



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

INFORME FINAL

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 |
| 1.4 | VISIÓN DEL CONSULTOR | 4 |
| CAPÍTULO 2 | RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES | 6 |
| 2.1 | RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES | 6 |
| 2.2 | RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE | 8 |
| CAPÍTULO 3 | CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA | 9 |
| 3.1 | INTRODUCCIÓN | 9 |
| 3.2 | PLUVIOMETRÍA | 9 |
| 3.3 | TEMPERATURA | 18 |
| 3.4 | FLUVIOMETRÍA | 20 |
| 3.5 | RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO | 24 |
| 3.6 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA | 25 |
| CAPÍTULO 4 | CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA | 26 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN | 26 |
| 4.2 | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA | 26 |
| 4.2.1 | Marco Geomorfológico | 26 |
| 4.2.2 | Marco Geológico | 29 |
| 4.3 | DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA | 33 |
| 4.3.1 | Unidades Hidrogeológicas | 33 |
| 4.3.2 | Niveles Freáticos | 34 |
| 4.3.3 | Parámetros Hidráulicos | 37 |
| 4.3.4 | Extracciones Existentes | 38 |
| 4.4 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA | 40 |

| | | |
|--------------------------------|---|----|
| CAPÍTULO 5 | CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA | 41 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓN | 41 |
| 5.2 | INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE | 41 |
| 5.3 | ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN | 44 |
| 5.4 | CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA | 51 |
| CAPÍTULO 6 | DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL | 53 |
| 6.1 | INTRODUCCIÓN | 53 |
| 6.2 | DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS | 53 |
| 6.3 | GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES | 57 |
| 6.4 | ENTRADAS Y SALIDAS AL SISTEMA | 59 |
| 6.5 | BALANCE HÍDRICO | 59 |
| 6.6 | INTERACCIÓN ENTRE ACUÍFEROS | 60 |
| 6.7 | CONCLUSIONES MODELO CONCEPTUAL | 62 |
| CAPÍTULO 7 | PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN | 64 |
| 7.1 | INTRODUCCIÓN | 64 |
| 7.2 | METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN | 64 |
| 7.3 | CONCLUSIONES SECTORIZACIÓN | 67 |
| CAPÍTULO 8 | DETERMINACIÓN DE OFERTA HÍDRICA | 68 |
| 8.1 | INTRODUCCIÓN | 68 |
| 8.2 | DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA | 68 |
| 8.3 | CONCLUSIONES OFERTA HÍDRICA | 68 |
| CAPÍTULO 9 | CONCLUSIONES | 69 |
| 9.1 | CONCLUSIONES GENERALES | 69 |
| 9.2 | IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS | 70 |
| CAPÍTULO 10 | BIBLIOGRAFÍA | 72 |
| ANEXOS | | |
| ANEXO A FICHAS DE ANTECEDENTES | | |
| ANEXO B PLUVIOMETRÍA | | |
| ANEXO C TEMPERATURA | | |
| ANEXO D FLUVIOMETRÍA | | |

CUADROS

| | | |
|--------------|--|----|
| Cuadro 2.1-1 | Listado de Antecedentes Consultados..... | 6 |
| Cuadro 3.2-1 | Estaciones Meteorológicas Utilizadas..... | 9 |
| Cuadro 3.2-2 | Precipitación Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa..... | 12 |
| Cuadro 3.2-3 | Probabilidad de Excedencia – Conchi Embalse..... | 14 |
| Cuadro 3.2-4 | Probabilidad de Excedencia – Conchi Muro Embalse..... | 15 |
| Cuadro 3.2-5 | Probabilidad de Excedencia – Chiu Chiu..... | 16 |
| Cuadro 3.2-6 | Probabilidad de Excedencia – Calama..... | 17 |
| Cuadro 3.3-1 | Temperatura Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa..... | 18 |
| Cuadro 3.4-1 | Estaciones Fluviométricas Cuenca Río loa..... | 20 |
| Cuadro 3.4-2 | Balance Cauce Río Loa..... | 24 |
| Cuadro 3.5-1 | Recarga por precipitación Cuenca Río Loa..... | 24 |
| Cuadro 3.5-2 | Recarga por Precipitación SHAC Calama..... | 25 |
| Cuadro 4.3-1 | Profundidad Nivel Freático Medio Anual SHAC Calama..... | 35 |
| Cuadro 4.3-2 | Rango de Permeabilidad Unidades Hidrogeológicas..... | 37 |
| Cuadro 4.3-3 | Rango de Coeficiente de Almacenamiento Unidades Hidrogeológicas..... | 37 |
| Cuadro 4.3-4 | Derechos Subterráneos SHAC de Calama..... | 38 |
| Cuadro 5.3-1 | Parámetros de Calidad Acuíferos SHAC Calama..... | 47 |
| Cuadro 6.2-1 | Geometría Acuíferos SHAC Calama..... | 53 |
| Cuadro 6.5-1 | Balance Hídrico SHAC Calama..... | 60 |
| Cuadro 6.6-1 | Balance Hídrico Acuífero Superior..... | 61 |
| Cuadro 6.6-2 | Balance Hídrico Acuitardo..... | 61 |
| Cuadro 6.6-3 | Balance Hídrico Acuífero Inferior..... | 61 |
| Cuadro 8.2-1 | Determinación Oferta Hídrica Acuífero Superior e Inferior..... | 68 |

FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 1.3-1 | Ubicación Cuenca Río Loa | 3 |
| Figura 1.4-1 | Esquema Modelo Conceptual Cualitativo..... | 5 |
| Figura 3.2-1 | Ubicación Estaciones Meteorológicas Utilizadas..... | 11 |
| Figura 3.2-2 | Curvas Isoyetas Media Anual Cuenca Río Loa..... | 13 |
| Figura 3.2-3 | Curvas de Variación Estacional – Conchi Embalse | 14 |
| Figura 3.2-4 | Curvas de Variación Estacional – Conchi Muro Embalse | 15 |
| Figura 3.2-5 | Curvas de Variación Estacional – Chiu Chiu | 16 |
| Figura 3.2-6 | Curvas de Variación Estacional – Calama..... | 17 |
| Figura 3.3-1 | Estadística Media Mensual de Temperatura – Conchi Embalse..... | 19 |
| Figura 3.3-2 | Estadística Media Mensual de Temperatura – Chiu Chiu | 19 |
| Figura 3.4-1 | Ubicación Estaciones Fluviométricas Utilizadas | 21 |
| Figura 3.4-2 | Registro Fluviométrico Río Salado | 22 |
| Figura 3.4-3 | Registro Fluviométrico Río Loa Aguas Arriba Calama | 22 |
| Figura 3.4-4 | Registro Fluviométrico Río Loa Aguas Abajo Calama..... | 23 |
| Figura 3.4-5 | Registro Fluviométrico Río San Salvador Antes Junta Río Loa | 23 |
| Figura 4.2-1 | Unidades Geomorfológicas Cuenca Río Loa | 28 |
| Figura 4.2-2 | Formaciones Geológicas SHAC Calama | 30 |
| Figura 4.2-3 | Esquema General de Geología Cuenca Río Loa | 32 |
| Figura 4.3-1 | Pozos con Información de Nivel Freático..... | 36 |
| Figura 4.3-2 | Derechos Subterráneos SHAC Calama | 39 |
| Figura 5.2-1 | Estaciones DGA de Calidad Superficial Cuenca Río Loa | 42 |
| Figura 5.2-2 | Puntos con Información de Calidad Hidroquímica | 43 |
| Figura 5.3-1 | Diagramas Calidad Agua Superficial Loa Alto | 44 |
| Figura 5.3-2 | Diagramas Calidad Agua Superficial Afluentes Loa Alto | 45 |
| Figura 5.3-3 | Diagramas Calidad Agua Superficial Loa Medio..... | 46 |
| Figura 5.3-4 | Concentración Sulfatos Acuífero Inferior..... | 48 |
| Figura 5.3-5 | Concentración Sulfatos Acuífero Superior | 49 |
| Figura 5.3-6 | Conductividad Eléctrica Acuífero Inferior | 50 |
| Figura 5.3-7 | Conductividad Eléctrica Acuífero Superior | 51 |
| Figura 6.2-1 | Geometría – Acuífero Superior | 54 |
| Figura 6.2-2 | Geometría – Acuitardo..... | 55 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 6.2-3 | Geometría – Acuífero Inferior..... | 56 |
| Figura 6.3-1 | Curvas Equipotenciales – Acuífero Superior..... | 57 |
| Figura 6.3-2 | Curvas Equipotenciales – Acuífero Inferior..... | 58 |
| Figura 6.6-1 | Esquema Modelo Conceptual..... | 62 |
| Figura 7.2-1 | Esquema Modelo Conceptual Cualitativo..... | 65 |
| Figura 7.2-2 | SHAC Acuífero Superior y SHAC Acuífero Inferior..... | 66 |

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.

Debido a lo anterior, es indispensable conocer la disponibilidad de agua subterránea en cada acuífero, principalmente en aquellas cuencas prioritarias para la autoridad.

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).

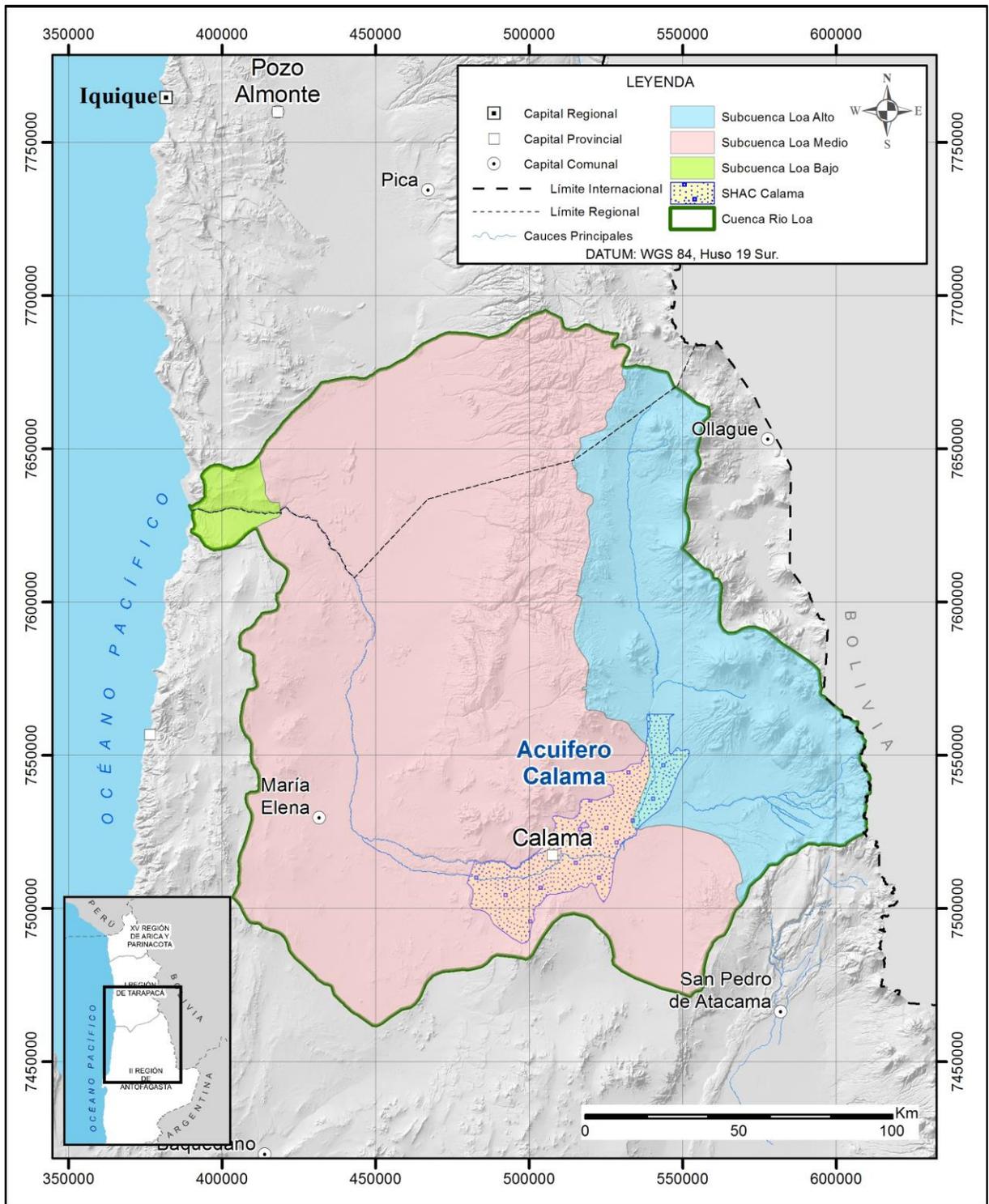
- Elaboración de propuesta de sectores hidrogeológicos en planta y en profundidad para los acuíferos del SHAC de Calama.

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 descritas a continuación.

- Río Loa Alto (bajo junta Río Salado): corresponde a la subcuenca asociada a los ríos Loa en su primer tramo, San Pedro y Salado. El río Loa fluye en dirección sur desde su nacimiento a los pies del volcán Miño, mientras que los ríos San Pedro y Salado fluyen de oriente a poniente.
- Loa Medio (entre R. Salado y Q. Amarga): corresponde a la cuenca aportante al río Loa en su tramo medio, incluyendo como afluentes principales el río San Salvador y la quebrada Amarga. En este tramo, el río Loa fluye en dirección poniente hasta su junta con el río San Salvador, donde continúa su recorrido hacia el norte hasta encontrarse con la quebrada Amarga que aporta desde el nor-oriente.
- Loa Bajo (entre Q. Amarga y Desembocadura): corresponde a la cuenca aportante al último tramo del río Loa, el cual luego del aporte de la quebrada Amarga fluye en dirección poniente hasta su desembocadura.

La superficie total de la cuenca es de aproximadamente 33.000 km², de los cuales la mayor parte corresponde al sector más desértico, en que las precipitaciones son escasas a nulas. En este contexto se ubica 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

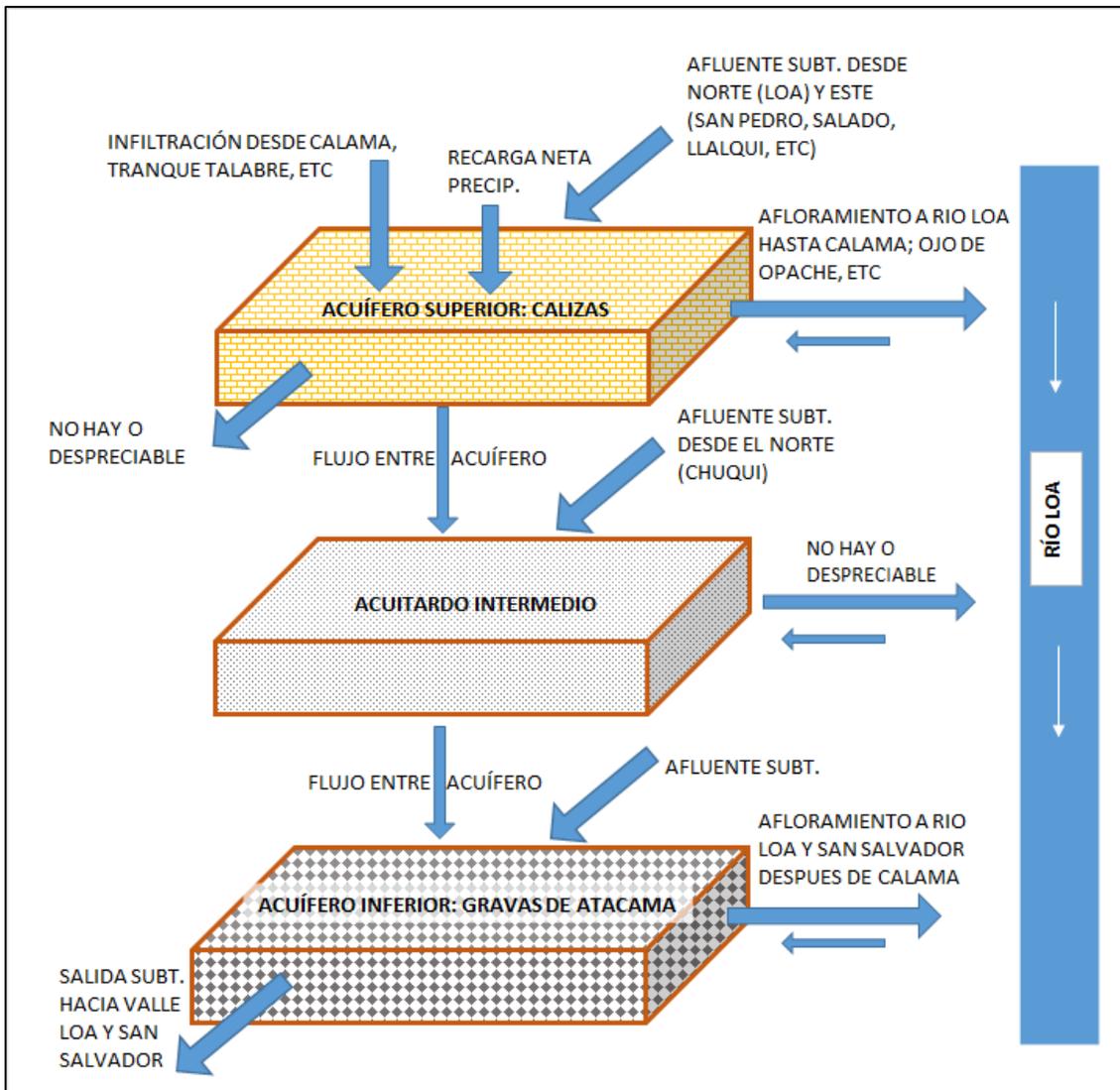
1.4 VISIÓN DEL CONSULTOR

El objetivo principal del estudio licitado se refiere a desarrollar una propuesta de sectorización hidrogeológica en profundidad para los acuíferos del SHAC de Calama, así como determinar la posible conexión hidráulica entre estos. También, a juicio de este consultor, es muy importante establecer claramente y cuantificar las interconexiones con las aguas superficiales de la zona.

En general, los aportes de agua al río Loa son generados principalmente por las decenas de vertientes a lo largo de su trayecto, principalmente en su zona alta, mientras que sus afluentes principales corresponden a los ríos San Pedro y Salado junto a otras quebradas menores desde su vertiente oriental. A pesar de su gran longitud y área aportante, los recursos hídricos de la cuenca del río Loa son muy limitados debido a las condiciones desérticas y escasa precipitación. Por lo tanto, el uso del agua, particularmente en la zona intermedia del río Loa (SHAC Calama), es de gran importancia para el desarrollo de la región, principalmente la industria minera que posee la mayor parte de los derechos de agua otorgados en la cuenca.

En orden a abordar en forma exitosa el presente estudio, es necesario destacar dos hechos fundamentales; uno se refiere a la importancia estratégica del acuífero asociado a este SHAC, como ya se ha mencionado y muy reconocido por todos los actores de la zona. Otro hecho relevante se refiere a que este sistema acuífero presenta una particular complejidad dada principalmente por las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas, que son muy determinantes en la dinámica de este sistema, y la existencia de varias unidades acuíferas interrelacionadas entre sí y con el resto de las aguas.

Dada la experiencia de este consultor en este sistema hídrico, y de sus principales especialistas, el diagrama siguiente (Figura 1.4-1) presenta un esquema conceptual cualitativo que involucra a los tres principales acuíferos presentes y sus interacciones internas y externas. Sobre la base de este esquema conceptual se desarrollará el presente estudio, ahondando en sus particularidades, propiedades hidrogeológicas y cuantificando los flujos correspondientes, para generar un cabal entendimiento y particularidades de este SHAC.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1.4-1 Esquema Modelo Conceptual Cualitativo

CAPÍTULO 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes se enfocó en la caracterización hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del río Loa y en particular, del sector comprendido por el SHAC de Calama.

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. A cada uno de ellos se le ha realizado una ficha resumen con los principales resultados referentes al objetivo del estudio, las que pueden ser consultadas en el Anexo A.

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 / Petionario: 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 |

| Ref | Documento | Año | Elaborado | Autor |
|-----|---|------|---------------------------------------|----------------------|
| 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 N° 85 | 2003 | DEP | DGA |
| 11 | Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta, SDT N° 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 N° 216 | 2005 | DEP | DGA |
| 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 | Hídrica 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. Se debe tener en cuenta que 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. Dentro de la información recabada se encuentra estadística de precipitaciones y temperatura obtenidas desde las estaciones meteorológicas y caudal pasante por las estaciones fluviométricas que posee la DGA en la cuenca del río Loa. Información de calidad y parámetros hidrogeológicos de los acuíferos han sido obtenidos desde los estudios desarrollados por la DGA, mientras que 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 el presente capítulo se describe la metodología utilizada en la caracterización hidrológica de la cuenca del río Loa. 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. Sin embargo, para tener una visión más completa de la variabilidad espacial, se incluyeron estaciones relevantes de sectores más alejados.

3.2 PLUVIOMETRÍA

Son consideradas las estaciones meteorológicas que posee la DGA en la zona y que de acuerdo a DGA (2016) 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, mientras que su distribución espacial se observa en la Figura 3.2-1.

Cuadro 3.2-1 Estaciones Meteorológicas Utilizadas

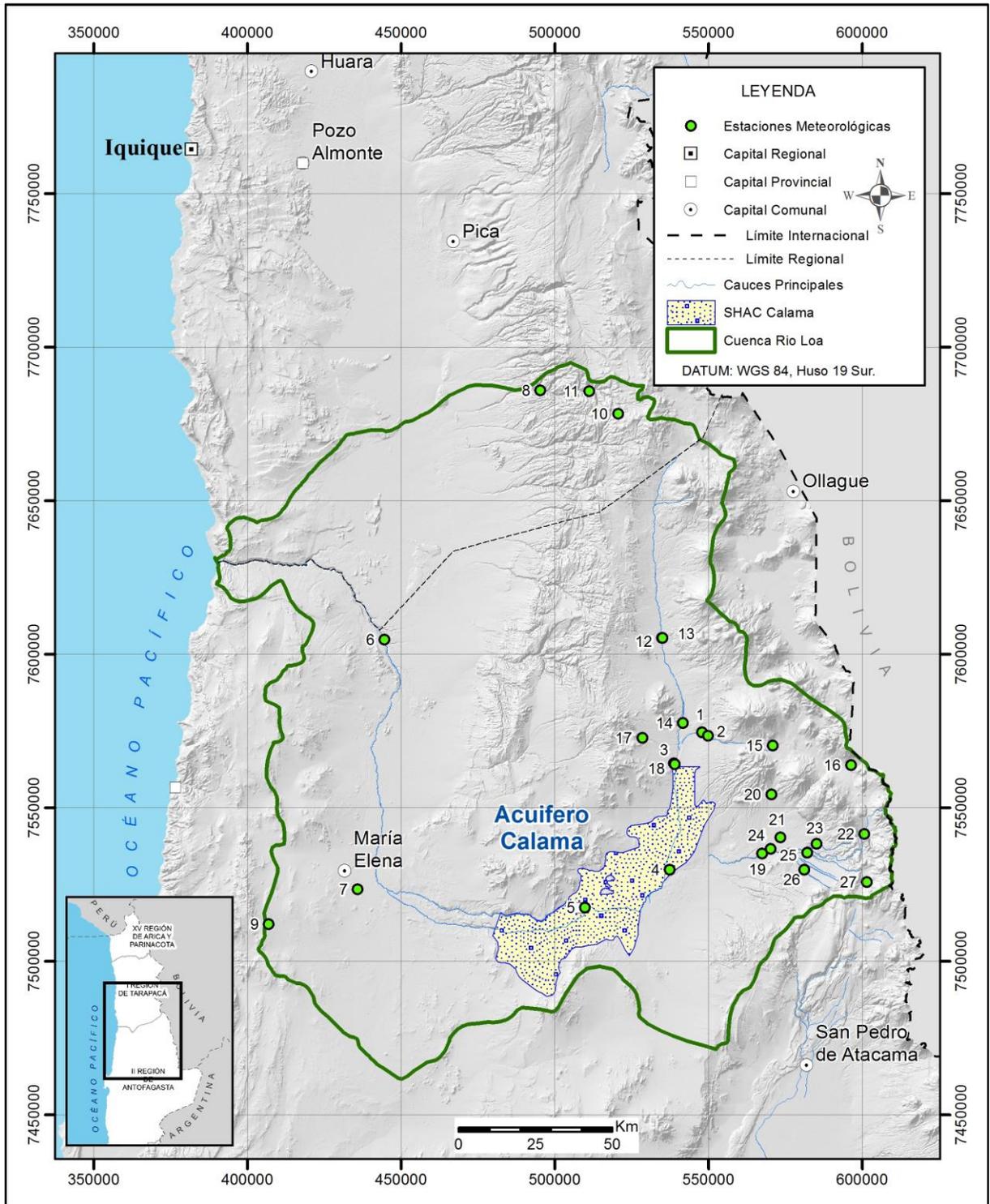
| Identificación | | | Coordenadas UTM | | | T° (*) |
|----------------|------------|-------------------------------|-----------------|-----------|--------------------|------------|
| N | BNA | Nombre | Este (m) | Norte (m) | Cota (m s.n.m.) | |
| 1 | 02103007-4 | San Pedro de Conchi | 547.876 | 7.574.483 | 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 | |

| Identificación | | | Coordenadas UTM | | | T° (*) |
|----------------|------------|-----------------------------|-----------------|-----------|--------------------|------------|
| N | BNA | Nombre | Este (m) | Norte (m) | Cota (m s.n.m.) | |
| 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 | |
| 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 registro de las estaciones meteorológicas ha sido completado al mes de abril de 2017 desde lo presentado por DGA (2016), mediante la actualización de los registros con información oficial de la DGA y por medio del relleno de acuerdo a los parámetros expuestos en DGA (2016). La estadística rellena se presenta en el Anexo B, mientras que el Cuadro 3.2-2 muestra los valores de precipitación media mensual y anual de las estaciones analizadas.



Fuente: Elaboración Propia

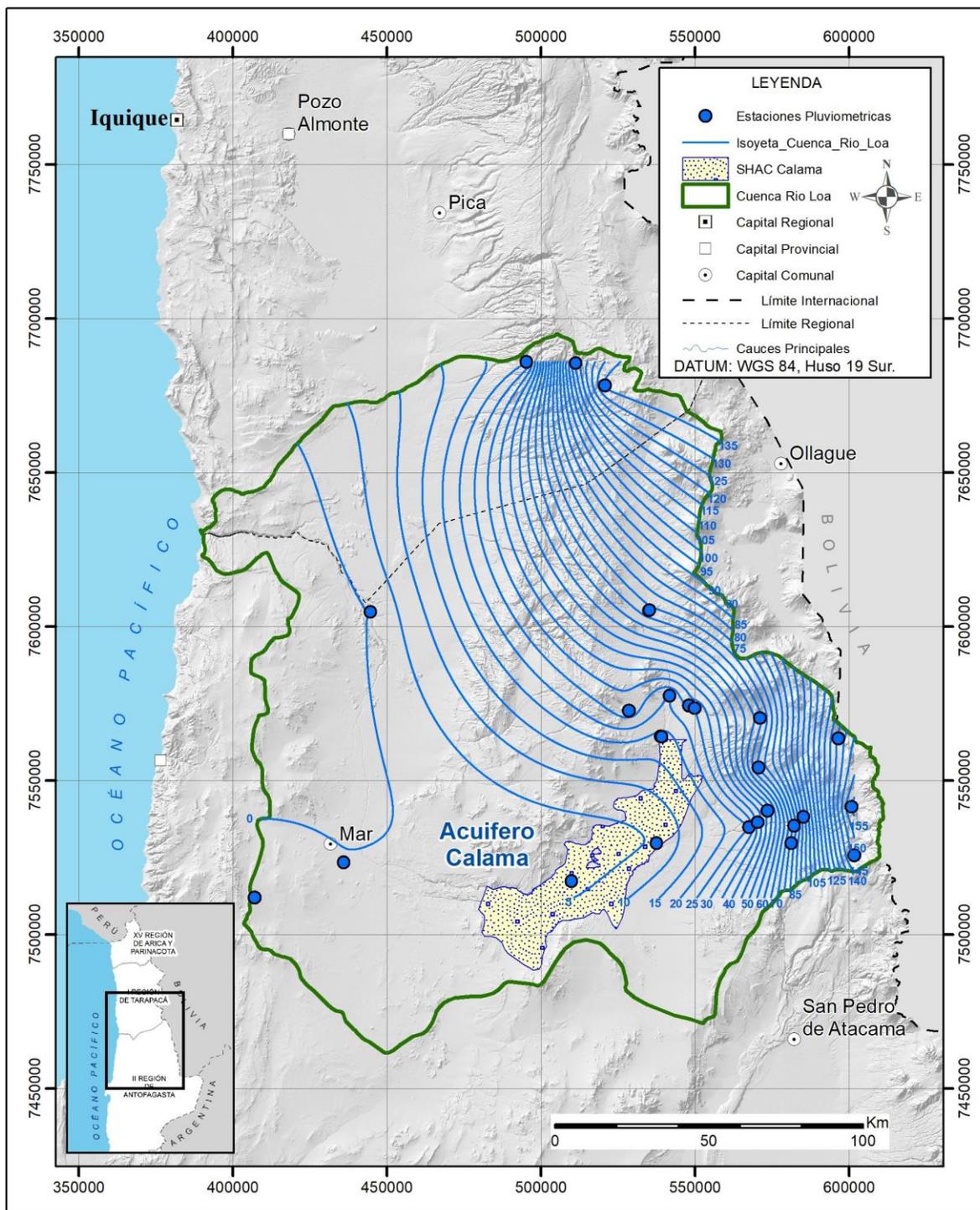
Figura 3.2-1 Ubicación Estaciones Meteorológicas Utilizadas

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.

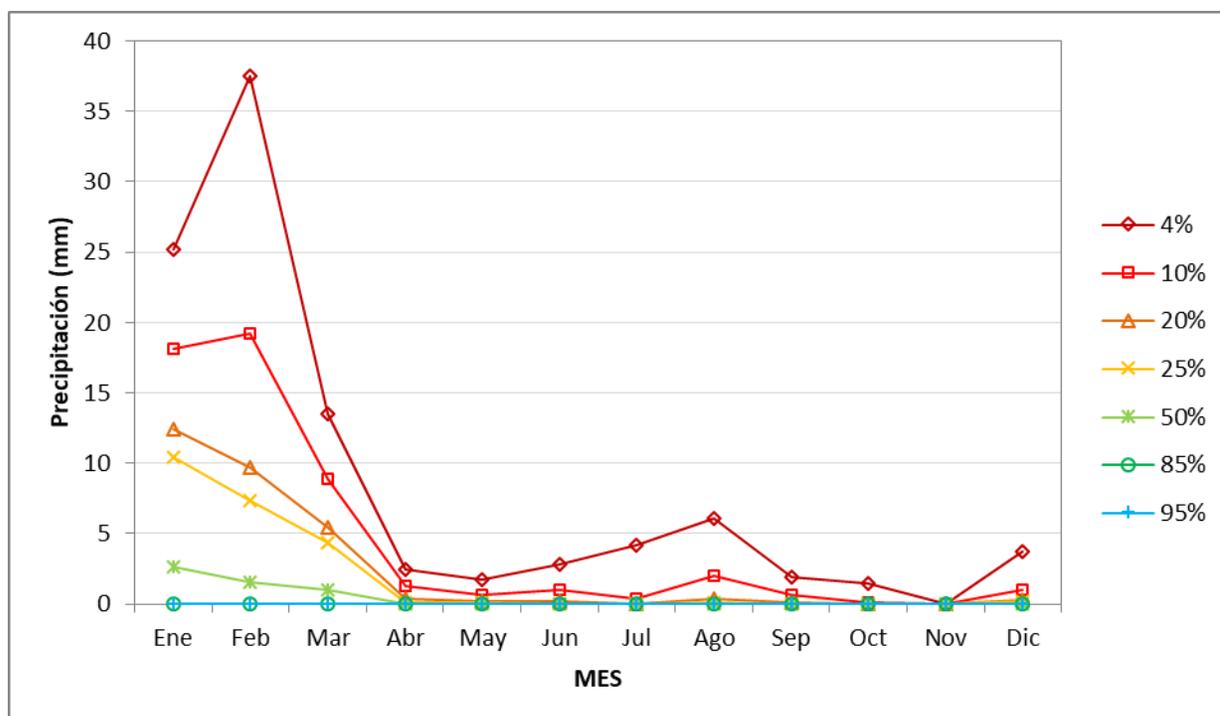
Con los registros actualizados y rellenos de las estaciones pluviométricas, se construyeron curvas isoyetas con la precipitación media anual para caracterizar la pluviometría de la cuenca del río Loa, la cual se presenta en la Figura 3.2-2.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-2 Curvas Isoyetas Media Anual Cuenca Río Loa

Posteriormente, la estadística fue utilizada en la construcción de curvas de variación estacional para cada estación analizada, con lo cual es posible estimar la precipitación media sobre el SHAC de Calama para diferentes periodos de retorno. Las Figuras 3.2-3 a 3.2-6 y los Cuadros 3.2-3 a 3.2-6 presentan las curvas desarrolladas, y sus valores, para las estaciones ubicadas dentro de la delimitación del SHAC de Calama, mientras que la totalidad del análisis se presenta en el Anexo B.



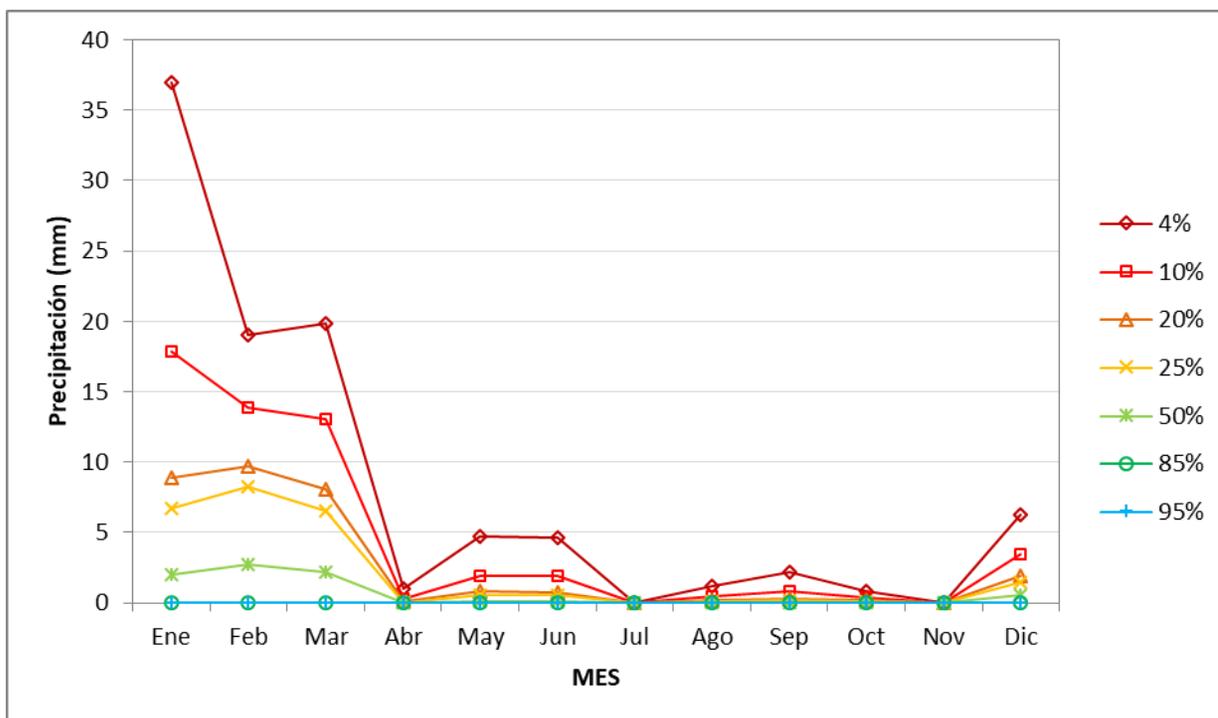
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-3 Curvas de Variación Estacional – Conchi Embalse

Cuadro 3.2-3 Probabilidad de Excedencia – Conchi Embalse

| Pex | 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) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 4% | 25,2 | 37,5 | 13,5 | 2,4 | 1,7 | 2,9 | 4,2 | 6,1 | 1,9 | 1,5 | 0,0 | 3,7 | 67,8 |
| 10% | 18,2 | 19,2 | 8,9 | 1,2 | 0,6 | 1,0 | 0,3 | 2,0 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | 1,0 | 43,8 |
| 20% | 12,5 | 9,7 | 5,5 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 29,0 |
| 25% | 10,4 | 7,4 | 4,4 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 24,8 |
| 50% | 2,6 | 1,6 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,0 |
| 85% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,5 |
| 95% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,5 |

Fuente: Elaboración Propia



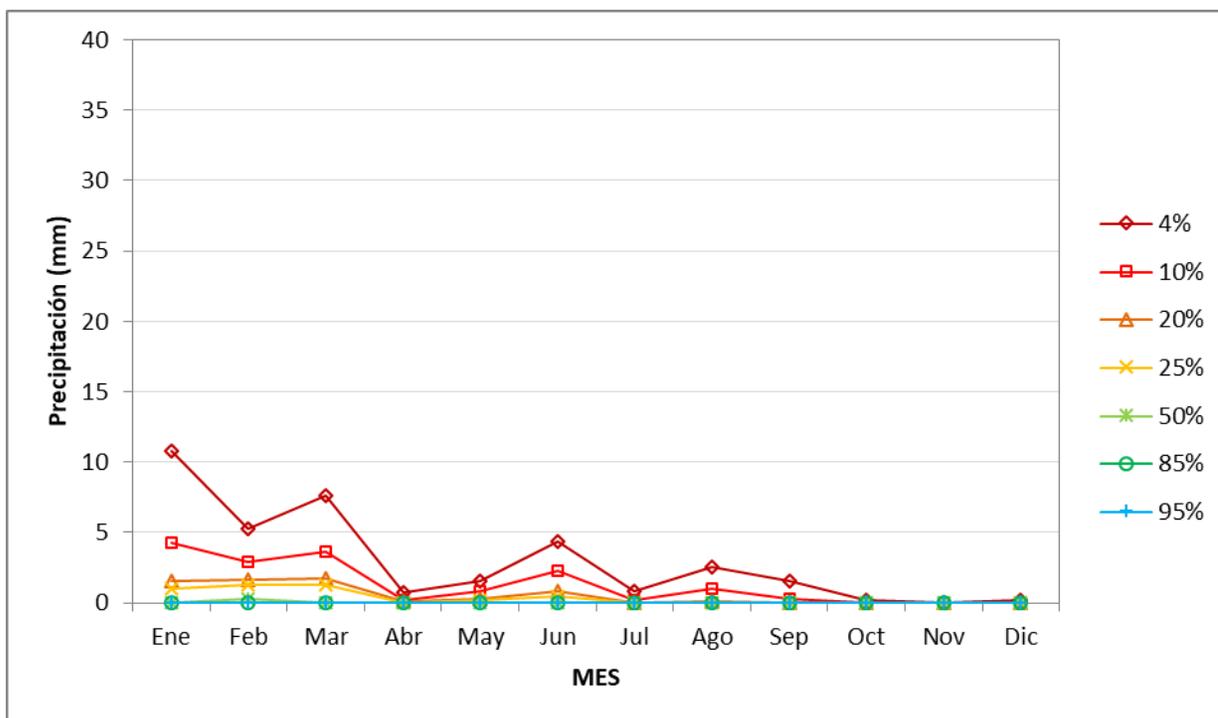
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-4 Curvas de Variación Estacional – Conchi Muro Embalse

Cuadro 3.2-4 Probabilidad de Excedencia – Conchi Muro Embalse

| Pex | 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) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 4% | 37,0 | 19,0 | 19,8 | 1,0 | 4,7 | 4,6 | - | 1,2 | 2,2 | 0,8 | - | 6,3 | 48,7 |
| 10% | 17,9 | 13,9 | 13,0 | 0,3 | 1,9 | 1,9 | - | 0,4 | 0,8 | 0,4 | - | 3,4 | 37,6 |
| 20% | 8,9 | 9,7 | 8,1 | 0,1 | 0,8 | 0,8 | - | 0,2 | 0,3 | 0,2 | - | 1,9 | 28,2 |
| 25% | 6,7 | 8,2 | 6,6 | 0,0 | 0,6 | 0,5 | - | 0,1 | 0,2 | 0,1 | - | 1,5 | 24,9 |
| 50% | 2,0 | 2,7 | 2,2 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,5 | 14,0 |
| 85% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 4,2 |
| 95% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 1,4 |

Fuente: Elaboración Propia



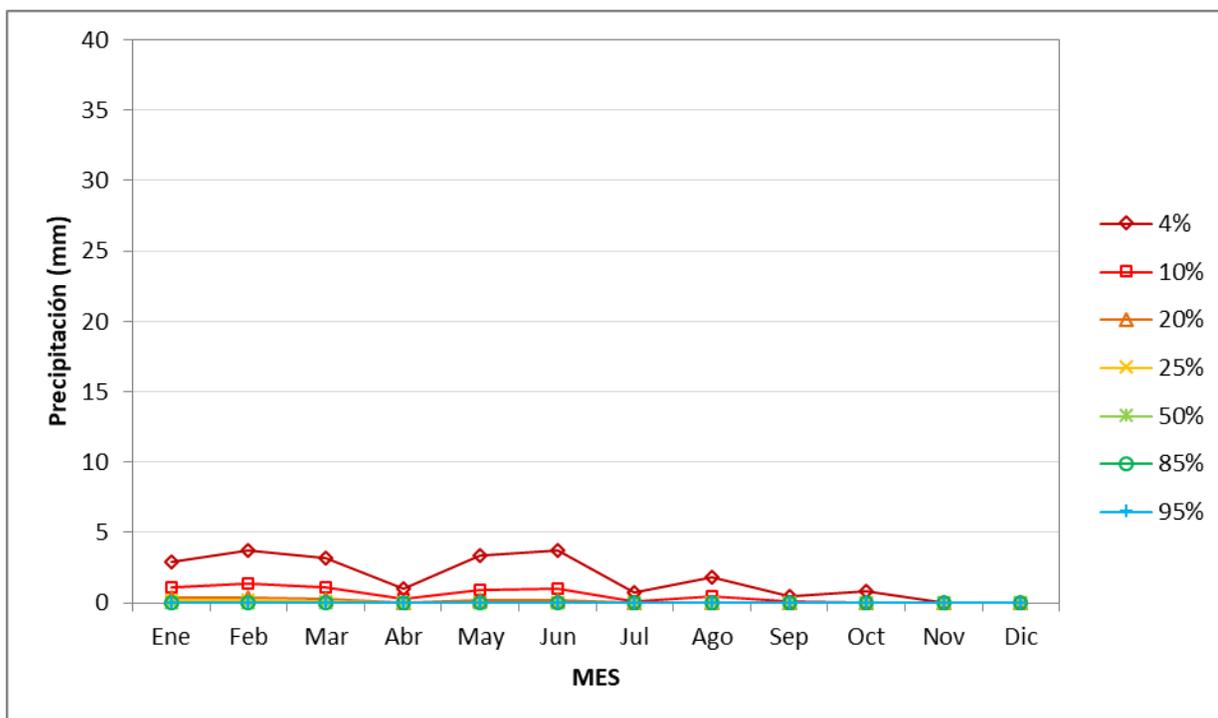
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-5 Curvas de Variación Estacional – Chiu Chiu

Cuadro 3.2-5 Probabilidad de Excedencia – Chiu Chiu

| Pex | 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) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 4% | 10,8 | 5,3 | 7,6 | 0,8 | 1,6 | 4,3 | 0,8 | 2,6 | 1,5 | 0,1 | - | 0,2 | 19,1 |
| 10% | 4,3 | 2,9 | 3,6 | 0,2 | 0,8 | 2,3 | 0,2 | 1,0 | 0,3 | 0,0 | - | 0,0 | 12,6 |
| 20% | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 8,5 |
| 25% | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 7,3 |
| 50% | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 3,8 |
| 85% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 0,9 |
| 95% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | 0,0 | 0,0 |

Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2-6 Curvas de Variación Estacional – Calama

Cuadro 3.2-6 Probabilidad de Excedencia – Calama

| Pex | 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) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| 4% | 2,9 | 3,7 | 3,2 | 1,0 | 3,4 | 3,7 | 0,7 | 1,8 | 0,5 | 0,8 | - | - | 18,6 |
| 10% | 1,1 | 1,3 | 1,1 | 0,2 | 0,9 | 1,0 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,0 | - | - | 9,9 |
| 20% | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - | 5,4 |
| 25% | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - | 4,3 |
| 50% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - | 1,4 |
| 85% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - | 0,0 |
| 95% | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - | 0,0 |

Fuente: Elaboración Propia

La serie de curvas de variación estacional presentadas 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.

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. El registro de cada estación ha sido rellenado a la fecha de abril de 2017 desde lo presentado en DGA (2016), el cual es posible consultar en el Anexo C. 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.

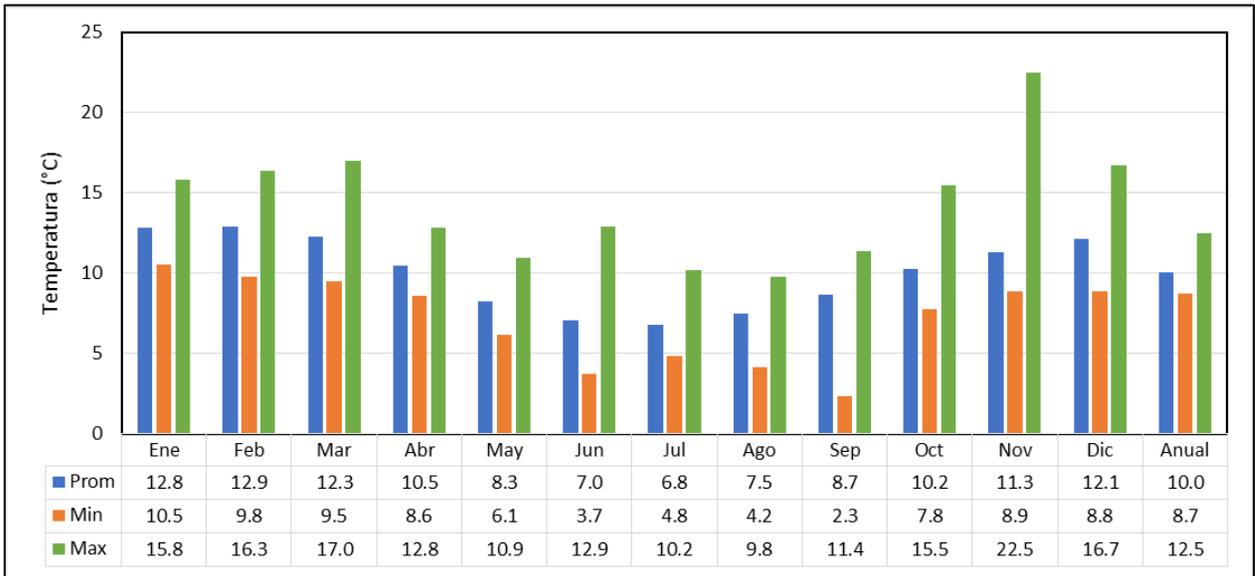
Cuadro 3.3-1 Temperatura Media Mensual y Anual Estaciones Cuenca Río Loa

| 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

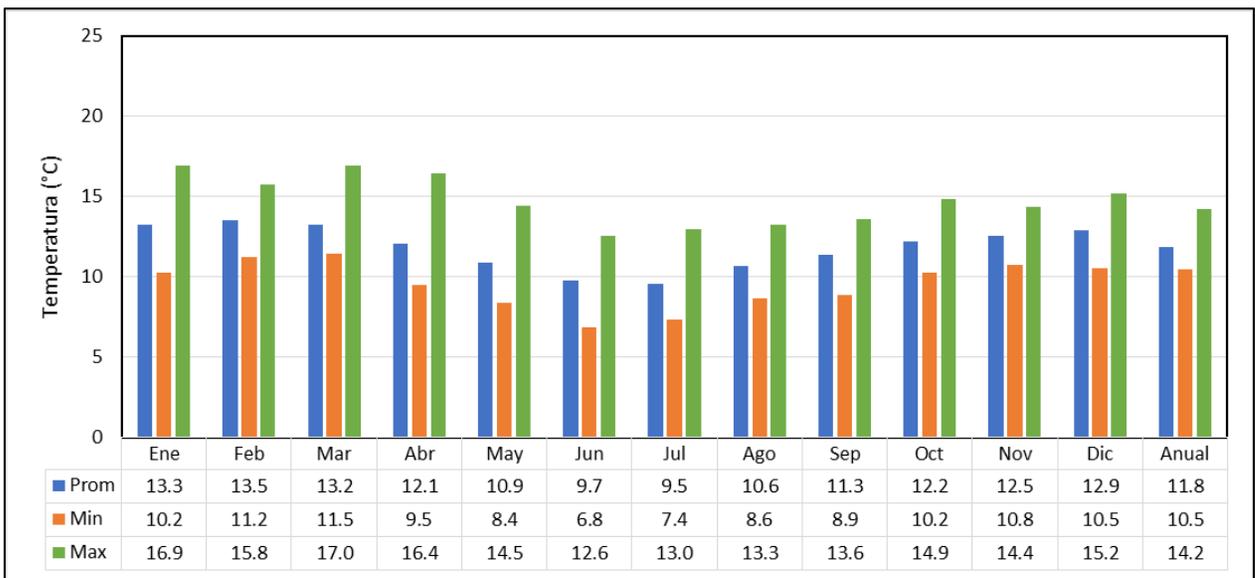
Para observar en mayor detalle la variación de temperatura en el SHAC de Calama, se presentan las Figuras 3.3-1 y 3.3-2 con el registro estadístico de las estaciones ubicadas dentro de su delimitación. El análisis para la totalidad de las estaciones se encuentra en el Anexo C.

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. La diferencia de cota altimétrica es la causante de esta diferencia que también afecta a los registros de precipitación, estableciéndose una mayor afectación por parte del denominado “invierno altiplánico”. Sin embargo, a efectos medios anuales, ambas estaciones presentan un registro en torno a los 10°C con una temperatura levemente mayor en la estación Chiu Chiu.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.3-1 Estadística Media Mensual de Temperatura – Conchi Embalse



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.3-2 Estadística Media Mensual de Temperatura – Chiu Chiu

3.4 FLUVIOMETRÍA

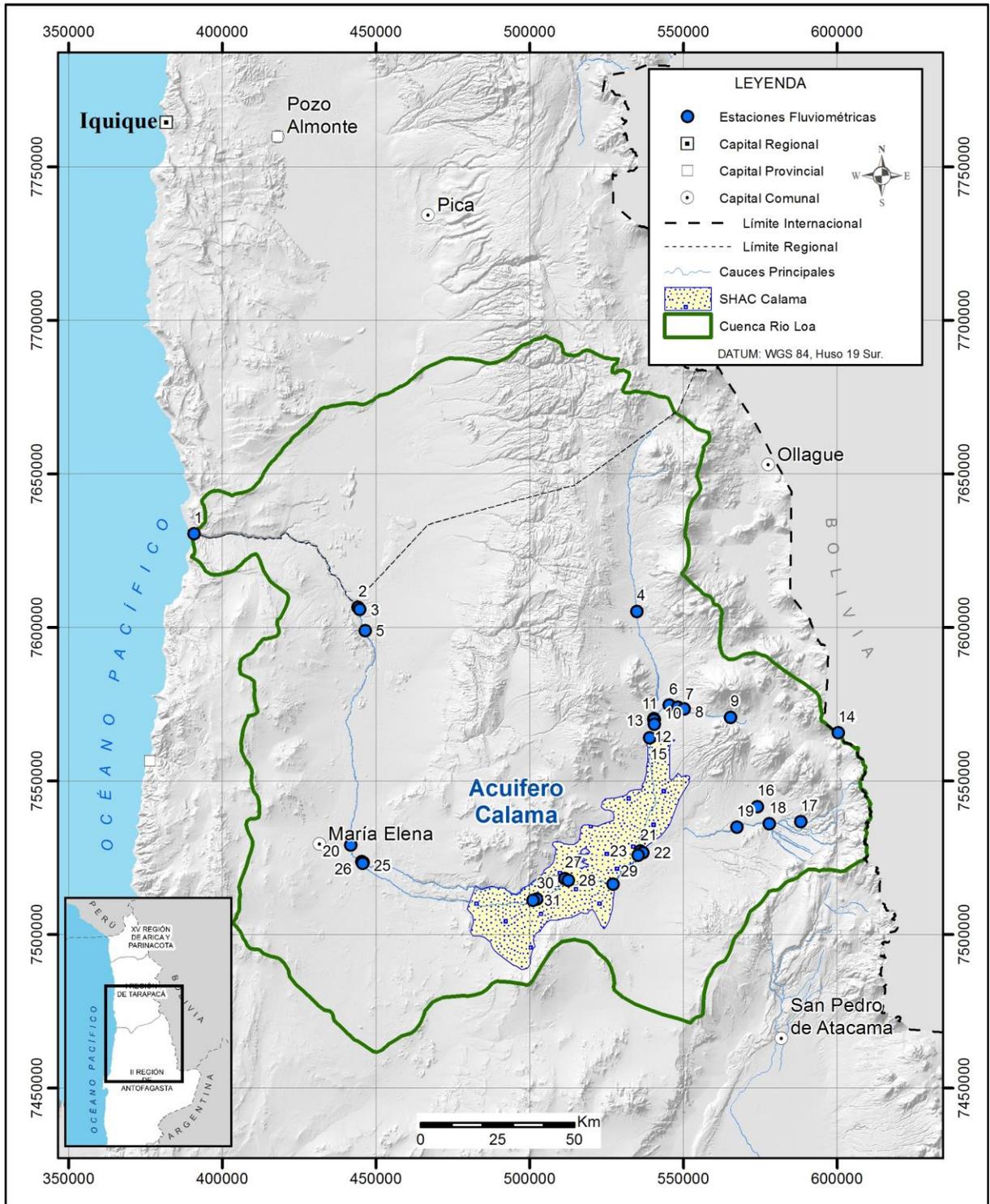
La caracterización fluviométrica se realizó mediante la información disponible actualizada al mes de abril de 2017 de las estaciones que posee la DGA en el curso del cauce del río Loa. Las estaciones analizadas son presentadas en el Cuadro 3.4-1, mientras que su distribución espacial se observa en la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

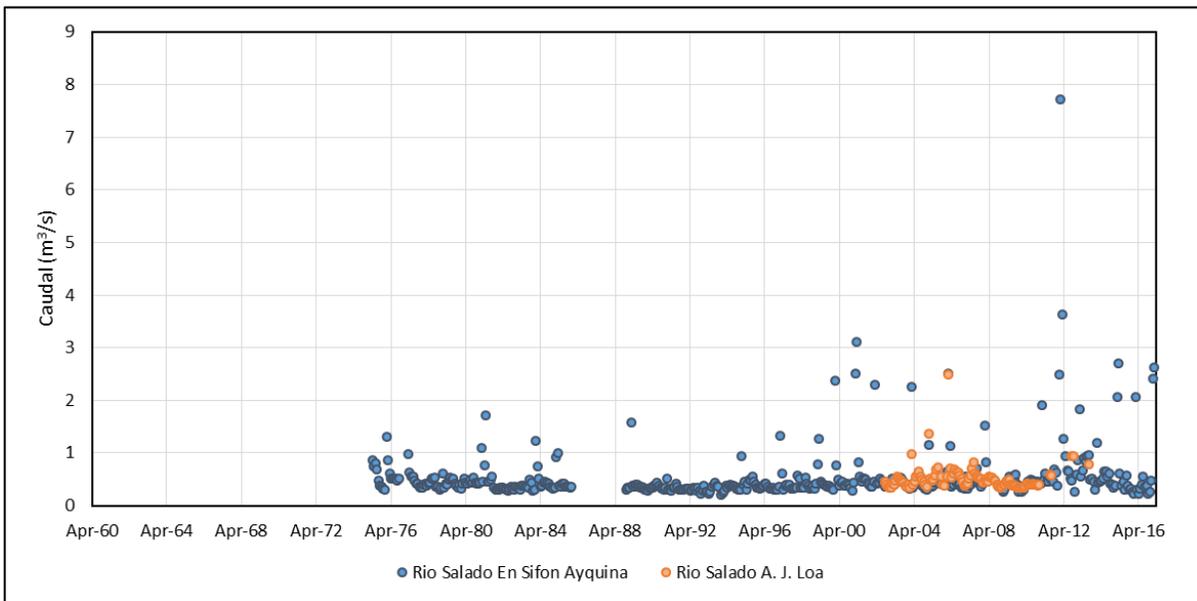


Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4-1

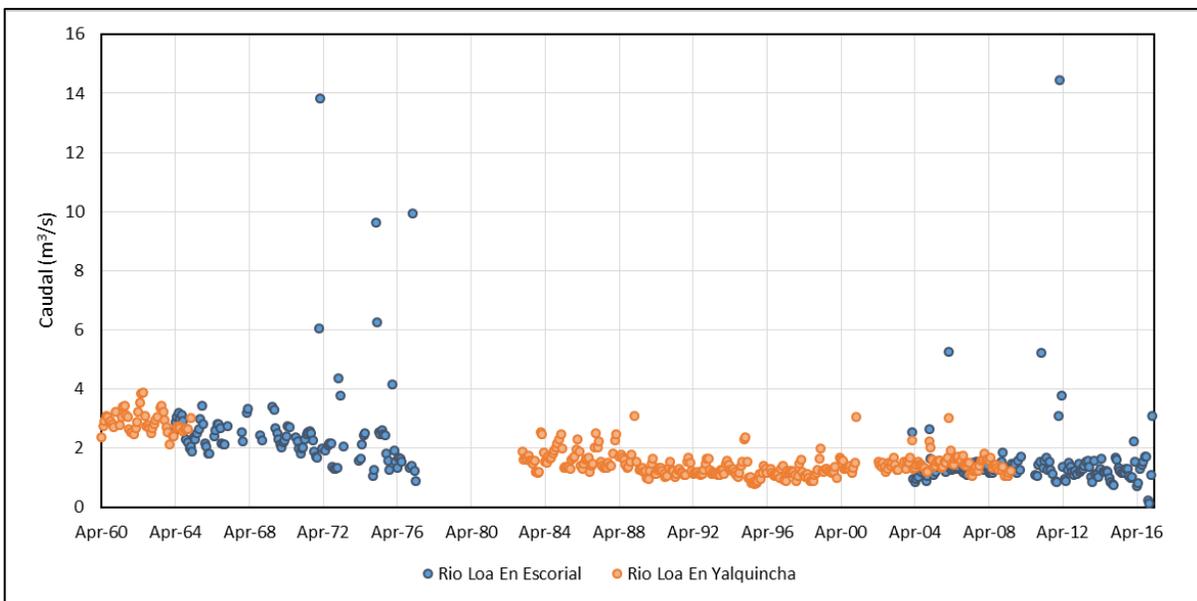
Ubicación Estaciones Fluviométricas Utilizadas

El registro fluviométrico de las estaciones es posible consultarlo en el Anexo D, mientras que en las Figuras 3.4-2 a 3.4-4, se presentan las estaciones que caracterizan al cauce del río Salado y el río Loa aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Calama.



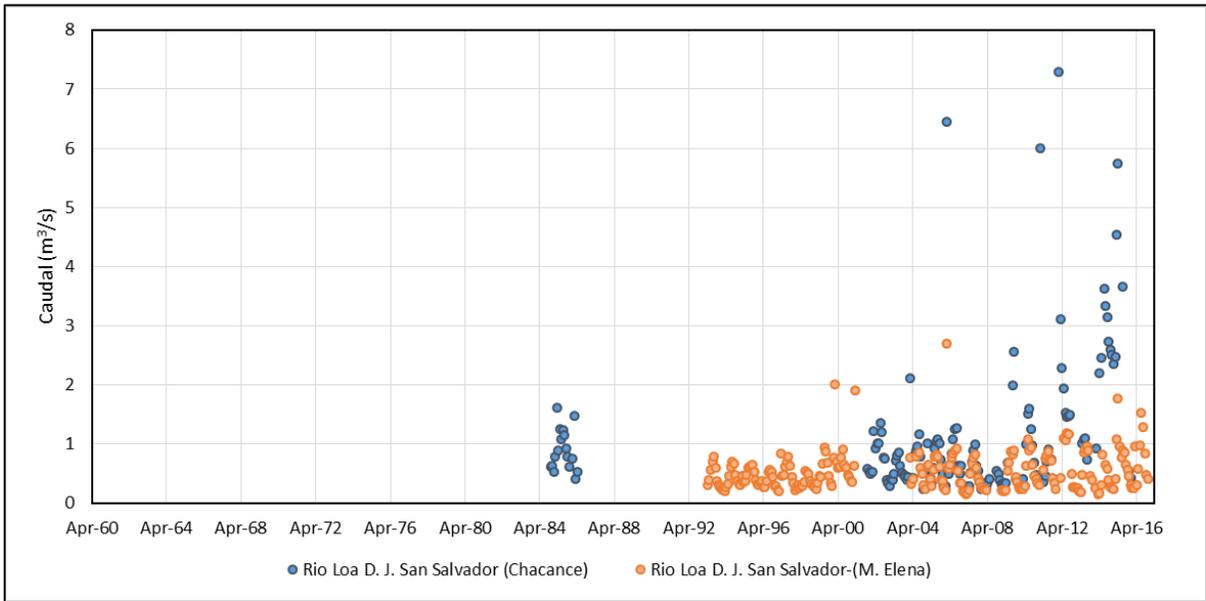
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4-2 Registro Fluviométrico Río Salado



Fuente: Elaboración Propia

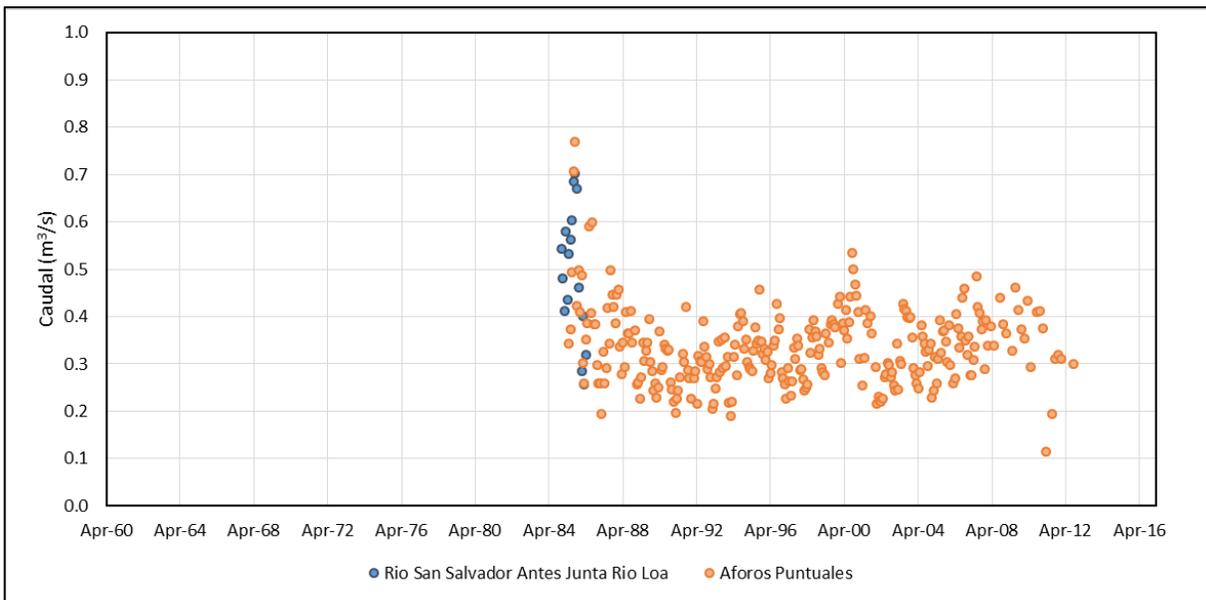
Figura 3.4-3 Registro Fluviométrico Río Loa Aguas Arriba Calama



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4-4 Registro Fluiométrico Río Loa Aguas Abajo Calama

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.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4-5 Registro Fluiométrico Río San Salvador Antes Junta Río Loa

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, se construye el Cuadro 3.4-2. De acuerdo a esto, es posible estimar un aporte desde el cauce superficial al acuífero del SHAC de Calama de 422 l/s. Este resultado se asemeja a la calibración del modelo numérico realizado en DGA (2014b), el cual estima una infiltración de 311 l/s, sin embargo se considera solo referencial debido a la incerteza en las variables utilizadas en el cálculo.

Cuadro 3.4-2 Balance Cauce Río Loa

| Tramo | Fuente | Caudal (m ³ /s) | Sub Balance (m ³ /s) | Balance Total (m ³ /s) |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Aguas Arriba Calama | Estaciones Escorial / Yalquincha | 1.776 | 0,710 | 0,422 |
| Calama | DGA (2014b) | -1.066 | | |
| Aguas Abajo Calama | Junta Ríos San Salvador / Loa | 0,631 | 0,288 | |
| | Aforos San Salvador | -0,343 | | |

Fuente: Elaboración Propia

3.5 RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO

La recarga anual por precipitación ha sido estudiada por DGA (2016) mediante el análisis por el método de curva número sobre las subcuencas Loa Alto, Loa Medio y Loa Bajo. Sus resultados, presentados en el Cuadro 3.5-1, permitieron estimar que la recarga se produce principalmente en el sector alto de la cuenca del río Loa, asociado a las mayores precipitaciones del sector altiplánico.

Cuadro 3.5-1 Recarga por precipitación Cuenca Río Loa

| Subcuenca | Recarga (mm/año) | Área (Km ²) | Recarga (l/s) |
|-----------|------------------|-------------------------|---------------|
| Loa Alto | 13,8 | 3.689 | 2.085 |
| Loa Medio | 0,5 | 13.833 | 333 |
| Loa Bajo | 0,0 | 15.600 | 0 |
| Total | 14,4 | 33.122 | 2.418 |

Fuente: DGA (2016)

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 3.5-2.

Cuadro 3.5-2 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 (ver Cuadro 3.2-2), 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. En términos generales, se observa la baja recarga por precipitación que presenta el acuífero frente a los resultados obtenidos para la totalidad de la cuenca, permitiendo estimar que la precipitación no es una variable que controle la dinámica del sistema acuífero.

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”, las cuales se producen en la parte alta de la cuenca del río Loa. 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

A partir de la revisión de antecedentes realizada, en el presente capítulo se realizó un levantamiento de información hidrogeológica para el SHAC de Calama.

La caracterización hidrogeológica contempla diversas actividades, entre las cuales se cuentan la identificación de unidades hidrogeológicas, generación de los antecedentes básicos de los acuíferos de interés, tales como sus parámetros hidráulicos, profundidad del agua subterránea y sus fluctuaciones estacionales e interanuales.

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, como se presenta en la Figura 4.2-1, cuatro unidades morfológicas que son caracterizadas por DGA (2004) y DGA (2014b) como se presenta a continuación.

Cordillera de los Andes

El relieve de esta unidad se caracteriza por presentar diferencias de alturas apreciables entre los sectores más bajos donde se encuentran las quebradas y las cimas de los cerros y volcanes que predominan en esta unidad morfológica, sobrepasando estos últimos muchas veces los 5.000 m. Asimismo, esta unidad se compone en general por franjas de carácter volcánicas de origen cenozoico a cuaternario, destacándose los volcanes Miño, Palpana y Chela, con alturas que alcanzan los 5.425, 6.023 y 5.648 m, respectivamente.

El nacimiento del río Loa se origina a los pies del volcán Miño alrededor de los 5.000 m s.n.m. en su falda occidental. Más hacia al sur, el río Loa recibe como primer aporte hídrico de relevancia, aguas provenientes del río San Pedro. El escurrimiento general que

sigue el cauce en este sector, posee orientación Norte – Sur hasta la confluencia con el río Salado donde cambia prácticamente en 90° hacia el poniente.

Precordillera

El SHAC de Calama se encuentra prácticamente en su totalidad dentro de esta unidad morfológica. Constituido por un amplio plano depositacional cuya mayor longitud está en sentido este – oeste, siguiendo el mismo recorrido del río Loa y con una pendiente que varía entre 1 a 2%.

La morfología de esta unidad es tabuliforme y dilatada con relieves volcánicos sobre impuestos. En estos relieves se distinguen formas terciarias y cuaternarias.

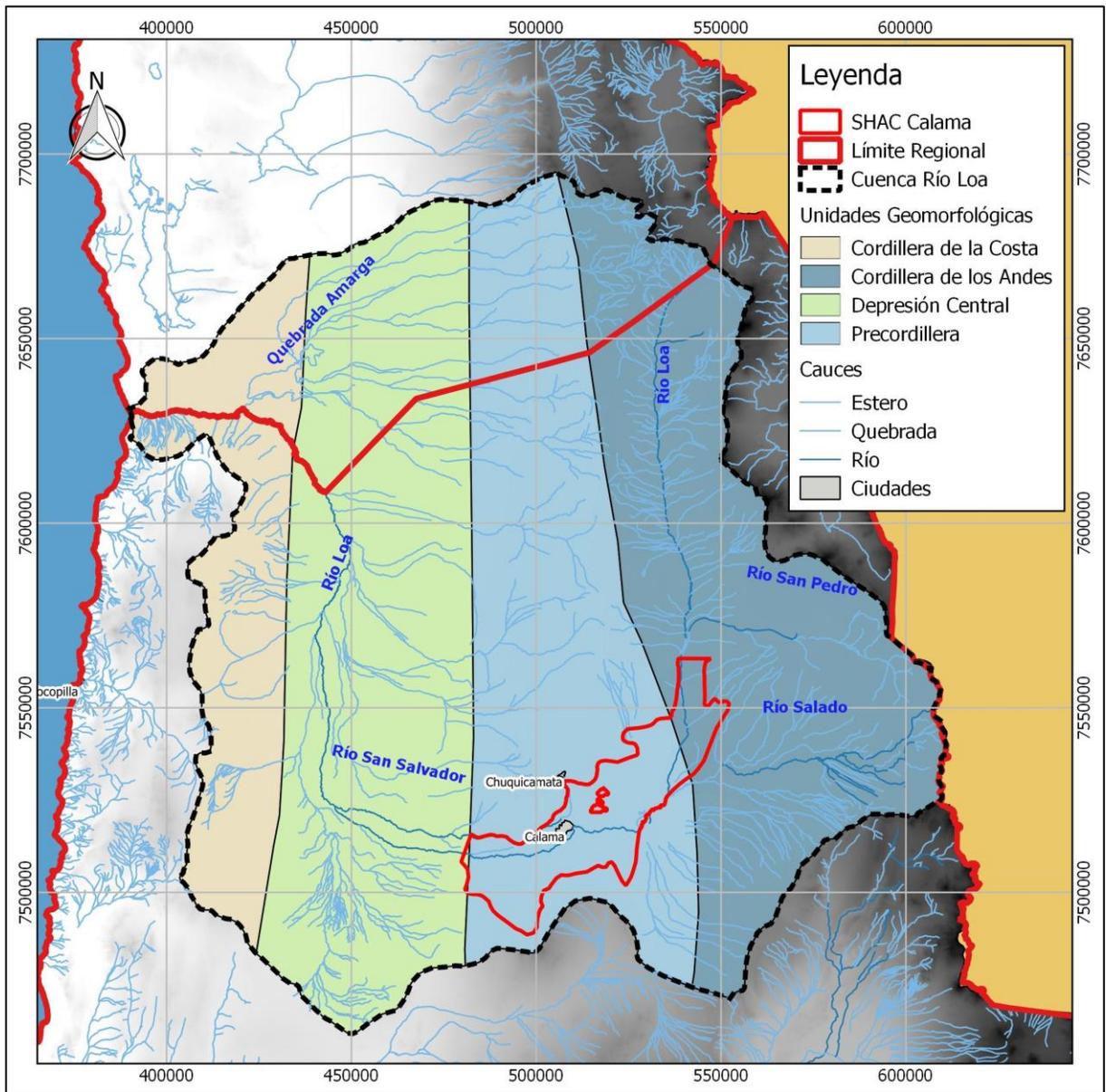
Depresión Central

El sentido de escurrimiento del río Loa cambia su trayectoria cerca de la localidad de Chancance, tomando un rumbo de sur a norte hasta Quillagua. A lo largo del cauce, se observan terrazas fluviales de mayor amplitud que en tramos anteriores. Adicionalmente, durante este tramo el río Loa recibe las aguas que provienen de las quebradas intermitentes del lado oriental y las procedentes del flanco occidental de la Cordillera de Domeyko.

Cordillera de la Costa

El relieve de esta unidad se presenta muy elevado y escarpado, dando origen al farellón costero, con cumbres que alcanzan aproximadamente los 2.000 y 1.500 m de altura, destacándose principalmente los cerros: Tolar, Catorce de Julio y Chuculay. Las planicies son de breve desarrollo, muy estrechas e interrumpidas por estribaciones desprendidas de la pampa alta y de la cordillera de la Costa.

En cuanto a la trayectoria de escurrimiento del cauce del río Loa, éste hace su último giro en dirección Este-Oeste a la altura de la localidad de Quillagua para posteriormente atravesar la Cordillera de la Costa y desembocar al mar en un profundo desfiladero de 500 metros de altura.



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) y presentadas en la Figura 4.2-2.

Qa: del periodo Pleistoceno - Holoceno. Corresponden a depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos.

Qan: del periodo Holoceno. Corresponden a depósitos de origen antrópico: tranques de relave y depósitos de material estéril de la gran minería de cobre; rellenos sanitarios.

Qf: del periodo Pleistoceno - Holoceno. Corresponden a depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.

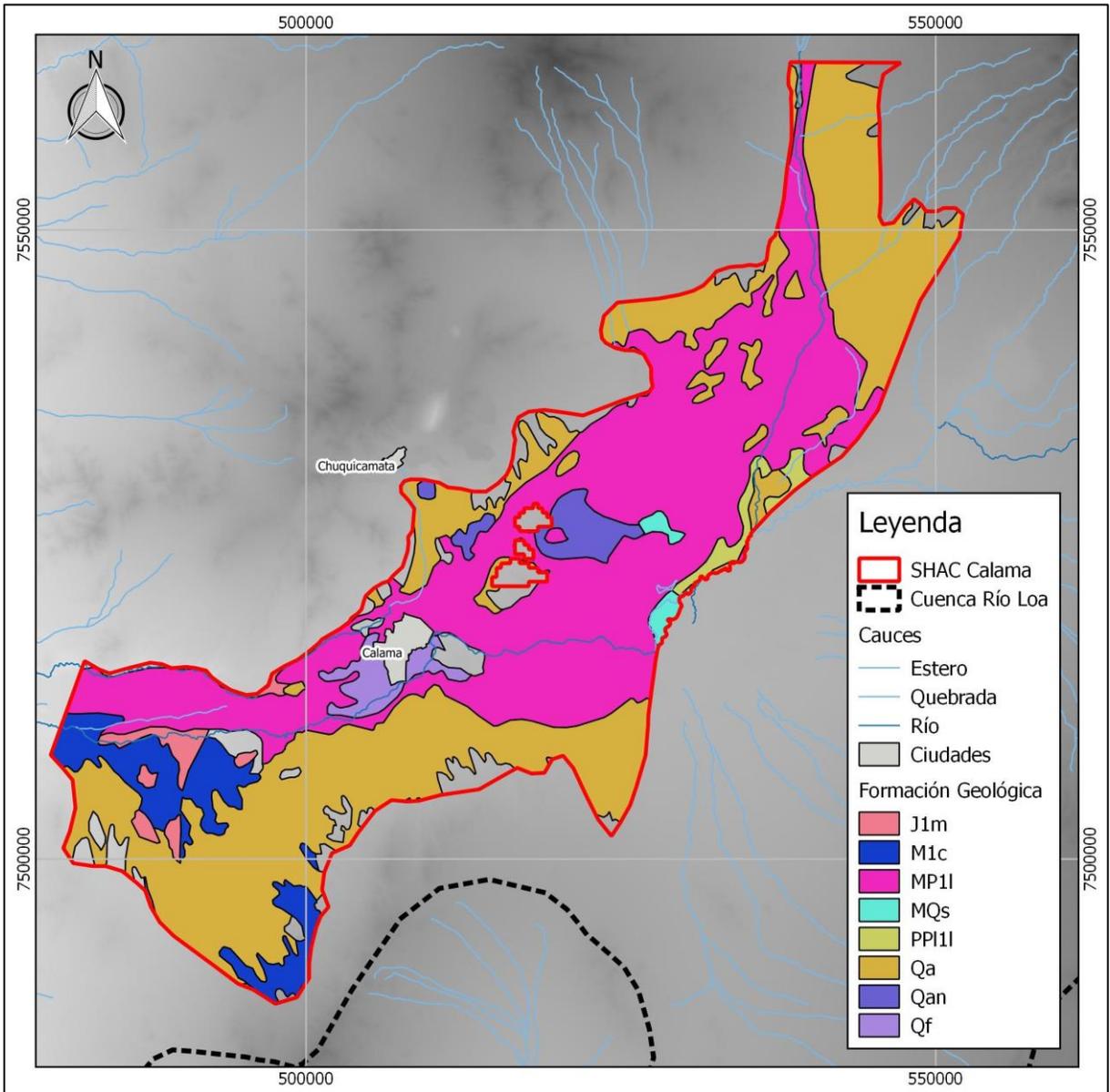
PPI1l: del periodo Plioceno - Pleistoceno. Corresponden a secuencias sedimentarias lacustres: limos y arcillas con intercalaciones de niveles calcáreos, conglomerádicos o piroclásticos.

MP1l: del periodo Mioceno Superior-Plioceno. Corresponden a secuencias sedimentarias lacustres, en parte fluviales y aluviales: limos, arenas, conglomerados, calizas y cenizas volcánicas.

M1c: del periodo Mioceno Inferior-Medio. Corresponden a secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales: gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas.

MQs: del periodo Mioceno - Cuaternario. Corresponden a depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente con bórax y/o litio.

J1m: del periodo Jurásico-Neocomiano. Corresponden a secuencias sedimentarias marinas carbonatadas y clásticas: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, paraconglomerados, niveles de yeso e intercalaciones volcánicas subordinadas.



Fuente: Elaboración propia desde SERNAGEOMIN (2003)

Figura 4.2-2 Formaciones Geológicas SHAC Calama

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 Porfirítica

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. Se extiende sobre la roca fundamental mesozoica por toda la zona al Oriente de la Cordillera del Medio cubriendo valles del terciario inferior con una capa de espesor variable (50 m en Conchi).

Formación de permeabilidad variable, donde se cree que circularían corrientes subterráneas, sin embargo, en distintos puntos es la causante de los afloramientos.

Junto con la formación de la serie riolítica se habrían depositado horizontalmente las calizas de agua dulce que constituyen las capas superiores de la mayor parte de la cuenca del Loa. Estas capas se identifican con las formaciones de Opache y Toconce, en la Pampa Llalqui, y también de Chiu Chiu, frente a Calama.

Desde el terciario superior los ríos comenzaron a profundizarse en las liparitas y calizas, formando profundos cañones.

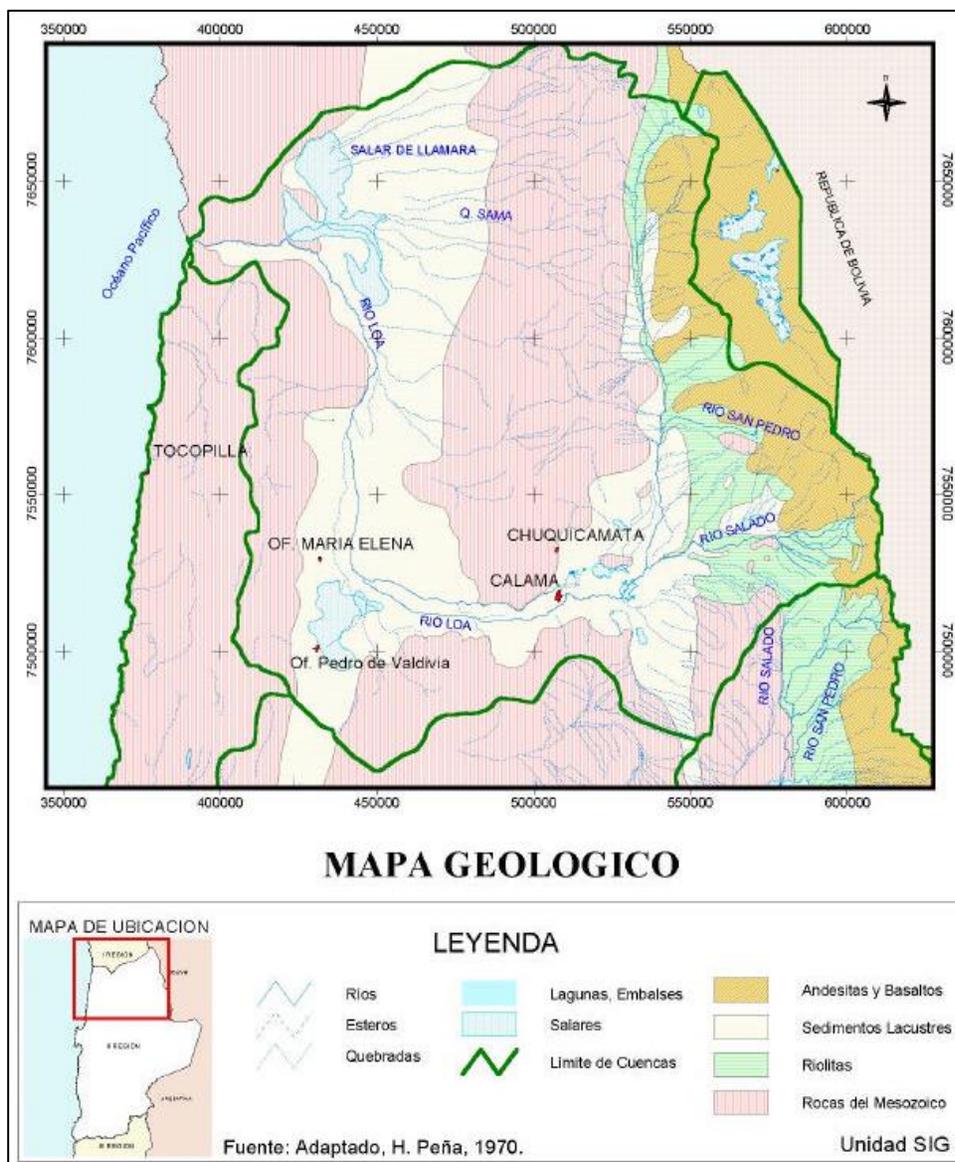
Formación Calizas del Loa o Formación el Loa

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 retrabajadas. Hacia al Noreste de Calama, esta formación posee estratos horizontales de limos y arcillas. La formación tiene una potencia variable con un máximo de 50 metros.

De acuerdo con la descripción geológica general, DGA (2003c) generó un plano esquemático que se presenta en la Figura 4.2-3.



Fuente: DGA (2003c)

Figura 4.2-3

Esquema General de Geología Cuenca Río Loa

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

En el área de estudio, correspondiente al SHAC de Calama, se definen seis unidades hidrogeológicas descritas en Knight Piésold (2010) y DGA (2014b).

Unidad Hidrogeológica 1: Depósitos Aluvio - Evaporíticos

Incluye principalmente gravas, arenas, depósitos detrítico-evaporíticos y depósitos limo-arenosos, parcialmente saturados.

Esta unidad la constituyen dos sub unidades, UH1a Depósitos aluviales de permeabilidad Media-Alta (10^{-1} a 10^2 m/d) y UH1b Depósitos detrítico-evaporíticos de permeabilidad Media-Baja (10^{-3} a 100 m/d). La primera se conforma por depósitos aluviales de gravas y arenas con matriz arenosa y a veces limo-arenosa, mientras que la segunda está integrada por la secuencia de la formación Chiu-Chiu y rellenos clásticos-salinos de salares.

Unidad Hidrogeológica 2: Acuífero Superior Cárstico-Detrítico El Loa

Secuencia conformada por rocas carbonatadas y detríticas que conforman un acuífero predominantemente de carácter freático de permeabilidad muy variable. Se subdivide en tres unidades. UH2a Rocas cárstico-arenosas de Permeabilidad Media-Alta (10^{-2} a 10^1 m/d) es el medio predominante de la unidad, por lo tanto considerada representativa de la condición típica del Acuífero Superior. UH2b Depósitos limo-arcillosos de Permeabilidad Baja (10^{-4} a 10^{-1} m/d) compuesta principalmente por depósitos de material fino limo-arcilloso. UH2c Depósitos de arenas negras de Permeabilidad Alta (10^{-2} a 100 m/d) constituida por depósitos detríticos con una presencia significativa en la fracción arenosa.

Unidad Hidrogeológica 3: Acuitardo Ignimbrítico

Esta unidad lo constituyen tobas consolidadas de baja permeabilidad y que se superponen a los depósitos de material fino del acuitardo detrítico del Loa.

Dependiendo de su disposición estratigráfica, esta secuencia puede desarrollar un confinamiento sobre el medio saturado inferior (Unidad 5).

Unidad Hidrogeológica 4: Acuitardo El Loa (“Acuitardo”)

Unidad hidrogeológica compuesta fundamentalmente por materiales finos de muy baja permeabilidad ($<5 \times 10^{-3}$ m/d), tales como arcillas y limos. Se trata de una unidad con un alto grado de homogeneidad, la que aportaría con una condición confinante en el acuífero inferior.

Unidad Hidrogeológica 5: Acuífero Gravas de Calama (“Acuífero Inferior”)

Se subdivide en dos unidades. UH5a Depósitos de Gravas, la más representativa del comportamiento hidrogeológico del acuífero inferior, con un rango de permeabilidad entre 5×10^{-2} y 10 m/d. UH5b Depósitos limo arcillosos, con una conductividad estimada entre 10^{-5} a 10^{-3} m/d.

Esta unidad se dispone bajo las unidades 3 y 4 correspondientes a los acuitardos ignimbríticos y detríticos de El Loa, respectivamente, adoptando un comportamiento hidráulico de confinamiento.

Unidad Hidrogeológica 6: Acuífero Rocas Pre-Terciarias (“Basamento Impermeable”)

Esta unidad se encuentra conformada tanto por rocas intrusivas y metamórficas como también, en menor medida, por rocas volcánicas y sedimentarias que afloran en los bordes de la cuenca de Calama. Presenta muy bajas permeabilidades (10^{-5} a 10^{-9} m/d) que le confieren una condición impermeable. Sin embargo, la conductividad hidráulica podría ser importante en zonas donde existen rocas con un grado significativo de fracturamiento y en áreas de intenso fallamiento.

Finalmente, 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). En los acápites siguientes, se caracterizan las unidades sedimentarias, que corresponden a las tres primeras, sin considerar la unidad de basamento impermeable.

4.3.2 Niveles Freáticos

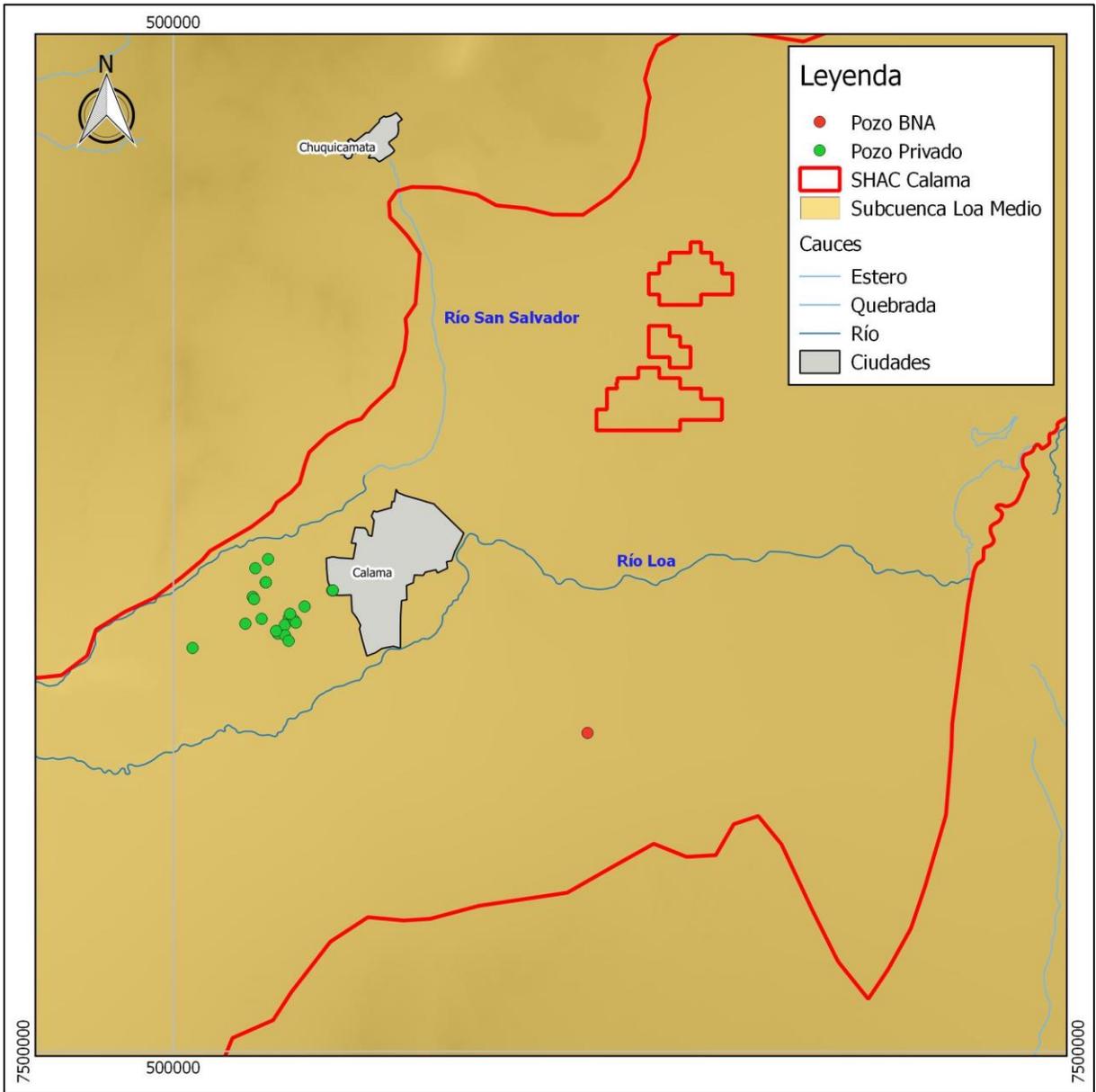
El registro de niveles freáticos en el acuífero del SHAC de Calama se obtiene desde la información oficial de pozos DGA y el monitoreo de los pozos pertenecientes a Minera El Tesoro presentado en Montgomery & Associates (2009). El resumen de esta información se presenta en el Cuadro 4.3-1, mientras su distribución espacial se observa en la Figura 4.3-1.

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



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3-1 Pozos con Información de Nivel Freático

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

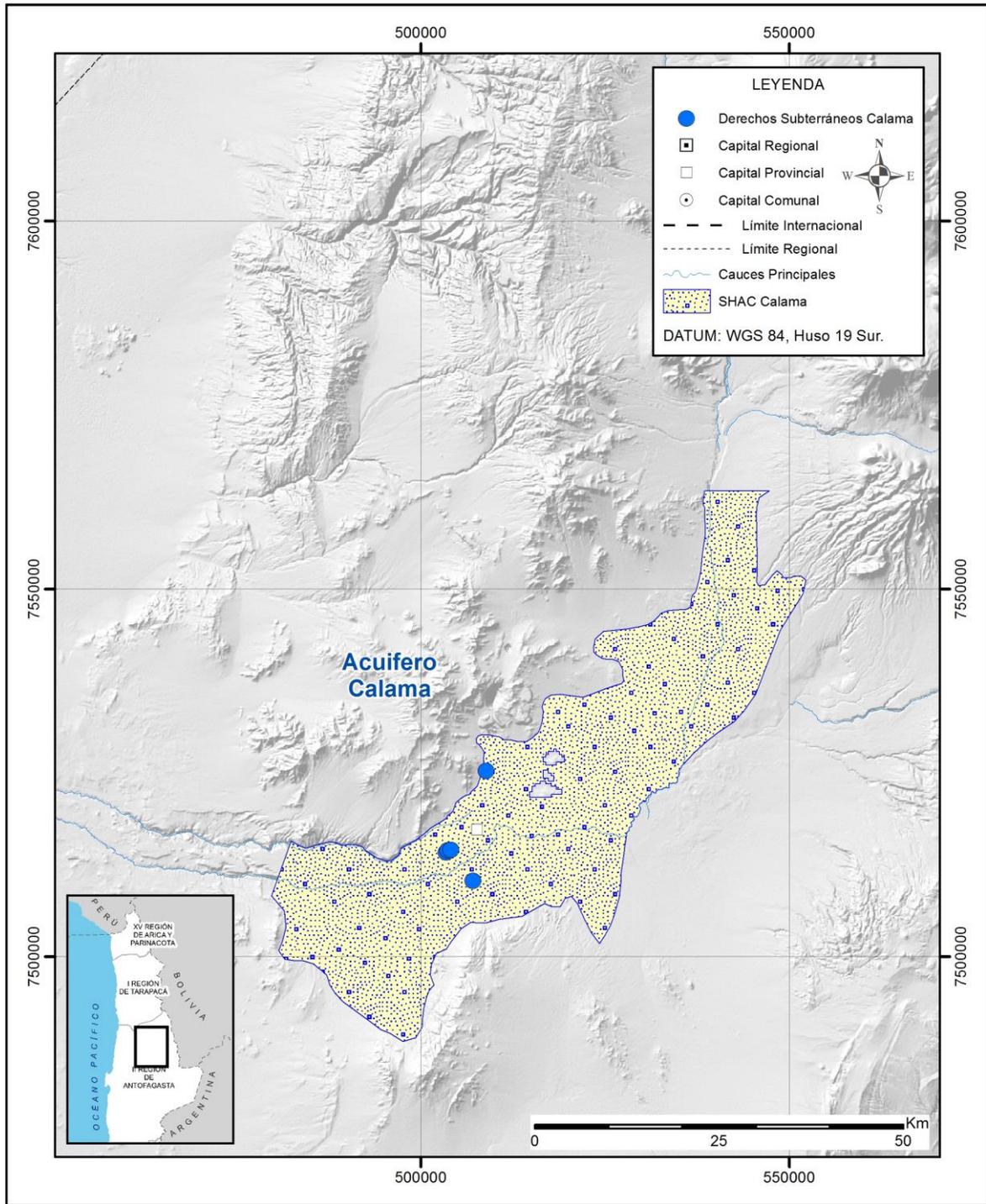
Dentro de la superficie del SHAC de Calama, se reconocen derechos subterráneos por un total de 560 l/s, los cuales se presentan en el Cuadro 4.3-4 y se distribuyen espacialmente como muestra la Figura 4.3-2.

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.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3-2 Derechos Subterráneos SHAC Calama

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

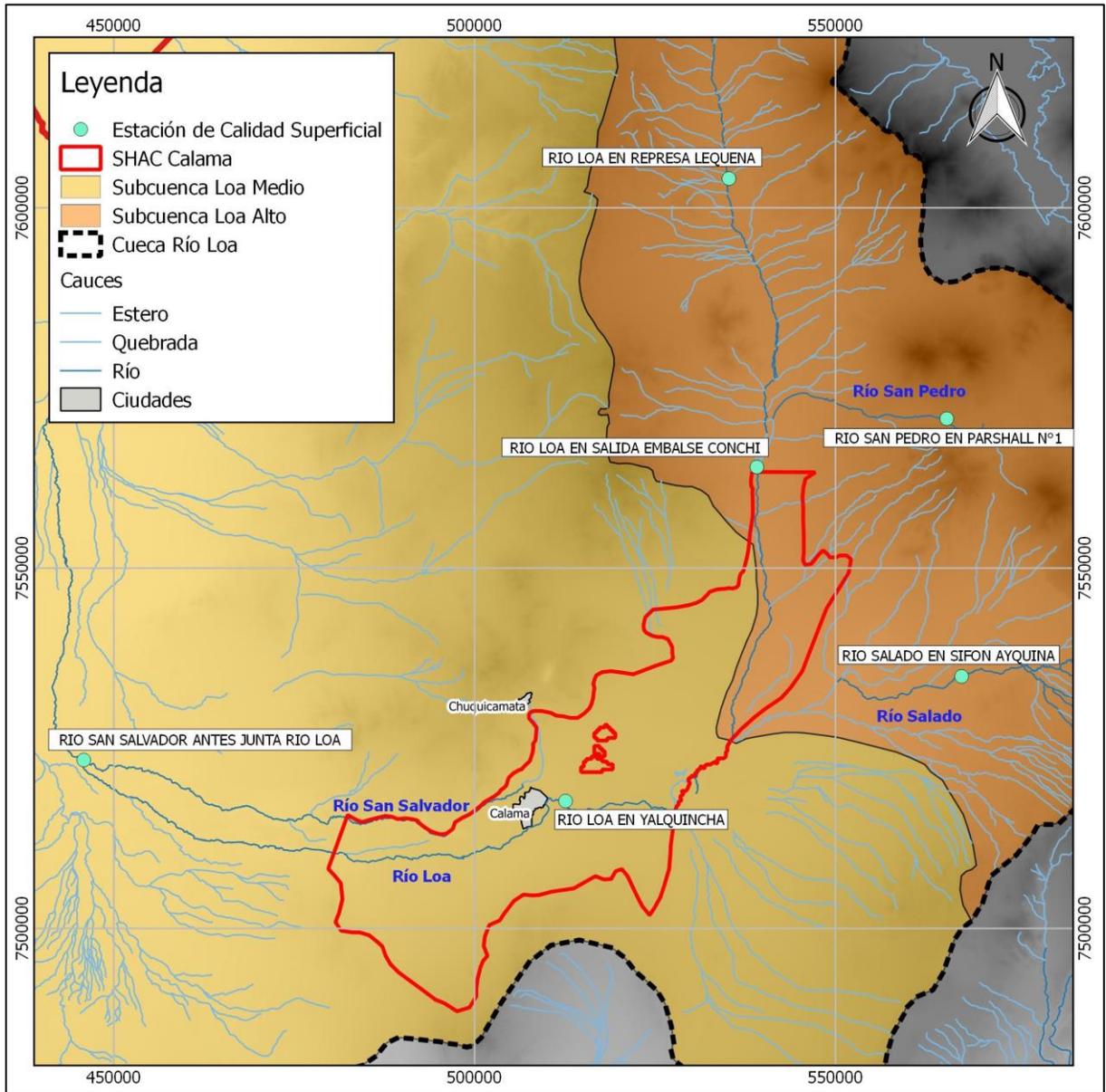
5.1 INTRODUCCIÓN

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, a través del análisis de antecedentes. La información recabada y su análisis se presenta en los acápite siguientes.

5.2 INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE

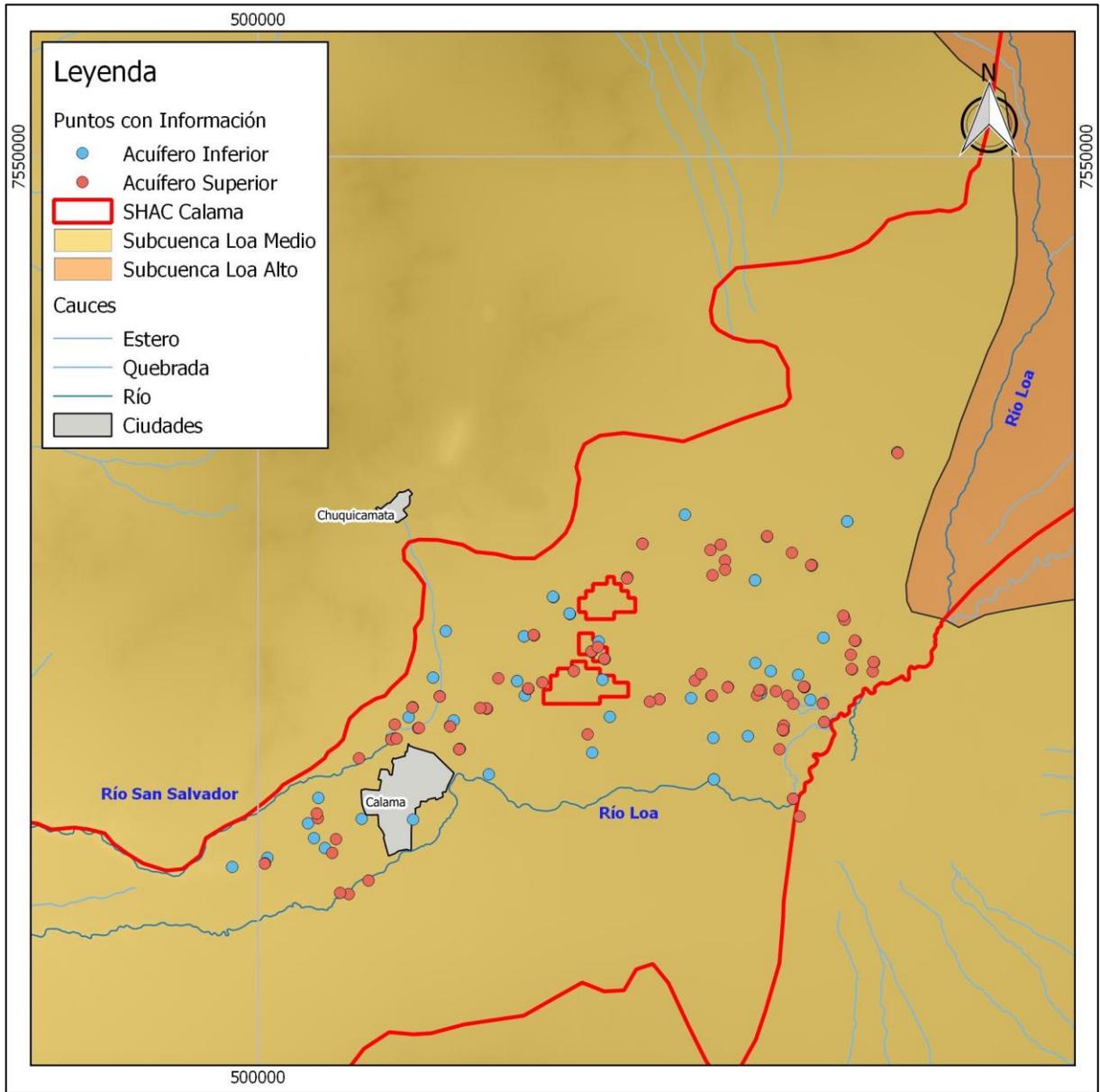
Considerando la interacción entre el sistema superficial y subterráneo que ocurre en el SHAC de Calama, se recopila información de la calidad del agua superficial del río Loa y sus afluentes en base a las estaciones de control DGA presentadas en el Figura 5.2-1.

Luego, la caracterización de las aguas subterráneas se apoya en los registros de calidad mediante monitoreos físico químicos e in situ presentados en estudios previos. La distribución espacial de los puntos con información de calidad hidroquímica, y su fuente, se presenta en la Figura 5.2-2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-1 Estaciones DGA de Calidad Superficial Cuenca Río Loa



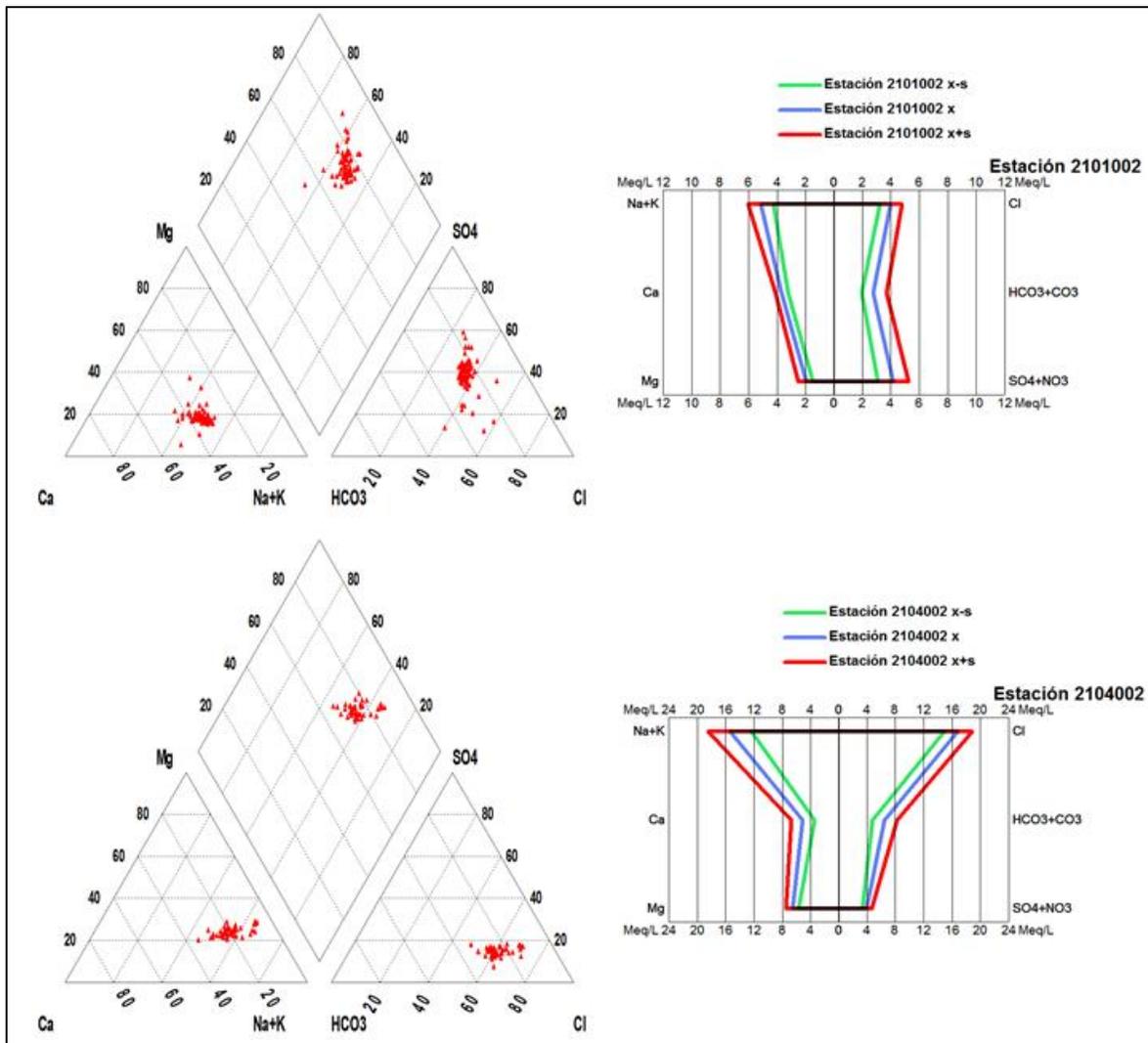
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-2 Puntos con Información de Calidad Hidroquímica

5.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El análisis se centra inicialmente en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca del río Loa, específicamente en las subcuencas del Loa Alto y Medio, que se relacionan al SHAC de Calama.

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, presentadas en la Figura 5.3-1.



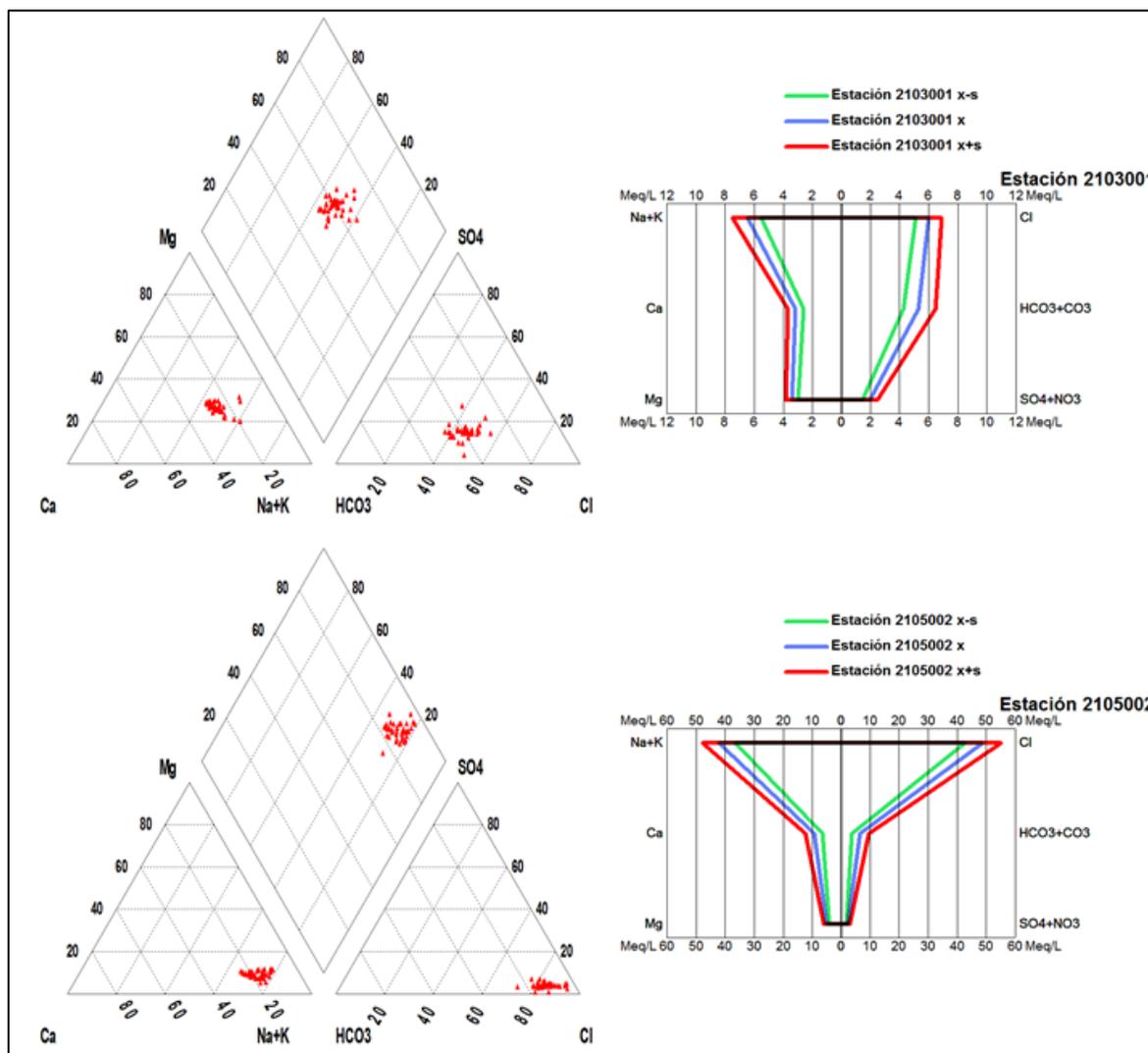
Nota: Imagen superior corresponde a estación Río loa en Represa Lequena e inferior a Río Loa en Salida Embalse Conchi.

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-1 Diagramas Calidad Agua Superficial Loa Alto

Río Loa en Represa Lequena se encuentra en la parte alta de la cuenca, donde se presenta una composición equilibrada del agua en el sector, la cual tiende a una calidad clorurada

sódica/potásica luego de su confluencia con el río San Pedro. Respecto a esto, se presenta en la Figura 5.3-2 la calidad de los principales afluentes al río Loa en la zona, correspondientes a los ríos San Pedro y Salado a través del registro de las estaciones Río San Pedro En Parshall N°1 y Río Salado En Sifón Ayquina.



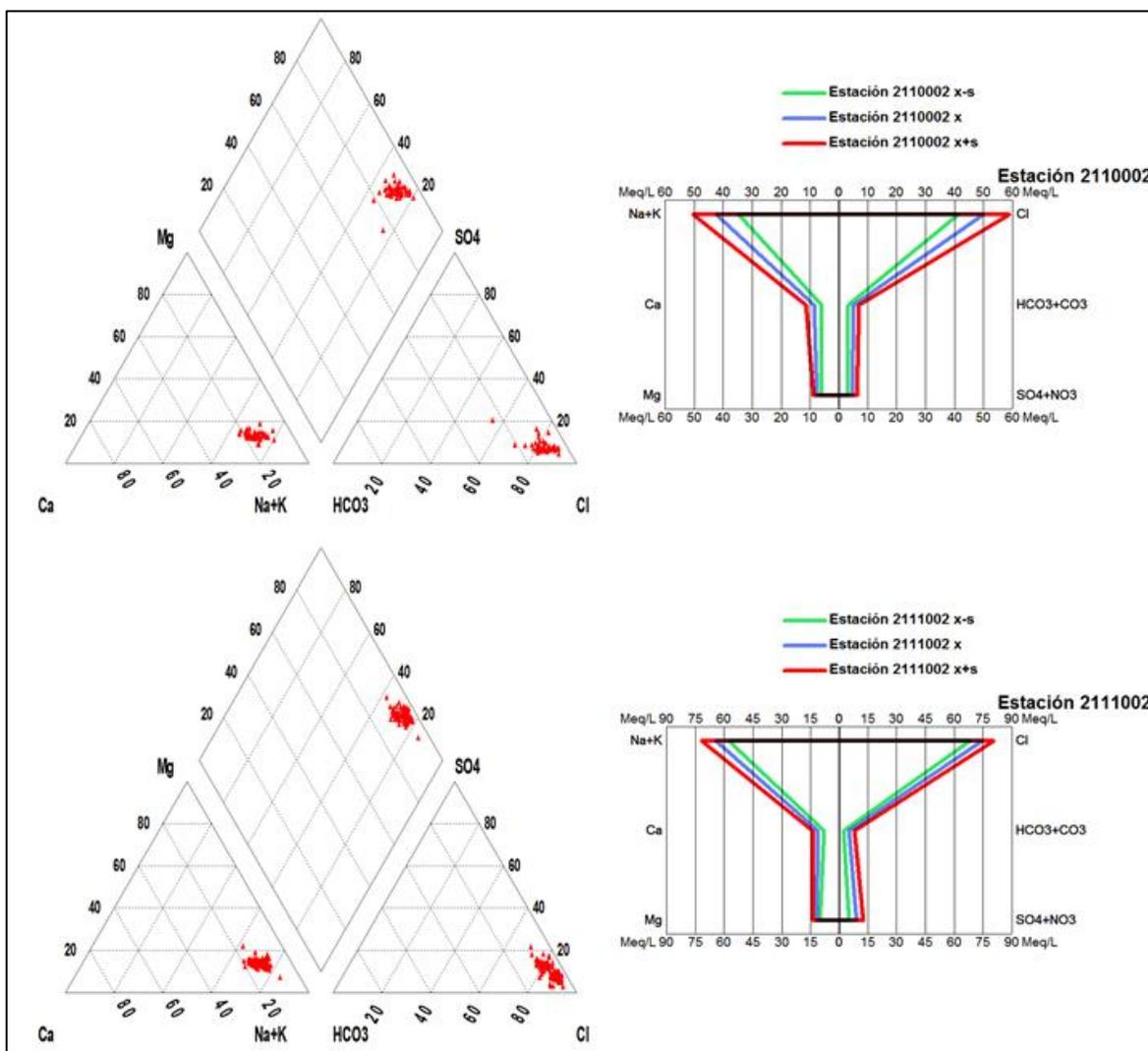
Nota: Imagen superior corresponde a estación Río San Pedro En Parshall N°1 e inferior a Río Salado En Sifón Ayquina.

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-2 Diagramas Calidad Agua Superficial Afluentes Loa Alto

Se observa que 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. La calidad del agua del río Salado es de importancia en la caracterización del río Loa a la altura del SHAC de Calama en base a lo presentado en las Figuras 3.4-2 y 3.4-3, donde se observan caudales similares entre ambos cauces. La composición de las aguas del río Loa se

presenta en la Figura 5.3-3 a través del análisis de las estaciones Río Loa en Yalquincha y Río San Salvador antes junta Río Loa.



Nota: Imagen superior corresponde a estación Río Loa en Yalquincha e inferior a Río San Salvador antes junta Río Loa.

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-3 Diagramas Calidad Agua Superficial Loa Medio

Se observa la composición clorurada sódica/potásico con una carga influenciada por la composición del río Salado. Ambos casos se observan similares, 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.

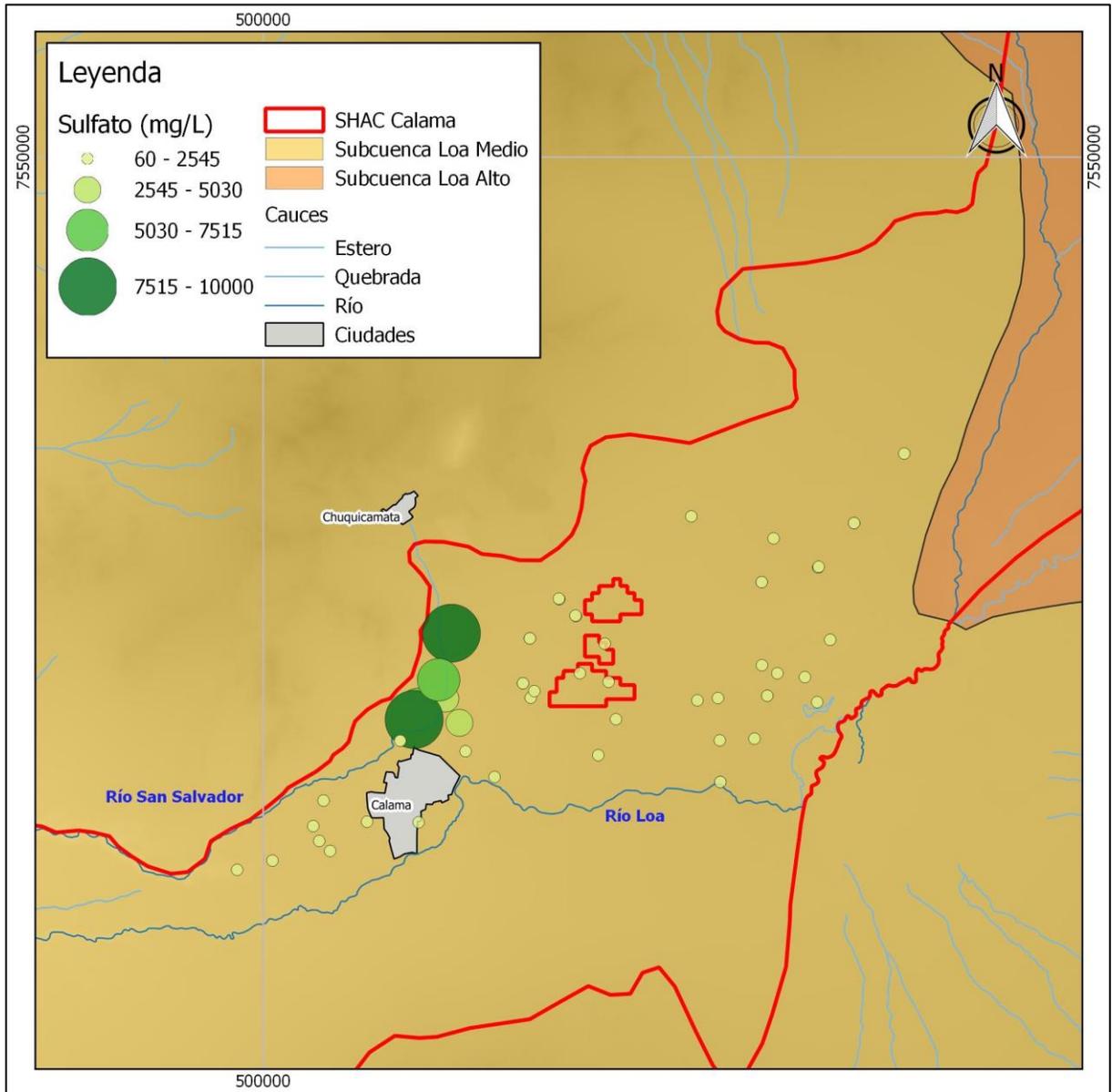
Caracterizada la calidad del agua superficial, se presenta a través de las Figuras 5.3-4 a 5.3-7 la concentración de sulfatos (SO_4) y conductividad eléctrica (CE) que se ha registrado para cada acuífero. Adicionalmente, se presenta el Cuadro 5.3-1 con la información resumida mediante parámetros estadísticos.

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 |

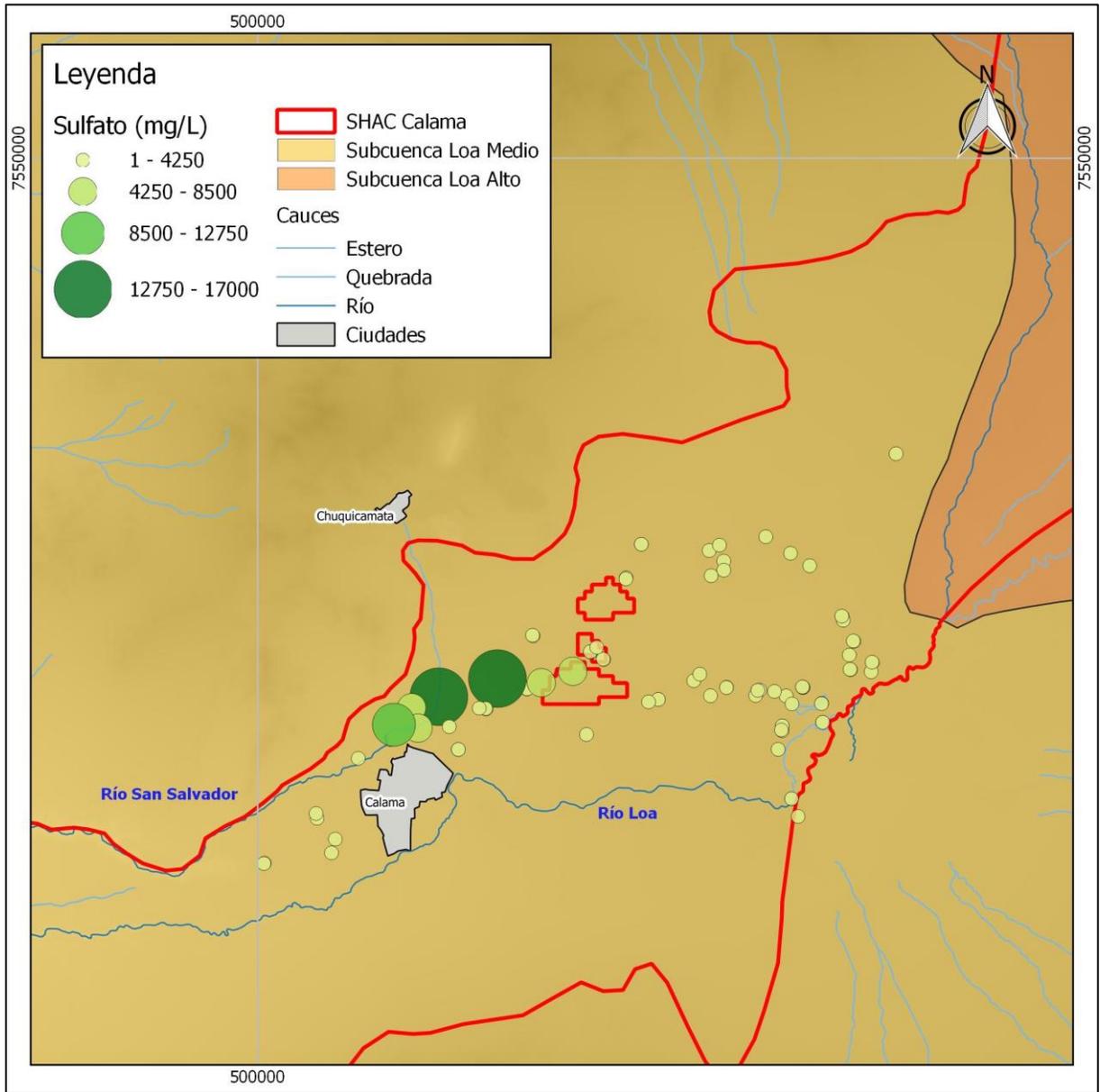
Fuente: Elaboración propia

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. El mismo análisis es posible realizar mediante su representación gráfica, sin embargo, es posible observar que las mayores concentraciones se concentran en los mismos sectores en ambos acuíferos. En este sentido, es posible estimar que si bien el acuífero superficial presenta una interacción directa con el cauce superficial, que influencia la calidad de agua, la existencia de concentraciones similares en ciertos sectores implicaría una zona de interacción entre ambos acuíferos.



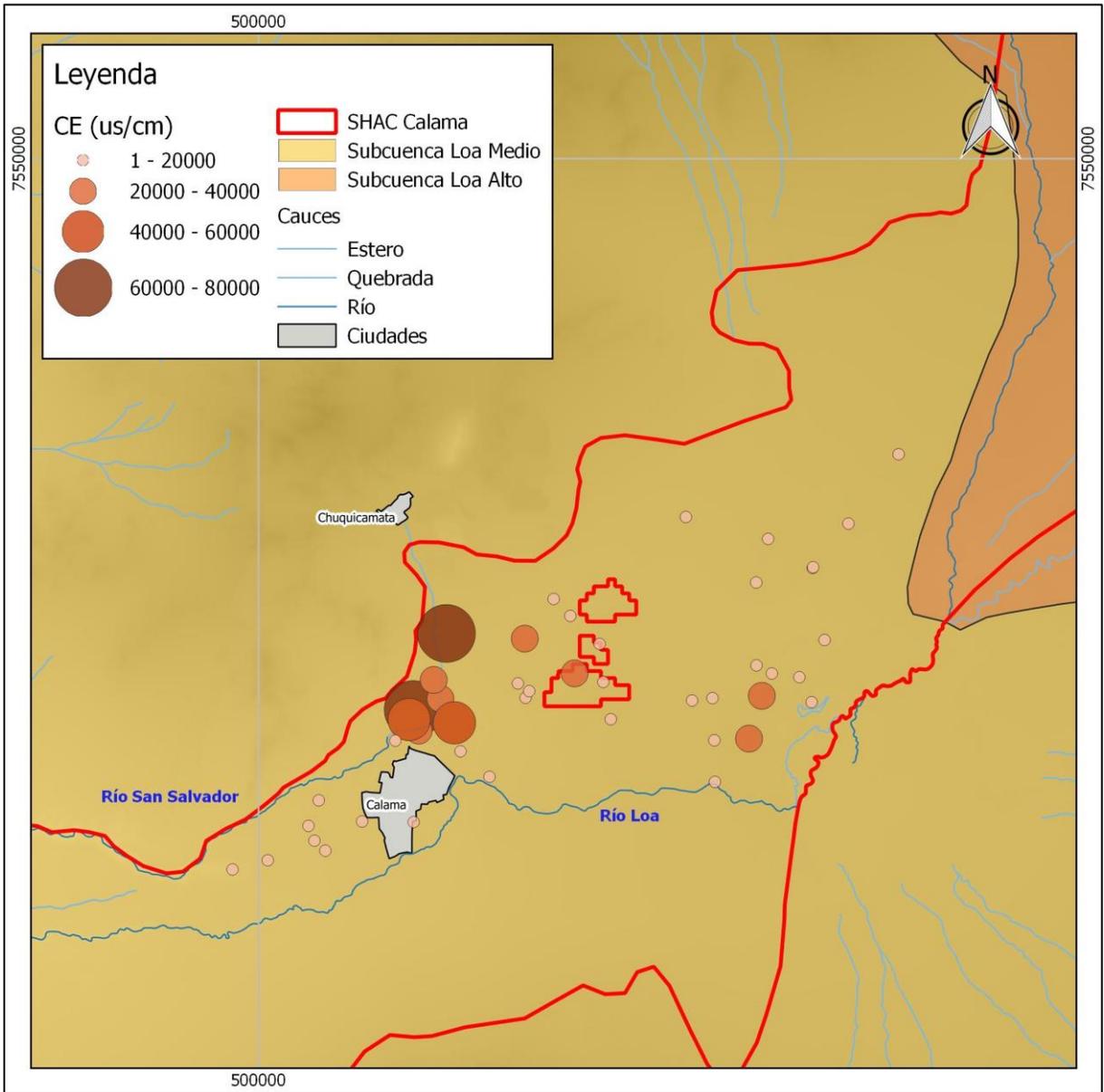
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-4 Concentración Sulfatos Acuífero Inferior



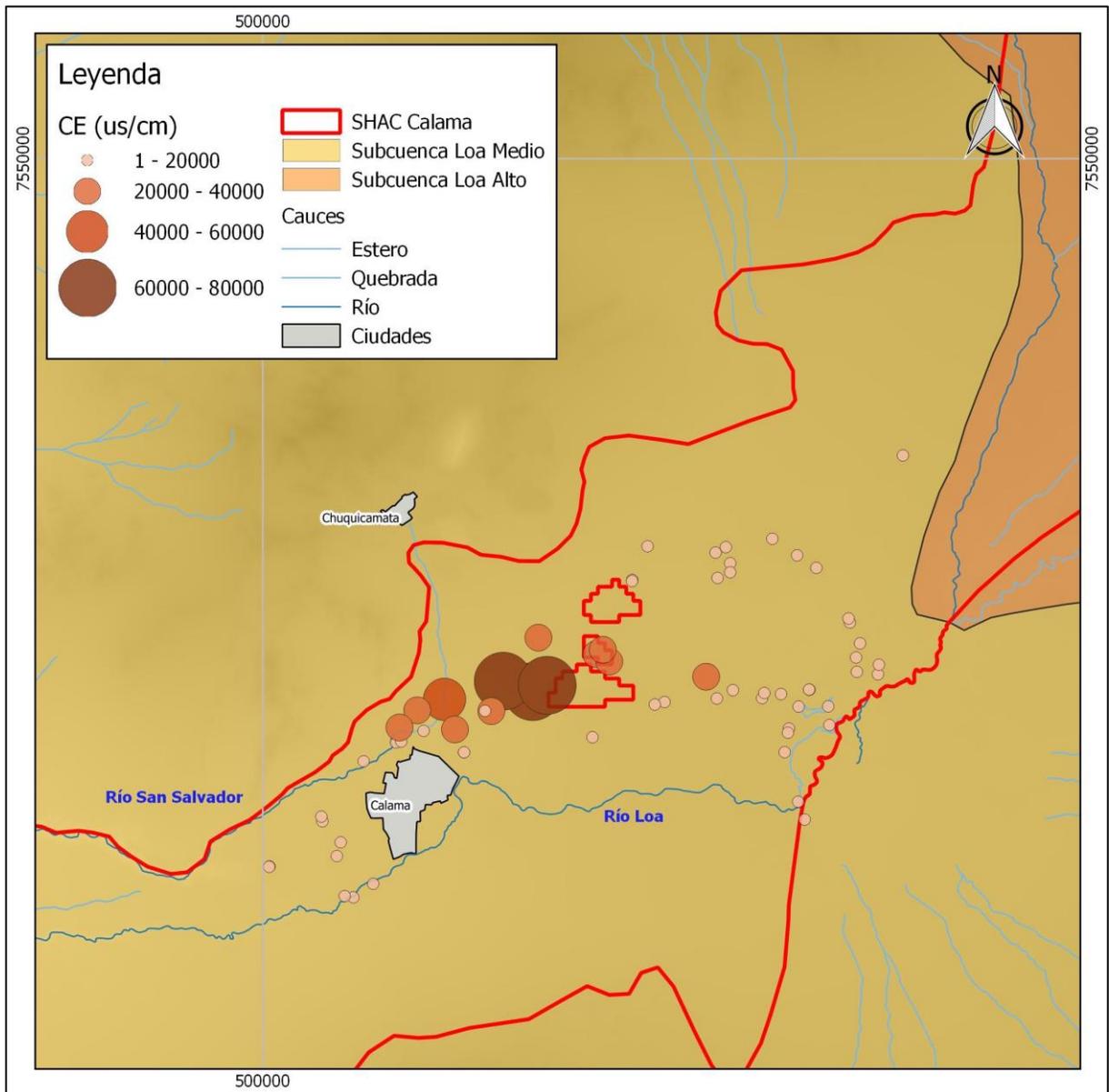
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-5 Concentración Sulfatos Acuífero Superior



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-6 Conductividad Eléctrica Acuífero Inferior



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-7 Conductividad Eléctrica Acuífero Superior

5.4 CONCLUSIONES CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Por medio de la caracterización hidroquímica, se determinó la composición de los principales cauces superficiales de la cuenca del río Loa. De esta forma, 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 de los acuíferos identificados, extensión, techo y base.
- Parámetros característicos de los acuíferos.
- Flujos entrantes/salientes desde/hacia otros SHAC.
- Flujos de interacción con cauces superficiales (afloramientos y descargas).
- Flujos de extracción del(los) acuífero(s).
- Superficie piezométrica.

6.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS

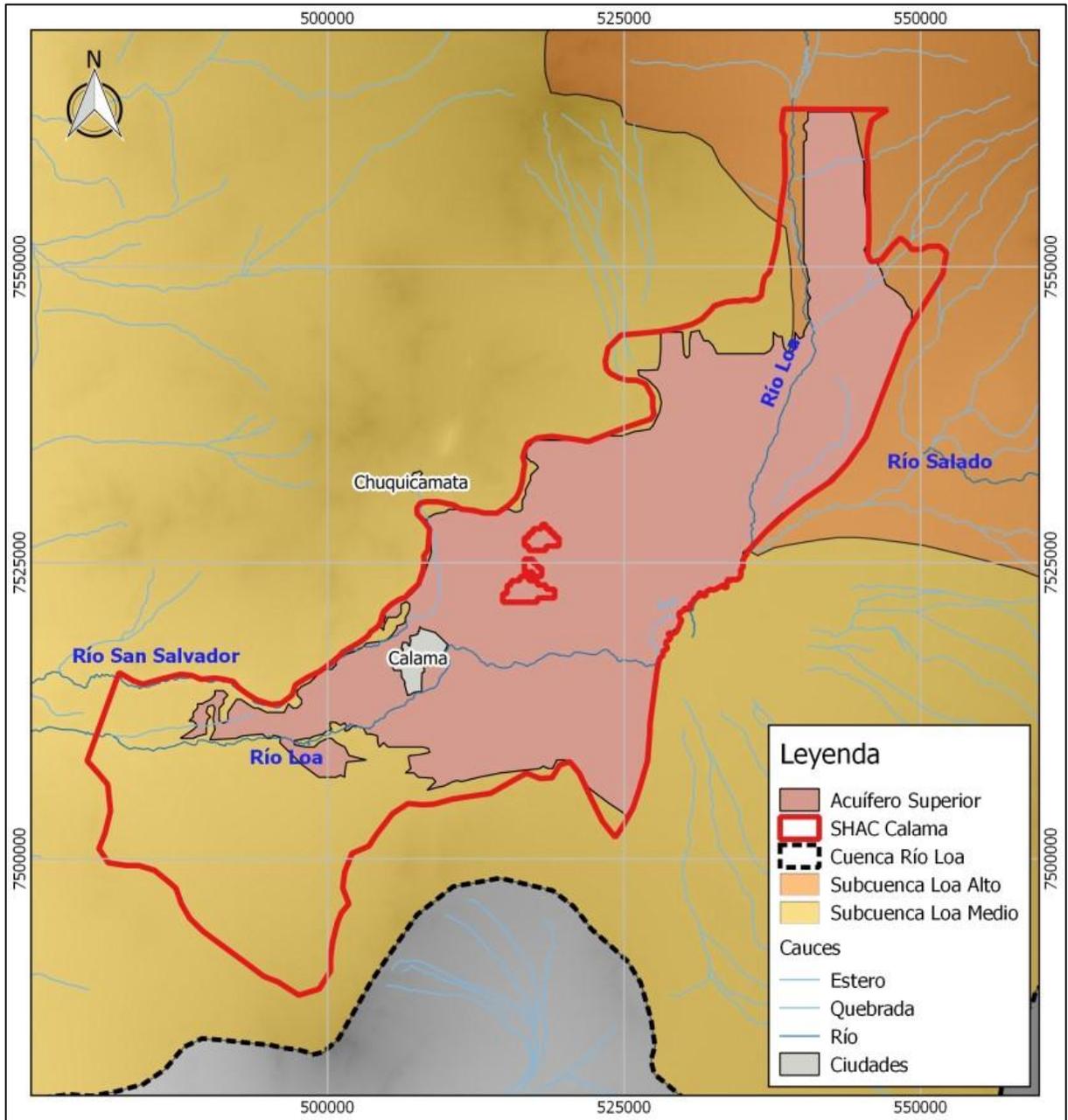
La geometría de los acuíferos se ha obtenido desde la modelación realizada por DGA (2014c) la cual se apoya sobre la interpretación de la información geofísica en Knigh Piésold (2010) y la singularidad hidrogeológica correspondiente al embalse Conchi, que impone el límite norte del SHAC. El Cuadro 6.2-1 presenta un resumen de las principales características geométricas de cada acuífero presente en el SHAC de Calama, mientras las Figuras 6.2-1 a 6.2-3 muestran la distribución espacial de cada una de estas unidades.

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 | - | - | - |

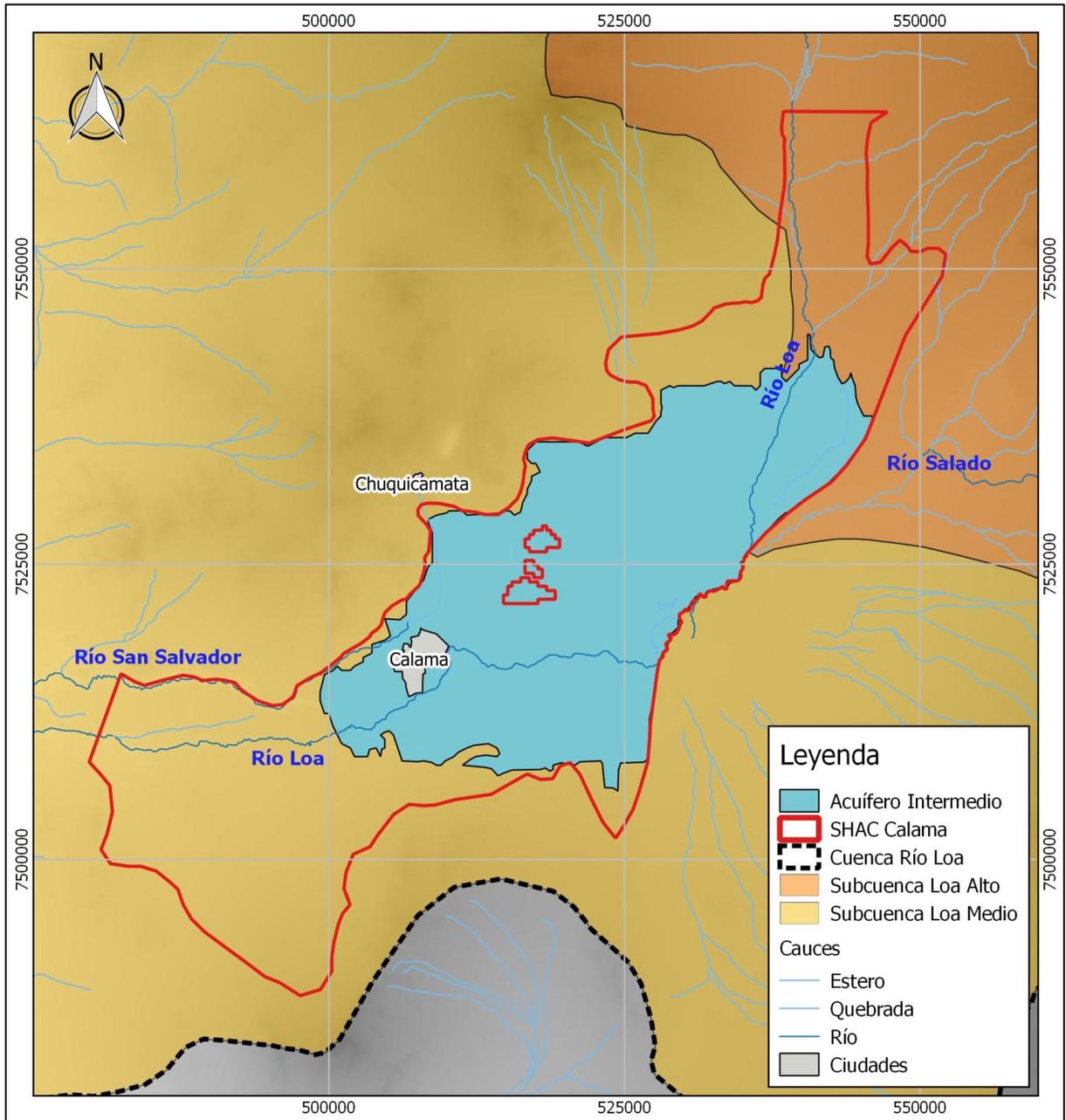
Nota: Valores presentados corresponden a valores estimados medios.

Fuente: Elaboración propia



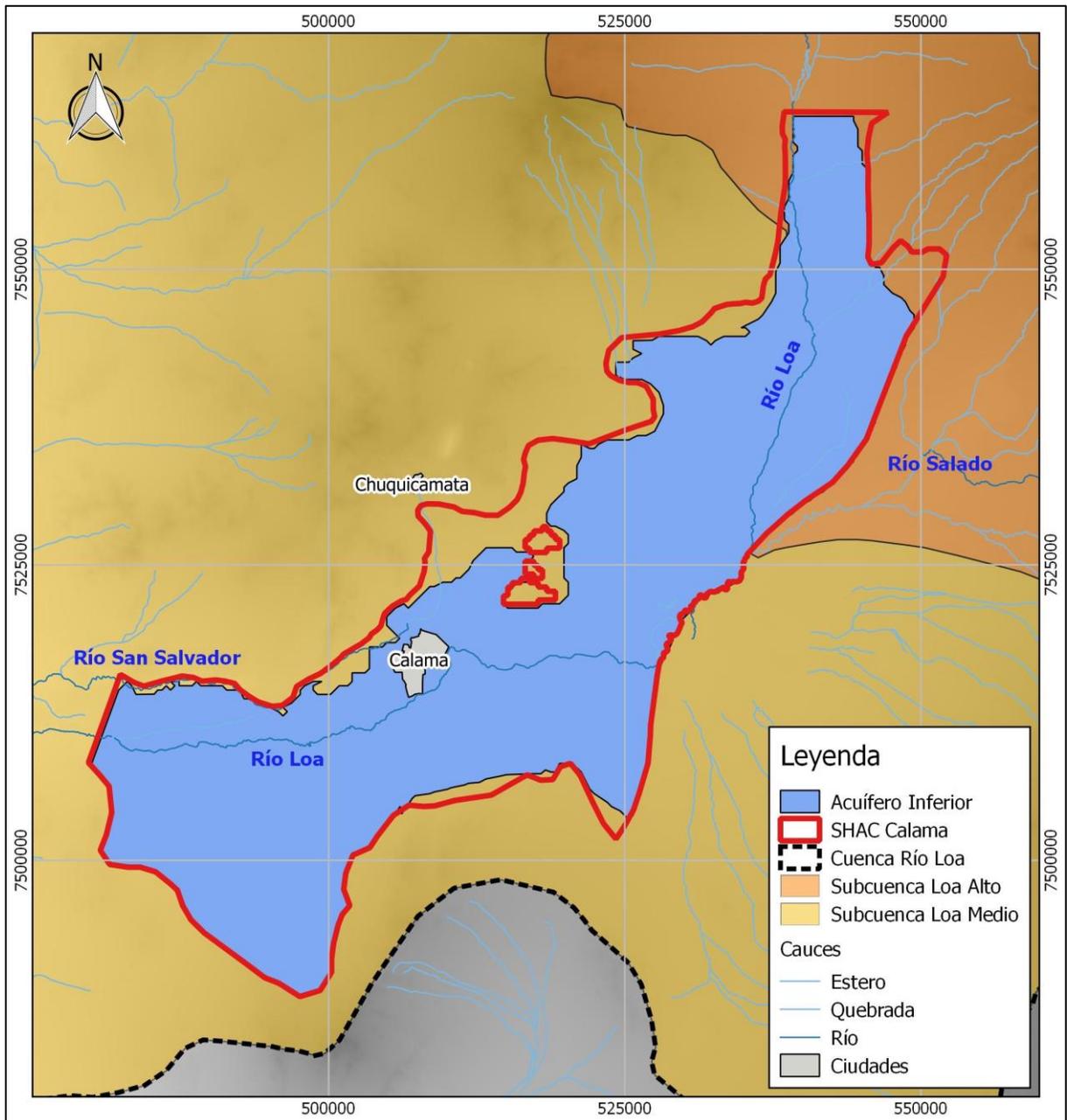
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.2-1 Geometría – Acuífero Superior



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.2-2 Geometría – Acuitardo



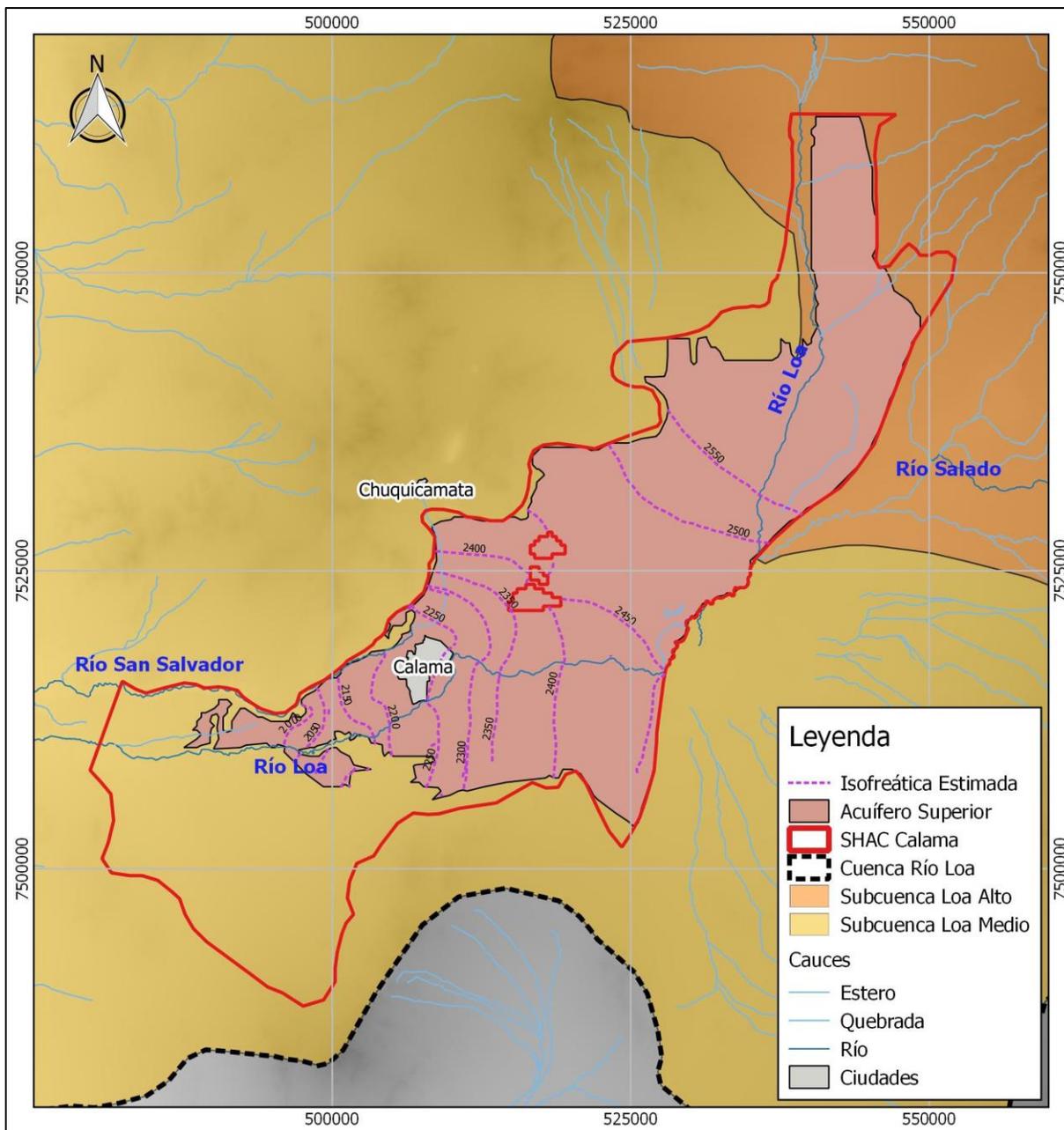
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.2-3 Geometría – Acuífero Inferior

Se observa que la superficie del acuitardo es menor a la de los acuíferos superior e inferior, específicamente en los sectores norte y sur-oeste del SHAC de Calama. 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.

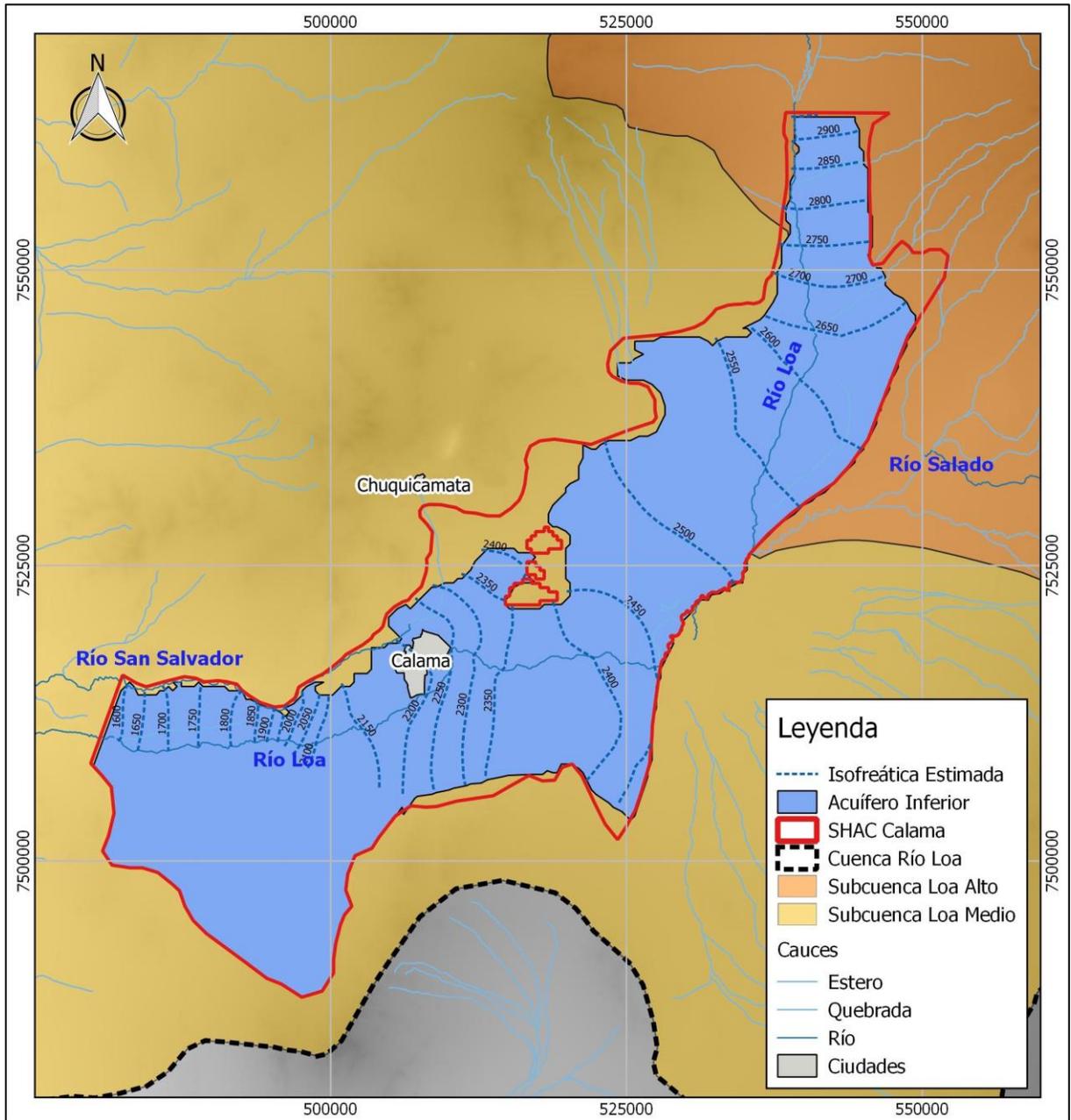
6.3 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES

Por medio de los resultados del modelo numérico de DGA (2014c), el cual usa información al año 2009, junto a valores de nivel freático actualizados al año 2010, fecha máxima con registro de monitoreo en el sector, se estiman curvas equipotenciales de los acuíferos superior e inferior. 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 y salidas al sistema acuífero del SHAC de Calama corresponden a la recarga por precipitación, recarga desde el cauce superficial, interacción entre sistemas acuíferos y explotación por bombeo. Los tres primeros flujos han sido determinados en el presente estudio, y a continuación se estiman los flujos de interacción entre acuíferos.

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 hídrico comprende la sumatoria de todos los flujos de entrada y salida que influyen e interactúan con la dinámica del acuífero subterráneo y que han sido desarrollados de manera independiente en acápite anteriores. Los principales flujos corresponden a los siguientes.

Entradas

- Recarga por precipitación.
- Recarga desde cauce superficial.
- Flujos subterráneos desde acuíferos adyacentes.

Salidas

- Afloramientos.
- Extracciones subterráneas.
- Flujo subterráneo de salida.

El valor de estos flujos, determinado en acápite anteriores y mediante la modelación numérica en estudios como DGA (2014b) y su actualización en DGA (2014c). El balance final del SHAC de Calama se presenta en el 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.

Se debe recordar que los valores presentados dentro del balance corresponden a resultados obtenidos desde distintas fuentes, por lo cual no se espera un balance ajustado. De acuerdo a esto, hay que tener en cuenta que elementos como el caudal de afloramiento o infiltración, presentan un mayor grado de incertidumbre en su determinación.

6.6 INTERACCIÓN ENTRE ACUÍFEROS

El balance general del SHAC de Calama ha sido planteado en el acápite anterior, sin embargo, la interacción entre el acuífero superior e inferior presenta un mayor grado de incertidumbre. Por ello, 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 sobre la totalidad de la delimitación de cada acuífero, fue posible determinar 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. Estos resultados corresponden a valores medios sobre la totalidad de la superficie, lo cual no implica que en determinados sectores la tendencia se pueda revertir.

Ahora bien, la interpretación de trabajos de geofísica, en la que se basan los modelos numéricos, permite asociar los distintos flujos de entrada y salida a cada unidad acuífera. 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 | | | |

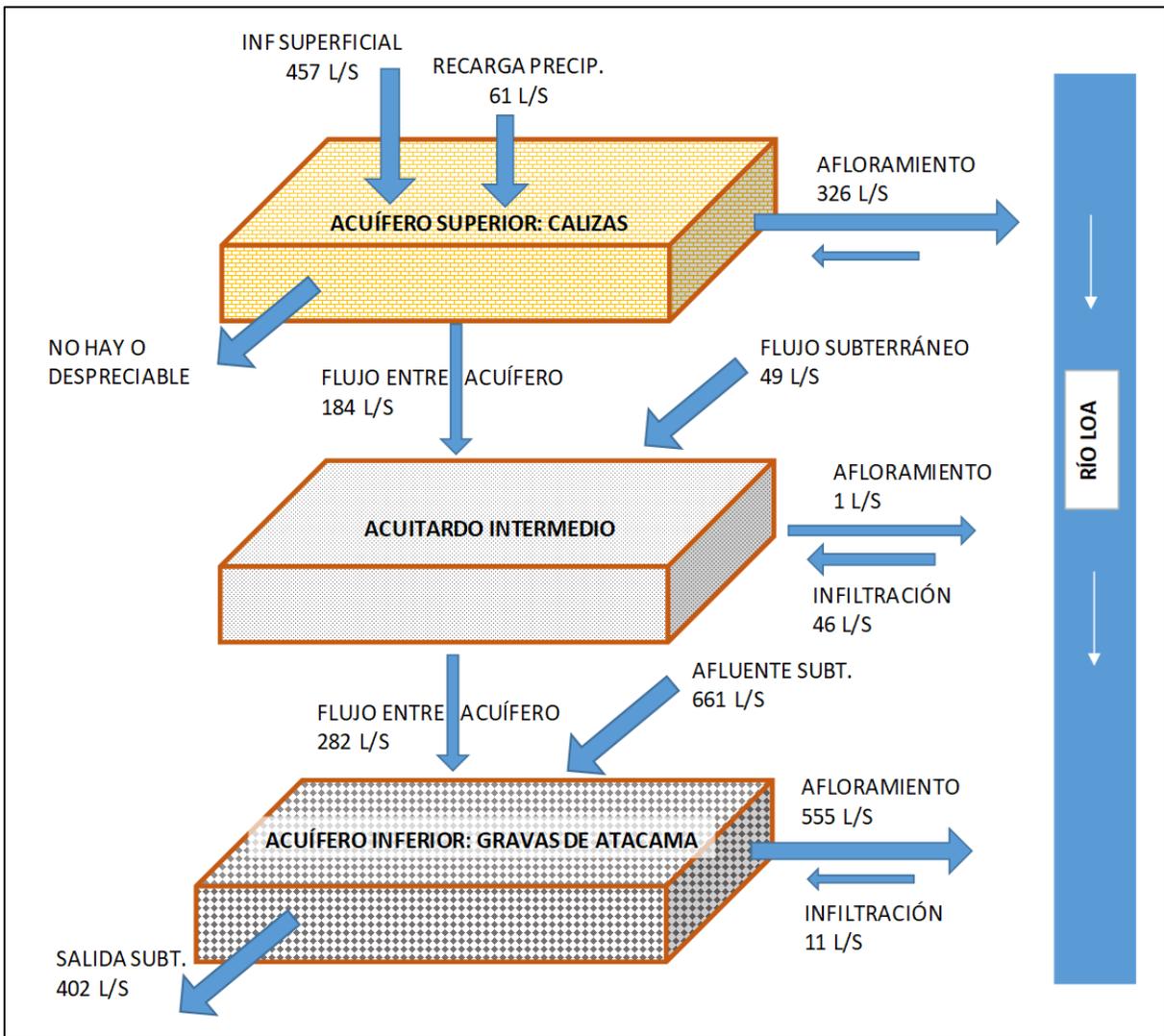
Fuente: Elaboración propia.

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. Éste vínculo se determina mediante un balance sobre la totalidad de la superficie de los acuíferos, por lo que no implica que esta interacción pueda encontrarse revertida en ciertos sectores que no han sido posible identificar.

CAPÍTULO 7 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN

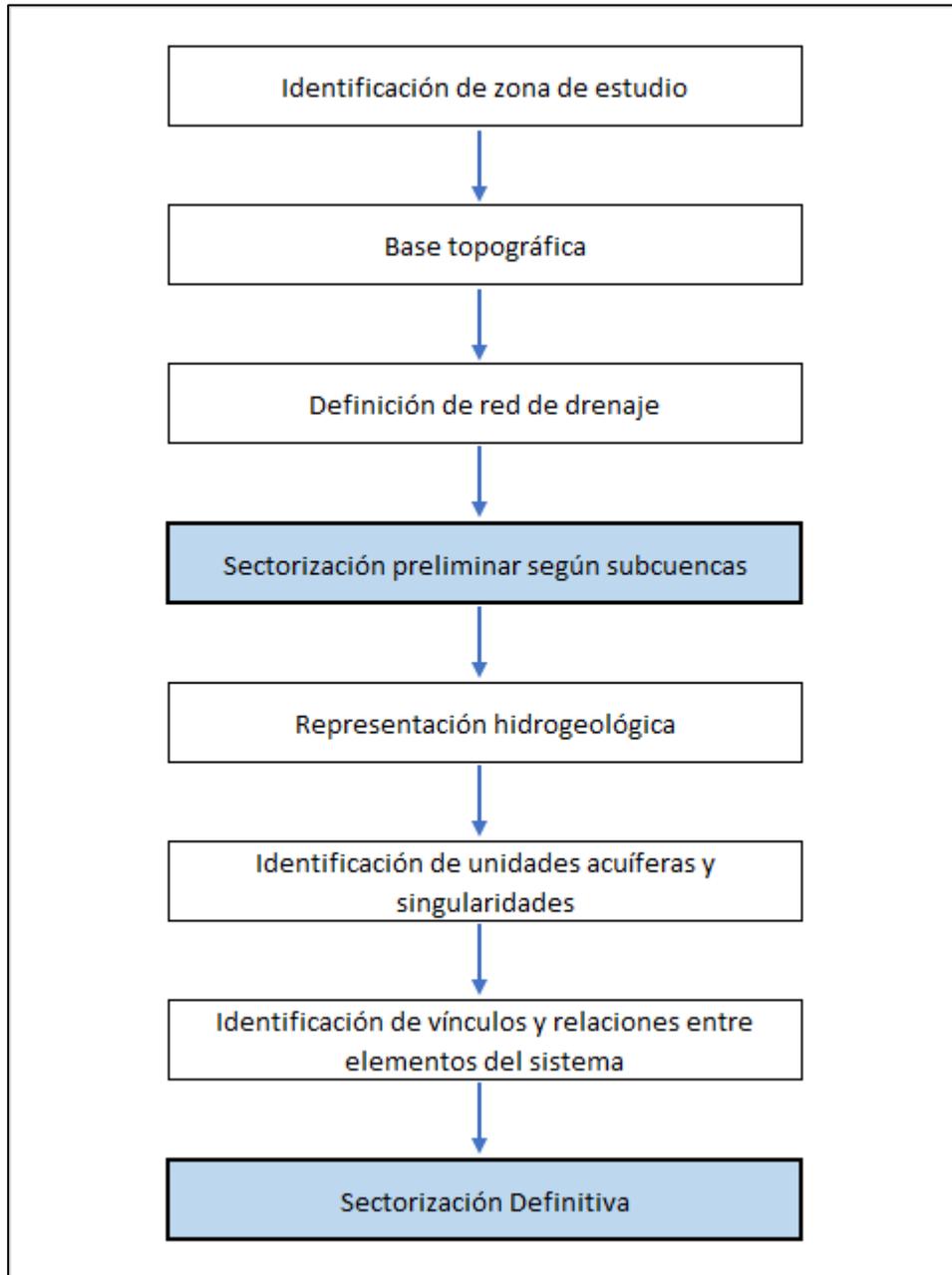
El presente capítulo presenta una propuesta de sectorización del SHAC de Calama, definida de acuerdo con la información recopilada y analizada en los capítulos anteriores.

Es importante recordar que el SHAC de Calama fue definido en DGA (2014c) enfocado en la sectorización de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común de toda la cuenca del río Loa. Es por esto que la sectorización realizada en el presente estudio es más detallada puesto que discrimina la variación vertical del relleno sedimentario.

7.2 METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN

La metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos según DGA (2014), se presenta en forma conceptual en la Figura 7.2-1. Consiste en caracterizar una serie de elementos que no son de relevancia dentro de la sectorización vertical que se busca en el SHAC de Calama, de igual forma, se ha seguido la metodología propuesta.

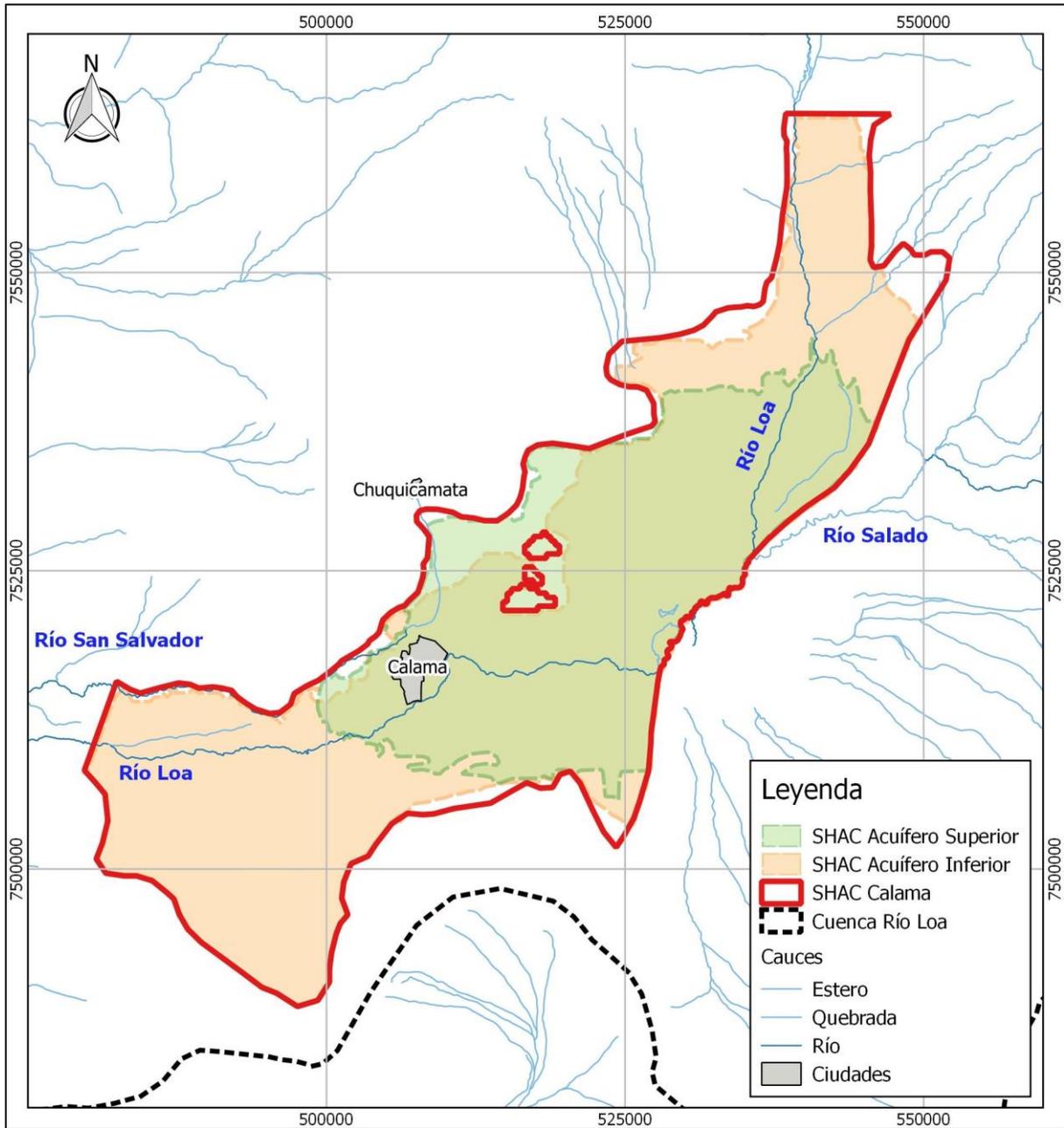
La caracterización hidrogeológica ha permitido identificar tres unidades acuíferas distribuidas verticalmente en el SHAC de Calama. Dentro de ellas, se ha determinado que la unidad intermedia o acuitardo, no presenta características hidráulicas que permitan la explotación de sus recursos hídricos, imposibilitando su definición como SHAC. Sin embargo, esta unidad presenta interacción de flujos con las unidades restantes, los cuales han sido definidos siguiendo la metodología que indica la identificación de posibles vínculos entre los SHAC y cursos superficiales.



Fuente: Elaboración Propia en base a DGA (2014).

Figura 7.2-1 Esquema Modelo Conceptual Cualitativo

Por lo tanto, en base a la caracterización hidrogeológica y la metodología planteada, se propone la subdivisión del SHAC de Calama en dos nuevos sectores que comprendan las unidades acuíferas superior e inferior. La delimitación de ambos SHAC propuestos se presenta en la Figura 7.2-2.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.2-2 SHAC Acuífero Superior y SHAC Acuífero Inferior

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 acuitado, se definen dos nuevos SHAC correspondientes al acuífero superior e inferior de Calama.

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

Se realizó una amplia revisión de antecedentes centrados en la cuenca del río Loa y en específico del sector correspondiente al SHAC de Calama. De esta forma fue posible obtener información referente a la caracterización vertical de su sistema acuífero.

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.

Mediante el análisis de antecedentes, correspondiente a interpretación de ensayos de geofísica y modelos numéricos, fue posible determinar la distribución espacial de las unidades acuíferas, con lo cual estimar su geometría.

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. Su diferencia se estima en la alta influencia que presentan las estadísticas meteorológicas con la cota altimétrica en la cuenca del río Loa.

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.

La caracterización hidroquímica se realizó primeramente sobre los cauces superficiales de mayor importancia dentro de la cuenca del río Loa. Aquello presentó la gran diferencia en la composición de las aguas del río Salado, con una alta carga sódica/potásica, frente a las del río Loa que, luego de su confluencia, adoptan similar calidad.

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. Se debe considerar que estos valores corresponden a cifras referenciales debido a la incerteza que existe en el cálculo de la interacción entre acuíferos y con el sistema superficial.

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.