



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE RECARGA GESTIONADA EN LA CUENCA DE COPIAPO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

TOMÁS NICOLÁS ALDUNATE SEPÚLVEDA

**PROFESOR GUIA:
DOLORINDA DANIELE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL ANGEL CARO HERNÁNDEZ
CARLOS PARRAGUEZ DECKER**

**SANTIAGO DE CHILE
2017**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo.
POR: Tomás Nicolás Aldunate Sepúlveda
Fecha: 05/09/2017
PROFESOR GUÍA: Dolorinda Daniele

Evaluación de métodos de recarga gestionada en la cuenca de Copiapó

La cuenca de Copiapó se ubica en la III región de Atacama, abarca una superficie aproximada de 18.400 km² y está compuesta por 6 subcuencas: río Jorquera, río Pulido, río Manflas, quebrada Paipote, río Copiapó medio y río Copiapó Bajo. El acuífero de la cuenca desde el año 1989 ha estado sometido a intensas extracciones de agua, a tasas de 50 a 100 Mm³/año, sumado a la sequía que afectó a la zona durante la última década ha puesto en situación crítica a la cuenca debido a la escasez hídrica.

Utilizando como escenario base la actualización realizada por la dirección general de aguas al modelamiento numérico de la cuenca se elige la mejor zona para evaluar dos escenarios; utilizar el lecho seco del río y la infiltración a través de pozos profundos. Al sector 3 de la división administrativa del acuífero, debido a que en el sector de la Puerta hay un alzamiento del basamento rocoso lo que permite el afloramiento de las aguas subterráneas.

En ambos escenarios propuestos se obtienen mejoras a la situación actual al comparar el balance hídrico con el obtenido para el modelo base, el escenario de lecho presenta una disminución del 12.75% de perdidas mientras que el de pozos un 40%. Los niveles estáticos calculados por los modelos indican una recuperación mayor en el escenario de pozos, no obstante utilizar el lecho del río logra generar recuperación incluso en los últimos sectores del acuífero.

Otro punto a analizar son los costos asociados a ambos escenarios, considerando que ambos proyectos necesitan el ingreso de 2 m³/s a la cuenca se optó por evaluar la opción de desalinizar agua de mar y su traslado al sector 3, el costo de esto asciende aproximadamente a 1.33 dólares el metro cúbico. Adicionalmente, el escenario de pozos debe considerar el costo de construcción de estos que asciende a 2.411.351.740 pesos.

Tomando en consideración los costos y beneficios, se concluye que a pesar de tener un costo inicial mayor, la mejor alternativa es la obtenida por el escenario de pozos.

A MI FAMILIA Y AMIGOS

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Alejandro y Claudia, por aguantarme durante casi 28 años, apoyarme y tratar de darme siempre lo mejor en la vida. A mi tío Ricardo por escucharme cuando necesitaba hablar, a mis hermanas: Macarena y Valentina, por siempre soportarme durante los años que vivimos juntos mientras estudiaba, a la Daniela por enseñarme calculo durante el primer año y darme el mejor regalo de mi vida, José Antonio. También a mis tíos Andrés y Andrea, por siempre tratar de entregarme un poco de calor familiar, a mis primos Javiera, Catalina y Agustín por recibirme en su casa cuando los iba a molestar y por último a mi nona que era la más preocupada porque terminara.

A mi profesora guía Linda Daniele, por permitirme trabajar con ella y por aconsejarme cuando no quería seguir adelante con esto, muchas gracias. A Miguel Angel por estar siempre dispuesto a reunirse y ayudarme con los problemas que surgían a medida que avanzábamos, por sus consejos y apoyo. Al profesor Carlos por aceptar ser parte de la comisión y a todos los docentes que formaron parte de mis años en el departamento. No puedo dejar de nombrar a la blanquita, por su disposición a ayudarme con los temas burocráticos que conllevo este trabajo ¡que no fueron pocos!

A mis amigos, los “que ashe” que vienen apañando desde el colegio, muchos años y seguimos sumando. A los iquiqueños amigos de la vida o curso, muchas gracias por acompañarme estos años. A los “ejecutivos”, por su humor diferente y sus palabras de “aliento” durante el proceso de esta tesis. A los amigos de plan común: Kura, chica, papalika, aralito. Sin ustedes probablemente no hubiese aguantado en la facultad. A los geocabros: tuqui, gogo, moreno, kathy, seba, mono, varguitas, cebolla, chama, cami, consu, baeza y a todos los que se me quedan en el tintero, un abrazo.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	2
1.4 METODOLOGÍAS	2
2 RECARGA GESTIONADA.....	3
2.1 DEFINICIÓN	3
2.2 ASPECTOS TÉCNICOS	3
2.3 ASPECTOS LEGALES	4
2.4 CALIDAD DE AGUA.....	5
2.5 MECANISMOS DE RECARGA	7
2.6 EXPERIENCIAS NACIONALES.....	10
3 ANTECEDENTES GENERALES.....	13
3.1 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO.....	13
3.2 GEOMORFOLOGÍA.....	16
3.3 ANTECEDENTES CLIMÁTICOS	18
3.4 ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS	19
4 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	25
4.1 GEOLOGÍA DE LA CUENCA.....	25
4.2 HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA	33
4.3 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA	38
4.4 CLASIFICACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA.....	51
5 MODELOS.....	61
6 CONCLUSIONES	84
7 BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXO A: MODELO LECHO DE RÍO	87
ANEXO B: MODELO DE POZOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIÓN EN ACUÍFEROS DE VULNERABILIDAD BAJA Y MEDIA,	6
TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN DE MECANISMOS DE RECARGA	8
TABLA 3. 1 INFORMACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS, EXTRAÍDA DICTUC (2010).....	19
TABLA 3. 2 PRECIPITACIÓN MEDIA EN LAS ESTACIONES, EXTRAÍDA DICTUC (2010).....	20
TABLA 3.3 RESUMEN PRECIPITACIÓN ESTACIONAL, EXTRAÍDA DICTUC (2010) .	20
TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES POR SUBCUENCAS, MODIFICADO DE DGA (2013). *EN AÑOS HÚMEDOS	21
TABLA 3.5 DATOS DE LAS ESTACIONES FLUVIOMETRICAS UTILIZADAS, MODIFICADA DGA (2013).....	22
TABLA 3. 6 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES MÁS CAUDAL ANUAL (m^3/s), MODIFICADA DGA (2013)	22
TABLA 3.7 UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS, EXTRAÍDA DGA (2013).....	23
TABLA 3.8 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL Y ANUAL (°C), EXTRAÍDA DGA (2013)	23
TABLA 3.9 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL, EXTRAÍDA DGA (2013)	24
TABLA 4. 1 VALORES DE TRANSMISIVIDAD, EXTRAÍDA DGA (2013).....	35
TABLA 4. 2 VALORES DE TRANSMISIVIDAD, MODIFICADA DE DGA (2013)	36
TABLA 4.3 VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD, MODIFICADO DGA (2013).....	37
TABLA 4. 4 TABLA RESUMEN DE LOS TIPOS DE AGUA PARA EL ACUÍFERO DE COPIAPÓ, EXTRAÍDA SERNAGEOMIN (2012).....	52
TABLA 4. 5 EXCEDE LOS LÍMITES EN CADA NORMA, * SOLO CORRESPONDE EN NORMA AGUA POTABLE, ** SOLO CORRESPONDE A NORMA PARA RIEGO, *** SOLO ALGUNAS MUESTRAS SUPERAN EL LIMITE	55
TABLA 5. 1 COMPARACIÓN ENTRE AMBOS TIPOS DE PLANTA, MODIFICADO DE MONTAÑO (2011)	71
TABLA 5. 2 CALCULO DE COSTOS PARA PLANTAS RO, EXTRAÍDA DE MONTAÑO (2011).....	72
TABLA 5. 3 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN POZOS, MODIFICADO DGA 2013-B.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 ZONA DE ESTUDIO, CUENCA DEL RIO COPIAPÓ, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE. EXTRAÍDA GOOGLE EARTH.....	13
FIGURA 3. 2 LÍMITES DE LA CUENCA Y LAS 6 SUBCUENCAS CON SUS PRINCIPALES REDES DE DRENAJE, EXTRAÍDO DE DICTUC 2010.....	14
FIGURA 3. 3 SECTORES DE APROVECHAMIENTO HIDROGEOLÓGICOS REALIZADOS POR LA DGA, EXTRAÍDO DGA (2013)	15
FIGURA 3. 4 ESPACIOS NATURALES, EXTRAÍDO IGM (1989).....	16
FIGURA 3.5 GRADIENTE PLUVIOMÉTRICO, EXTRAÍDO DGA (2013)	21
FIGURA 4.1 PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO ROCOSO	26
FIGURA 4.2 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 1.A.....	39
FIGURA 4.3 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 1.B.....	39
FIGURA 4.4 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 2.....	40
FIGURA 4.5 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 3.....	41
FIGURA 4.6 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 4.....	42
FIGURA 4.7 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 5.....	43
FIGURA 4.8 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SECTOR 6.....	44
FIGURA 4. 9 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 1	45
FIGURA 4. 10 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 2	46
FIGURA 4. 11 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 3	47
FIGURA 4. 12 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 4	48
FIGURA 4. 13 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 5	49
FIGURA 4. 14 DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN EL SECTOR 6	50
FIGURA 4. 15 EVOLUCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA.	54
FIGURA 4. 16 DIAGRAMA PIPER VERANO	57
FIGURA 4. 17 DIAGRAMA PIPER INVIERNO.....	58
FIGURA 4. 18 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE LA MUESTRA CON LA NORMA PARA AGUA POTABLE	60
FIGURA 4. 19 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE LA MUESTRA CON LA NORMA PARA RIEGO.....	60
FIGURA 5. 1 GEOMETRÍA PLANTA MODELO ALTO.....	62
FIGURA 5. 2 GEOMETRÍA PLANTRA MODELO BAJO	63
FIGURA 5. 3 PERFIL MODELO ALTO	64
FIGURA 5. 4 PERFIL MODELO BAJO	64
FIGURA 5. 5 CALIBRACIÓN-VALIDACIÓN MODELO ALTO	65
FIGURA 5. 6 CALIBRACIÓN-VALIDACIÓN MODELO BAJO	66
FIGURA 5.7 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 1.....	67
FIGURA 5. 8 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 2.....	67
FIGURA 5. 9 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 3.....	68
FIGURA 5. 10 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 4.....	68
FIGURA 5. 11 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 5.....	69

FIGURA 5. 12 COMPARACIÓN NIVELES SECTOR 6.....	69
FIGURA 5. 13 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 3A.	78
FIGURA 5. 14 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 3B.	79
FIGURA 5. 15 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 4.....	80
FIGURA 5. 16 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 5.....	81
FIGURA 5. 17 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 6A.	82
FIGURA 5. 18 NIVELES ESTÁTICOS SECTOR 6B.	83

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO

El acuífero de la cuenca del río Copiapó, desde el año 1989 ha sufrido intensas extracciones de agua a tasas de 50 a 100 MMm³/año, esto probablemente producto del incremento de la demanda en relación con el aumento de proyectos mineros y agrícolas, sumado al aumento de habitantes en la región de Atacama (CONAMA-DGA, 2009). Adicionalmente, los últimos años de sequía que han afectado a la región y a Chile, han vuelto aún más acentuada la escasez de recursos hídricos y en los últimos tiempos ha incrementado la preocupación por la situación tan extrema en la que se encuentra la región de Atacama. Este escenario ha hecho imperante la necesidad de buscar alternativas para resolver ésta problemática.

El río Copiapó se origina en La junta, en la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido, ambos son los principales afluentes. Existe un tercer afluente, el río Manflas, y estos son casi los únicos aportes superficiales, por lo cual solo un tercio de la cuenca hidrográfica es activa. (DGA, 2004)

El acuífero del valle del río Copiapó es la unidad hidrogeológica de mayor importancia, por su productividad y extensión. Está conformado principalmente por depósitos fluviales de edad pleistocena a holocena, en este se concentran casi todas las extracciones de agua de la cuenca y administrativamente se ha subdividido en 6 sectores a pesar de ser solo un acuífero, esto debido a un comportamiento distintivo de los niveles de agua subterránea en cada uno de ellos. (SERNAGEOMIN, 2012)

En los casos de escasez extrema, existen diferentes alternativas que pueden implementarse para aliviar la situación. Fundamentalmente se resumen en disminuir la presión sobre los recursos (disminuir y/o limitar el uso) o encontrar fuentes externas que puedan aliviar la situación a corto y mediano plazo.

Una de las alternativas es la gestión de la recarga gestionada del acuífero, proceso mediante el cual se introduce de forma no natural agua a este. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1995).

Estados Unidos, Israel y algunos países de Europa han realizado diferentes experiencias cuyos avances permiten considerar la Recarga Gestionada como una opción totalmente factible para la mayoría de los escenarios (G. Cabrera, 2013). Esta alternativa presenta ventajas en Chile respecto a los embalses superficiales. Tanto en la inversión como en los permisos de obra, según lo estipulado en el Código de Aguas (S.Törey, 2014).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos generales

Evaluar diferentes escenarios de Recarga Gestionada para la cuenca del río Copiapó, región de Atacama.

Comparar los escenarios propuestos con el actual, a través de modelamiento computacional.

1.2.2 Objetivos específicos

Estudiar el método de utilizar el lecho natural del río para realizar una recarga y comparar los resultados con algún tipo de recarga gestionada factible de realizar en el área de estudio, tratando de aprovechar las condiciones naturales presentes en la zona.

Modelar ambos métodos como alternativas, para generar una propuesta factible de recarga para el acuífero.

Evaluar las consecuencias de usar una planta desalinizadora con la que se realizará la recarga, considerando factores técnicos y económicos.

1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se espera determinar si las condiciones físicas y químicas del acuífero permiten la realización de una adecuada recarga gestionada. Además, se espera estudiar la factibilidad de utilizar el lecho del río como único mecanismo de recarga.

1.4 METODOLOGÍAS

En este punto se detallarán las metodologías que se utilizarán para lograr los objetivos:

- Recopilación y análisis de material bibliográfico e información hídrica a partir de publicaciones científicas e información emanada de la DGA u otras instituciones.
- Modelar diferentes escenarios para la técnica de recarga.
- Evaluar geológica y económicamente los diferentes escenarios.

2 RECARGA GESTIONADA

2.1 DEFINICIÓN

Se entiende por recarga gestionada cualquier obra humana que busque aumentar la tasa de infiltración natural con el objetivo de almacenar agua para su posterior uso aprovechando las condiciones dadas por los acuíferos (DGA, 2013). Aunque existen otras labores humanas que de forma secundaria aumentan la infiltración, tales como ciertos tipos de riego asociados a la agricultura, la construcción de represas o tranques en ríos y trabajos en los cauces de los ríos (Seiler K. et al, 2007).

Almacenar agua no es el único objetivo que puede tener la recarga gestionada, otros objetivos pueden ser: reducir la intrusión de agua marina hacia los acuíferos, evitar la subsidencia del suelo, utilizar el acuífero para distribuir agua del lugar donde es posible la recarga hacia un lugar donde pueda ser utilizada. Otra utilidad que tiene es la capacidad de mejorar la calidad de las aguas a través de un tratamiento suelo-acuífero o geopurificación (bouwer, 2002).

2.2 ASPECTOS TÉCNICOS

Al momento de empezar a analizar un sector para una posible recarga gestionada es necesario tener en consideración tres aspectos importantes: la cantidad de agua disponible, la calidad del agua a infiltrar, y las propiedades hidráulicas y geológicas de la zona (Seiler K et al, 2007).

Sobre el origen de las aguas estas pueden provenir de diferentes fuentes. De escorrentía superficial, de ciudades cercanas por plantas de tratamiento o aguas lluvias, plantas desalinizadoras. Es fundamental conocer los caudales de esta, sus características físico-químicas, contenido de gases y saber la presencia de bacterias o virus (DGA, 2013).

Si bien en un principio la recarga podría llevarse a cabo en cualquier formación permeable (DGA, 2013), lo mejor es realizarlo en zonas donde las formaciones presenten una conductividad hidráulica entre 10^{-5} m/s y 10^{-2} m/s (0,9 m/d a 864 m/d), y un alto coeficiente de almacenamiento (Seiler K. et al, 2007). Normalmente la recarga se realiza en acuíferos libres, aunque también puede llevarse a cabo en acuíferos confinados bajo presiones elevadas, las características que se deben conocer del acuífero son su litología, sus estructuras geológicas, sus datos hidrogeológicos, la calidad del agua en este, además es importante conocer la hidrodinámica del acuífero para ver cómo se comportara al momento de llevarse a cabo la recarga (DGA, 2013).

Adicionalmente hay que tener en consideración aspectos tanto climatológicos como ambientales presentes en la zona, factores como: la temperatura, precipitaciones, viento, evapotranspiración, evaporación son los más destacados en el ámbito climatológico, por su parte en las características ambientales es necesario conocer la topografía y pendiente de la zona, la red de drenaje superficial y la presencia o no de cobertura vegetal (DGA, 2013).

2.3 ASPECTOS LEGALES

El Código de Aguas (Chile, 1981), desde que se modificó en el año 2005, en sus artículos 66 y 67 estipula que será posible otorgar derechos provisionales de aprovechamiento de agua subterránea en áreas de restricción con cargo a la recarga gestionada del acuífero, y mientras dure esta.

Dependiendo de si las obras a realizar son dentro de un cauce natural o no, es posible que se necesite autorización de parte de la DGA para éstas, es el caso de cualquier obra dentro de cauce debido a que se busca que no se entorpezca la libre circulación del cauce y que éstas obras no vayan a provocar daño en la población. No obstante, hay algunas situaciones especificadas en el art. 294 del Código de Aguas en donde se señala que obras fuera del cauce también necesitaran autorización previa (CNR, 2013)

El reglamento de aguas subterráneas establece en su art.34 que los proyectos de recarga tendrán que entregar una memoria técnica con lo siguiente:

- Descripción del sistema de recarga gestionada.
- Descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga gestionada.
- Descripción del sitio de recarga.
- Características geológicas e hidrogeológicas del sector.
- Características de la zona no saturada.
- Características de acuífero.
- Velocidad y dirección del flujo.
- Comportamiento histórico de los niveles de agua en el sector.
- Calidad del agua.
- Impactos asociados a la obra de recarga gestionada, área de influencia de la recarga gestionada, impactos calculados, análisis de domos e impacto sobre la calidad del agua.
- Plan de monitoreo, que contemple al menos:
 1. Monitoreo del nivel de las aguas.
 2. Monitoreo de la calidad de las aguas.
 3. Control del caudal de recarga.
 4. Control de extracciones.
- Plan de contingencia, que contemple al menos:
 1. Medidas de protección del acuífero.
 2. Planes de alerta ante impactos no deseados.

No obstante, todo lo anterior no se exige un plan de abandono en caso de término de proyecto, y no se consideran los posibles efectos negativos que un abandono podría tener, esto en los casos que no se vean afectados por el art.294 del Código de Aguas (DGA, 2013).

La Ley de Bases Generales del Medio Ambiente en su artículo 10 no establece explícitamente que los proyectos de recarga gestionada tengan que elaborar un estudio de impacto ambiental. Sin embargo, los proyectos que se realicen en zonas protegidas

o estén comprendidas en el art.294 del Código de Aguas, o que alteren cursos o cuerpos de agua deberán realizar dicho estudio, por lo cual, no es posible descartar la necesidad de tener que hacerlo en proyectos de recarga (DGA, 2013).

El Decreto Supremo N° 46 de 2013 (D.S N°46) determina las concentraciones máximas de contaminantes presentes en residuos líquidos que pueden ser descargados en la zona saturada de los acuíferos, si la calidad natural del acuífero es peor que la establecida por este decreto se permitirá que la calidad de la descarga sea como máximo igual a está.

2.4 CALIDAD DE AGUA

La calidad del agua que se busca introducir al acuífero es de suma importancia, esto debido a que en ningún caso se busca cambiar las características hidroquímicas que posee y así evitar modificar las condiciones naturales, previniendo posibles reacciones químicas o contaminación de la totalidad de las aguas.

En el caso específico de Chile, el decreto N° 46 es el que establece las normas de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, este decreto habla sobre la emisión de residuos líquidos que hayan sido obtenidos a partir de procesos, servicios o actividades, y no de planes de recarga gestionada, pero al no existir una norma que regule estos últimos se rigen por ésta misma.

El art. 8 de este decreto establece lo siguiente “*No se podrá emitir directamente a la zona saturada del acuífero, salvo que la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural.*”, esto implica la necesidad de utilizar métodos de recarga gestionada que utilicen la condición filtrante de las rocas que sobreyacen al acuífero como encargadas de purificar aún más el agua, o en situaciones en que esto no sea posible a la necesidad de aplicar procesos de purificación a las aguas.

La Dirección General de Aguas (DGA) será la entidad encargada de determinar la vulnerabilidad del acuífero, para el caso de este decreto se entiende por vulnerabilidad a la velocidad con la que un contaminante puede migrar hasta la zona saturada del acuífero. Un acuífero puede ser considerado de alta, media o baja vulnerabilidad, a partir de esta clasificación existen nuevas restricciones.

El art. 9 dice lo siguiente “*Si la vulnerabilidad del acuífero es calificada por la Dirección General de Aguas como alta, sólo se podrá disponer residuos líquidos mediante infiltración, cuando la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural del acuífero.*”, para el caso de vulnerabilidad media o baja los art. 10 y 11 definen los límites máximos de emisión

Contaminante	Unidad	Límites máximo permitidos	
		V. Media	V. Baja
Indicadores Físicos y Químicos			
Ph		6,0 - 8,5	6,0 - 8,5
Inorgánicos			
Cianuro	Mg/L	0,2	0,2
Cloruros	Mg/L	250	250
Fluoruro	Mg/L	1,5	5
N-Nitrato + N-Nitrito	Mg/L	10	15
Sulfatos	Mg/L	250	500
Sulfuros	Mg/L	1	5
Orgánicos			
Aceite y Grasas	Mg/L	10	10
Benceno	Mg/L	0,01	0,01
Pentaclorofenol	Mg/L	0,009	0,009
Tetracloroetano	Mg/L	0,04	0,04
Tolueno	Mg/L	0,7	0,7
Triclorometano	Mg/L	0,2	0,2
Xileno	Mg/L	0,5	0,5
Metales			
Aluminio	Mg/L	5	20
Arsenico	Mg/L	0,01	0,01
Boro	Mg/L	0,75	3
Cadmio	Mg/L	0,002	0,002
Cobre	Mg/L	1	3
Cromo Hexavalente	Mg/L	0,05	0,2
Hierro	Mg/L	5	10
Manganeso	Mg/L	0,3	2
Mercurio	Mg/L	0,001	0,001
Molibdeno	Mg/L	1	2,5
Niquel	Mg/L	0,2	0,5
Plomo	Mg/L	0,05	0,05
Selenio	Mg/L	0,01	0,02
Zinc	Mg/L	3	20
Nutrientes			
Nitrogeno total Kjeldahl	Mg/L	10	15

Tabla 2. 1 Límites máximos de emisión en acuíferos de vulnerabilidad baja y media, modificado de Decreto N°46

2.5 MECANISMOS DE RECARGA

Los dispositivos de recarga se pueden clasificar principalmente en 3 sistemas de recarga, estos son: infiltración superficial, la infiltración en la zona vadosa e infiltración directa al acuífero (Bouwer, 2002).

La infiltración superficial requiere suelos superficiales permeables con esto se busca reducir la necesidad de terreno a utilizar, ya que se tendría una tasa de infiltración mayor. Los acuíferos deben ser freáticos y con una alta transmisividad para acomodar el flujo de agua infiltrada lejos de la zona de recarga para evitar altos montículos de agua que interfieran con ésta (Bouwer, 2002).

La infiltración en la zona vadosa se lleva a cabo en lugares donde no se encuentren las características necesarias para una infiltración superficial, falta disponibilidad de terreno o una baja tasa de permeabilidad, se lleva a cabo con sistemas verticales. La principal ventaja que presentan éstos es su bajo costo aunque presentan una posible desventaja al poder colmatarse debido a los sólidos en suspensión, esto implica que se debería tratar el agua previamente para reducir el número de éstos. (Bouwer, 2002)

La infiltración directa al acuífero es realizada en lugares donde las condiciones para realizar alguno de los dos tipos de infiltración anterior no es posible y donde los acuíferos son profundos y/o confinados (Bouwer, 2002).

Para una explicación más detallada de los dispositivos o métodos para la recarga se utilizará la clasificación propuesta por DINA-MAR el año 2010.

N°	Sistema	Tipo de dispositivo
1	Dispersión	Balsas de infiltración
2		Canales de Infiltración
3		Técnicas de tratamiento suelo/acuífero
4		Campos de Infiltración (inundación y difusión controlada)
5		Recarga accidental por retornos de riego
6	Modificación del Canal	Diques de retención y represas
7		Diques permeables
8		Serpenteos
9		Escarificación Lecho
10		Diques subsuperficiales/subterráneos
11		Diques perforados
12	Pozos	Qanats (Galerías subterráneas)
13		Pozos abiertos de infiltración
14		Pozos profundos y minisondeos
15		Sondeos
16		Dolinas, Colapsos
17		ASR
18		ASTR
19	Filtración	Bancos filtrantes en lechos de ríos (RBF)
20		Filtración interdunar
21		Riego subterráneo
22	Lluvia	Captación de agua lluvia en improductivo
23	SUDS	Recarga accidental conducciones y alcantarillado
24		Sistemas urbanos de drenaje sostenible

Tabla 2. 2 Clasificación de mecanismos de recarga, extraída de DINA-MAR (2010)

2.5.1 Dispersión

Los sistemas de dispersión necesitan de afloramientos permeables y encontrarse próximos a la fuente de agua. Distribuyen el agua a recargar sobre la superficie permeable para que esta infiltre a través de la zona no saturada hasta llegar al acuífero.

Se utilizan generalmente en acuíferos superficiales libres, y la calidad original exigida para el agua son menores que para los sistemas profundos, porque el filtrado natural a través de la zona no saturada mejora la calidad de ésta.

2.5.2 Modificación del canal

En estos sistemas la infiltración se realiza desde el lecho del río. Al ocurrir la recarga gestionada a través de la zona subálvea de éste, el agua puede llegar directamente hasta el acuífero en “control vertical”.

Este grupo incluye varios tipos de diques, que son diferentes tipos de dispositivos de recarga gestionada. Estos son: los diques de retención y represas, diques permeables o presas de arena, diques subsuperficiales, subterráneos y perforados.

Los diques perforados y los de retención o represas se instalan en la superficie del cauce fluvial, y almacenan el agua para así aumentar el tiempo de permanencia favoreciendo así la infiltración natural. Por otro lado, las presas de arena aumentan la capacidad de almacenamiento, creando un “acuífero artificial” aguas arriba de las presas. Por su parte, los diques permeables no retienen ni desvían completamente el flujo de agua, sino que lo represan parcialmente y permiten un flujo a través de ellos. Por último, las presas subsuperficiales, son diques subterráneos cuya función es optimizar la capacidad de almacenamiento del acuífero subyacente, reteniendo el flujo subterráneo de agua. Este método necesita conocer bien la estructura tridimensional del acuífero.

Es importante considerar los posibles impactos que conlleven estos métodos, tanto los negativos como los positivos, debido a que estos afectan el flujo natural superficial y subterráneo. Además de ser necesaria la construcción de un dissipador en la base de la presa, para evitar la destrucción y erosión del terreno ubicado aguas abajo del dique producido por la caída del agua.

2.5.3 Pozos

Los sistemas de recarga pertenecientes a esta categoría suelen utilizarse en terrenos donde el uso de sistemas superficiales no es correcto. Esto puede deberse a varios motivos, tales como poca disponibilidad de terreno, por tratarse de acuíferos poco transmisivos o porque en la zona se presenta alternancia entre niveles permeables e impermeables.

Algunas de las técnicas en profundidad que son agrupadas en esta clasificación son los drenes y galerías, pozos, minisondeos y sondeos de inyección, ASR/ASTR (Aquifer Storage & Recovery / AS Transfer R) y la inyección a través de simas y dolinas.

2.5.4 Filtración

Los dispositivos de filtración son sistemas que pueden utilizar tanto instalaciones artificiales pre existentes como las condiciones naturales de la zona, estos mecanismos tienen como objeto introducir ciertas modificaciones antrópicas que permitan aumentar la tasa de infiltración o la recarga natural.

2.5.5 Lluvia

La captación de agua proveniente de lluvia es básicamente la recolección de la escorrentía superficial para uso productivo. Esto conlleva acumular esta agua de una extensa zona para su uso en otra área, esto puede ser tanto para recarga como para riego.

Aprovechar racionalmente parte de este volumen de agua que discurre superficialmente, no es tan solo un sistema de recuperación de aguas pluviales, sino que puede ser un método de control de la erosión e inundaciones. Además, esto reduce la proporción de residuos sólidos que pueden llegar a la red principal.

Los sistemas de aprovechamiento de la escorrentía superficial buscan canalizar la escorrentía superficial por canales, por gravedad, hacia las zonas preparadas para la infiltración. Por lo general, están constituidos por tres componentes básicos: un área de recolección del agua de lluvia, un sistema de subirrigación o distribución y una zona de almacenamiento o infiltración. El diseño y las dimensiones estarán directamente relacionados con el volumen total recuperado.

2.5.6. SUDS

Estos Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son iguales que los de captación de lluvia, se están convirtiendo en una estrategia para mitigar los impactos ambientales de las zonas urbanas y rurales. Es una tecnología incipiente y que por ende esta siempre en mejora, sin embargo, todavía existen aspectos que requieren un mayor desarrollo tales como su diseño, costos, mantenimiento, entre otros. En esta misma categoría se incluye el sistema de recarga accidental producido por las fugas desde la conducción de agua y alcantarillado.

2.6 EXPERIENCIAS NACIONALES

En Chile la experiencia pública relacionada con la recarga gestionada es escasa, se ha centrado principalmente en estudios, investigaciones y algunos planes pilotos. Siendo principalmente la DGA, CNR y DOH las instituciones que han impulsado estos estudios. A continuación se presentara un resumen de algunas de las iniciativas en el país extraídas desde un informe técnico realizado por la DGA el año 2013 (DGA,2013-B).

Mejoramiento del sistema de aguas subterráneas para su utilización en riego en la cuenca del río Copiapó; CNR, Jorquera y asociados S.A.; noviembre 2012

El objetivo principal del estudio consistió en analizar alternativas a nivel de prefactibilidad, de obras de infiltración de agua para su uso en riego, proponiendo obras que permitan la optimización del uso de los recursos tanto superficiales como subterráneos.

Se realizó un análisis y se determinó que hay 3 elementos que inciden en la factibilidad de llevar a cabo una recarga gestionada:

1. Que exista un espacio no saturado bajo el nivel estático máximo histórico y que existan las condiciones hidrogeológicas para infiltrar.
2. Que exista la disponibilidad del recurso de agua superficial para infiltrar.
3. Que se disponga o pueda disponer de superficie para el emplazamiento de las obras.

Los principales resultados del estudio indicaron lo siguiente:

Los volúmenes no saturados del acuífero hacen posible realizar recarga, y que alcanzan para los recursos disponibles para infiltrar. Que la infiltración es posible en cuanto a las características hidrogeológicas del acuífero.

El volumen de agua susceptible para infiltración se estima en 430 millones de m³ disponibles cada 20 años, estos volúmenes en la actualidad se descargan en el mar durante las crecidas.

Teniendo en consideración las demandas, los consumos, utilización actual del suelo y baja interferencia con obras existentes se encontró como apropiado utilizar terrenos ubicados en el sector 4 y 5, y realizar la recarga mediante lagunas. Adicionalmente se estudió la viabilidad de las obras con respecto a impactos ambientales negativos y medidas de mitigación para estos impactos, llegando a la conclusión de que ellos son mínimos en los sitios escogidos, y que incluso existía un impacto positivo por la recarga.

Se realizaron diseños preliminares de obras para infiltrar y se establecieron sus costos, se analizaron los beneficios por la mayor disponibilidad de agua y se generaron índices beneficio/costo siguiendo normas de MIDEPLAN. Índices, que en la mayoría de los casos, resultan atractivos para la inversión. Se identifican fórmulas posibles para financiamiento y el marco legal para la construcción. Los índices de inversión son mejores respecto a cualquier otro proyecto que pueda aumentar los recursos del valle de Copiapó, no fue posible contar con el detalle de la evaluación económica asociada a este estudio.

Mejoramiento de agua subterránea para riego Ligua y Petorca; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Enero 2013.

El objetivo principal de este estudio fue analizar las alternativas y desarrollo de obras de recarga gestionada, a nivel de pre-factibilidad, en las cuencas de la Ligua y Petorca, para su uso en riego, proponiendo obras que permitan una optimización en el uso de recursos superficiales y subterráneos.

Después de una selección inicial de 19 sitios favorables para la recarga (12 en La Ligua y 7 en Petorca), se optó finalmente por 4 sitios que se evaluaron considerando un 50% de probabilidad de excedencia de los caudales, los caudales con estas características varían entre: 240 y 840 l/s para el periodo Junio-Septiembre en Petorca y 158 y 1.357 l/s para el periodo Mayo-Septiembre en La Ligua. La disponibilidad promedio de esta excedencia es de 1 cada 2 años.

Se determinó que los proyectos no presentan ninguna limitación en el campo ambiental, pero se recomendó hacer un ingreso voluntario al sistema de evaluación ambiental.

Al realizar la evaluación económica el estudio indico que ambos proyectos evaluados en la Ligua eran rentables, tanto con precios de mercado como con los precios sociales, siendo el ubicado cerca de Cabildo el más rentable. Para el caso de los proyectos evaluados en Petorca ambos dieron una rentabilidad negativa al utilizar los precios de mercado, pero al utilizar precios sociales ambos fueron rentables.

Finalmente, los proyectos evaluados en este estudio son complementarios a proyectos de embalses, y son pequeños en el contexto de cada valle, por lo que sus efectos tendrán una influencia en la vecindad inmediata, pero serán marginales a nivel cuenca.

Estudio e implementación de un plan piloto de recargas artificiales a los acuíferos del valle del Aconcagua; DOH, GeoHidrología Consultores; en ejecución

La DOH está desarrollando un proyecto de recarga artificial en la zona, para aprovechar la capacidad de los acuíferos de almacenar volúmenes de agua excedentes que se generan en años normales y húmedos, para utilizarlos en periodos que se requieran.

Este proyecto es el paso siguiente a los estudios previos realizados por la DOH de pre-factibilidad técnica y económica para el desarrollo de sistemas de recarga artificial a gran escala. Tiene como objetivo el realizar pruebas físicas que permitan validar o mejorar parámetros y variables teóricas, de modo de contar con el conocimiento necesario para diseñar, construir y operar sistemas de recarga artificial a escala industrial, en el valle del Aconcagua.

Las actividades a desarrollar se han dividido en cinco etapas enumeradas a continuación:

1. Recopilación de antecedentes, evaluación y diseño de trabajos de terreno.
2. Trabajos de terreno y diseño de ingeniería plan piloto.
3. Implementación y puesta en marcha.
4. Monitoreo, control, medición y evaluación de variables.
5. Análisis, conclusiones, recomendaciones e informe final.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La cuenca del río Copiapó se ubica en el norte de Chile, específicamente en la III región de Atacama. Esta se extiende entre los paralelos 26°38' y 28°38' latitud Sur y abarca una superficie aproximada de 18.400 Km (DGA, 2004). Se encuentra conformado por 6 subcuencas: río Jorquera, río Pulido, río Manflas, quebrada Paipote, río Copiapó medio y río Copiapó bajo.

Es posible acceder a la ciudad de Copiapó a través de la Ruta 5 (Panamericana), tanto desde el norte como desde el sur, dentro de la cuenca existen caminos secundarios pavimentados o de ripio que unen a las localidades presentes en el valle o debido a la actividad agrícola y minera presente en la zona. (Figura 1)



Figura 3.1 zona de estudio, cuenca del río Copiapó, región de Atacama, Chile. Extraída Google Earth

Adicional a la división natural, la dirección general de aguas ha dividido en 6 sectores administrativos el acuífero de Copiapó:

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta La Puerta.
- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.
- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

En la figura 3.3 se muestra su distribución en la zona.

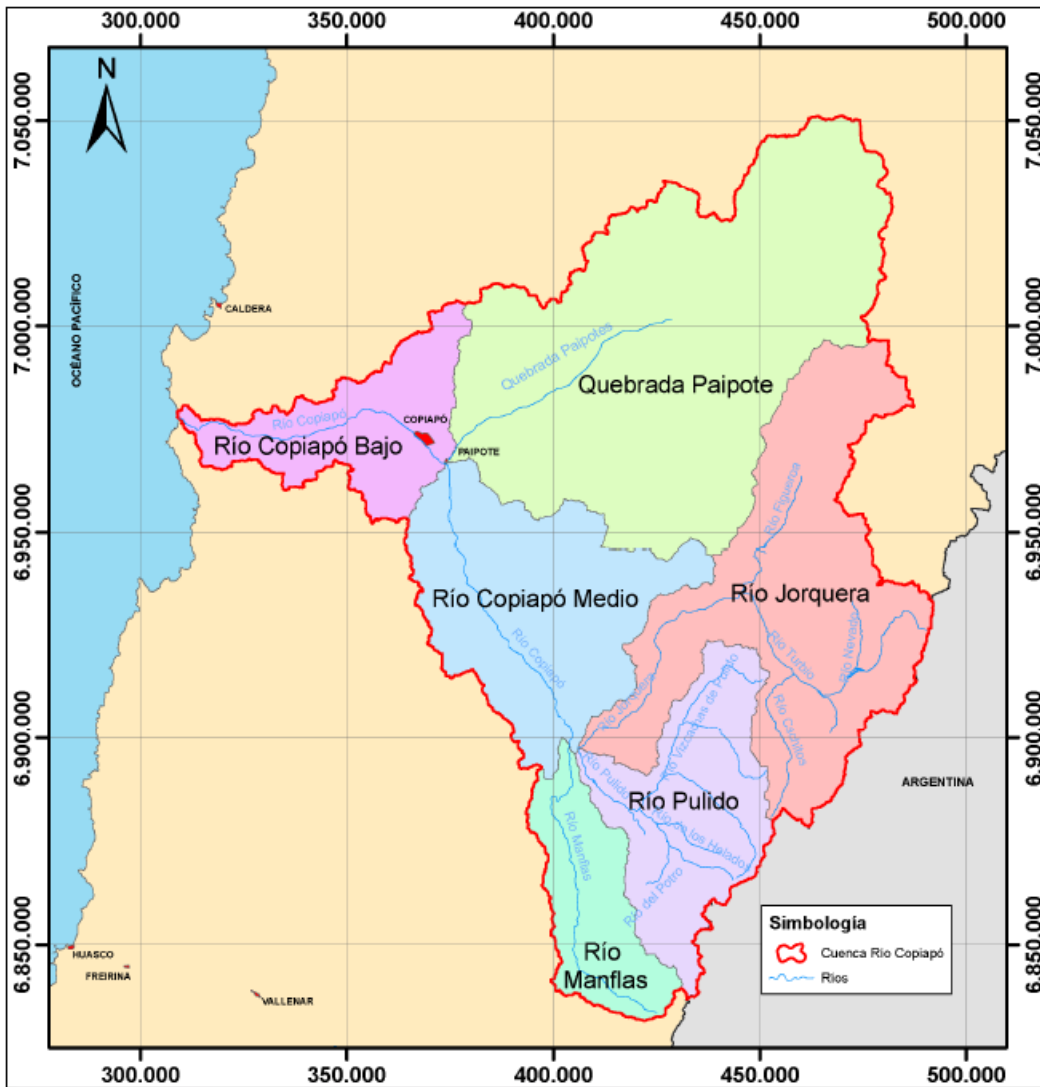


Figura 3. 2 Límites de la cuenca y las 6 subcuencas con sus principales redes de drenaje, extraído de DICTUC 2010

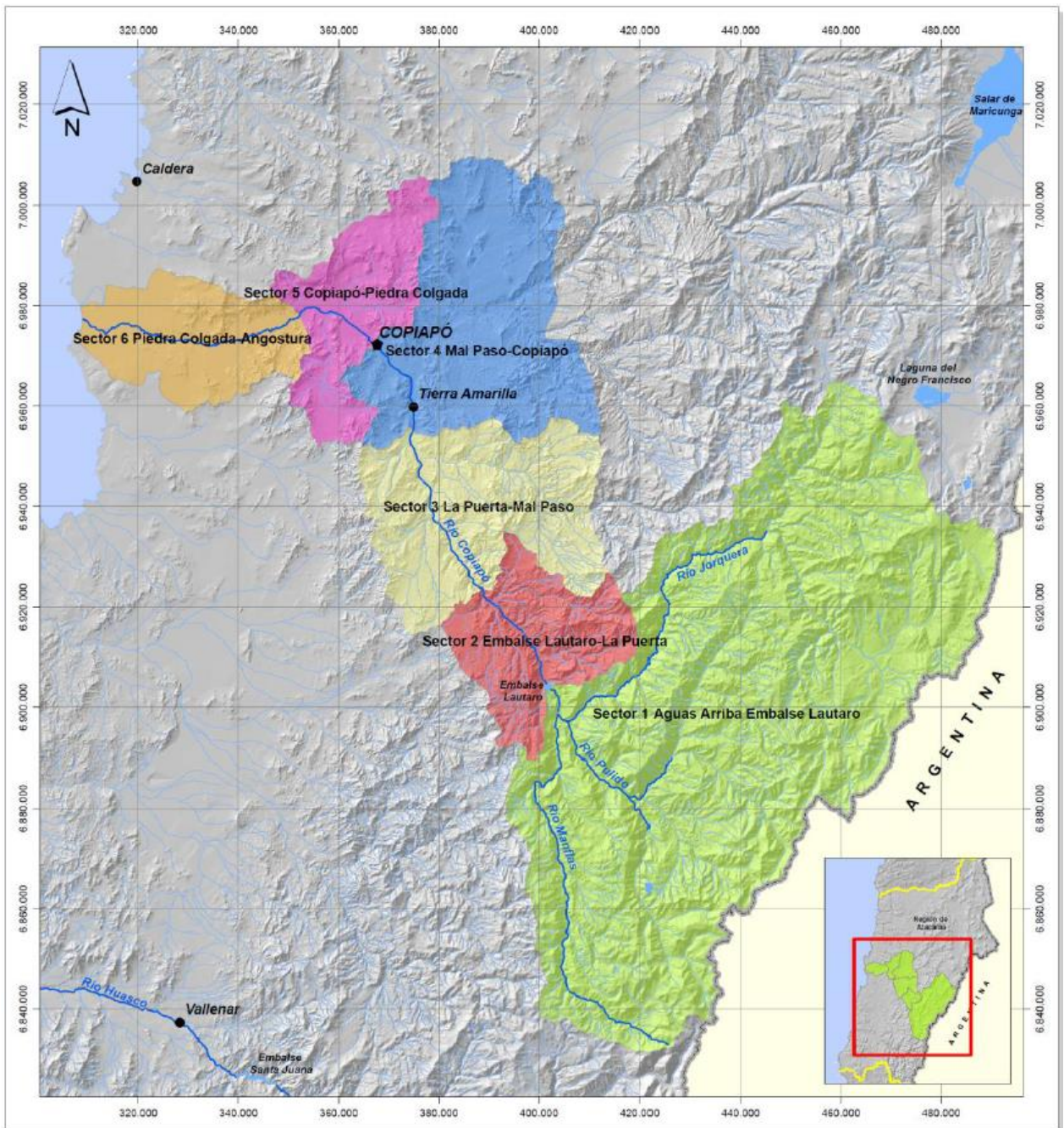


Figura 3. 3 Sectores de aprovechamiento hidrogeológicos realizados por la DGA, extraído DGA (2013)

3.2 GEOMORFOLOGÍA

Se utilizará la clasificación propuesta por el Instituto Geográfico Militar (IGM,1989) para describir el espacio natural de la región de Atacama.

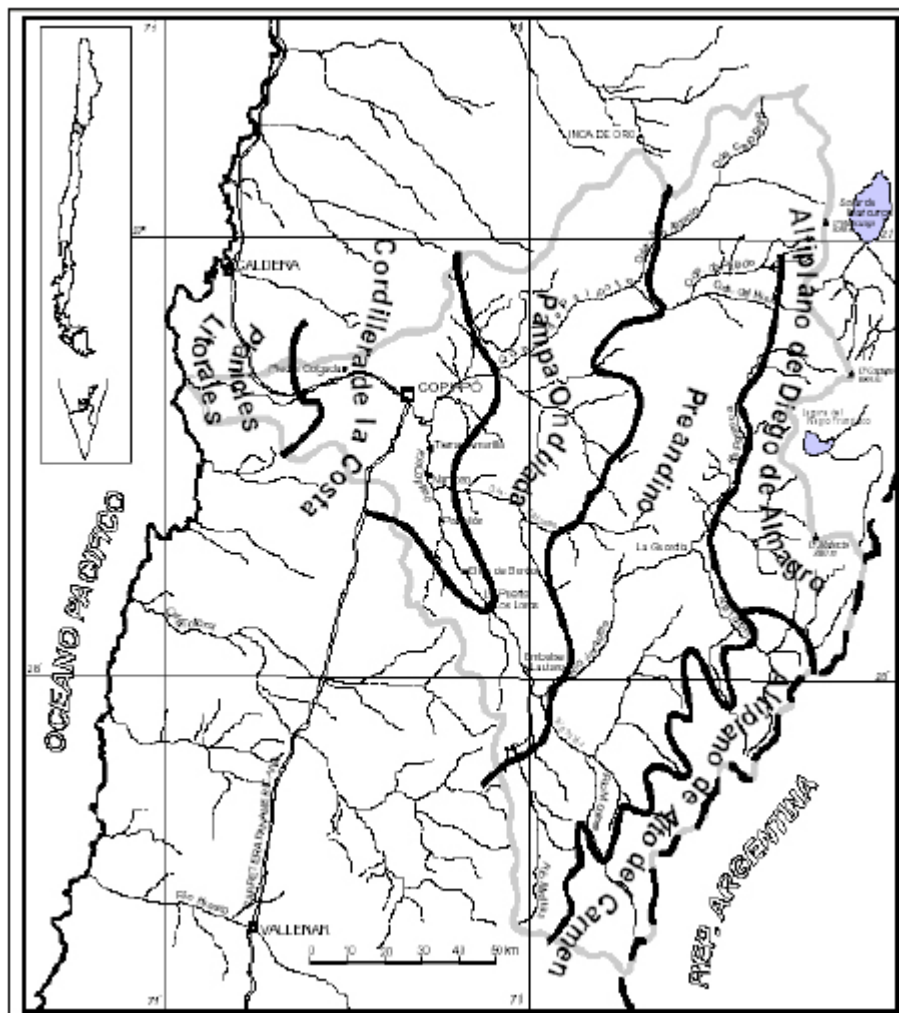


Figura 3. 4 Espacios Naturales, Extraído IGM (1989)

3.2.1 Subsistemas Altiplánicos

Este subsistema está dividido en dos zonas, Diego de Almagro que sería la zona norte de este espacio natural que se caracteriza por la presencia de cuencas endorreicas, con extensos depósitos evaporíticos y en él se destacan los siguientes volcanes cuaternarios: nevados Maricunga (4.980 m.s.n.m.), Copiapó (6.080 m.s.n.m.) y Jotabeche (5.880 m.s.n.m). Más al sur se ubica la zona denominada Alto del Carmen que su característica geomorfológica principal es la presencia de la Cordillera de los Andes, que presenta un desarrollo transversal de 50 a 75 km. En esta zona nacen los principales tributarios del río Copiapó: Jorquera, Pulido y Manflas. (SERNAGEOMIN, 2012)

3.2.2 Subsistema Preandino

Este subsistema presenta formas de relieve abruptas, se alcanzan alturas de hasta 2.700 m.s.n.m hacia el oriente y unos 2.500 m.s.n.m hacia el poniente. Está compuesto por la quebrada Paipote en el norte y hacia el sur se identifican las quebradas generadas por los ríos Figueroa, Turbio, Jorquera, Pulido, Montosa y Manflas. Esto son los principales tributarios del río Copiapó, este por su parte presenta un escurrimiento de tipo recto y valle escarpado. (SERNAGEOMIN, 2012; DGA, 2004)

3.2.3 Subsistema pampa ondulada

Este sistema presenta características similares al anterior, pero se diferencia en que la forma de su relieve no es tan abrupta y en que presenta un mayor desarrollo de terrazas fluviales. Las laderas de los cerros están compuestas por caras libres y taludes. (SERNAGEOMIN, 2012; DGA, 2004)

3.2.4 Subsistema Cordillera de la Costa

En este subsistema la topografía empieza a variar, la altitud de los cerros disminuye, y se presentan menos escarpados. Adicionalmente se aprecia un ensanchamiento de los valles debido a que las terrazas laterales tienen una mayor amplitud, específicamente entre el sector de San Pedro hasta San Camilo alcanzando entre 5 a 11 km. El cauce del río empieza a ser del tipo recto-meandrico y en el sector de Valle Fértil del tipo anastomosado. (SERNAGEOMIN, 2012; DGA, 2004)

3.2.5 Subsistema Planicies Litorales

La principal característica de este subsistema es la presencia de extensas planicies litorales que se originaron debido a numerosos ciclos transgresivos y regresivos. (SERNAGEOMIN, 2012)

3.3 ANTECEDENTES CLIMÁTICOS

El clima de la región de Atacama varía paulatinamente de norte a sur. Desde el límite norte de la región hasta la ciudad de Copiapó se caracteriza por un clima árido, hacia el sur de la ciudad de Copiapó este varía a un clima de desierto marginal para finalmente paulatinamente transformarse en clima de estepa cálido (SERNAGEOMIN, 2012).

Se utilizara la misma clasificación que para el caso de la geomorfología.

3.3.1 Subsistemas altiplánicos

Este subsistema presenta un clima denominado “tundra de alta montaña”, se caracteriza por presentar temperaturas bajas durante todo el año con variaciones que fluctúan entre bajo y sobre 0°C, en verano las temperaturas no superan los 10°C. Por su parte la cantidad de precipitaciones varía dependiendo de la latitud, por lo general caen entre 150 y 200 mm/año, principalmente en forma de nieve. (SERNAGEOMMIN, 2012)

3.3.2 Subsistemas Preandino y pampa ondulada

Este subsistema presenta un clima del tipo “desierto frio de montaña”, se caracteriza por una severa limitación térmica, las temperaturas medias anuales son inferiores a 10°C y presenta frecuentes heladas durante el año. En la parte alta de esta zona las precipitaciones se dan en forma de nieve. (SERNAGEOMMIN, 2012).

3.3.3 Subsistema Cordillera de la Costa

Este subsistema presenta un clima del tipo “desértico transicional”, su principal característica es la alta nubosidad. Todos los meses del año son secos y presenta temperaturas que en el periodo estival alcanzan máximas cercanas a los 30°C y en invierno mínimas cercanas a los 4°C. (SERNAGEOMMIN, 2012)

3.3.4 Subsistema Planicies Litorales

Este subsistema presenta un clima del tipo “desértico costero”, se caracteriza por presentar nublados abundantes debido a la influencia del mar. La temperatura media anual es inferior a los 16°C y no presenta heladas durante todo el año. (SERNAGEOMIN, 2012).

3.4 ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS

3.4.1 Pluviometría

Las precipitaciones en la cuenca presentan una marcada estacionalidad, ya que el 80% de la precipitación total anual se concentra entre mayo y agosto (DICTUC, 2010). A continuación se presenta los resultados obtenidos por el DICTUC (2010), en el cual se utilizaron 13 estaciones de observación, la tabla 3.1 contiene la información general sobre las estaciones.

N°	Estación Meteorológica	Código	UTM WGS84		Altitud
		BNA	Este	Norte	m.s.n.m.
1	Caldera	03340001-2	319.889	7.004.743	15
2	Canto de Agua	03701001-4	324.832	6.890.108	330
3	Conay Albaricoque	03802006-4	391.477	6.796.399	1.600
4	Copiapó	03450004-5	367.723	6.971.879	385
5	El Totoral	03604001-7	307.153	6.911.671	150
6	Elibor Campamento	03431004-1	381.881	6.933.193	750
7	Hacienda Manflas	03421004-7	404.408	6.887.808	1.410
8	Iglesia Colorada	03414002-2	413.312	6.884.641	1.550
9	Jorquera en la Guardia	03404002-8	425.947	6.920.575	2.000
10	Las Vegas	03210001-5	431.750	7.048.466	2.250
11	Embalse Lautaro	03430006-2	401.647	6.904.993	1.110
12	Los Loros	03430007-0	389.976	6.920.933	940
13	Pastos Grandes	03441001-1	443.897	7.000.375	2.260

Tabla 3. 1 Información estaciones meteorológicas, extraída DICTUC (2010)

En la tabla 3.2 se encuentra la información referida a la precipitación media mensual y la precipitación media anual, mientras en la tabla 3.3 se presenta un resumen de la precipitación estacional.

Estación	Altitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
N°	m.s.n.m.	mm	mm	mm	mm	Mm	mm	mm	mm	mm	mm	Mm	mm	mm
1	15	0,0	0,0	0,8	0,4	1,3	5,3	4,9	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	17,6
2	330	0,2	0,0	0,4	1,2	3,1	9,7	8,8	6,6	0,4	0,4	0,0	0,2	30,6
3	1.600	0,1	1,8	2,6	3,1	8,5	26,1	19,8	14,0	0,5	0,0	0,8	1,0	64,8
4	385	0,0	0,0	1,1	0,2	1,4	6,0	4,3	3,8	0,2	0,0	0,0	0,1	17,6
5	150	0,2	0,0	0,7	0,9	3,0	10,1	7,6	5,0	0,3	0,3	0,0	0,0	28,9
6	750	0,0	0,0	1,0	0,6	2,6	9,1	7,5	5,9	0,4	0,1	0,0	0,0	27,7
7	1.410	0,2	0,2	1,9	2,9	4,8	13,3	10,2	10,3	1,0	0,6	0,0	0,1	44,7
8	1.550	0,2	0,2	1,5	4,0	6,0	12,2	10,9	9,5	1,4	0,8	0,0	0,3	50,4
9	2.000	0,2	1,4	3,2	3,5	6,4	13,3	7,3	7,6	2,8	1,3	0,1	0,3	47,9
10	2.250	0,0	1,0	2,9	0,8	5,7	6,6	26,4	4,5	0,8	0,2	0,0	0,0	49,4
11	1.110	0,3	0,4	2,9	2,4	4,2	8,9	8,1	8,8	1,5	0,3	0,2	0,2	36,8
12	940	0,0	0,0	1,2	1,4	2,8	10,5	9,3	8,1	0,9	0,1	0,0	0,1	35,6
13	2.260	0,0	1,6	3,2	1,8	3,4	8,9	9,8	4,8	2,3	0,7	0,0	0,2	36,3

Tabla 3.2 Precipitación media en las estaciones, extraída DICTUC (2010)

Estación	Altitud	Pp (mm)	Pp (mm)	Periodo May-Ago		Periodo Sep-Abr	
		año	año	mm	%	Mm	%
N°	m.s.n.m.	Calendario	Hidrológico				
1	15	18,0	17,6	16,6	90,5	1,7	9,5
2	330	30,1	30,6	28,1	91,0	2,8	9,0
3	1.600	57,6	64,8	68,4	87,3	10,0	12,7
4	385	17,1	17,6	15,5	90,9	1,6	9,1
5	150	28,3	28,9	25,8	91,8	2,3	8,2
6	750	27,7	27,7	25,1	92,3	2,1	7,7
7	1.410	44,9	44,7	38,5	84,9	6,9	15,1
8	1.550	49,7	50,4	38,6	82,0	8,4	18,0
9	2.000	48,7	47,9	34,5	72,9	12,8	27,1
10	2.250	50,8	49,4	43,2	88,7	5,5	11,3
11	1.110	35,0	36,8	30,1	78,9	8,1	21,1
12	940	34,7	35,6	30,7	88,9	3,8	11,1
13	2.260	35,4	36,3	27,0	73,5	9,7	26,5

Tabla 3.3 Resumen precipitación estacional, extraída DICTUC (2010)

En la Figura 3.3 se presenta el gradiente de precipitación media anual, en esta se puede observar el aumento de las precipitaciones con altura y se estima en 1mm cada 70 metros. (DGA, 2013)

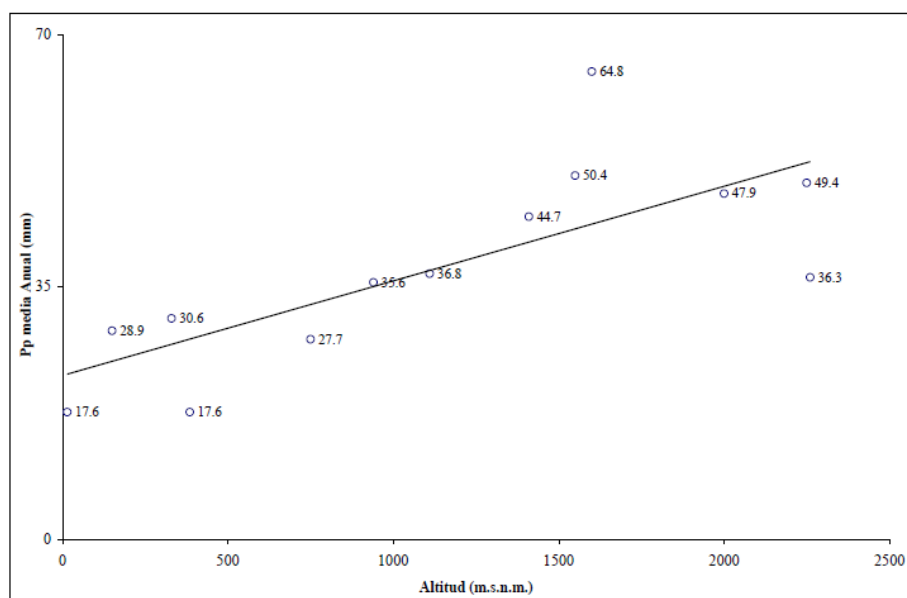


Figura 3.5 Gradiente Pluviométrico, extraído DGA (2013)

3.4.2 Fluviometría

El río Copiapó presenta un régimen mixto, se observa una superposición de diferentes regímenes. El cauce principal presenta un régimen nival en su parte alta para luego pasar a un régimen mixto. Por otra parte, sus afluentes presentan regímenes nivales o mixtos. (DGA, 2013) En la tabla 3.4 se presenta un resumen de las características de las diferentes subcuencas.

Cuenca	Subcuenca	Régimen	Periodo mayores caudales*	Periodo Estiaje
Manflas	Manflas	Nival	Noviembre a Enero	Mayo a Julio
Pulido	Pulido	Nival	Diciembre a Febrero	Agosto a Octubre
Jorquera	Jorquera	Mixto	Diciembre a Febrero	Diciembre a Febrero
Copiapó	Alta	Nival	Diciembre a Marzo	Junio a Agosto
	Media	Mixto	Mayor aporte Nival	Agosto a Octubre
	Baja	Mixto	Invierno y verano	Diciembre a Febrero

Tabla 3.4 Características principales por subcuencas, modificado de DGA (2013). *En años Húmedos

La información sobre caudales fue obtenida por la DGA (2013) y utilizaron 12 estaciones fluviométricas, en la tabla 3.5 se presentan sus datos de ubicación además de la superficie aportante de cada una.

N°	Estación Fluviométrica	Código	UTM WGS84		Superficie de la cuenca (km ²)
		BNA	Este	Norte	
1	Río Copiapó en Angostura	03340001-2	317.937	6.976.386	18.420
2	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	03701001-4	374.492	6.954.377	10.151
3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal	03802006-4	374.894	6.955.304	10.157
4	Río Copiapó en ciudad de Copiapó	03450004-5	367.359	6.972.122	17.122
5	Río Copiapó en Lautaro	03604001-7	401.673	6.904.738	7.478
6	Río Copiapó en Pastillo	03431004-1	403.963	6.901.926	7.454
7	Río Copiapó en La Puerta	03421004-7	388.794	6.923.493	8.333
8	Río Copiapó en San Antonio	03414002-2	394.793	6.916.652	7.809
9	Río Jorquera en Vertedero	03404002-8	405.776	6.897.200	4.207
10	Canal Mal Paso después de Bocatoma	03210001-5	374.920	6.955.458	10.157
11	Río Manflas en Vertedero	03430006-2	402.212	6.885.569	981
12	Río Pulido en Vertedero	03430007-0	407.369	6.892.473	2.023

Tabla 3.5 Datos de las estaciones fluviométricas utilizadas, modificada DGA (2013)

Los datos de los caudales medio mensuales obtenidos junto con el caudal medio anual son presentados en la tabla 3.6. Estos datos fueron registrados en condiciones no naturales o de sobre-explotación, por lo que los obtenidos en la parte baja de la cuenca se ven seriamente afectados.

N°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Caudal Medio Anual
1	0,67	0,55	0,46	0,42	0,50	0,53	0,49	0,41	0,30	0,26	0,26	0,49	0,44
2	1,80	1,20	1,22	1,21	1,23	1,3	1,16	1,03	1,05	1,08	1,11	1,45	1,07
3	1,15	1,24	0,77	0,84	1,35	1,46	0,86	1,21	0,67	0,36	0,26	0,30	0,99
4	2,34	1,88	1,62	1,33	1,45	1,44	1,58	1,27	1,02	1,05	0,95	1,78	1,93
5	1,80	1,77	1,55	1,24	1,15	1,0	0,94	1,06	1,19	1,31	1,53	1,51	1,29
6	2,80	2,48	1,94	1,84	1,92	2,01	2,0	2,06	1,92	1,87	1,91	2,48	1,79
7	2,93	2,91	2,57	2,31	2,26	2,22	2,08	2,09	2,09	2,11	2,21	2,60	2,41
8	2,99	1,75	1,66	1,45	1,29	1,33	1,26	1,28	1,50	1,77	2,12	2,78	1,50
9	0,72	0,69	0,64	0,67	0,72	0,77	0,76	0,79	0,78	0,71	0,71	0,79	0,72
10	0,74	0,74	0,78	0,80	0,85	0,75	0,68	0,67	0,64	0,66	0,68	0,76	0,72
11	0,62	0,59	0,45	0,41	0,42	0,46	0,46	0,46	0,45	0,55	0,67	0,61	0,46
12	2,70	2,30	1,74	1,47	1,33	1,24	1,16	1,07	0,97	0,93	1,11	1,91	1,43

Tabla 3. 6 Caudal Medio Mensual en las estaciones más caudal anual (m³/s), modificada DGA (2013)

El río Copiapó presenta su mayor crecida en el mes de Enero principalmente por los deshielos ocurridos en la cuenca del río Pulido. En el sector de La Puerta es donde aflora la mayor parte del agua subterránea por lo cual es en este lugar, donde se

observa mayor cantidad de agua superficial, este punto es un excelente lugar de control para determinar la disponibilidad total de agua en la cuenca. (DGA, 2013).

3.4.3 Evaporación y Temperatura

La información de temperaturas medias y evaporación media mensual se obtuvo a partir de 6 estaciones, 4 de las cuales se encuentran al interior de la cuenca mientras que las otras 2 se ubican en el límite sur de esta. En la tabla 3.7 se detalla la ubicación de las estaciones.

N°	Estación	Altitud	UTM WGS84	
		m.s.n.m	Este	Norte
1	Canto de Agua	330	324.832	6.890.108
2	Conay Albaricoque	1.600	391.477	6.796.399
3	Copiapó	385	367.723	6.971.879
4	Iglesia Colorada	1.550	413.312	6.884.641
5	Embalse Lautaro	1.110	401.647	6.904.993
6	Los Loros	940	389.976	6.920.933

Tabla 3.7 Ubicación de estaciones meteorológicas, Extraída DGA (2013)

De los datos obtenidos es posible decir que las temperaturas medias anuales no presentan una gran variación en las diferentes estaciones, Siendo la estación ubicada en el Embalse Lautaro la que presenta la máxima (19.6°) mientras que la mínima se alcanza en la ciudad de Copiapó (16.7). Si uno observa las temperaturas medias mensuales se observa que las temperaturas máximas se obtienen en el periodo de verano (Enero-Febrero) mientras que las mínimas se alcanzan en invierno (Junio-Julio) (DGA, 2013). En la tabla 3.7 se presentan los valores de la temperatura para la cuenca.

N°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	20,5	20,3	19,7	17,4	15,1	13,1	12,9	14,2	15,5	16,5	18	19,3	16,9
2	20,5	20,3	19,4	17,1	15,1	13,9	13,7	14,9	15,8	17,4	18,6	19,9	17,2
3	20,4	20,4	19,5	17,3	15,1	13,4	12,5	14	15,1	16,3	17,5	19,1	16,7
4	20,9	21,2	20,3	19,1	17	16	15,7	16,3	17	18,9	19,6	20,7	18,6
5	22,1	22	21,5	19,7	18	16,6	16,7	17,7	18,3	19,7	20,7	21,6	19,6
6	21,6	20,9	20,1	17,9	16	15,4	14,8	15,9	16,5	18,1	19,7	20,6	18,1
Promedio	21	20,9	20,1	18,1	16,1	14,7	14,4	15,5	16,4	17,8	19	20,2	17,8

Tabla 3.8 Temperatura Media Mensual y Anual (°C), Extraída DGA (2013)

En concordancia con las altas temperaturas, los valores medios mensuales de evaporación son muy altos, superando por mucho los pequeños valores de precipitaciones medias mensuales. Por lo cual, casi la totalidad del agua caída en las zonas medias o bajas de la cuenca retorna rápidamente a la atmosfera.(DGA, 2013) En la tabla 3.9 se presentan los valores medios de evaporación para la cuenca.

N°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	195,3	179,2	176,7	141	89,9	60	65,1	71,3	93	124	138	161,2
2	325,5	291,2	294,5	249	217	189	192,2	217	222	285,2	306	337,9
3	217	190,4	173,6	123	89,9	84	77,5	102,3	132	139,5	165	186
4	399,9	364	365,8	306	269,7	267	251,1	291,4	300	353,4	381	412,3
5	325,5	282,8	269,7	204	173,6	150	158,1	195,3	219	272,8	297	325,5
6	350,3	299,6	285,2	213	164,3	135	145,7	170,5	210	279	312	344,1
Promedio	302,3	267,9	260,9	206	167,4	147,5	148,3	174,6	196	242,3	366,5	394,5

Tabla 3.9 Evaporación Media Mensual, Extraída DGA (2013)

4 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

4.1 GEOLOGÍA DE LA CUENCA

Conocer la geología del área de estudio es fundamental para realizar un correcto trabajo, esto debido a que la geología superficial y del subsuelo condiciona las características que poseerán los acuíferos, así como la calidad del agua. La información presentada en esta sección se basó en estudios anteriores (SERNAGEOMIN, 2012)

En la cuenca del río Copiapó es posible clasificar las unidades litológicas en dos grupos: el primero corresponderá a los depósitos no consolidados y semiconsolidados con edades del Mioceno al Holoceno y el segundo corresponde a unidades de roca con edades desde el Carbonífero al Paleógeno. El primer grupo corresponde al relleno sedimentario del valle mientras que las rocas conforman el basamento y los rasgos geológicos de los cerros aledaños (SERNAGEOMIN, 2012).

Debido a que hacer una descripción detallada de todas las unidades presentes en la cuenca del río Copiapó sería de una extensión mayor a la que se busca en este trabajo, se describirán los depósitos no consolidados y semiconsolidados de manera más detallada que las rocas, adicionalmente se detallaran las estructuras presentes en la zona (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.1 Geología de Subsuperficie

Basamento Rocoso

El mayor espesor se encuentra ubicado en torno a las zonas Goyo Diaz-Villa del Cerro-Elisa de Bordos, Paipote-Copiapó, Chamonate y Piedra Colgada, alcanzando en algunas secciones espesores de relleno entre 500-600 m. Desde Copiapó al sur las secciones tienen espesores entre 200-400 m, y en el tramo entre Angostura y Piedra Colgada el espesor es variable entre 200-400 m, El menor espesor se encontraría en torno al sector de Los Loros y La Puerta. Se puede apreciar que el ancho de las secciones es mayor en zonas donde confluyen quebradas laterales, en la figura 4.1 se presenta un perfil longitudinal a lo largo del valle del río Copiapó con las profundidades de basamento (DGA, 2013).

Embalse Lautaro-Elisa de Bordos Desde el Embalse Lautaro la profundidad aumenta progresivamente hacia el sector de Goyo Diaz, desde esta localidad disminuye paulatinamente hasta el sector San Antonio. Aguas abajo, entre Los Loros y La Puerta, la profundidad del basamento es muy homogénea y mínima en una zona donde el valle desarrolla estrechamientos en su sección transversal. Entre La Puerta y hasta Hornito, la profundidad aumenta gradualmente, para finalmente disminuir bruscamente en el sector de Elisa de Bordos. La morfología del basamento en esta zona describe una silueta con forma de “W” (DGA, 2013).

Elisa de Bordos-Paipote En este tramo la morfología del basamento impermeable es homogénea y subhorizontal, con una profundidad entre 108 y 265 metros. Entre Tierra Amarilla-Paipote, está aumenta a valores máximos de 200 m, este sector coincide con una zona de gran demanda de aguas subterráneas (DGA 2013).

Paipote-Angostura Se observa una zona con un alto de basamento, disminuye la profundidad, hacia una zona caracterizada por un estrechamiento del valle y por la presencia de los cerros islas: La Cruz y Pichincha. Luego la profundidad aumenta, mayor a 300 metros, hacia zonas en las cuales hay una sección de valle mayor y donde el tamaño y ancho de las quebradas tributarias es significativamente mayor. Desde Piedra Colgada hasta Angostura la profundidad disminuye hasta valores menores a 150 metros, la morfología del basamento en este tramo es similar a la del primero, de “W”.

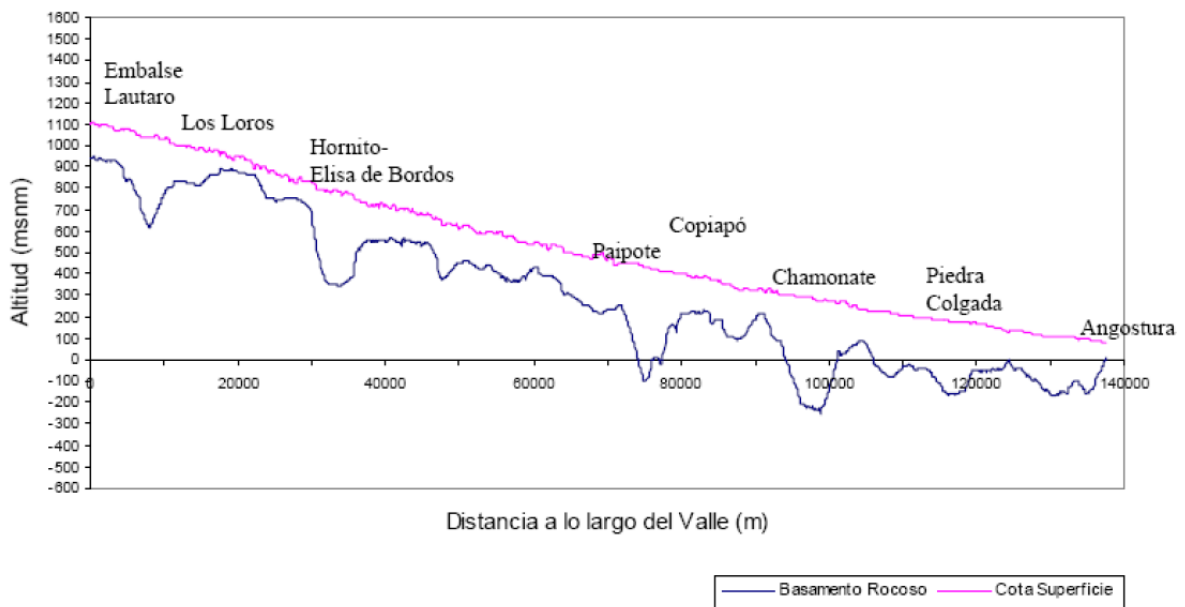


Figura 4.1 Profundidad del Basamento Rocos, extraída DGA (2013)

4.1.2 Depósitos no consolidados

4.1.2.1 Depósitos eólicos PIHe (holoceno-pleistoceno)

Son depósitos de granos homogéneos que generalmente culminan en crestas subparalelas, entre tierra amarilla y Piedra Colgada, tanto los relieves rocosos como los depósitos no consolidados, se observan cubiertos de forma irregular y discontinua por mantos de dunas activas e inactivas o paleodunas. En la zona las dunas activas alcanzan superficies de hasta 3 km², se reconocen dunas del tipo longitudinal de hasta

4 km, dunas transversales de hasta 2 km y pequeñas dunas tipo barján (SERNAGEOMIN, 2012).

Las dunas activas están conformadas por arenas muy finas a medias, bien seleccionadas y redondeadas, color ocre a levemente amarillo, compuestas de cuarzo, feldespatos, anfibola y escasas micas, junto con fragmentos líticos y escasos minerales pesados. Las paleodunas están constituidas por arenas medias, de colores grises a ocre suaves, presentan un contenido variable de fragmentos rocosos que provienen de los macizos circundantes. Presentan extensión limitada, menor a 2 km² de superficie (SERNAGEOMIN, 2012).

Los depósitos se disponen principalmente sobre el basamento local y en menor medida sobre los depósitos no consolidados, la movilidad de las dunas activas, sumado a la ausencia de un perfil edáfico y cobertura vegetal, vincula estos depósitos a procesos actuales. La escasa o nula movilidad de las paleodunas relaciona su origen a procesos eólicos (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.2 Depósitos de remoción en masa PIHrm (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos no consolidados a semiconsolidados y caóticos de bloques, gravas y arenas, polimicticos, angulosos. Presentan una matriz formada por arena, limos y arcilla, se producen debido al deslizamiento de roca y sedimentos en laderas abruptas, desarrollan superficies de hasta 5km² de estilo aborregadas o de rotación de bloques (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.3 Depósitos coluviales PIHc (Pleistoceno-Holoceno)

Estos depósitos generan formas cónicas de escasa superficie, máximo 1 km², con pendientes elevadas (20°, 40° y 55°) mayores a las desarrolladas por conos aluviales. Se originan de forma independiente y en torno a las cabeceras de muchos conos aluviales. Se disponen directamente sobre el basamento rocoso de la zona y en algunos sectores suelen engranar con depósitos aluviales y/o fluviales. Se estima que la potencia media estaría entre los 3 y 5 m (SERNAGEOMIN, 2012).

Corresponden a mezclas caóticas de fragmentos rocosos, principalmente clastosoportados, monocomposicionales, con mala selección, subangulosos a angulosos, con bloques en una escasa matriz del tipo gravilla, gravilla arenosa y arena. Estos depósitos se originan por mecanismos de liberación primaria, asociados a la meteorización y la desintegración mecánica de rocas preexistentes (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.4 Depósitos Aluviales PIHa (Pleistoceno-Holoceno)

- Depósitos de conos aluviales (Holoceno)

Estos depósitos rellenan depresiones de quebradas menores, poseen superficies menores a los 4 km² con pendientes medias de 4° a 5°. Alcanzan gran desarrollo en ambos lados del valle, en algunas zonas incluso pueden interdigitarse, se disponen tanto sobre el basamento rocoso como sobre otros depósitos no consolidados, dependiendo del volumen del depósito su espesor varía de unos pocos metros a varias decenas de metros (SERNAGEOMIN, 2012).

Estos depósitos poseen intercalaciones de niveles, que están constituidos por gravas y gravas arenosas, incluyen escasos bloques erráticos, junto a numerosos niveles de gran continuidad lateral, formados por arenas y gravillas de diversos tamaños. Los clastos están mal seleccionados, son angulosos a subangulosos y están inalterados, algunas veces aparecen englobados en una matriz de grava y arena (SERNAGEOMIN, 2012).

- Depósitos de flujos de barro y detritos (Holoceno)

Estos depósitos cubren el fondo de pequeñas quebradas, con superficies individuales que no superan los 3 km². Morfológicamente muestran rasgos de abanicos aluviales, con frentes lobulares o semicirculares y en algunos sectores culminan en terrazas poco desarrolladas. Los depósitos cubren rocas de la Fm La Ternera y Lautaro y sobreyacen y/o engranan con secuencias fluviales (SERNAGEOMIN, 2012).

Están compuestos por alternancia de niveles de fragmentos líticos, de mala selección, medianamente consolidados y con escasa continuidad lateral. Los clastos presentan un tamaño variado, alcanzando incluso los 50 cm de diámetro, tienen una mala selección, son angulosos a subangulosos. La matriz está compuesta por porciones de barro, arena y fragmentos líticos, cementados con carbonato de calcio. En general, los depósitos son matriz soportado y son macizos con escasas estructuras sedimentarias, sin gradación ni orden alguno y están limitados por estratificación plana horizontal con espesores variables (SERNAGEOMIN, 2012).

Generalmente no presentan perfil edáfico ni cobertura vegetal, su origen se relaciona con procesos ocurridos durante el Holoceno temprano (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.5 Depósitos aluviales y fluviales PIHaf (Pleistoceno-Holoceno)

Estos depósitos rellenan el fondo de extensas quebradas tributarias del río Copiapó, generalmente alcanzan superficies mayores a los 4 km² con pendientes suaves y continuas de 2° a 4° en sus extremos terminales. Tienen forma semicónicas con un perfil transversal convexo y uno radial cóncavo. Los segmentos terminales de estos depósitos culminan en profundos abanicos aluviales con un ancho medio de 1 km mientras que los segmentos marginales desarrollan incipientes terrazas, con espesores que alcanzan los 2 m (SERNAGEOMIN, 2012).

La secuencia engrana con depósitos fluviales, aluviales y coluviales, interrumpe la continuidad de depósitos fluviales, aluviales y fluviales y depósitos de flujos aluviales antiguos. La base de la secuencia sobreyace el basamento rocoso, el espesor es

variable yendo de los 20 m, quebrada El Bronce, hasta los 122,5 m en el sector de confluencia de la Qb. Cerrillos y el valle del río Copiapó (SERNAGEOMIN, 2012).

La unidad está compuesta por gravas y gravillas arenosas. Subredondeadas a subangulosas con tamaños medios mayores que 3-10 cm, sin alteraciones y con abundantes niveles arenosos, niveles de fragmentos rocosos mayores que 10 cm de diámetro, que se relacionan con la episodios de transporte hídrico de gran energía o dinámica, y ciertos niveles limoarenosos. Los procesos de génesis de estos depósitos se consideran modernos o actuales (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.6 Depósitos fluviales PIHf (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados, constituyen tanto el cauce actual como las terrazas adyacentes. Comprenden bolones, ripios, gravas, gravillas y arenas que son las facies de relleno de canal, así como arenas, limos y arcillas que corresponden a las facies de llanura de inundación y/o sedimentación lacustre. Los clastos se observan inalterados, bien redondeados, discoidales y esféricos, con superficies pulimentadas, incluidos en una matriz de arenas, limos y arcillas. De existir cemento este es del tipo calcáreo (SERNAGEOMIN, 2012).

Depósitos de morfologías llanas, levemente inclinados aguas abajo, mientras el perfil transversal es prácticamente horizontal. Abarcan la totalidad del ancho del valle, con valores medios de 1 km en el segmento Embalse Lautaro-Paipote y entre 2 y 2,5 km en el segmento Paipote-Piedra Colgada. La base descansa sobre el basamento rocoso indiferenciado, esta incluye sedimentos más antiguos de edad Pliocena-Pleistocena e incluso Miocena, mientras que en la zona superficial, los depósitos fluviales engranan con depósitos aluviales y coluviales. El espesor medio de estos depósitos es variable a lo largo del valle aguas abajo de Elisa de Bordos y aguas arriba de Paipote se estima en 100m, en torno al sector Paipote –San Fernando se estima en un promedio de 150m mientras que en la zona de La Chimba-Cerro Pichincha el espesor medio es de 80m (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.7 Depósitos aluviales y coluviales antiguos MSPIac (Mioceno-Pleistoceno?)

Estos depósitos rellenan depresiones que corresponden al fondo de quebradas menores, con superficies individuales de 2 km², ocasionalmente pueden tener a 8 km² de extensión. Presentan escaso desarrollo de suelo y/o vegetación, denotan múltiples rasgos morfológicos, atribuibles a los efectos de prolongada acción erosiva moderna. Estos depósitos afloran en numerosos y discontinuos sectores del valle del río Copiapó. (SERNAGEOMIN, 2012).

Estos depósitos poseen estructuras sedimentarias similares a los depósitos aluviales y flujos de barro y/o detritos. Tienen características sedimentarias típicas de flujos o remociones en masa, con matriz soportada, sin gradación ni orden, alternadas con texturas clastosoportadas, imbricadas, englobando aislados megabloques. Los

niveles arenosos poseen finas estratificaciones cruzadas y estructuras de surcos y relleno, junto a bases canalizadas o paleocanales en niveles pseudoconglomerádicos. La interdigitación con secuencias fluviales y fluvioaluviales antiguas, junto a su característica morfológica de pedimento, le asigna una edad probable plioleistocena. Por correlación litológica, Arévalo (1994 y 1995), los incluye en depósitos pertenecientes a la unidad Gravas de Atacama, por lo cual la edad del depósito sería miocena (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.8 Estratos de Caldera PIHec (Cuaternario)

Esta sucesión sedimentaria marina-litoral se distribuye a lo largo del dominio costero del extremo noroeste de la cuenca, está compuesta por depósitos de espesores variables entre 1 y 3 m, ya sea no consolidados (e.g., playas actuales) a bien cementados. En estos últimos se diferencian un conglomerado basal y las areniscas y coquinas superiores. Estos estratos se han dividido en una sucesión alta, con un nivel de fauna fósil de ambiente cálido, con terrazas marinas ubicadas entre los 105 ±18 y 210±20 m.s.n.m. y una sucesión baja, con terrazas marinas ubicadas entre la playa actual y los 105±18 m.s.n.m (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.9 Estratos de Agua Amarga Plaa (Plioceno)

Estos estratos se exponen en la costa en una franja norte-sur de hasta 7km de ancho, están compuestos por una sucesión de coquinas, gravas y arenas de carácter marino-litoral en capas de espesores decimétricos a métricos. Sobreyacen a las gravas de Copiapó y al basamento rocoso, conformando una banda fuertemente erosionada adosada, entre los 200 y los 350 metros de altura, una regular paleo línea de costa. Se encuentran cubiertos por los estratos de Caldera y depósitos eólicos (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.1.10 Gravas del Copiapó MPlgc (Mioceno-Plioceno)

Estas gravas afloran en ambos lados del río Copiapó, a 9 km de la desembocadura de éste y hasta el Llano de Las Liebres. Tiene un espesor mínimo de 50m y se infiere que engrana lateralmente con sedimentitas marinas de la Fm. Bahía Inglesa y la Sobreyacen, coquinas litorales tanto de edad pliocena como cuaternaria. Está unidad corresponde a sedimentos clásticos constituidos principalmente por gravas no consolidadas a levemente cementadas (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.11 Gravas de Atacama Mga (Mioceno Medio)

Depósitos semiconsolidados de amplia distribución en la precordillera de Copiapó, compuesto de gravas conglomeradas, polimicticas con lentes de arenas y limos bien estratificados e intercalaciones de ignimbritas entre 15 y 12 Ma. Estos depósitos en muchos sectores rellenaron la red hidrográfica existente, rellenando paleovalles. Al oeste de la cuenca estos depósitos se encuentran colgados sobre cauces actuales y se disponen sobre el basamento mesozoico. Edades K-Ar, obtenidas de las tobas, permite atribuir las al Mioceno Medio (15-12Ma) (SERNAGEOMIN, 2012).

4.1.2.12 Gravas de Angostura Mgan (Mioceno Inferior-Mioceno Medio)

Estas gravas afloran aguas debajo de la angostura del río Copiapó y hasta 2,5 km antes de su desembocadura, Sobreyacen a granitoides jurásicos y subyacen a la Fm. Bahía Inglesa. Está compuesta por gravas clastosoportadas, rojizas, intercaladas con gravillas y arenas gruesas bien estratificadas, no cohesivas a ocasionalmente cementadas con calcita. Debido a la relación estratigráfica se le asigna una edad mínima de Mioceno Medio, aunque se asocia el depósito de las gravas durante el ascenso global del nivel marino que le sucede en la base del Mioceno Temprano, lo cual restringe la edad máxima al Mioceno Inferior (SERNAGEOMIN, 2012).

4.3.2 Estructuras principales

Las estructuras presentes en la zona podrían favorecer el desarrollo de acuíferos con potencial hidrogeológico medio a bajo. A continuación se expondrán las principales estructuras presentes en la zona.

Sistema de Falla de Atacama corresponde a una discontinuidad estructural profunda, que se extiende por más de 1.000 km, que entre 156 y 154 Ma inició sus desplazamientos a través de fallas extensionales y que luego reactivó hacia el este, entre los 126 y 106 Ma. En el valle del río Copiapó, esta falla ha sido denominada como Falla El Encierro y se ubica en el cerro Imán. Adicionalmente movimientos horizontales, en dominio dúctil, habrían dado origen a la foliación que presentan las milonitas del sector Chamonte, de edad entre los 122 Ma y 104 Ma, y la foliación de las monzodioritas y granodioritas ubicadas entre la ex mina Cerro Imán y Piedra Colgada (SERNAGEOMIN, 2012).

El Sistema de Fallas Sierra Castillo-La Ternera es el extremo austral del Sistema de Fallas de Domeyko, cuyo extremo norte se ubica en la zona de Chuquicamata. El origen de este sistema se relaciona con un evento de deformación transcurrente sinistral, ocurrido durante un periodo inusual y elevada tasa de convergencia entre las placas Farallón (oceánica) y Sudamericana. En el valle del río

Copiapó existen pliegues anticlinales y sinclinales de ejes oblicuos a las fallas de borde y bloques rotados en sentido antihorario. Estas estructuras afectan a las rocas que rellenan la Cuenca Hornito (SERNAGEOMIN, 2012).

Sistemas de Fallas Inversas de bajo ángulo, junto con los pliegues asimétricos volcados al este, son el resultado de una deformación que ocurrió en el Cretácico Superior temprano, involucra unidades triásicas, jurásicas y cretácicas inferiores, y la discordancia que se observa en la base de los estratos suprayacentes permiten suponer que este sistema corresponde al equivalente temporal a la faja plegada y corrida de Chañarcillo y Päipote (SERNAGEOMIN, 2012).

Fallas Quebrada Las Vacas y La Mona estas estructuras corresponden a fallas inversas, que poseen una vergencia este, y un ángulo de medio a alto. Y se cree que son el resultado de una fase de deformación que tuvo lugar entre el Cretácico-Terciario (SERNAGEOMIN, 2012).

Fallas Pauna-La Estancilla, La iglesia, Vizcachas-La Guardia, Quebrada Aránguiz, todas estas estructuras corresponden a fallas inversas de rumbo NNE, con trazas kilométricas 40-100 km y son el rasgo estructural más destacado en la zona central de la cuenca. Hacia el este se observan fallas inversas subparalelas de alto ángulo y vergencias opuestas que alzan bloques de basamento Paleozoico y Triásico, deforman pasivamente la cobertura y preservan sinclinales formados por secuencias cretácicas y terciarias. Probablemente estas fallas estuvieron activas, individualmente, durante distintos periodos del Terciario (SERNAGEOMIN, 2012).

4.2 HIDROGEOLOGÍA DE LA CUENCA

4.2.1 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades geológicas del valle del río Copiapó pueden ser agrupadas según sus propiedades específicas que les permiten experimentar recarga, almacenar y transmitir el agua subterránea en: depósitos no consolidados y basamento rocoso indiferenciado (BRI). El último grupo engloba a las unidades rocosas que conforman los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó (DGA, 2013).

Los depósitos no consolidados conforman el relleno sedimentario del valle. Principalmente están conformados por secuencias permeables a semipermeables con porosidad intergranular, desarrollan potentes, continuos y extensos niveles estratificados, multiacuíferos (libres a semiconfinados). Concentran el mayor potencial hidrogeológico, ya que están en condiciones que les permitirían experimentar la recarga, de transmitir y almacenar importantes volúmenes de agua subterránea (DGA, 2013).

Las unidades geológicas han sido agrupadas desde el punto de vista de la ocurrencia del agua subterránea, en cuatro categorías de importancia hidrogeológica relativa: alta, media a baja, baja y baja a nula.

Acuíferos de Alta Importancia Hidrogeológica

Esta unidad hidrogeológica está conformada por los depósitos fluviales de cauces actuales, y secuencias del tipo sobreyacidas e intercaladas por depósitos fluviolacustres. Son secuencias sedimentarias no consolidadas y con eficaz interconexión entre muy buenos acuíferos y las fuentes de recarga, se encuentran a lo largo y ancho del valle del río Copiapó y en la confluencia de éste con las quebradas que lo tributan (DGA, 2013).

Poseen una gran capacidad de almacenamiento, con valores de entre 0,16 y 15,0% y valores de transmisividad del orden de 1.000 a 20.000 $m^3/día/m$. Cálculos hidrogeológicos indican permeabilidades relativamente buenas, $3-6 \times 10^{-4}$ m/s para la mayor parte de los acuíferos aunque en niveles con lentes de escasa permeabilidad presentarían valores de 2×10^{-5} m/s. a través de registros puntuales se ha podido observar que la permeabilidad superficial de los depósitos fluctúan entre 10^{-5} y 10^{-7} m/s, con tasas de infiltración de 10^{-2} a 10^{-3} m/s (DGA, 2013).

Las tasas de descenso de los niveles estáticos, se determinaron comparando entre niveles para prolongados periodos de sequía, los resultados indican valores del orden de 0,3 a 4,5 m/año. El espesor de las secuencias, según sondajes mecánicos, es de hasta 180 m, determinados por geofísica da valores del orden de 100 a 200m. En algunas zonas puede alcanzar entre 250-300 m y en otras más de 300, este valor correspondería a “cubetas” tectónicas” que se sitúan en torno a grandes zonas de falla o sectores relacionados con la presencia de acuíferos en roca (DGA, 2013).

En esta unidad las aguas subterráneas podrían alcanzar tiempos de residencia entre 30 y 200 años, en la parte baja se podría obtener tiempos de residencia de entre 80 y 160 años. Mientras en niveles más profundos de las “cubetas geológicas” podrían llegar a ser incluso fósiles (mil o miles de años) (DGA, 2013).

Acuíferos de Media a Baja Importancia Hidrogeológica

Esta unidad hidrogeológica corresponde a depósitos no consolidados, porosos y permeables, los cuales poseen un escaso volumen y les falta continuidad en los procesos de recarga. Esta unidad incluye a los depósitos fluvioaluviales y a los depósitos de cono aluviales.

Acuíferos Locales de Baja Importancia Hidrogeológica en Depósitos no Consolidados a Semiconsolidados

En esta unidad hidrogeológica se encuentran los depósitos de Dunas y los depósitos de conos de deyección, estos se encuentran en áreas muy localizadas y/o de reducida extensión, principalmente apoyadas sobre el BRI, impermeable. Presentan una escasa capacidad para retener o almacenar agua subterránea (acuíferos de paso), debido a infiltraciones conexas a esporádicas precipitaciones.

Otros depósitos considerados en esta unidad son los de flujo de barro y/o detritos, los depósitos fluviales a fluvioaluviales de terrazas antiguas y los depósitos de flujos aluviales antiguos. Presentan un dominio de sedimentos con abundantes finos intersticiales, baja porosidad, baja permeabilidad y gran parte se encuentra cementados.

Acuíferos Locales de Baja a Nula Importancia Hidrogeológicas en Rocas

Esta unidad está conformada por las rocas que pertenecen a los flancos y el basamento rocoso (BRI) del valle del río Copiapó y por depósitos con escasa a nula porosidad, compuesto por los flujos de barro y detritos, fluviales a fluvioaluviales de terrazas antiguas y los flujos aluviales antiguos. Los posibles acuíferos se encontrarían en rocas porosas y/o fracturadas con adecuada interconexión hidráulica, con reducida a esporádica fuentes de recarga. Estas características junto con el predominio de rocas prácticamente impermeables le da un escaso a nulo potencial hidrogeológico.

4.2.2 Propiedades Hidrogeológicas

En esta sección se presentaran las siguientes propiedades: transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S), la información aquí presentada se extrae del informe realizado por la DGA (2013).

4.2.2.1 Transmisividad (T)

En un acuífero, la transmisividad *mide la cantidad de agua, por unidad de ancho, que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico igual a 1* (DGA, 2013).

Para el caso del acuífero de la cuenca del río Copiapó hay varios estudios que entregan valores para ciertos sectores, el primero de ellos es el realizado por Álamos y Peralta (1987) y entrega valores que oscilan entre 1.000 y 20.000 (m²/día), en la tabla 4.1 se presentan los valores para cada sector.

Sector	Transmisividad (m²/día)
Embalse Lautaro-Valle Hermoso	<15.000-20.000
San Antonio-La Puerta	1.000-5.000
Elisa de Bordos	<20.000
Elisa de Bordos-Jotabeche	1.000-5.000
Jotabeche-Nantoco	<15.000-20.000
Tierra Amarilla-Paipote	1.000-5.000
San Fernando	<15.000-20.000
Copiapó	1.000-10.000
Bodega	10.000-15.000
La Chimba-P. Colgada	1.000-5.000

Tabla 4. 1 Valores de transmisividad, extraída DGA (2013)

El estudio “Modelo Hidrogeológico Cuenca Río Copiapó, Sector Ramadillas – La Puerta, Proyecto Caserones, SITAC (2009)” obtuvo valores tanto de pruebas de bombeos como indirectamente, estos valores se presentan en la tabla 4.2.

Código	Sector	Transmisividad (m²/d)
WE-01	Río Ramadillas	303
WE-02	Río Ramadillas	56
WE-03	Río Ramadillas	447
WE-04	Río Pulido-Ramadillas	399
WEO-04	Río Pulido-Ramadillas	462
CCH-1	Iglesia Colorada	2.810
CCH-2	Iglesia Colorada	3.000
CCH-3	Iglesia Colorada	2.470
CCH-4	Iglesia Colorada	500
M-III-107	Jorquera	10.353
ND-305	Manflas	431
ND-326	Pulido	216
M-II-204	Pulido	2.381
ND-344	Pulido	803
M-III-097	San Antonio-Los Loros	1.266
M-III-051	Lautaro-San Antonio	3.435
M-III-168	Lautaro-San Antonio	561
ND-287	Lautaro-San Antonio	39.300
M-3-116	Lautaro-San Antonio	3.440
M-III-096	Lautaro-San Antonio	1.809
M-III-073	Lautaro-San Antonio	4.767
M-III-122	Lautaro-San Antonio	5.127
M-III-041	Lautaro-San Antonio	1.935
M-III-050	Lautaro-San Antonio	3.859
M-III-058	Lautaro-San Antonio	3.895
M-III-068	Lautaro-San Antonio	22.800
M-III-070	Lautaro-San Antonio	1.926
ND-229	Lautaro-San Antonio	1.073
M-3-115	Los Loros-La Puerta	6.452
ND-365	La Puerta-Mal Paso	5.758

Tabla 4. 2 Valores de transmisividad, modificada de DGA (2013)

En la cuenca del Ramadillas y en su confluencia con el Pulido los valores son más bajos debido a que se ven influenciados por el acuífero inferior (roca basal alterada) y las transmisividades son medias a altas con valores que fluctúan entre 400 y 500 m²/día (DGA, 2013).

En las zona de Iglesia Colorada y Las Juntas las transmisividades son medias a altas a muy altas, y altas a muy altas respectivamente, con valores entre 500 y 3.000 m²/día para la primera y entre 800 y 10.000 m²/día para la segunda. Mientras que bajo el embalse Lautaro encontramos valores de transmisividad entre 1.000 y 20.000 m²/día (DGA, 2013).

El último estudio del que se extraen valores para la transmisividad es el realizado por el DICTUC (2010) que recopiló y analizó información de estratigrafía y pruebas de bombeo en pozos que se encontraban distribuidos en el valle, los valores obtenidos por ellos junto con valores de conductividad son presentados en la tabla 4.3.

Código	WGS 84		Transmisividad (m ² /d)	Conductividad (m/d)
	UTM Este	UTM Norte		
ND-0302-282	414.742	6.884.195	936	17
ND-0302-302	407.563	6.895.221	565	19
ND-0302-287	401.580	6.904.987	1.770	21
NR-0302-74	400.839	6.905.251	427	27
ND-0302-229	400.365	6.909.931	1.044	15
ND-0302-145	399.689	6.910.781	820	22
ND-0302-222	399.487	6.911.477	1.640	25
ND-0302-289	397.907	6.914.045	1.330	27
ND-0302-960	394.758	6.916.883	299	4
ND-0302-268	391.678	6.920.439	362	9
ND-0302-307	391.188	6.920.839	670	46
ND-0302-232	387.303	6.924.263	1.097	20
ND-0302-272	385.282	6.928.292	1.970	39
ND-0302-240	383.922	6.929.192	642	15
ND-0302-364	382.300	6.932.605	2.450	33
ND-0302-341	376.523	6.945.164	10.900	300
ND-0302-313	374.579	6.965.575	2.410	63
UA-0302-1(2)	368.709	6.970.441	868	14
ND-0302-309	365.630	6.974.298	3.820	184
ND-0302-288	359.066	6.979.902	12.200	467
ND-0302-593	358.310	6.980.454	1.170	41
ND-0302-635(2)	356.199	6.980.927	249	5
ND-0302-665	354.433	6.979.671	149	5
ND-0302-594	348.465	6.975.698	1.590	119
ND-0302-603	346.948	6.975.670	513	34
ND-0302-329	344.562	6.976.016	997	24
ND-0302-599	339.518	6.974.302	289	19
ND-0302-577(1)	336.415	6.969.069	151	23
ND-0302-606(3)	324.080	6.975.085	143	3
ND-0302-606(2)	324.067	6.974.795	260	6
ND-0302-606(1)	323.235	6.974.626	101	2

Tabla 4.3 Valores de transmisividad y conductividad, modificado DGA (2013)

4.2.2.2 Permeabilidad (K)

La permeabilidad de un acuífero se define como *cociente entre la transmisividad y el espesor saturado*. Los valores presentes en el valle son los esperados para el relleno sedimentario que presenta, estos para el caso del valle van entre 10^{-4} y 2×10^{-3} m/s (10 y 200 m/día), mientras para aquellos depósitos producidos por inundaciones (limos, arcillas y arenas) el valores es menor y varía entre 10^{-6} y 10^{-5} m/s y finalmente para los depósitos fluvioaluviales el rango va entre 10^{-7} y 10^{-5} m/s (DGA, 2013). Los valores de permeabilidad para el valle se presentan en la tabla 4.3.

4.3 NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

El valle del río Copiapó se encuentra subdividido en seis subsectores acuíferos, esta subdivisión se realizó bajo criterios hidrogeológicos tales como el angostamiento del valle y disminución del espesor de acuífero debido al ascenso de la posición de la roca basal (DGA, 2013). La división es la siguiente:

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta La Puerta.
- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.
- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

Para el caso de analizar el comportamiento histórico de los niveles, el sector 1 fue nuevamente subdividido en 2, esto se realizó con el fin de agrupar los pozos con altitudes entre los 1.000 y 1.350 msnm y por otra parte a los pozos entre 1.300 y 1.650 (DGA, 2013).

Sector 1

Este sector cuenta con 9 pozos de la red de monitoreo, que poseen mediciones desde el año 1986 (DGA, 2013), en la figura 4.2 se muestra la profundidad del nivel de agua subterránea para los pozos del sector 1.A y en la figura 4.3 las para el sector 1.B.

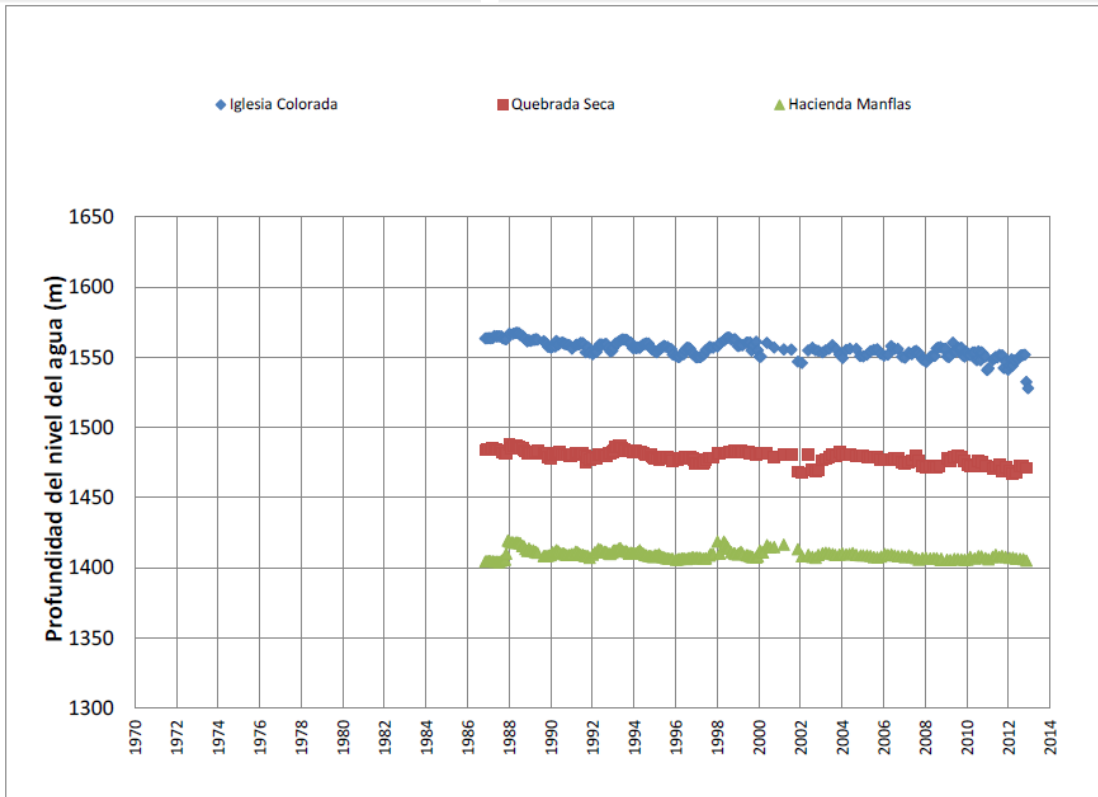


Figura 4.2 Niveles de Agua Subterránea en Sector 1.A, extraída DGA (2013)

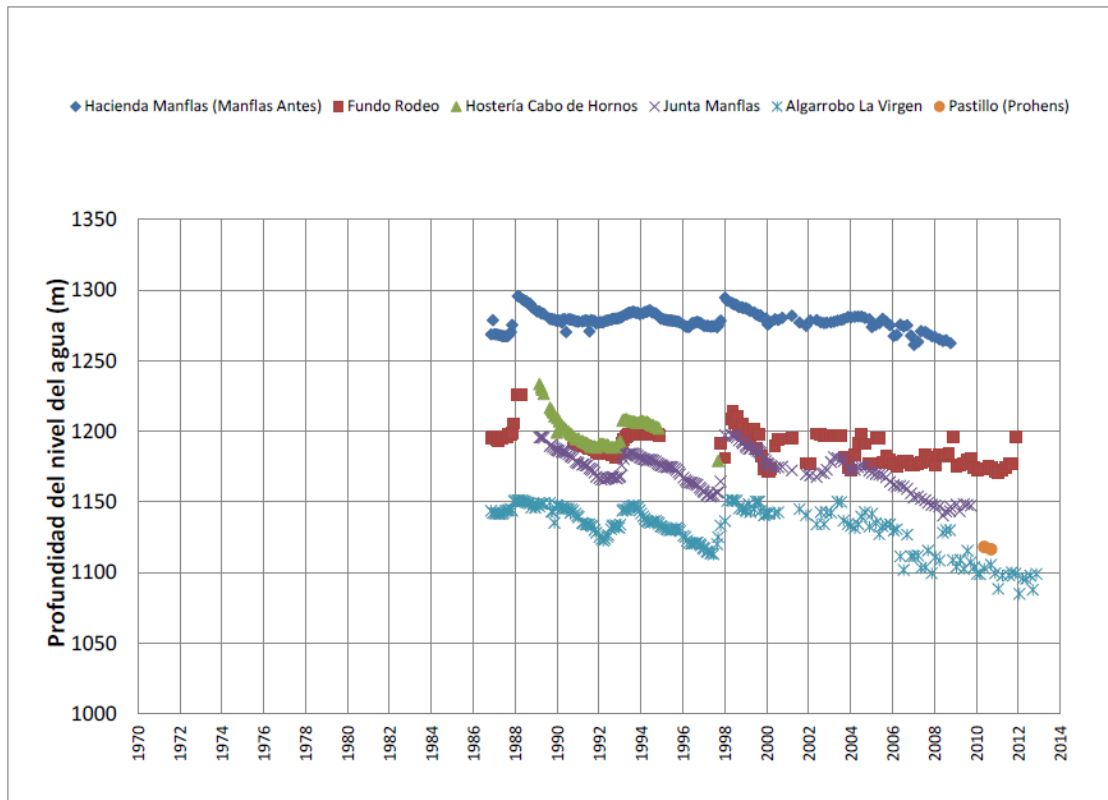


Figura 4.3 Niveles de Agua Subterránea en Sector 1.B, extraída DGA (2013).

En ambas figuras se puede apreciar que presentan fluctuaciones que pueden ser asociados a una variación estacional, además se observa un ascenso en los niveles entre los años 1997 y 1998 que pueden ser atribuibles a los eventos de precipitación que sucedieron el año 1997.

En lo que respecta a la profundización de los niveles, en el grupo 1.A no se observa esto, en el grupo 1.B se observa una tendencia en este sentido.

Sector 2

Este sector cuenta con 7 pozos de la red de monitoreo, con mediciones desde el año 1971 (DGA, 2013). En la figura 4.4 se muestra el comportamiento de estos pozos a lo largo del tiempo, se observa que el nivel de los pozos se ha mantenido constante.

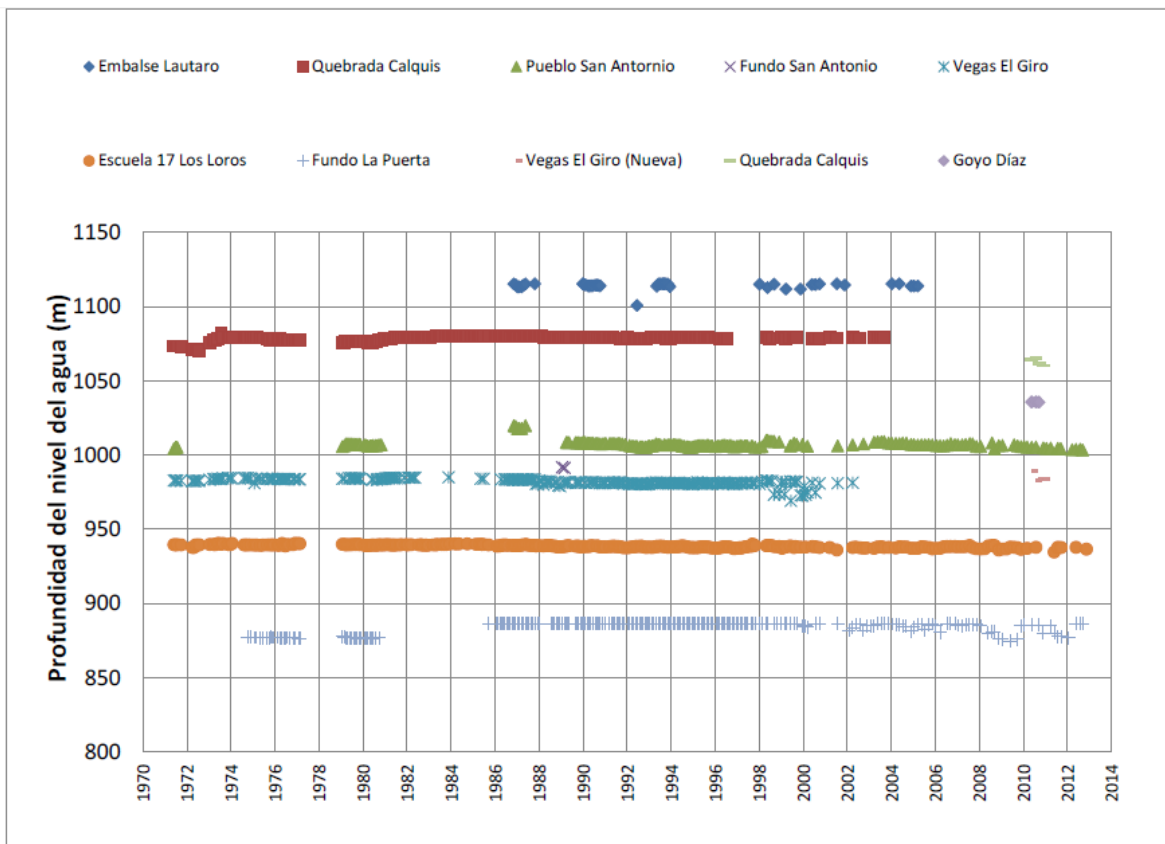


Figura 4.4 Niveles de Agua Subterránea en Sector 2, extraída DGA (2013).

Sector 3

Este sector cuenta con 9 pozos de la red de monitoreo, con mediciones desde el principio de la década de los '70 (DGA, 2013). En la figura 4.5 se presenta el comportamiento de la profundidad en los niveles de agua Subterránea, de esto se puede observar que la mayoría presenta una tendencia en la profundización de los niveles, salvo los pozos de Parcela Nantoco y Canal Mal Paso, además se aprecia que algunos pozos presentan un aumento de los niveles de agua entre 1997 y 1998, asociados a las precipitaciones ocurridas en 1997.

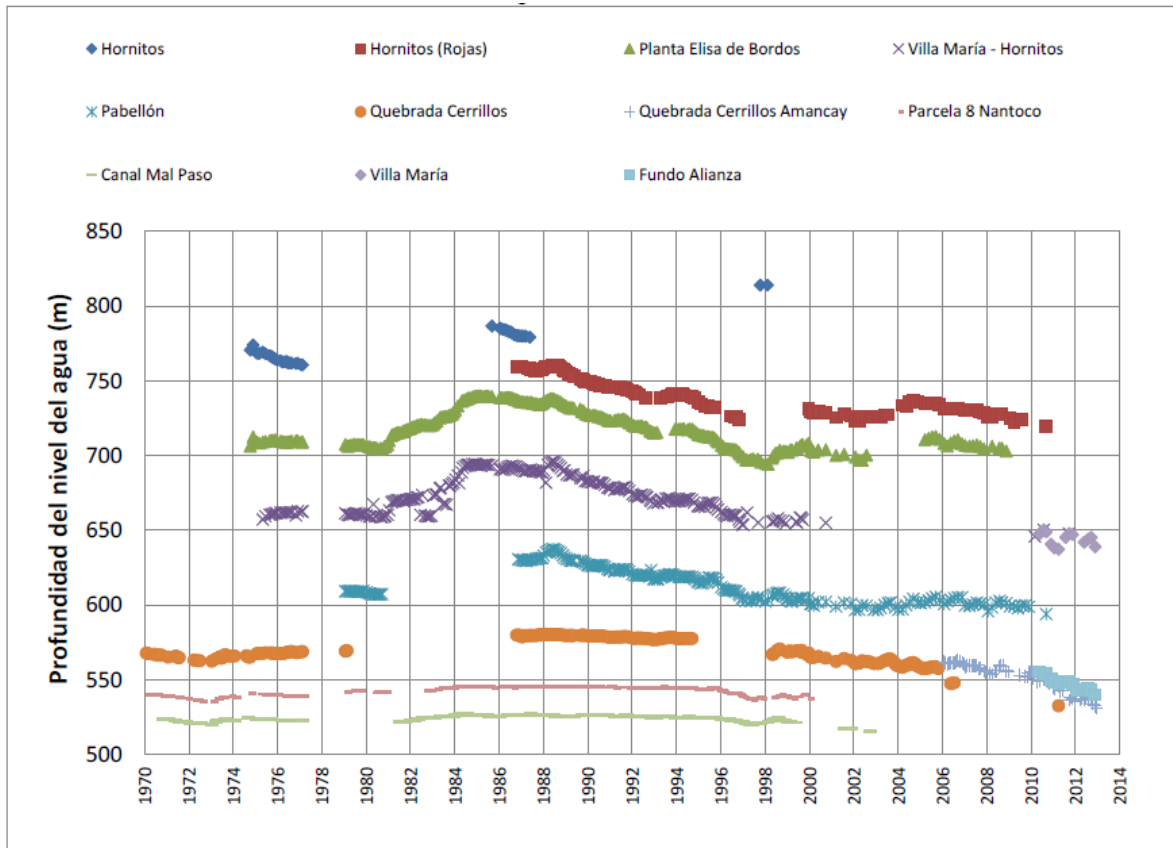


Figura 4.5 Niveles de Agua Subterránea en Sector 3, extraída DGA (2013).

Sector 4

Este sector cuenta con 10 pozos de la red de monitoreo, con mediciones a partir de la década de los '60 (DGA, 2013), en la figura 4.6 se presenta la profundidad en los niveles de agua subterránea a lo largo de los años de medición. Se aprecia un comportamiento similar de todos los pozos en este sector, con un nivel estable en los primeros años, luego en el año 1984 aumenta el nivel de las aguas subterráneas para después observar un descenso de este a partir del año 1994.

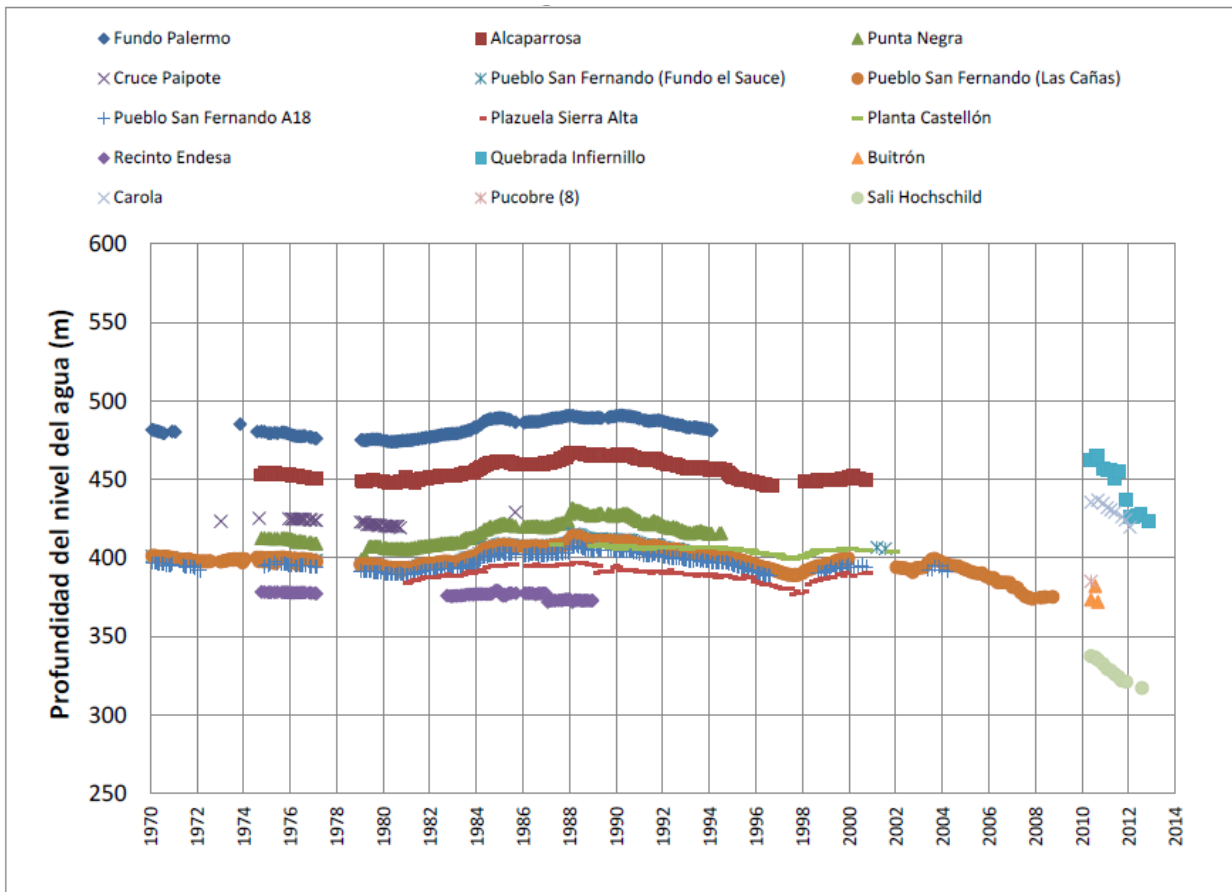


Figura 4.6 Niveles de Agua Subterránea en Sector 4, extraída DGA (2013).

Sector 5

Este sector cuenta con 10 pozos de la red de monitoreo, las mediciones comenzaron principalmente a partir de la década de los '70 (DGA, 2013), en la figura 4.7 se presenta la profundidad en los niveles de agua subterránea a lo largo de los años de medición. Se aprecia un comportamiento similar de todos los pozos en este sector, con un nivel de profundidad constante en los primeros años, luego en el año 1984 aumenta el nivel de las aguas subterráneas para después observar un descenso de este a partir del año 1988.

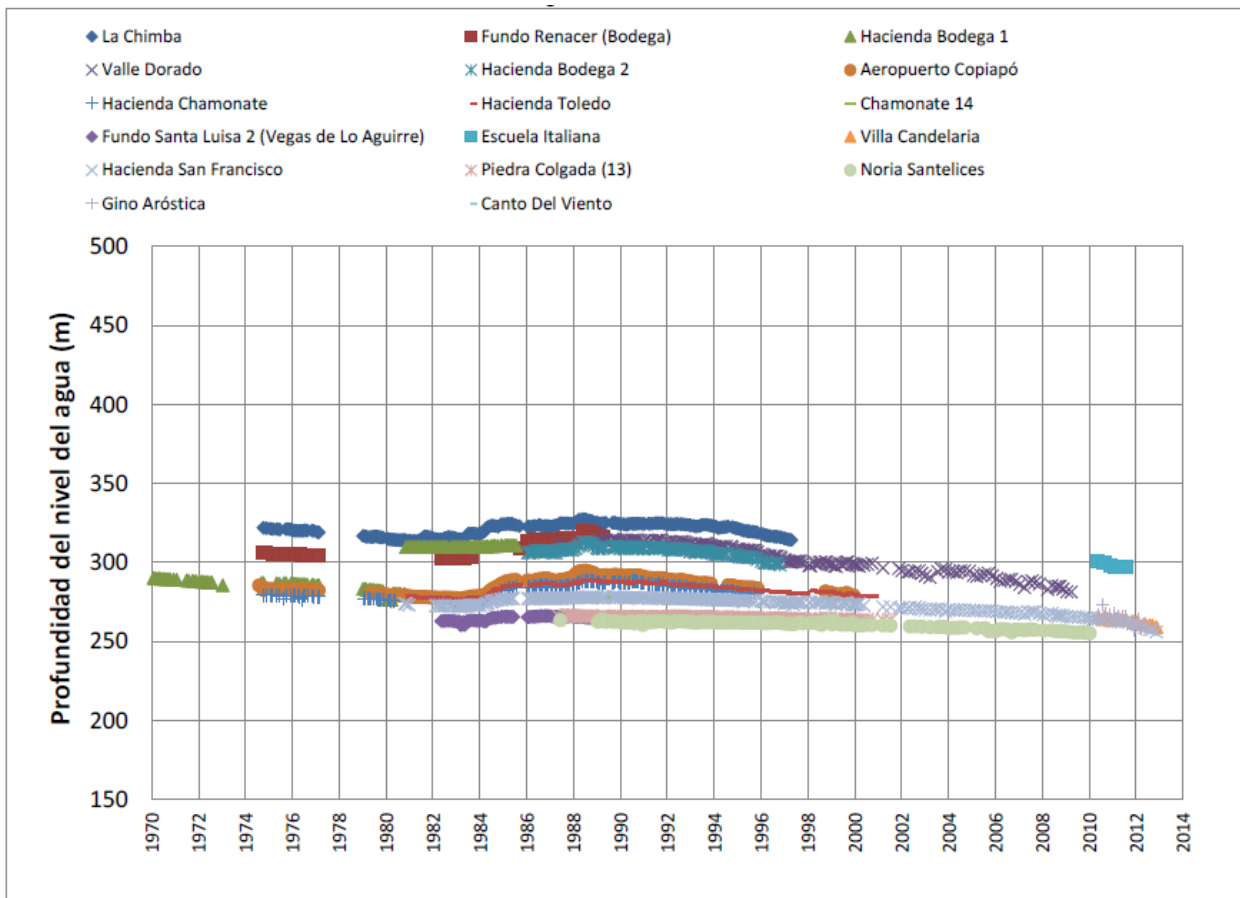


Figura 4.7 Niveles de Agua Subterránea en Sector 5, extraída DGA (2013).

Sector 6

Este sector cuenta con 19 pozos de la red de monitoreo, las mediciones comenzaron principalmente a partir de la década de los '60 (DGA, 2013), en la figura 4.8 se presenta la profundidad en los niveles de agua subterránea a lo largo de los años de medición. Se aprecia un comportamiento similar para todos los pozos, se observa que la profundidad de los niveles de agua se ha mantenido constante.

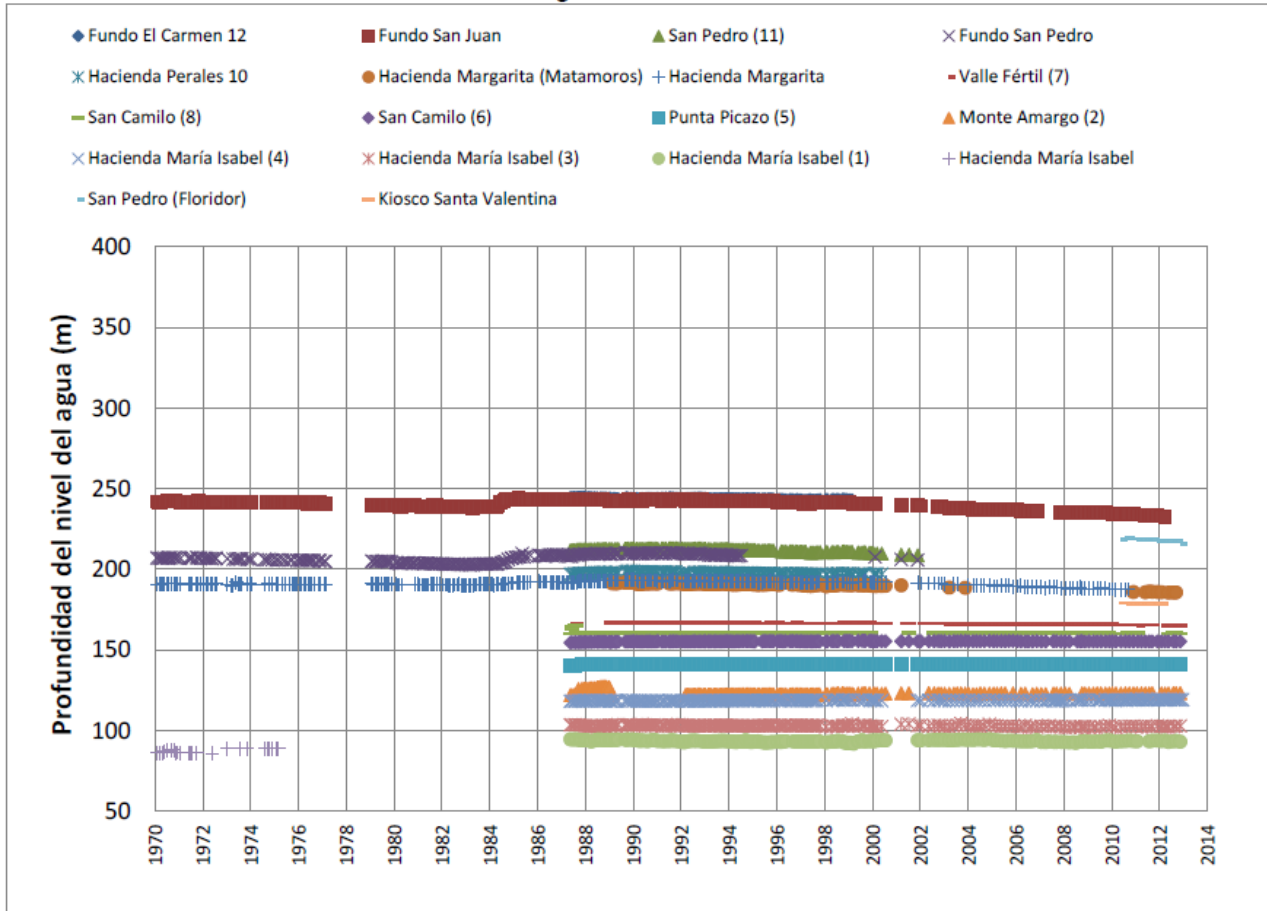


Figura 4.8 Niveles de Agua Subterránea en Sector 6, extraída DGA (2013).

Niveles Piezométricos

En este apartado se mencionaran los datos de niveles estáticos obtenidos por el SERNAGEOMIN durante el periodo de tiempo comprendido entre el 2008 y el 2010 para los seis sectores de la cuenca del río Copiapó.

Sector 1

Para este caso, el río Pulido se puede separar en dos sectores, el alto, que va desde el sector de Junta del Potro hasta Cabo de Hornos, donde las profundidades varían entre 10 y 25 m.b.s.t. y en el bajo, que va desde Cabo de Hornos hasta la confluencia del Jorquera, donde las profundidades son mayores y van desde los 48 a los 64 m.b.s.t. alcanzando excepcionalmente los 65 metros. Este tramo, presenta una mayor concentración de pozos de bombeo. En el Caso del río Jorquera, previo a la confluencia, la profundidad de los niveles estáticos es superior a los 65 m.b.s.t. El río Manflas por su parte presenta niveles entre los 10 y 26 m.b.s.t alcanzando excepcionalmente los 27 metros. Finalmente en el último tramo del sector, que va entre la confluencia de los tres ríos mencionados anteriormente y el Embalse Lautaro, los niveles estáticos se encuentran a una profundidad que varía entre los 27 y 47 m.b.s.t. (SERNAGEOMIN, 2012).

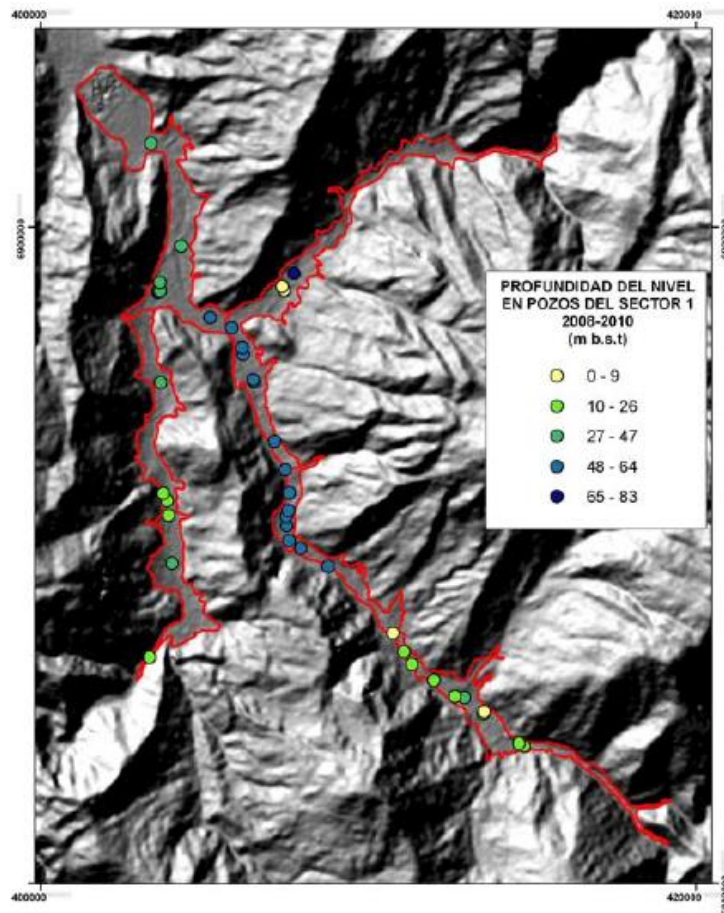


Figura 4. 9 Distribución de los pozos en el sector 1, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Sector 2

En este sector el nivel varía principalmente entre 4 y 17 m.b.s.t. Sin embargo, en las zonas de confluencia de las quebradas Calquis, Amolanas y Los Loros los niveles alcanzan profundidades mayores a 18 m.b.s.t. y con un máximo de 33 metros en los sectores Calquis y Amolanas. Otra característica de esta zona es la surgencia de agua en los sectores de Los Loros y La Puerta (SERNAGEOMIN, 2012)

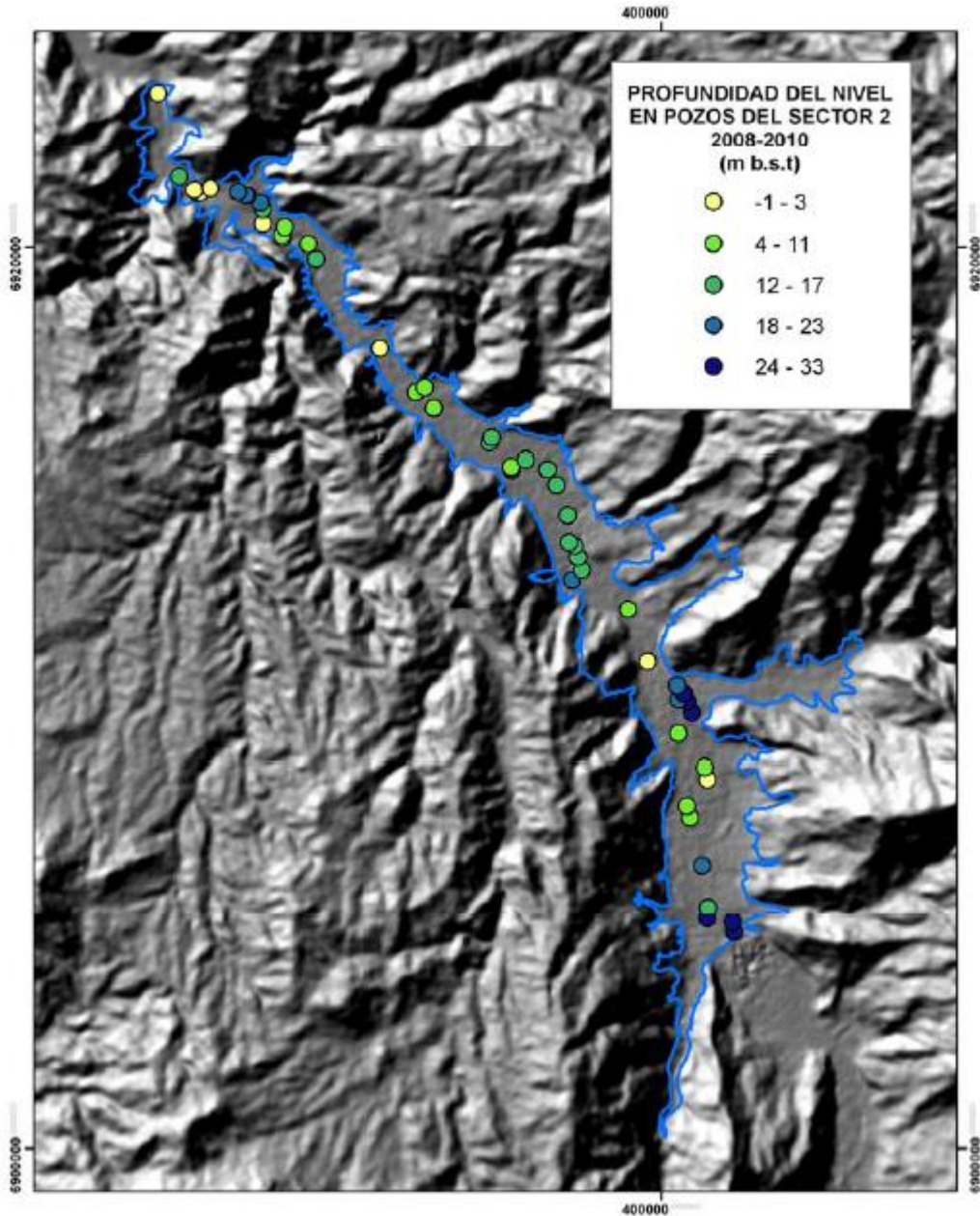


Figura 4. 10 Distribución de los pozos en el sector 2, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Sector 3

En este sector la variación de profundidades es muy amplia, va desde los 30 m.b.s.t hasta los 75 m.b.s.t. Las mayores profundidades se encuentran en el sector de Elisa de Bordos mientras que las menores se ubican en el sector de Nantoco. (SERNAGEOMIN, 2012).

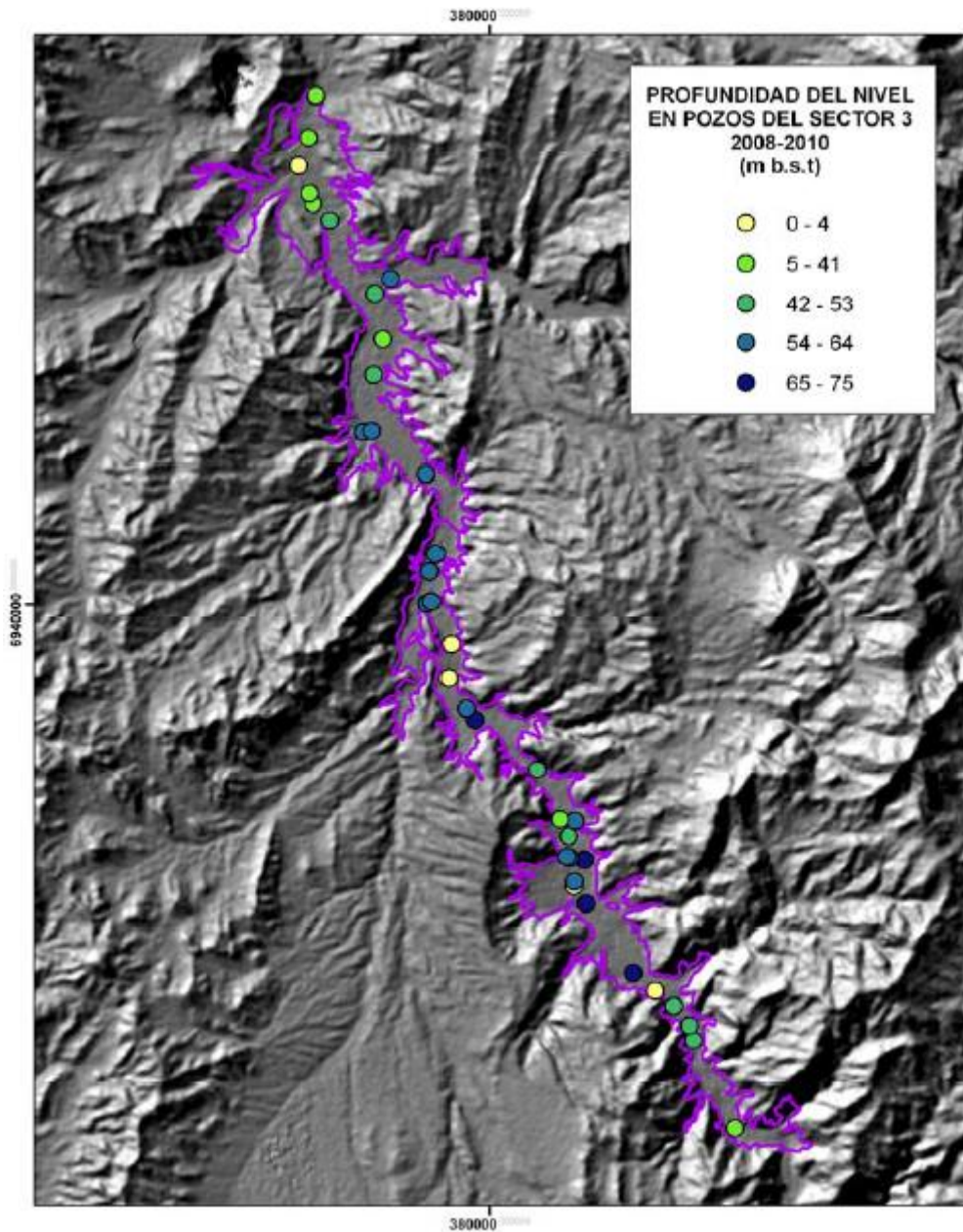


Figura 4. 11 Distribución de los pozos en el sector 3, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Sector 4

En este sector las profundidades varían entre 30 y 135 m.b.s.t. alcanzando las menores profundidades el año 2008 en el sector de Copiapó, a pesar de esto, la tónica en el sector es encontrar profundidades mayores a los 50 m.b.s.t. Las máximas profundidades se alcanzan entre Tierra Amarilla y Paipote, lo cual es concordante con la existencia de un número mayor de pozos (SERNAGEOMIN, 2012).

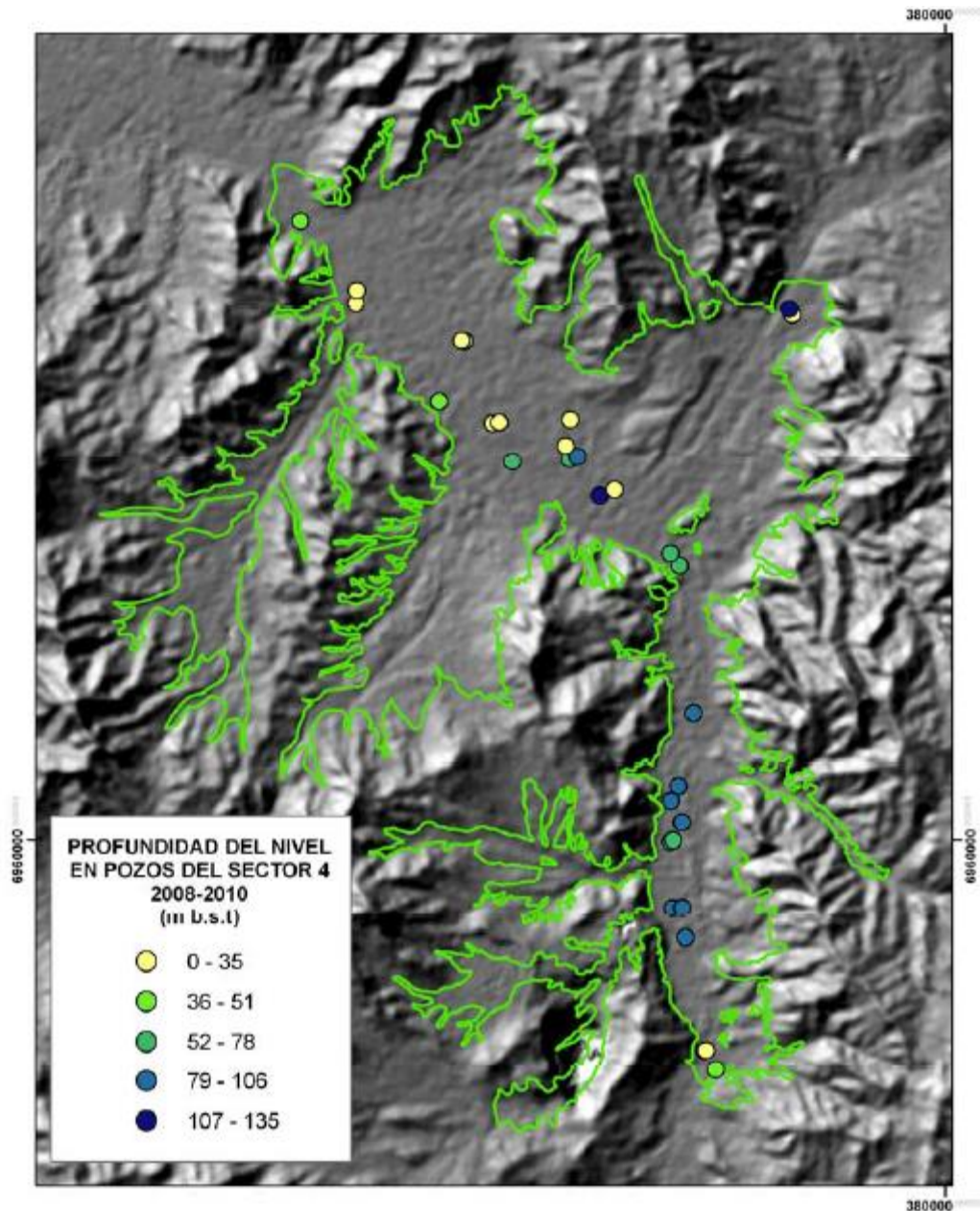


Figura 4. 12 Distribución de los pozos en el sector 4, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Sector 5

En este sector las profundidades de los niveles varían, principalmente, entre los 15 y los 60 m.b.s.t. Estas profundidades se distribuyen de diferente manera a lo largo del sector, en el extremo sureste varían entre 50 y 60 m.b.s.t, en la zona central estas fluctúan entre los 25 y 39 m.b.s.t., mientras en el extremo noroeste se encuentran los niveles más someros con variaciones entre los 15 y 20 m.b.s.t. (SERNAGEOMIN, 2012).

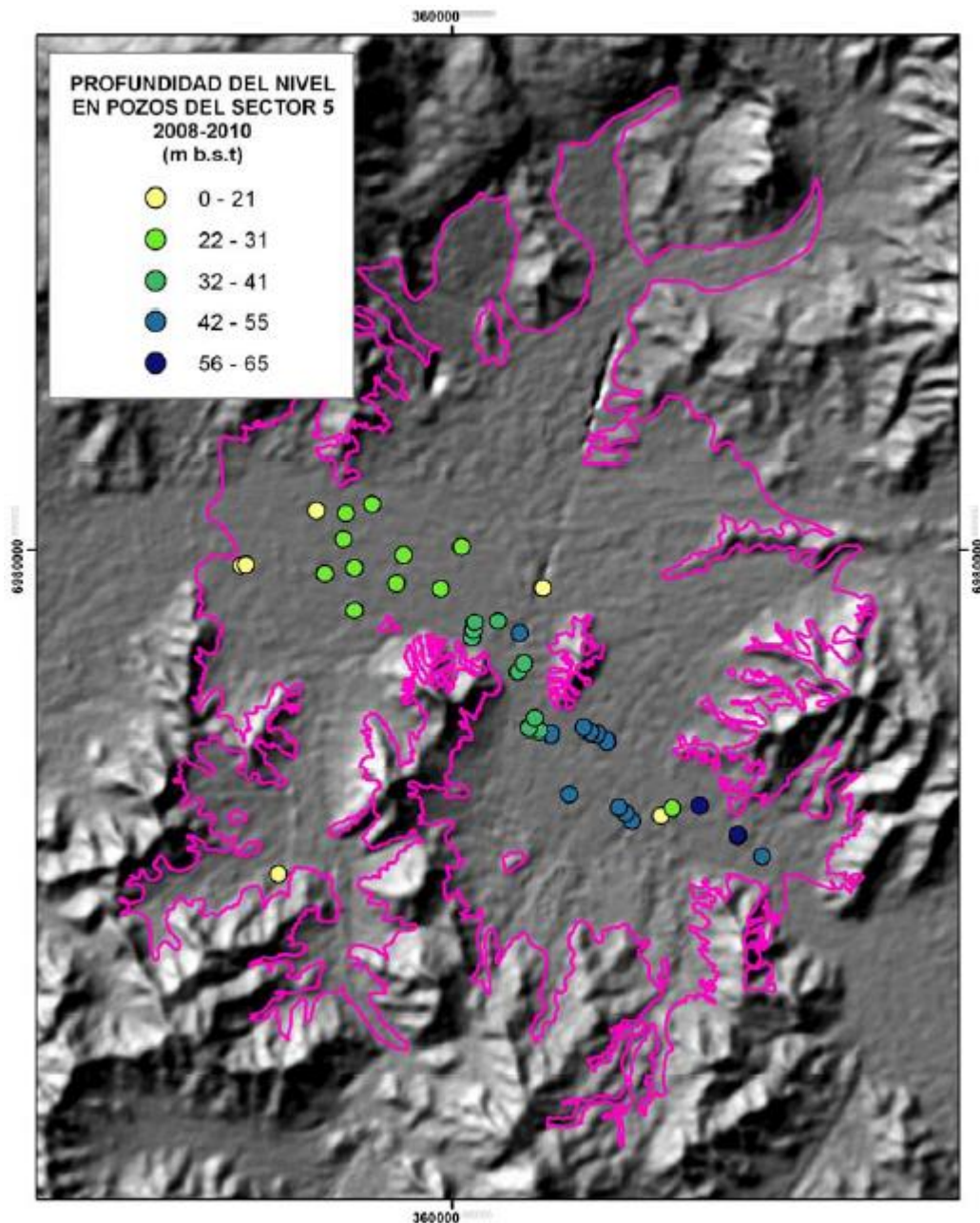


Figura 4. 13 Distribución de los pozos en el sector 5, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Sector 6

La variación de los niveles en este sector va, aproximadamente, entre los 3 y los 15 m.b.s.t. Alcanzándose los niveles más profundos en el sector de Piedra Colgada, oeste del sector, el cual presenta un mayor número de pozos, característica común en todos los sectores, mientras que los niveles más someros se observan en la zona este del sector.

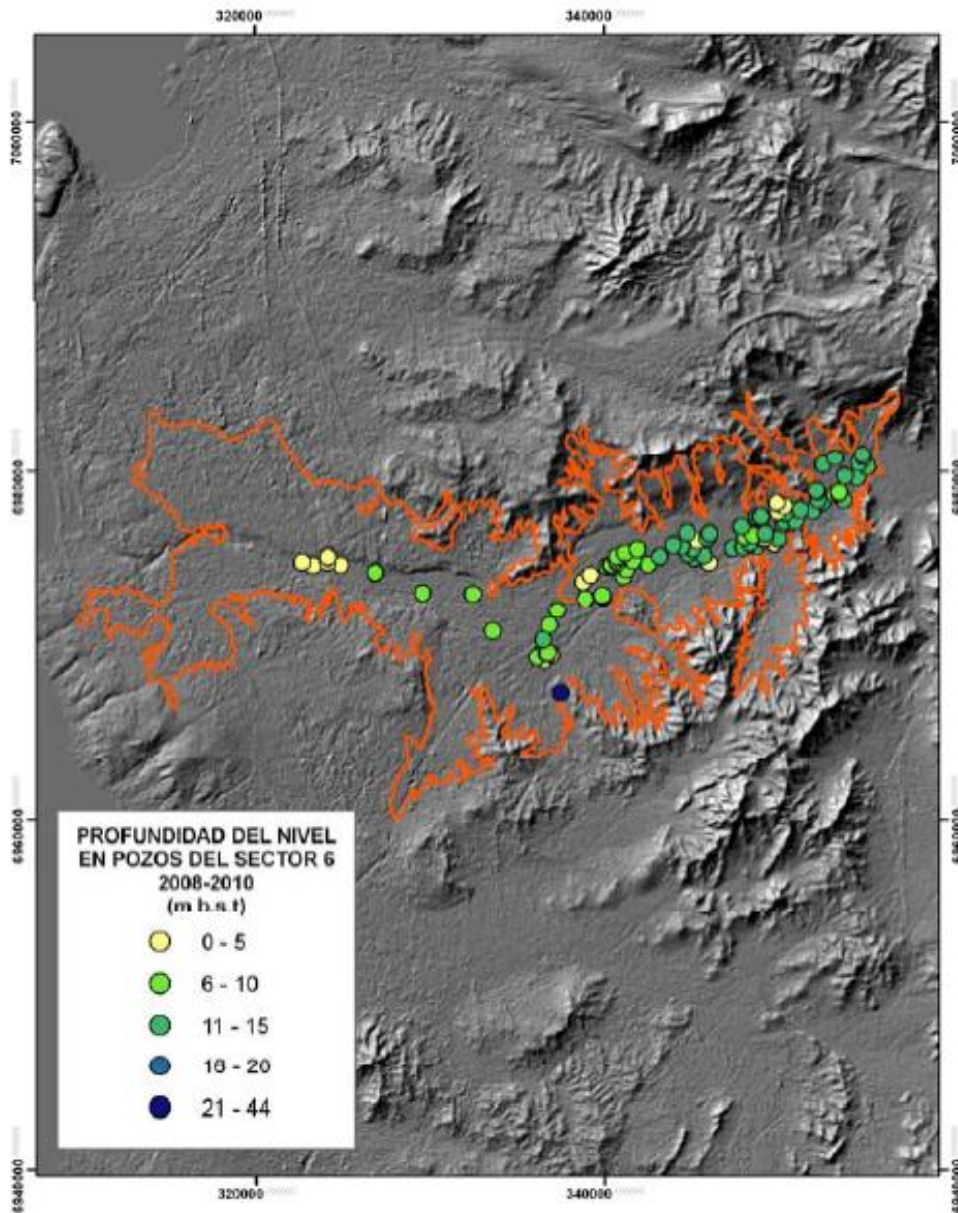


Figura 4. 14 Distribución de los pozos en el sector 6, extraída SERNAGEOMIN (2012)

4.4 CLASIFICACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA

En esta sección se presentará la clasificación y calidad del agua subterránea y superficial para la cuenca del río Copiapó, la información será extraída del trabajo realizado por el SERNAGEOMIN el año 2012.

Aguas Subterráneas

Para clasificar estas aguas se utilizarán los diagramas de piper y de stiff obtenidos por el SERNAGEOMIN a partir de 215 muestras y se utilizará la subdivisión que ellos realizaron, la cual incluye los 6 sectores en los cuales está dividido el acuífero por la DGA, la subcuenca de la quebrada Paipote, subcuenca del río Ramadillas y las minas Casale y Refugio. Cabe destacar que los resultados serán presentados siguiendo la dirección de flujo del agua subterránea.

Diagramas Piper

En el sector de la subcuenca del río Ramadillas las aguas son sulfatadas cálcicas, además se observa que el porcentaje de sulfatos va disminuyendo aguas abajo mientras se incrementa el porcentaje de bicarbonato y cloruros, siendo mayor el incremento de bicarbonato (SERNAGEOMIN, 2012).

Para el sector 1 de la división realizada por la DGA, las aguas también son del tipo sulfatadas cálcicas, con excepción de algunas muestras obtenidas en el río Manflas que corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas. Para el caso de los cationes la mayoría se agrupan en el sector cálcico, aguas de los ríos Manflas, Pulido y cabecera del río Copiapó, mientras un grupo menor de aguas correspondientes al río Jorquera quedan en la zona sin clasificación entre aguas cálcicas y aguas sódicas y potásicas. En el caso de los aniones, se aprecia una mayor dispersión en el anión primario, variando de sulfato a bicarbonato (SERNAGEOMIN, 2012).

En el sector 2 la totalidad de las muestras se clasifican como aguas sulfatadas cálcicas. En el caso del sector 3 las aguas también son clasificadas aguas sulfatadas a pesar de que los cationes de algunas muestras entran en el campo del sodio y potasio. Se observa además un aumento en el porcentaje de cloruros, sin embargo no alcanza a ser el anión dominante (SERNAGEOMIN, 2012).

El sector 4 presenta aguas sulfatadas cálcicas y un aumento en el porcentaje de cloruros. Para el sector quebrada de Paipote y Llano de Varas, el agua fue clasificada como sulfatada cálcica, el agua de este afluente llega al río Copiapó justo en el sector 4, al ser ambas aguas clasificadas de igual forma el agua resultante también será sulfatada cálcica (SERNAGEOMIN, 2012).

Para el sector 5 las aguas son clasificadas como sulfatadas cálcicas, se mantiene la distribución de cloruros presentes en el sector 4 y los cationes se aproximan al campo de las aguas sódicas y potásicas (SERNAGEOMIN, 2012).

En el sector 6 la mayoría de las muestras caen en la clasificación aguas sulfatadas cálcicas aunque existen otras que se clasifican como aguas sulfatadas sódicas (SERNAGEOMIN, 2012).

En el sector Casale y Refugio se obtiene un resultado para cada mina, en el caso de Casale el agua es clasificada como aguas sulfatadas sódicas y para Refugio son bicarbonatadas cálcicas (SERNAGEOMIN, 2012).

Las aguas de la cuenca del río Copiapó son sulfatadas cálcicas, no obstante, hay una disminución del calcio y un aumento del sodio y potasio desde el sector 4 siendo más marcada en el sector 6. Esta tendencia de aumento hacia aguas abajo del contenido de sulfato, cloruro y sodio, se condice con el comportamiento normal de las aguas de circulación regional, aunque también se pueden asociar a recargas producto de retornos por riego y aportes laterales vinculados a segmentos del valle, en el cual tributan o descargan numerosas quebradas (SERNAGEOMIN, 2012).

Ubicación	Clasificación
Sector subcuenca río Ramadillas	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector 1	Aguas Sulfatadas Cálcicas y Bicarbonatadas Cálcicas
Sector 2	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector 3	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector 4	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector Q. Paipote y Llano de Varas	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector 5	Aguas sulfatadas cálcicas
Sector 6	Aguas sulfatadas cálcicas y sulfatadas sódicas
Sector Casale y Refugio	No siguen una tendencia

Tabla 4. 4 Tabla resumen de los tipos de agua para el acuífero de Copiapó, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Diagramas de Stiff

Para el sector del río Ramadillas las aguas fueron clasificadas como dulces y dulces a moderadamente mineralizadas, con un predominio del sulfato y el calcio.

En el sector 1 se clasifico cada uno de los afluentes del río Copiapó, para el Manflas sus aguas inicialmente eran dulces a moderadamente mineralizada con predominio de bicarbonato y calcio, aguas abajo se clasifican como dulces mineralizadas a moderadamente salobres con predominio de calcio. En el caso de los aniones inicialmente predominaba el sulfato y finalmente lo hace el bicarbonato. Para el río Pulido en un principio el agua es dulce a moderadamente mineralizada y luego pasa a ser dulce mineralizada o moderadamente salobre, la última muestra de este río es agua salobre pero está cercana al límite de agua dulce mineralizad. Los iones predominantes son el calcio y el sulfato. El río Jorquera presenta agua salobre y al igual

que el tramo final del r. Pulido predominan el calcio y sulfato. Por último la cabecera del río Copiapó presenta aguas dulces mineralizadas o moderadamente salobres, con predominio de calcio y sulfato. A pesar de que los 3 primeros ríos mencionados son afluentes del Copiapó la mezcla de aguas resultantes no es la esperada por la clasificación del diagrama, esto puede explicarse debido a una diferencia de caudales entre los 3 afluentes. (SERNAGEOMIN, 2012)

Para el sector 2 las aguas son principalmente dulces mineralizadas o moderadamente salobres, aunque aguas abajo existen algunas muestras donde se obtuvo como resultado aguas salobres. En todo el sector predominan el calcio y el sulfato. (SERNAGEOMIN, 2012)

En el sector 3 las aguas inicialmente son dulces mineralizadas o moderadamente salobres, luego existe un sector de transición para finalmente observar aguas salobres, los iones predominante continúan siendo el calcio y el sulfato. (SERNAGEOMIN, 2012)

Para el sector 4 las aguas son del tipo salobre con predominio del calcio y el sulfato, con excepción de una muestra en la cual se obtuvo como resultado agua salada y prevalencia del cloruro en lugar del sulfato (SERNAGEOMIN, 2012).

En el sector de la quebrada Paipote en su cabecera se observa que el agua es dulce a moderadamente mineralizada para aguas abajo ir variando a agua dulce mineralizada o moderadamente salobre y finalmente a agua salobre, esto puede deberse a la presencia de cuerpos mineralizados en el sector de La Coipa o a la actividad minera presente en esta zona, en el Llano de Varas las aguas son dulce mineralizada o moderadamente salobre, esto puede ocurrir debido a que no se ven influenciadas por la zona de La Coipa. Finalmente la última muestra de este sector es salobre, probablemente debido a la mezcla de ambas aguas (SERNAGEOMIN, 2012).

Para el sector 5 el agua es salobre con predominio de calcio y sulfato, en el sector 6 continua la tendencia de los sectores 4 y 5, aguas salobres y hacia el final agua salada. En el caso de los aniones sigue prevaleciendo el sulfato, sin embargo, para el caso de los cationes hay una transición de aguas cálcicas a aguas sódicas. Esta última variación puede deberse a la influencia de las rocas de la formación Bahía Inglesa, que corresponde a un ambiente marino, o a la intrusión salina (SERNAGEOMIN, 2012).

En el último sector, Casale y Refugio, se observa que en el sector de Casale las aguas son salobres a saladas, esto a pesar de encontrarse en la parte alta de la cuenca y podría deberse a la mineralización presente en la zona que influiría en las aguas subterráneas. Estas aguas podrían llegar a la cuenca del río Jorquera y podrían influir en su composición. Por otro lado, en el sector de El Refugio la muestra se clasificó como dulce (SERNAGEOMIN, 2012).

En la cabecera de la cuenca el agua es dulce y dulce mineralizada a moderadamente salobre, aguas abajo va cambiando el tipo, ya en el sector 2 es posible apreciar algunas muestras salobres, en el sector 3 ya no se aprecian muestras de aguas del tipo dulces mineralizadas a moderadamente salobres, el agua presenta una signatura salobre durante los siguientes dos sectores para finalmente en el sector 6 ser

salada. En la figura 4.15 se muestra un mapa con la evolución del agua (SERNAGEOMIN, 2012).

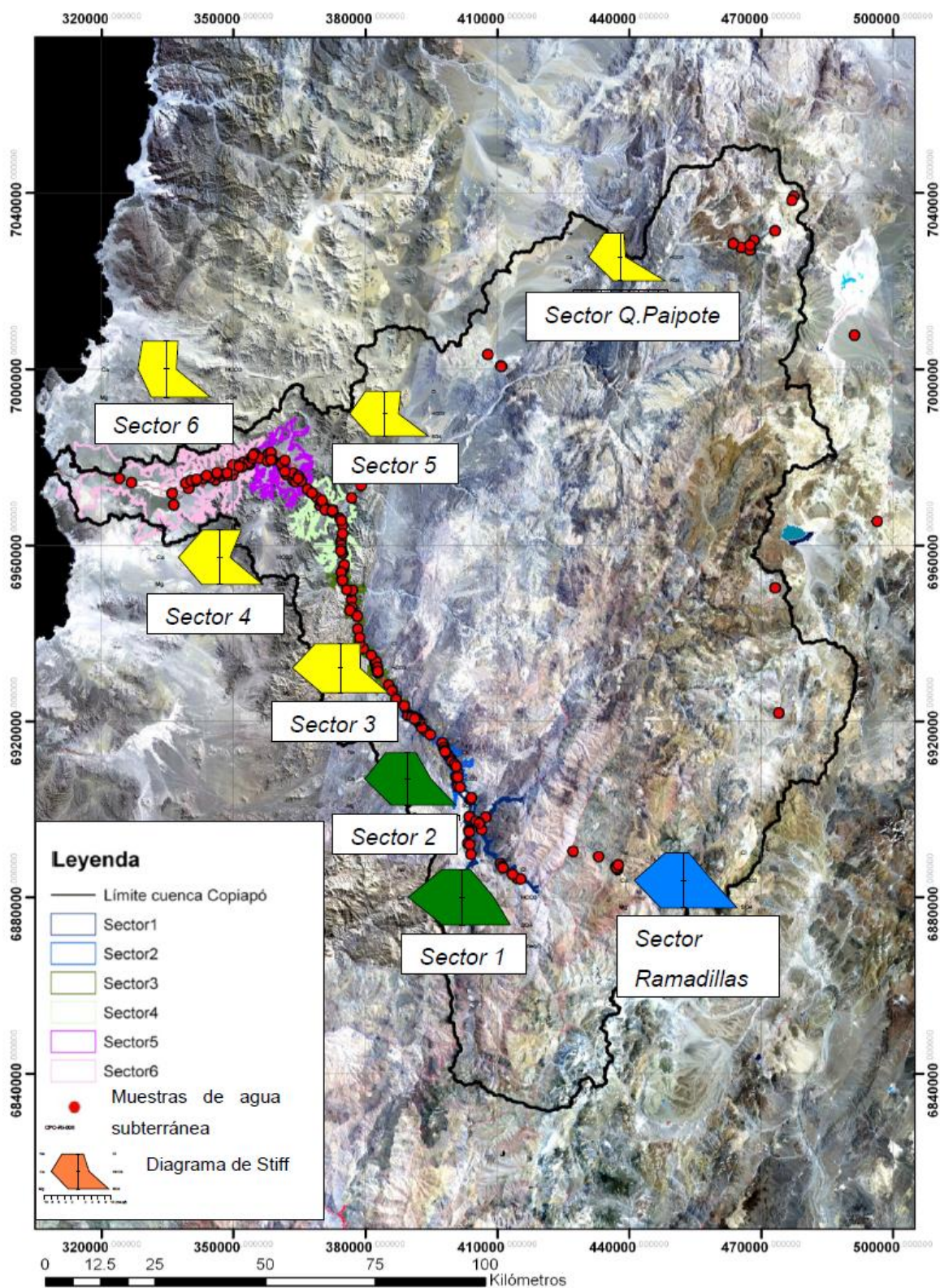


Figura 4. 15 Evolución de las aguas subterráneas en la cuenca, extraída SERNAGEOMIN (2012).

Calidad de las aguas subterráneas

Para evaluar la calidad del agua se comparan muestras de los 6 sectores en los cuales está dividido el acuífero por la DGA con los requisitos químicos para la norma de agua potable (NCh.409, INN, 2005) y de riego y otros usos (NCh. 1.333, INN, 1987).

Es correcto mencionar que los datos presentados en la tabla 4.5 son referenciales ya que la obtención de la muestra no fue cumpliendo a cabalidad con los estándares establecidos por cada norma.

¿Se excede la norma?	Norma de Agua Potable						Norma de agua para Riego					
	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6
total solidos disueltos	Si	Si	Si	Si	Si	Si						
Al**												
As						Si***						
B**							Si	Si	Si	Si	Si	Si
Ba**												
Be**												
Cd												
Cl-				Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Co**												
Cr				Si	Si	Si						
Cn**												
Cu												
F-												
Fe	Si	Si	Si									Si
Hg						Si***					Si	Si
Li**							Si	Si	Si	Si	Si	Si
Mg				Si	Si	Si						
Mn						Si***		Si				Si
Mo**							Si	Si	Si	Si		Si
Na**												Si
Ni**												
NO3-*					Si	Si						
Pb												
Se		Si	Si	Si	Si	Si						
SO4	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
V**												
Zn						Si***						Si

Tabla 4. 5 Excede los límites en cada norma, * Solo corresponde en Norma agua potable, ** Solo corresponde a Norma para riego, * Solo algunas muestras superan el limite**

Para el caso cuando se compara con la Norma de agua potable, se aprecia que a medida que se desplaza aguas abajo, en la cuenca, ésta se va enriqueciendo en elementos y superando en un mayor número de elementos la norma, esto se condice con lo que ocurre naturalmente en el escurrimiento de agua aunque adicionalmente puede existir una influencia antrópica.

El hierro es el elemento que más veces supera la norma a medida que se avanza por la cuenca, partiendo en 2-3 veces la norma y alcanzando las 12 (SERNAGEOMIN, 2012).

Cuando se compara con el caso de la Norma de agua para riego se observa que en todos los sectores se superan los 4 mismos elementos (SO_4 , Li, Cl-, B), adicionalmente el Mo sobrepasa la norma en casi todos los sectores menos en el sector 5, donde el elemento que supera la norma es el mercurio. Sin embargo, en el sector 6 se transgrede la norma en 10 elementos (SERNAGEOMIN, 2012).

Aguas Superficiales

En la clasificación de estas aguas se utilizarán los datos obtenidos por el SERNAGEOMIN, que se extrajeron de 25 estaciones de monitoreo que obtuvieron mediciones tanto en el periodo de invierno como en verano, estas estaciones se encuentran distribuidas en toda la cuenca del río Copiapó.

Diagramas Piper

Las aguas se pueden clasificar como sulfatadas cálcicas en la gran mayoría de las estaciones, no se observan cambios dependientes de la época del año en las que se realicen las mediciones, pero si es posible distinguir tendencias asociadas a los ríos afluentes y al río Copiapó. En las imágenes 4.16 Y 4.17 Se presentan los diagramas para cada época del año. (SERNAGEOMIN, 2012)

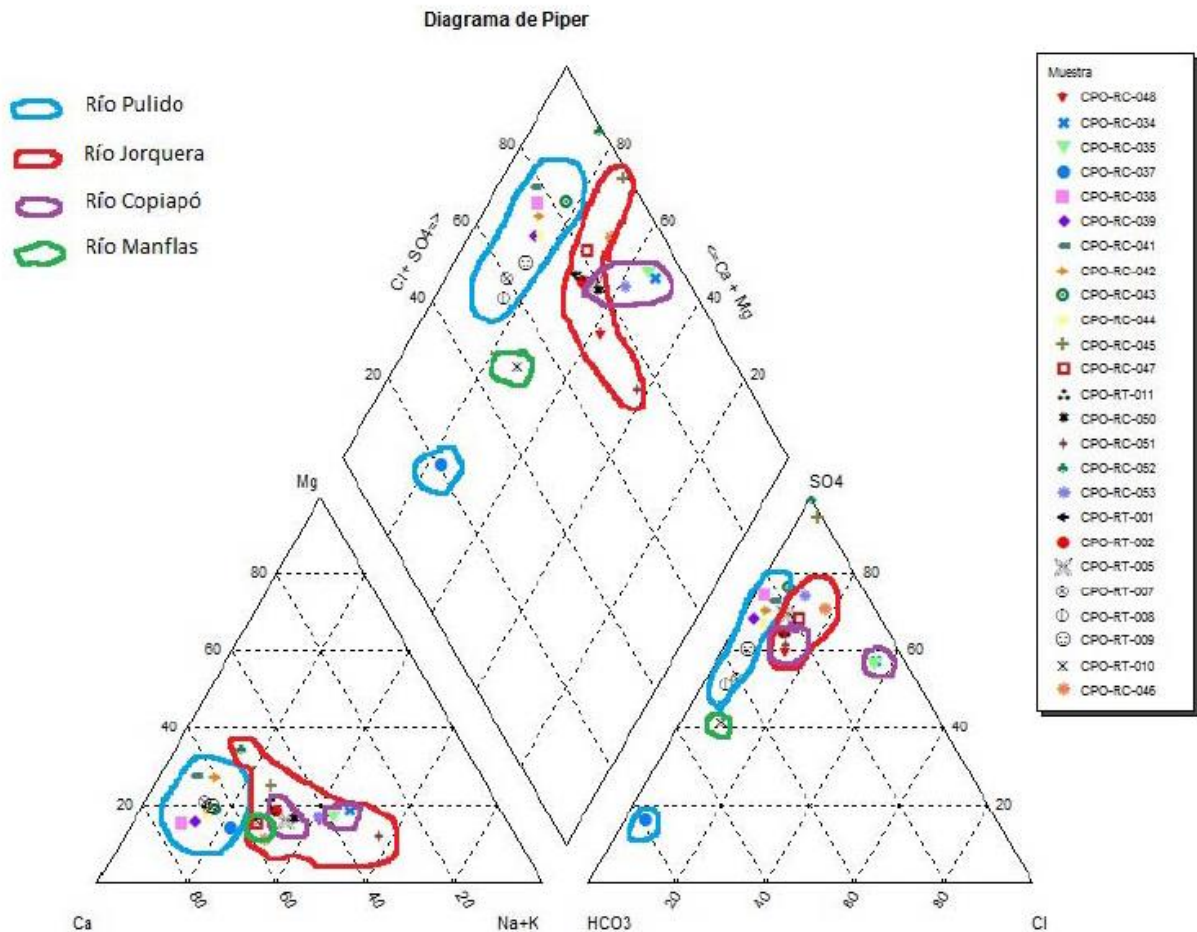


Figura 4. 16 Diagrama Piper verano, extraído SERNAGEOMIN (2012)

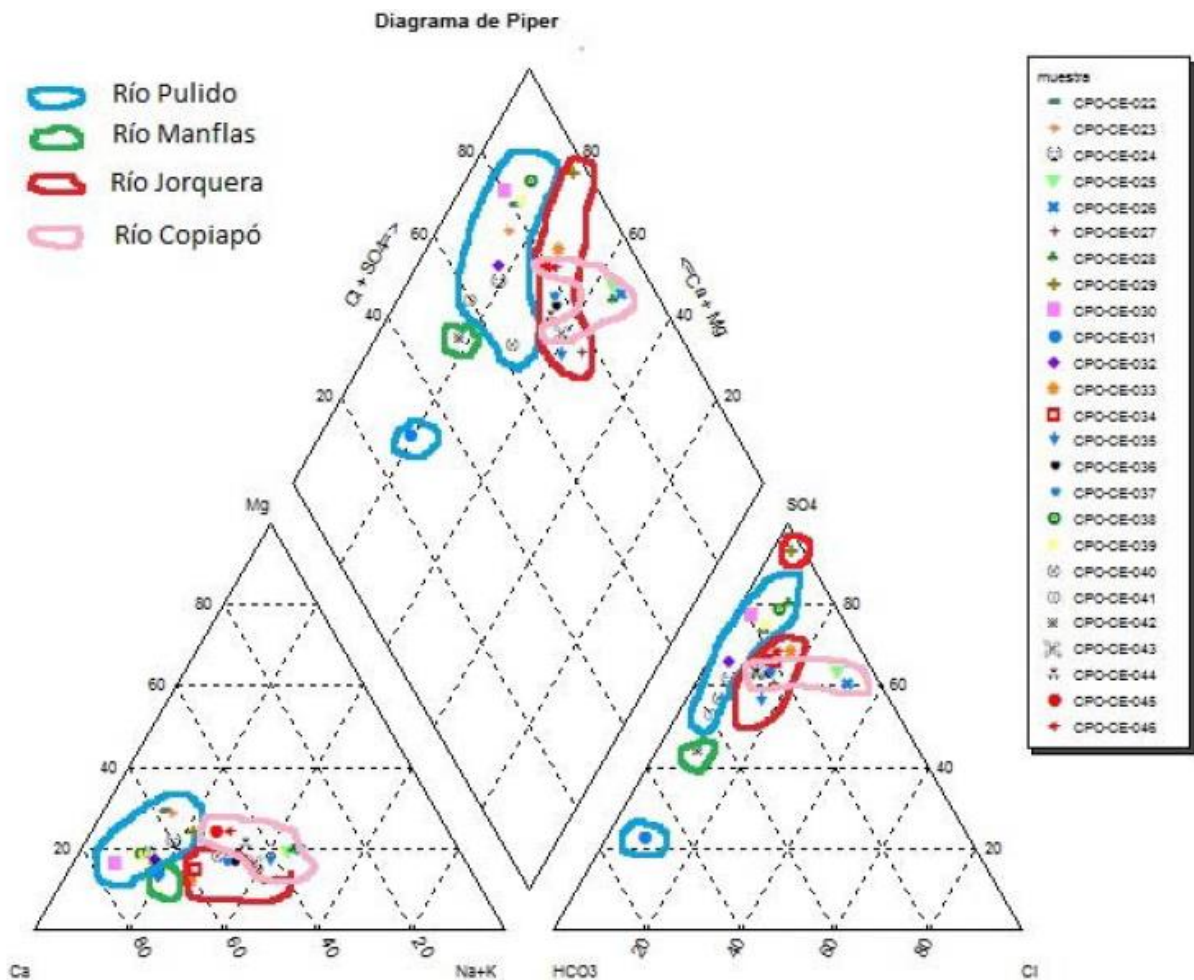


Figura 4. 17 Diagrama Piper invierno, extraído SERNAGEOMIN (2012)

Las mediciones realizadas en el río Pulido se encuentran justo entre las muestras de sus afluentes (ríos Montosa, Chacay y Ramadillas) lo que permite distinguir un proceso de mezcla de aguas, las muestras del Montosa presentan un mayor contenido de bicarbonatos mientras que las de los ríos Chacay y Ramadillas son las que presentan un mayor contenido de sulfatos (SERNAGEOMIN, 2012).

Para los ríos Manflas y Jorquera se puede decir que todas las aguas son sulfatadas cálcicas, tanto para sus afluentes y sin importar la estacionalidad. (SERNAGEOMIN, 2012)

Finalmente, para el río Copiapó es posible distinguir el aumento de sulfatos aguas abajo sin importar la época del año y que las mediciones realizadas en la parte baja de éste presentan una disminución del calcio y un aumento de sodio y potasio (SERNAGEOMIN, 2012).

Diagrama de Stiff

Las aguas del río Jorquera son del tipo dulces mineralizadas o moderadamente salobre, aumenta el número de iones presentes aguas abajo con un predominio del calcio y sulfato. Solo se puede hacer una comparación básica con el agua subterránea presente en este sector, ya que solo se tiene una muestra, y es que el agua subterránea presenta una mayor concentración de iones, es una agua salobre, aunque se encuentra próxima al límite de agua dulce mineralizada que es el agua presente en superficie (SERNAGEOMIN, 2012).

En el caso del río Pulido las aguas son del tipo dulce moderadamente mineralizada, si la comparamos con el agua subterránea existente en la zona podemos observar que se trata el mismo tipo de agua lo que permitiría inferir una correlación entre ambas aguas. Una situación similar ocurre en el río Manflas, la estación para monitorear el agua superficial se encuentra aguas arriba de los pozos donde se tomaron las muestras de agua subterránea e igualmente se puede observar una correlación entre ambas ya que ambas presentan el mismo tipo de agua, dulce moderadamente mineralizada, y similar iones dominantes (SERNAGEOMIN, 2012).

Finalmente para el río Copiapó, cuando este nace en la confluencia de los ríos mencionados anteriormente, el tipo de agua es dulce mineralizada o moderadamente salobre. Este tipo de agua se mantiene por los primeros 3 sectores (de la división propuesta por la DGA para el acuífero), en los sectores 4 y 5 no es posible obtener muestras para evaluar, porque el río se encuentra sin agua, y finalmente aguas saladas en el sector 6. Este comportamiento es similar a lo ocurrido en las aguas subterráneas en donde van mineralizándose aguas abajo, solo que en este caso no es posible observar la transición a aguas salobres (SERNAGEOMIN, 2012).

Calidad del Agua

Se utilizara la misma metodología que lo realizado para las aguas subterráneas, las normas se compararan con 24 muestras, ya que solo se utilizaran las muestras tomadas en verano. Los resultados expresados son solo referenciales ya que no se cumplieron a cabalidad los estándares establecidos por las normas para el muestreo de aguas (SERNAGEOMIN, 2012).

Agua potable

En el sector 1 se transgrede la norma en las concentraciones de Mn, mientras para el sector 2 se presentan elevadas concentraciones de Fe, Mn, y SO_4 , en el caso del sector 3 se observan altos valores en As. En el sector 4 y 5 no existe agua superficial por lo que no existen mediciones, en el sector 6 se sobrepasa la norma en TDS, Cl-, Fe y SO_4^{-2} , siendo los valores más altos si lo comparamos con las demás muestras. Finalmente en la subcuenca del río Ramadillas se sobrepasa la norma en las concentraciones de Mn y para las subcuencas de los ríos Pulidos y Jorquera la norma

se transgrede en las concentraciones de As, que son las más altas presentes en la cuenca (SERNAGEOMIN, 2012).

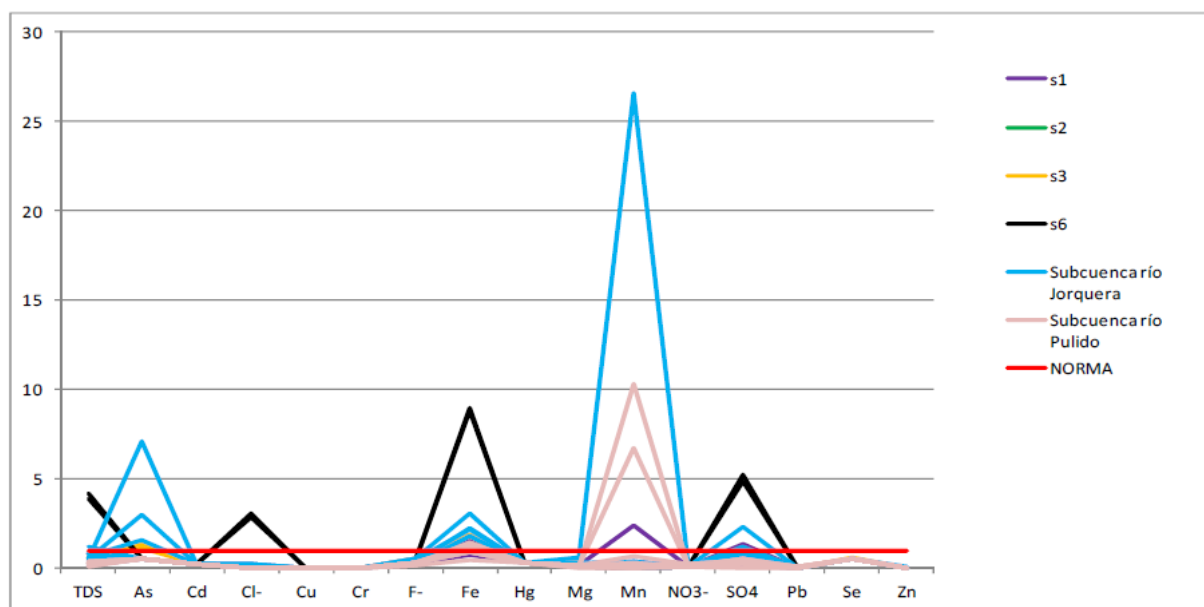


Figura 4. 18 Comparación de los valores de la muestra con la norma para agua potable, extraída SERNAGEOMIN (2012)

Agua para Riego

Para esta norma el sector 6 transgrede la norma en TDS, B, Cl y Li

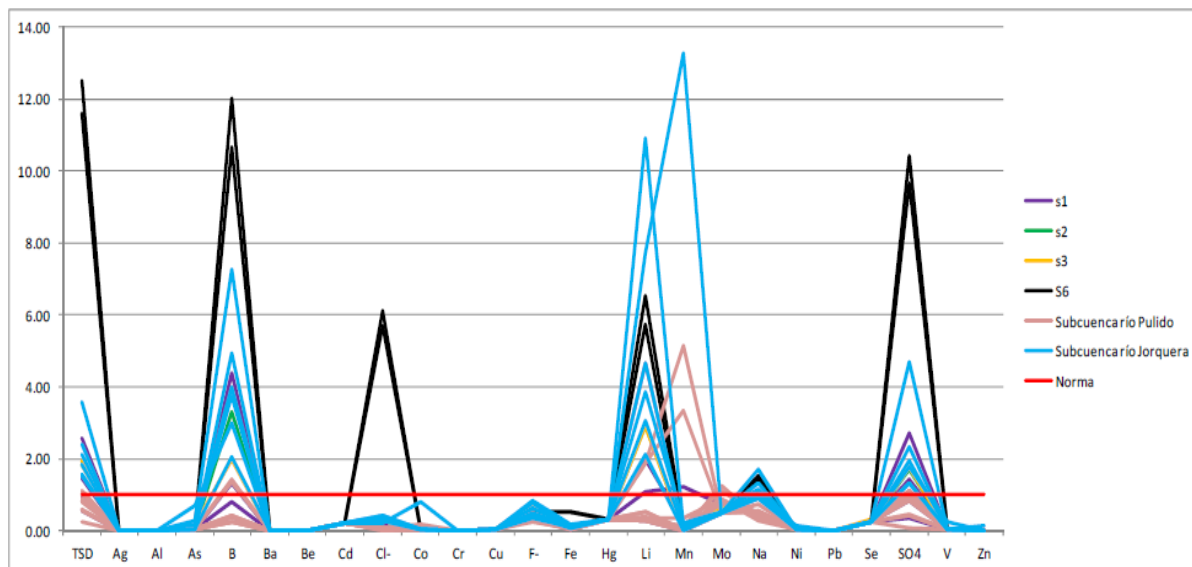


Figura 4. 19 Comparación de los valores de la muestra con la norma para riego, extraída SERNAGEOMIN (2012)

5 MODELOS

Modelo base

El modelo hidrogeológico de Copiapó actualizado por la DGA posee dos modelos numéricos independientes, Sector Alto y Sector bajo, el primero incluye a los sectores 1 y 2 del acuífero mientras el segundo está asociado a los sectores del 3 al 6. (DGA,2013)

La geometría de planta de ambos modelos define el acuífero sedimentario por el contacto roca-relleno, la grilla implementada es de 200m x 200m, las figuras 5.1 y 5.2 se muestra la geometría para cada sector. Está actualización mejora la representación del basamento rocoso en los modelos, acercando lo modelado a la información interpretada desde las estaciones geofísicas, Las figuras 5.3 y 5.4 muestran estas mejoras. (DGA,2013)

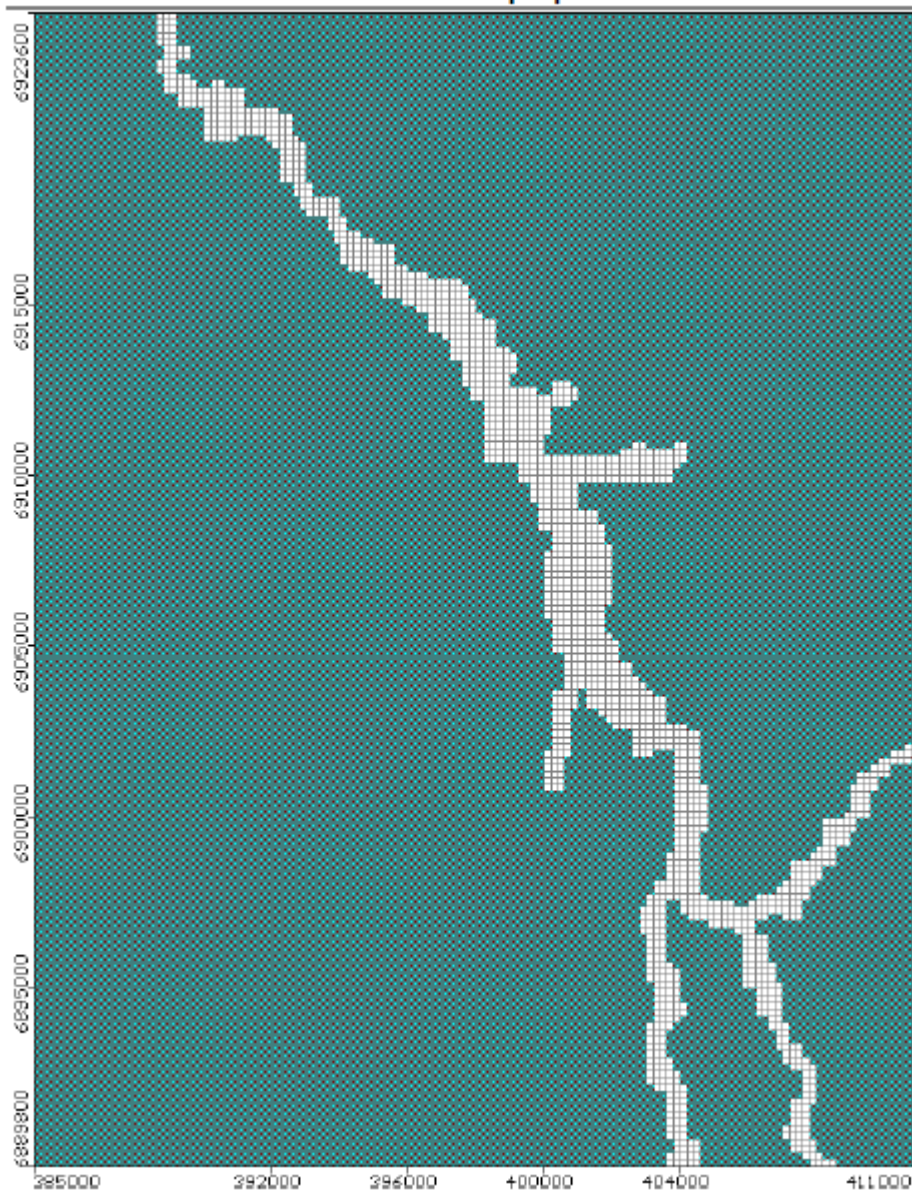


Figura 5. 1 Geometría planta modelo alto, extraído DGA (2013)

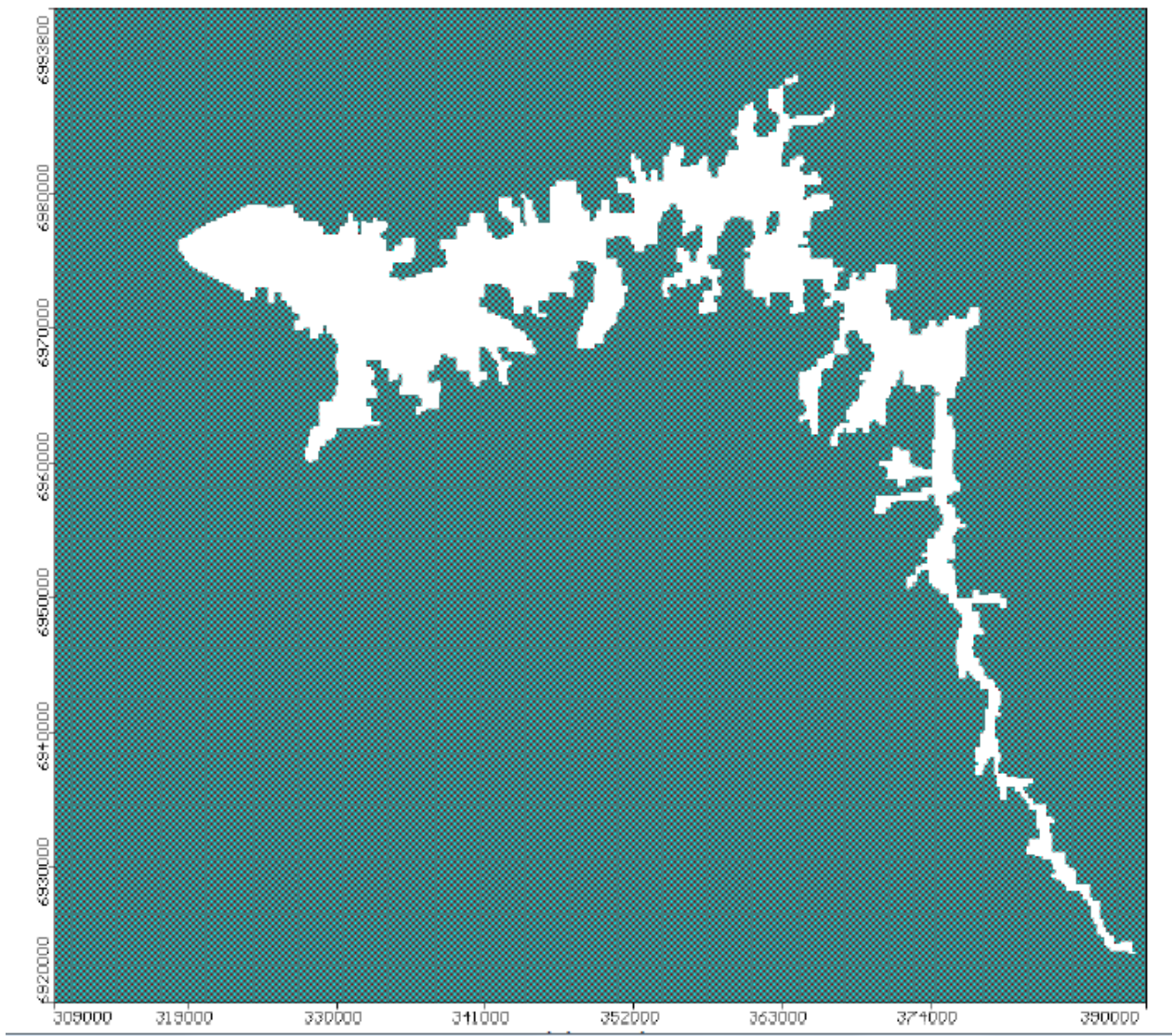


Figura 5. 2 Geometría plantra modelo bajo, DGA (2013)

Es importante resaltar que para la representación del basamento rocoso se ha considerado un espesor mínimo de relleno de 100m, esto para no generar problemas numéricos asociados a secado de celdas. (DGA, 2013)

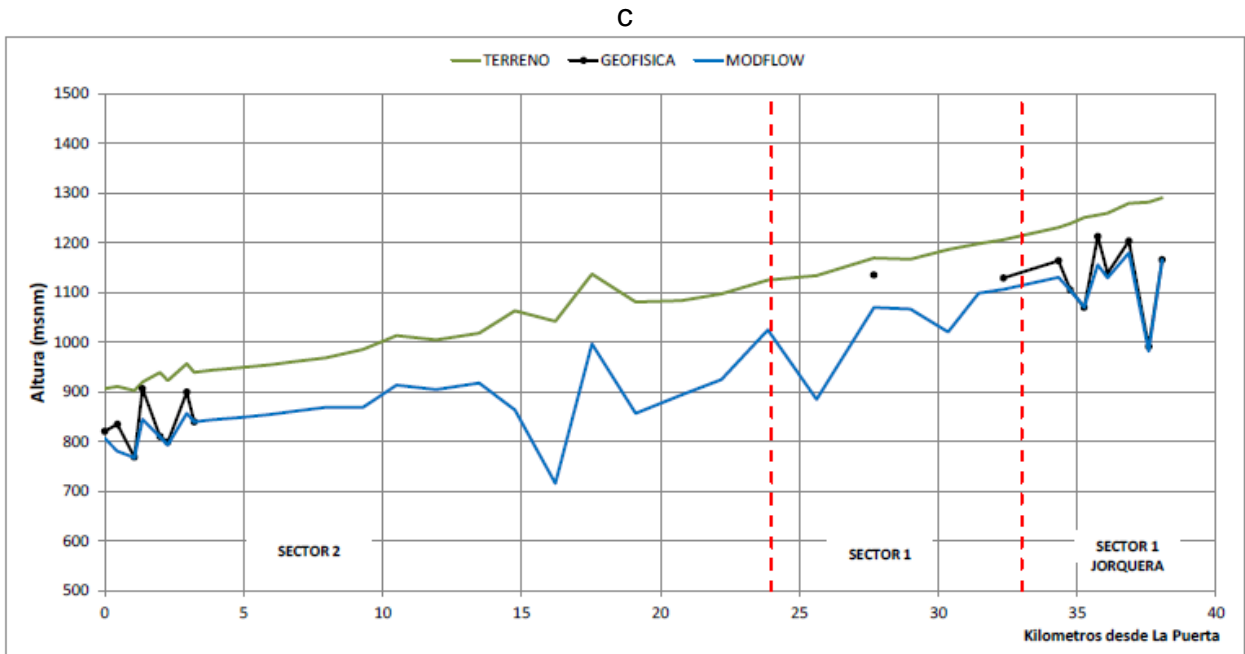


Figura 5. 3 Perfil modelo alto, DGA (2013)

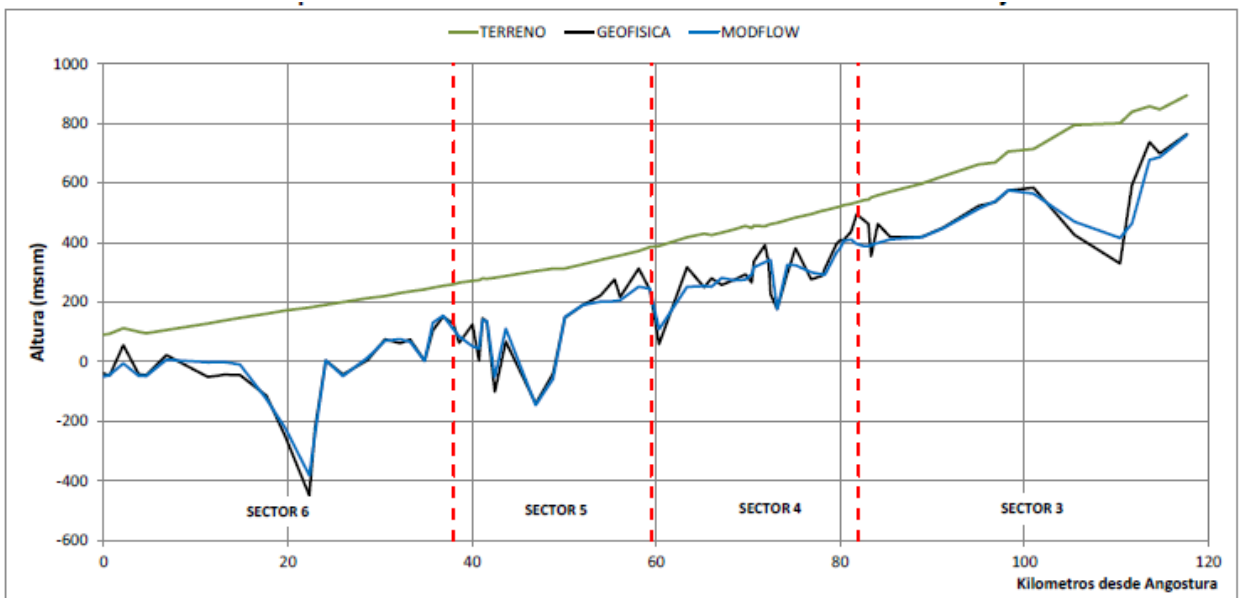


Figura 5. 4 Perfil modelo Bajo, DGA (2013)

Las condiciones de borde no fueron actualizadas y se conservan las fijadas en el modelo realizado por el SERNAGEOMIN el año 2012, estas son las siguientes: Para el sector alto se consideran niveles conocidos en la cabecera de los tres afluentes del río Copiapó; Pulido, Jorquera y Manflas. Otra condición impuesta para ambos sectores es una condición de drenaje en el eje del cauce que permita representar los afloramientos del sistema en los lugares en donde el nivel freático se encuentre somero. Situación que ocurre en el sector 2 en la localidad de los Loros, aguas arriba de la estación

pluviométrica en la Puerta y aguas abajo de la localidad de Piedra Colgada hasta la zona de angostura. (DGA, 2013)

Por su parte el modelo fue nuevamente calibrado utilizando datos entre el periodo 1993 y 2012, en ambos sectores la calibración obtenida es de buena calidad, logrando un error RMS normalizado muy inferior a 5%, que es el valor considerado válido para representar el gradiente hidráulico regional del acuífero. (DGA, 2013) Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la calibración.

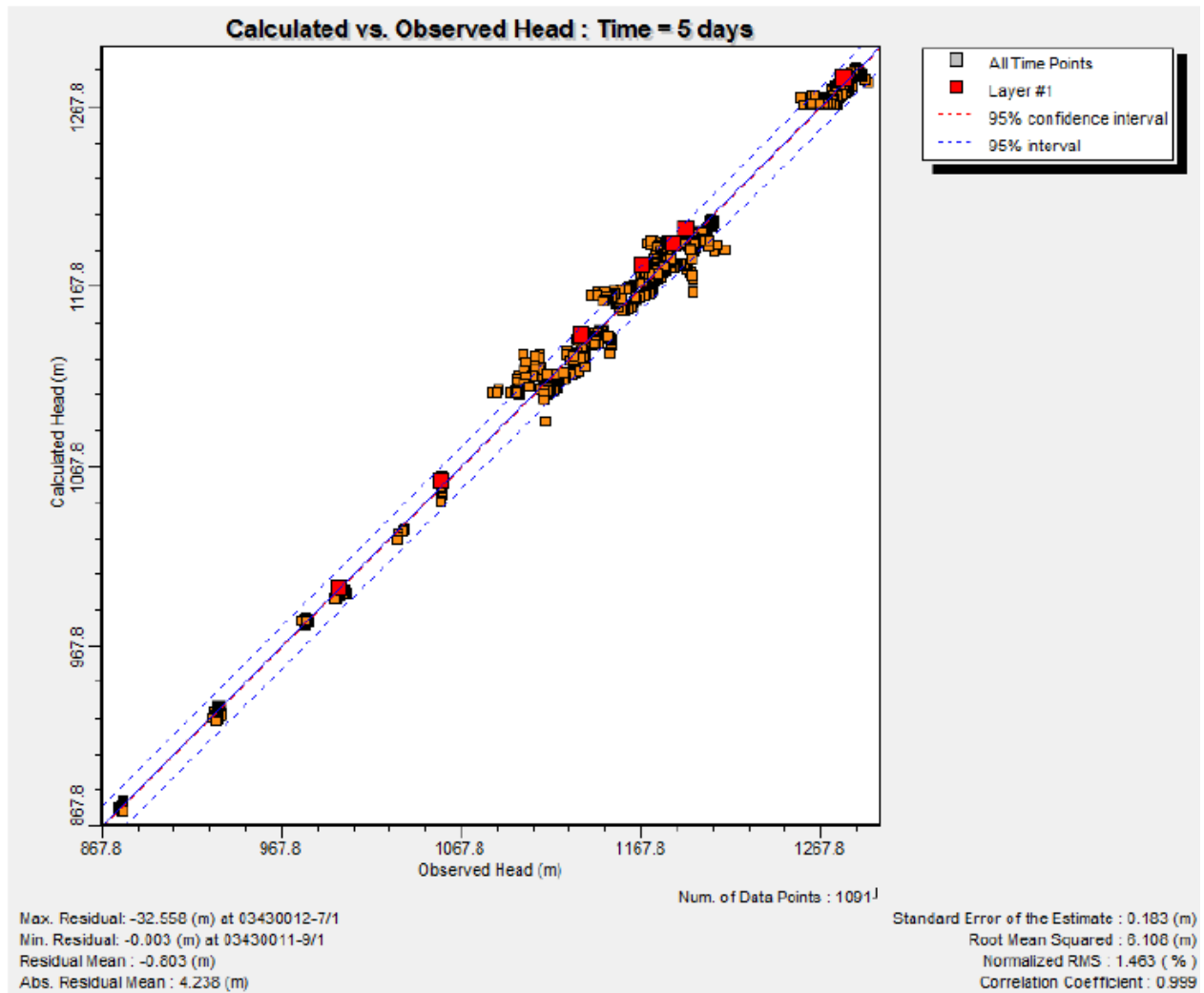


Figura 5. 5 Calibración-validación modelo alto, DGA (2013)

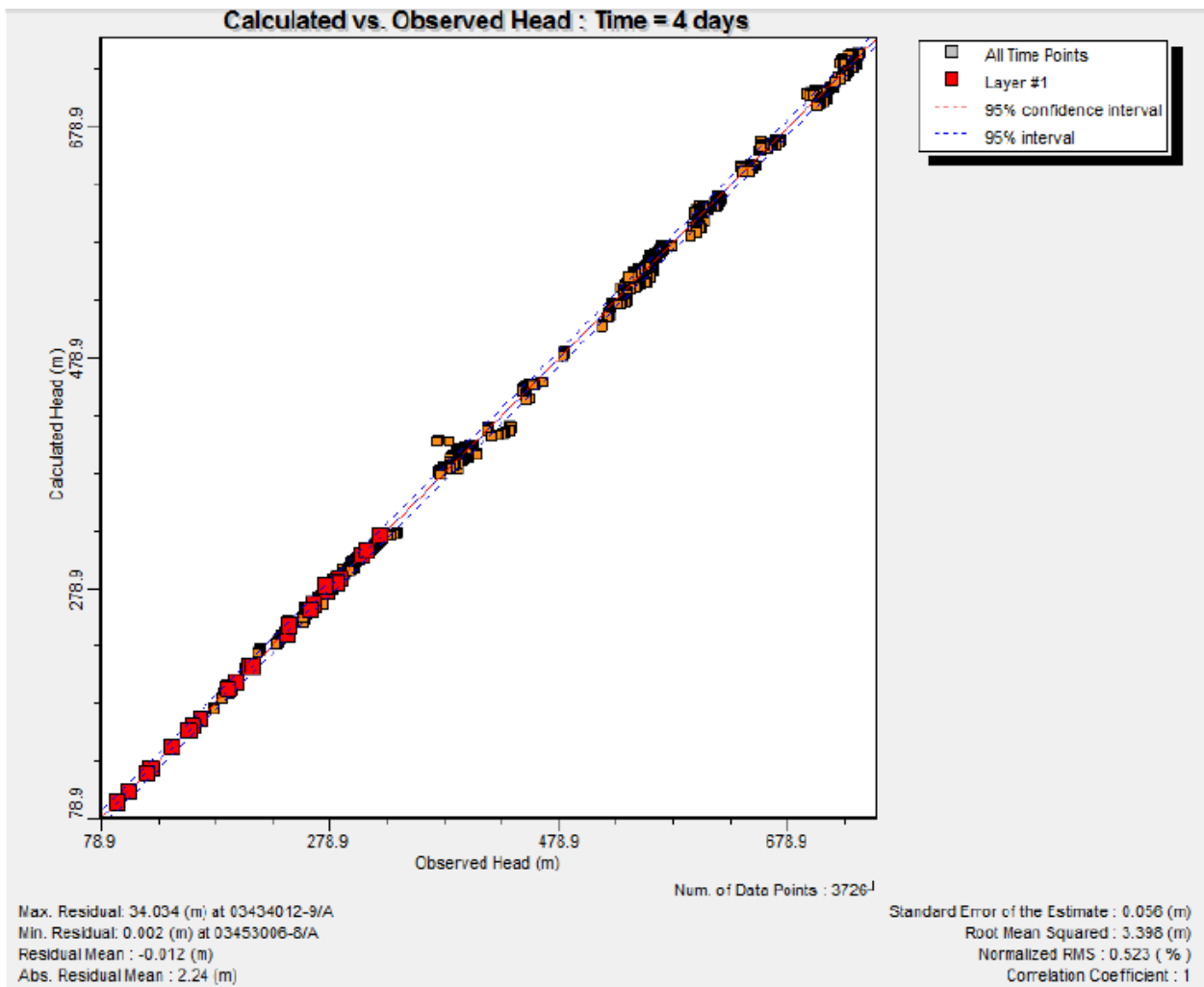


Figura 5. 6 Calibración-validación modelo bajo, DGA (2013)

Al comparar los niveles de agua subterránea simulados con los observados en distintos pozos, se observa que se han representado de buena manera los niveles para todo el acuífero. (DGA, 2013) Las figuras de 5.7 al 5.11 muestran la situación en un pozo por sector.

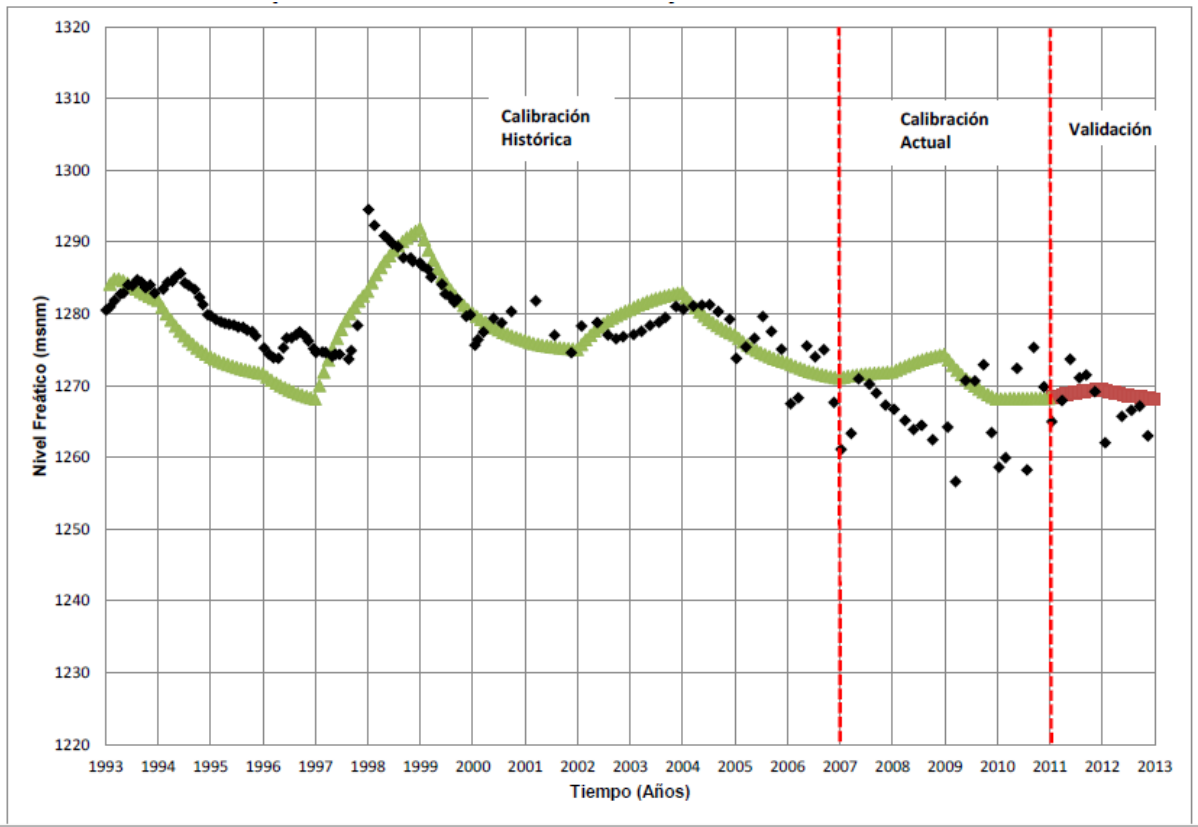


Figura 5.7 Comparación niveles sector 1, DGA (2013)

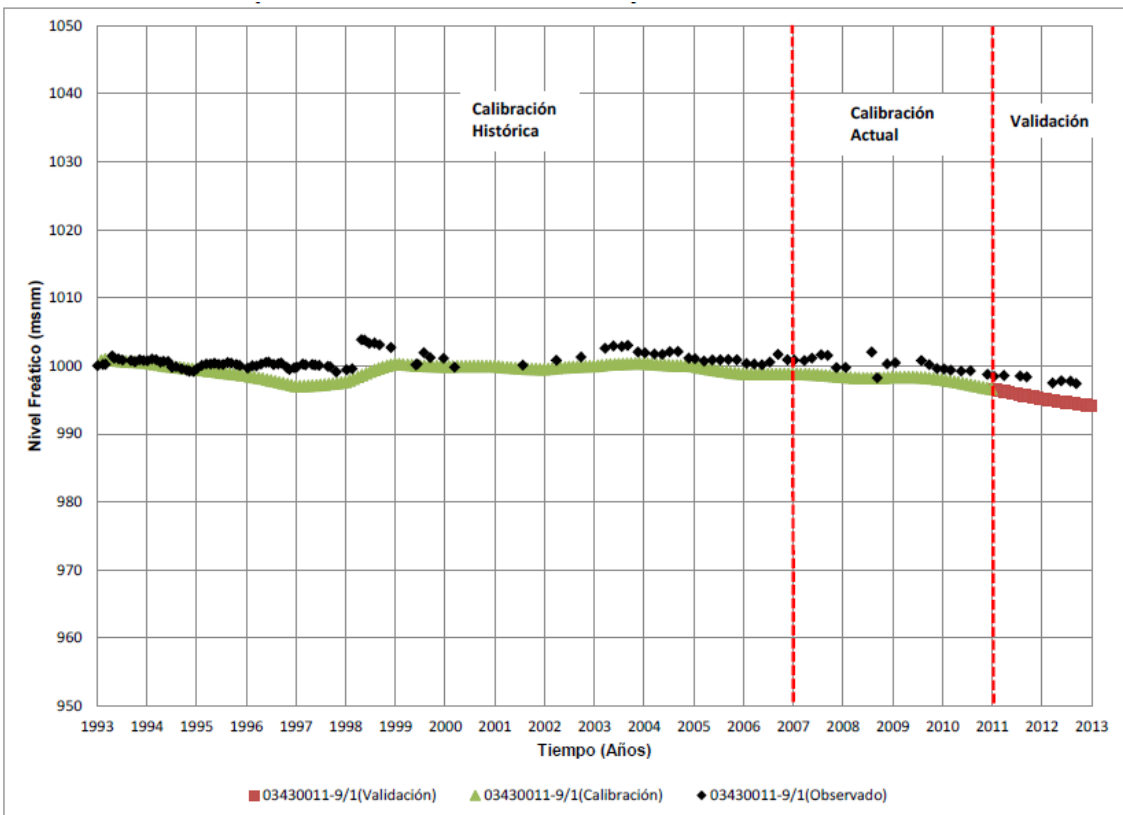


Figura 5. 8 Comparación niveles sector 2, DGA (2013)

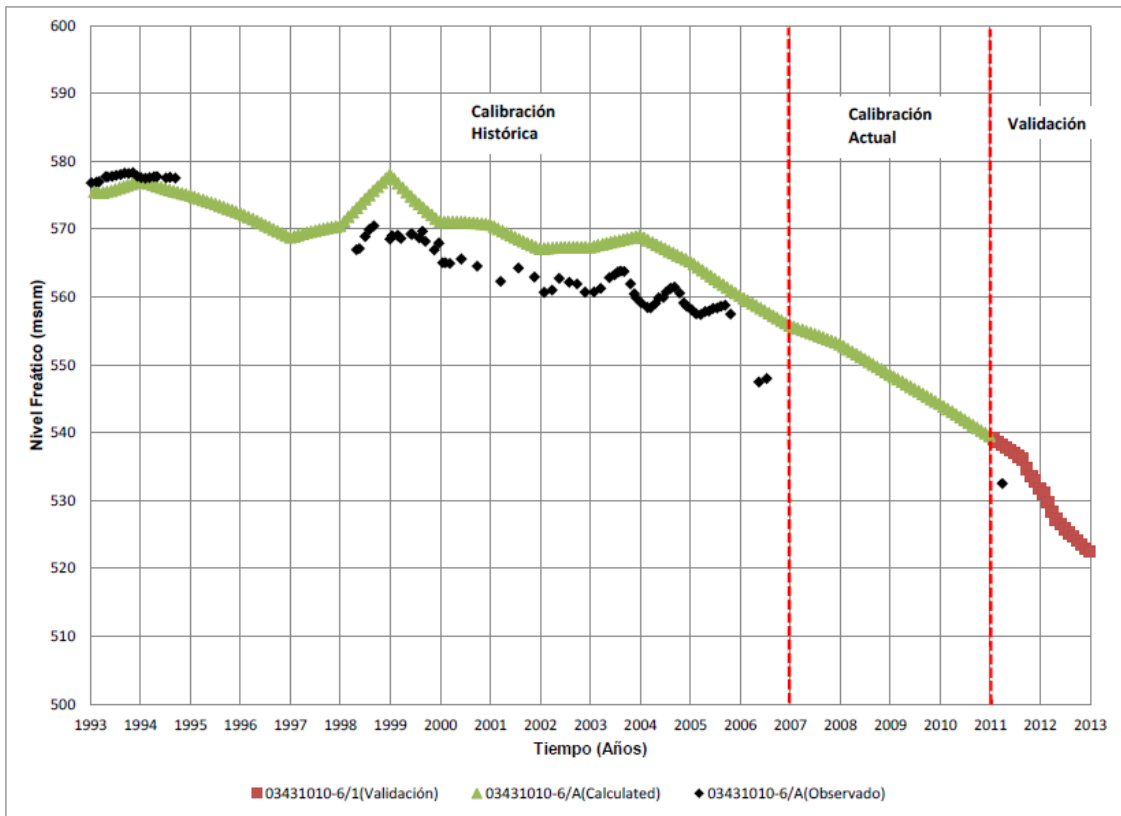


Figura 5. 9 Comparación niveles sector 3, DGA (2013)

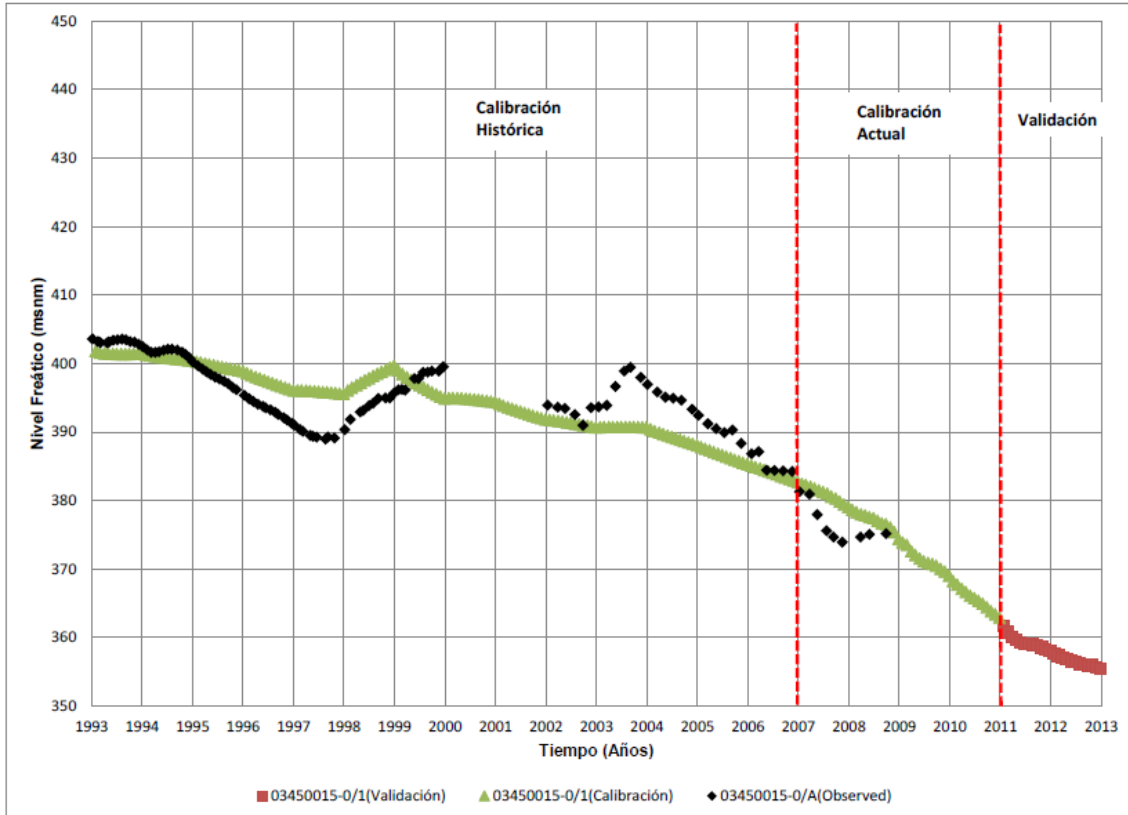


Figura 5. 10 Comparación niveles sector 4, DGA (2013)

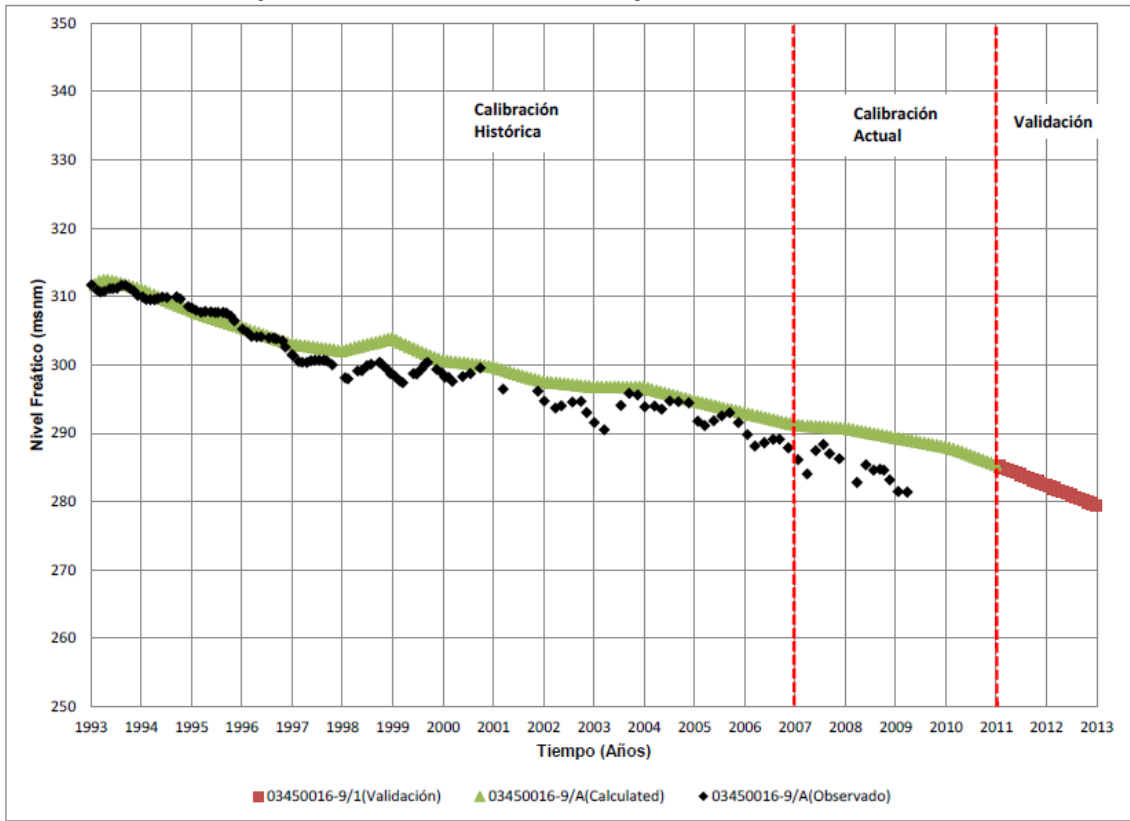


Figura 5. 11 Comparación niveles sector 5, DGA (2013)

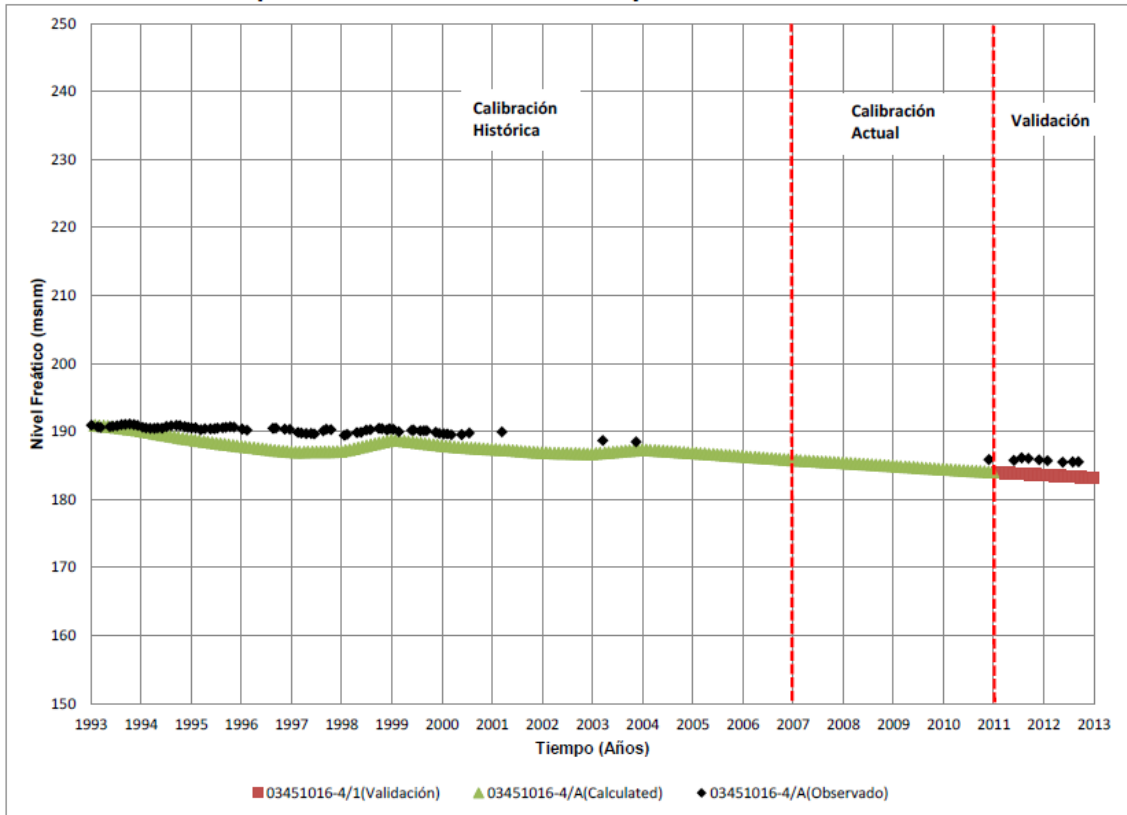


Figura 5. 12 Comparación niveles sector 6, DGA (2013)

De esta información se extrae que el mejor lugar para realizar las modificaciones y así poder comparar la utilización del lecho con otro método de recarga es en el modelo bajo del acuífero, debido a que los sectores 3,4 y 5 presentan un nivel estático más profundo, buena permeabilidad y además en la última parte del sector 2 se presenta un afloramiento de agua. Al realizar las modificaciones en el sector 3 del modelo se espera lograr una recuperación mayor a lo largo de la cuenca, ya que la dinámica interna del acuífero lo permitiría. (DGA, 2013)

En el informe del SERNAGEOMIN se menciona que para evitar que siga descendiendo el nivel de agua en el acuífero sería necesario contar con un caudal de agua cercano a los $1,7m^3/s$. Se estudiara la recuperación del acuífero ingresando un caudal de $2 m^3/s$, estos nuevos ingresos de agua se obtendrán a partir de una planta desalinizadora ubicada en las cercanías de la desembocadura del río y su transporte se realizará a través de tuberías hasta el sector de la puerta.

Desalinización de agua

El proceso de desalinizar agua de mar divide esta en dos fluidos, agua fresca con una baja concentración de sal y una salmuera concentrada. Para llevar a cabo este proceso es necesario energía y diferentes tecnologías para separarlos. (A. Khawaji et al, 2008)

El incremento de la capacidad global de las plantas desalinizadoras ha sido notorio. En 1980 la capacidad total era de solo 5 millones de $m^3/día$ mientras que en 2008 era de 52,8 millones de $m^3/día$, incluso en la última década este aumento ha sido mayor, ya que en 2013 se estimaba una capacidad total de 85,9 millones de $m^3/día$. (S. Miller et al, 2015) Lo cual es un reflejo del aumento de demanda de agua y la necesidad de recurrir a nuevas tecnologías en varios lugares del mundo.

Existen diferentes tecnologías que han ido apareciendo en las ultimas décadas, aunque existen tres tecnologías que son las más utilizadas en el mundo. Las de Osmosis Inversa (RO, por sus siglas en ingles), las de destilación súbita multi-etapas (MSF, por sus siglas en ingles) y las de destilación Multi-Efecto (MED, por sus siglas en ingles), las cuales para 2013 representaban respectivamente el 65%, 22% y 8% de la capacidad para desalinizar a nivel mundial. (S. Miller et al, 2015).

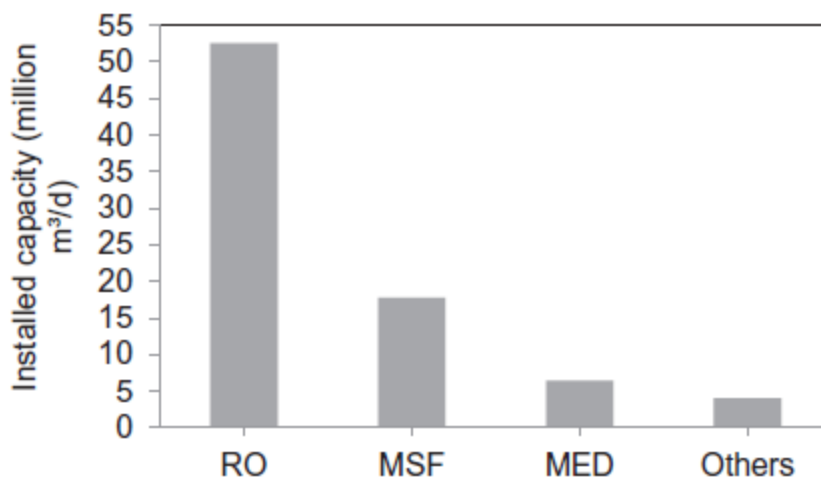


Figura 5. 133 Capacidad total mundial instalada de desalinización por tecnología, extraído de S.Miller et al (2015)

Costos Asociados

En este trabajo se considera que para poder generar una recuperación real en el acuífero será necesario como mínimo hacer circular en el sistema $2 \text{ m}^3/\text{s}$, por ende se utilizara este volumen de agua para desarrollar los costos derivados de la planta desalinizadora y de su transporte hasta el sector de La Puerta.

La capacidad de producción requerida es de $172.800 \text{ m}^3/\text{día}$, actualmente existen solo dos tipos de plantas desalinizadoras que son capaces de alcanzar este rendimiento, estas son: las de evaporación instantánea multietapa y la de osmosis inversa (MSF y RO por sus siglas en ingles). (Khawaji, A et al, 2008; Kim, Y, 2009) En la tabla 5.1 se muestra un cuadro comparativo entre ambas.

Característica	MSF	RO
Consumo de energía eléctrica (kWh/m ³)	3,5-4,0	2,4-4,5
Costo de instalación	Alto	Medio
capacidad de producción (m ³ /día)	alta>50.000	alta>50.000
Posibilidad de ampliación	Difícil	Fácil
Calidad agua desalada (ppm)	alta<50	media 300-500
Superficie de terreno requerida	Mucha	Poca

Tabla 5. 1 Comparación entre ambos tipos de planta, modificado de Montaña (2011)

Tomando en consideración que el principal costo asociado a desalinizar es el consumo eléctrico se decidió seguir la evaluación de costos asumiendo una planta de osmosis inversa, adicionalmente estas plantas permiten una ampliación en caso de que la demanda por agua desalinizada sea mayor en un futuro. Según el estudio realizado por Montaño el costo por m^3 para este tipo de plantas varía entre 0,28 y 0.61 euros, el detalle de estos costos se observa en la tabla 5.2, sin embargo I.C. Karagiannis, P.G. Soldatos proponen que para una planta de estas dimensiones el costo por m^3 sería entre 0.36 y 0.53 euros.

Partida	Costo €/m³
Energía	0,21-0,33
Personal y mantenimiento	0,04-0,19
aditivos químicos	0,01-0,06
reposición de membranas	0,02-0,04
Total	0,28-0,61

Tabla 5. 2 Calculo de costos para plantas RO, extraída de Montaño (2011)

Otro costo asociado con la desalinización será la necesidad de transportar el agua generada hasta el punto en donde la utilizaremos, en este caso se tiene que tener en consideración dos variables, la distancia en “horizontal” y la diferencia de elevación desde el punto de origen y el de entrega. Ambas variables tienen costos distintos, siendo estimado en 0,16 dólares el costo cada 100 km en horizontal y 0,052 dólares cada 100 metros de elevación. (Montaño, 2011)

Siendo conservadores en el costo tal de desalinizar se estima que su valor por m^3 será de 0.60 euros, que son 0.66 dólares aproximadamente. Si consideramos que siguiendo el cauce del río la distancia entre la planta y el sector La Puerta será de 130 km y la diferencia de altura es 890 metros, el costo por transporte será aproximadamente de 0.67 dólares aproximadamente. Finalmente el costo total por m^3 será de 1.33 dólares aproximadamente.

Para analizar la recuperación se utilizara el modelo actualizado por la DGA como situación base de la cuenca y mediante cambios realizados a la modelación en MODFLOW se obtienen dos escenarios extras.

Escenario Lecho de río

Considerando que durante la última década la condición habitual es encontrar los sectores 4 y 5 sin transporte de agua, este escenario busca aprovechar esta condición y hacer circular el caudal generado a través del lecho, se realizan modificaciones a las condiciones de borde impuestas en el modelo base, sector bajo.

Este escenario agrega una condición de borde que es el ingreso de 2 m³/s de agua desalinizada en la primera celda del sector 3. El escenario base utiliza celdas tipo "Drain" que representan una condición de drenaje en el centro del cauce, este tipo de celda es eficiente para modelar de buena manera cuando el acuífero recarga el río pero no funciona de manera similar cuando se desea representar la recarga del río al acuífero. Por este motivo se reemplazaron todas las celdas tipo "Drain" por celdas tipo "Stream" que permiten realizar un mejor modelamiento numéricos para ambos procesos.

Las celdas "Stream" se ingresan por tramo, a la celda inicial y final de cada tramo se le ingresan los siguientes datos: el tiempo en el cual se encuentran activas, 7300 días en el caso de este modelo, la altura del nivel de agua y del fondo del río con respecto al nivel del mar, el ancho estimado, el índice de rugosidad, permeabilidad en z, caudal estimado y la conductividad la extrae del mismo modelo.

Escenario de pozos

Otra alternativa es utilizar pozos para realizar una infiltración profunda en el acuífero, estos pozos se ubicaran en el curso del río, específicamente en el sector 3 de la división de la DGA, espaciados cada 300 metros, figura 5.14. Estos deben ser de 60 metros de profundidad, habilitados a 12" y con cribas a partir de los 35 metros de profundidad y permitirían una infiltración en el acuífero de 41l/s, este valor se obtiene a partir del método de Lefranc que se muestra en la ecuación 5.1:

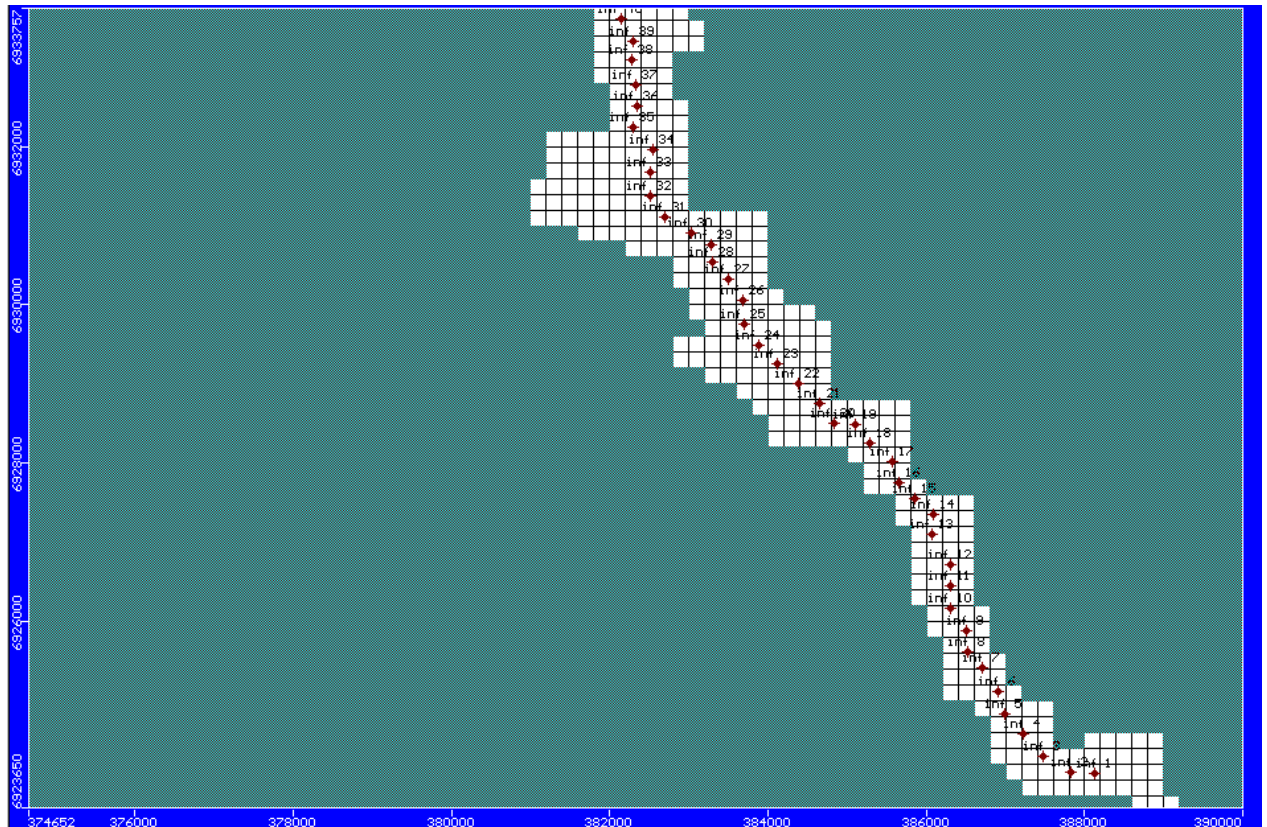


Figura 5. 144 Distribución de los pozos, elaboración propia.

Ecuación 5.1: Método de Lefranc, permite calcular el caudal a partir de un factor de forma, la conductividad hidráulica y la altura de la columna de agua.

$$Q = k * C * hm$$

Dónde:

- Q: Caudal inyectado ($m^3/día$)
- k: Conductividad hidráulica (m/día)
- C: Factor de forma (m)
- hm: Altura del agua sobre el nivel estático (m)

El Factor de forma (C), para pozos en donde el largo del pozo es muy mayor al diámetro ($L \gg d$) se calcula a partir de la ecuación 5.2:

Ecuación 5.2: Calculo de factor de forma (C) cuando el diametro del pozo es considerablemente menor que el largo de la zona filtrante del mismo

$$C = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{2L}{d}\right)}$$

Dónde:

- L: Longitud de la zona filtrante (m)
- D: diámetro del pozo (m)

Los pozos se alimentaran directamente desde el río a través de una bomba portátil ubicada a un costado de éste, si bien en el sector no existen excedentes de los cuales captar agua esta se obtendría de la misma fuente que el anterior método. Antes de ingresar al pozo como tal el agua pasara por un tratamiento de filtrado para evitar el ingreso de solidos que puedan colmatar el mismo.

Dentro del proceso de habilitación de los pozos será necesario la construcción de una caseta metálica con puerta que contendrá la bomba, el filtro, combustible y otros elementos necesarios, así se le otorgara un resguardo a estos implementos.

El número total de pozos a construir será de 40, cada uno tendrá una capacidad de infiltración cercana a los 41 l/s lo que totalizaría unos 1968 l/s que ingresarían al sistema en el sector 3.

Adicional al costo de desalinizar agua y su posterior transporte la alternativa de pozos tiene que considerar la construcción de los pozos y su funcionamiento, en la tabla 5.3 se detallan estos.

Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
A. Instalación y levante de faenas					1.200.000
1	Instalación y levante de faenas	gl	1	1.200.000	1.200.000
B. Construcción del pozo					27.477.000
2	Perforación D min = 16"	M	60	280.000	16.800.000
3	Entubación cañería acero D = 12", e = 6,3 mm	M	40	80.000	3.200.000
4	Cribas acero al carbono, Slot 40, D = 12"	M	20	220.000	4.400.000
5	Suministro y colocación de filtro granular	M	60	46.700	2.802.000
6	Sello y brocal de hormigón	gl	1	225.000	225.000
7	Tapa del pozo según plano de proyecto	gl	1	50.000	50.000
C. Obra de captación, filtro y caseta					5.000.000
8	Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	1	2.000.000	2.000.000
9	Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico	gl	1	3.000.000	3.000.000
D. Interrupción de faenas					960.000
10	Interrupción de faenas	hrs	24	40.000	960.000
E. Plano de construcción e informe final					300.000
11	Plano de construcción e informe final	gl	1	300.000	300.000
Subtotal por pozo					34.937.000
Gastos generales, imprevistos y utilidades (45%)					15.721.650
Total neto					50.658.650
I.V.A (19%)					9.625.144
TOTAL					60.283.794
Subtotal por el proyecto (40 pozos)					1.397.480.000
Gastos generales, imprevistos y utilidades (45%)					628.866.000
Total neto					2.026.346.000
I.V.A (19%)					385.005.740
TOTAL					2.411.351.740

Tabla 5. 3 Costos de construcción pozos, modificado DGA 2013-B.

Balances de Masas

El primer punto a comparar entre los distintos escenarios será el balance hídrico promedio del acuífero de cada escenario, cada balance será representado por un diagrama.

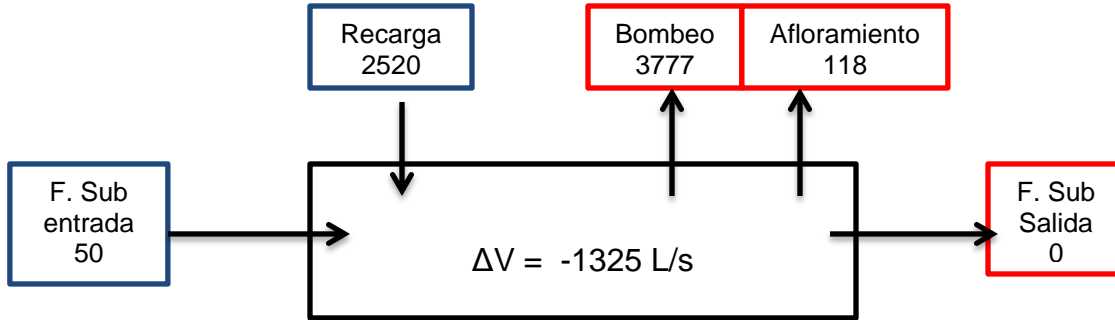


Diagrama 5. 1 Modelo Base, elaboración propia.

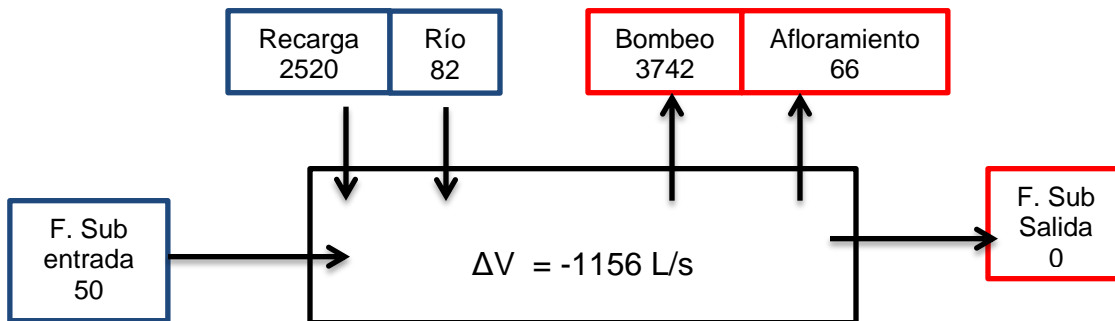


Diagrama 5. 2 Modelo Río, elaboración propia.

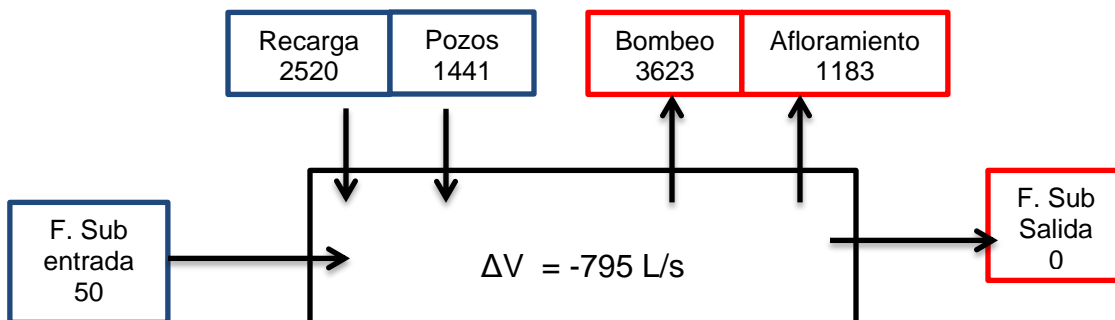


Diagrama 5.3 Modelo pozos, elaboración propia.

Si bien ningún escenario genera una recuperación efectiva del acuífero en ambos se observa una disminución en pérdida. Siendo el modelo de pozos el que presenta mayor disminución, un 40%, mientras el escenario que utiliza el lecho del río disminuye la pérdida en un 12.75%.

Recuperación Niveles Estáticos.

Para observar la recuperación de los niveles estáticos (NE) se utilizan pozos presentes en los tres modelos para los diferentes sectores del acuífero, los resultados se representaran en gráficos que incluirán el modelo Base, pozos, stream y los datos obtenidos mediante medición, según sea necesario.

Sector 3A

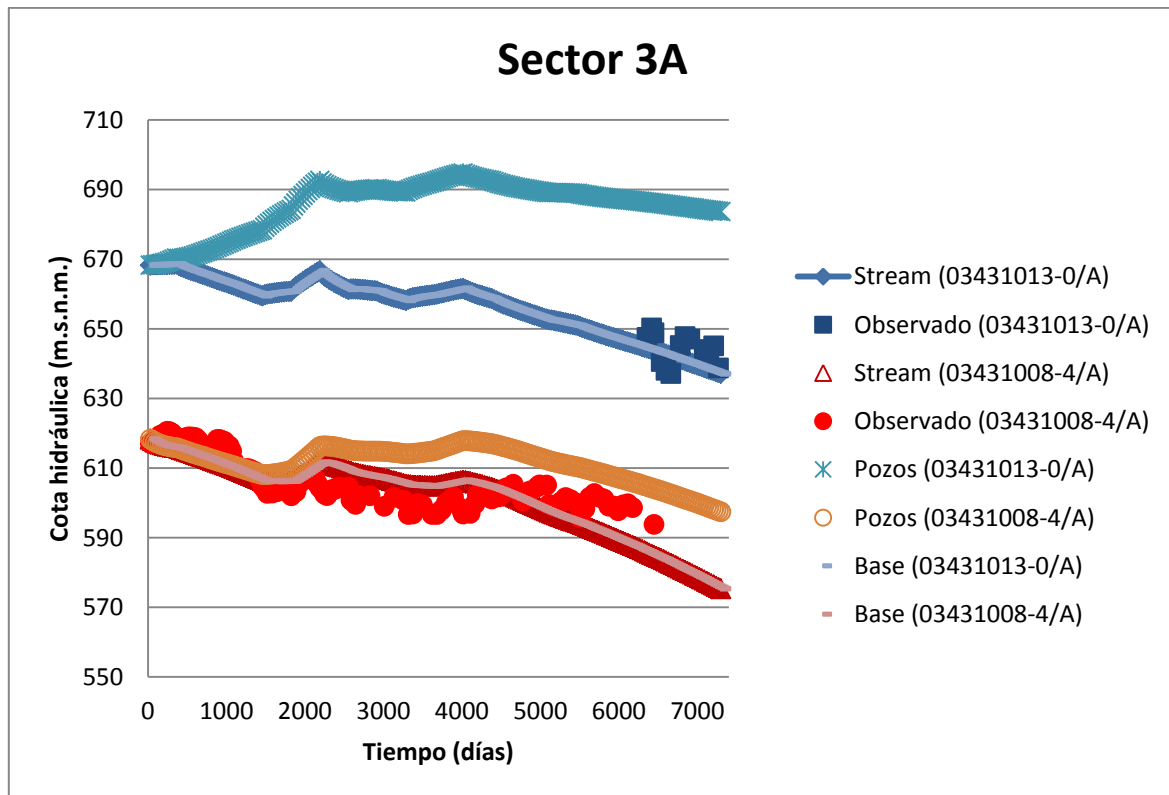


Figura 5. 15 Niveles estáticos sector 3A, elaboración propia.

En el sector se observa claramente que el modelo de pozos genera una recuperación en los NE, mientras que el modelo Stream mantiene los mismos niveles que el escenario base. Estos resultados eran esperables debido a que la recarga del modelo de pozos se realiza en este sector, lo que genera automáticamente una recuperación en los sectores cercanos.

Sector 3B

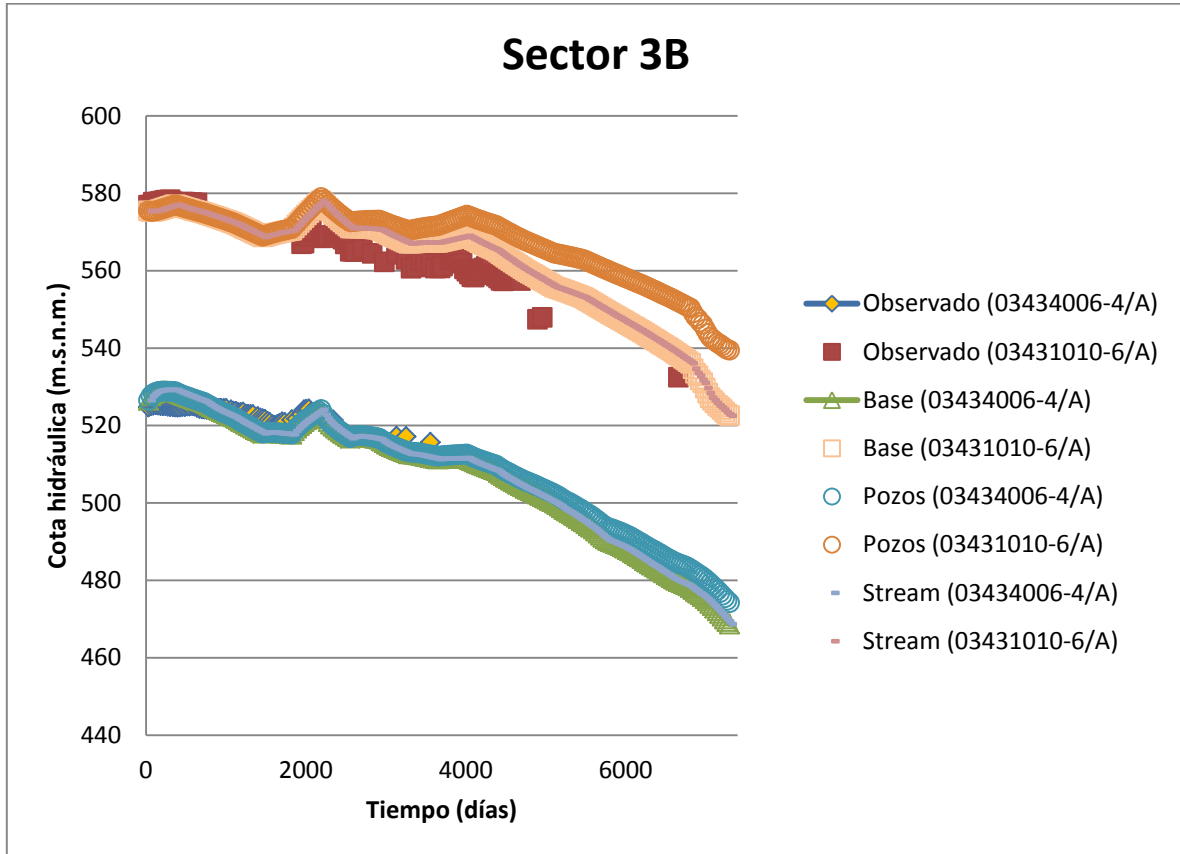


Figura 5. 16 Niveles estáticos sector 3B, elaboración propia.

En este sector los N.E. de todos los modelos se comportan de manera similar los primeros 10 años, sin embargo, luego de la primera década se observa una recuperación de estos en el escenario en el cual la recarga es mediante pozos.

Sector 4

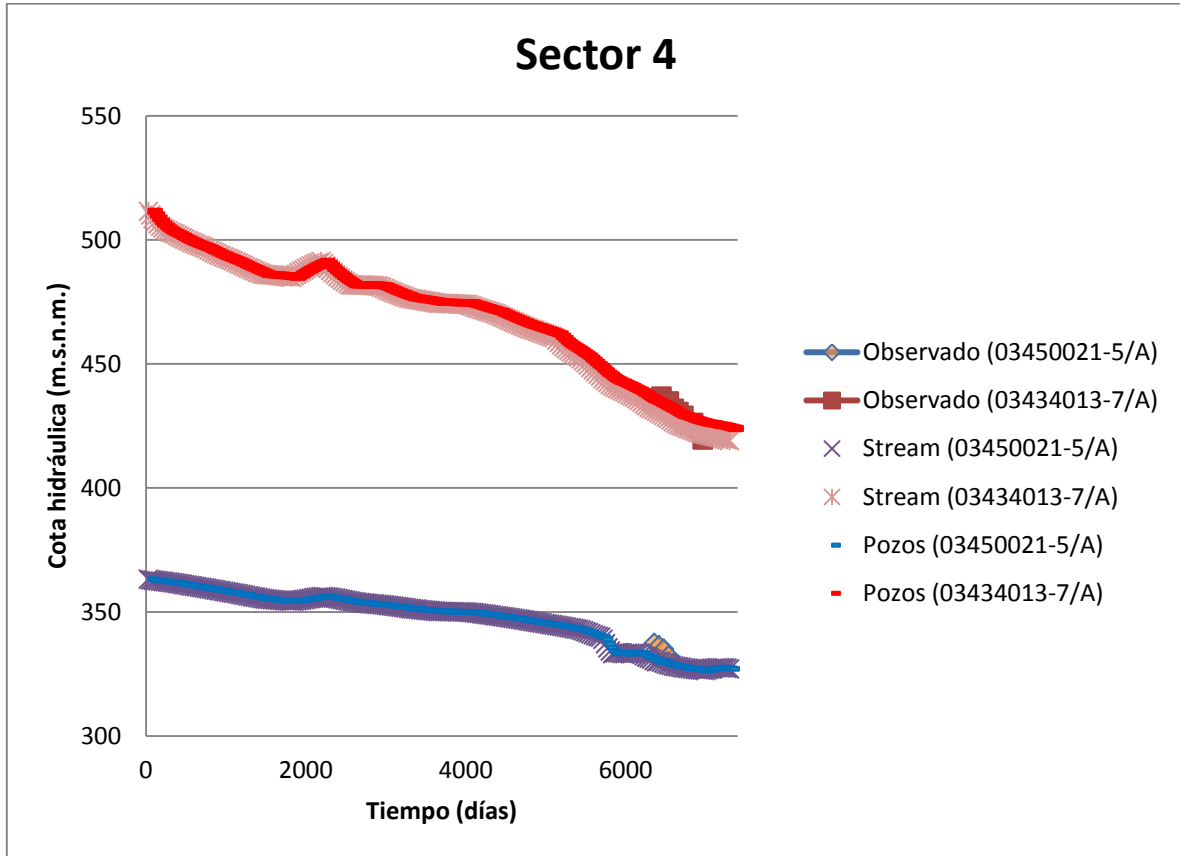


Figura 5. 17 Niveles estáticos sector 4, elaboración propia.

A partir de este sector no se gráfica el modelo base debido a que uno de los dos modelos compartirá datos con éste. En este sector es el modelo Stream el que comparte datos, aunque los resultados del modelo de pozos son bastante similares es posible hablar de una leve recuperación de los N.E.

Sector 5

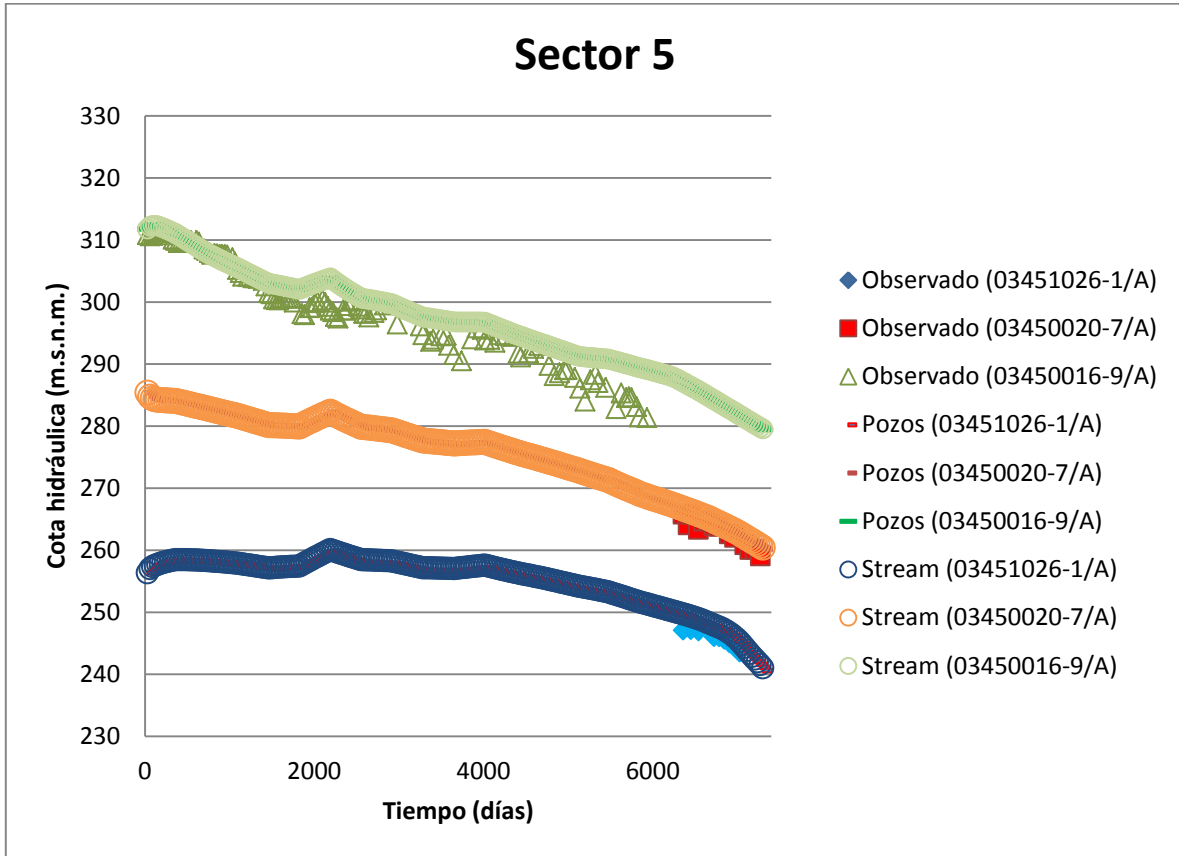


Figura 5. 18 Niveles estáticos sector 5, elaboración propia.

En este sector ambos modelos comparten datos con el modelo Base, por ende, no se genera recuperación en los niveles estáticos.

Sector 6A

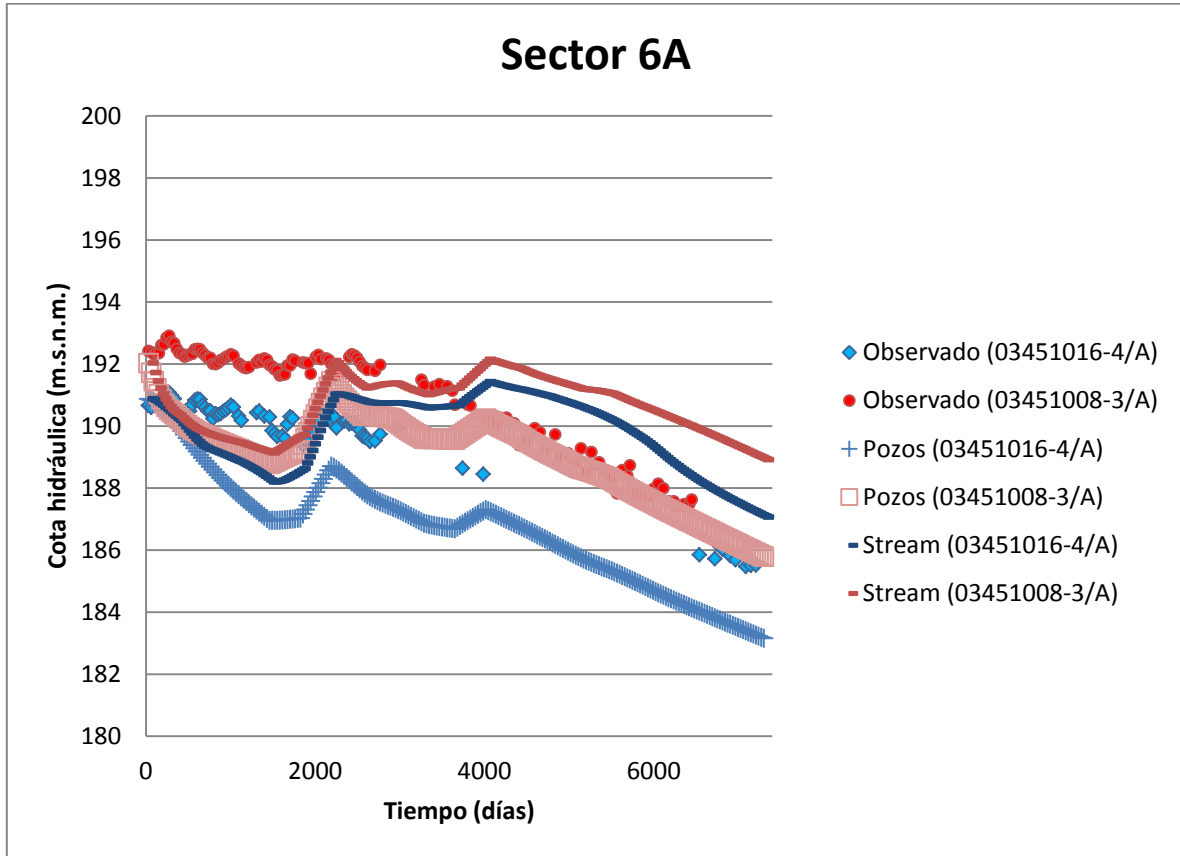


Figura 5. 19 Niveles estáticos sector 6A, elaboración propia.

En el sector 6A es el modelo de pozos el que comparte datos con el escenario Base, el modelo Stream da cuenta de una leve recuperación en los N.E. este resultado era esperado, ya que se esperaba un efecto mayor al hacer circular agua por todos los sectores.

Sector 6B

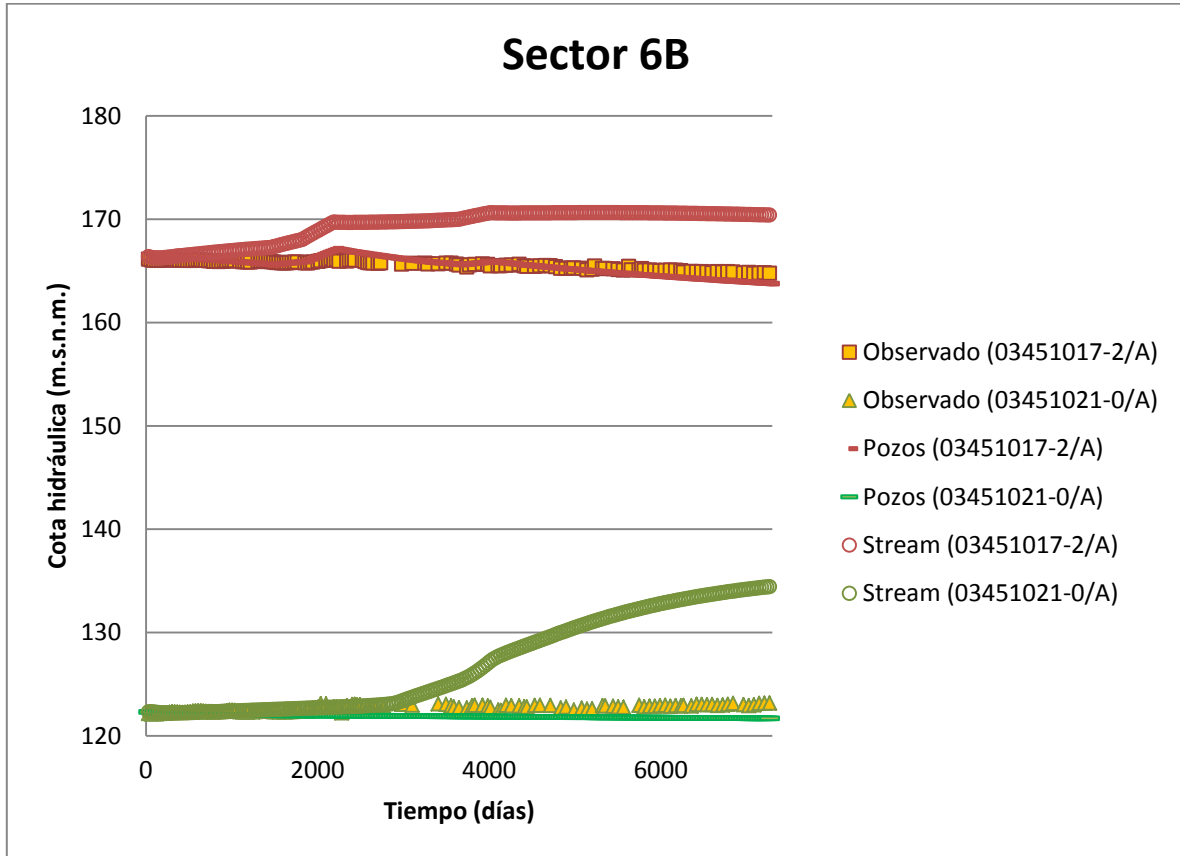


Figura 5. 20 Niveles estáticos sector 6B, elaboración propia.

En este sector la situación es similar al anterior, modelo pozos comparte datos con el escenario base, pero la recuperación que se origina en el modelo Stream es mayor y se hace notoria al pasar una década desde la puesta en marcha.

Considerando los resultados de ambas modelaciones se observa que el modelo de pozos es la alternativa que mayor recuperación entrega a los sectores estudiados, no solo presenta mejor recuperación en el sector 3A, sino que su mayor recuperación se observan hasta el sector 4, en el balance de masa sus resultados también son claramente superiores siendo su mayor costo el principal impedimento. Sin embargo, esta es la mejor alternativa estudiada.

6 CONCLUSIONES

Es innegable que la situación actual del acuífero de Copiapó es crítica, es necesario que se tomen medidas por parte de las autoridades competentes para evitar que este escenario no siga empeorando. Este trabajo nos muestra alguna de las alternativas posibles para buscar la recuperación del acuífero, sin embargo, hay muchas más técnicas a ser evaluadas y así encontrar la solución óptima.

Ambos modelos, analizados presentaron resultados positivos frente al escenario actual, una mejora del 12.75% y 40%, siendo el modelo de pozos el que entrego mejoras destacadas en el balance hídrico. En la recuperación de niveles hubo aumentos entre 5 y 30 metros en los sectores 3A y 3B del acuífero para el escenario de pozos, sin embargo esta recuperación no se vio traspasada al resto de los sectores. El escenario que utilizaba el lecho del río para originar la recarga presento resultados menos optimistas presentando una recuperación en los sectores 6A y 6B del acuífero de un par de metros, el costo anual de ambos modelos es similar y a pesar de tener un coste inicial mayor la mejor alternativa sería la planteada por el modelo de pozos.

La escasez de agua para realizar obras de recarga artificial es el principal problema presente en la zona, será necesario invertir en obras para obtenerlas, en el caso evaluado se optó por utilizar una planta desalinizadora de osmosis inversa con capacidad para 172.800 m³/día, aumentando considerablemente los costos de los distintos escenarios, haciendo prácticamente inviable la realización de ambos. Sin embargo, actualmente se analiza la opción de realizar la llamada “carretera del agua” que buscaría llevar los excedentes generados en las zonas australes del país hacía las zonas más necesitadas. Este proyecto se ha planteado para hacer frente a las futuras sequias que podrían afectar a la zona central pero de todas formas podría considerar la alternativa de llevar a cabo obras de recarga en esas mismas zonas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering.
- Cabrerías, G. 2013. Aspectos generales de la recarga artificial de acuíferos en Chile, Tercera Jornada Técnica – ALHSUD.
- Comisión Nacional de Riego, 2013. Estudio diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente-Dirección General de Aguas, 2009. Estrategia nacional de gestión integrada de cuencas hidrográficas, plan de gestión para la cuenca del río Copiapó.
- Depth Investigation of New Activities for Managed Aquifer Recharge, 2010. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible.
- Dictuc – Dirección General de Aguas, 2010. Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó
- Dirección General de Aguas, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de Calidad, Cuenca del río Copiapó.
- Dirección General de Aguas, 2012. Análisis crítico red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó.
- Dirección General de Aguas, 2013. Actualización de la modelación integrada y subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó.
- Dirección General de Aguas, 2013-B. Análisis y síntesis preliminar de iniciativas sobre recarga artificial en Chile.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1995. ¿Conoces las aguas subterráneas?, Recarga artificial de acuíferos.
- Karagiannis, I – Soldatos, P. 2008. Water cost literature: review and assessment.
- Khawaji, A – Kutubkhanah, I – Wie, J. 2008. Advances in seawater desalination technologies.
- Kim, Y et al. 2009. Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plan with a reverse osmosis network.
- Miller, S – Shemer, H – Semiat, R. 2015. Energy and environmental issues in desalination.
- Montaño. Borja, 2011. Análisis económico de la desalinización.

Servicio Nacional de Minería y Geología-Corporación de Fomento de la Producción, 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en la cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Törey, S. 2014. El lento camino en la recarga artificial de acuíferos. Revistas AIDIS, edición mayo, p27-p31.

ANEXO A: MODELO LECHO DE RÍO

En formato digital

ANEXO B: MODELO DE POZOS

En formato digital.