



Gobierno
de Chile

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

ASESORÍA TÉCNICA PARA LA SECTORIZACIÓN DE ACUÍFEROS EN CALAMA

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

HÍDRICA CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 421

Santiago, Octubre 2017

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil en Geografía Juan Carlos Salgado

HÍDRICA CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniera Civil Maricel Gibbs R.
Ingeniero Civil Felipe Orellana M. (MEngSc)
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Cartógrafo Salomón Vielma P.

CONTENIDO

| | | |
|------------|--|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | GENERAL | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS DEL ESTUDIO | 1 |
| 1.3 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO | 2 |
| CAPÍTULO 2 | RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1 | RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES | 3 |
| 2.2 | RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE | 4 |
| CAPÍTULO 3 | CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA | 5 |
| 3.1 | INTRODUCCIÓN | 5 |
| 3.2 | PLUVIOMETRÍA | 5 |
| 3.3 | TEMPERATURA | 9 |
| 3.4 | FLUVIOMETRÍA | 9 |
| 3.5 | RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO | 11 |
| 3.6 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA | 11 |
| CAPÍTULO 4 | CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA | 12 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN | 12 |
| 4.2 | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA | 12 |
| 4.2.1 | Marco Geomorfológico | 12 |
| 4.2.2 | Marco Geológico | 13 |
| 4.3 | DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA | 14 |
| 4.3.1 | Unidades Hidrogeológicas | 14 |
| 4.3.2 | Niveles Freáticos | 15 |
| 4.3.3 | Parámetros Hidráulicos | 15 |
| 4.3.4 | Extracciones Existentes | 16 |
| 4.4 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA | 17 |
| CAPÍTULO 5 | CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA | 18 |

| | | |
|---|---|----|
| 5.1 | INTRODUCCIÓN | 18 |
| 5.2 | INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE | 18 |
| 5.3 | ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN | 18 |
| 5.4 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA | 20 |
| CAPÍTULO 6 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL | | 21 |
| 6.1 | INTRODUCCIÓN | 21 |
| 6.2 | DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS | 21 |
| 6.3 | GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES | 21 |
| 6.4 | ENTRADAS Y SALIDAS AL SISTEMA | 23 |
| 6.5 | BALANCE HÍDRICO | 23 |
| 6.6 | INTERACCIÓN ENTRE ACUÍFEROS | 23 |
| 6.7 | CONCLUSIONES MODELO CONCEPTUAL | 25 |
| CAPÍTULO 7 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN | | 26 |
| 7.1 | INTRODUCCIÓN | 26 |
| 7.2 | METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN | 26 |
| 7.3 | CONCLUSIONES SECTORIZACIÓN | 26 |
| CAPÍTULO 8 DETERMINACIÓN DE OFERTA HÍDRICA | | 28 |
| 8.1 | INTRODUCCIÓN | 28 |
| 8.2 | DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA | 28 |
| 8.3 | CONCLUSIONES OFERTA HÍDRICA | 28 |
| CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES | | 29 |
| 9.1 | CONCLUSIONES GENERALES | 29 |
| 9.2 | IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS | 30 |
| CAPÍTULO 10 BIBLIOGRAFÍA | | 31 |

CUADROS

| | | |
|--------------|--|----|
| Cuadro 2.1-1 | Listado de Antecedentes Consultados..... | 3 |
| Cuadro 3.2-1 | Estaciones Meteorológicas Utilizadas..... | 5 |
| Cuadro 3.2-2 | Precipitación Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa..... | 7 |
| Cuadro 3.3-1 | Temperatura Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa..... | 9 |
| Cuadro 3.4-1 | Estaciones Fluviométricas Cuenca Río loa..... | 10 |
| Cuadro 3.5-1 | Recarga por Precipitación SHAC Calama..... | 11 |
| Cuadro 4.3-1 | Profundidad Nivel Freático Medio Anual SHAC Calama..... | 15 |
| Cuadro 4.3-2 | Rango de Permeabilidad Unidades Hidrogeológicas..... | 16 |
| Cuadro 4.3-3 | Rango de Coeficiente de Almacenamiento Unidades Hidrogeológicas..... | 16 |
| Cuadro 4.3-4 | Derechos Subterráneos SHAC de Calama..... | 16 |
| Cuadro 5.3-1 | Parámetros de Calidad Acuíferos SHAC Calama..... | 20 |
| Cuadro 6.2-1 | Geometría Acuíferos SHAC Calama..... | 21 |
| Cuadro 6.5-1 | Balance Hídrico SHAC Calama..... | 23 |
| Cuadro 6.6-1 | Balance Hídrico Acuífero Superior..... | 24 |
| Cuadro 6.6-2 | Balance Hídrico Acuitardo..... | 24 |
| Cuadro 6.6-3 | Balance Hídrico Acuífero Inferior..... | 24 |
| Cuadro 8.2-1 | Determinación Oferta Hídrica Acuífero Superior e Inferior..... | 28 |

FIGURAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 1.3-1 | Ubicación Cuenca Río Loa | 2 |
| Figura 3.2-1 | Curvas Isoyetas Media Anual Cuenca Río Loa..... | 8 |
| Figura 4.2-1 | Unidades Geomorfológicas Cuenca Río Loa | 13 |
| Figura 5.2-1 | Puntos con Información de Calidad Hidroquímica | 19 |
| Figura 6.3-1 | Curvas Equipotenciales – Acuífero Superior | 22 |
| Figura 6.3-2 | Curvas Equipotenciales – Acuífero Inferior..... | 22 |
| Figura 6.6-1 | Esquema Modelo Conceptual | 25 |
| Figura 7.2-1 | SHAC Acuífero Superior y SHAC Acuífero Inferior..... | 27 |

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERAL

El aumento de la actividad minera en las últimas décadas, y consecuentemente el de la demanda de agua para satisfacer esta actividad, le ha otorgado una importancia cada vez mayor al recurso subterráneo como fuente de abastecimiento, principalmente en el norte del país, donde el recurso superficial es escaso y no es capaz de satisfacer todas las demandas asociadas a los diferentes sectores de la economía.

Como parte de esta estimación, es necesario definir de manera precisa los denominados “Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común” (SHAC), que se definen como acuíferos o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente.

En el presente estudio, se realizará la sectorización de un SHAC ya definido en estudios anteriores, correspondiente al SHAC de Calama, que comprende el sector acuífero más importante dentro de la cuenca del río Loa.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

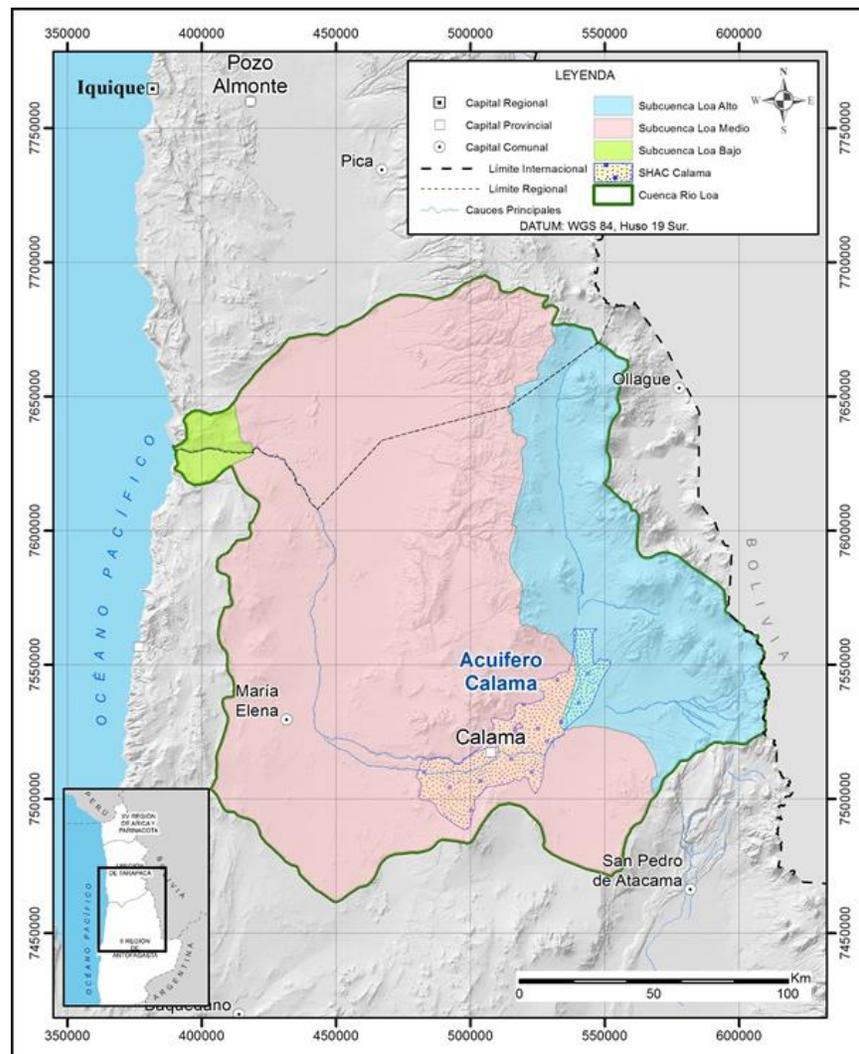
El objetivo principal del estudio es la revisión, análisis de antecedentes y generación de información para realizar una propuesta de sectorización hidrogeológica en profundidad para los acuíferos del SHAC de Calama, así como determinar la posible conexión hidráulica entre estos. Para cumplir con este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Análisis de antecedentes.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga de cada acuífero (superior e inferior).
- Elaboración de propuesta de sectores hidrogeológicos en planta y en profundidad para los acuíferos del SHAC de Calama.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Loa se encuentra ubicada principalmente en el norte de la región de Antofagasta, aunque parte de ella corresponde a la región de Tarapacá. Está dividida en 3 subcuencas (ver Figura 1.3-1), las cuales son: subcuenca río Loa Alto (bajo junta Río Salado), subcuenca Loa Medio (entre río Saldo y quebrada Amarga) y subcuenca Loa Bajo (entre Q. Amarga y desembocadura).

La superficie total de la cuenca es de aproximadamente 33.000 km². La zona de estudio correspondiente al SHAC de Calama, definido previamente en DGA (2014c). Presenta una superficie aproximada de 1.600 km² y su extensión sigue al río Loa desde aguas abajo del embalse Conchi hasta aguas arriba de su confluencia con el río San Salvador.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1.3-1 Ubicación Cuenca Río Loa

CAPÍTULO 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio son aquellos presentados en el Cuadro 2.1-1.

Cuadro 2.1-1 Listado de Antecedentes Consultados

| Ref | Documento | Año | Elaborado | Autor |
|-----|--|------|------------------|---------------|
| 1 | Investigación de los Recursos Hidráulicos en el Norte Grande | 1976 | CORFO | DGA |
| 2 | Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional | 1986 | IPLA | DGA |
| 3 | Balance Hídrico de Chile | 1987 | DGA | DGA |
| 4 | Estudio Hidrogeológico Sector de Calama | 1995 | Álamos y Peralta | Minera Leonor |
| 5 | Análisis de Extracciones de Agua Calama Quillagua, II Región , SIT Nº 20 | 1995 | IPLA | DGA |
| 6 | Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes / Peticionario: Comunidad Atacameña San Francisco Chiu Chiu | 2000 | DARH | DGA |
| 7 | Análisis de la DGA con respecto a recursos de reconsideración interpuestos por la Asociación de Agricultores del Valle de Calama a autorizaciones para el traslado del ejercicio del derecho de aprovechamiento de aguas superficiales, cuenca del río Loa, informe técnico Nº 123 | 2001 | DARH | DGA |
| 8 | Determinación de los Derechos de Aprovechamiento en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región, SDT Nº 153 | 2003 | DARH | DGA |
| 9 | Mapa Geológico de Chile, Escala 1:1.000.000 | 2003 | SERNAGEOMIN | SERNAGEOMIN |
| 10 | Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca Río Loa, SIT Nº 85 | 2003 | DEP | DGA |
| 11 | Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta, SDT Nº 152 | 2003 | DEP | DGA |
| 12 | Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca Río Loa | 2004 | Cade Idepe | DGA |
| 13 | Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama, Segunda Región, SDT Nº 216 | 2005 | DEP | DGA |

| Ref | Documento | Año | Elaborado | Autor |
|-----|---|------|---------------------------------------|----------------------|
| 14 | Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa, SDT N° 192 | 2005 | DARH | DGA |
| 15 | Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos | 2005 | DICTUC | DGA |
| 16 | Simulación Hidrogeológica de la Explotación del Acuífero Freático Ubicado en la Formación Opache, II Región, Norte de Chile, Memoria para Optar al Título de Geólogo | 2009 | Felipe Fuentes | Universidad de Chile |
| 17 | Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009 | 2009 | Montgomery & Associates | Minera El Tesoro |
| 18 | Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales, Ref. No. SA202-00039/20-14 | 2010 | Knight Piésold | CODELCO |
| 19 | Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas S.D.T N° 317 | 2011 | DEP | DGA |
| 20 | Estudio Acuífero de Calama Sector Medio del Río Loa, Región de Antofagasta | 2012 | Matraz y Univ Politécnica de Cataluña | DGA |
| 21 | Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta, SIT N° 324 | 2013 | Mayco | DGA |
| 22 | Manual Decreto Supremo N° 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (publicado en Diario Oficial 07/03/14) | 2013 | DGA | DGA |
| 23 | Caracterización Hidrogeoquímica de la Cuenca del Loa Alto, Región de Antofagasta, Chile, SIT N° 335 | 2014 | Matraz | DGA |
| 24 | Metodología para la Delimitación y Sectorización de Acuíferos a Nivel Nacional, SIT N° 341 | 2014 | GCF | DGA |
| 25 | Análisis Integrado Río Loa Región de Antofagasta, SIT N° 339 | 2014 | Knight Piésold | DGA |
| 26 | Sectorización de los Acuíferos de la Cuenca del Río Loa, SIT N° 358 | 2014 | Knight Piésold | DGA |
| 27 | Anexo A - Construcción Modelo Numérico de Flujo Efecto del Drenaje del Rajo DMH | 2015 | Hidromas | CODELCO |
| 28 | Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos, SIT N° 400 | 2016 | Hidrica Consultores | DGA |

Fuente: Elaboración propia.

2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

La revisión de los estudios listados en el Cuadro 2.1-1, permitió la recopilación de antecedentes respecto a la caracterización del SHAC de Calama. Este sistema presenta 3 grandes unidades acuíferas, por lo tanto, la revisión de antecedentes ha sido realizada con el objetivo de caracterizar cada una de ellas. La información de niveles freáticos se ha obtenido principalmente desde el registro de instituciones privadas. El detalle y manejo de la información recabada se presenta en detalle en los siguientes acápite.

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En base a la información disponible, se realizó una caracterización de las variables precipitación, temperatura y caudal, enfocada principalmente en la zona definida por el SHAC de Calama y sus alrededores.

3.2 PLUVIOMETRÍA

Son consideradas las estaciones meteorológicas que posee la DGA en la zona y que presentan la mejor disponibilidad y calidad de información para permitir el relleno de su registro. Las estaciones utilizadas corresponden a las presentadas en el Cuadro 3.2-1.

Cuadro 3.2-1 Estaciones Meteorológicas Utilizadas

| Identificación | | | Coordenadas UTM | | | T° (*) |
|----------------|------------|-------------------------------|-----------------|-----------|--------------------|------------|
| N | BNA | Nombre | Este (m) | Norte (m) | Cota (m s.n.m.) | |
| 1 | 02103007-4 | San Pedro de Conchi | 547.876 | 7.574.483 | 3.217 | |
| 2 | 02103008-2 | Parshall N° 2 | 549.824 | 7.573.426 | 3.318 | X |
| 3 | 02104008-8 | Conchi Embalse | 538.784 | 7.564.358 | 3.010 | X |
| 4 | 02104010-k | Chiu-Chiu | 537.411 | 7.529.737 | 2.524 | X |
| 5 | 02110013-7 | Calama | 509.837 | 7.517.426 | 2.300 | |
| 6 | 02112008-1 | Quillagua | 444.563 | 7.604.677 | 802 | |
| 7 | 02112009-k | Coya Sur | 435.923 | 7.523.440 | 1.250 | |
| 8 | 02113005-2 | Guatacondo DGA | 495.259 | 7.685.909 | 2.460 | |
| 9 | 220002 | El Loa Calama AD. | 406.972 | 7.512.068 | 2.293 | X |
| 10 | 01080002-1 | Collahuasi | 520.589 | 7.678.271 | 4.250 | |
| 11 | 01770001-4 | Copaquire | 511.209 | 7.685.562 | 3.540 | |
| 12 | 02101001-4 | Río Loa antes Represa Lequena | 534.952 | 7.605.232 | 3.315 | |
| 13 | 02101003-0 | Lequena | 535.066 | 7.605.287 | 3.320 | X |
| 14 | 02102005-2 | Quinchamale | 541.688 | 7.577.600 | 3.080 | |
| 15 | 02103009-0 | Ojos San Pedro | 570.949 | 7.570.268 | 3.800 | |
| 16 | 02103010-4 | Inacaliri | 596.382 | 7.563.801 | 4.040 | |
| 17 | 02104007-k | Conchi Viejo | 528.509 | 7.572.682 | 3.491 | |
| 18 | 02104009-6 | Conchi Muro Embalse | 539.134 | 7.564.169 | 3.000 | |

| Identificación | | | Coordenadas UTM | | | T° (*) |
|----------------|------------|-----------------------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------|
| N | BNA | Nombre | Este (m) | Norte (m) | Cota (m s.n.m.) | |
| 19 | 02105002-4 | Río Salado en Sifón Ayquina | 567.504 | 7.534.994 | 2.980 | |
| 20 | 02105014-8 | Cupo | 570.475 | 7.554.319 | 3.370 | |
| 21 | 02105015-6 | Turi | 573.360 | 7.540.347 | 3.070 | |
| 22 | 02105016-4 | Linzor | 600.708 | 7.541.423 | 4.100 | X |
| 23 | 02105017-2 | Toconce | 585.179 | 7.538.250 | 3.310 | X |
| 24 | 02105018-0 | Ayquina | 570.230 | 7.536.542 | 3.031 | X |
| 25 | 02105020-2 | Salado Embalse | 582.124 | 7.535.344 | 3.200 | |
| 26 | 02105021-0 | Caspana | 581.126 | 7.529.692 | 3.260 | X |
| 27 | 02105022-9 | El Tatio | 601.584 | 7.525.764 | 4.370 | X |

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 19S.

Fuente: Elaboración propia.

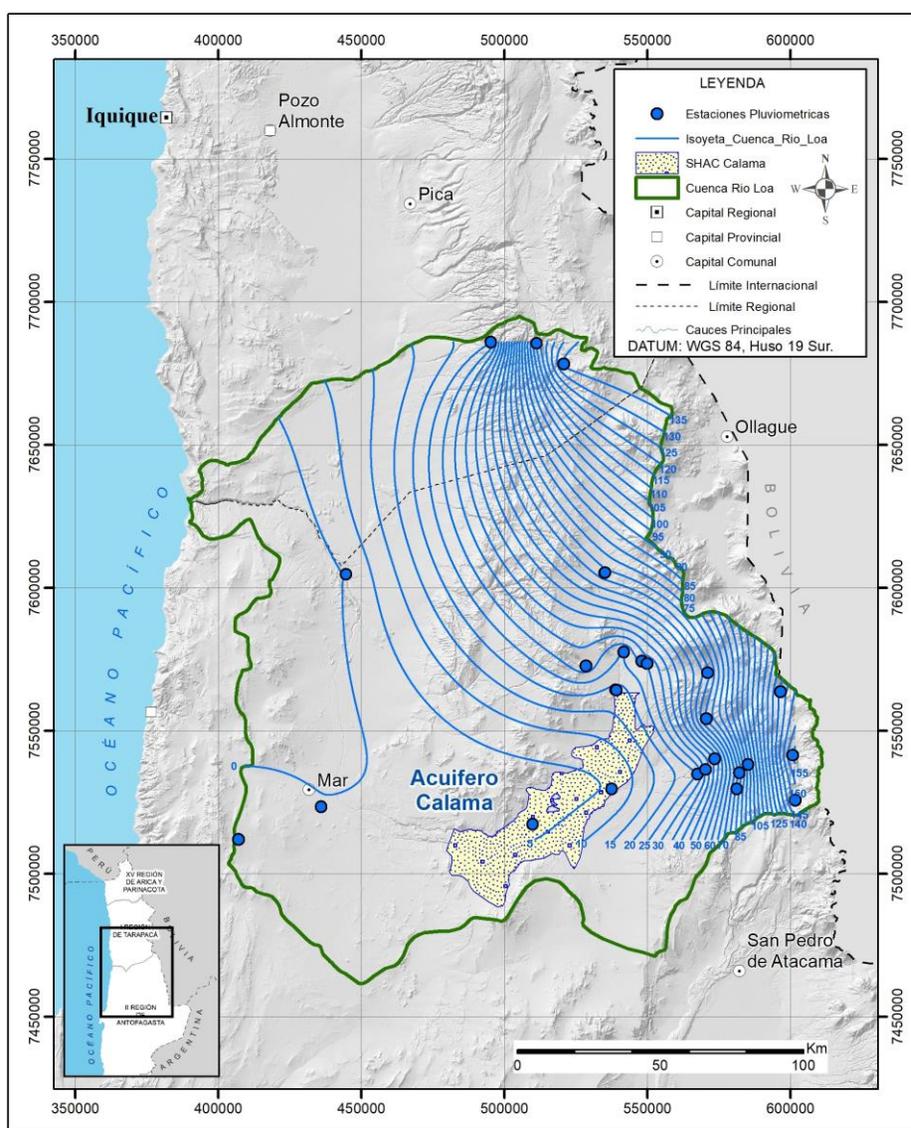
El Cuadro 3.2-2 muestra los valores de precipitación media mensual y anual de las estaciones analizadas.

Cuadro 3.2-2 Precipitación Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa

| Estación | Ene (mm) | Feb (mm) | Mar (mm) | Abr (mm) | May (mm) | Jun (mm) | Jul (mm) | Ago (mm) | Sep (mm) | Oct (mm) | Nov (mm) | Dic (mm) | Anual (mm) |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| San Pedro de Conchi | 11,20 | 12,42 | 3,15 | 1,76 | 0,76 | 1,90 | 0,00 | 0,61 | 0,92 | 0,27 | 0,03 | 1,40 | 33,8 |
| Parshall N2 | 9,38 | 9,68 | 5,13 | 0,39 | 0,81 | 0,76 | 0,86 | 0,55 | 0,73 | 0,20 | 0,02 | 1,31 | 29,8 |
| Conchi Embalse | 5,90 | 6,27 | 3,02 | 0,34 | 0,33 | 0,40 | 0,44 | 0,88 | 0,31 | 0,19 | 0,00 | 0,68 | 18,7 |
| Chiu-Chiu | 1,31 | 1,08 | 1,37 | 0,11 | 0,30 | 0,66 | 0,11 | 0,33 | 0,19 | 0,05 | 0,00 | 0,08 | 5,6 |
| Calama | 0,39 | 0,57 | 0,49 | 0,19 | 0,54 | 0,48 | 0,15 | 0,27 | 0,06 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 3,3 |
| Quillagua | 0,13 | 0,00 | 0,11 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,3 |
| Coya Sur | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,3 |
| Guatacondo DGA | 13,35 | 4,78 | 3,37 | 0,05 | 0,13 | 0,82 | 0,95 | 0,85 | 0,11 | 0,09 | 0,00 | 0,66 | 24,8 |
| El Loa Calama AD | 0,89 | 1,03 | 0,58 | 0,23 | 0,86 | 1,32 | 0,69 | 0,33 | 0,38 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 6,5 |
| Collahuasi | 51,31 | 44,11 | 14,21 | 2,65 | 1,37 | 3,08 | 1,78 | 1,89 | 1,54 | 1,49 | 0,93 | 9,54 | 136,2 |
| Copaquire | 41,83 | 31,44 | 18,46 | 0,06 | 2,60 | 4,37 | 2,63 | 1,06 | 0,78 | 0,68 | 0,13 | 5,64 | 111,6 |
| Río Loa Antes Represa Lequena | 16,79 | 29,61 | 9,46 | 0,87 | 0,69 | 0,71 | 4,13 | 0,66 | 0,31 | 0,22 | 0,17 | 5,29 | 68,5 |
| Lequena | 19,11 | 27,46 | 15,64 | 0,46 | 0,83 | 0,89 | 1,15 | 0,84 | 0,65 | 0,14 | 0,08 | 2,18 | 68,6 |
| Quinchamale | 5,28 | 6,45 | 6,22 | 0,49 | 0,23 | 0,86 | 0,51 | 0,35 | 2,30 | 0,00 | 0,00 | 2,35 | 24,4 |
| Ojos San Pedro | 15,80 | 24,05 | 14,83 | 0,23 | 1,91 | 1,64 | 0,23 | 0,79 | 1,28 | 0,29 | 0,06 | 2,35 | 62,7 |
| Inacaliri | 46,91 | 47,58 | 21,82 | 2,34 | 3,75 | 2,18 | 0,75 | 2,08 | 2,61 | 0,54 | 0,87 | 6,80 | 136,4 |
| Conchi Viejo | 9,47 | 12,82 | 4,91 | 0,81 | 0,74 | 1,04 | 1,26 | 0,75 | 1,05 | 0,30 | 0,00 | 0,55 | 33,5 |
| Conchi Muro Embalse | 5,49 | 4,68 | 4,72 | 0,15 | 0,59 | 0,68 | 0,00 | 0,25 | 0,28 | 0,20 | 0,00 | 1,17 | 17,7 |
| Río Salado en Sifón Ayquina | 7,68 | 7,33 | 5,91 | 0,24 | 2,04 | 1,36 | 0,31 | 0,46 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,37 | 25,0 |
| Cupo | 26,43 | 28,59 | 13,89 | 0,46 | 0,71 | 0,97 | 0,47 | 0,48 | 0,26 | 0,34 | 0,03 | 1,06 | 71,5 |
| Turi | 12,53 | 18,85 | 9,37 | 0,09 | 0,33 | 1,12 | 0,02 | 1,15 | 0,74 | 0,16 | 0,09 | 1,28 | 44,9 |
| Linzor | 47,84 | 60,45 | 28,87 | 2,20 | 2,64 | 1,83 | 1,31 | 1,22 | 2,72 | 0,32 | 1,25 | 6,85 | 156,1 |
| Toconce | 27,72 | 43,43 | 15,31 | 0,54 | 1,49 | 1,37 | 0,61 | 1,14 | 0,86 | 0,33 | 0,41 | 2,78 | 94,0 |
| Ayquina | 10,39 | 14,39 | 9,22 | 0,12 | 0,88 | 0,75 | 0,33 | 0,60 | 0,54 | 0,63 | 0,03 | 0,67 | 38,1 |
| Salado Embalse | 21,54 | 31,31 | 15,36 | 0,62 | 1,04 | 1,55 | 0,34 | 1,92 | 0,88 | 0,27 | 0,15 | 1,85 | 76,4 |
| Caspana | 23,30 | 29,37 | 16,05 | 0,18 | 1,09 | 1,87 | 0,43 | 1,22 | 1,34 | 0,96 | 0,07 | 2,10 | 77,1 |
| El Tatio | 50,08 | 48,50 | 30,10 | 0,70 | 3,57 | 2,89 | 1,01 | 1,59 | 2,01 | 0,46 | 0,89 | 6,35 | 148,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Con los registros actualizados y rellenos de las estaciones pluviométricas, se construyeron curvas isoyetas con la precipitación media anual para caracterizar la pluviometría de la cuenca del río Loa, la cual se presenta en la Figura 3.2-1. Posteriormente, la estadística fue utilizada en la construcción de curvas de variación estacional para cada estación analizada, las cuales muestran una concentración de las lluvias de mayor importancia entre los meses de enero y marzo, lo cual se asocia a las lluvias altiplánicas denominadas “invierno boliviano”. Se observa que la precipitación con una probabilidad de excedencia del 50% corresponde a valores máximos mensuales menores a los 5 mm para todas las estaciones asociadas al SHAC de Calama, lo cual permite estimar que el aporte al acuífero es relativamente bajo debido a la falta o bajo periodo de retorno de eventos de precipitación extremos.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-1 Curvas Isoyetas Media Anual Cuenca Río Loa

3.3 TEMPERATURA

Las estaciones meteorológicas con medición de temperatura utilizadas en el análisis han sido presentadas con anterioridad en el Cuadro 3.2-1. Posterior al relleno del registro se ha obtenido el valor de temperatura media mensual y anual de cada estación analizada, la cual es presentada en el Cuadro 3.3-1.

Cuadro 3.3-1 Temperatura Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa

| Estación | Ene (°C) | Feb (°C) | Mar (°C) | Abr (°C) | May (°C) | Jun (°C) | Jul (°C) | Ago (°C) | Sep (°C) | Oct (°C) | Nov (°C) | Dic (°C) | Anual (°C) |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| San Pedro de Conchi | 12,2 | 12,0 | 11,4 | 9,4 | 7,4 | 5,7 | 5,4 | 6,1 | 7,8 | 9,0 | 9,8 | 10,9 | 8,8 |
| Parshall N2 | 12,5 | 12,2 | 11,8 | 10,9 | 9,1 | 7,8 | 7,8 | 8,5 | 9,6 | 11,0 | 11,3 | 12,2 | 10,4 |
| Conchi Embalse | 12,8 | 12,9 | 12,3 | 10,5 | 8,3 | 7,0 | 6,8 | 7,5 | 8,7 | 10,2 | 11,3 | 12,1 | 10,0 |
| Chiu-Chiu | 13,3 | 13,5 | 13,2 | 12,1 | 10,9 | 9,7 | 9,5 | 10,6 | 11,3 | 12,2 | 12,5 | 12,9 | 11,8 |
| Calama | 7,1 | 7,4 | 7,1 | 5,5 | 2,9 | 1,1 | 0,8 | 1,7 | 2,9 | 4,4 | 5,6 | 6,6 | 4,4 |
| Quillagua | 13,0 | 12,7 | 12,4 | 11,7 | 10,1 | 9,3 | 8,4 | 9,7 | 10,7 | 11,4 | 12,4 | 12,5 | 11,2 |
| Coya Sur | 13,8 | 13,7 | 13,3 | 12,7 | 11,5 | 10,7 | 10,1 | 11,4 | 11,4 | 12,0 | 12,7 | 13,2 | 12,2 |
| Guatacondo DGA | 12,1 | 12,3 | 11,9 | 10,7 | 9,6 | 8,5 | 8,4 | 9,6 | 10,4 | 10,8 | 11,4 | 12,0 | 10,6 |
| El Loa Calama AD | 4,9 | 4,6 | 4,9 | 3,2 | 0,9 | -0,3 | -0,3 | 0,0 | 1,4 | 2,6 | 3,4 | 4,8 | 2,5 |
| Collahuasi | 15,2 | 15,2 | 14,6 | 13,0 | 11,5 | 10,3 | 9,9 | 10,8 | 11,8 | 12,9 | 13,6 | 14,5 | 12,8 |

Fuente: Elaboración Propia

De esta forma es posible observar una relativa estabilidad de la temperatura a lo largo del año para la estación Chiu Chiu, ubicada cercana a los 2.500 m s.n.m., lo cual se diferencia de la estacionalidad presente en los registros de Conchi Embalse, la cual se encuentra sobre los 3.000 m s.n.m.

3.4 FLUVIOMETRÍA

La caracterización fluviométrica se realizó mediante la información disponible actualizada al mes de abril de 2017 de las estaciones que posee la DGA en el curso del cauce del río Loa. Las estaciones analizadas son presentadas en el Cuadro 3.4-1.

Cuadro 3.4-1 Estaciones Fluviométricas Cuenca Río loa

| Identificación | | | Coordenadas UTM | | |
|----------------|---------|---|-----------------|-----------|-------------|
| N | BNA | Nombre | Este (m) | Norte (m) | Cota (msnm) |
| 1 | 2120001 | Río Loa En Desembocadura | 390.803 | 7.630.449 | - |
| 2 | 2112002 | Canal Quillagua En Quillagua | 444.263 | 7.606.523 | 910 |
| 3 | 2112001 | Río Loa En Quillagua | 444.811 | 7.605.787 | 802 |
| 4 | 2101001 | Río Loa Antes Represa Lequena | 534950 | 7.605.197 | 3.315 |
| 5 | 2112005 | Río Loa Antes Zona Agrícola Quillagua | 446.559 | 7.598.875 | 950 |
| 6 | 2103004 | Río San Pedro En San Pedro | 545.412 | 7.574.671 | - |
| 7 | 2103003 | Río San Pedro En Camino Internacional | 548.222 | 7.574.048 | 3.320 |
| 8 | 2103002 | Río San Pedro En Parshall N° 2 (Bt. Chilex) | 550.371 | 7.573.426 | 3.318 |
| 9 | 2103001 | Río San Pedro En Parshall N"1 | 565.449 | 7.570.727 | 3.700 |
| 10 | 2104013 | Río Loa En Vado Santa Bárbara (DOH) | 540.438 | 7.570.195 | 2.950 |
| 11 | 2104004 | Río Loa En Alcantarilla Conchi N"1 | 540.609 | 7.569.980 | 2.975 |
| 12 | 2104003 | Río Loa En Alcantarilla Conchi N"2 | 540.523 | 7.569.795 | 2.932 |
| 13 | 2104001 | Río Loa En Conchi | 540.605 | 7.568.412 | 3.010 |
| 14 | 2103014 | Río Siloli Antes B.T. Fcab | 600.440 | 7.565.684 | 4.000 |
| 15 | 2104002 | Río Loa En Salida Embalse Conchi | 539.132 | 7.564.018 | 2.950 |
| 16 | 2105008 | Vertiente Turi Turi | 574.117 | 7.541.630 | - |
| 17 | 2105007 | Río Toconce Antes Represa Sendos | 588.204 | 7.536.667 | - |
| 18 | 2105001 | Río Salado A. J. Curti | 578.012 | 7.536.045 | 3.080 |
| 19 | 2105002 | Río Salado En Sifón Ayquina | 567.504 | 7.534.956 | 2.980 |
| 20 | 2112007 | Río Loa D. J. San Salvador-(M. Elena) | 441.818 | 7.529.060 | 1.240 |
| 21 | 2104005 | Río Loa Antes Junta Río Salado | 536.036 | 7.527.190 | 2.505 |
| 22 | 2105005 | Río Salado A. J. Loa | 536.865 | 7.526.665 | 2.500 |
| 23 | 2110008 | Río Loa Después Junta Río Salado (Ca) | 535.290 | 7.525.777 | 2.500 |
| 24 | 2112006 | Río Loa D. J. San Salvador (Chacance) | 445.441 | 7.523.630 | 1.238 |
| 25 | 2111002 | Río San Salvador Antes Junta Río Loa | 445.843 | 7.523.355 | 1.238 |
| 26 | 2110007 | Río Loa Antes Junta San Salvador | 445.672 | 7.523.201 | 1.238 |
| 27 | 2110001 | Río Loa En Escorial | 511.462 | 7.518.218 | 2.450 |
| 28 | 2110002 | Río Loa En Yalquincha | 512.605 | 7.517.664 | 2.300 |
| 29 | 2110031 | Río Loa En Angostura | 527.123 | 7.516.384 | 2.470 |
| 30 | 2110003 | Río Loa En Chintoraste | 502.342 | 7.511.488 | 2.200 |
| 31 | 2110004 | Río Loa En Finca | 501.142 | 7.511.120 | 2.100 |

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 19S.

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.

El registro aguas abajo de Calama se encuentra influenciado por el caudal del río San Salvador, el cual de acuerdo al registro de la estación Río San Salvador Antes Junta Río Loa junto al valor de aforos puntuales, permiten estimar su caudal en torno a los 310 l/s. Por lo tanto, considerando el caudal promedio registrado aguas arriba de la ciudad de Calama, la demanda hídrica de la ciudad, junto al caudal aforado y registrado en las cercanías de la junta entre los ríos Loa y San Salvador, es posible estimar un aporte desde el cauce superficial al acuífero del SHAC de Calama de 422 l/s.

3.5 RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO

Utilizando los parámetros del método de curva número asociados a la cuenca del río Loa, se centra el análisis sobre la superficie del SHAC de Calama. Se señalan como representativas de la zona alta, media y baja del SHAC a las estaciones Conchi Muro Embalse, Chiu Chiu y Calama. De acuerdo a la ubicación de cada estación, se estima su área de influencia sobre el SHAC de Calama mediante la construcción de Polígonos de Thiessen, con los cuales se obtuvieron los resultados que presenta el Cuadro 3.5-1.

Cuadro 3.5-1 Recarga por Precipitación SHAC Calama

| Estación | Recarga (mm) | Área (Km ²) | Recarga (l/s) |
|---------------------|--------------|-------------------------|---------------|
| Calama | 0,32 | 970 | 12,1 |
| Chiu Chiu | 0,63 | 495 | 13,7 |
| Conchi Muro Embalse | 1,71 | 155 | 7,8 |
| Total | 2,66 | 1.620 | 33,5 |

Fuente: Elaboración propia

Se observa que a pesar de presentar una mayor precipitación media, se asocia una menor recarga a la estación Conchi Embalse de acuerdo a su menor área de influencia sobre la superficie del SHAC de Calama.

3.6 CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

La caracterización hidrológica ha permitido verificar que las precipitaciones se concentran entre los meses de enero y marzo, asociados al denominado “invierno altiplánico”. De acuerdo a esto, se ha estimado que la recarga al sistema acuífero del SHAC de Calama por precipitaciones no corresponde a una variable de importancia en el sistema, siendo controlado principalmente por aportes subterráneos y la interacción con el cauce principal. Justamente, la recarga por infiltración desde el cauce del río Loa al SHAC de Calama ha sido estimado a través de la realización de un balance considerando las estaciones fluviométricas de control aguas arriba y aguas abajo de Calama, junto con el valor de la demanda hídrica de la ciudad. De acuerdo a esto, se estimó una recarga cercana a los 400 l/s, lo cual se corresponde a valores obtenidos en estudios anteriores.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

4.1 INTRODUCCIÓN

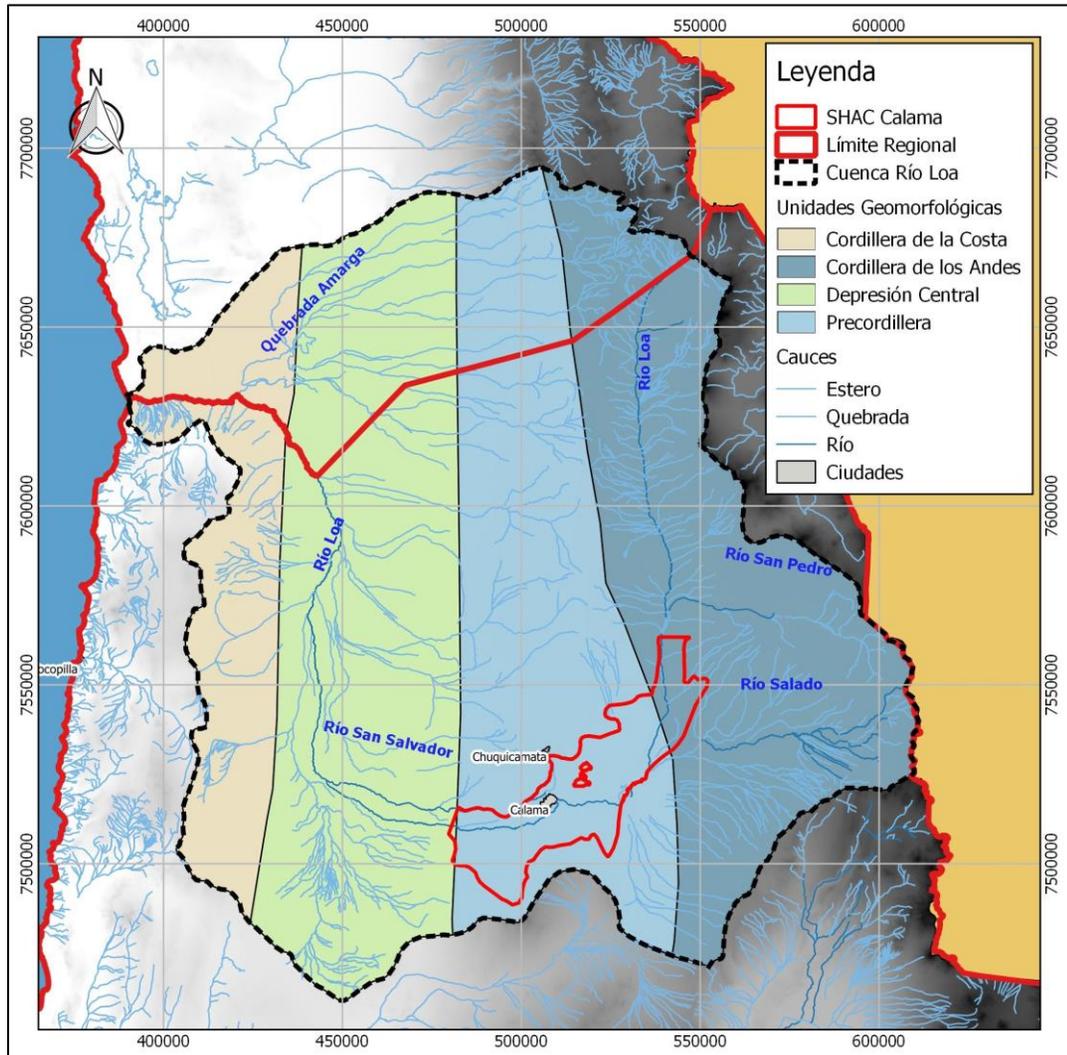
La caracterización hidrogeológica contempla la identificación de unidades hidrogeológicas, parámetros hidráulicos, profundidad del agua subterránea y sus fluctuaciones estacionales e interanuales de la zona a estudiar.

4.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La caracterización de la geología del área de estudio se presenta mediante un análisis inicial de la geomorfología de la cuenca del río Loa, para luego describir las unidades geológicas que se distinguen.

4.2.1 Marco Geomorfológico

Respecto a la geomorfología de la cuenca del río Loa, SERNAGEOMIN (2013) distingue, cuatro unidades morfológicas Cordillera de la Costa, cordillera de los Andes, Depresión Central y Precordillera, como se presenta a continuación en la Figura 4.2-1.



Fuente: Elaboración propia desde SERNAGEOMIN (2003)

Figura 4.2-1 Unidades Geomorfológicas Cuenca Río Loa

4.2.2 Marco Geológico

La descripción geológica del SHAC de Calama se desarrolla en base a las principales formaciones geológicas identificadas por SERNAGEOMIN (2003). La agrupación de estas formaciones geológicas permite la distribución espacial de cuatro grandes series de acuerdo a lo planteado por Álamos y Peralta (1995), DGA (2003c) y DGA (2014b).

Formación Porfírica

Rocas fundamentales, que está constituida por lavas, conglomerados, brechas, areniscas y tobas mesozoicas del jurásico y cretácico inferior. Esta serie es particularmente importante debido a su impermeabilidad, ya que desvía y estanca las corrientes de agua

subterráneas. Se observa en el mineral de Chuquicamata y en el cerro Colorado, de la ribera oeste del río Loa.

Formación Liparítica o Riolítica

Constituida por tobas, ignimbritas, tufitas, rodados y areniscas de carácter riolítico. Formación de permeabilidad variable, donde se cree que circularían corrientes subterráneas, sin embargo, en distintos puntos es la causante de los afloramientos.

Formación Calizas del Loa o Formación el Loa

Descrita primeramente “depósitos de aguas estancadas diluviales de la cuenca del Loa” que correspondería probablemente a un lago del terciario medio, que se habría extendido sobre el actual curso del río Loa desde Conchi hasta Quillagua. Está formada por dos niveles uno superior e inferior, donde el primero lo constituyen calizas, areniscas calcáreas, travertino y con intercalaciones de ignimbritas. En la capa inferior se detectan secuencias de gravas, areniscas, conglomerados, arcillas, limos y diatomitas.

Formación Chiu Chiu

Secuencia de limos y arcillas, bien estratificados, dispuestos horizontalmente en los alrededores del poblado de Chiu Chiu. Se emplaza de manera disconformemente sobre la Formación El Loa y corresponden a depósitos de conglomerados de areniscas, evaporitas, diatomitas, travertinos y cenizas volcánicas re TRABAJADAS. Hacia al Noreste de Calama, esta formación posee estratos horizontales de limos y arcillas.

4.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA

La descripción hidrogeológica busca presentar las principales unidades hidrogeológicas que posean capacidad de generar acuíferos, tal como se desarrolla en los acápite siguientes.

4.3.1 Unidades Hidrogeológicas

Se definen seis unidades hidrogeológicas descritas en Knight Piésold (2010) y DGA (2014b).

- Unidad Hidrogeológica 1: Depósitos Aluvio - Evaporíticos
- Unidad Hidrogeológica 2: Acuífero Superior Cárstico-Detrítico El Loa
- Unidad Hidrogeológica 3: Acuitardo Ignimbrítico
- Unidad Hidrogeológica 4: Acuitardo El Loa (“Acuitardo”)
- Unidad Hidrogeológica 5: Acuífero Gravas de Calama (“Acuífero Inferior”)
- Unidad Hidrogeológica 6: Acuífero Rocas Pre-Terciarias (“Basamento Impermeable”)

Estas unidades reconocidas han sido agrupadas para conformar 4 principales unidades hidrogeológicas: Acuífero Superior (UH-1 y UH-2), Acuitardo (UH-3 y UH-4), Acuífero Inferior (UH-5) y Basamento (UH-6).

4.3.2 Niveles Freáticos

El registro de niveles freáticos en el acuífero del SHAC de Calama se obtiene desde la información oficial de pozos DGA y el monitoreo de los pozos pertenecientes a Minera El Tesoro presentado en Montgomery & Associates (2009).

Cuadro 4.3-1 Profundidad Nivel Freático Medio Anual SHAC Calama

| Pozo | UTM Este (m) | UITM Norte (m) | Cota (m s.n.m.) | Profundidad Nivel Freático (m) | | | | | |
|------------|--------------|----------------|-----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
| PPR-1 | 504.582 | 7.515.527 | 2.220 | 2,7 | 2,5 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,5 |
| PPR-2 | 505.546 | 7.516.089 | 2.231 | 10,2 | 9,9 | 26,0 | 63,1 | 64,3 | 61,8 |
| PPR-3 | 503.224 | 7.516.369 | 2.205 | 11,9 | 11,4 | 10,7 | 10,2 | 9,7 | 10,4 |
| PPR-4 | 504.051 | 7.515.081 | 2.214 | 4,4 | 4,3 | 3,6 | 3,1 | 3,4 | 3,0 |
| PPR-5 | 502.772 | 7.515.863 | 2.198 | 9,5 | 9,3 | 9,2 | 7,3 | 34,1 | 38,1 |
| LE-1 | 502.861 | 7.516.861 | 2.212 | 41,1 | 41,3 | 42,3 | 43,6 | 45,7 | 46,9 |
| LE-2 | 503.306 | 7.517.179 | 2.216 | 41,9 | 42,1 | 43,0 | 44,2 | 45,4 | 46,2 |
| LE-4 | 502.817 | 7.515.785 | 2.198 | 9,7 | 9,4 | 8,9 | 7,3 | 8,1 | 8,4 |
| LE-6 | 503.231 | 7.516.371 | 2.206 | 12,5 | 11,9 | 12,3 | 10,7 | 10,7 | 11,2 |
| LE-7 | 504.025 | 7.515.108 | 2.215 | 5,3 | 5,2 | 5,0 | 4,6 | 4,3 | 4,0 |
| LE-9 | 505.562 | 7.516.084 | 2.230 | 10,0 | 9,8 | 9,4 | 9,6 | 9,8 | 9,9 |
| P-7 | 503.592 | 7.514.664 | 2.209 | 5,3 | 5,1 | 5,5 | 5,3 | 5,2 | 5,2 |
| P-10 | 503.645 | 7.514.581 | 2.209 | 6,0 | 5,8 | 6,6 | 41,5 | 44,3 | 46,8 |
| P-18 | 504.075 | 7.515.259 | 2.215 | - | - | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| P-19 | 503.891 | 7.514.882 | 2.211 | 6,5 | 6,2 | 6,7 | 6,1 | 6,2 | 6,1 |
| P-21 | 504.219 | 7.515.039 | 2.216 | 5,4 | 5,3 | 5,5 | 4,8 | 4,6 | 4,5 |
| P-24 | 504.277 | 7.514.962 | 2.216 | 8,3 | 8,0 | 8,3 | 7,6 | 7,5 | 7,2 |
| P-25 | 503.896 | 7.514.520 | 2.212 | 7,2 | 6,9 | 7,5 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| P-27 | 504.023 | 7.514.329 | 2.213 | 8,4 | 8,2 | 8,8 | 8,3 | 8,5 | 8,5 |
| PBC-1 | 503.081 | 7.515.095 | 2.204 | - | - | 30,2 | 32,6 | 39,0 | 42,0 |
| PBC-2 | 502.513 | 7.514.927 | 2.196 | - | - | 24,0 | 26,3 | 33,1 | 36,3 |
| OBS-6C | 505.564 | 7.516.093 | 2.231 | - | - | - | 79,6 | 80,0 | 78,0 |
| OBS-7C | 500.670 | 7.514.080 | 2.172 | - | - | - | 62,4 | 64,2 | 66,4 |
| OBS-8C | 503.585 | 7.514.673 | 2.209 | - | - | - | 40,3 | 43,6 | 45,8 |
| OBS-9C | 504.072 | 7.515.269 | 2.216 | - | - | - | 46,3 | 49,3 | 51,8 |
| Aeropuerto | 514.456 | 7.511.112 | 2.389 | 26,2 | 26,4 | 25,0 | - | - | - |

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 19S.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Parámetros Hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas que conforman el SHAC de Calama se obtiene desde la revisión de antecedentes. De esta forma, se construyó el Cuadro

4.3-2 con el rango de valor para las permeabilidades y el Cuadro 4.3-3 correspondiente al coeficiente de almacenamiento.

Cuadro 4.3-2 Rango de Permeabilidad Unidades Hidrogeológicas

| Fuente | DGA (2012) | | DGA (2013b) | | DGA (2014c) | |
|-------------------------|------------|-------|-------------|-----|-------------|-----|
| | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| Acuífero Superior (m/d) | 0,001 | 300 | 0,002 | 309 | 0,017 | 2,6 |
| Acuitardo (m/d) | 1,0E-06 | 0,005 | | | | |
| Acuífero Inferior (m/d) | 1,0E-05 | 100 | 0,01 | 120 | 0,03 | 41 |

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.3-3 Rango de Coeficiente de Almacenamiento Unidades Hidrogeológicas

| Fuente | DGA (2012) | | DGA (2013b) | |
|-------------------|------------|------|-------------|------|
| | Min | Máx | Min | Máx |
| Acuífero Superior | 0,012% | 1,6% | 0,012% | 1,6% |
| Acuífero Inferior | 0,003% | 30% | 0,003% | 69% |

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Extracciones Existentes

Dentro de la superficie del SHAC de Calama, se reconocen derechos subterráneos por un total de 560 l/s, los cuales se presentan en el Cuadro 4.3-4.

Cuadro 4.3-4 Derechos Subterráneos SHAC de Calama

| Código BNA | UTM Este (m) | UTM Norte (m) | Solicitante | Q (l/s) | Acuífero Habilitado |
|----------------|--------------|---------------|---|---------|---------------------|
| ND-0202-800061 | 507.116 | 7.510.326 | Inversiones Arlequín Limitada | 30 | - |
| ND-0202-1191 | 508.861 | 7.525.280 | Codelco Chile División Radomiro Tomic | 2 | Superior |
| ND-0202-1864 | 503.460 | 7.514.207 | Compañía Contractual Minera Leonor | 73,2 | - |
| ND-0202-1864 | 503.707 | 7.514.507 | Compañía Contractual Minera Leonor | 65 | - |
| ND-0202-1864 | 504.093 | 7.514.588 | Compañía Contractual Minera Leonor | 46,8 | - |
| ND-0202-1864 | 503.711 | 7.514.146 | Compañía Contractual Minera Leonor | 70 | - |
| ND-0202-1864 | 503.839 | 7.513.955 | Compañía Contractual Minera Leonor | 65 | - |
| ND-0202-1169 | 507.818 | 7.520.969 | Corporación Nacional Del Cobre De Chile | 30 | - |
| ND-0202-1454 | 504.586 | 7.511.906 | Compañía Minera Xstrata Lomas Bayas | 35 | Superior |
| ND-0202-1061 | 503.043 | 7.515.996 | Compañía Contractual Minera Leonor | 45 | - |
| ND-0202-1057 | 503.873 | 7.514.709 | Compañía Contractual Minera Leonor | 0,7 | Inferior |
| ND-0202-1058 | 502.587 | 7.515.490 | Compañía Contractual Minera Leonor | 50 | Superior |
| ND-0202-1059 | 504.346 | 7.515.139 | Compañía Contractual Minera Leonor | 0,5 | Superior |
| ND-0202-1060 | 505.366 | 7.515.696 | Compañía Contractual Minera Leonor | 47 | Superior |

Nota: Coordenadas expresadas en Datum WGS84 19S Fuente: Elaboración propia desde registro en línea DGA de derechos y expedientes.

4.4 CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El análisis realizado a través de la revisión de antecedentes geológicos e hidrogeológicos, permitió definir seis unidades hidrogeológicas, caracterizando a las principales cuatro. De éstas, tres corresponden a unidades acuíferas que se posicionan sobre la unidad de basamento impermeable. Se identifica que la unidad denominada como acuífero inferior se encuentra confinada a lo largo de la distribución espacial del acuitardo que la sobreyace. Definidas las unidades hidrogeológicas que conforman el SHAC de Calama, se caracterizan en base a sus niveles freáticos y parámetros hidráulicos, identificándose un rango mayor de permeabilidad y almacenamiento en la unidad acuífera superior.

CAPÍTULO 5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

5.1 INTRODUCCIÓN

La caracterización hidrogeoquímica buscó determinar la calidad del agua subterránea contenida en el acuífero del SHAC de Calama, y su relación con el agua superficial. La información recabada y su análisis se presentan en los acápite siguientes.

5.2 INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE

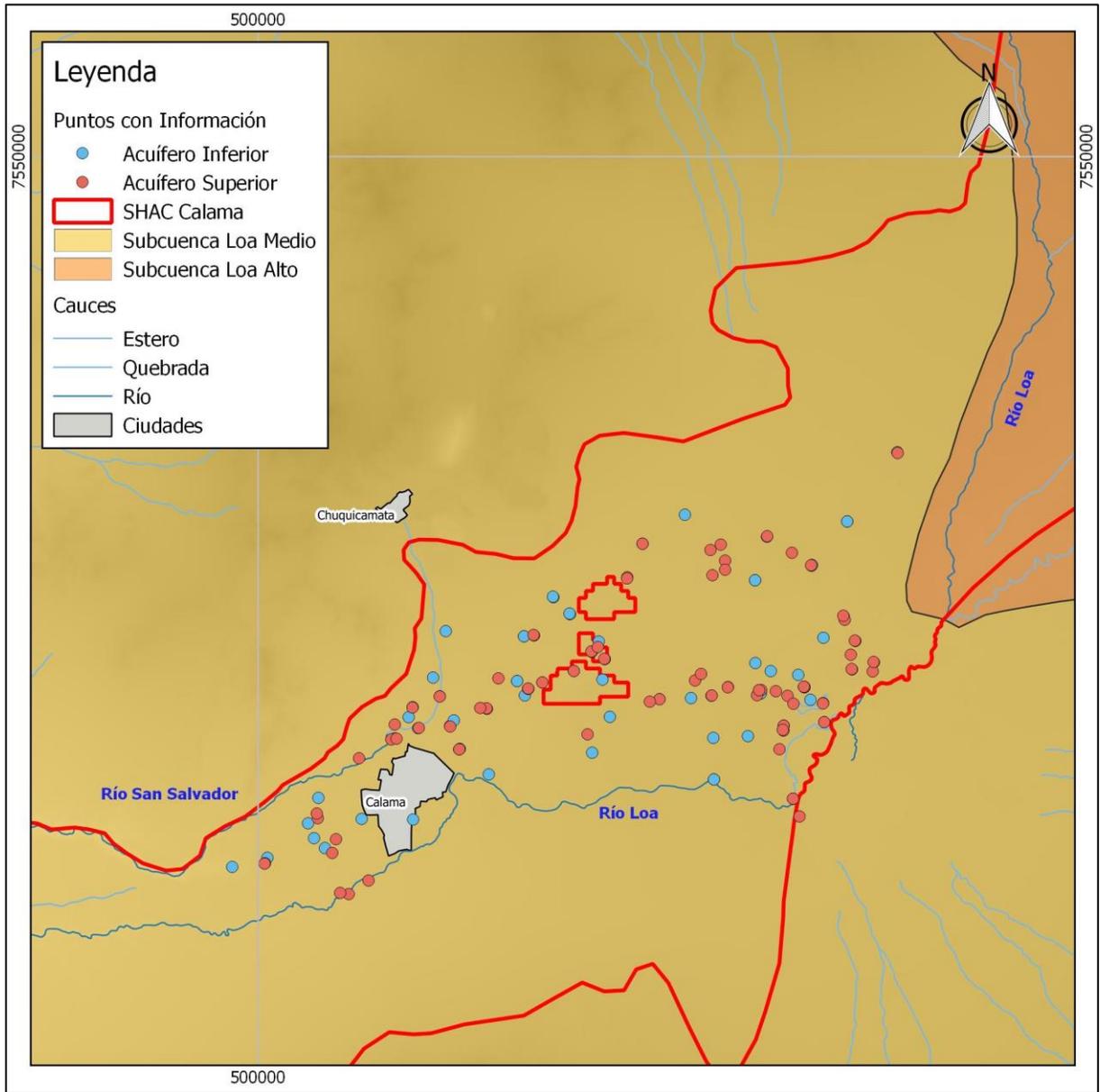
La caracterización de las aguas subterráneas se apoya en los registros de calidad mediante monitoreos físico químicos e in situ presentados en estudios previos y en base a las estaciones de control de la DGA. La distribución espacial de los puntos con información de calidad hidroquímica, y su fuente, se presenta en la Figura 5.3-1.

5.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Por medio del registro de calidad de las estaciones DGA, se construyen diagramas de Piper y Stiff de las estaciones Río Loa en Represa Lequena y Río Loa en Salida Embalse Conchi. Río Loa en Represa Lequena presenta una una calidad clorurada sódica/potásica luego de su confluencia con el río San Pedro.

Tanto el río San Pedro como el río Salado, en términos generales, poseen una composición clorurada sódica/potásica. Sin embargo, el río San Pedro posee una componente bicarbonatada importante, mientras que la carga sódica/potásica del río Salado es muy elevada.

En el caso del río Loa, se observa la composición clorurada sódica/potásico con una carga influenciada por la composición del río Salado. La situación es similar tanto para el río Loa como para el San Salvador, siendo el río San Salvador un afloramiento del acuífero superior del SHAC de Calama, con lo cual se estima la importante interacción de sus aguas con el cauce superficial.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-1 Puntos con Información de Calidad Hidroquímica

Caracterizada la calidad del agua superficial para cada acuífero, se presenta el Cuadro 5.3-1 con la información resumida mediante parámetros estadísticos.

Cuadro 5.3-1 Parámetros de Calidad Acuíferos SHAC Calama

| Parámetro | CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | | SO ₄ (mg/l) | |
|-----------|--------------------------------|----------|------------------------|----------|
| | Inferior | Superior | Inferior | Superior |
| N Datos | 47 | 68 | 56 | 89 |
| Promedio | 9.436 | 12.555 | 1.293 | 1.631 |
| Mínimo | 2.000 | 1.800 | 60 | 90 |
| Máximo | 45.000 | 80.000 | 10.000 | 17.000 |

Fuente: Elaboración propia

Se observa que las composiciones de las aguas del acuífero superior presentan una mayor concentración de sulfatos y conductividad eléctrica que el acuífero inferior. Esta diferencia se estima que radica en la interacción directa que posee el acuífero superior con las aguas del cauce superficial, las que se observaron influenciadas por la calidad clorurada sódica/potásico del río Salado.

5.4 CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Se constató la importante influencia que posee el río Salado sobre la calidad de las aguas del río Loa, que luego de su confluencia, pasan a poseer una alta carga sódica/potásica. De acuerdo a la interacción que posee el cauce superficial con el acuífero superior del SHAC de Calama, determinado en el acápite 3.4, se observó una influencia sobre su calidad al analizar los parámetros de conductividad y concentración de sulfatos. Al observar los valores que toman estos parámetros en ambos acuíferos del SHAC, se observa una mayor concentración en el superior a niveles promedio y máximos. Adicionalmente, se presentó la composición de las aguas del río San Salvador, el cual nace desde un afloramiento del acuífero superior, el cual presenta una marcada influencia de la calidad clorurada sódica/potásica que posee el cauce del río Loa luego de su confluencia con el río Salado.

CAPÍTULO 6 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL

6.1 INTRODUCCIÓN

En base a toda la información recopilada, se ha realizado la construcción del modelo conceptual del SHAC de Calama, el cual considera los siguientes componentes: geometría, flujos de entrada, salida e interacción, parámetros característicos y superficie piezométrica.

6.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS

El Cuadro 6.2-1 presenta un resumen de las principales características geométricas de cada acuífero presente en el SHAC de Calama.

Cuadro 6.2-1 Geometría Acuíferos SHAC Calama

| Unidad | Cota Techo (m s.n.m.) | Altura (m) | Superficie (Km ²) | Volumen Geométrico (Mm ³) |
|-------------------|-----------------------|------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Acuífero Superior | 2.504 | 51 | 1.048 | 54.000 |
| Acuitardo | 2.453 | 44 | 805 | 35.000 |
| Acuífero Inferior | 2.409 | 133 | 1.104 | 147.000 |
| Basamento | 2.276 | - | - | - |

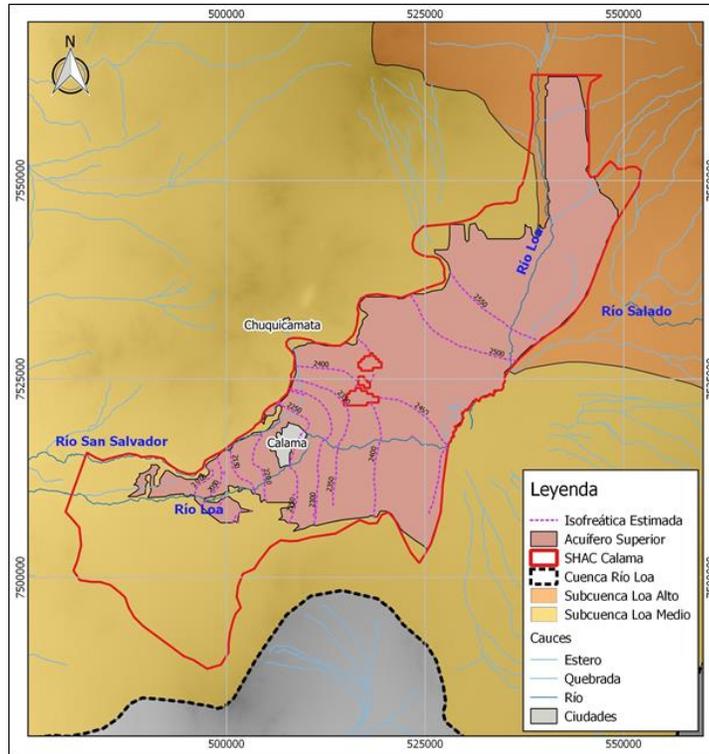
Nota: Valores presentados corresponden a valores estimados medios.

Fuente: Elaboración propia en base a datos (DGA 2014c) y Knight Piesold (2010)

Se observa que la superficie del acuitardo es menor a la de los acuíferos superior e inferior. Esta situación implica la existencia de una sola unidad acuífera en estas zonas, correspondiente a la fusión del acuífero superior e inferior, al no existir un estrato de separación entre ellos.

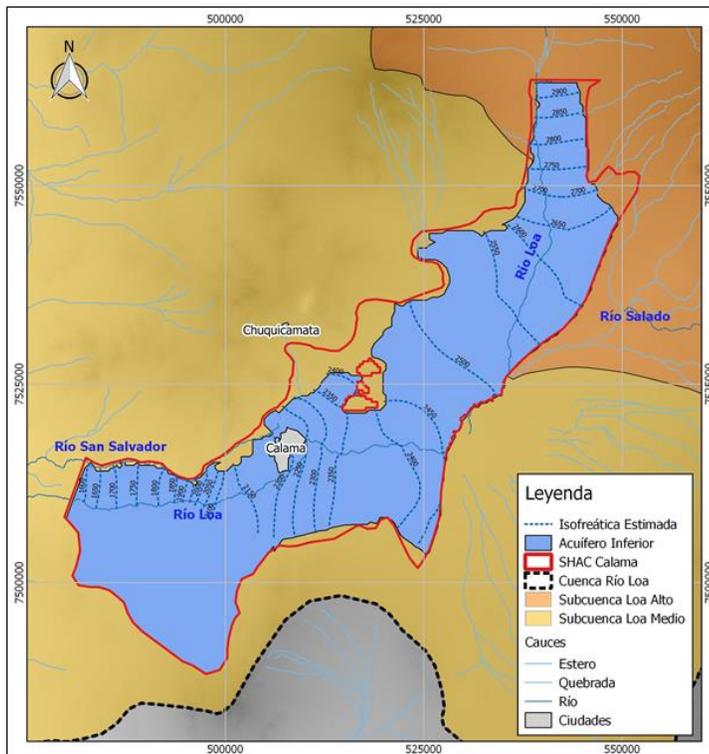
6.3 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES

Por medio de los resultados del modelo numérico de DGA (2014c), junto a valores de nivel freático actualizados al año 2010, se estiman curvas equipotenciales de los acuíferos superior e inferior obtenidos en la etapa de modelación geométrica anterior. Los resultados se presentan en las Figuras 6.3-1 y 6.3-2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.3-1 Curvas Equipotenciales – Acuífero Superior



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.3-2 Curvas Equipotenciales – Acuífero Inferior

6.4 ENTRADAS Y SALIDAS AL SISTEMA

Las principales entradas subterráneas provienen desde el norte (aguas abajo de embalse Conchi), río Salado y Pampa Llalqui, junto a infiltraciones desde el cauce superficial o riego. Por otro lado, las salidas corresponden a los afloramientos del río Loa en sector de angostura, las vertientes Likantatay y Ojos de Opache, río San Salvador, junto a la salida subterránea al límite oeste del SHAC de Calama.

6.5 BALANCE HÍDRICO

El balance final del SHAC de Calama se determinó mediante la modelación numérica de diferentes estudios de la DGA (2014b y 2014c). Los resultados se presentan en el siguiente Cuadro 6.5-1

Cuadro 6.5-1 Balance Hídrico SHAC Calama

| Flujo | Sector | Caudal (l/s) | Balance Parcial (l/s) | Balance Total (l/s) |
|----------|----------------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| Entradas | Precipitación | 34 | 1.263 | -20 |
| | Nor-oeste (flujo subt) | 189 | | |
| | Río Salado (flujo subt) | 77 | | |
| | Pampa Llalqui (flujo subt) | 395 | | |
| | Infiltración Superficial | 311 | | |
| | Inf Tranque Talabre | 20 | | |
| | Inf Riego | 76 | | |
| | Inf Agua Potable | 50 | | |
| Salidas | Afloramientos Angostura | 326 | 1.283 | |
| | Oeste | 402 | | |
| | V. Likantatay | 33 | | |
| | V. Ojos de Opache | 315 | | |
| | Río San Salvador | 207 | | |

Fuente: Elaboración propia.

6.6 INTERACCIÓN ENTRE ACUÍFEROS

A partir de los resultados del modelo numérico elaborado por DGA (2014c) fue posible estimar los flujos de vinculación entre ambos acuíferos. Utilizando la herramienta de Zone Budget se determinó un flujo desde el acuífero superior al acuitardo de 146 l/s, lo cual finalmente resulta en un aporte de 278 l/s al acuífero inferior. Considerando esto, se presentan los Cuadros 6.6-1 a 6.6-3 con el balance hídrico de cada acuífero.

Cuadro 6.6-1 Balance Hídrico Acuífero Superior

| Flujo | Sector | Caudal (l/s) | Balance Parcial (l/s) | Balance Total (l/s) |
|----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| Entradas | Precipitación | 61 | 518 | 8 |
| | Infiltración Superficial | 311 | | |
| | Inf Tranque Talabre | 20 | | |
| | Inf Riego | 76 | | |
| | Inf Agua Potable | 50 | | |
| Salidas | Afloramientos Angostura | 326 | 510 | |
| | Interacción Acuíferos | 184 | | |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6.6-2 Balance Hídrico Acuitardo

| Flujo | Sector | Caudal (l/s) | Balance Parcial (l/s) | Balance Total (l/s) |
|----------|-------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| Entradas | Interacción Ac Superior | 184 | 279 | -4 |
| | Entrada Subterránea | 49 | | |
| | Interacción Cauce | 46 | | |
| Salidas | Interacción Ac Inferior | 282 | 283 | |
| | Afloramientos | 1 | | |

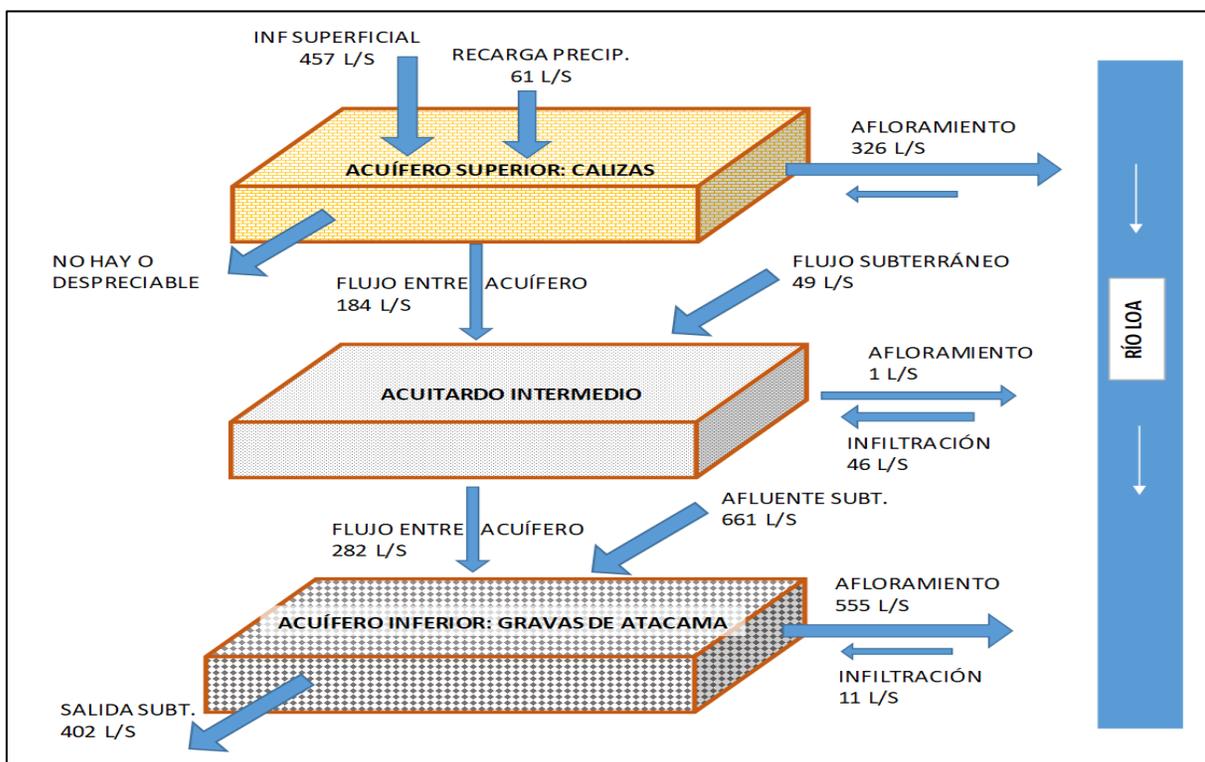
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6.6-3 Balance Hídrico Acuífero Inferior

| Flujo | Sector | Caudal (l/s) | Balance Parcial (l/s) | Balance Total (l/s) |
|----------|----------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| Entradas | Nor-oeste (flujo subt) | 189 | 954 | -3 |
| | Río Salado (flujo subt) | 77 | | |
| | Pampa Llalqui (flujo subt) | 395 | | |
| | Interacción Acuíferos | 282 | | |
| | Infiltración Superficial | 11 | | |
| Salidas | Oeste | 402 | 957 | |
| | V. Likantatay | 33 | | |
| | V. Ojos de Opache | 315 | | |
| | Río San Salvador | 207 | | |

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 6.6-1 se presenta el modelo conceptual esquemático en condiciones naturales para el SHAC de Calama, indicando los flujos de interacción entre acuíferos y cauces.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.6-1 Esquema Modelo Conceptual

6.7 CONCLUSIONES MODELO CONCEPTUAL

El desarrollo del modelo conceptual ha permitido definir las características geométricas de cada unidad acuífera dentro del SHAC de Calama. Se destaca la determinación de la extensión superficial que abarca cada unidad, sobre la cual se estimaron curvas equipotenciales.

El análisis se complementó mediante el balance hídrico general del SHAC de Calama, con el cual se identifican numéricamente los principales flujos de entrada y salida. Sobre este balance existe un cierto grado de incerteza debido a la dificultad que implica la determinación de la relación del acuífero con el sistema superficial (afloramientos e infiltraciones). Luego de la determinación general del balance, se analizó el balance interno que permitió estudiar la interacción que presentan las unidades acuíferas entre sí. De acuerdo con los resultados del modelo numérico construido por DGA (2014c), se determinó que el acuífero superior alimenta al acuífero inferior.

CAPÍTULO 7 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo presenta una propuesta de sectorización del SHAC de Calama, definida de acuerdo con la información recopilada y analizada en los capítulos anteriores.

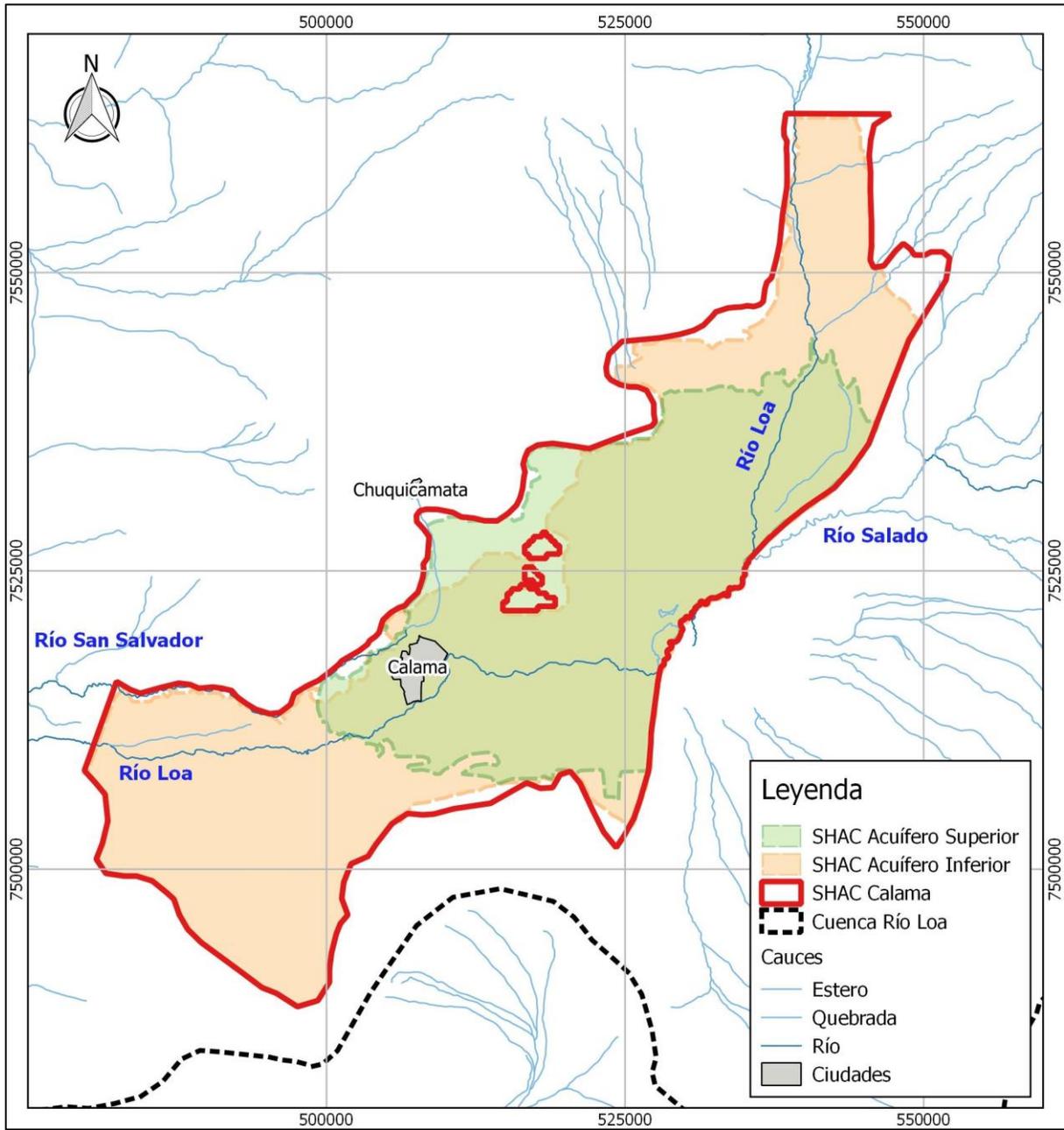
7.2 METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN

La caracterización hidrogeológica ha permitido identificar tres unidades acuíferas distribuidas verticalmente en el SHAC de Calama. Dentro de ellas, se ha determinado que la unidad intermedia o acuitardo, no presenta características hidráulicas que permitan la explotación de sus recursos hídricos, imposibilitando su definición como SHAC. Por lo tanto, se propone la subdivisión del SHAC en dos nuevos sectores que comprendan las unidades acuíferas superior e inferior. La delimitación de ambos SHAC propuestos se presenta en la Figura 7.3-1.

Se destaca que la diferenciación de los dos sectores solo se expande a la delimitación del acuitardo, tras lo cual ambos acuíferos se fusionan al no existir la unidad intermedia y se definen como el SHAC Acuífero Inferior de Calama.

7.3 CONCLUSIONES SECTORIZACIÓN

A través del desarrollo del presente estudio, se verifican las distintas etapas que presenta la metodología de sectorización acuífera planteada por DGA (2014), tras lo cual es posible estimar una sectorización vertical del SHAC de Calama. Es decir, de acuerdo a la caracterización realizada, y considerando su interacción con el acuitardo, se definen dos nuevos SHAC correspondientes al acuífero superior e inferior de Calama.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.3-1 SHAC Acuífero Superior y SHAC Acuífero Inferior

CAPÍTULO 8 DETERMINACIÓN DE OFERTA HÍDRICA

8.1 INTRODUCCIÓN

La oferta hídrica se define como el caudal de entrada natural que presenta cada acuífero y que se encuentra disponible para su utilización. En el acápite siguiente se presenta el análisis de los caudales que corresponden a la oferta hídrica de los previamente definidos SHAC Acuífero Superior de Calama y SHAC Acuífero Inferior de Calama.

8.2 DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica de cada acuífero se determina mediante el balance de los flujos naturales que se han determinado en acápites anteriores. Por lo tanto, el Cuadro 8.2-1 presenta el valor de la oferta hídrica correspondiente a cada acuífero.

Cuadro 8.2-1 Determinación Oferta Hídrica Acuífero Superior e Inferior

| Acuífero | Flujo Entrada | Q (l/s) | Oferta Hídrica (l/s) |
|----------|--------------------------|---------|----------------------|
| Superior | Precipitación | 34 | 491 |
| | Infiltración Superficial | 311 | |
| | Inf Tranque Talabre | 20 | |
| | Inf Riego | 76 | |
| | Inf Agua Potable | 50 | |
| Inferior | Nor-oeste | 189 | 939 |
| | Río Salado | 77 | |
| | Pampa Llalqui | 395 | |
| | Interacción Acuíferos | 278 | |

Fuente: Elaboración propia.

8.3 CONCLUSIONES OFERTA HÍDRICA

La obtención de la oferta hídrica se asocia a los caudales naturales de entrada que interactúan con el acuífero. En este caso, donde se presenta una sectorización vertical, es de importancia conocer los flujos que se asocian a cada uno de estos acuíferos y la interacción entre ellos. Mediante el análisis de los modelos numéricos realizados en el SHAC de Calama, se obtuvo una oferta hídrica cercana a los 490 y 940 l/s para el acuífero superior e inferior respectivamente.

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES

9.1 CONCLUSIONES GENERALES

El análisis de la información geológica e hidrogeológica permitió establecer las principales unidades hidrogeológicas con potencial acuífero. De esta forma se reconocen 4 grandes unidades: Acuífero Superior, Acuitardo, Acuífero Inferior y Basamento Impermeable.

La caracterización hidrológica del SHAC de Calama contó con registros incompletos de temperatura y precipitación, obtenidos desde las estaciones meteorológicas de la DGA, por lo cual se debió generar un relleno de la estadística hasta el año hidrológico 2016 - 2017.

La estadística rellena de precipitación presentó un régimen de mayores precipitaciones entre los meses de enero y marzo, lo cual se asocia a las lluvias altiplánicas denominadas “invierno boliviano”.

El registro de temperatura presentó una estabilidad en la estación Chiu Chiu, la cual contrasta con una mayor estacionalidad presentada por la estación ubicada en el embalse Conchi.

Mediante el registro de precipitaciones y utilizando el método de curva número, se estimó la recarga al acuífero superior del SHAC de Calama. El resultado, cercano a los 34 l/s, muestra la baja incidencia en la dinámica del sistema acuífero que presentan las precipitaciones.

Se analizó el registro fluviométrico de las estaciones de control DGA cercanas al SHAC de Calama, tras lo cual se presentaron dos observaciones de importancia. Primero, el balance realizado entre aguas arriba y aguas debajo de la ciudad de Calama, permitió estimar un caudal de infiltración desde el cauce superficial cercano a los 400 l/s. Segundo, el caudal aportante del río Salado se presenta del mismo orden de magnitud que el cauce del río Loa, lo cual se asocia a la calidad del agua aguas debajo de su confluencia.

Los registros de calidad físico química en los acuíferos superior e inferior, permitieron determinar la alta influencia del río Salado, no solo sobre las aguas superficiales, si no que sobre el sistema acuífero superior debido a la interacción directa mediante el río Loa.

Si bien los registros en el acuífero inferior se presentan menores al superior, se observa que las distribuciones de sus valores máximos se corresponden, lo cual se estima como zonas de interacción entre ambos acuíferos.

El desarrollo del modelo conceptual ha permitido definir la interacción del sistema superficial con el acuífero entregando un balance hídrico general del SHAC de Calama.

En base a la metodología de sectorización de acuíferos, se estimaron los flujos de interacción entre las unidades acuíferas dentro de la escala vertical del SHAC de Calama, determinándose que el acuífero superior alimenta en cerca de 280 l/s al inferior.

La identificación de los caudales involucrados permitió la estimación de la oferta hídrica de cada acuífero, asociada a los flujos de entrada natural de cada uno, resultando en flujos cercanos a 500 y 940 l/s para el acuífero superior e inferior respectivamente

9.2 IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS

Las principales brechas identificadas durante el desarrollo del estudio se presentan en torno al monitoreo de niveles freáticos en el SHAC de Calama.

La DGA posee en las cercanías de la ciudad de Calama dos pozos de observación, Moctezuma que se encuentra suspendido desde el año 1990 y Aeropuerto, del cual no se presentan registros desde diciembre de 2007. La falta de información en los registros de la DGA ha implicado la necesidad de apoyarse en el monitoreo de privados, de los que se ha obtenido información hasta el año 2010. Esta situación dificulta la estimación y actualización de las equipotenciales que permitan dar una visión general de la situación actual de los acuíferos del SHAC de Calama y permitan una actualización de los modelos numéricos de la zona.

A pesar del apoyo en los registros de privados, se observa que la distribución de los pozos de monitoreo se concentran cercanos a la ciudad de Calama, lo que en superficie corresponde solo al 1% del total del SHAC de Calama.

Por lo tanto, es necesario que en vista de posibles futuros estudios se realice la actualización de los registros de niveles freáticos junto con la construcción de nuevos pozos de monitoreo distribuidos aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Calama.

CAPÍTULO 10 BIBLIOGRAFÍA

Álamos y Peralta (1995), Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Calama, Realizado para: Minera Leonor.

DGA (1976), Investigación de los Recursos Hidráulicos en el Norte Grande, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: CORFO.

DGA (1986), Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: IPLA.

DGA (1987), Balance Hídrico de Chile., Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile

DGA (1995), Análisis Estudio de Extracciones de Agua Calama Quillagua, II Región, SIT N° 20, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: IPLA.

DGA (2000), Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes / Peticionario: Comunidad Atacameña San Francisco Chiu Chiu, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DARH.

DGA (2001), Análisis de la DGA con respecto a recursos de reconsideración interpuestos por la Asociación de Agricultores del Valle de Calama a autorizaciones para el traslado del ejercicio del derecho de aprovechamiento de aguas superficiales, cuenca del río Loa, informe técnico N° 123, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DARH.

DGA (2003), Determinación de los Derechos de Aprovechamiento en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región, SDT N° 153, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DARH.

DGA (2003b), Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta, SDT N° 152, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DEP.

DGA (2003c), Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca Río Loa, SIT N° 85, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DEP.

DGA (2004), Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca Río Loa, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Cade Idepe.

DGA (2005), Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa, SDT N° 192, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DARH.

DGA (2005b), Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama, Segunda Región, SDT N° 216, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DEP.

DGA (2005c), Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DICTUC.

DGA (2011), Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas S.D.T N° 317, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: DEP.

DGA (2012), Estudio Acuífero de Calama Sector Medio del Río Loa, Región de Antofagasta, SIT N° 295, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Matraz y Univ Politécnica de Cataluña.

DGA (2013), Manual Decreto Supremo N° 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (publicado en Diario Oficial 07/03/14), Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile

DGA (2013b), Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta, SIT N° 324, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Mayco.

DGA (2014), Metodología para la Delimitación y Sectorización de Acuíferos a Nivel Nacional, SIT N° 341, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: GCF.

DGA (2014b), Análisis Integrado Río Loa Región de Antofagasta, SIT N° 339, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Knight Piésold.

DGA (2014c), Sectorización de los Acuíferos de la Cuenca del Río Loa, SIT N° 358, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Knight Piésold.

DGA (2014d), Caracterización Hidrogeoquímica de la Cuenca del Loa Alto, Región de Antofagasta, Chile, SIT N° 335, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Matraz.

DGA (2016), Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos, SIT N° 400, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Hidrica.

Felipe Fuentes (2009), Simulación Hidrogeológica de la Explotación del Acuífero Freático Ubicado en la Formación Opache, II Región, Norte de Chile, Memoria para Optar al Título de Geólogo, Realizado para: Universidad de Chile.

Hidromas (2015), Anexo A - Construcción Modelo Numérico de Flujo Efecto del Drenaje del Rajo DMH, Realizado para: CODELCO.

Knight Piésold (2010), Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales, Ref. No. SA202-00039/20-14, Realizado para: CODELCO.

Montgomery & Associates (2009), Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Realizado para: Minera El Tesoro.

SERNAGEOMIN (2003), Mapa Geológico de Chile, Escala 1:1.000.000.