

GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN



**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS  
HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LOS ACUÍFEROS  
COSTEROS UBICADOS ENTRE LOS RÍOS SALADO  
Y HUASCO, III REGIÓN DE ATACAMA**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**

**MIGUEL NENADOVICH Y COMPAÑÍA LTDA.**

**S.I.T. N° 198**

**SANTIAGO, FEBRERO DE 2010**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

**Ministro de Obras Públicas**  
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar H.

**Director General de Aguas**  
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

**Jefe División de Estudios y Planificación**  
Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

**Inspector Fiscal**  
Ingeniero Civil Sr. Miguel Ángel Caro H.

**MIGUEL NENADOVICH Y COMPAÑÍA LTDA.**

**Jefe de Proyecto**  
Ingeniero Civil Sr. Félix Pérez

**Profesionales Participantes**  
Ingeniero Civil Sr. Iván Rivera R.  
Ingeniero Civil Sr. Marcelo Allende B.  
Ingeniero Civil Srta. María Cristina Contreras  
Ingeniero Civil Sr. Juan Zárate S.  
Cartógrafo Srta. Lorena Bustamante J.  
Dibujante Proyectista Srta. Marcela Ruffo T.  
Hidromensor Sr. Luis Duque S.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	ESTUDIOS BÁSICOS .....	2
2.1	Estimación de Recargas.....	2
2.2	Caracterización Hidrogeológica.....	3
2.3	Calidad de las Aguas Subterráneas .....	7
2.4	Características de la Explotación .....	8
3.	MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....	9
3.1	Desarrollo del Modelo.....	9
3.2	Calibración en Régimen Permanente .....	12
3.3	Calibración en Régimen Impermanente .....	13
4.	DETERMINACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN SUSTENTABLE .....	14
5.	CONCLUSIONES .....	17

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio involucra dos grandes zonas pertenecientes a la Región de Atacama: las cuencas costeras entre los ríos Salado y Copiapó, de 5.880 Km<sup>2</sup> de extensión, y las cuencas costeras entre los ríos Copiapó y Huasco, cuya superficie alcanza los 10.410 Km<sup>2</sup>.

Estas cuencas poseen un clima desértico, por lo tanto, las precipitaciones son muy escasas, presentándose eventualmente en los meses invernales. Las cuencas costera ubicadas entre los ríos Salado y Copiapó (o Cuencas Norte), presentan una precipitación anual promedio de 15 mm, mientras que las cuencas costeras ubicadas entre los ríos Copiapó y Huasco (o Cuencas Sur), se ha registrado una precipitación anual promedio de aproximadamente 30 mm.

La Cuenca Norte concentra, de acuerdo con el Censo Demográfico de 2002, una población aproximada de 25.000 habitantes, concentrados principalmente en las ciudades de Chañaral (límite norte de la cuenca) y Caldera.

La Cuenca Sur, de acuerdo con la misma fuente, posee una población de solamente 700 habitantes, concentrados principalmente en los pueblos de Carrizal Bajo, Totoral y Canto del Agua.

En ambas cuencas, las principales actividades que consumen recurso hídrico son la minería y la agricultura, en especial en la Cuenca Sur, que posee una actividad económica de mayor consumo hídrico que la Cuenca Norte, según se detalla en el presente estudio.

El objetivo general de este trabajo fue efectuar un análisis y una evaluación de los recursos hídricos subterráneos en las cuencas costeras ubicadas entre los ríos Salado y Copiapó, y en las cuencas costeras ubicadas entre este último y el río Huasco.

Para ello se efectuó una caracterización, cualitativa y cuantitativa, de la hidrología e hidrogeología de la zona de estudio y de la calidad de sus aguas. Esto permitió determinar la explotación sustentable en el tiempo, en particular para aquellas cuencas ubicadas al sur del río Copiapó.

Los trabajos específicos desarrollados fueron los siguientes:

- Caracterización de los acuíferos, considerando las interrelaciones entre ellos.
- Evaluación de las recargas a los acuíferos.
- Determinar valor y distribución de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos.
- Desarrollo de modelos hidrogeológicos calibrados para la zona.
- Determinación de la explotación sustentable.

- Efectuar muestreos de calidad del agua subterránea y caracterizar la calidad de las aguas.
- Desarrollo de una herramienta de gestión, a nivel de fuentes, para los acuíferos costeros, que permita su utilización para planificación estratégica en la región.

## **2. ESTUDIOS BÁSICOS**

### **2.1 Estimación de Recargas**

Uno de los aspectos fundamentales del estudio se centró en la estimación de las recargas. Es decir, los caudales o volúmenes medios de recarga a los sistemas acuíferos estudiados, producto de las precipitaciones en la zona, que constituyen la única fuente de alimentación significativa de los acuíferos. La metodología de cálculo se basó en la generación de los procesos de escorrentía e infiltración para cada evento de lluvia, considerando series mensuales. Para esto, el procedimiento utilizado consistió en lo siguiente:

- Generar una estadística pluviométrica que abarque un período de 40 años, mediante técnicas de relleno y correlación de la estadística disponible.
- A partir de lo anterior, se establecieron perfiles de distribución de la precipitación en función de la altura en las cuencas en estudio. Dicho perfil debe cubrir toda la zona de interés dentro de ambas cuencas. Es decir, la zona correspondiente al relleno, donde se ubican las formaciones acuíferas.
- Con dichos perfiles, se estimó la recarga que reciben las formaciones acuíferas asociadas a cada subcuenca. Se obtuvo una serie de valores que abarcan los 40 años definidos para la serie observada y sintetizada de las lluvias. El procedimiento utilizado para este cálculo está basado conceptualmente en diversos métodos señalados a continuación.

Para la estimación de la recarga, se utilizaron los siguientes métodos de cálculo:

- Modelo SCS o Método de la Curva Número.
- Método del Balance Hídrico utilizando fórmula de Turc.
- Método de Blaney-Criddle.

A partir de los resultados obtenidos para ambas zonas en estudio y para cada método, se establecieron las siguientes conclusiones:

- El método SCS entrega mayores recargas que el método del balance hídrico, y éste a su vez, mayores que el método de Blaney-Criddle.

- El método SCS tiene la ventaja de ajustar su principal parámetro, la Curva Número, a las condiciones áridas de las cuencas en estudio, de acuerdo a la fuente consultada al respecto (“Handbook of Hidrology”, Maidment, Mc Graw-Hill Inc., 1992).
- Por otro lado, la misma fuente anterior, en su punto 4.2.6, señala que las ecuaciones de Turc se ajustan de manera satisfactoria en climas húmedos. Por lo tanto, de lo anterior se infiere una menor confiabilidad hacia el método del balance hídrico para zonas áridas, como las cuencas en estudio.
- Finalmente, el método de Blaney-Criddle entrega una evapotranspiración excesiva para la zona, principalmente porque está desarrollado para determinar dicho parámetro en zonas con amplia actividad agrícola, y por lo tanto, los valores límites para zonas con clima desértico no corresponden a la realidad de las cuencas en estudio.

Por lo tanto, para el análisis de la sustentabilidad a la explotación de los acuíferos y especialmente para el ajuste del modelo hidrogeológico, se consideró como base a las recargas obtenidas mediante el Método SCS, teniendo en cuenta además que es el resultado más conservador.

## **2.2 Caracterización Hidrogeológica**

Para la caracterización hidrogeológica y establecimiento del modelo conceptual a partir del cual se desarrolló el modelo numérico, se abordaron los siguientes estudios específicos:

- Caracterización geológica de las unidades sedimentarias susceptibles de constituir acuíferos de interés.
- Exploración geofísica para detectar acuíferos y la geometría de éstos.
- Catastro detallado de las captaciones en la zona de estudio, con medición de niveles y estimación de la explotación real de cada captación.
- Muestras de agua para caracterizar la calidad del agua presente en los acuíferos

Para la ejecución del estudio geofísico se contrató a la empresa Geodatos SAIC, quienes en febrero de 2009 desarrollaron el estudio, el cual consistió en la ejecución de perfiles mediante TEM en dos sectores, denominados Quebrada Salitrosa, ubicado aproximadamente a 80 km al norte de la ciudad de Chañaral, y el sector sur del Río Copiapó ubicado aproximadamente a 30 km al sur oeste de la ciudad homónima entre la Ruta 5 y el borde costero.

Para este se establecieron 12 perfiles geofísicos, cuatro de ellos ubicados en el sector de Quebrada Salitrosa y los ocho restantes en el sector al sur del Río Copiapó.

De los resultados obtenidos cabe destacar que en la zona ubicada entre quebrada Seca y Totoral se encuentran dos capas de gravas arcillosas rodeadas de sedimentos finos y cubiertas de sedimentos secos. Bajo estos estratos se ubica la roca basal a unos 120 m de profundidad.

El sector de la Hacienda Castilla, ubicada en la quebrada Totoral se observa un estrato de gravas arcillosas de un espesor superior a 400 m. Esta capa se encuentra junto a un estrato de sedimentos finos de similar espesor. En este sector no se alcanza a apreciar la roca basal, según lo mostrado por el estudio geofísico.

El estrato de sedimentos finos identificado anteriormente, se extiende hacia el sector de quebrada Boquerones, donde también es posible encontrar sectores en los cuales se encuentran capas de gravas con arcillas.

En el sector de la quebrada Carrizal el estrato de gravas se encuentra inmediatamente después de la capa de sedimentos secos. En este sector la roca basal se ubica como máximo a unos 200 m de profundidad.

Por otro lado la caracterización de la geología en el área de estudio se ha realizado atendiendo los objetivos del trabajo. En tal sentido se efectuó una caracterización de las unidades cuaternarias y sedimentarias presentes, las que pueden ser potenciales contenedoras de acuíferos.

Cabe señalar que el área de estudio que comprende las cuencas costeras entre los ríos El Salado y Huasco, excluyéndose el río Copiapó, puede dividirse en dos grandes sectores. Uno ubicada al norte del río Copiapó y otra al sur del mismo.

A partir de los levantamientos geológicos analizados se trazó el contacto roca-relleno, interpretado para los fines del presente trabajo, como la envolvente de todas las unidades sedimentarias y cuaternarias agrupadas. El resto de la unidades geológicas, englobadas dentro del contacto roca-relleno, en su mayoría corresponden a formaciones rocosas del Paleozoico (complejos metamórficos) principalmente ubicadas en los sectores costeros, y del Jurásico y Cretácico hacia el interior y en las zonas altas de las subcuencas estudiadas (Plutones, Volcánico-sedimentarias e Intrusivos).

#### **a) Zona al Norte del Río Copiapó**

De acuerdo con los antecedentes analizados, existen sólo dos sectores de interés en esta zona, correspondientes a las Quebradas Guamanga y Salitrosa.



Respecto a la quebrada Guamanga, el acuífero de este sector está representado por suelos conformados principalmente de arenas y gravas no saturadas, con presencia de limos y bolones en algunos sectores. Se observa la presencia de areniscas con arcilla a una profundidad de 20 m aproximadamente en ciertos sectores ubicados en la zona más occidental de ésta quebrada. La roca basal en esta zona se encuentra en promedio a unos 70 m de profundidad, variando entre los 30 m en el sector occidental de la quebrada y 100 m en el lado oriental.

El relleno emplazado en la quebrada Salitrosa, está constituido principalmente por gravas y arenas secas, existiendo en sectores aislados estratos compuestos de gravas y arcillas y estratos de sedimentos finos en su mayoría secos. La roca basal se encuentra principalmente entre 20 y 100 m de profundidad.

De acuerdo con los estudios realizados, el sector de cuencas costeras ubicado al norte del río Copiapó, no evidencia la presencia de acuíferos de interés. Esto se corrobora con el hecho de que prácticamente no existen captaciones en esta zona, salvo algunas de bajo rendimiento que posee la Minera Mantos Blancos en la quebrada Guamanga.

#### **b) Zona al Sur del Río Copiapó**

En la zona al sur del Río Copiapó se distinguen 5 sectores de interés desde el punto de vista hidrogeológico: Quebradas Seca, Totoral, Carrizal, Boquerones y Chacritas.

Para caracterizar el relleno sedimentario, se empleó la información correspondiente a la exploración geofísica junto con los antecedentes recopilados en terreno sobre los planos de construcción de captaciones existentes en la zona y el estudio geológico. A continuación se describen las características del relleno en cada una de estas quebradas.

En la zona de quebrada Seca la roca basal en este sector se ubica a una profundidad variable entre 50 y 200 m. El relleno acuífero en se caracteriza por presentar depósitos de gravas con arcillas de espesor variable entre 100 y 150 m, sobre la cual se encuentra un estrato de sedimentos más compactos de un espesor de unos 100 m cubierta de una capa de sedimentos finos arcillosos que varían entre los 20 y 100 m de espesor. En este sector no se poseen antecedentes sobre captaciones existentes y por lo tanto no se tiene información sobre los niveles de la napa freática.

De acuerdo a los antecedentes que se poseen, en el sector ubicado entre las Quebradas Seca y Totoral, la roca basal se encontraría a una profundidad variable entre 10 y 90 m, además no habría presencia de acuíferos debido a que los suelos están constituidos principalmente de sedimentos con presencia mayoritaria de arcillas. Al igual que en el sector de quebrada Seca, no se tiene información sobre la presencia de captaciones.

En la zona de la Quebrada Totoral, es posible encontrar suelos mayoritariamente granulares con presencia de arcillas. En el sector de la Hacienda Castilla la roca basal se ubica a una profundidad entre 50 y 200 m, éstos acuíferos se componen de gravas arcillosas con un espesor mayor a 400 m, En este sector el nivel estático se aprecia entre los 3 y 48 m. de profundidad. En el sector más cercano a la Cordillera de la Costa, el nivel estático se encuentra a una profundidad de 18 m, y a medida que se acerca a la costa, el nivel se hace más superficial encontrándose a unos 3 m en el sector donde se encuentra el pozo del APR de Totoral.

La zona de la Quebrada Carrizal, está conformada por acuíferos con presencia de gravas y arenas junto con arcillas y limos, este tipo de suelo alcanza hasta una profundidad de 100 m en este sector. Bajo esta capa, se encuentran suelos compuestos básicamente por limos y arcillas, estrato de un espesor de hasta 100 m. De esta forma la roca basal es posible de encontrar a una profundidad variable entre 10 y 100 m. En este sector el nivel estático varía dependiendo del sector, en Canto del Agua el nivel va desde 1 a 12 m de profundidad y en Quebrada de los Sapos se alcanza un nivel de 22 m de profundidad.

En los sectores ubicados en la Quebrada Boquerones en los cuales se puede distinguir la presencia de roca basal, ésta se encuentra a una profundidad de 100 m. En el suelo presente en los primeros 100 m de profundidad se pueden encontrar arenas finas y gruesas, gravas, ripio y porcentajes variables de arcillas, a continuación, se distingue principalmente la presencia de un estrato de sedimentos finos arcillosos que cubre gran parte del subsuelo de esta zona, con un espesor superior a 500 m en algunos sitios. Bajo esta capa de sedimentos se encuentra un estrato de gravas y arenas arcillosas de un espesor superior a los 200 m. El nivel estático en este sector se aprecia a unos 30 m de profundidad.

En el sector de la Quebrada Chacritas, los acuíferos están compuestos por un conglomerado de ripio, gravas y arena, el cual se ubica a unos 3 m de profundidad con un espesor aproximado de 20 a 25 m. En este sector no existen antecedentes sobre la ubicación de la roca basal. El nivel estático en este sector se encuentra en promedio a unos 15 m de profundidad.

Por otro lado, a partir de la información de niveles obtenida del catastro, se trazaron las curvas isofreáticas en la zona al sur del Río Copiapó, utilizando el software ArcGis.

Las curvas trazadas muestran que el sentido del flujo es predominantemente de oriente a poniente, excepto en un sector de la zona de la quebrada Chacritas donde existe un angostamiento del valle, en el cual el flujo escurre hacia el norte. En esta misma zona se puede ver que el gradiente hidráulico varía entre  $1,3 \times 10^{-2}$  y  $3,1 \times 10^{-2}$ . En cambio, en el sector que va desde la quebrada Boquerones hacia Carrizal, el gradiente hidráulico es de  $8,5 \times 10^{-3}$  y en el sector al oriente de Hacienda Castilla el gradiente hidráulico es de  $2,2 \times 10^{-2}$ .

Con la finalidad de calcular los parámetros de los acuíferos en estudio, se recopiló información de las pruebas de bombeo realizadas en pozos ubicados al sur del Río Copiapó. Los pozos que contaban con esta información se ubican en los sectores de las quebradas Totoral, Carrizal y Chacritas.

A partir de las pruebas de Gasto Constante se obtuvieron los valores de permeabilidad ( $K$ ) y Transmisibilidad ( $T$ ), utilizando el programa Acuífer Test mediante el Método de Theis.

Como resultado del análisis se determinó que en el sector de la quebrada Totoral, el valor promedio de la transmisibilidad es del orden de  $230 \text{ m}^2/\text{día}$ . En tanto en el sector de quebrada Carrizal éste valor es del orden de  $830 \text{ m}^2/\text{día}$ .

### **2.3 Calidad de las Aguas Subterráneas**

Como fue comprobado durante el trabajo, en la zona comprendida entre el río Copiapó por el norte y el río Huasco por el sur, existen varias cuencas costeras con importantes recursos hídricos, actualmente en explotación, por lo que fue necesario su caracterización desde el punto de vista de la calidad de sus aguas.

Para ello se programó y llevó a cabo una campaña de muestreos de agua subterránea para su análisis físico, químico y bacteriológico. Los puntos de muestreo (principalmente pozos y norias) fueron seleccionados de forma tal de cubrir toda la zona comprendida por dichas cuencas costeras.

Los parámetros de análisis se seleccionaron de modo de tener en cuenta la aptitud de dichas aguas para los diversos usos posibles (potable, riego), así como permitir su caracterización hidrogeoquímica. Los parámetros de análisis fueron los siguientes: *Amoníaco, Alcalinidad, Arsénico, Bicarbonatos, Boro, Bromuro, Calcio, Carbonatos, Cloruros, Cobre, Coliformes Fecales, Coliformes Totales, Conductividad Eléctrica, DBO<sub>5</sub>, DQO, Dureza Teórica, Fluoruro, Fosforo Total, Hierro, Magnesio, Manganeso, Nitrato, Nitrito, pH, Potasio, Sílice total, Sodio, Sólidos disueltos totales, Sulfato.*

Los muestreos fueron realizados por profesionales de la Dirección General de Aguas, y las muestras fueron enviadas para su proceso al laboratorio HIDROLAB, en Santiago.

A modo de síntesis respecto de la calidad del agua, se observan mayores valores de iones Na y Cl (por disolución del NaCl) en los pozos ubicados en los extremos de aguas arriba de las cuencas y en los de aguas abajo. En cambio los menores contenidos de salinidad se observan para los pozos de la zona central.

Lo anterior se atribuiría al hecho de que la principal recarga a los acuíferos se produce por precipitación en la zona central, donde los acuíferos son de mayor extensión y volumen, y permiten una mayor recarga.

Esto también es concordante con que indican concentraciones del total de sólidos disueltos, cloruros, arsénico y sulfatos, que son menores para las aguas que se encuentran en el relleno central.

Cabe destacar que esto refuerza la hipótesis establecida para el modelo conceptual, considerado en la modelación numérica, consistente en que la recarga se produce principalmente por percolación de una fracción de la precipitación, y esto es fundamentalmente en la zona central de las cuencas (relleno sedimentario de mayor extensión y potencia).

## **2.4 Características de la Explotación**

### **a) Zona al Norte del Río Copiapó**

Existen muy pocos derechos constituidos en las subcuencas costeras entre Salado y Copiapó. Uno sólo en la comuna de Caldera por 21 l/s. Asimismo no hay registros de derechos pendientes o solicitudes presentadas antes de Enero de 2009, según fue constatado en la DGA.

En la comuna de Chañaral hay 4 derechos que totalizan 32,8 l/s y pertenecen en su mayoría a la Minera Mantos Blancos.

Por otra parte, en conjunto con la DGA, se realizó, durante el mes de septiembre de 2008, el catastro de las captaciones subterráneas existentes en esta zona.

En dicho catastro, fueron ubicadas captaciones subterráneas (operativas o no) en la quebrada Guamanga, asociadas a la Minera Mantos Blancos; en la quebrada Salitrosa, cuyos derechos pertenecen a un propietario privado, y antepozos ubicados al interior de Caldera, utilizados por CORFO en su momento, es decir, ya no operativos.

Cabe destacar la escasa infraestructura existente para la explotación de aguas subterráneas en toda esta zona al norte del río Copiapó como se pudo constatar del recorrido efectuado en septiembre. Se constató además, que el abastecimiento de agua potable para Chañaral y Caldera, y para la mina Mantos Blancos, para su consumo operativo, proviene de la cuenca del río Copiapó.

### **b) Zona al Sur del Río Copiapó**

Esta zona si concentra la mayoría de los derechos constituidos y en trámite. En efecto, los derechos de agua subterránea constituidos totalizan 293 l/s, de ejercicio permanente y continuo. La mayoría de ellos se ubican en la Quebrada Carrizal.

Por su parte los derechos pendientes en la DGA, suman cerca de 278 l/s, la mayoría de los cuales corresponde a solicitudes ingresadas por el 4º transitorio, y una del 6º transitorio. En este caso también la mayoría de las solicitudes se ubican en la quebrada Carrizal.

Durante el mes de marzo de 2009 se llevó a cabo el catastro de captaciones subterráneas existentes en las cuencas costeras al sur del río Copiapó. Este abarcó todas las cuencas costeras ubicadas entre Copiapó y Huasco, específicamente a las quebradas Seca, Total, Carrizal, Boquerones y Chacritas.

Como resultado de este trabajo en terreno se identificaron 48 pozos, 93 norias, 74 zanjas y 5 captaciones no determinadas, que totalizan 220 captaciones subterráneas.

### **3. MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

#### **3.1 Desarrollo del Modelo**

Utilizando el programa Visual Modflow, se elaboró un modelo de flujo subterráneo para la zona comprendida por las cuencas de las quebradas Total y Carrizal.

La implementación del modelo consideró 2 etapas: la elaboración de un modelo en régimen permanente o estacionario, donde se representan las condiciones actuales de la cuenca en estudio mediante el proceso de calibración del modelo, y la implementación de un modelo en régimen impermanente o transiente, que utiliza como condición inicial los resultados del modelo estacionario, y representa la evolución histórica del sistema en los últimos 20 años. El horizonte de modelación implementado, por lo tanto, abarca el período entre Enero de 1989 y Marzo de 2009.

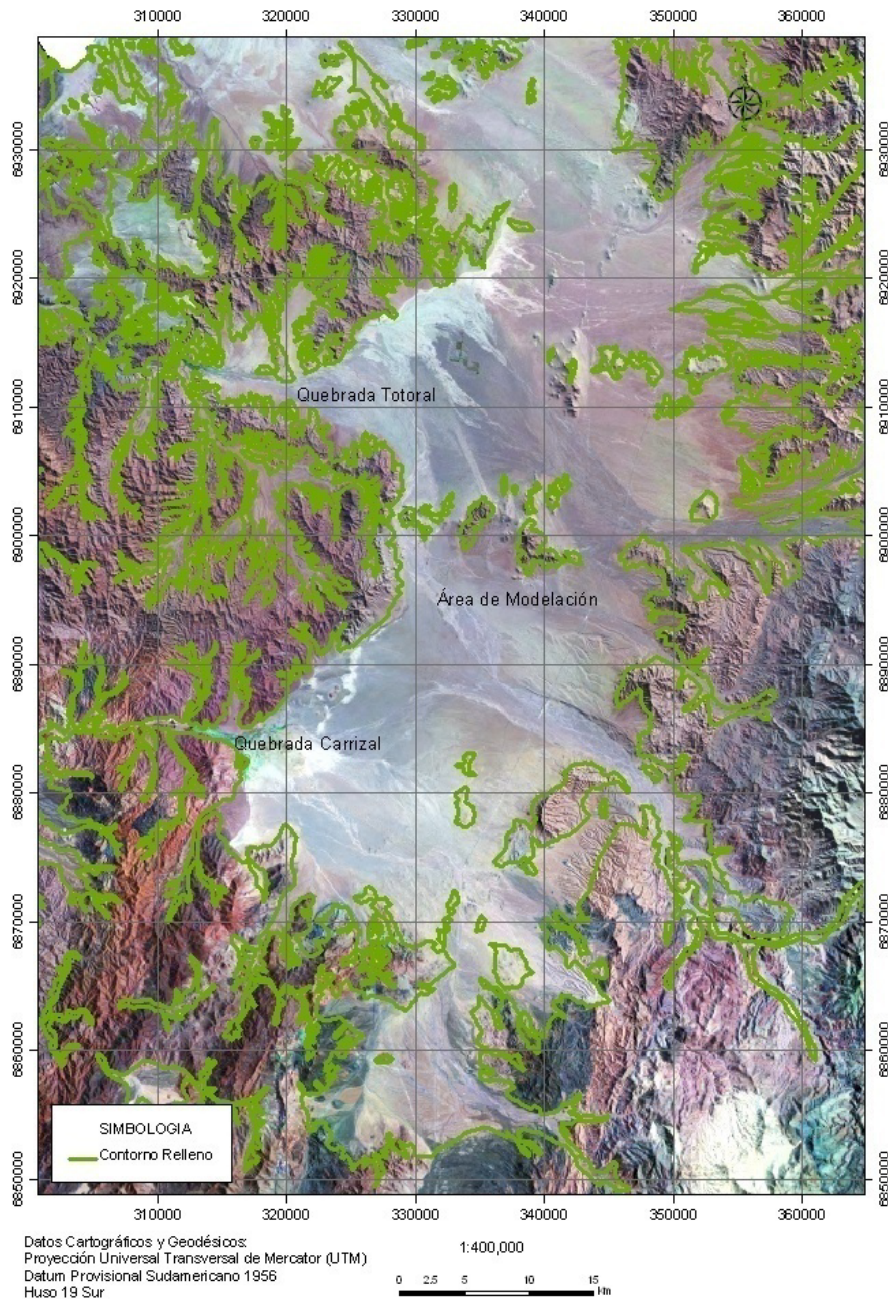
El modelo elaborado cubre la zona que incluye ambas cuencas. Los límites geográficos del modelo se han determinado de acuerdo a la extensión de los acuíferos analizados. De esta forma, el dominio de modelación cubre un área de 4.080 km<sup>2</sup>. La malla posee celdas cuyas dimensiones son de 250 m x 250 m, con lo que se obtiene 320 filas y 204 columnas, es decir, 65.280 celdas. El modelo contempla la continuidad de una unidad hidrogeológica heterogénea, no confinada, representada por 1 estrato con propiedades hidrogeológicas variables espacialmente.

La superficie de terreno asociada al modelo se obtuvo a partir de la topografía generada partir de las cartas IGM 1:50.000. Esta información permitió obtener curvas de nivel cada 25 m.

Para definir el basamento rocoso se utilizó principalmente la información obtenida a partir del estudio Geofísico, complementada con datos obtenidos de planos de construcción de pozos. En los sectores en los cuales no se contaba con esta información se utilizó una superficie de basamento que facilitara la convergencia del

modelo, de esta forma se determinó una profundidad mínima de basamento rocoso de 90 m. En la Figura siguiente se muestra el área de modelación.

Figura 3.1-1  
Área de Modelación



El modelo considera dos puntos de salida de flujo correspondientes a las quebradas Totoral y Carrizal. En ambos sectores se estableció como condición de borde, el nivel constante correspondiente al nivel estático del pozo más cercano a estos puntos. Estas condiciones fueron incluidas tanto en el modelo en régimen permanente, como en régimen transiente.

La recarga fue incorporada al modelo de manera distinta, según el régimen analizado sea permanente o transiente. La estimación de las recargas, producto de las precipitaciones en la zona, fueron estimadas previamente por métodos de infiltración como ya se ha señalado. Según esto se obtuvieron series mensuales de recargas para 40 años en cada subcuenca, y distribuida espacialmente por franjas de diferente altura, cada 200 m de elevación del terreno.

Para el modelo en régimen permanente, la recarga del sistema se determinó a partir del promedio de las series de recargas mensuales.

La recarga en régimen impermanente ha sido incorporada directamente desde las series mensuales de recarga obtenidas mediante el método SCS, a partir de la serie de precipitaciones mensuales de la cuenca.

Por otro lado, en el área de modelación se han identificado dos zonas en las cuales existe evaporación y/o evapotranspiración, que corresponden a los sectores de angostamiento de las quebradas mencionadas. Son zonas donde el nivel freático se aproxima a la superficie e incluso aflora el agua generando una abundante vegetación como el caso de quebrada Totoral.

Para estos sectores se ha utilizado una tasa de evaporación de 1430 mm/año obtenida a partir de la información hidrometeorológica de la zona.

Los valores de las permeabilidades asociadas a la zona de modelación, se obtuvieron a partir de pruebas de gasto constante recopiladas de los expedientes e información relacionada con los pozos de la zona. La limitada información hidrogeológica en la zona de modelación, y en particular, de parámetros de almacenamiento, obligó a adoptar valores típicos de rendimiento específico ( $S_y$ ) para acuíferos no confinados, para ser incorporados al modelo.

Para la calibración del modelo se utilizaron antecedentes de niveles estáticos de los pozos, norias y zanjas obtenidos desde las siguientes fuentes:

- Catastro realizado en Marzo de 2009 en la zona de estudio.
- Niveles históricos observados en pozos de la DGA, desde 1989 a la fecha. Estos pozos se ubican en su totalidad, en la subcuenca de la quebrada Carrizal

La primera fuente de información fue considerada para la calibración en régimen permanente, al presentar una visión global de la explotación de la zona en el período de realización del catastro.

Además, dicha fuente de información fue incluida también en el modelo en régimen transiente o impermanente, en particular en el último período del horizonte de modelación correspondiente al año 2009.

La segunda fuente de información fue considerada para el ajuste del modelo en régimen impermanente, al representar la evolución de los niveles estáticos en 7 pozos de monitoreo de la DGA, con antecedentes desde 1989 a la fecha. Dicho período de información fue el que definió finalmente el tiempo de simulación en régimen transiente, que como se mencionó anteriormente, abarca justamente los últimos 20 años.

Además de la información puntual de niveles estáticos, se trazaron las curvas equipotenciales utilizando ArcGis.

En cuanto a la explotación por el bombeo de los pozos considerada en la modelación, ésta fue obtenida del catastro y encuestas de terreno. Para el caso transiente, se consideró la información sobre el inicio de los bombeos, y sus reglas estacionales de operación (para invierno y verano) para cada una de ellas.

### **3.2 Calibración en Régimen Permanente**

El proceso de calibración en régimen permanente consistió en reproducir en el modelo los niveles estáticos de los pozos observados durante el catastro realizado en marzo de 2009, y la tendencia de las curvas equipotenciales. Para esto, se operó el modelo en régimen permanente y se modificó la distribución de permeabilidades dejando fijos los otros parámetros, hasta obtener niveles freáticos cercanos a los medidos.

Considerando la gran cantidad de puntos de observación, se realizó un análisis general de la información obtenida en el catastro. Durante dicho análisis, se identificaron algunos casos en los cuales se observaban importantes diferencias de niveles entre pozos cercanos, por lo tanto se eliminaron aquellos pozos que se alejaban de la tendencia general. También se eliminaron aquellos puntos que presentaban inconsistencias con la topografía del lugar.

Finalmente se ajustó el modelo para obtener un error promedio normalizado (Normalized RMS) de 1,25%. Este valor se considera muy aceptable dada la gran cantidad de datos y la gran variabilidad en los niveles medidos.



### 3.3 Calibración en Régimen Impermanente

Una vez realizada la calibración en régimen permanente, se efectuó el ajuste en régimen impermanente o transiente, donde se incorporan al modelo los siguientes elementos:

- Serie mensual de recargas: se incorpora al modelo la recarga como serie mensual de datos estimados a partir de la estadística mensual de precipitaciones en la zona.
- Pozos de observación medidos por la DGA: Se incorporaron además, los registros de niveles estáticos de 7 pozos de monitoreo de la DGA, con mediciones desde 1989 a la fecha.
- Bombeo desde captaciones subterráneas: De acuerdo con la información recopilada en el catastro de marzo de 2009. En aquellas captaciones sin información respecto al inicio de sus operaciones, se asumió que comenzaban a operar desde Enero de 1989.
- Pozos de observación catastrados: Se incorporaron los pozos catastrados en marzo de 2009. Los niveles de estos pozos corresponden al último período de modelación.

El modelo en régimen transiente fue definido para el período entre el 1 de Enero de 1989 y el 31 de Marzo de 2009, es decir, 7.395 días. Dicho período fue dividido en 108 subperíodos ("stress period"), generándose por lo tanto, los resultados de modelación para cada uno de ellos.

Como condición de borde de nivel inicial en el modelo, se consideró la solución en régimen permanente obtenida en el punto anterior.

El proceso de calibración del modelo en régimen transiente, considera la variación del rendimiento específico del acuífero (puesto que se trata de acuíferos no confinados), de tal forma de reproducir la variación o tendencia de los niveles observados durante el tiempo para los pozos de observación de la DGA, y además reproducir los niveles observados en las captaciones catastradas en marzo de 2009, para el último período de modelación.

En el proceso de calibración en régimen transiente se priorizó, en lo posible, representar la tendencia de los niveles estáticos por sobre los valores en sí. Los resultados se presentan en las figuras siguientes.

Luego del ajuste del modelo transiente se obtuvo un valor del error promedio normalizado RMS del orden de 1,1 %, correspondiente al último periodo de simulación.

#### 4. DETERMINACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN SUSTENTABLE

El modelo hidrogeológico desarrollado para los acuíferos de las cuencas costeras ubicadas entre el río Copiapó y Huasco (cuencas denominadas Carrizal y Totoral), fue aplicado para diversos escenarios de explotación, con el fin de determinar la explotación sustentable de aquellos.

Para esto último, la DGA dispone de criterios que deben ser cumplidos en aquellos sectores donde se requiere evaluar la demanda máxima sustentable. Dichos criterios, que en la práctica representan restricciones respecto a la explotación del acuífero, se detallan más adelante.

En cualquiera de los escenarios definidos e implementados, el horizonte de modelación consideró un período de 50 años.

Los escenarios de explotación definidos y analizados fueron los siguientes:

1. **Escenario 1:** Proyecta la demanda actual existente sobre los acuíferos en estudio. Aquí la demanda se refiere a la explotación real actual determinada en el trabajo de terreno.
2. **Escenario 2:** Proyecta la demanda total de los derechos sobre los acuíferos en estudio. Incorpora tanto los derechos constituidos, como los derechos en trámite.
3. **Escenario 3:** Determina, mediante la aplicación de los criterios establecidos por la DGA, la explotación máxima sustentable sobre los acuíferos en estudio.

Todos estos escenarios incorporan como día 1 de modelación, el 1 de Abril de 2009; es decir, inmediatamente después del fin del modelo calibrado en régimen transiente. A su vez, el día final de modelación es el 31 de Marzo de 2059, una vez cumplidos los 50 años de simulación.

El escenario 1 reproduce la explotación actual efectiva sobre los acuíferos, la cual fue determinada mediante el catastro realizado en marzo de 2009, e incorporada en el modelo. Para la implementación de este escenario, las extracciones fueron proyectadas hasta el año 2059 de manera estacional, asumiendo que los caudales de invierno se distribuyen entre el 1 de Abril y el 30 de Septiembre de cada año, mientras que los caudales de verano se producen entre del 1 de Octubre y el 31 de Marzo.

El escenario 2, proyecta la demanda correspondiente a los derechos constituidos por la DGA más aquellos que se encuentran pendientes o en trámite. Al igual que el escenario anterior, dichas demandas han sido incorporadas al modelo en el día 1, y proyectadas de manera continua por 50 años. Con respecto a los derechos incorporados a este escenario, sus totales son los siguientes:

- Total constituidos: 313 l/s.
- Total en trámite: 274 l/s.
- Total asociados a subcuenca Totoral (constituidos y en trámite): 104 l/s.
- Total asociados a subcuenca Carrizal (constituidos y en trámite): 483 l/s.

El escenario 3, el más importante, permitió determinar la explotación máxima sustentable que es capaz de soportar el sistema acuífero analizado. Se analizaron en forma separada las subcuencas de Totoral y Carrizal, con el fin de establecer dicha explotación para cada una de ellas.

Para determinar la explotación máxima sustentable, la DGA ha definido criterios que se deben cumplir. El procedimiento consiste en maximizar la explotación en el sector acuífero de interés, sujeto a una serie de restricciones que se detallan a continuación.

#### Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero

Los descensos generales en el sector deben estar estabilizados para una operación del sistema en 50 años. Si los descensos son sostenidos, se considera que el volumen de afección sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero. En caso contrario, el sistema acuífero será considerado con afección y se deberá cerrar el acuífero. Dicha condición se representa mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_0 - V_{50}}{V_0} < 0,05$$

Donde  $V_{50}$  indica el volumen del acuífero a los 50 años de operación indicados por el modelo y  $V_0$  corresponde al volumen inicial en el acuífero.

En caso que los descensos sean sostenidos y no se cumpla la condición de cierre para volúmenes, se deberá aumentar la extracción hasta alcanzar la condición del 5%.

#### Criterio 2: Satisfacción de la Demanda

Para cada sector hidrogeológico, se debe asegurar una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda (derechos) y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

$$Q_{OFERTA} > 95\% \cdot Q_{DEMANDA}$$

### Criterio 3: Pozos Secos

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$\frac{\text{Nº de pozos secos}}{\text{Nº total de pozos}} < 5\%$$

Por lo tanto, para determinar la explotación máxima sustentable se ha utilizado el siguiente proceso iterativo:

- Se han evaluado los 3 criterios anteriores para el escenario 2 (que, sin considerar el escenario 3, es el de mayor explotación).
- En caso que se cumplan satisfactoriamente los 3 criterios (como efectivamente ocurrió), se agregan nuevos pozos de explotación distribuidos homogéneamente por toda la cuenca. Se estableció que cada pozo agregado se le asigna un caudal de explotación de 10 l/s.
- Si el escenario 2 no hubiese cumplido los criterios, habría que haber descartado algunos derechos en trámite incluidos en el modelo como pozos de explotación, hasta cumplir con las restricciones.
- Una vez agregado el o los pozos nuevos considerados, se evalúan nuevamente los criterios definidos por la DGA.
- Si la nueva explotación permite cumplir los criterios, ésta se aumenta mediante nuevos pozos distribuidos por la cuenca en estudio. En caso que una de las restricciones no se cumpla, se disminuye la explotación eliminando los suficientes pozos agregados con anterioridad, de tal forma que se consiga la explotación que se acerque lo más posible a los límites impuestos por los criterios DGA. Dicha explotación será la máxima sustentable asociada al acuífero en estudio.

Los pozos fueron agregados distribuidos por toda la superficie de las subcuencas. El fin de lo anterior es agotar el acuífero de manera distribuida y no localizada, y de paso, evitar el desembalse local y puntual del acuífero.

De acuerdo con los resultados de los escenarios, explotar la zona en estudio a través de los derechos ya constituidos por la DGA y sumados a aquellos en trámite a la fecha del presente trabajo, ininterrumpidamente por 50 años, agota alrededor de un 2% del volumen total del acuífero Totoral, y alrededor de un 3,8 % para el acuífero Carrizal.

Es decir, la explotación sustentable de los acuíferos puede ser mayor que los caudales de bombeo asociados a los derechos actuales. Por consiguiente ambos acuíferos pueden soportar una explotación mayor que la de los derechos actuales (constituidos y pendientes).

## **5. CONCLUSIONES**

El estudio realizado ha permitido establecer diversas conclusiones atinentes a los objetivos generales y específicos planteados.

El primer aspecto relevante tiene relación con la información recopilada y procesada para la zona de estudio, esto es los acuíferos costeros ubicados entre los ríos Salado y Huasco. Esta zona se caracterizaba por una gran escasez de información sobre los recursos hídricos, por lo que se ha logrado un aporte sustantivo al conocimiento de los recursos existentes en estas cuencas costeras.

En tal sentido, la exploración geofísica aplicada tanto en la cuenca costera norte (entre ríos Salado y Copiapó) como en la cuenca costera sur (entre ríos Copiapó y Huasco), representa una información inédita en materia hidrogeológica, y por lo tanto, información valiosa al momento de implementar un modelo de este tipo en la zona.

Por otro lado, resultó fundamental el catastro de captaciones realizado en ambas zonas (norte y sur), mediante el cual se pudo tener una clara idea de la magnitud de la explotación efectiva actual en las cuencas costeras analizadas. Dicho catastro se complementó con la información recopilada referente a los derechos constituidos y pendientes de la zona, así como la estimación general de las demandas actuales y su proyección futura.

Bajo la misma directriz, el análisis hidrológico bajo el cual se estimó la recarga real de las cuencas estudiadas durante los últimos 20 años, presentó, de manera prolija, importantes antecedentes referentes a la disponibilidad del recurso hídrico en la zona. Los resultados obtenidos en este análisis de las recargas, han sido confirmados por el modelo numérico implementado también en este estudio.

Además, el estudio incluyó en estudio hidrogeológico de la zona, el cual permitió identificar y caracterizar los cuerpos acuíferos existentes en la zona de estudio. Esta información resultó fundamental para el desarrollo de la etapa de modelación hidrogeológica.

Por lo tanto, una primera conclusión importante del trabajo, se refiere al aporte que éste realiza en términos de elaboración de información básica para la zona. Esto es válido especialmente para la zona al sur del río Copiapó.

La segunda conclusión importante, la cual se obtuvo justamente a partir de la información recopilada y desarrollada, es la escasa disponibilidad de recursos hídricos para las cuencas costeras ubicadas entre los ríos Salado y Copiapó, o zona norte del estudio. Dicha ausencia de recursos es manifiesta en la práctica, en que las demandas existentes en la zona deben ser abastecidas mediante recursos provenientes de la vecina cuenca del río Copiapó.

A partir de esa conclusión, los esfuerzos se concentraron en estudiar en detalle las cuencas costeras ubicadas al sur del río Copiapó, hasta el río Huasco, incluyendo el desarrollo de un modelo numérico para poder determinar la sustentabilidad de los acuíferos.

En esa zona se efectuó además una caracterización hidroquímica de sus aguas. Los parámetros de análisis se seleccionaron de modo de determinar la aptitud de dichas aguas para los usos potable y riego, así como permitir su caracterización hidroquímica. De esos análisis, se desprende que hay mayor contenido salino para las aguas ubicadas en los sectores periféricos de las cuencas (su parte alta y baja). Lo anterior se atribuiría al hecho de que la principal recarga a los acuíferos se produce principalmente en las zonas centrales del relleno que alberga acuíferos de mayor volumen.

Lo anterior fue verificado con el desarrollo del modelo conceptual y numérico en cuanto a que la recarga se produce principalmente por percolación de una fracción de la precipitación en la zona central de las cuencas (relleno sedimentario de mayor extensión y potencia). Al mismo tiempo, esto significa que las aguas son más aptas para su uso juntamente en las zonas de mayor acumulación de recursos subterráneos.

La modelación hidrogeológica (sobre la base del programa Visual Modflow) se desarrolló a partir de la caracterización hidrogeológica cuantitativa. Esto es: una geometría refinada con bastante precisión gracias a la geofísica complementada con el detalle de planos de construcción de pozos, y de la geología. Además se utilizó información referente al catastro de captaciones, pruebas de bombeo, niveles observados en los pozos de monitoreo de la DGA, niveles observados en pozos catastrados, etc.

El primer paso del proceso de modelación hidrogeológica consistió en desarrollar el modelo en régimen permanente, con el fin de ajustar los parámetros hidrogeológicos y verificar la recarga estimada previamente bajo consideraciones hidrológicas. El ajuste del modelo fue realizado contrastando los niveles estáticos observados en los pozos catastrados, con los niveles calculados por el modelo.

En dicho proceso de ajuste se modificó la distribución de permeabilidades y se realizó un análisis de sensibilidad de las recargas incorporadas al modelo con el fin de determinar las condiciones que optimizan el proceso de calibración.

Los resultados del balance hídrico para la condición de régimen permanente se entregan en la Tabla 5-1 y Figura 5-1.

Una vez determinado lo anterior, fue implementado el modelo en régimen transiente. Esto fue definido para el período 1989-2009, e incorporó la serie mensual de recargas determinadas en el estudio hidrológico de la zona, las demandas obtenidas en el catastro realizado, y la distribución de permeabilidades obtenidas en la calibración en régimen permanente.

El proceso de calibración de este modelo fue realizado contrastando las series temporales de niveles observados en pozos administrados por la DGA, los cuales poseen información desde 1989. Dicho ajuste fue obtenido modificando la distribución del rendimiento específico del acuífero en estudio.

Los resultados del ajuste transiente mejoran la representatividad del sistema acuífero, en sentido de incluir el estado de equilibrio que éste experimenta actualmente según lo muestra el monitoreo que efectúa la DGA.

Tabla 5-1  
Balance Hídrico Régimen Permanente  
Subcuenca Totoral

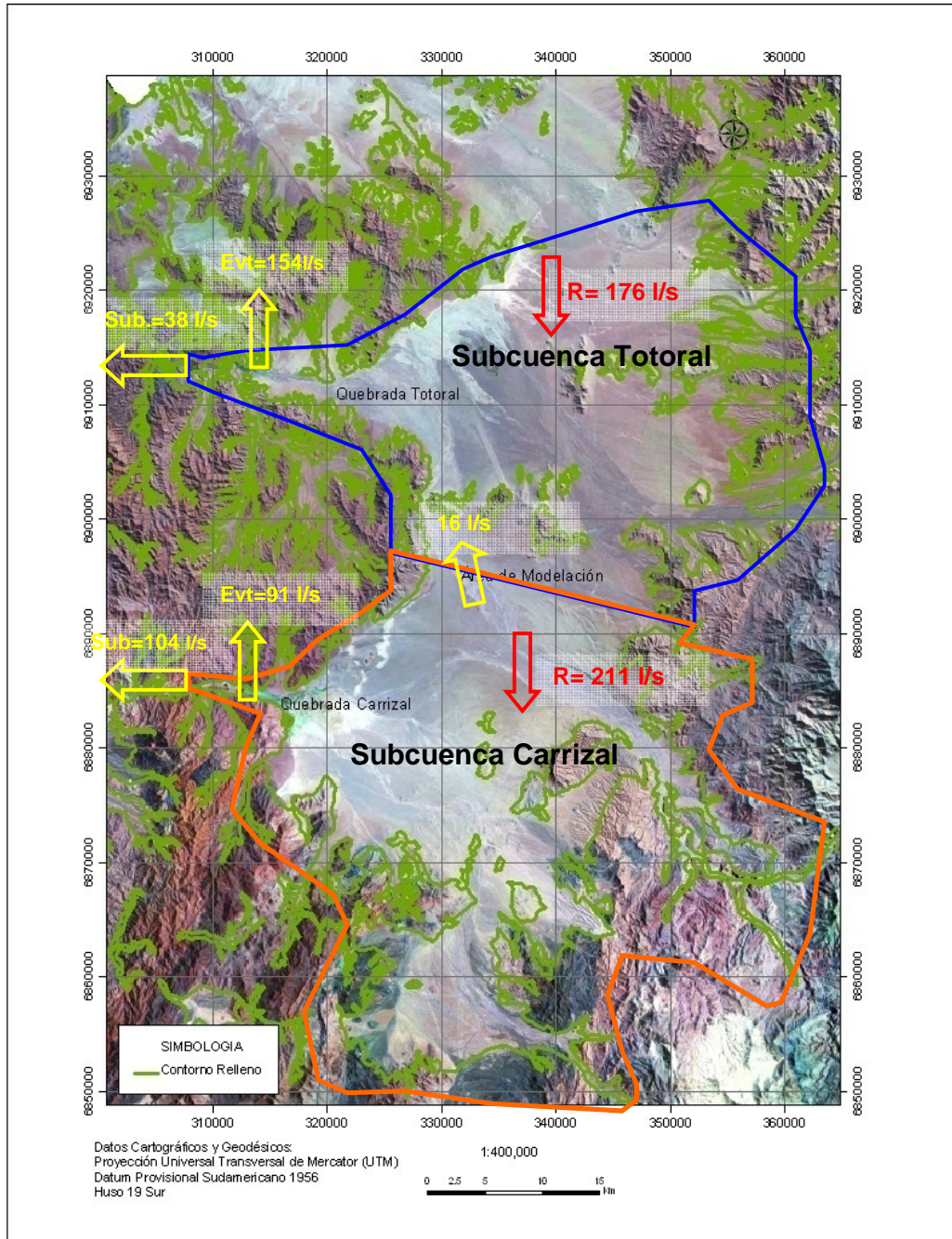
Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Recarga por Precipitación	176	Afloramiento en angostura	38
Aporte desde Subcuenca Carrizal	16	Evapotranspiración en zona de afloramiento	154
Total	192	Total	192

Subcuenca Carrizal

Entradas		Salidas	
Recarga por Precipitación	211	Afloramiento en angostura	104
		Aporte hacia Subcuenca Totoral	16
		Evapotranspiración en zona de afloramiento	91
Total	211	Total	211

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5-1  
Balance Hídrico por Subcuencas Totoral y Carrizal. Régimen Permanente.



Fuente: Elaboración Propia



Cabe destacar que para el balance en régimen transiente, y en los escenarios analizados, la recarga media fue estimada como un promedio ponderado, que considera el período que abarca cada uno de los valores de la serie.

Con el modelo de simulación se procedió a analizar y determinar la explotación sustentable de las cuencas al Sur del río Copiapó, analizando para ello diversas proyecciones de la explotación futura de la cuenca. Para el estudio de los escenarios se consideró un período de simulación de 50 años, a partir del presente. Fueron analizados 3 escenarios de explotación, como se ha explicado anteriormente.

Para el primero, que consistió en proyectar la explotación real actual por 50 años más, se obtuvo los siguientes resultados para el balance, en cifras promedio sobre todo el periodo:

Tabla 5-2  
Resumen de Balances Hídricos Resultantes de la Modelación Futura. Escenario 1.

Subcuenca Totoral			Subcuenca Carrizal		
Ítem		Caudal (l/s)	Ítem		Caudal (l/s)
IN	Recarga	85	IN	Recarga	102
	Aporte Subcca. Carrizal	15	OUT	Salida a Subcca. Totoral	15
OUT	Evapotranspiración	143		Evapotranspiración	84
	Bombeo Pozos	32		Bombeo Pozos	60
	Salida por Qda. Totoral	39		Salida por Qda. Carrizal	102
Desembalse Neto		115	Desembalse Neto		159
Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	1%	Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	0%
	En caudal (l/s)	1,0		En caudal (l/s)	0,0

Fuente: Elaboración Propia

El segundo escenario consistió en proyectar, como explotación del sistema acuífero, los derechos ya constituidos y aquellos que se encuentran en trámite, por el período de 50 años. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 5-3

Resumen de Balances Hídricos Resultantes de la Modelación Futura. Escenario 2.

Subcuenca Totoral			Subcuenca Carrizal		
Ítem		Caudal (l/s)	Ítem		Caudal (l/s)
IN	Recarga	85	IN	Recarga	102
	Aporte Subcca. Carrizal	13	OUT	Salida a Subcca. Totoral	13
OUT	Evapotranspiración	128		Evapotranspiración	44
	Bombeo Pozos	102		Bombeo Pozos	478
	Salida por Qda. Totoral	36		Salida por Qda. Carrizal	82
Desembalse Neto		168	Desembalse Neto		515
Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	0%	Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	0%
	En caudal (l/s)	0,0		En caudal (l/s)	0,0

Fuente: Elaboración Propia

En el tercer escenario, tuvo por finalidad determinar la explotación máxima sustentable de los acuíferos asociados a las subcuencas Carrizal y Totoral. De acuerdo con lo anterior, se obtuvo que la explotación máxima sustentable es la siguiente:

- Cuenca Totoral: 360 l/s.
- Cuenca Carrizal: 635 l/s.
- Total ambas subcuencas: 995 l/s

Para este escenario se obtuvo el siguiente balance hídrico:

Tabla 5-4

Resumen de Balances Hídricos Resultantes de la Modelación Futura. Escenario 3.

Subcuenca Totoral			Subcuenca Carrizal		
Ítem		Caudal (l/s)	Ítem		Caudal (l/s)
IN	Recarga	84	IN	Recarga	102
	Aporte Subcca. Carrizal	14	OUT	Salida a Subcca. Totoral	14
OUT	Evapotranspiración	111		Evapotranspiración	42
	Bombeo Pozos	362		Bombeo Pozos	638
	Salida por Qda. Totoral	31		Salida por Qda. Carrizal	81
Desembalse Neto		406	Desembalse Neto		673
Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	0%	Error de Balance	C/R a Flujo de Entrada	0%
	En caudal (l/s)	0.0		En caudal (l/s)	0.0

En resumen, considerando los derechos constituidos y pendientes a la fecha, habría una disponibilidad neta para nuevos derechos de cerca de 400 l/s en ambas subcuencas, que se distribuyen en 250 l/s para Totoral y de 150 l/s para Carrizal.

Los resultados acá presentados, señalan que existen recursos disponibles en ambos acuíferos (Carrizal y Totoral), para acoger favorablemente las solicitudes actualmente pendientes así como nuevas solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, hasta completar las cifras de extracción sustentable antes señaladas.