	0.413	0.350	0.177	0.527	0.033	0.236	0.172
Total	3.560	3.560	3.684	2.410	1.209	3.619	0.105	2.475	1.163

Para determinar el escenario de explotación máxima se impusieron las siguientes condiciones:

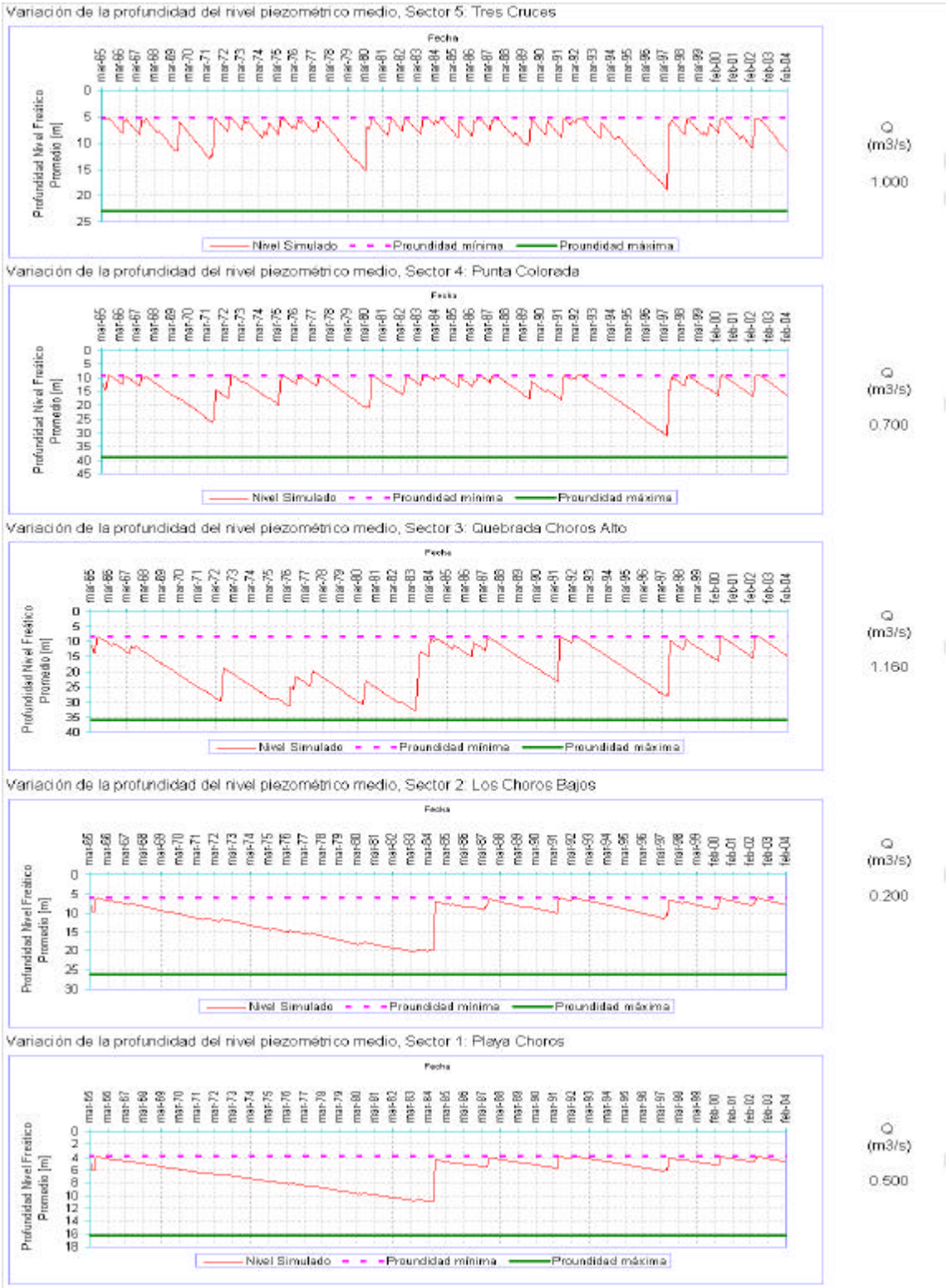
1. Que los caudales de bombeo impuestos fueran factibles de explotar;
2. Que los niveles se estabilizaran en el tiempo y que no alcanzaran el límite inferior de profundidad máxima aceptable;
3. Que la explotación de los sectores aguas arriba no afectaran los derechos que ya han sido otorgados

1.- Para el primer punto, el escenario escogido como sustentable permite explotar un bombeo factible en m^3/s como se resumen a continuación:

Tabla N° 19: Resumen Caudales Factibles de Explotar.

Sector / m3/s	Bombeo factible
S5-Tres Cruces	1.000
S4-Punta Colorada	0.700
S3-Qda. Choros Alto	1.160
S2-Los Choros Bajos	0.200
S1-Playa Los Choros	0.500
Total	3.560

Gráfico N°10: Variación de Niveles Escenario 3



2.-Para la segunda consideración, los niveles presentados en el gráfico 10 indican una perfecta estabilización de los niveles, cuya señal depende directamente de la señal de precipitación de la Estación Junta el Carmen.

3.- En la obtención del escenario sustentable, la estabilización de los niveles de aguas abajo depende directamente de la explotación aguas arriba, por lo que el sector 3 de Choros Alto, fue la limitante para seguir explotando los sectores de Punta Colorada y de Tres Cruces. Los sectores de Choros Bajos y Playa Choros a pesar de ser más pequeños, mostraron ser un poco independientes de la explotación que ocurría aguas arriba.

De los gráficos presentados en el Anexo 3, la variación de la recarga efectiva es similar al caso anterior.

La escorrentía total entrante a cada uno de los sectores, permite que si exista caudal disponibles para los sectores de más abajo, que corresponde al caudal sobrante desde aguas arriba.

V RESULTADO DE LA MODELACION

1. En escenario 1, de derechos otorgados, demuestra que el acuífero es capaz de sostener una estabilización en el tiempo de los niveles y que el acuífero de Quebrada Los Choros no estaría siendo actualmente sobreexplotado, del punto de vista legal del uso.

2. El escenario 2, de derechos constituidos y solicitados, permite clarificar que la aprobación de los derechos en trámite desde agosto 2002 hasta diciembre 2003, no perjudicaría el estado del acuífero de Quebrada Los Choros, en comparación con lo ya otorgado.

3. El escenario sustentable permite explotar un bombeo factible en m^3/s como se resumen a continuación

4. El escenario se considera sustentable del punto de vista de los niveles del acuífero, pues ellos siempre logran la recuperación a través del tiempo.

5. Es importante señalar que, debido a la conceptualización del modelo, los pozos de bombeo han sido agrupados por sector y los resultados de modelación aquí presentados podrían variar en el caso que se contase con un modelo hidrogeológico de más detalle, como lo son los modelos desarrollados en diferencias finitas (como Visual Modflow), en donde la coordenada de ubicación de los pozos adquiere vital importancia del punto de vista del funcionamiento local y regional.

6. El modelo aquí desarrollado y utilizado es una primera aproximación a la respuesta del acuífero de manera global.

VI Derechos de Aprovechamiento

VI.1 *Demanda de Aguas Subterráneas*

Analizando las peticiones presentadas en la Cuenca de la Quebrada de los Choros, se determinó que la demanda vigente de derechos de aprovechamiento al 30 de junio de 2004 para cada uno de los sectores acuíferos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla Nº 20. Resumen demanda vigente zona de estudio

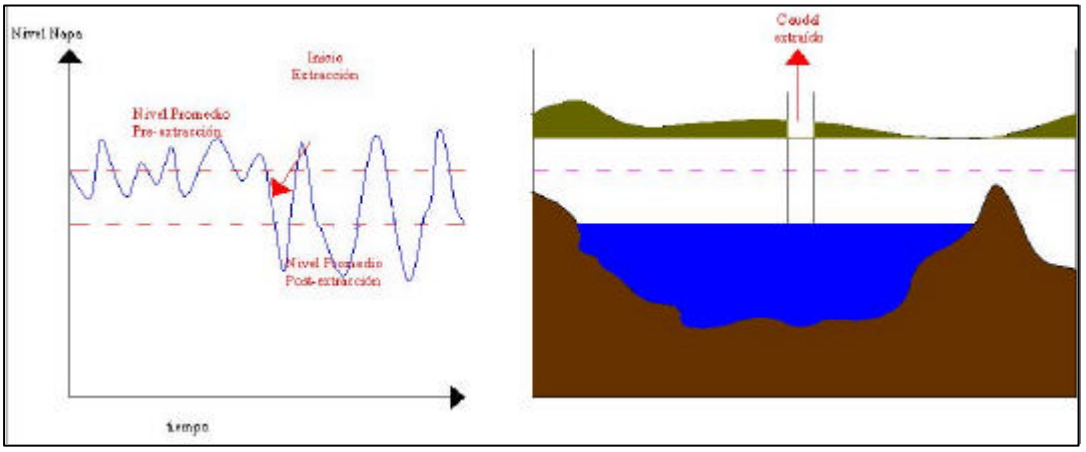
SECTOR	DEMANDA Q (l/s)	N° EXP	N° POZOS
Playa Los Choros	11,5	2	2
Los Choros Bajos	1,2	1	1
Los Choros Altos	1160,0	9	24
Punta Colorada	576,6	13	13
Tres Cruces	1969,7	34	47
Total	**3719,0**	**59**	**87**

En Anexo 1 se presenta los listados con las solicitudes de aguas subterráneas, correspondientes al área de estudio, ingresadas a la Dirección General de Aguas que se encuentran constituidas, en trámite y aquellas que pueden ser regularizadas a través del Art. 2° Transitorio del Código de Aguas. No se incluyen en estos listados las solicitudes que han sido denegadas.

VI.2 *Determinación de los Derechos de Aprovechamientos Sustentable a Explotar en el Acuífero.*

Los Derechos de Aprovechamiento susceptibles de ser otorgados en un acuífero, deben corresponder a una explotación sustentable que no perjudique ni menoscabe derechos de terceros ni al medio ambiente y debe asegurar que la fluctuación de los niveles del acuífero sea estable en el tiempo(figura Nº8).

Figura Nº 8. Fluctuación de niveles estable bajo una explotación sustentable



Lo descrito en el párrafo anterior equivale a la siguiente relación:

E(Qs) = E(Qb)

Donde:

E(Qb) = Corresponde al valor esperado de los Derechos Susceptibles de constituirse en el acuífero, en carácter de permanentes y definitivos; cuya explotación es sustentable en el tiempo y no afecta derechos de terceros ni al medio ambiente.
y
E(Qs) = Corresponde al caudal total de explotación sustentable, el que debe incluir los retornos producidos por la explotación continua de los derechos otorgados y los susceptibles de otorgarse.

Es decir:

E(Qs) = Q ***extracción neta sustentable*** **+ Retornos** ***(producidos por la explotación continua de los Dos otorgados y susceptibles de otorgarse)***

CAUDAL EXTRACCIÓN NETA: Corresponde al caudal de bombeo neto modelado, que permite asegurar que la fluctuación de los niveles del acuífero sea estable en el tiempo.

Los retornos producidos por la explotación de los derechos corresponden a:

RETORNOS DE RIEGO = Corresponde a los excedentes que se producen al considerar una extracción de los derechos previstos para riego y que retornan al acuífero. Estos excedentes se producen debido a que al considerar una extracción permanente de estos derechos, las extracciones son mayores que las demandas hídricas de los cultivos definidas por la Evapotranspiración potencial[2]. Esta demanda está limitada por las necesidades de agua propias de los cultivos (que está determinada por las etapas de desarrollo de éstos) y por la capacidad de los suelos de retener agua para ser aprovechada por un cultivo cuyos valores se encuentran entre la Capacidad de Campo[3] y el Punto de Marchitez Permanente[4] del suelo.

En general esta recarga inducida de riego se estima en promedio a un 80% al considerar una extracción permanente en el tiempo, de los derechos para riego.

RETORNOS DE AGUA POTABLE = Corresponde a las pérdidas originadas de situaciones propias de la operación tales como roturas de cañerías o filtraciones. En el proceso de tarificación la Superintendencia de Servicios Sanitarios considera que el porcentaje de pérdida de la "Empresa Modelo" alcanza aproximadamente entre el 25% y 30% de las extracciones totales de los derechos de aprovechamiento de agua potable. En consecuencia se considera un 25% como pérdidas por conducción y que retornan al acuífero, de los derechos previstos para agua potable.

---

2 Evapotranspiración Potencial (Etp)= corresponde a la cantidad de agua transpirada en una unidad de tiempo por un cultivo corto, verde, cubriendo completamente la superficie del suelo, de altura uniforme y nunca falto de agua.

3 Capacidad de Campo (CC) = Indica el límite superior o máximo de agua útil para la planta que queda retenida en el suelo contra la fuerza de gravedad.

4 Punto de Marchitez Permanente (PMP) = Indica el límite inferior o mínimo de agua útil para la planta.

Tabla Nº 21. Derechos (l/s) susceptibles de constituirse en el acuífero de la Cuenca Quebrada Los Choros.

SECTOR	DERECHOS SUSCEPTIBLES DE CONSTITUIRSE (l/s)
PLAYA LOS CHOROS	500,0
LOS CHOROS BAJOS	200,0
QDA. CHOROS ALTOS	1160,0
PUNTA COLORADA	700,0
TRES CRUCES	1000,0
TOTAL	**3560,0**

Retornos de Riego = 80 %
Pérdidas por agua Potable = 25 %

Tabla Nº 22. Cuadro comparativo Derechos susceptibles de constituirse v/s Demanda vigente en el acuífero de la Cuenca de Quebrada Los Choros al 30 de Junio de 2004

SECTOR	DERECHOS SUSCEPTIBLES DE CONSTITUIRSE (l/s)	DEMANDA (l/s) (30-06-04)
PLAYA LOS CHOROS	500,0	11,5
LOS CHOROS BAJOS	200,0	1,2
QDA. CHOROS ALTOS	1160,0	1160,0
PUNTA COLORADA	700,0	576,6
TRES CRUCES	1000,0	1969,7
TOTAL	**3560,0**	**3719,0**

De la tabla anterior se ha podido establecer los derechos susceptibles de constituirse en carácter de permanente y definitivo de aguas subterráneas, en los sectores acuíferos en la cuenca de la Quebrada Los Choros, determinándose que:

En el **Sector acuífero de Playa Los Choros** es posible avanzar el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo hasta el 30 de junio de 2004.

En el **Sector acuífero de Los Choros Bajos**, es posible avanzar el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo hasta el 30 de junio de 2004.

En el **Sector acuífero de Los Choros Altos**, las recargas de dicho sector son insuficiente en relación a la explotación prevista de los derechos en él, de modo que, sólo es posible constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el 30 de junio de 2004.

En el **Sector acuífero de Punta Colorada**, es posible avanzar el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo hasta el 30 de junio de 2004.

En el **Sector acuífero de Tres Cruces**, las recargas de dicho sector son insuficiente en relación a la explotación prevista de los derechos en él, de modo que, sólo es posible constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el 31 de enero de 2004.

VII Conclusiones

La determinación del caudal susceptible de otorgarse como derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, hecha sobre la base de la oferta neta sustentable de extraer en el acuífero y de las recargas inducidas por efecto de la explotación de los derechos previstos para riego y de las pérdidas por conducción de los derechos previstos para agua potable, ha permitido determinar los derechos posibles de constituir en los sectores acuíferos de la cuenca de la **Quebrada Los Choros**, los que contrastados con la demanda vigente al **30 de junio de 2004**, permite concluir que:

a) Es posible avanzar en la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, en carácter de definitivos, sin producir perjuicios a derechos de terceros para las solicitudes presentadas hasta el ***30 de Junio de 2004***, en los sectores de:

- **i) Playa Los Choros**
- **ii) Los Choros Bajos**
- **iii) Quebrada Colorada**

Se puede concluir además que en los sectores antes mencionados, las recargas son suficientes en relación a la explotación prevista de los derechos solicitados en cada uno de ellos. Además el hecho de avanzar hasta esta fecha significa que estas fuentes se encuentran abiertas y en situación de ser estudiada para evaluar su disponibilidad para demandas de agua generadas por solicitudes posteriores a esa fecha.

b) En el Sector de **Tres Cruces** y **los Choros Altos** las recargas son insuficientes en relación a la explotación prevista de los derechos solicitados en el sector, de modo que, sólo es posible constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el ***31 de Enero de 2004*** para el sector de **Tres Cruces** y hasta el ***30 de junio de 2004*** para el sector de **Los Choros Altos**.

VIII REFERENCIA

1. **ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA QUEBRADA LOS CHOROS**. Elaborado para Construcciones y Maquinarias BSF Ltda. por GFC Ingenieros Consultores.

2. **MODELO DE SIMULACIÓN QUEBRADA LOS CHOROS. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA QUEBRADA LOS CHOROS, IV REGION**. Dirección General de Aguas. Departamento de Estudios y Planificación. Informe Técnico SIT N° 96 de Septiembre de 2004.

IX ANEXOS

ANEXO 1

DEMANDA VIGENTE AL 30 DE JUNIO DE 2004
QUEBRADA LOS CHOROS
IVa REGION