

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

ESTUDIO ACUÍFERO DE CALAMA SECTOR MEDIO DEL RÍO LOA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS S.A.
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
S.I.T. N°295**

Santiago, Diciembre 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Abogada Sra. Loreto Silva

Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría

Jefe de División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrian Lillo

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sra. Andrea Osses

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Salgado

CONSORCIO MATRAZ CONSULTORES – UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Director de Proyecto - España
PhD Ingeniero Civil Xavier Sanchez-Vila

Director de Proyecto - Chile
Mcs. Hidrogeólogo Nicolás Iturra Jáuregui

Equipo de Profesionales:

Hidrogeólogo Pau Balart Nolla
Mcs. Ingeniero Geólogo Albert Brangari
PhD Ingeniero Civil Daniel Fernández
Hidrogeólogo Genís Freixas
Ingeniero Ambiental Christopher Henri
Hidrogeólogo Narcís Martí Antón
Geólogo Estanislao Pujades
Geóloga Violeta Velasco

INDICE

AGRADECIMIENTOS	12
1. RESUMEN EJECUTIVO	13
1.1 ANÁLISIS DE FORTALEZAS.....	17
1.2 ANÁLISIS DE DEBILIDADES	18
1.3 RECOMENDACIONES	19
1.4 INTRODUCCIÓN.....	22
1.5 OBJETIVOS Y ALCANCE	24
1.6 METODOLOGÍA.....	24
1.6.1 <i>Recopilación y Análisis de Antecedentes</i>	25
1.6.2 <i>Fase de Campo. Prospección geofísica</i>	25
1.6.3 <i>Caracterización Geológica, Hidrológica e Hidrogeológica</i>	25
1.6.4 <i>Desarrollo del modelo conceptual</i>	25
1.6.5 <i>Proyecto SIG</i>	27
1.6.6 <i>Red básica de monitoreo</i>	28
1.6.7 <i>Desarrollo del modelo numérico</i>	28
2. ESTUDIO DEL ACUÍFERO DE CALAMA	29
2.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	29
2.1.1 <i>Geología</i>	30
2.1.2 <i>Hidrología</i>	33
2.1.3 <i>Hidrogeología</i>	35
2.1.4 <i>Hidroquímica</i>	37
2.1.5 <i>Modelación conceptual y numérica</i>	40
2.1.6 <i>Plan de Alerta Temprana (PAT) – Minera El Tesoro</i>	52
3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	65
3.1 COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA EXISTENTE.....	65
3.2 CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	75
3.2.1 <i>Introducción</i>	75
3.2.2 <i>Objetivos de la campaña gravimétrica</i>	75
3.2.3 <i>Revisión de los antecedentes de campañas geofísicas</i>	76
3.2.4 <i>Desarrollo de la campaña de prospección</i>	77
3.2.5 <i>Resultados de la campaña gravimétrica</i>	79
3.3 DEFINICIÓN DE MODELO GEOLÓGICO	102
3.3.1 <i>Gestión de la información</i>	102
3.3.2 <i>Modelo geológico 3D</i>	104

3.3.3	<i>Desarrollo de perfiles estratigráficos</i>	105
3.3.4	<i>Generación del modelo 3D</i>	108
3.4	CONCLUSIONES DEL MODELO GEOLÓGICO 3D.....	110
4.	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA	111
4.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	111
4.2	PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	116
4.2.1	<i>Conductividad hidráulica</i>	116
4.2.2	<i>Coficiente de almacenamiento</i>	117
4.3	PIEZOMETRÍA REPRESENTATIVA DEL SISTEMA.....	118
5.	ANÁLISIS HIDROQUÍMICO	129
5.1	DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	134
5.1.1	<i>Aguas superficiales</i>	134
5.1.2	<i>Acuífero superior</i>	135
5.1.3	<i>Acuífero inferior</i>	137
5.2	ANÁLISIS HIDROQUÍMICO – ELEMENTOS MAYORES.....	139
5.2.1	<i>Aguas superficiales</i>	139
5.2.2	<i>Acuífero superior</i>	141
5.2.3	<i>Acuífero inferior</i>	143
5.3	ANÁLISIS HIDROQUÍMICO - CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).....	145
5.3.1	<i>Acuífero superior</i>	146
5.3.2	<i>Acuífero inferior</i>	150
5.4	ANÁLISIS HIDROQUÍMICO - SULFATOS (SO ₄).....	154
5.4.1	<i>Acuífero superior</i>	156
5.4.2	<i>Acuífero inferior</i>	160
6.	MODELO CONCEPTUAL	165
6.1	DOMINIO Y GEOMETRÍA DE MODELACIÓN.....	166
6.1.1	<i>Modelos conceptuales existentes</i>	167
6.2	HIDROLOGÍA.....	168
6.2.1	<i>Cursos de agua superficial</i>	168
6.2.2	<i>Presencia de salares</i>	170
6.2.3	<i>Hidrometeorología</i>	170
6.3	HIDROGEOLÓGÍA.....	174
6.3.1	<i>Unidades acuíferas</i>	174
6.4	BALANCE HÍDRICO DEL MODELO CONCEPTUAL.....	177
6.4.1	<i>Entradas</i>	179
6.4.2	<i>Salidas</i>	189

6.4.3	<i>Conexión y semi-desconexión entre acuíferos superior e inferior</i>	198
6.4.4	<i>Conexión del río Loa con el acuífero superior</i>	201
6.4.5	<i>Resumen balance global y discusión</i>	205
7.	MODELO NUMÉRICO	209
7.1	OBJETIVOS DE LA MODELIZACIÓN.....	209
7.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	209
7.3	METODOLOGÍA.....	211
7.3.1	<i>Discretización</i>	211
7.3.2	<i>Zonación de parámetros</i>	212
7.3.3	<i>Evaluación del modelo numérico</i>	212
7.4	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL	212
7.5	CONDICIONES DE CONTORNO	214
7.6	ZONIFICACIÓN DE PARÁMETROS	216
7.7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	218
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	223
8.1	CONCLUSIONES	223
8.2	ANÁLISIS DE FORTALEZAS.....	227
8.3	ANÁLISIS DE DEBILIDADES	227
8.4	RECOMENDACIONES	228
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Flujograma de decisiones.....	60
Figura 3-1. Modelo conceptual de la cuenca del río Loa. Fuente: Montgomery & Associates, 2009.	67
Figura 3-2. Corte geológico donde se observan diferentes fallas. Fuente: elaboración propia.	71
Figura 3-3. Columna estratigráfica tipo de la zona. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.	72
Figura 3-4. Perfil geológico transversal de la cuenca trazado en la localización marcada en la figura superior. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.....	73
Figura 3-5. Perfil geológico longitudinal de la cuenca trazado en la localización marcada en la figura superior. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.....	74
Figura 3-6. Distribución de los perfiles geofísicos existentes en la cuenca del Río Loa. Fuente: elaboración propia.	76
Figura 3-7. Fotografía del gravímetro utilizado durante los trabajos de la campaña de geofísica gravimétrica en la cuenca del Río Loa en Septiembre del 2012 Fuente: elaboración propia.....	77
Figura 3-8. Mapa de distribución de los puntos gravimétricos realizados en la campaña de geofísica en septiembre del 2012. Fuente: elaboración propia.	78
Figura 3-9. Mapa de distribución de los perfiles gravimétricos realizados. Fuente: IGT S.L.	79
Figura 3-10. Perfil gravimétrico 1. Fuente: IGT S.L.....	84
Figura 3-11. Perfil gravimétrico 2. Fuente: IGT S.L.....	85
Figura 3-12. Perfil gravimétrico 3. Fuente: IGT S.L.....	86
Figura 3-13. Perfil gravimétrico 4. (Fuente: IGT S.L.).....	87
Figura 3-14. Perfil gravimétrico 5. (Fuente: IGT S.L.).....	88
Figura 3-15. Perfil gravimétrico 6. (Fuente: IGT S.L.).....	89
Figura 3-16. Perfil gravimétrico 7. (Fuente: IGT S.L.).....	90
Figura 3-17. Perfil gravimétrico 8. (Fuente: IGT S.L.).....	91
Figura 3-18. Perfil gravimétrico 9. (Fuente: IGT S.L.).....	92
Figura 3-19. Perfil gravimétrico 10. (Fuente: IGT S.L.).....	93
Figura 3-20. Perfil gravimétrico 11. (Fuente: IGT S.L.).....	94
Figura 3-21. Perfil gravimétrico 12. (Fuente: IGT S.L.).....	95
Figura 3-22. Perfil gravimétrico 13. (Fuente: IGT S.L.).....	96
Figura 3-23. Perfil gravimétrico 14. (Fuente: IGT S.L.).....	97
Figura 3-24. Puntos con información geológica y litológica disponible. Fuente: elaboración propia.	103
Figura 3-25. Distribución de los cortes geológicos. Fuente: elaboración propia.....	105

Figura 3-26. Columna estratigráfica simplificada obtenida mediante la herramienta de gestión de datos geológicos en ArcGIS en la que se puede visualizar las cuatro unidades descritas en el modelo geológico. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 3-27. Ejemplo de perfil geológico obtenido con las herramientas de gestión geológica para ArcGIS (ESRI) e interpretado para la realización del modelo geológico. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 3-28. Superficies completas 3D del techo de cada una de las unidades definidas en el modelo geológico (Visualizadas en ArcScene; ArcGIS). Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 4-1. Correlación entre las unidades geológicas e hidrogeológicas (Fuente: elaboración propia a partir del informe de Knight Piésold, 2010).	115
Figura 4-2. Superficie piezométrica del acuífero superior definida a partir de los niveles medios medidos en los pozos los años 2008 y 2009. (Fuente: Elaboración propia).....	120
Figura 4-3. Dirección de la quebrada de la vertiente Ojos de Opache, y dirección de salida del flujo del agua subterránea del acuífero superior.	122
Figura 4-4. Superficie piezométrica del acuífero profundo definida a partir de los niveles medios medidos en los pozos los años 2008 y 2009. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 5-1. Puntos con análisis hidroquímicos disponibles. Fuente: Elaboración propia.....	130
Figura 5-2. Puntos categorizados por tipología hidrológica de muestreo. (Fuente: Elaboración propia).....	133
Figura 5-3. Distribución espacial de los puntos de aguas superficiales con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.	134
Figura 5-4. Distribución espacial de los puntos del acuífero superior con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.	135
Figura 5-5. Distribución espacial de los puntos del acuífero inferior con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.	137
Figura 5-6. Diagrama Piper de las muestras de agua superficial. (Fuente: Elaboración propia)...	140
Figura 5-7. Diagrama Piper de las muestras del acuífero superior. (Fuente: Elaboración propia).	142
Figura 5-8. Diagrama Piper de las muestras del acuífero inferior. Elaboración propia	144
Figura 5-9. Mapa de puntos con conductividad eléctrica representativa para el acuífero superior y representación de su modelo hidroquímico conceptual. (Fuente: Elaboración propia)	149
Figura 5-10. Mapa de puntos con conductividad eléctrica representativa para el acuífero inferior y representación de su modelo hidroquímico conceptual. (Fuente: Elaboración propia)	152
Figura 5-11. Mapa de puntos con concentración de sulfatos representativos para el acuífero superior con la representación del modelo hidroquímico conceptual de la conductividad. (Fuente: Elaboración propia).....	158
Figura 5-12. Mapa de puntos con concentración de sulfatos representativos para el acuífero inferior con la representación del modelo hidroquímico conceptual de la conductividad. (Fuente: Elaboración propia).....	162

Figura 6-1. Ubicación en planta del contorno del modelo conceptual. Fuente: elaboración propia.	167
Figura 6-2. Ubicación del contorno objeto de estudio con los contornos de los modelos del Tesoro, Tranque Talabre y Toqui. Fuente: elaboración propia.	168
Figura 6-3. Ubicación del área de estudio con la topografía (Fuente: elaboración propia).	171
Figura 6-4. Valores de pluviometría anual en función de la altitud en los distintas estaciones meteorológicas del entorno de la zona de estudio (cuenca del río Loa y altiplano adyacente). Las dos líneas oblicuas marcan la región admisible de valores precipitación-altitud. (Fuente: Elaboración propia).....	173
Figura 6-5. Precipitación media mensual para las estaciones de Calama y Chiu Chiu (Fuente: Aquaconsult, 2011).	174
Figura 6-6. Columna estratigráfica tipo de la zona (Fuente: Montgomery & Associates, 2007) ...	176
Figura 6-7. Representación en superficie de los límites del acuitardo (Fuente: elaboración propia).	177
Figura 6-8. Balance hídrico conceptual de la zona (Fuente: elaboración propia.)	179
Figura 6-9. Zona del contorno dónde se producen las mayores entradas subterráneas al sistema. Fuente: elaboración propia.	181
Figura 6-10. Superficie de la zona modelada en la que se considera el efecto de la recarga urbana y que se corresponde con la extensión de la ciudad de Calama (Fuente: elaboración propia).....	182
Figura 6-11. Superficies de recarga por retorno de regadío en las zonas de Calama y Chiu-Chiu (Fuente: elaboración propia).....	184
Figura 6-12. Ubicación de las balsas del Tranque Talabre donde se produce infiltración al acuífero superior (Fuente: elaboración propia).	185
Figura 6-13. Precipitación media mensual para las estaciones de Chiu Chiu y Calama (Fuente: Aquaconsult, 2011)	186
Figura 6-14. Ubicación de las secciones de aforo (Fuente: Knight Piésold, 2010).....	189
Figura 6-15. Ubicación de las vertientes de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).....	192
Figura 6-16. Caudal histórico en manantiales (Fuente: Minera El Tesoro).....	193
Figura 6-17. Ubicación de las extracciones contabilizadas en los antecedentes disponibles (Fuente: elaboración propia).....	194
Figura 6-18. Salida subterránea a través del margen oeste del contorno del modelo. Fuente: elaboración propia.	196
Figura 6-19. Ubicación de las principales zonas con cuerpos de agua lámina libre formados por humedales y salares (Fuente: elaboración propia).	198
Figura 6-20. Diferencias piezométricas (en metros) entre el acuífero superior y el profundo. Fuente: elaboración propia.	201
Figura 6-21. Ubicación de las estaciones de aforo de aguas superficiales Conchi, Salado y Escorial. Fuente: elaboración propia.	203

Figura 6-22. Registro histórico de caudales superficiales aforados en las estaciones Conchi, Salado y Escorial. Fuente: elaboración propia.....	204
Figura 6-23. Resultado de sustraer la suma de caudales de las estaciones Conchi y Salado, al caudal de la estación Conchi. Fuente: elaboración propia.....	205
Figura 7-1. Visualización de las capas del modelo y de los ríos: Acuífero superior (rosa), acuitardo (verde), acuífero profundo (azul). Fuente: elaboración propia.	210
Figura 7-2. Visualización de la estructura y de la continuidad del acuitardo (verde) dentro de Visual Modflow. Fuente: elaboración propia.	211
Figura 7-3. Visualización de la malla en tres dimensiones. Para poder visualizarse bien, la malla de la figura que se presenta es una malla virtual con menos celdas de las que tiene el modelo. Fuente: elaboración propia.	213
Figura 7-4. Visualización de un perfil vertical de la malla. Se pueden ver la localización de las tres capas. Fuente: Elaboración propia.	213
Figura 7-5. Condiciones de contorno utilizadas en el modelo numérico. Fuente: elaboración propia.	214
Figura 7-6. Visualización de las malla en tres dimensiones con las condiciones de contorno y los ríos. Niveles prescritos aparecen en color rojo; ríos en color azul. Fuente: elaboración propia.	215
Figura 7-7. Visualización de las zonas de la segunda capa del modelo numérico. La parte central contiene el acuitardo y se representa mediante una zona de menor permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.	216
Figura 7-8. Zonificación de la recarga separando zonas de riego, zonas urbanas , Tranque Talabre y recarga por precipitación. Fuente: Elaboración propia.	217
Figura 7-9. Mapa piezométrico simulado del acuífero superior (capa 1). Fuente: Elaboración propia.	218
Figura 7-10. Mapa piezométrico simulado del acuífero inferior (capa 3). Fuente: Elaboración propia.	219
Figura 7-11. Mapa piezométrico simulado del acuífero superior (capa 1). Fuente: Elaboración propia.	220

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Balance del modelo conceptual del Modelo de Calama realizado por la DGA en el informe S.I.T. 85	41
Tabla 2-2. Balance del modelo conceptual realizado por DICTUC (2005) para el sector de Pampa Llalqui.	42
Tabla 2-3. Balance del modelo conceptual realizado por M&A para el sector de campo de pozos de MET.....	43
Tabla 2-4. Características del modelo numérico realizado por M&A para MET en 2009.....	44
Tabla 2-5. Resultados del balance del modelo numérico (estacionario) realizado por M&A para MET en 2009.	45
Tabla 2-6. Resultados del balance del modelo conceptual de Tranque Talabre realizado por KP en 2010	46
Tabla 2-7. Características del modelo numérico realizado por KP para CODELCO (TranqueTalabre) en 2010.	47
Tabla 2-8. Balance general de la cuenca para el modelo numérico en régimen permanente realizado por KP para CODELCO (TranqueTalabre) en 2010.	47
Tabla 2-9. Resultados del balance del acuífero en calizas o acuífero superior, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010.....	48
Tabla 2-10. Resultados del balance del acuitardo, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010	48
Tabla 2-11. Resultados del balance del acuífero en gravas o acuífero inferior, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010.....	49
Tabla 2-12. Resultados del balance del modelo conceptual de El Toqui realizado por Aquaconsult en 2011	50
Tabla 2-13. Características del modelo numérico realizado por Aquaconsult para CODELCO en 2011	50
Tabla 2-14. Resultados del balance del modelo numérico en régimen permanente del sector de El Toqui realizado por Aquaconsult en 2011.....	51
Tabla 2-15. Caudales de extracción otorgados en 2004 del campo de pozos MET.....	52
Tabla 2-16. Nueva Línea Base Caudales Superficiales	54
Tabla 2-17. Esquema del Programa de Monitoreo Global y sus componentes	56
Tabla 3-1. Tabla resumen de las unidades geológicas principales en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.....	70
Tabla 3-2. Resultados de los ensayos gravimétricos.....	101
Tabla 3-3. Resumen de los puntos con información geológica y/o litológica en la cuenca de estudio. (Fuente:Elaboración propia).....	105

Tabla 4-1. Valores cuantitativos y cualitativos de permeabilidad en las unidades hidrogeológicas.	117
Tabla 4-2. Valores cuantitativos y cualitativos de almacenamiento en las unidades hidrogeológicas.	118
Tabla 4-3. Valores de nivel utilizados para hacer la piezometria del acuífero superior.	123
Tabla 5-1. Puntos de agua analizados por cada uno de los entes presentes en la zona de estudio	130
Tabla 5-2. Tipos de análisis disponibles.	131
Tabla 5-3. Clasificación de puntos muestreados en la cuenca de Calama en función de su representatividad hidrogeológica.	132
Tabla 5-4. Resumen de los puntos de aguas superficiales por proyecto y tipo.	135
Tabla 5-5. Puntos del acuífero superior con información hidroquímica.....	136
Tabla 5-6. Puntos del acuífero inferior con información hidroquímica	138
Tabla 5-7. Listado de puntos con los valores de conductividad eléctrica utilizados como representativos para el acuífero superior.	150
Tabla 5-8. Listado de puntos con los valores de conductividad eléctrica utilizados como representativos para el acuífero inferior.	153
Tabla 5-9. Listado de puntos con los valores de concentración de sulfatos utilizados como representativos para el acuífero superior.	159
Tabla 5-10. Listado de puntos con los valores de concentración de sulfatos utilizados como representativos para el acuífero inferior.	163
Tabla 6-1. Precipitación media mensual para las estaciones de Chiu Chiu y Calama (Fuente: Aquaconsult, 2011).....	187
Tabla 6-2. Resumen de extracciones promedio.	195
Tabla 6-3. Balance anual promedio para la gran cuenca de Calama.	206

Agradecimientos

Quisieramos agradecer a quienes ayudaron en la etapa de recopilación, digitalización y compilación de la información. Especialmente a Gianinna Leyton por su colaboración y apoyo en las etapas iniciales.

Al equipo formado de DGA por Adrián Lillo, Andrea Osses y Juan Carlos Salgado por haber facilitado la ejecución y coordinación durante toda la evolución del proyecto.

Agradecimientos especiales a Martin Brown, Superintendente de Medio Ambiente de Minera El Tesoro, por la disposición a aportar y colaborar en la construcción de un modelo integrado para la cuenca. Así como a Juan Pablo Schuster de Montgomery & Associates por facilitarnos el acceso a la información solicitada.

Nuestros agradecimientos a Jorge Jemio, y a Gladys Lorca Directora de Exploración Distrital e Hidrogeología GRMDD de Codelco, por el suministro de información hidrogeológica sobre el Tranque Talabre.

1. Resumen Ejecutivo

La Dirección General de Aguas - MOP resolvió por licitación pública (No de Resolución 1962 de 11 de julio de 2012) adjudicar a Matraz Consultores Asociados Limitada, en consorcio con la Universitat Politècnica de Catalunya, el proyecto denominado "MODELACION ACUIFERO DE CALAMA CUENCA DEL RIO LOA".

La zona de estudio ha sido objeto de un número importante de estudios que han abordado ámbitos parciales del dominio y con objetivos diversos. El estudio que se presenta tiene como tarea principal la integración de toda la información hidrogeológica disponible, con el objetivo de elaborar un modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero de Calama. Para conseguir esto, además de compilar un vasto volumen de información, ha sido necesario levantar nueva información en zonas en las que se disponía de un conocimiento prácticamente nulo del sistema acuífero. Esto se ha logrado mediante una campaña gravimétrica, ejecutada durante el desarrollo de este proyecto.

El trabajo realizado permite reunir en un único trabajo, el estado del conocimiento hidrogeológico para la cuenca de Calama. De esta forma, el presente estudio se transforma en una herramienta de consulta y análisis para abordar los distintos planes de seguimiento, alerta, monitoreo y control de las extracciones existentes, con una perspectiva global del sistema de recursos hídricos de Calama.

Las conclusiones a las que se han podido llegar en el presente trabajo se resumen a continuación:

- La zona geográfica dónde se ubica el presente estudio se sitúa en la cabecera del río Loa y engloba las poblaciones de Calama y San Francisco de Chiu Chiu. Los principales ríos que discurren por el contorno son el Loa, el San Salvador y el río Salado. Dentro del contorno se localizan los salares de Talabre, del Indio, Rudolph y Brinkerhoff.
- En la zona de estudio dominan tres subtipos climáticos que corresponden al clima desértico interior (cotas superiores a 1000 m.s.n.m.), el clima desértico marginal de altura (> 2000 m.s.n.m.) y clima de estepa de altura (> 3000 m.s.n.m.).
- Desde el punto de vista geológico, la cuenca engloba una serie de materiales sedimentarios que han rellenado la cuenca del río Loa durante los últimos 50 millones de años. Estos materiales presentan un espesor variable con un valor medio entorno los 300 m, y están dispuestos sobre un basamento de rocas ígneas y metamórficas, que también componen las principales cumbres de la zona.

- La gran cuenca de Calama está fuertemente controlada por el régimen tectónico y sistema estructural. De esta forma, el fondo rocoso de la cuenca se compone de un basamento impermeable de bloques hundidos y alzados limitados por fallas. Lo anterior provoca la presencia de zonas con un relleno sedimentario espacialmente variable.
- Las principales unidades hidrogeológicas presentes en la zona corresponden a la UH-1, formada por depósitos de cobertura aluvio-evaporíticos y no saturados; la UH-2 que engloban los materiales calcáreos del acuífero superior del Loa; las UH-3 y UH-4 que conjuntamente conforman el acuitardo limo-arcilloso; la UH-5 que conforma el acuífero inferior de Calama compuesto por gravas y conglomerados y la UH-6 compuesta por el basamento ígneo-metamórfico. De este modo se pueden suponer la existencia de dos unidades acuíferas principales: el acuífero superior, de carácter libre, y el acuífero inferior, de carácter semiconfinado. Ambos acuíferos se encuentran separados por un acuitardo en la gran mayoría del área modelada.
- Las conductividades hidráulicas para el acuífero superior tienen un rango amplio, que está en función del grado de porosidad secundaria y van del orden de $1 \times 10^{+02}$ a 1×10^{-02} m/d. El acuitardo tiene unos valores siempre inferiores a 1×10^{-03} - 1×10^{-06} m/d, y el acuífero profundo tiene un rango promedio de $1 \times 10^{+01}$ a 1×10^{-03} m/d.
- Los coeficientes de almacenamiento estimados para el acuífero superior tienen un rango de valores de 1×10^{-4} a 2×10^{-2} , mientras que el acuífero inferior oscilarían entre los 3×10^{-5} a 3×10^{-1} , valores representativos de su carácter semiconfinado.
- Se ha observado a través del análisis hidroquímico que la recarga de la gran cuenca de Calama proviene subterráneamente desde dos fuentes principales: la más importante provendría de la cuenca del río Salado con una marcada huella clorurada sódica con influencias geotermales, y otra fuente importante provendría desde aguas arriba del embalse Conchi con una marca de aguas tipo cloruradas más magnésico-cálcicas
- En términos generales, la dirección principal de flujo subterráneo para ambos acuíferos es de norte-este a sur-oeste, con salida subterránea por el borde oeste de la cuenca. Los gradientes hidráulicos oscilan entre 0.2%-1.0% para el acuífero superior y entre 0.1%-1.5% para el inferior.
- En la parte central de la cuenca, la dirección principal de flujo se re-orienta en sentido norte-sur, bordeando una zona de menor velocidad de flujo en el entorno

del Salar Del Indio, al norte de la ciudad de Calama. Inmediatamente atravesada la zona del Salar de Talabre la dirección de flujo principal se vuelve a reorientar en sentido este-oeste hasta la salida de la cuenca en el borde oeste.

- Los mapas de conductividad eléctrica (CE) confirman la presencia de una zona de menor velocidad de flujo o mayor tiempo de residencia en la zona en torno al Salar Del Indio, al norte de la ciudad de Calama. En esta zona, se registran valores de CE elevados (>25.000 uS/cm) en ambos acuíferos.
- La orientación o lineamiento dibujado por la quebrada de la vertiente Ojos de Opache tiene el mismo rumbo que el sentido de flujo del agua subterránea del acuífero superior. De esta forma, la geomorfología reciente sustenta la tesis de que el acuífero superior se drena por completo a través de una serie de vertientes, de las cuales Ojos de Opache es la principal.
- En el caso del acuífero inferior, dentro del dominio modelado no se observan afloramientos naturales y por lo tanto se estima que el flujo sale subterráneamente fuera del dominio modelado hacia el oeste.
- Las entradas al sistema se han evaluado en el rango 1200 l/s a 2000 l/s. El aporte principal al sistema procede de la entrada de agua por los contornos norte y este (75% del total de entradas). El resto de elementos de recarga incluyen la infiltración del Tranque Talabre, precipitación, los excedentes de riego y las pérdidas de redes urbanas y mineras.
- Las salidas del sistema oscilarían entre 1200 l/s y 2300 l/s. Las descargas del acuífero superior al río Loa y las descargas de las vertientes suponen la salida natural más importante (70% del total de salidas), mientras que las extracciones por pozos suponen entre el 10% - 15% de las descargas totales. El sistema presenta también una descarga subterránea a través del contorno oeste del modelo, y pérdidas por evaporación directa.
- El balance neto del sistema es deficitario, con una diferencia que oscilaría en el rango de 0 l/s y 300 l/s. La consecuencia directa de esta situación deficitaria es el descenso progresivo de los niveles piezométricos, especialmente concentrado en las zonas de extracción.
- Toda variación en el nivel del río Loa afectará directamente el gradiente con el acuífero superior y por lo tanto afectará la descarga desde el acuífero al río, afectando el balance global. A su vez, una variación en la descarga del acuífero al río afectará directamente la descarga registrada en las vertientes.

- El análisis histórico de caudales superficiales confirma la estrecha relación entre el río Loa y el acuífero superior, y la hipótesis presentada por Ingeorec 2005 que establece que en general es el acuífero superior quien aporta recursos hídricos al río Loa. En este trabajo se ha determinado además, que ese aporte es variable, estacional y depende de la altura de carga hidráulica del río Loa.
- Se ha calculado que entre el periodo 2007 y 2011, los aportes del acuífero superior al río Loa se comportaron de manera estacional y registraron una media para el periodo de 400 l/s.
- En función del estado deficitario en el balance hídrico de la cuenca, y el uso intenso de los recursos hídricos en esta árida región del país, se propone realizar un estudio de recarga artificial sobre las avenidas por eventos meteorológicos esporádicos. Esto permitiría modificar el balance hídrico agregando recursos que naturalmente van a parar fuera del dominio modelado.
- Se recomienda realizar una gestión integrada a nivel de la cuenca, que permita gestionar los planes de alerta temprana de forma integrada entre los principales usuarios de los recursos hídricos.

El gran volumen de antecedentes e información disponible ha permitido construir un modelo hidrogeológico regional integrado de la gran cuenca de Calama. El modelo hidrogeológico conceptual ha sido construido a partir de 3 elementos básicos como son: geología, hidrología e hidrogeología.

A partir del desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual de la gran cuenca de Calama, se ha construido un modelo numérico de flujo preliminar. Este modelo numérico preliminar representa el primer paso en la etapa de modelación y adelanta los lineamientos para el desarrollo de un modelo numérico de detalle, que permita en el futuro ejecutar a la DGA una gestión integral de los recursos hídricos de la cuenca.

1.1 Análisis de fortalezas

Las fortalezas del trabajo presentado aquí residen en:

- Integración y compilación de toda la información disponible provista por DGA.
- Desarrollo de una base de datos integrada de gran potencialidad, y desarrollo de un modelo geológico 3D a nivel regional.
- Generación de más de 200 Km de nuevos datos gravimétricos, que muestran señalan sobre la posición del basamento en zonas donde existía escasa o nula información sobre la geometría de la cuenca.
- Integración de la geología, hidrología e hidrogeología como 3 aspectos base en la metodología para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual integrado.
- Análisis de los datos hidroquímico y desarrollo de un modelo de flujo hidroquímico coherente con los datos de niveles, geología estructural, parámetros hidroquímicos generales y elementos mayores.
- Postulación de un modelo hidrogeológico conceptual que integra información de de diversas y variadas fuentes.
- Construcción de un modelo numérico de flujo preliminar que permite estimar las características y requerimientos técnicos de un modelo de estas dimensiones regionales, volumen de bases de datos necesarias y posibilidades para construir potenciales escenarios de simulación.

1.2 Análisis de debilidades

Los aspectos que requieren de mayor atención y cuidado son los siguientes:

- Existen áreas del dominio modelado con ausencia de información. Esta ausencia de información dice relación con la geometría de la cuenca y presencia de las unidades acuíferas, información de niveles y hidroquímica.
- El enorme volumen de información disponible requiere de un esfuerzo de revisión y análisis crítico de los datos para poder compilar todo en una única base y lenguaje común, especialmente cuando las fuentes que han generado la información provienen de una amplio abanico de empresas, competencias e intereses. Lo anterior obliga a mantener una revisión crítica permanente del origen y calidad de los datos utilizados, puesto que una incorrecta gestión de la base de datos puede inducir a errores en el análisis posterior.
- Ausencia de análisis detallados sobre aspectos y zonas específicas de la cuenca que si requieren mayor atención.
- No se han desarrollado estudios hidrogeológicos en las sub-cuencas que alimentan a la gran cuenca de Calama, y por lo tanto parte del conocimiento que existe sobre las fuentes de alimentación de la hidrogeología de Calama se basan en supuestos e hipótesis que necesitan ser validados.

1.3 Recomendaciones

En relación con los planes de monitoreo y futuras investigaciones de la hidrogeología en la gran cuenca de Calama se puede señalar lo siguiente:

- La zona geográfica de mayor incidencia en los recursos de la sub-cuenca corresponde a la importante cuenca hidrográfica del río Salado y a las cuencas ubicadas aguas arriba del embalse Conchi. La sub-cuenca del río Salado posee una hidroquímica particular puesto que recibe sus aguas desde manantiales geotermales, descarga subterránea y aguas de precipitación y deshielos. Resulta altamente provechoso realizar un estudio dedicado de esta subcuenca, en donde se integre el conocimiento hidrogeológico con las condicionantes hidroquímicas y geotermales. Un modelo de estas características permitiría cuantificar los caudales de recarga que esta sub-cuenca vierte hacia la gran cuenca de Calama, y permitiría caracterizar en detalle la influencia hidroquímica que ejercen sus aguas sobre las zonas más bajas.
- De la misma forma que con la sub-cuenca del río Salado, sería provechoso contar con una modelación conceptual que integre la hidrogeología de la sub-cuenca del río Loa aguas arriba del embalse Conchi, debido a que esta sub-cuenca regula la la segunda fuente más importante de recursos hídricos que alimentan la cuenca de Calama.
- En una amplia zona del borde este del dominio modelado, existe incertezas sobre la presencia y extensión de los acuíferos así como de los tiempos de residencia del agua subterránea. Estas incertezas provocan que no sea posible valorar la recarga desde el borde sur-este (al sur de la sub-cuenca del río Salado). Para resolver estas interrogantes, resulta necesario lograr medir niveles y medir conductividades eléctricas o sólidos totales disueltos.
- En la entrada norte del dominio, cerca del área del embalse Conchi es necesario cuantificar los caudales de entrada subterránea y la presencia o ausencia de los niveles acuíferos superior e inferior. Esto se lograría mediante sondajes, geofísica dedicada y muestras químicas de aguas subterráneas.
- La salida oeste del modelo, actualmente considera un caudal de 240 l/s a través del acuífero inferior. Este valor es una estimación gruesa recopilada de la bibliografía que fue obtenido a través de cálculos de secciones de Darcy. Este valor debiese ser precisado con un balance hídrico dedicado al acuífero inferior mediante

las investigaciones propuestas para mejorar el conocimiento de las entradas, así como una geofísica dedicada para modelar con precisión la geometría de la sección de paso del borde oeste.

- En relación con los planes de monitoreo de niveles de ambos acuíferos, se recomienda mantener las frecuencias mensuales actuales para todas las captaciones disponibles, y mejorar la base de datos entregada en este proyecto mediante su actualización periódica.
- En relación con los planes de alerta temprana (PAT), se recomienda una revisión técnica que apunte a considerar el sistema de forma integrada y en su conjunto. En este sentido, la recomendación pasa por considerar que las medidas de gestión aguas arriba inciden directamente aguas abajo y por tanto no es posible gestionar eficientemente las zonas de forma separada.
- Se recomienda investigar la relación que existe entre la altura de la superficie del río Loa y las descargas de las vertientes. El análisis de esta situación requiere determinar la existencia de una correlación entre las descargas del embalse Conchi con los niveles de aforo del río Loa (en distintas secciones de aforo) y las descargas históricas de las vertientes en la salida oeste de la cuenca.
- Se recomienda la revisión de los cálculos de almacenamiento en aquellas zonas sujetas a un bombeo intensivo. Producto de los caudales de bombeo, existen áreas sensibles en donde es posible que se produzcan cambios en los flujos verticales entre el acuífero superior e inferior.
- Se recomienda desarrollar un modelo numérico de flujo de detalle a partir del modelo hidrogeológico conceptual y modelo numérico preliminar desarrollado en este trabajo. Esta herramienta permitiría realizar una gestión integrada de los recursos de la cuenca y evaluar en su conjunto los impactos de distintos escenarios de simulación.
- La precipitación directa sobre la cuenca es una componente menor del balance global, y por lo tanto no incide sustancialmente en la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, las avenidas e inundaciones esporádicas producto de eventos meteorológicos de carácter torrencial si contienen un potencial importante como fuente de recarga de aguas subterráneas. Para poder hacer uso de estos recursos, se propone el estudio de la infiltración y almacenamiento subterráneo de eventos meteorológicos torrenciales en la zona.

- Se puede realizar un estudio de investigación e inversión, compartida con los privados y que les permita operar en el futuro a modo de cuenta de ahorro de los recursos hídricos infiltrados artificialmente. Sobre esto último existe experiencia en otras partes del mundo, como forma de revertir los descensos regionales sostenidos en la cuenca.

1.4 Introducción

La Región de Antofagasta presenta condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos. Esta situación se ha incrementado durante la última década, particularmente por el crecimiento de los sectores productivos, y en especial por el desarrollo de la minería, principal motor de la economía del país. La aparición de nuevos proyectos en la Región ha generado un aumento de la demanda de aguas subterráneas, lo que se ha traducido en un mayor uso intensivo de los derechos de aprovechamiento otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA). A lo señalado se suma el hecho de que existe una gran cantidad de derechos subterráneos constituidos, fundamentalmente para la minería, dentro de la región. La cuenca del río Loa constituye la principal fuente de abastecimiento de recursos hídricos de la región; sin embargo, el desarrollo productivo, socio-cultural y los intereses del medioambiente dependientes de estos recursos se encuentran en una situación crítica desde el punto de vista de su sostenibilidad. En una condición en que por un lado, el río Loa está declarado agotado, y por otro lado, que el sistema río-acuífero está fuertemente interconectado en gran parte de la cuenca, lo que significa que una explotación subterránea intensiva sin el control adecuado impactará necesariamente los recursos superficiales. El sector acuífero de la cuenca media del río Loa, en adelante acuífero de Calama, se localiza entre Yalquincha y la Confluencia del río Loa con el San Salvador. Sobre este acuífero existe una extracción subterránea neta en el orden de los 500 l/s, y se espera que a fines de la presente década se incremente en al menos 400 l/s adicionales, ya sea por el inicio de las extracciones en Pampa Yalqui o por el necesario drenaje de los rajos asociados a la explotación minera de Mansa Mina y El Toqui. A este escenario se agrega el potencial efecto sobre la calidad de los recursos hídricos provenientes de la actividad minera, tal como el Tranque de Relave Talabre situado en la zona norte del área de estudio. Con una escorrentía subterránea renovable estimada en el orden de los 750 l/s para el sector medio de la cuenca del río Loa, la sostenibilidad en el largo plazo del acuífero de Calama se basa principalmente en el gran volumen de agua almacenada y la dinámica de los sub acuíferos que lo componen, así como de un adecuado manejo y control de los posibles efectos no deseados asociados a cada una de las intervenciones. Los acuíferos que componen el acuífero de Calama presentan características perfectamente diferenciables. Un acuífero superior localizado en roca cálcica y espesor medio aproximado de 50m, de naturaleza kárstica debido al flujo preferencial por fracturas de origen tectónico y por una red de canales generados por

dilución de la roca. Presenta una rápida renovación y en algunos sectores una estrecha interrelación con el río Loa y su variabilidad estacional, tanto en su recarga como en su descarga. Un acuífero inferior, muy antiguo, conformado por detritos no homogéneos y mal clasificados, de espesor medio cercano a los 150 m, de escasa productividad general y dinámica de flujo lenta, con recarga y descarga sin relación aparente con el río Loa, debido al fuerte confinamiento ejercido por un paquete de sedimentos finos de aproximadamente 100 m de espesor que subyace al acuífero superior.

La DGA estima que en algunos sectores específicos la desconexión hidráulica entre ambos acuíferos pueda estar debilitada, y que frente al aumento de las explotaciones del acuífero inferior es esperable que la proyección espacial de las depresiones induzca una recarga significativa desde el acuífero superior, por sobre la condición de equilibrio actual, y con ello eventualmente se afecte al río Loa y las vertientes de escurrimiento superficial permanente del área. No obstante lo anterior, el efecto indicado podrá ser percibido en la medida que sobre estos sectores de conexión concurren algunos factores desfavorables, como por ejemplo: cercanía al río Loa o vertientes, valor alcanzado por el gradiente inducido, permeabilidad hidráulica de la conexión existente, etc. En el mejor de los escenarios los efectos podrán ser imperceptibles debido a la atenuación propia del almacenamiento de los acuíferos y a la estacionalidad del río Loa, que durante el invierno escurre hasta su desembocadura posibilitando una mayor recarga, del mismo modo que con los aportes eventuales de las crecidas originadas por las precipitaciones estivales. Nuevas investigaciones efectuadas por las Mineras de la zona, han aumentado el conocimiento hidrogeológico del acuífero de Calama, aunque el detalle y el análisis de la información levantada se enmarcan en los intereses y compromisos asumidos individualmente por cada una de ellas. Así, la zona oeste se encuentra levantada en detalle por Minera El Tesoro, producto de compromisos de orden ambiental y de un Plan de Alerta Temprana asociado al ejercicio de derechos de agua; la zona centro norte, levantada detalladamente por CODELCO con motivo de compromisos ambientales relacionados con las infiltraciones del Tranque Talabre y de sus proyectos Mineros Mansa Mina y Quetena; la zona suroeste, recientemente levantada por la empresa KGHM International en razón de la elaboración de un PAT para la explotación de sus derechos en Pampa Yalqui. Las dos primeras empresas poseen modelos conceptuales y matemáticos construidos fundamentalmente sobre la base de la información propia, y la tercera se encuentra en vías de construcción de su modelo conceptual y la definición del dominio de

su modelación matemática. En razón de lo anterior, la DGA ha estimado pertinente la licitación de un trabajo de modelación hidrogeológica, que sobre la base de la integración de toda la información disponible, elabore un modelo conceptual único del acuífero de Calama, cuya modelación matemática permita dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de las extracciones.

1.5 Objetivos y alcance

El objetivo general del estudio es construir un modelo de hidrogeológico del acuífero de Calama, que a partir de la integración de toda la información hidrológica disponible, permita dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de las extracciones existentes. Como objetivos específicos se identifican los siguientes:

- Generar la geometría del Acuífero.
- Generar catastros de la demanda.
- Definición y caracterización de unidades acuíferas principales.
- Realizar catastro de pozos y niveles.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga.
- Obtener parámetros hidrogeológicos del acuífero.
- Definir modelo conceptual del acuífero.
- Definición del dominio, y construcción preliminar de un modelo hidrogeológico matemático en base Visual Modflow para el acuífero de Calama con la información del estudio.
- Representación territorial de la información del estudio (SIG).

Para abordar los objetivos del proyecto, se han definido X etapas principales

1.6 Metodología

El desarrollo de este proyecto contempla una extensa recopilación de antecedentes y análisis; caracterización hidrogeológica de la cuenca; definición y caracterización de los acuíferos principales; desarrollo de modelo conceptual; elaboración de un modelo

hidrogeológico y proposición de red básica de monitoreo. A continuación se describe y detalla la metodología seguida para desarrollar los objetivos del estudio.

1.6.1 Recopilación y Análisis de Antecedentes

Se efectúa una completa recopilación de los estudios básicos y antecedentes (informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas, datos puntuales, etc.) provistos por la DGA. En particular, se considera la información de distintas instituciones e iniciativas privadas que están descritas en las bases administrativas de la prestación de servicios personales para la modelación del acuífero de Calama. El resultado de esta actividad es utilizar mapas topográficos, geológicos, hidrogeológicos, climatológicos, de suelo y uso de la tierra de la zona de estudio. La revisión de la información hidrogeológica existente pone énfasis en los datos de pozos perforados en la zona, pruebas de bombeo, perfiles estratigráficos y geofísicos.

1.6.2 Fase de Campo. Prospección geofísica

Específicamente se ha ejecutado un estudio de prospección de perfiles geofísicos gravimétricos del orden de 200 km, considerando que cada estación gravimétrica debiese tener una separación máxima a lo más de 2 Km, con el objeto de levantar datos en los sectores con déficit de información, tal como en el sector oeste, sur y noreste del área de estudio.

1.6.3 Caracterización Geológica, Hidrológica e Hidrogeológica

Caracterización de las precipitaciones y caudales dentro de la cuenca con el objeto de identificar la dinámica de las recargas y descargas al río Loa, los flujos bases dentro de la cuenca y la influencia de las crecidas en los procesos de recarga del acuífero de Calama. Para la caracterización hidrogeológica del Acuífero de Calama se efectúa un estudio hidrogeológico en base a la definición del marco geológico y geomorfológico de la zona. Se considera toda la información sobre mapas hidrogeológicos, prospecciones existentes, estratigrafía de sondajes, informes hidrogeológicos asociados a pozos, estudios de modelación de aguas subterráneas, informes de monitoreo de empresas mineras entre otros.

1.6.4 Desarrollo del modelo conceptual

El desarrollo del modelo conceptual integra toda la información referente a la geometría

del acuífero, las características físicas del medio, las acciones a las que está sometido el acuífero y los procesos fisicoquímicos relevantes que tienen lugar en él. A continuación se citan de manera esquemática todos los aspectos que se especificarán en el modelo conceptual fruto del estudio hidrogeológico. Dichos aspectos tienen en cuenta toda la información recopilada de los estudios anteriores y antecedentes nuevos obtenidos. A su vez, aporta un modelo espacial y conceptual sobre el funcionamiento del sistema acuífero y la cuenca hidrológica, e incluye una descripción de las unidades relevantes de los acuíferos del sistema, indicando su composición, localización en profundidad y espesores, profundidad del basamento, parámetros elásticos representativos, nivel o niveles freáticos, las zonas y mecanismos de recarga, así como afloramientos, entre otros.

Caracterización de los tipos de acuíferos que forman el sistema y las características del medio. De esta forma, se describe la geometría de los acuíferos, sus límites y elementos relevantes como ríos, condiciones de borde (nivel fijo, caudal conocido o condición mixta o de goteo) y zonificación de las propiedades elásticas del medio (transmisividad y coeficiente de almacenamiento).

Descripción y cuantificación de todos los elementos que recargan y descargan sobre el sistema acuífero. Con especial interés en la caracterización de la interacción vertiente-acuífero, conceptualizando la conexión hidráulica que relaciona las entradas y salidas del sistema entre las dos unidades acuíferas (superficial y profunda).

1.6.5 Proyecto SIG

El análisis geológico e hidrogeológico desarrollado depende de la estructura de la base de datos que se utilice. Es por ello que, como parte de nuestra metodología, hemos creado una base de datos geo-espacial cuyo diseño se ha basado en diferentes estándares internacionales y que integra de una manera eficiente información espaciotemporal de diversa naturaleza (geológica, hidrogeológica, hidroquímica, geográfica, hidrológica, hidrometeorológica, otros) y de distinto origen (diferentes formatos, diferente escala espacio-temporal). Actualmente se puede encontrar en el mercado diversos software de SIG, siendo el más extendido ArcGIS (ESRI). Las herramientas disponibles en dicho software son múltiples y variadas, pero la mayoría de las veces no están orientadas al usuario final, que se siente perdido en la maraña de funciones y herramientas que ofrece. Nuestro grupo de investigación trabaja en concentrar las ventajas de ArcGIS en un pequeño set de herramientas, reduciendo al mínimo las barreras que tiene que superar el usuario final. Gracias a nuestros expertos que trabajan día a día en soluciones de geología, hidrología e hidrogeología, hemos desarrollado herramientas enfocadas directamente al trabajo específico que realizan en estas áreas. De esta manera se obtienen los óptimos resultados, minimizando tiempo y recursos. Se ha creado un set de herramientas que permiten la visualización de la información geológica del punto deseado en forma de columna estratigráfica y además permiten al usuario generar automáticamente perfiles geológicos entre puntos seleccionados directamente en la pantalla. Información complementaria como los perfiles geofísicos de pozos y las diferentes unidades definidas aparecen también en el perfil geológico digital. Sobre estos perfiles geológicos digitales el usuario puede correlacionar y definir posibles superficies de contacto, unidades y subunidades en la pantalla. Esta información quedará almacenada en la base de datos y permitirá al usuario posteriormente visualizarla e integrarla en modelos tridimensionales. Paralelamente, se han desarrollado diversas técnicas que correlacionan las características texturales de cada tramo del sondeo descrito y almacenado en la base de datos con la permeabilidad hidráulica, a través de fórmulas empíricas. En cuanto a la explotación de datos hidrogeológicos, se ha generado un set de herramientas que nos permite realizar diversas consultas espacio-temporales. Particularmente, sobre los datos hidroquímicos, nos permiten realizar diversos cálculos sobre estos datos consultados (como el balance iónico), mapas temáticos, y diversos análisis estadísticos (matrices de correlación, análisis bivariable, etc). Además genera diagramas típicamente usados en análisis hidroquímicos como Stiff, Piper, Schöeller-

Berkaloff entre otros pudiendo además visualizar su distribución espacio-temporal.

Toda la información obtenida puede ser analizada de forma integrada dentro de la misma plataforma, ArcGIS, o bien puede ser exportados a otras plataformas de modelación hidrogeológica cuyos resultados pueden cargarse nuevamente en ArcGIS para su post-procesamiento. Toda la información que se recopile quedará respaldada en formato digital (CD o DVD según formatos estándar del software empleado) y será entregado a la DGA.

1.6.6 Red básica de monitoreo

Una vez realizado el estudio hidrogeológico de la zona, y establecido el modelo conceptual y espacial del acuífero y la cuenca hidrogeológica, se propondrá a la DGA los puntos de monitoreo y control que permitan en el futuro verificar las hipótesis y supuestos efectuados durante el estudio, como son las condiciones de borde, entradas y salidas, zonas de mayor interés.

1.6.7 Desarrollo del modelo numérico

Sobre la base del modelo conceptual se ha construido un modelo numérico en Visual Modflow. El modelo representará adecuadamente las variables de interés hidrológico e hidrogeológicos, así como aquellas que se encuentran incluidas en los planes de monitoreo, seguimiento y control de las extracciones.

Normalmente la estructura del modelo no es única ni segura, existen varias estructuras posibles. Una buena discretización repercute en que el tiempo necesario para completar el proceso de modelación se reduzca de modo significativo.

2. Estudio del Acuífero de Calama

2.1 Recopilación y análisis de la información existente

La recopilación de antecedentes y análisis de la información existente ha tenido como objetivo principal establecer una compilación base de todos los trabajos hidrogeológicos publicados en la gran cuenca de Calama. Para esto, se ha contado con diversas fuentes de información en poder de la Dirección General de Aguas (DGA), entre las que podemos enumerar como principales los trabajos realizados por Minera El Tesoro y proyecto El Toqui en el sector sur-oeste de la ciudad de Calama, los trabajos desarrollados por Codelco Norte en el Tranque Talabre y alrededores, y algunos antecedentes publicados por DICTUC en el sector de Pampa Llalqui, al este del río Loa.

Para resumir el gran volumen de información existente, en este capítulo de revisión de antecedentes se ha dispuesto la información bajo la estructura que define el modelo hidrogeológico conceptual:

- Geología
- Hidrología
- Hidrogeología
- Hidroquímica
- Modelación conceptual y numérica

En consecuencia, la información se ha clasificado por temáticas y en orden cronológico (de más antiguo a más reciente). A su vez, en cada subsección temática se enumeran los informes utilizados junto a un breve resumen de su contenido, por lo que al recorrer este capítulo se notará que algunos informes se repiten entre subsecciones. Esto último ocurre especialmente en el caso de los trabajos más relevantes desde el punto de vista del presente estudio.

2.1.1 Geología

- **HAUSER YUNG, ARTURO. (Junio 1999). Informe técnico: Hidrogeología segmento intermedio del río Loa, II Región.**

El presente informe hidrogeológico sobre la cuenca media del río Loa, abarca el área de influencia comprendida entre la localidad de Lasana y el sector de Angostura.

Se ha obtenido los registros geológicos de 8 pozos presentes en el estudio, siendo el Chuca-1, Chuca-3, Chuca-4, Chuca-5, Chuca-8, SE-2, SE-3 y SE-4. Estos pozos se presentan e interpretan en los perfiles geológicos A-B y C-D, junto a la descripción de las formaciones geológicas.

- **DICTUC INGENIERÍA (Febrero 2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui, Mapa hidrogeológico. Informe para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.**

La extensión espacial de este trabajo abarca desde la ciudad de Calama hasta Pampa Llaqui. En este estudio, Dictuc distingue un basamento de rocas paleozoicas y mesozoicas marinas, las cuales conforman una cuenca sobre la cual se deposita un relleno terciario sedimentario, que define el sistema acuífero, caracterizado por intercalaciones de rocas volcánicas. En la figura 3.2 del informe de Dictuc, se define la distribución en subsuperficie de las unidades geológicas que conforman el sistema acuífero de la cuenca (rocas estratificadas cenozoicas).

De este estudio, se ha extraído la descripción geológica de la Formación Toconce, las características geológicas del grupo El Loa e Ignimbrita Sifón y la descripción geológica de la Formación Calama y Formación Chiu-Chiu.

- **AQUACONSULT (Noviembre 2006) para MET. Estudio Geológico-Geofísico del Área de los Pozos MET de Calama.**

Con un estudio geofísico, Aquaconsult levanta información geológica de los acuíferos del área de pozos de Minera El Tesoro, en concreto con perfiles TEM y GEM. El objetivo fue evaluar la posición y profundidad de futuros pozos de observación y la profundización de pozos existentes.

Del documento se han extraído los perfiles geológicos AA', BB', CC' (en las Figuras Nº 5 a 7) y la interpretación de los perfiles TEM L-1, L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7 (en las Figuras B1 a B7 del **Anexo B**), además la interpretación de los perfiles GEM GEM-1 a GEM-25 (en las Figuras C-1 a C-25 del **Anexo C**).

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Noviembre 2009) para Minera El Tesoro. Informe técnico: Resultados de la construcción del pozo OBS-11C, Minera El Tesoro, Calama.**

En el presente informe se detalla el proceso de construcción del pozo OBS-11C, además de las condiciones hidrogeológicas del contexto en que está ubicado. De este informe se ha obtenido la información geológica de detalle del pozo OBS-11C.

- **CODELCO NORTE (Diciembre 2009). Umbrales pozos control drenaje rajo MMH RCA 311/2.005. (Presentación Powerpoint).**

En esta presentación se han obtenido la información en detalle de 20 perfiles geológicos: 9 pozos del acuífero superior, 10 pozos del acuífero inferior y 1 pozo del basamento. Entre estos perfiles se encuentra la información estratigráfica de los pozos CC-1, CC-2, CC-3, CC-4, CC-5, CC-6, CC-7, CC-8, CC-9, CC-10, CC-11, CC-12, CC-14, CC-15, CC-16, CC-17, CC-18, SI-8C, CHUCA-7B y PBMM-4.

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Enero 2010) para Minera El Tesoro. Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico sector campo de pozos minera el tesoro. (Período: octubre-diciembre 2009).**

En este informe se haya información geológica de diferentes perfiles geológicos realizados en el sector del campo de pozos de MET.

Se han utilizado las descripciones estratigráficas pertenecientes 27 pozos, entre los que se encuentran los pozos PPR-1 a PPR-5, P-10, P-21, OBS-6C, OBS-7C, OBS-8C, OBS-9C, PBC-1, PBC-2, LE-1, LE-2, LE-4, LE-6, LE-7, OBS-6LiA, OBS-8Li, LE-9, P-18, P-7, P-19, P-24, P-25, P-27, OBS-10C-A.

- **KNIGHT PIÉSOLD (Mayo 2010) para CODELCO. Informe Final Consolidado Modelamiento hidráulico del tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales. Informe para Codelco Chile.**

En este informe se analiza la geología de la zona del Tranque Talabre obtenida a partir de la construcción de una serie de pozos.

De este informe se ha extraído la descripción geológica de 70 sondeos: OT-01 a OT-021 (menos OT-06), SE-01 a SE-04, BT-01 a BT-07 (menos BT-04), TR-01 a TR-13, DT-01 a DT-04, CHUCA 1, CHUCA 2, CHUCA 6, CHUCA 7B, CHUCA 8, CHUCA 9, CHUCA 10B, CHUCA 13B, CHU-45 a CHU-49, E1 a E3, Px, P1, P2, W-1 a W-6 (menos W-4).

En el mismo documento aparecen 3 perfiles geológicos interpretados como los perfiles AA', BB' y CC' que han servido para la interpretación del modelo conceptual geológico, así como la información de 16 perfiles geofísicos interpretados TEM LV-1, LV-2, LV-3, LV-4, LV-5, RG1, RG-2, RG-3, RG-4, RG-5, RG-8, RG-9, RG-10, RG-15, RG-19, RG-20 (en las Figuras A-1 a A-5 y de B-1 a B-11).

- ***AQUACONSULT (Noviembre 2011) para CODELCO. Modelamiento hidrogeológico de la subcuenca Cluster Toki para el proyecto Quetena. Informe Final para Estudio de Impacto Ambiental (Revisión A).***

Aquaconsult realiza una descripción de diez unidades geológicas (UG) definidas para el modelamiento de la subcuenca Toki. De este informe técnico se ha obtenido la descripción de las unidades geológicas del sector Toki desde la obtención de la información geológica de 27 pozos: QH1 a QH10, OH1, OH2, CC-8, CHUCA-6B, SI-24E, DDH-701, DDH-702, DDH-876, DDH-1975, DDH-1978, DDH-1988, DDH-2551, DDH-2568, DDH-2570, DDH-2574, DDH-1982, DDH-1988a (extraídas del **Anexo B**).

Además contiene información de trabajos geofísicos e interpretación de 11 perfiles TEM como los perfiles L-1, L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7, L-8, L-9, L-10 y L-11 (en las Figuras C-1 a C-11 del **Anexo B**).

2.1.2 Hidrología

- **S.I.T. N° 85. Departamento de Estudios y Planificación. Informe técnico. Evaluación de los recursos hídricos en los sectores Calama y Llalqui en la Cuenca del río Loa. (Mayo 2003).**

La Dirección General de Aguas realiza un balance hidrológico a nivel de la cuenca completa del río Loa, utilizando la información de aportes de precipitación, la evapotranspiración natural y la temperatura, además, de los resultados de los balances de escorrentía total, los usos del suelo, la evapotranspiración de los salares y la de los cauces superficiales, y los resultados del balance entre escorrentía y usos de suelo.

- **DICTUC INGENIERÍA (Febrero 2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui, Mapa hidrogeológico. Informe para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.**

En este informe DICTUC cuantifica las entradas que recibe el acuífero superior por parte de las aguas superficiales del río Loa (230 l/s), la infiltración de las precipitaciones en la cuenca (21 l/s), la infiltración desde los relaves de Codelco en la zona 32 (l/s), una infiltración aportada por el acuífero inferior (32 l/s) y finalmente el aporte del flujo subterráneo (34 l/s). En el informe se presenta un esquema de las variables anteriormente descritas y el rol que cumplen en el ciclo hidrológico de la zona. De este informe se han utilizado los cálculos de recarga, descarga y precipitación para el modelo conceptual de la cuenca de Calama.

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Enero 2010) para Minera El Tesoro. Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico sector campo de pozos minera el tesoro. (Período: octubre-diciembre 2009).**

En este informe se presenta información histórica en relación con el aforo de los caudales de las vertientes de Ojos de Opache en el Nacimiento y Enaex, la vertiente de Likantatay y la vertiente de la Cascada, así como los aforos del río Loa en la Cascada y del río San Salvador en el nacimiento y los niveles piezométricos en diferentes pozos de producción y observación.

- ***MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Abril-Junio 2011) para Minera El Tesoro. Informe trimestral del monitoreo hidrogeológico del sector campo de pozos de la Minera el Tesoro.***

En este informe se actualizan los registros históricos de las mediciones de flujo para las principales vertientes de la cuenca de Calama: Vertiente Ojos de Opache en Nacimiento (Sección de aforo en su nacimiento), Vertiente Ojos de Opache en Enaex (Sección de aforo ubicada 500 m aguas abajo de la sección de aforo en Nacimiento), Vertiente Likantatay (aforada en su nacimiento) y Vertiente La Cascada (aforada cerca de los canales de regadío) levantando caudales aforados mensuales con las fechas de monitoreo y el registro histórico.

Además de los registros históricos de caudales, en este informe se presentan los registros automáticos sobre la variación de nivel en pozos instrumentados, y las mediciones manuales realizadas por MET en 13 pozos de observación: PPR2, PPR3, PPR5, P21, P10, LE-1, LE-2, LE-4, LE-6, LE-7, LE-9, PPR-1 y PPR-4. El registro de mediciones manuales más completo se extiende a partir de 1993 hasta la actualidad y todos los datos manuales disponibles se presentan tabulados en un anexo. Los registros automáticos más extensos en los pozos se extienden a partir de julio de 2007 junto con el inicio del programa de instrumentación.

- ***MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Octubre 2011) para MET. Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico del sector campo de pozos minera el Tesoro. Período: Julio-Septiembre 2011.***

Actualización de la información de aforos de los caudales de las vertientes de Ojos de Opache en el nacimiento y Enaex, la vertiente de Likantatay y la vertiente de la Cascada, así como los aforos del río Loa en la Cascada y del río San Salvador en el nacimiento y la piezometría en diferentes pozos de producción y observación

- ***AQUACONSULT (Noviembre 2011) para CODELCO. MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO SUBCUENCA CLUSTER TOKI PARA PROYECTO QUETENA. Informe Final para Estudio de Impacto Ambiental (Revisión A).***

La División Codelco Norte realiza aforos sistemáticos entre los años 2002 y 2011 en cuatro puntos a lo largo del Río San Salvador: RSSA, RSSB, RSSC y RSSN, distribuidos desde su nacimiento hasta su junta con el Río Loa, con el objetivo de registrar datos de caudales a lo largo de todo el cauce del Río San Salvador. De este informe, se ha utilizado los promedios estadísticos. Además, en el mismo

informe aparece un análisis climático de la zona, donde se han utilizado los datos climáticos promediados de las estaciones CHIU-CHIU y Calama entre 1994-2009.

- **CADE-IDEPE Consultores e Ingeniería (Diciembre 2.004). Informe técnico: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Informe para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.**

En este informe se realiza una actualización del estado de los cursos y cuerpos de agua para la zona de la cuenca alta del río Loa. Del mismo se ha utilizado información para completar el apartado correspondiente a la descripción general de la zona de estudio. También se ha podido obtener la descripción hidrológica de la cuenca alta del río Loa en detalle.

2.1.3 Hidrogeología

- **HAUSER YUNG, ARTURO (Junio 1999). Informe técnico: Hidrogeología segmento intermedio del río Loa, II Región.**

El autor describe en este informe las unidades hidrogeológicas existentes en segmento intermedio del río Loa. De este trabajo se ha obtenido la definición de dos sistemas acuíferos generales, el acuífero superior calcáreo y el acuífero inferior granular.

- **DICTUC INGENIERÍA (Febrero 2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui, Mapa hidrogeológico. Informe para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.**

DICTUC describe el acuífero inferior (Formación Calama) y las arenas y arcillas de la formación Jalquinche (miembro inferior Grupo El Loa). Además define el basamento desde el sector de Pampa Llaqui, en la zona de la confluencia de la Quebrada de la Teca con el río Loa, hacia el este, por la existencia en profundidad de la Ignimbrita Sifón, correspondiente al estrato impermeable que confina el acuífero inferior. El acuífero superior se define conformado en el sector de la ciudad de Calama por calizas y areniscas calcáreas de la formación Opache los cuales engranan hacia el Este con los sedimentos arenosos, limosos y cineríticos de la formación Toconce, reconocidos en el sector de la Quebrada León.

Además, en el mismo documento aparece información sobre ensayos de bombeo realizados en los pozos P1, P2 y Px (Acuífero superior) y E2,E3 (acuífero Inferior), y ha utilizado como puntos de observación los puntos E1,W1,W2,W3,W4,W5 y W6 para conocer los parámetros hidráulicos del acuífero inferior.

- **GEOHIDROLOGÍA. MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLOGICA RADO MIRO TOMIC. INFORME FINAL MODIFICACIÓN N°1: "SERVICIOS SONDAJES HIDROGEOLOGICOS, CONTROL TÉCNICO Y GEOFÍSICA PROYECTO QUETENA (Junio 2011).**

En este informe aparecen datos de ensayos Lefranc para definición de permeabilidades en 8 piezómetros: QH-2, QH-3, QH-4, QH-5, QH-6, QH-7, QH-8 y QH-10.

- **AQUACONSULT (Noviembre 2011) para CODELCO. MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO SUBCUENCA CLUSTER TOKI PARA PROYECTO QUETENA. Informe Final para Estudio de Impacto Ambiental (Revisión A).**

Aquaconsult levanta en este estudio de modelamiento la definición de valores de conductividad hidráulica (k) y valores de coeficiente de almacenamiento (S) para dos sectores de la Subcuenca Cluster Toki, y los asigna vía tres mecanismos alternativos: estimación bibliográfica, correlación con valores existentes y valores

empíricos obtenidos. A su vez, se define la conductividad hidráulica (k) en el *Acuífero Inferior* en la Sub-Cuenca Cluster a partir de ensayos Lefranc existentes de 4 pozos (QH-2, QH-4, QH-5 y QH-6) dando un rango probable de k de 0.5-10 m/d (con un valor verificado de 0.57 m/d para el Sector Sur), y un rango probable de 0.1-0.5 m/d (con valores verificados de 0.30-0.45 m/d para el sector Norte).

Se define la conductividad hidráulica del *Acuífero Superior* con el pozo QH-10 con un dato puntual de 0.26 m/d. Este dato es consistente con el valor usado en el modelo numérico de Knight Piésold (2010) para la cuenca de Calama. A su vez, se define un valor de 0.3 m/d para la unidad acuífera superior.

Para el *Acuitardo* no existen datos de conductividad hidráulica para el sector Quetena, por lo que Aquaconsult utiliza valores de k de 0.001, 0.012 y 0.036 m/d (obtenidos por Knight Piésold, 2010 a partir de ensayos de inyección tipo "SlugTest") y los combina con valores de la literatura, obteniendo como representativo el rango 10^{-2} - 10^{-6} m/d.

El coeficiente de almacenamiento (S) de los acuíferos de la Hoya Quetena se define con un rango de $2 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-3}$ para el *Acuífero Inferior*. Para el *Acuífero Superior*, Aquaconsult considera como representativo el orden de magnitud de 10^{-2} , consistente con los resultados obtenidos por Knight Piésold (2010) en la cuenca de Calama.

2.1.4 Hidroquímica

- ***S.I.T. N° 85. Departamento de Estudios y Planificación. Informe técnico. Evaluación de los recursos hídricos en los sectores Calama y Llalqui en la Cuenca del río Loa. (Mayo 2003).***

En este informe se presenta la hidroquímica de la cuenca definida en sectores: Calama y sector Llalqui. Contiene una interpretación de análisis químicos de aguas superficiales y subterráneas, recopilados desde distintos estudios y/o aportados por los peticionarios de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas, a partir del cual se estableció un marco hidrogeoquímico para las aguas de la cuenca del Loa, definiendo la composición química del río y de sus aportes, estableciendo una relación con la morfología y la composición litológica de la cuenca alta. Los datos recopilados se han utilizado para generar diagramas de Piper y Stiff con el objetivo de ayudar a definir los procesos químicos relevantes a escala de la cuenca de estudio.

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA para Minera El Tesoro (Noviembre 2009). Resultados de la construcción del pozo OBS-11C..**

Este memorando técnico tiene como objeto establecer, a través de las analíticas químicas de las aguas superficiales y subterráneas en conjunto con los antecedentes existentes, las posibles diferencias entre las aguas de la Formación Opache, las de la Formación Calama, la conexión hidráulica entre el pozo OBS 11-C y la Formación Calama, y la detección de parámetros que permitan alertar posibles influencias de las aguas de la Formación Opache durante la explotación del pozo P-10.

Se presentan 18 resultados de analíticas químicas de aguas superficiales y aguas subterráneas. Las analíticas corresponden a 11 pozos (OBS-11C, OBS-7C, OBS-7L, PPR-3, PPR-5, P-21, PPR-2, LE-2, PBC-1, P-10, P-27), 4 vertientes (Vertiente Likantatay, VODO Nacimiento, Vertiente La Cascada y VODO) y 3 muestras de aguas superficiales (Río San Salvador Nacimiento, Puente Viejo de Calama y Río Loa Este).

- **KNIGHT PIÉSOLD (Agosto 2009) para CODELCO. Informe técnico: Análisis e interpretación de la hidroquímica de los acuíferos y su relación con el Tranque Talabre (Ref. No. SA202-00039/20-8)**

Se entregan los resultados de la interpretación hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas reconocidas en el área del Tranque Talabre con el objetivo de realizar una evaluación química e isotópica del agua y posibles filtraciones del agua del tranque a los acuíferos subyacentes.

De este informe se ha obtenido información sobre analíticas de aguas subterráneas de pozos y puntos de aguas con monitoreos permanentes, además de una interpretación hidroquímica de la relación entre la infiltración de las aguas del Tranque Talabre en los acuíferos subyacentes existentes, y por otro lado la relación hidrogeoquímica entre el acuífero superior e inferior. Se presentan 42 datos químicos tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas. Los datos corresponden a 32 pozos: 8 del Acuífero Inferior (SI-5D, SI-6B, SI-7B, SI-11E, SI-12E, TL-01, TL-14, TL-24); 24 del Acuífero Superior (TL-02C, TL-03C, TL-06C, TL-07C, TL-08C, TL-09C, TL-10C, TL-11C, TL-13C, SI-14E, SI-16C, SI-18C, SI-20C, SI-22C, TR1, TR2, TR3, TR4, TR5, TR6, TR7, TR8, TR12, TR13); 3 puntos manantiales (V-9, V-2S, V-1S); 6 puntos de aguas superficiales (RLJ, RLK, RLL, RLM, RLN, RLQ); y un muestreo del agua del Tranque Talabre (DTT).

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Noviembre 2009) para Minera El Tesoro. Informe técnico: Resultados de la construcción del pozo OBS-11C, Minera el Tesoro, Calama.**

Durante la perforación del pozo OBS-11C se midieron parámetros químicos en terreno como el pH, la temperatura, la conductividad, el total de sólidos disueltos (TSD) y el potencial de oxidación-reducción (ORP). Además, en el mismo pozo y a una profundidad de 130m de perforación, se tomó una muestra de agua para análisis químico de elementos mayores y otros elementos como arsénico, boro, fluoruro y silicatos.

- **AQUACONSULT (Noviembre 2011) para CODELCO. MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO SUBCUENCA CLUSTER TOKI PARA PROYECTO TEQUENA. Informe Final para Estudio de Impacto Ambiental (Revisión A).**

En el presente informe se ha obtenido información sobre muestras de agua en el sector Quetena correspondientes a pozos incorporados al programa de monitoreo de niveles de agua e hidroquímica de CODELCO en esta zona. La información obtenida corresponde a 23 puntos: 22 son pozos (QH-02, QH-03, QH-04, QH-05, QH-06, QH-07, QH-08, QH-10, OH-02, QH-01, CHUCA-6B, SI-23C, CC-1, CC-12, CC-14, CC-15, CC-17, CC-8, CC-2, CC-3, CC-9, SI-24E); 1 punto de agua superficial (RSSN).

Aquaconsult presenta los análisis de contenidos totales de las muestras, tabulados en el informe. Del mismo informe se ha obtenido la distribución geográfica del muestreo, la cual además expone la distribución de calidades de las aguas, incluyendo: diagramas de Stiff, contenidos de sulfato, Total de Sólidos Disueltos (TDS), pH, Conductividad Eléctrica (CE), y Tipo de Agua.

2.1.5 Modelación conceptual y numérica

En la información recopilada aparecen diferentes modelos conceptuales del funcionamiento hidrogeológico del sistema. A continuación se resumen los trabajos desde dónde se ha obtenido la información usada para la definición de la modelación conceptual:

- ***S.I.T. N° 85. Departamento de Estudios y Planificación. Informe técnico. Evaluación de los recursos hídricos en los sectores Calama y Llalqui en la Cuenca del río Loa (Mayo 2003).***

El estudio contiene los resultados del estudio hidrogeológico y balance hídrico para la zona de Calama y Pampa Llaqui y la modelación hidrogeológica en el contorno específico situado cerca de Calama, así como algunas interpretaciones de información hidrogeoquímica en apoyo a los resultados hidrológicos.

Con este estudio se ha obtenido la información necesaria para calcular la recarga a través de los regadíos de Calama y Chiu Chiu con el dato correspondiente al uso efectivo del riego (0,5 l/s/Ha). En segundo lugar, también se han extraído los datos correspondientes a los bombeos del sector Calama y los datos de evaporación, contemplados como salidas del balance hídrico. Finalmente se han podido extraer los valores de caudal correspondientes las entradas y salidas de agua que se dan lugar en las diferentes relaciones río-acuífero, donde se cuantifican estos valores en determinadas zonas.

A continuación se presenta un resumen de los componentes del balance hídrico y los datos presentados en el informe para el modelo conceptual (**Tabla 2-1**).

MODELO CALAMA DGA (S.I.T. 85)

ENTRADAS (l/s)			
Recargas	Riego Lasana-Chiu Chiu	117	Acuífero Superior
	Riego Calama	560	Acuífero Superior
Flujo Subterráneo	Flujo Entrada Borde N-E	956	No se especifica
TOTAL ENTRADAS		1633	
SALIDAS (l/s)			
Descargas	Evaporación salares (Sares Brinkerhoff, Rudolph, Talabre e Indio)	60-80	Acuífero Superior
	Bombes Calama	183	No se especifica
	Relación Río – Acuífero	350	Acuífero Superior
Flujo Subterráneo	Flujo Salida Borde W	658	No se especifica
TOTAL SALIDAS		1261	
BALANCE TOTAL (Modelo Calama DGA S.I.T. 85)		-372	DEFICITARIO

Tabla 2-1. Balance del modelo conceptual del Modelo de Calama realizado por la DGA en el informe S.I.T. 85

- ***DICTUC INGENIERÍA (Febrero 2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui, Mapa hidrogeológico. Informe para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.***

A partir de los mapas piezométricos de los acuíferos superficial y profundo para la parte alta de la cuenca del Loa, se ha podido completar el apartado de la piezometría, describiendo las direcciones principales del flujo y cuantificando los gradientes hidráulicos de los acuíferos de forma aproximada. Además, en el mismo informe se presenta un modelo conceptual del funcionamiento de este sector de la cuenca de Calama junto con un balance por componentes, que se resume a continuación (**Tabla 2-2**).

MODELO DICTUC .SECTOR CALAMA-LLALQUI (2005)

ACUÍFERO SUPERIOR

ENTRADAS (l/s)	
Precipitación	21
Flujo Subterráneo	34
Recarga Río Loa	230
Infiltración desde Acuífero Inferior	32
Infiltración desde Tranque de Relave	32

TOTAL ENTRADAS ACUÍFERO SUPERIOR 349

SALIDAS (l/s)	
Evaporación	161
Bombes-Extracción	100
Flujo subterráneo	96

TOTAL SALIDAS ACUÍFERO SUPERIOR 357

BALANCE TOTAL ACUÍFERO SUPERIOR	-40	DEFICITARIO
--	------------	--------------------

ACUÍFERO INFERIOR

ENTRADAS (l/s)	
Recarga Flujo Subterráneo (Valle Río Salado)	331
Recarga Flujo Subterráneo (Valle Río Loa)	346

TOTAL ENTRADAS ACUÍFERO INFERIOR 677

SALIDAS (l/s)	
Flujo Subterráneo	642

TOTAL SALIDAS ACUÍFERO INFERIOR 642

BALANCE TOTAL ACUÍFERO SUPERIOR	35	INCREMENTAL
--	-----------	--------------------

CUENCA GENERAL

BALANCE TOTAL DE LA CUENCA	-5	EN EQUILIBRIO
-----------------------------------	-----------	----------------------

Tabla 2-2. Balance del modelo conceptual realizado por DICTUC (2005) para el sector de Pampa Llalqui.

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Octubre 2007) para Minera El Tesoro. Modelo hidrogeológico del sector Calama. Presentación Powerpoint.**

En esta presentación aparece un diagrama conceptual, donde se describen las entradas y salidas de agua en el sistema correspondiente al balance hídrico de esta zona de la cuenca de Calama.

En este caso, el balance presentado, es un balance hídrico realizado por la DGA en el año 2003, dónde se define de forma general los recursos hídricos de la cuenca **(Tabla 2-3)**.

RECURSOS DISPONIBLES TOTALES		
Recursos disponibles (superficial + subterráneo) = Es Total - Usos (efect.+in situ)	Yalquincha (Aguas arriba de Calama)	2117 L/s
	La Finca (Aguas Debajo de Calama)	1370 L/s

RECURSOS DISPONIBLES SUBTERRÁNEOS		
Flujo Subterráneo disponible = Recursos disponibles - Q superficial observado	Yalquincha (Aguas arriba de Calama)	746 L/s
	La Finca (Aguas Debajo de Calama)	658 L/s

Tabla 2-3. Balance del modelo conceptual realizado por M&A para el sector de campo de pozos de MET.

- **MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA (Noviembre 2009) para Minera El Tesoro. Informe técnico: Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa en Calama, Chile.**

En este informe técnico se presentan el modelo conceptual y el matemático para el contorno del modelo del Tesoro, que se solapa con el modelo objeto de estudio desde la zona central hasta la zona oeste. Se ha recogido un modelo geológico conceptual, la cuantificación de la recarga urbana, las extracciones por bombeo, las salidas por evaporación y las salidas subterráneas a través del contorno oeste. Las características del modelo numérico realizado por parte de Montgomery & Associates en el Noviembre de 2009 se presenta a continuación **(Tabla 2-4)**.

MODELO NUMÉRICO EL TESORO (MONTGOMERY & ASSOCIATES)

Area del modelo	214.725 Km ²		
Nº Celdas modelo	Filas x Columnas	Total	Total Activas
	90 x 186	66960	34356
Ancho Celda	250 x 250 m		

Capas del modelo						
		Espesor medio(m)	Porosidad Drenable	Ss	K(m/d)	Kv(m/d)
1	Caliza Loa Superior	20-300	0.06		90-300	3.50
2	Arenas Loa Inferior	2-10	0.10	1·10 ⁻⁴	0.5	0.05
3	Arcillas Loa Inferior	20-170	0.01	1·10 ⁻¹¹	9·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁷
4	Gravas Calama	45-300	0.10	1·10 ⁻⁵	1-10	0.01

Tabla 2-4. Características del modelo numérico realizado por M&A para MET en 2009.

A partir del modelo numérico en el informe de M&A se presenta unos resultados en obtenidos de las simulaciones en forma de balances, los cuales se presentan a continuación (**Tabla 2-5**).

CAPA 1

ENTRADAS (l/s)						
Recarga	Agua Subterránea borde Este				1191	
	Áreas de recarga				325	
	TOTAL ENTRADAS CAPA 1				1516	
SALIDAS (l/s)						
Descarga		Pérdida	Ganancia	Acuífero		
	Río Loa	-273	1129	-856		
	Río San Salvador	-4	112	-108		
	Quebrada Opache	-12	475	-462		
	TOTAL SALIDAS A RÍOS					-1426
		Pérdida	Ganancia	Acuífero		
	Vertientes		17	-17		
	Likantatay		27	-27		
	TOTAL SALIDAS A VERTIENTES					-44
	ET					-45
	Goteo a Calama					-1
TOTAL SALIDAS A CAPA 1					-1516	

CAPA 4

ENTRADAS (l/s)		
Recarga	Agua Subterránea Borde Este	240
	Goteo de formación Opache	1
	TOTAL ENTRADAS CAPA 4	241
SALIDAS (l/s)		
Descarga	Agua Subterránea borde Oeste	-241
	TOTAL SALIDAS CAPA 4	-241

DOMINIO DEL MODELO

ENTRADAS (l/s)		
Recarga	Agua subterránea borde Este	1431
	Áreas de recarga	325
	TOTAL ENTRADAS DEL DOMINIO DEL MODELO	1756
SALIDAS (l/s)		
Descarga	Descarga a ríos	-1426
	Descarga a Vertientes	-44
	Evapotranspiración	-45
	Agua subterránea borde Oeste	-241
	TOTAL SALIDAS DEL DOMINIO DEL MODELO	-1756

BALANCE TOTAL DEL DOMINIO DEL MODELO	0	EN EQUILIBRIO
---	----------	----------------------

Tabla 2-5. Resultados del balance del modelo numérico (estacionario) realizado por M&A para MET en 2009.

- ***KNIGHT PIÉSOLD (Mayo 2010) para CODELCO. Informe técnico: Modelamiento hidráulico del tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales. Informe para Codelco Chile.***

Se presenta la cuantificación del balance hídrico con el que se definen las entradas del balance correspondientes a la infiltración a través del tranque Talabre, la recarga por precipitación a través de los datos extraídos en el modelo en régimen permanente, las entradas subterráneas a partir del contorno Este del modelo, las extracciones por bombeo en la zona y, finalmente, los caudales que se determinan en las diferentes relaciones río-acuífero de diferentes zonas. En general el informe elabora el modelo conceptual y el modelo matemático del Tranque Talabre, realizando una predicción del sistema, con el objetivo de determinar la vulnerabilidad de acuíferos y cauces superficiales, y terminando el informe con

propuestas de mitigación y control. Knight Piésold define el balance del modelo conceptual como se observa en la tabla inferior (**Tabla I-6**).

BALANCE CONCEPTUAL TRANQUE TALABRE (Knight Piésold)

ENTRADAS (l/s)			Acuífero
Recargas	Precipitaciones (l/m ²)	0.42	Superior
	Río-Acuífero	479	Superior
	Tranque Talabre	38.5	Superior
Flujo Subterráneo		[]	
TOTAL ENTRADAS			518
SALIDAS (l/s)			Acuífero
Descargas	Bombeos	57.4	No específica
	Extracciones en lagunas	38.4	Superior
	Acuífero-Río	1206	Superior
TOTAL SALIDAS			1302
BALANCE TOTAL (TRANQUE TALABRE)		-784	DEFICITARIO

Tabla 2-6. Resultados del balance del modelo conceptual de Tranque Talabre realizado por KP en 2010

En este mismo informe, KP realiza un modelo numérico del Tranque Talabre para la relación entre los acuíferos y las aguas superficiales del sector. Las características del modelo numérico desarrollado se presentan a continuación, además de los balances hídricos obtenidos para cada uno de los estratos modelados y el balance hídrico general del dominio del modelo numérico (**Tablas 2-7, 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11**).

MODELO NUMÉRICO TRANQUE TALABRE (KNIGHT PIÉSOLD, 2010)

Area	860 Km ²	
Límites	UTM Margen Inferior	UTM Margen Superior
	506700 / 7507280	545000 / 7538220
Ancho celda	Sector Tranque	90 x 90 m
	Otros	180 x 180 m
Capas del Modelo		
	1	Calizas
	2	Acuitardo
	3	Acuífero inferior

Tabla 2-7. Características del modelo numérico realizado por KP para CODELCO (TranqueTalabre) en 2010.

BALANCE HÍDRICO MODELO NUMÉRICO EN RÉGIMEN PERMANENTE PARA LA CUENCA EN GENERAL

ENTRADAS (l/s)		
Recarga	Tranque	21
	Precipitación	19
Flujo Subterráneo	NE	241
	SE	48
	NO	164
	E	221
TOTAL ENTRADAS		714
SALIDAS (l/s)		
Descarga	Flujo Salida Oeste	349
	Afloramiento Río Loa	372
TOTAL SALIDAS		721
BALANCE TOTAL DE LA CUENCA		-7
		EN EQUILIBRIO

Tabla 2-8. Balance general de la cuenca para el modelo numérico en régimen permanente realizado por KP para CODELCO (TranqueTalabre) en 2010.

BALANCE HÍDRICO RÉGIMEN PERMANENTE ACUÍFERO EN CALIZAS O ESTRATO 1

ENTRADAS (l/s)		
Recarga	Tranque	21
	Precipitación	19
Flujo Subterráneo	NE	80
	SE	21
	NO	122
	E	163
TOTAL ENTRADAS		426
SALIDAS (l/s)		
Descarga	Flujo Salida Oeste	38
	Filtración hacia Estrato 2	42
	Afloramiento Río Loa	372
TOTAL SALIDAS		433
BALANCE TOTAL ESTRATO 1		7
		EN EQUILIBRIO

Tabla 2-9. Resultados del balance del acuífero en calizas o acuífero superior, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010

BALANCE HÍDRICO RÉGIMEN PERMANENTE ACUITARDO O ESTRATO 2

ENTRADAS (l/s)		
Flujo Subterráneo	Desde Estrato 1	42
	NO	41
TOTAL ENTRADAS		83
SALIDAS (l/s)		
Flujo Subterráneo	Filtración hacia Estrato 3	83
	Afloramiento Río Loa	1
TOTAL SALIDAS		84
BALANCE TOTAL ACUITARDO		-1
		EN EQUILIBRIO

Tabla 2-10. Resultados del balance del acuitardo, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010

BALANCE HÍDRICO RÉGIMEN PERMANENTE ACUÍFERO EN GRAVAS O ESTRATO 3

ENTRADAS (l/s)		
Flujo Subterráneo	De estrato 2	83
	NE	161
	SE	27
	NO	1
	E	57
TOTAL ENTRADAS		329
SALIDAS (l/s)		
Flujo Subterráneo	Flujo Salida Oeste	312
	Afloramiento Río Loa	19
TOTAL SALIDAS		331
BALANCE TOTAL ESTRATO 3		-2
		EN EQUILIBRIO

Tabla 2-11. Resultados del balance del acuífero en gravas o acuífero inferior, obtenido del modelo numérico de Tranque Talabre realizado por KP en 2010

- **AQUACONSULT (Noviembre 2011) para CODELCO. MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO SUBCUENCA CLUSTER TOKI PARA PROYECTO TEQUENA. Informe Final para Estudio de Impacto Ambiental (Revisión A).**

En este informe se detallan los modelos conceptual y numérico de la subcuenca Clúster realizado por Aquaconsult. Se ha obtenido el valor de pluviometría de las estaciones meteorológicas de Calama y Chiu Chiu para poder cuantificar el valor de recarga por precipitación en el área del modelo. Finalmente, de este informe se han podido extraer valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de los acuíferos superior e inferior (**Tabla 2-12**), aunque estos valores sólo han servido para tenerlos en cuenta como orden de magnitud, y una aproximación al balance general del sector estudiado en el informe, ya que solo aparecen las entradas del modelo conceptual.

MODELO CONCEPTUAL DE EL TOQUI (Aquaconsult)

Entradas (l/s)			Area aplicación (Ha)	Acuífero
Recargas	Precipitación	0.5	3650	Inferior
Flujo Entrada	Borde N-E	4		Inferior
	Borde W	16		Inferior

Tabla 2-12. Resultados del balance del modelo conceptual de El Toqui realizado por Aquaconsult en 2011

Aquaconsult también presenta el desarrollo del modelo con la geometría del sistema acuífero, los parámetros hidrogeológicos asociados, los flujos de entrada y salida que posee el sistema (recarga, flujo subterráneo) y la interacción del sistema con el Río San Salvador, el cual nace dentro de la zona de estudio producto de afloramientos subterráneos (**Tabla 2-13**).

El modelo fue implementado en el software Visual Modflow v4.2, y ejecutado en régimen permanente, considerando las condiciones estacionarias del sistema en estudio.

MODELO NUMÉRICO DE EL TOQUI (Aquaconsult)

Area	63.6 Km ²	
Límites	UTM Margen inferior	UTM Margen superior
	500779/7518082	508704/7526107
Nº Celdas	Filas*Columnas	Total
	174*178	30972
Capas del Modelo		
	K (m/d)	Condición de borde
1-Acuífero superior	0.26	Condición borde y dren
2-Acuitardo	0.57	Dren
3-Acuífero Inferior	0.30-0.45	Condición de borde

Tabla 2-13. Características del modelo numérico realizado por Aquaconsult para CODELCO en 2011

Además de las características del modelo numérico, en el mismo informe, Aquaconsult presenta como resumen un balance hídrico obtenido a partir del modelo numérico (**Tabla 2-14**).

BALANCE HÍDRICO OBTENIDO DEL MODELO NUMÉRICO RÉGIMEN PERMANENTE EL TOQUI

Unidad acuífera	Flujo	Caudales	
		Entrada	Salida
Acuífero Superior	Flujo		
	Entrada subterránea	1.6	
	Recarga	1.1	
	Flujo desde acuitardo	1.2	
	Afloramiento		4
	Subtotal	3.9	4
Acuitardo	Flujo desde acuífero inferior	5.3	
	Flujo desde acuífero superior		1.2
	Afloramiento		4.1
	Subtotal	5.3	5.3
Acuífero inferior	Entrada subterránea	5.7	
	Flujo hacia acuitardo		5.3
	Salida subterránea		0.4
	Subtotal	5.7	5.7
Total		14.9	15

BALANCE TOTAL SECTOR EI TOQUI	-0.1	EN EQUILIBRIO
--------------------------------------	-------------	----------------------

Tabla 2-14. Resultados del balance del modelo numérico en régimen permanente del sector de El Toqui realizado por Aquaconsult en 2011

2.1.6 Plan de Alerta Temprana (PAT) – Minera El Tesoro

En el presente apartado se presenta un resumen del Plan de Alerta Temprana de la Mina el Tesoro del 31 de Agosto de 2010, "Habilitación Sectorial Pozo P-10 Minera El Tesoro", dónde se pone de manifiesto la voluntad por parte de las autoridades competentes a reducir los bombeos en el acuífero más superficial a fin de poder recuperar los niveles y afloramientos de fuentes de agua superficial que dependen de ellos. En el presente PAT se solicitó por parte de la Mina el Tesoro (MET) la extracción de agua con un caudal determinado del acuífero profundo confinado con la condición de cumplir con una extracción sostenible. Esta sostenibilidad se evalúa comparando los niveles y caudales superficiales con valores mínimos obtenidos de la información hidrogeológica existente.

2.1.6.1 Antecedentes

2.1.6.1.1 Extracciones Mina El Tesoro

La Resolución DGA Nº 48 del 05 de febrero de 2004 constituye cinco derechos de aprovechamiento consuntivo de aguas subterráneas de ejercicio permanente y continuo por un caudal total de 320 l/s, distribuidos en los siguientes pozos:

Pozo	Caudal(l/s)
P-10	73,2
P-19	65,0
P-24	46,8
P-25	70,0
P-27	65,0

Tabla 2-15. Caudales de extracción otorgados en 2004 del campo de pozos MET

Este grupo de cinco pozos de aquí en adelante será denominado "campos de pozos 320", en alusión a la suma de sus derechos. El aprovechamiento queda restringido a las tres condiciones siguientes:

- La instalación de equipos de medida en los pozos y la transferencia de la información a la DGA.
- La no disminución de los caudales de los ríos Loa y San Salvador ni las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y la Cascada, la no afectación de las zonas de vegas

activas además de no superar una extracción que signifique una reducción del 5% del volumen almacenado a lo largo de 50 años.

- La realización de un Plan de Alerta Temprana y su posterior aprobación por la DGA antes de poder ejercer su derecho a explotación.

2.1.6.1.2 Formaciones acuíferas

De acuerdo a lo establecido en el SDT N° 153 de agosto de 2003 de la Dirección General de Aguas y de la información hidrogeológica recopilada por MET, dentro del acuífero de Calama se reconocen dos formaciones geológicas como acuíferas: La Formación Calama (Fm. Calama) compuesta por gravas y arena y la Formación Loa (Fm. Loa) compuesta por las siguientes capas de techo a base: calizas, areniscas calcáreas y una capa compuesta por arcillas y limos arenosos que actúan como capa confinante de la Fm. Calama.

Análisis de Tritio recientes de las dos formaciones acuíferas y de las vertientes ponen de manifiesto la conexión entre la Fm. Loa y las vertientes, y muestran una desconexión entre las Fm. Loa y Fm. Calama.

En el año 2007 se decidió desde la DGA y COREMA disminuir las extracciones de la Fm. Loa para preservar las vegas, vertientes y ríos que dependen de ella, habilitando extracciones en la Fm. Calama. Se profundizó y habilitó el pozo P-10 en la Fm. Calama además de realizar una prueba de bombeo de larga duración para conocer las características físicas del acuífero además de evaluar los posibles impactos en el acuífero superior y en la vertiente Ojos de Opache.

Adicionalmente se definió una red de monitoreo, en la cual se midieron los cambios de presión en la Fm. Calama, lográndose mediante la implementación de un modelo numérico hidrogeológico, modelar los efectos de la extracción en la Fm. Calama.

2.1.6.1.3 Condición Actual de las Vertientes y Ríos del Sistema

En este apartado se caracterizan las condiciones en las que se encuentran las vertientes Likantatay, ojos de Opache en Nacimiento, Ojos de Opache en ENAEX, la Cascada y el río San Salvador en el Nacimiento para poder comparar posteriormente si las extracciones del pozo P-10 repercuten en los caudales de los cursos de agua mencionados. A partir de los registros históricos de caudales de las vertientes se estima un caudal representativo actual de cada una denominado Línea Base en L/s. La vertiente Likantatay se ha secado

por completo y por esta razón no se propone ningún caudal de Línea Base para esta vertiente. En la **Tabla 2-25** se presentan las Líneas Base para cada vertiente.

Nueva Línea Base Caudales Superficiales	
Periodo Junio 2007 - Octubre 2009	
Cauce Superficial	Caudal Línea Base (l/s)
Vertiente Likantatay	-
Río San Salvador Nacimiento	19
Vertiente Ojos de Opache, Nacimiento	283
Vertiente Ojos de Opache, ENAEX	322
Vertiente La Cascada	17

Tabla 2-16. Nueva Línea Base Caudales Superficiales

2.1.6.2 Objetivos del Plan de Alerta Temprana

El objetivo del PAT es predecir oportunamente los impactos sobre los caudales de los ríos Loa y San Salvador y de las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y La Cascada; y sobre la zona de vegas activas, de tal modo de prevenir afecciones negativas en el sector y suspender el ejercicio de los presentes derechos cuando corresponda.

Por otro lado, el PAT permitirá a MET

- Obtener la autorización para el ejercicio de los derechos constituidos en el pozo P-10, habilitado en la Fm. Calama y equivalentes a 73,2 l/s.
- Mejorar el conocimiento del sistema y de su respuesta frente a la explotación de agua subterránea, desde la Fm. Calama,
- Evaluar en forma oportuna los eventuales efectos que la extracción de agua desde el pozo P-10 tendría sobre la Fm. Loa,
- Obtener la autorización para el ejercicio de los derechos constituidos en el pozo P-10, habilitado en la Fm. Calama y equivalentes a 73,2 l/s.

Se aclara que el PAT solo pretende habilitar los derechos de agua del pozo P-10. Al mismo tiempo se reitera que MET no excederá el caudal de 98 l/s a extraer desde todos sus pozos con aprobación ambiental.

2.1.6.3 Programa de Monitoreo del Plan de Alerta Temprana

El Plan de Alerta Temprana está conformado por un Programa de Monitoreo Global y una Unidad de Monitoreo de Alerta Temprana. El primero está formado por subprogramas que hacen referencia a diferentes parámetros como son el Monitoreo de Niveles y Caudales, Hidroquímica e Isotopía. Estos subprogramas en su conjunto ayudarán a mejorar el entendimiento del sistema y la mejor evaluación de los posibles impactos. La **Tabla 2-26** resume los distintos subprogramas.

Programa de Monitoreo Global								
Sub - grupo Monitoreo	Punto de Monitoreo		Sub - programa de Monitoreo			Frecuencia		
	Nº	Identificación	Niveles y Q's	Químico	Isotópico	Niveles y Q's	Químico	Isotópico
Cauces Superficiales	1	Vert. Ojos Opache	x	x	x	mensual	estacional	
	2	Vert. Ojos Opache	x			mensual		
	3	Vertiente Likantatay	x	x	x	mensual	estacional	
	4	Vertiente La	x	x	x	mensual	estacional	
	5	Río Loa en La	x			mensual		
	6	Río San Salvador	x	x	x	mensual	estacional	
	7	Río San Salvador	x			mensual		
	8	Puente Viejo Calama		x	x		estacional	
	9	Río Loa en	x	x	x		estacional	
Pozos Fm. Loa	1	OBS-7L	x	x	x	c/1 hora	estacional	
	2	PPR-1	x			semanal		
	3	PPR-3	x	x	x	semanal	estacional	
	4	PPR-4	x			semanal		
	5	LE-4	x			semanal		
	6	LE-6	x			c/2		
	7	LE-7	x			semanal		
	8	LE-9	x			c/1 hora	estacional	

	9	P-7	x			c/1 hora		
	10	P-18	x			c/1 hora		
	11	P-19	x			c/2		
	12	P-21	x	x	x	semanal	estacional	

	13	P-24	x			c/2	
	14	P-25	x			c/2	
	15	P-27	x	x	x	c/2	estacional
Pozos Fm. Loa Inferior (Confinante)	1	OBS-6LiA	x			c/1 hora	
	2	OBS-6LiB	x			c/1 hora	
	3	OBS-6LiC	x			c/1 hora	
	4	OBS-8LiA	x			c/1 hora	
	5	OBS-8LiB	x			c/1 hora	
	6	OBS-8LiC	x			c/1 hora	
Pozos Fm. Calama	1	P-10	x	x	x	c/1 hora	estacional
	2	OBS-6C	x			c/1 hora	
	3	OBS-7C	x	x	x	c/1 hora	estacional
	4	OBS-8C	x			c/1 hora	
	5	OBS-9C	x			c/1 hora	
	6	OBS-10C	x			c/1 hora	
	7	OBS-11C	x	x	x	c/2	estacional
	8	PBC-1	x	x	x	c/1 hora	estacional
	9	PBC-2	x			c/1 hora	
	10	PPR-2	x	x	x	semanal	estacional
	11	PPR-5	x	x	x	semanal	estacional
	12	LE-1	x			semanal	
	13	LE-2	x	x	x	semanal	estacional
	14	FCAB - Patio (OBS)	x			c/2	estacional

Tabla 2-17. Esquema del Programa de Monitoreo Global y sus componentes

El monitoreo de Niveles y caudales permite evaluar los niveles de agua en la Fm. Calama aguas debajo de la vertiente Ojos de Opache y aguas arriba del campo de pozos MET. Comprende el control de 4 puntos deveritentes, 4 ríos, de 15 pozos en la Fm. Loa, 2 pozos en la formación Loa inferior (acuitardo) y 14 pozos en la Fm. Calama.

A partir de las marcas químicas de las diferentes vertientes, ríos y pozos se pueden establecer relaciones entre los diferentes componentes del sistema hidrológico y a su vez ver posibles variaciones en los análisis como consecuencia del impacto creado por las extracciones del pozo P-10. El monitoreo químico está formado por 6 puntos de control de cursos superficiales, 4 pozos de la Fm. Loa y 7 pozos en la Fm. Calama.

El monitoreo isotópico pretende brindar información de los procesos de movimiento y distribución del agua en el acuífero, además de que los isótopos del Deuterio ($2H$) y del Oxígeno-18 ($18O$) del agua pueden dar información de las zonas de recarga si se comparan con la Línea Meteórica de precipitación. En este subprograma hay puntos de control en 6 cauces superficiales, 4 en pozos de la Fm. Loa y 7 pozos de la Fm. Calama.

Además de los puntos identificados en el PMG se construirá un nuevo pozo en la sección que une el nacimiento del río San Salvador con el cerro Calama y permitirá contar con información de niveles, hidroquímica e isótopos para las dos formaciones acuíferas, Fm. Loa y Calama.

Se completará además el PAT con un SIG en línea que contendrá toda la información contenida en el monitoreo.

2.1.6.4 Evaluación Temprana de los Efectos de la Extracción de Agua del pozo P-10

El flujograma de decisiones establece Las condiciones bajo las cuales puede operar el pozo profundo P-10, verificando que se cumplan las condiciones establecidas en la Resolución DGA N°48/2004 y definiendo las acciones a seguir en caso de que alguno de los umbrales establecidos se vea superado.

En este sentido, como se ha señalado anteriormente, en el muestreo isotópico realizado en agosto de 2009, el Tritio ($3H$) fue detectado en todas las muestras de aguas superficiales y en las aguas subterráneas del pozo P-21 (Fm. Loa), pero no así en las aguas provenientes del pozo PPR-2 (Fm. Calama). Estos antecedentes, más otros geológicos e hidrogeológicos, hacen razonable asumir que existe una desconexión hidráulica en el corto plazo entre las Formaciones acuíferas El Loa y Calama. Por lo anterior, durante el primer año de ejercicio del pozo P-10, solo serán consideradas como variables de decisión las siguientes:

- El volumen almacenado.
- Tritio en la Formación Calama.
- Caudal de la Vertiente Ojos de Opache.

Así, el flujograma de decisiones (**Figura 2-1**) comienza verificando si el volumen total extraído supera al 5% del volumen embalsado en el acuífero de Calama. En caso de ser

superado, se debe suspender el bombeo desde el pozo P-10 hasta que el volumen embalsado se recupere. Esto último deberá comprobarse usando los instrumentos que estén disponibles en ese momento. Mientras el volumen extraído sea menor al volumen embalsado, se podrá seguir bombeando sin restricción y se deberá avanzar en el flujograma para verificar el resto de las condiciones.

La segunda verificación corresponde al monitoreo de Tritio en los pozos profundos. En caso de no encontrarse Tritio en las muestras tomadas desde los pozos profundos por sobre el límite de detección establecido en la línea base de este PAT (0,5 TU), se deberá verificar el comportamiento de los caudales de la vertiente Ojos de Opache en su estación de Aforo ENAEX. Si el promedio móvil en 12 meses de la vertiente está por sobre 283 l/s, se podrá bombear el pozo P-10 sin restricción. Si por el contrario, el promedio móvil en 12 meses del caudal de la vertiente está por debajo de 283 l/s, entonces se deberá verificar los caudales de la vertiente, monitoreando 1 vez a la semana y por 1 mes (lo anterior se realizará mientras no se encuentre operativa la estación fluviométrica señalada en el punto I.1.2). En caso de verificarse el descenso por debajo del umbral establecido, se debe realizar un Informe tendiente a analizar las causas de dicho descenso. Si el descenso es atribuible al P-10, se debe suspender la extracción desde el pozo P-10. Si no es atribuible a P-10, se puede bombear el pozo P-10 sin restricción y se deberá redefinir el umbral para la vertiente Ojos de Opache en ENAEX.

En caso de verificarse la presencia de Tritio por sobre el límite de detección establecido en la línea base de este PAT, esto es, por sobre 0,5 TU (Unidades de Tritio), entonces se deberá realizar un Informe tendiente a analizar si la presencia de Tritio se debe a una conexión hidráulica entre las Formaciones Calama (profunda) y El Loa (superficial).

En forma paralela se debe verificar el comportamiento de los caudales de la vertiente Ojos de Opache en su estación de Aforo ENAEX. Si el promedio móvil en 12 meses de la vertiente está por sobre 318 l/s se podrá bombear el pozo P-10 sin restricción (a). Si por el contrario, el promedio móvil en 12 meses del caudal de la vertiente está por debajo de 318 l/s, y por sobre 283 l/s, se debe disminuir el bombeo desde el pozo P-10 (b), en un caudal equivalente a la diferencia entre el umbral de 318 l/s y el promedio móvil en 12 meses correspondiente al mes en análisis. Si el promedio móvil en 12 meses es inferior a 283 l/s, se debe suspender el bombeo desde el pozo P-10 (c). Las acciones tomadas en todos los casos serán analizadas nuevamente a la luz de los resultados del informe que

determinará las causas de la presencia de Tritio en el acuífero inferior. Si los resultados del informe demuestran que la presencia de Tritio se debe a una conexión hidráulica entre las Formaciones Calama (Acuífero Inferior) y El Loa (acuífero superior), se debe suspender el bombeo.

Por el contrario, si el estudio determina que la presencia de Tritio no se debe a una conexión hidráulica natural y que dicha conexión se debe a causales atribuibles a MET, esta deberá tomar las acciones necesarias para corregir dicha conexión. En el caso que no sea atribuible a MET, la Dirección General de Aguas establecerá las acciones a seguir.

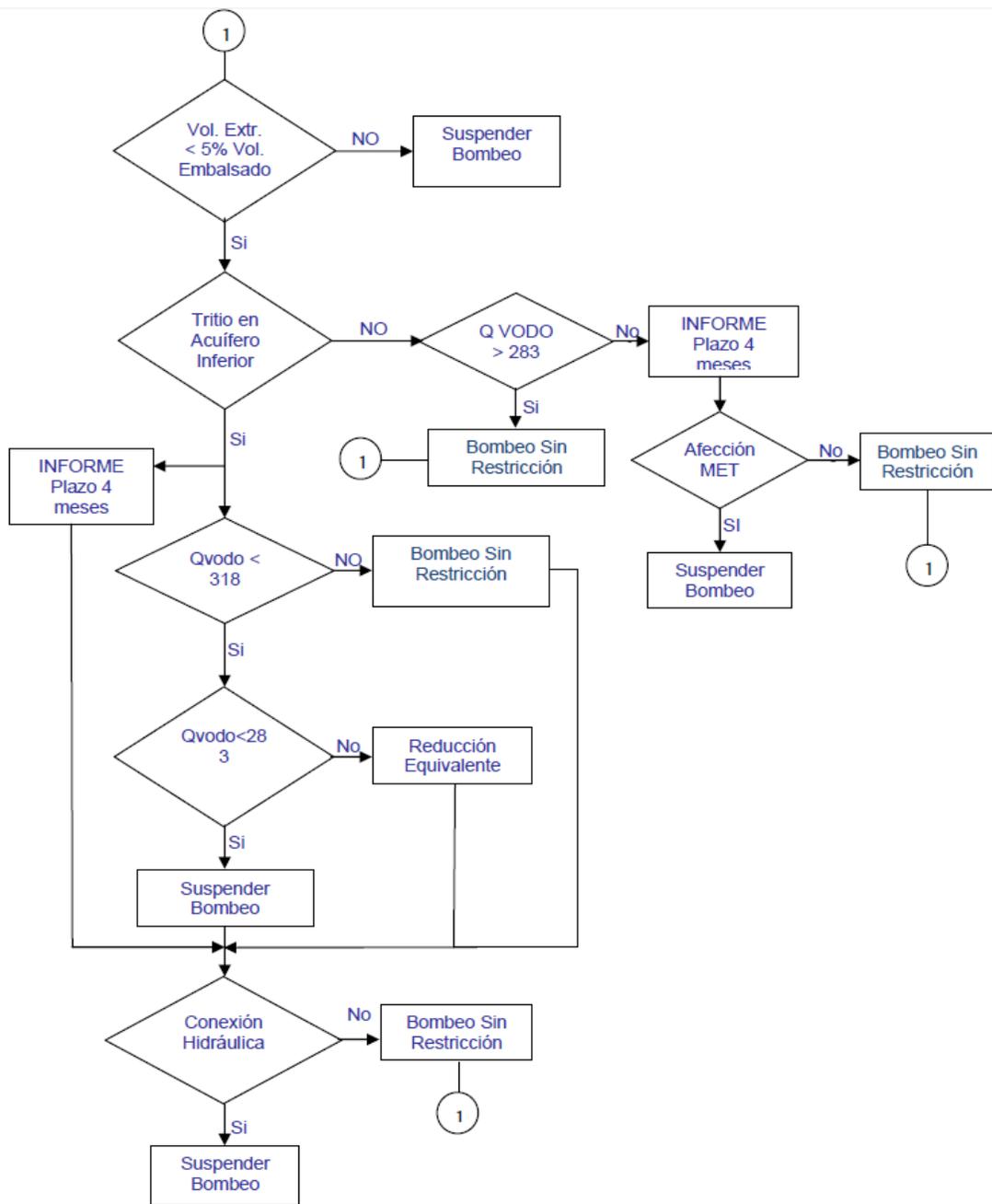


Figura 2.1. Flujograma de decisiones

2.1.6.5 Umbrales

El objetivo de este PAT es proteger los caudales de las vertientes Likantatay, Ojos de Opache, La Cascada y los ríos Loa y San Salvador, asegurando la estabilidad de los niveles en la Fm. Loa que es dónde están conectados.

El otro objetivo es evaluar si la extracción desde el pozo P-10 puede o no afectar a los caudales antes mencionados. A continuación se determinan umbrales que permitan evaluar de manera temprana las condiciones establecidas en la otorgación de extracción del pozo P-10.

De los análisis realizados sobre el comportamiento histórico de cada una de estas fuentes, y considerando lo señalado en el punto I.1.3 de este informe, en forma preliminar solo se definirán umbrales de protección para la vertiente Ojos de Opache. Estos umbrales, serán monitoreados en el punto definido como, "Ojos de Opache en ENAEX".

Determinación de Umbrales en las Vertientes

Conforme al modelo conceptual actualmente aceptado, el flujo pasante por el acuífero superior corresponde aproximadamente a la suma de los caudales de las vertientes que afloran aguas debajo de la ciudad de Calama, esto es, las vertientes Ojos de Opache, La Cascada y Likantatay.

Consecuentemente, todas ellas son influidas por las variaciones históricas de cada uno de los factores que componen el balance hídrico del acuífero superior, en términos de entradas y salidas. Por otra parte, pruebas de bombeo han demostrado que en el corto plazo existe una fuerte desconexión hidráulica entre el acuífero superior y el inferior, tal que es posible asumir que las extracciones en el acuífero Calama inferior no ha significado la inducción de aportes desde el acuífero Loa superior, al menos en el lapso de los dos últimos años. Si complementariamente, asumimos que la naturaleza kárstica de la formación de calizas del acuífero superior genera una rápida dinámica entre las variables del balance, tal que el efecto de una extracción repercute rápidamente en el flujo pasante y las vertientes, entonces la serie histórica de los caudales mensuales de vertientes se puede reconstituir como la suma de los caudales aforados más la extracción media mensual de MET. Sin perjuicio de lo anterior, históricamente la vertiente La Cascada ha presentado un comportamiento hidrológico e hidroquímico ligado al río Loa, distinto al

comportamiento de las vertientes Ojos de Opache y Likantatay, no se considera la rectificación de sus caudales.

Vertiente Ojos de Opache en Enaex

Tanto la DGA Región de Antofagasta como MET realizan aforos mensuales en este punto. El monitoreo por parte de la DGA comenzó en Octubre de 1997, mientras que el registro de MET en Abril del 2000.

Validada la hipótesis de desconexión entre la Formación El Loa y la Formación Calama en el corto plazo, se definieron dos umbrales para la vertiente Ojos de Opache. Para ello se trabajó principalmente con datos de la DGA, completados con datos de MET para los meses en que no se contaba con mediciones por parte de DGA.

Para el cálculo del primer umbral se consideró la tendencia actual y se realizó un pronóstico de los caudales para los próximos años. Esta simulación, se hizo asumiendo que P-10 comenzará a operar en septiembre del 2010 (lo que implica cero extracción desde la Fm. Loa) y suponiendo además que los caudales de la vertiente para los meses desde agosto a diciembre de 2010 serían los mínimos medidos para esos meses en los 3 últimos años. La simulación aplicó la metodología señalada en el punto I.1.4.1, logrando estabilizarse en un valor de 283 l/s. El segundo umbral para la vertiente Ojos de Opache considera el mínimo histórico promedio móvil en 12 meses del caudal natural de la vertiente, el cual corresponde a 318 l/s.

Cómo se explica más adelante, ambos umbrales serán utilizados en el flujograma de decisión de este PAT.

Reducción en 50 años superior al 5% del volumen almacenado

Uno de los objetivos del PAT es que no haya un abatimiento de los niveles que suponga una reducción mayor al 5% del volumen total almacenado en la Fm. Calama a lo largo de 50 años. La estimación del volumen total de la formación Calama proviene del modelo numérico hidrogeológico realizado por Montgomery & Associates del 2009 y equivale a un total de 7.555.035.490 m³, el 5% del cual es 377.751.775 m³. Si se suman todas las extracciones conocidas en la Fm. Calama se cuantifica un caudal de 133 L/s, que supone un 2.78% del volumen total almacenado. Como se puede observar se puede decir

que no se excede a la condición de no extraer más del 5% del volumen almacenado en 50 años.

No se disminuyan caudales de ríos a nivel regional

Con la información existente no hay evidencias de que haya una conexión entre el río Loa y la formación acuífera Calama. El caudal medio medido en el río Loa en las estaciones de Yalquincha y la Cascada de la DGA es superior a los 1000 L/s. Aún y suponiendo que todo el caudal extraído en el pozo P-10 proviniera totalmente del río Loa, eso supondría un porcentaje menor al 10% de su caudal, de lo que se puede decir que el impacto creado no sería cuantificable ya que este porcentaje es menor al error de medición de los caudales.

2.1.6.6 Informes y Evaluación

Se propone que los resultados de monitoreo de este PAT sean reportados de manera trimestral mediante la entrega de Informes Trimestrales al Departamento de Administración de los Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, consolidando los resultados del Programa de Monitoreo Global propuesto para el acuífero de Calama y de la Unidad de Monitoreo de Alerta Temprana propuesta. Los Informes siguientes serán entregados la cuarta semana del mes siguiente al término del trimestre monitoreado.

Cada vez que se verifique que un umbral haya sido superado, MET deberá comunicar el hecho a DGA Región de Antofagasta, entonces la DGA deberá oficiar a MET indicando las acciones a seguir conforme a lo establecido en este PAT.

Por otro lado, y bajo el entendimiento de que el PAT es un documento dinámico, se propone que las nuevas Líneas Base del sistema a las que se hace referencia en este documento, así como los umbrales propuestos para la Unidad de Monitoreo de Alerta Temprana, sean actualizados de manera anual. Al mismo tiempo se sugiere revisar la frecuencia de entrega de Informes de Monitoreo, de manera de cambiarla de una frecuencia Trimestral a otra Anual.

3. Descripción geológica

Este capítulo tiene como objetivo reunir toda la información geológica existente en la cuenca del acuífero de Calama y lograr un análisis integral del funcionamiento geológico.

Inicialmente, se presenta una síntesis de las diferentes formaciones geológicas existentes en la cuenca basándose en la compilación de datos proporcionados por los informes mencionados en el capítulo de revisión de antecedentes. La información compilada hace referencia a sectores de la zona de estudio con abundante información disponible, así como a zonas sin información geológica disponible. Para abordar la incertidumbre geológica en determinadas partes de la cuenca, en el marco de este proyecto se realizó una campaña de geofísica gravimétrica para conocer la geometría del basamento geológico. Los resultados de esta campaña se presentan aquí.

En este capítulo se expone el modelo geológico general de la cuenca del río Loa en su sector medio en la ciudad de Calama, en conjunto con la información compilada y la campaña gravimétrica.

3.1 Compilación de la información geológica existente

La compilación geológica tiene como objetivo la descripción de las formaciones geológicas presentes en la gran cuenca de Calama. En general, la información compilada proviene principalmente de los informes:

- *"Informe técnico: Hidrogeología segmento intermedio del río Loa, II Región"* realizado por Hauser Yung (1999)
- *"Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui"* realizado por la Ingeniería DICTUC (2005)
- *"Estudio Geológico-Geofísico del Área de los Pozos MET de Calama"* realizado por Aquaconsult (2006) para Minera El Tesoro
- *"Informe técnico: Resultados de la construcción del pozo OBS-11C, Minera El Tesoro, Calama"* realizado por Montgomery and Associates (2009) para Minera El Tesoro
- Presentación PPT *"Umbrales pozos control drenaje rajo MMH RCA 311/2.005"* realizada por CODELCO NORTE (2009)

- *"Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico sector campo de pozos minera el tesoro. (Período: octubre-diciembre 2009)"* realizado por Montgomery & Associates (2010) para Minera El Tesoro
- *"Estudio de modelamiento hidrogeológico de la subcuenca Cluster Toqui para el Proyecto Quetena"* realizado por la empresa Aquaconsult en 2011 para CODELCO
- *"Modelamiento hidráulico del Tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales"* realizado por la empresa Knight Piésold en 2010 para la empresa CODELCO
- *"Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa. Calama, Chile"* realizado por Montgomery & Asociados en 2009 para la Minera El Tesoro.

El detalle del sistema geológico superficial y sub-superficial obtenido de los documentos anteriores se dispone en el **Anexo A1**, donde se presentan los puntos principales a escala local y subregional.

La zona de estudio está formada por una serie de materiales sedimentarios que han rellenado la cuenca del río Loa durante los últimos 50 millones de años. Estos materiales tienen un espesor variable con una media cercana a los 300 metros, y adquiriendo en algunos casos puntuales potencias de hasta 500 metros. Subyacente a éstos materiales, existe una roca de origen ígneo-metamórfico, definida como basamento sobre el cual han ido sedimentando todos los materiales sedimentarios de relleno anteriormente citados. Las rocas del basamento se pueden hallar en los extremos de la cuenca formando parte de las cumbres con mayor altura. En la **Figura 3-1** se observa el modelo geológico conceptual de la cuenca del río Loa, y un resumen en la **Tabla 3-1**.

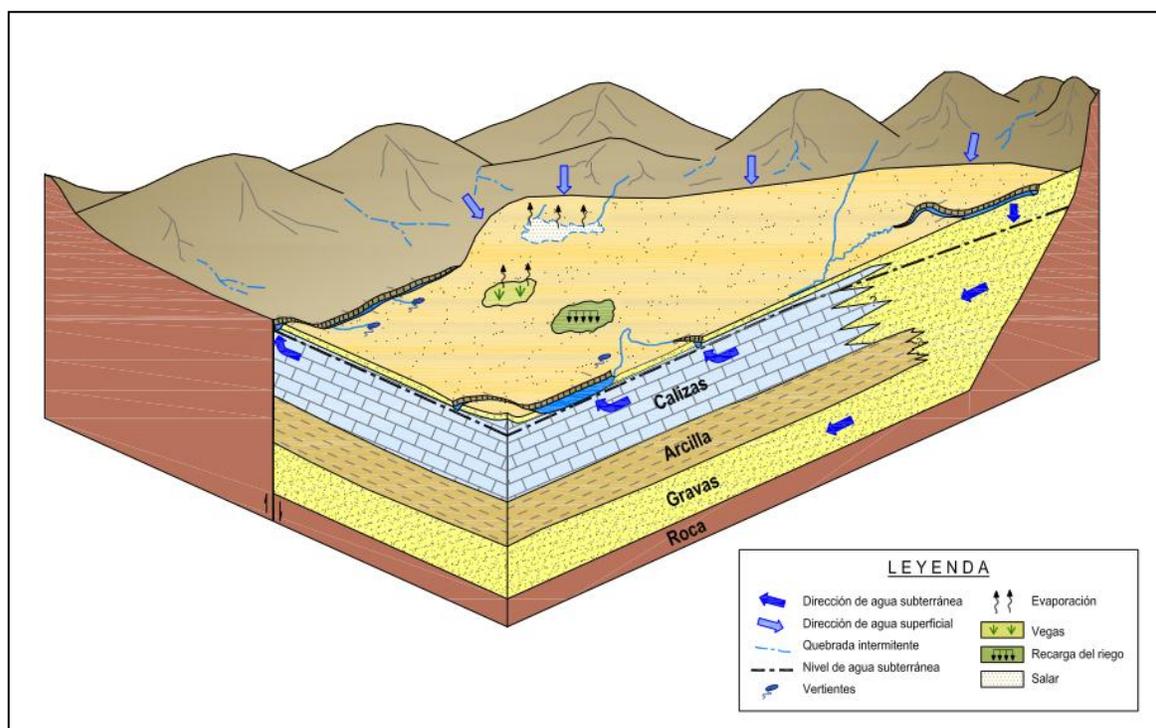


Figura 3-1. Modelo conceptual de la cuenca del río Loa. Fuente: Montgomery & Associates, 2009.

En la zona de estudio se definen siete unidades geológicas principales compuestas por rocas litológicamente diferentes y depósitos sedimentarios semi-consolidados, las cuales se describen a continuación, nombrándolas de base a techo:

UG-1 Basamento ígneo-metamórfico. Esta primera unidad está compuesta principalmente por rocas intrusivas y metamórficas, siendo las rocas más antiguas de la cuenca. Estas rocas están formadas esencialmente por granitos, dioritas, tonalitas, esquistos y anfibolitas. El basamento es subyacente a todas las demás unidades que se describen a continuación y conforman todos los altos relieves de la zona de estudio.

Las principales rocas ígneas que componen el basamento son el complejo intrusivo de Chuquicamata, el complejo granodiorítico Fortuna, el complejo monzonítico-monzodiorítico Los Picos, los granitoides del Triásico y el complejo meta-plutónico de cerros de Chuquicamata.

Por otro lado, las rocas metamórficas pertenecen mayoritariamente al complejo metamórfico del Limón Verde, de edad Paleozoica, dispuesto en el borde sur de la

cuenca. También han sido localizadas rocas metamórficas durante la perforación de los pozos situados al poniente del Tranque Talabre.

Finalmente, las rocas volcánicas y sedimentarias que también forman parte de éste basamento pertenecen a las formaciones Collahuasi, a los estratos de los cerros de Chuquicamata, Quetena y el grupo Caracoles y finalmente a la formación Cerritos Bayos en el borde noroeste de la cuenca.

Numerosas fallas tanto de carácter regional como local afectan al basamento, lo cual incide muy significativamente en la geometría del relleno sedimentario del área de estudio.

UG-2 Formación Calama. A pesar de tener una muy extensa presencia en toda la cuenca de Calama, esta formación presenta muy escasos afloramientos siendo las más cercanos al área de estudio los que se encuentran en el Cerro de Calama (7 km al sureste) y en Cerro Milagro (10 km al este).

Esta formación está compuesta por sedimentos de origen torrencial y gravitacional y está constituida principalmente por depósitos de gravas y conglomerados gruesos polimícticos con moderado grado de consolidación y compactación. Estos materiales se caracterizan también por tener una estratificación irregular y una selección pobre (UG-2a). Niveles compuestos por lavas y brechas andesíticas están intercaladas en la parte basal de la secuencia, aflorando en los cerros del Milagro y Calama (UG-2b).

Los sedimentos de ésta formación están mal clasificados y sus clastos son de origen volcánico (andesitas), de angulosos a subredondeados, de tamaño variable entre 1-20 cm, y en parte imbricados en la matriz, siendo ésta de tipo arcillo arenosa.

La potencia de esta unidad no supera los 120 metros en general; sin embargo, numerosos pozos de la cuenca de Calama interceptan ésta formación mostrando espesores de 160 m en el área de la Hoya Quetena y algunos espesores puntuales de por lo menos 300 metros en algunas otras zonas.

UG-3 Formación Jalquinche (grupo Loa). Esta unidad está formada por areniscas finas y limolitas con intercalaciones de evaporitas que se hallan en el sector central y occidental.

La subunidad UG-3c (secuencia superior calcárea) está formada esencialmente por areniscas y calizas; la subunidad UG-3b (secuencia superior de tobas) está formada

por tobas y cenizas volcánicas además de areniscas y limos y finalmente la subunidad UG-3a (secuencia inferior limoso-arcillosa) está formada por limolitas y arcillitas.

UG-4 Formación Lasana (grupo Loa). En el sector oriental de la cuenca se disponen areniscas, limolitas y conglomerados que constituyen esta formación.

UG-5 Formación Chiquinaputo (grupo Loa). Formación suprayacente en parte a la formación Opache en el sector oriental de la cuenca, formada por los materiales correspondientes a conglomerados y areniscas de paleocanales.

UG-6 Formación Opache (grupo Loa). Formación compuesta por calizas, calizas arenosas, areniscas calcáreas y travertinos. Presenta afloramientos exclusivamente en la parte sur de la Hoya Quetena, bordeando la quebrada del río San Salvador.

Las subunidades que conforman ésta formación son la subunidad UG-6c denominada secuencia superior calcárea y formada por calizas y travertinos con intercalaciones de rocas volcánicas, la subunidad UG-6b denominada secuencia detrítica gruesa formada por conglomerados y areniscas, y la subunidad UG-6a denominada secuencia inferior clástico-fina formada por lutitas y areniscas.

UG-7 Formación Chiuchiu. Corresponde a depósitos conglomeráticos de areniscas laminares, diatomitas, travertinos y cenizas volcánicas re-trabajadas. En los sedimentos finos de esta formación se encuentra frecuentemente materia orgánica compuesta por tallos, raíces y gasterópodos.

Paralelamente a este conjunto de unidades geológicas principales ubicadas en el área de estudio, también se hallan una serie de materiales geológicos de carácter no consolidado. Estos sedimentos están formados por gravas aluviales antiguas de origen exógeno, ignimbritas compuestas por depósitos de flujos piroclásticos de composición riolítica, depósitos de piedemonte, depósitos aluviales, depósitos fluviales y de ciénagas tanto antiguos como modernos (UG-8 a UG-14).

Unidad	Formación Geol.	Descripción Geológica de los materiales
UG-1	Basamento	Rocas Ígneas, volcánicas y metamórficas
UG-2	Fm. Calama	Depósitos de gravas y conglomerados (UG-2a). Intercalaciones de lavas y brechas andesíticas (UG-2b)
UG-3	Fm. Jalquinche	Limolitas y arcillitas (UG-3a) Tobas, cenizas volcánicas, areniscas y limos (UG-3b) Calcarenitas y calizas (UG-3c)
UG-4	Fm. Lasana	Areniscas, limolitas y conglomerados
UG-5	Fm. Chiquinaputo	Conglomerados y areniscas
UG-6	Fm. Opache	Lutitas y areniscas (UG-6a) Conglomerados y areniscas (UG-6b) Calizas, travertinos y calcarenitas UG-6c)
UG-7	Fm. Chiu-Chiu	Areniscas, travertinos y cenizas volcánicas

Tabla 3-1. Tabla resumen de las unidades geológicas principales en la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia.

Estructuralmente los materiales geológicos que conforman la cuenca están afectados por diversos sistemas de fallas de carácter normal e inverso originados por los diferentes episodios tectónicos que han afectado a ésta, originando la combinación de estructuras de horst y graben. Es por ello que en muchos casos las diferentes unidades geológicas se encuentran falladas y desplazadas en el plano vertical, tal y como se muestra en la **Figura 3-2.**

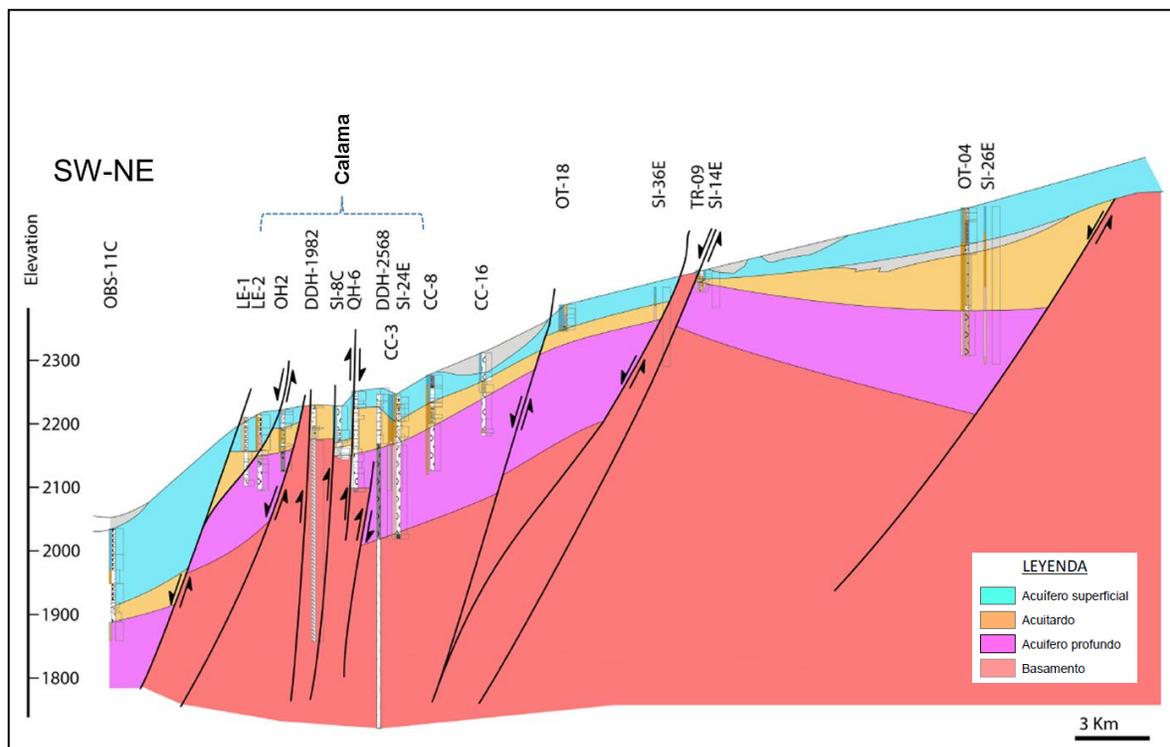


Figura 3-2. Corte geológico donde se observan diferentes fallas. Fuente: elaboración propia.

La síntesis general de la definición de las unidades geológicas se puede observar en la **Figura 3-3**, donde se presenta una columna estratigráfica general tipo, la cual se compone de base a techo por: basamento impermeable (UG-1), brechas sedimentarias y gravas (UG-2), arcillas (UG-3 y UG-4), arenas y calizas (UG-5 y UG-6) y una cobertura aluvial (UG-7 a UG-14).

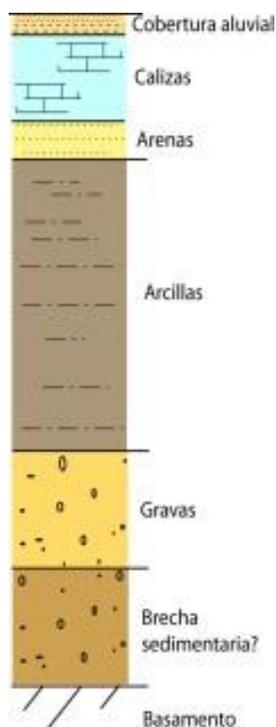


Figura 3-3. Columna estratigráfica tipo de la zona. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.

En particular, en el informe de Montgomery & Associates (2007) y posterior a la perforación de varios sondeos en la zona de estudio, se presentan algunos cortes geológicos situados dentro de la zona de estudio. Así, en la **Figura 3-4** se observa la localización en planta del perfil geológico PPR-2, ubicado al oeste de la ciudad de Calama. Se observa la secuencia geológica correspondiente a los materiales sedimentarios del relleno de la cuenca, dispuestos por encima del basamento ígneo-metamórfico. En la parte central de la cuenca es donde hay el mayor espesor de sedimentos, y que hacia los lados, estos sedimentos se van acuñando hasta desaparecer. En ésta sección se observan las principales unidades geológicas existentes en la zona de estudio (de base a techo, UG-1 a UG-7).

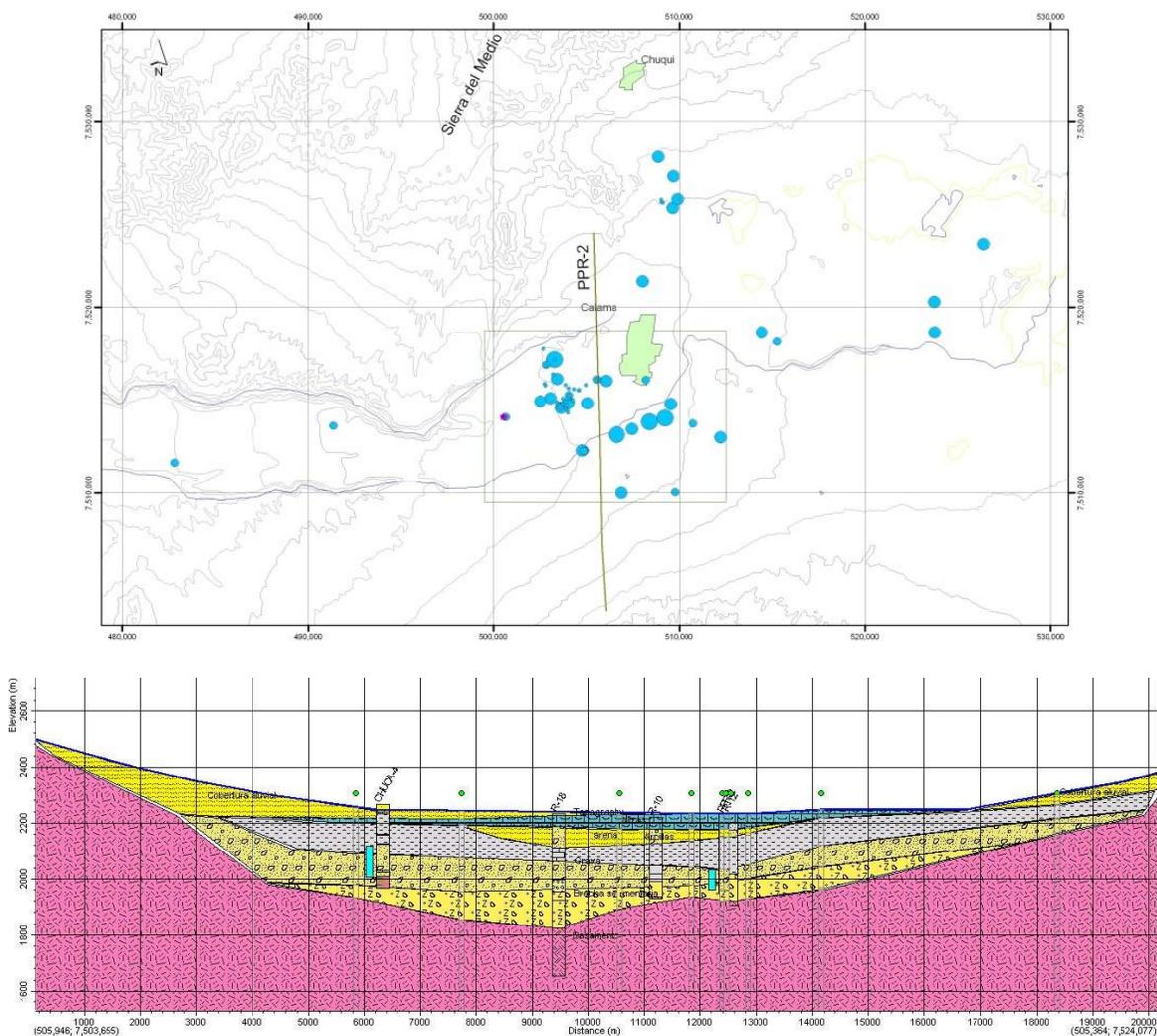


Figura 3-4. Perfil geológico transversal de la cuenca trazado en la localización marcada en la figura superior. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.

De modo equivalente, en la **Figura 3-5** se presenta un corte geológico longitudinal, representativo de la zona ubicada al oeste de la ciudad de Calama. En esta sección la secuencia de los materiales geológicos, tienen una continuidad lateral.

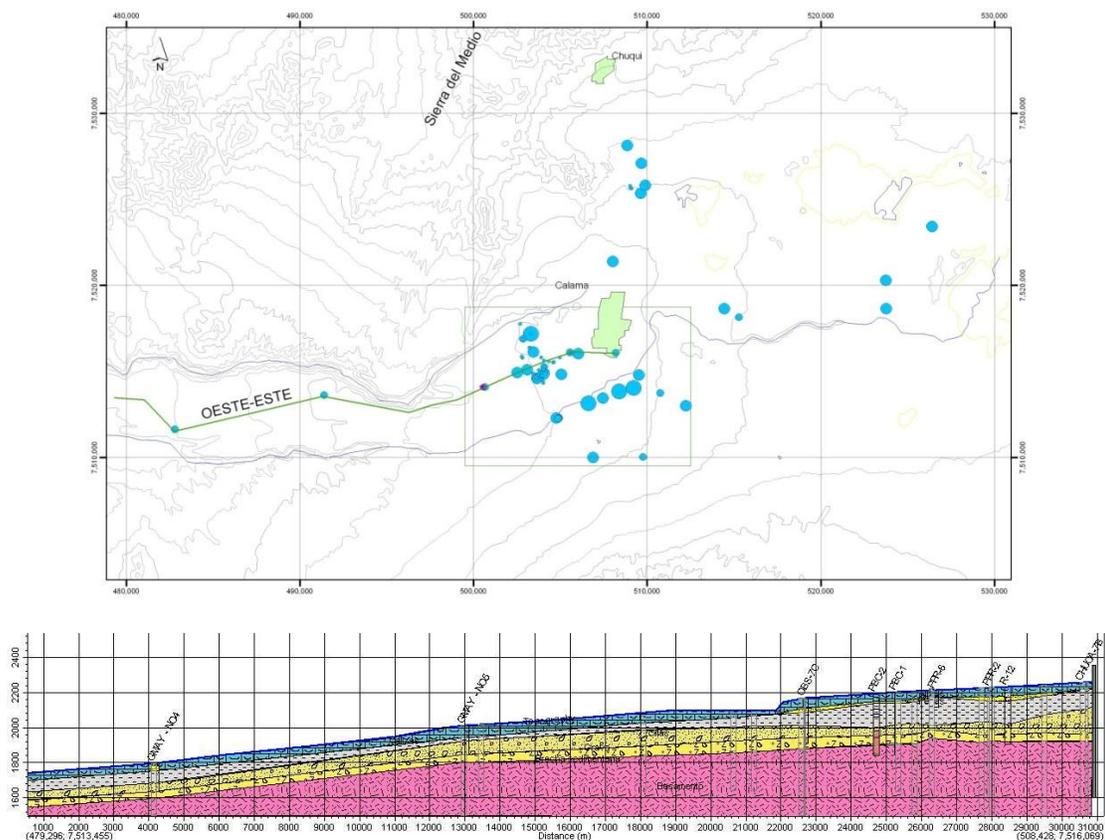


Figura 3-5. Perfil geológico longitudinal de la cuenca trazado en la localización marcada en la figura superior. Fuente: Montgomery & Associates, 2007.

En el próximo capítulo se presenta una campaña de prospección geofísica desarrollada durante el transcurso del presente proyecto, y orientada a resolver las incertidumbres actuales sobre la información geológica.

3.2 Campaña de prospección geofísica

3.2.1 Introducción

En las bases técnicas de DGA para este proyecto hidrogeológico, se solicita explícitamente la ejecución de una campaña geofísica gravimétrica. Esta campaña gravimétrica debía estar formada por 200 km de perfiles gravimétricos con una separación máxima entre puntos ensayados de 2 km, lo que equivale a un mínimo de 100 puntos. El objetivo principal de esta campaña solicitada por DGA ha sido la investigación del fondo basamento de la cuenca en los sectores en que no se tiene información estratigráfica profunda.

Para estos efectos, fue contratada la empresa geofísica IGT, quienes ejecutaron exitosamente el proyecto encomendado e hicieron entrega de un informe técnico con los detalles y resultados de la campaña. Este informe técnico se adjunta como **Anexo A.5**.

Como parte de la metodología utilizada, junto a un equipo técnico de DGA, se estableció un perímetro de interés para los objetivos buscados, a partir de la revisión de los antecedentes de información geofísica y geológica disponible. El criterio principal utilizado sobre el diseño de la campaña ha sido la localización y caracterización de zonas con poca e ninguna información geológica sobre el basamento, con énfasis en la definición de lo que posteriormente sería el límite este y oeste del acuífero inferior. De esta forma, se diseñaron perfiles radiales que se extendieron desde el centro de la zona que contaba con mayor información y hacia el exterior a las zonas menos estudiadas.

3.2.2 Objetivos de la campaña gravimétrica

Se ha cubierto las zonas menos exploradas para lograr delinear sectores que se encontraban indefinidas hasta ahora, como los bordes oeste y este del modelo. Específicamente, se ha buscado determinar la potencia del conjunto de capas que se comportan como acuíferos, y determinar en las zonas donde se ha realizado los ensayos gravimétricos, la profundidad en la que se encuentra el sustrato rocoso base del sistema acuífero.

3.2.3 Revisión de los antecedentes de campañas geofísicas

Las campañas geofísicas previas en la cuenca del río Loa se han concentrado principalmente en la parte central de la zona de estudio, abarcando las áreas de los proyectos de El Toqui, Tranque Talabre y la zona de Minera El Tesoro.

La información consiste en una serie de exploraciones realizadas a partir de ensayos de transientes electromagnéticas (TEM), concentradas en las proximidades de la ciudad de Calama y coincidentes con las zonas dónde se encuentran las actividades mineras. Los perfiles TEM recopilados se resumen en la **Figura 3-6** dónde puede observar como las zonas Este y Oeste de la cuenca de Calama se encuentran poco investigados.

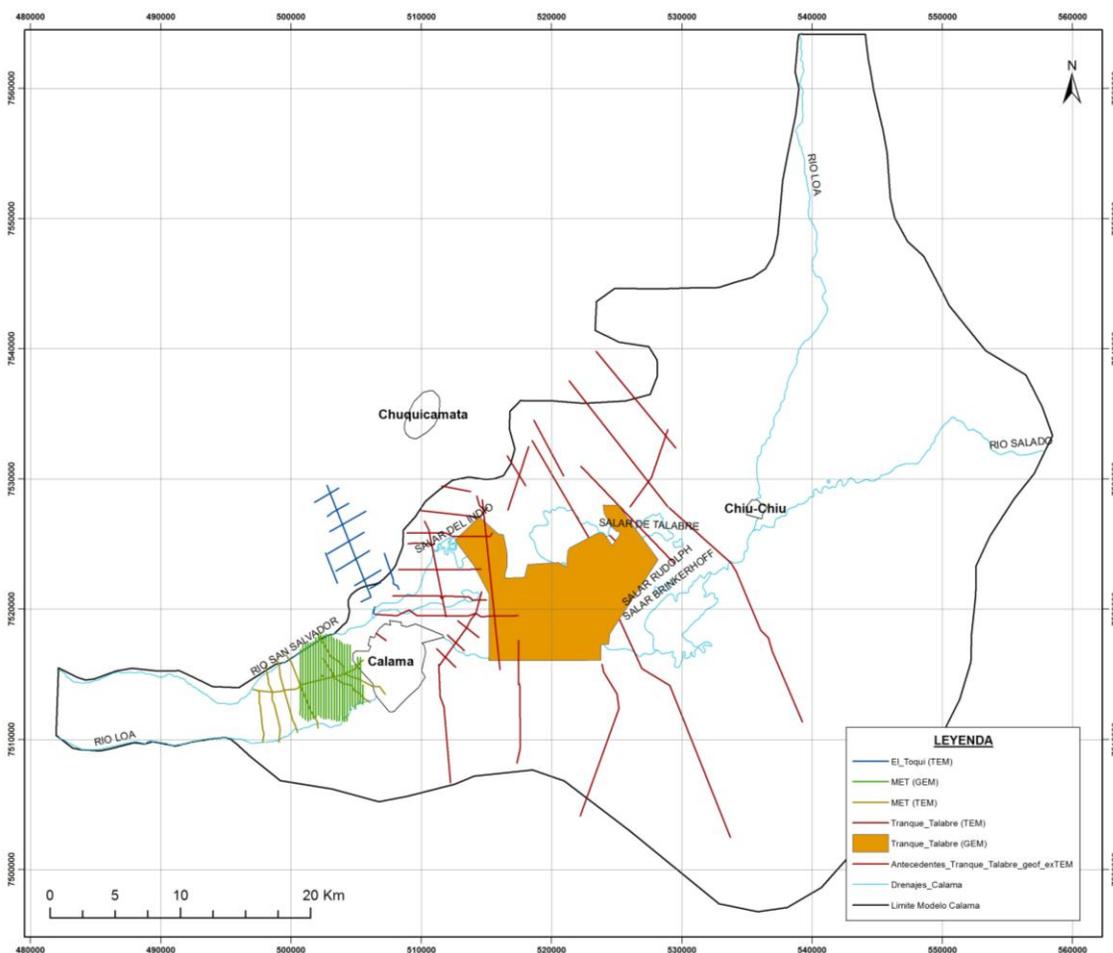


Figura 3-6. Distribución de los perfiles geofísicos existentes en la cuenca del Río Loa. Fuente:elaboración propia.

3.2.4 Desarrollo de la campaña de prospección

La campaña de campo se llevó a cabo entre los días 17 y 24 de septiembre de 2012 con un equipo formado por tres personas: un técnico geofísico de la empresa International Geophysical Technology (IGT), un técnico topográfico de la empresa B&V Geomensores y un hidrogeólogo de Matraz Consultores.

El equipo utilizado para la realización de los ensayos geofísicos es un gravímetro modelo 210T de la marca Sodin con termostato y sensibilidad de 0.01 mgal (**Figura 3-7**). El levantamiento topográfico se realizó con un GPS geodésico.



Figura 3-7. Fotografía del gravímetro utilizado durante los trabajos de la campaña de geofísica gravimétrica en la cuenca del Río Loa en Septiembre del 2012 Fuente: elaboración propia.

La campaña comenzó con una evaluación en terreno de los principales accesos. Durante el periodo de los ensayos se realizaron aproximadamente 20 gravimetrías/día llegando a un total de 123 puntos ensayados. Se realizó además la repetición del 10% de los puntos ensayados con el objetivo de validar de modo estadístico la bondad de los datos. Cada punto ensayado fue marcado con una estaca de madera convenientemente identificada para su posterior levantamiento topográfico.

La distribución de los perfiles gravimétricos se realizó de forma radial en las zonas con menos información anclando los puntos con información geológica de sondajes. De esta forma, el grueso de puntos se concentra en la parte este de la cuenca del río Loa. En la parte oeste también se planificó la realización de dos perfiles para así poder caracterizar el contorno este de la cuenca.

A su vez, los perfiles radiales se distribuyeron espacialmente para poder caracterizar gravimétricamente las zonas más altas en la cuenca, ya que representan la entrada de aguas superficiales y subsuperficiales por los contornos norte y este.

La distribución final de los puntos realizados y su numeración se pueden observar en la **Figura 3-8**.

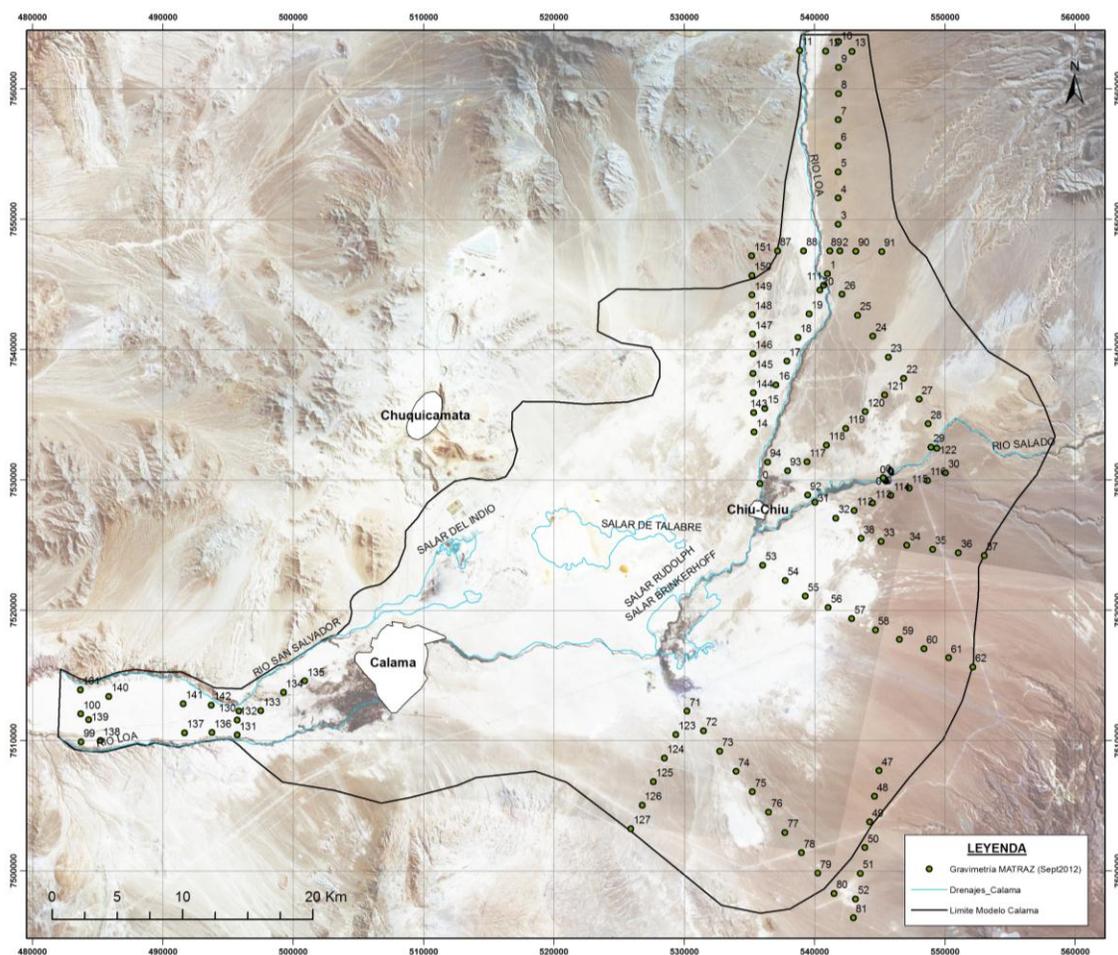


Figura 3-8. Mapa de distribución de los puntos gravimétricos realizados en la campaña de geofísica en septiembre del 2012. Fuente: elaboración propia.

3.2.5 Resultados de la campaña gravimétrica

En la que se han obtenido 14 perfiles gravimétricos, constituidos por 112 puntos. De cada uno de estos se ha obtenido información de la profundidad del basamento o sustrato rocoso, y así se ha estimado la potencia de las capas de materiales no consolidados. La distribución de los perfiles se puede observar en la **Figura 3-9**, donde se presenta las anomalías de Bouguer de 3 perfiles en la zona sureste, 10 perfiles en la zona este y noreste, y un perfil en la zona oeste. A continuación se describe la interpretación del modelo gravimétrico para cada perfil a partir de su orientación, longitud y separación entre estaciones gravimétricas. El orden en que se presenta la descripción de los perfiles es en sentido anti-horario empezando por el perfil 11 hasta llegar al perfil 14.

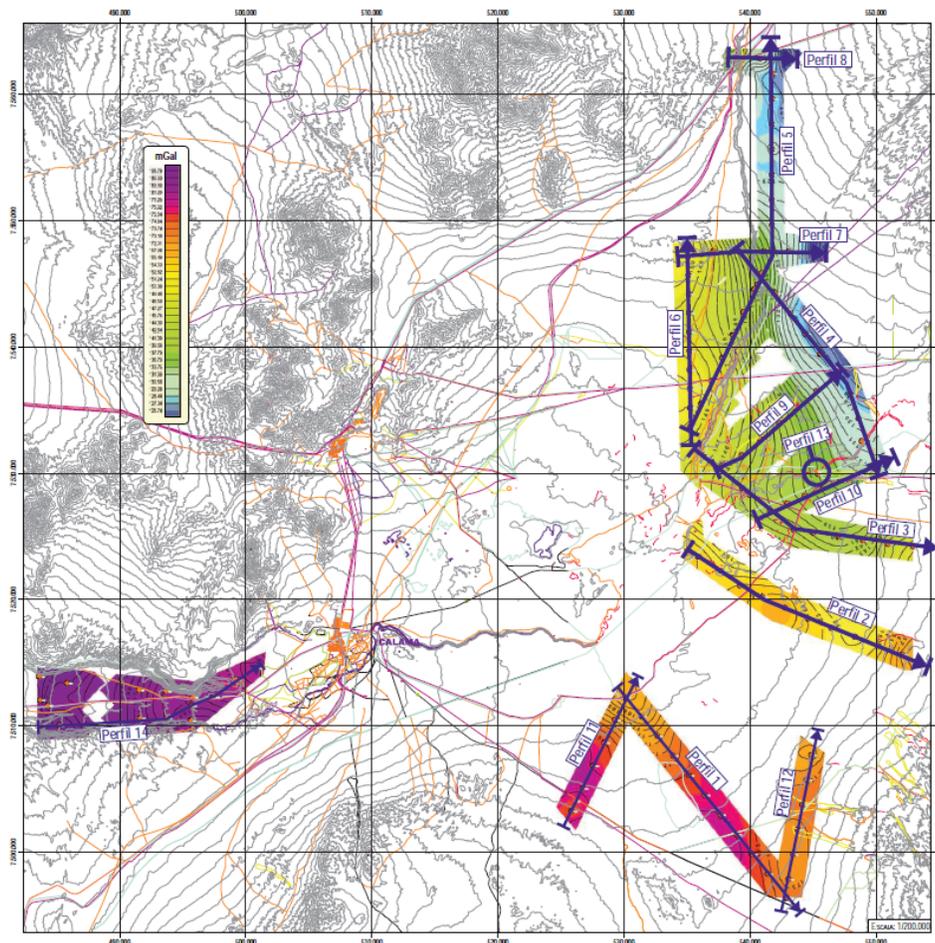


Figura 3-9. Mapa de distribución de los perfiles gravimétricos realizados. Fuente: IGT S.L.

Perfil 1

Este perfil está delimitado por los puntos 71 y 81. Tiene una orientación NO-SE, con una longitud total de 20 km y una separación entre cada una de las once estaciones que lo conforman de 2 km. La forma interpretada del basamento es trapezoidal respecto a la superficie del terreno, con una parte horizontal superior con profundidad aproximada de 70 m. La cota de basamento media es de 2490.84, una cota máxima de 2611.70 m en el punto 81 y una mínima de 2249.21 m en el punto 71.

Perfil 2

Este perfil está delimitado por las estaciones 53 y 62. Tiene una orientación NO-SE, con una longitud total de 18 km y una separación entre las diez estaciones de 2 km. La forma interpretada del perfil del basamento respecto al terreno es irregular, con un máximo relativo en la parte central de 486.75 m de profundidad, en el punto 61 tiene su máximo de profundidad con prácticamente 760 m, a partir de este punto y hacia el este la profundidad disminuye considerablemente. La cota media de este perfil del basamento es de 1986.34 m, y una cota inferior de 1901.41 m en el punto 54 y una cota superior en el punto 62 de 2252.31 m.

Perfil 3

Este perfil está delimitado por los puntos 94 y 37. Esta formado por dos tramos unidos con diferente orientación NO-SE y O-E, tiene una longitud total de 19 km, con un total de 11 estaciones situadas en su mayoría a 2 km de distancia excepto los puntos 92 y 31 que se sitúan a cada lado del río Salado. La forma del basamento en este perfil es concava, con una profundidad media de 209 m, una profundidad mínima de 42.4 m y una máxima de 318m que corresponden a las cotas 2648.93 (punto 37) y 2267.56 (punto 33) m.

Perfil 4

Este perfil está situado entre los puntos 88 y 30. Tiene una orientación NO-SSE, una longitud total de 21 km aproximadamente y una separación de 2 km entre las diez estaciones situadas más al S-SE. El basamento en este perfil tiene una profundidad que va incrementando de NO a SE, con un valle de 362 m de profundidad en el punto 25. El punto 88 tiene una profundidad mínima correspondiente a 85.2 m. La cota media del basamento es de 2456.65 m. La cota máxima y mínima es de 2704.28 y 2329.13 m correspondientes a los puntos 88 y 29.

Perfil 5

Este perfil está delimitado por los puntos 14 y 10. Está formado por dos segmentos con diferente orientación, del punto 14 al 2 de SE a NO y del punto 2 al 10 de S a N. Hay un total de 17 puntos con una separación de 2 km entre ellos. El basamento en este perfil tiene una profundida media de 184.7 m. Según la interpretación gravimétrica en el extremo norte el basamento llega a la superficie a la cota 3040. En el punto 5 se alcanza la máxima profundidad del basamento con 295.5 m desde la superficie. La cota mínima del basamento se encuentra en el punto 14 con 2431.30 m. La cota del basamento aumenta progresivamente de S a N.

Perfil 6

Este perfil está situado entre los putnos 14 y 151. Tiene una orientación S-N, una longitud de 18 km y una separación entre estaciones de 2 km con un total de diez puntos. La profundidad del basamento muestra una forma inclinada, con máximo relativo en la zona sur en el punto 144 de 112 m de profundidad. Un valle en el centro en el punto 148 de 144.8 m de profundidad y a partir de este punto una disminución de esta hacia el extremo norte donde se encuentra el extremo con menor profundidad en el punto 151 donde el basamento alcanza la superficie. La cota media del basamento es de 2595.32 m, la cota más baja del basamento en este perfil se situa a 2431.28 m en el punto 14 y el punto 151 es la cota máxima con 2837.14 que corresponde a la superficie del terreno.

Perfil 7

Este perfil está situado entre los puntos 151 y 91. Tiene una orientación O-E, una longitud de 10 km con seis puntos. La separación entre ellos es de 2 km excepto el punto 2 que se situa entre dos puntos con separación inferior. La cota del basamento en este perfil va desde la superficie en el extremo O y va profundizandose hasta el otro extremo hasta llegar a 259 m de profundidad. Entre el punto 88 y 89 se puede observar una mayor pendiente. La profundidad media del basamento es de 136 m. La cota más baja del basamento se presenta en el punto 89 con 2602.51 m, la cota máxima se encuentra en el punto 151 coincidente con la cota del terreno, 2837.14 m.

Perfil 8

Este perfil se sitúa entre los puntos 11 y 13. Tiene una orientación O-E, una longitud de 4 km, formado por 3 puntos con una separación de 2 km. La cota del basamento disminuye en dirección O-E, la profundidad media a la que se encuentra el sustrato rocoso es de 136 m, la profundidad máxima y mínima es de 179.8 y 111.8 m respectivamente.

Perfil 9

Este perfil está delimitado por los puntos 93 y 22. Tiene una orientación SO-NE, una longitud de 12 km y una separación entre los siete puntos de 2 km. El basamento muestra una forma convexa respecto a la superficie, con una profundidad máxima de 283.8 m en la estación 22. La cota más alta del basamento en este perfil es de 2442.64 m en el punto 119. La cota media del basamento es de 2405.75 m. La diferencia de cota máxima es de 110.49 m.

Perfil 10

Este perfil está comprendido entre los puntos 32 y 30. Tiene una orientación SO-NE, con una longitud de poco más de 9 km repartidos entre siete puntos de ensayo. La forma interpretada de la profundidad del basamento respecto a la superficie del terreno es bastante regular, con una profundidad media de 252.72 m y una diferencia de cota máxima de casi 26 m. La cota media del basamento es de 2325.51 m.

Perfil 11

Este perfil está delimitado por los puntos 127 y 71. Tiene una orientación SO-NE, con una longitud de 10 km y una separación entre cada una de las cinco estaciones que lo confirman de 2 km. La forma interpretada del basamento a lo largo del perfil es de tipo convexa, teniendo una cota media de 2436.83 m, cota máxima de 2475.34 m en el punto 124 y mínima de 2387.78 m en el punto 123.

Perfil 12

Este perfil está delimitado por los puntos 81 y 47. Tiene una orientación SO-NE, con una longitud total de 16.5 km y una separación entre las seis estaciones situadas más al NE de 2 km y una separación aproximada de 1.5 km entre las estaciones 81 y 52. La forma del perfil del basamento respecto a la superficie del terreno se puede describir como dos superficies horizontales de diferente profundidad separadas por una pendiente, la profundidad máxima es de 205 m y la mínima de 63 m. La cota media del basamento es

de 2614.69 m, con un máximo en la estación 49 de 2662.25 m y un mínimo en el punto 52 de 2572.45 m.

Perfil 13

Este perfil está delimitado por los puntos R01 y R09. Tiene una orientación N-S, una longitud total de 360 metros aproximadamente y una separación entre los nueve puntos de casi 50 m. El basamento esta a una profundidad media de 8.4 m, y la diferencia de cota máxima entre los puntos del basamento es de 7.1 m. La cota media del basamento en este perfil es de 2548.68 m. Este perfil se situa en la planicie de inundación del río Salado.

Perfil 14

Este perfil está delimitado por los puntos 99 y 135. El perfil está formado por 2 rectas de puntos, la más occidental con dirección O-E y la más oriental con dirección SO-NE. La longitud total es de 18 km, con un total de ocho puntos separados entre si con una distancia alrededor de 2 km excepto los puntos 138 y 137 que distan 6 km. La profundidad del basamento respecto de la superficie del suelo disminuye de los extremos hacia el interior dibujando dos maximos para volver a aumentar en un valle central en el punto 136 con 274.45 m de profundidad. El punto 138 es el más superficial del basamento, se situa a 58.45 m de la superficie. La cota media del basamento es de 1896 m, la cota máxima se encuentra en el punto 134 con 2012.51 m, mientras que la cota mínima se situa a 1733.48 en el punto 99.

Perfil 1

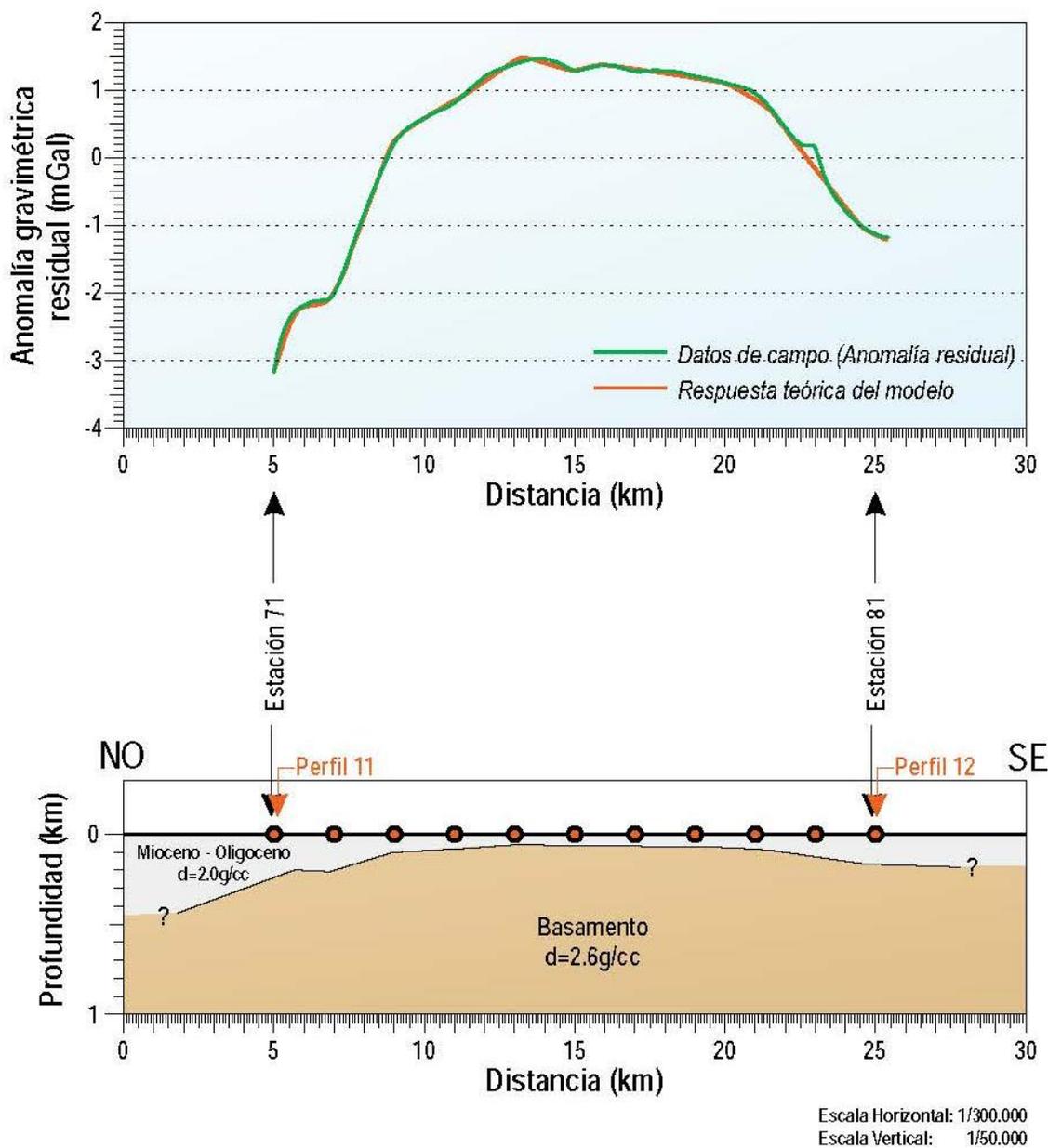


Figura 3-10. Perfil gravimétrico 1. Fuente: IGT S.L..

Perfil 2

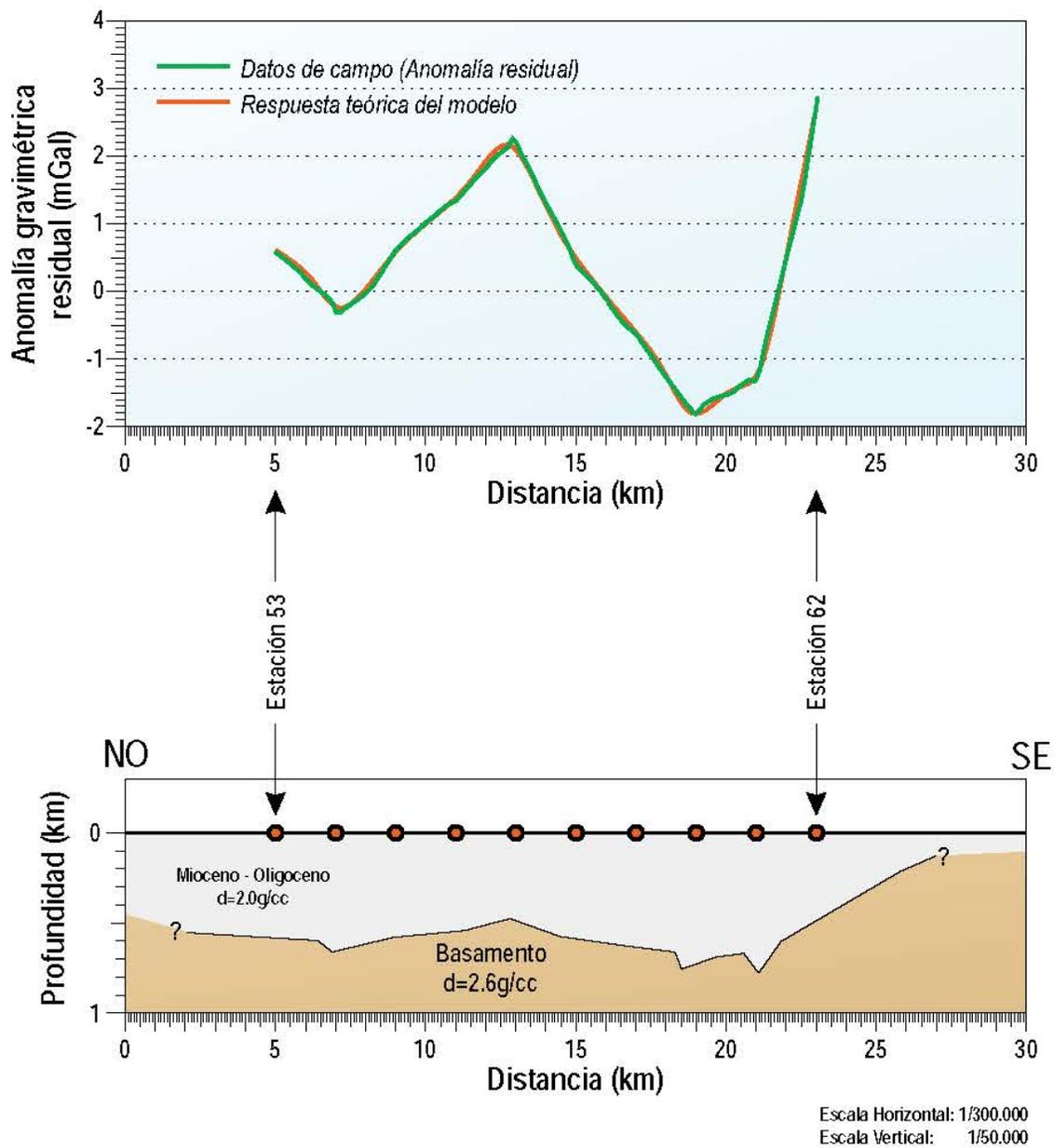


Figura 3-11. Perfil gravimétrico 2. Fuente: IGT S.L..

Perfil 3

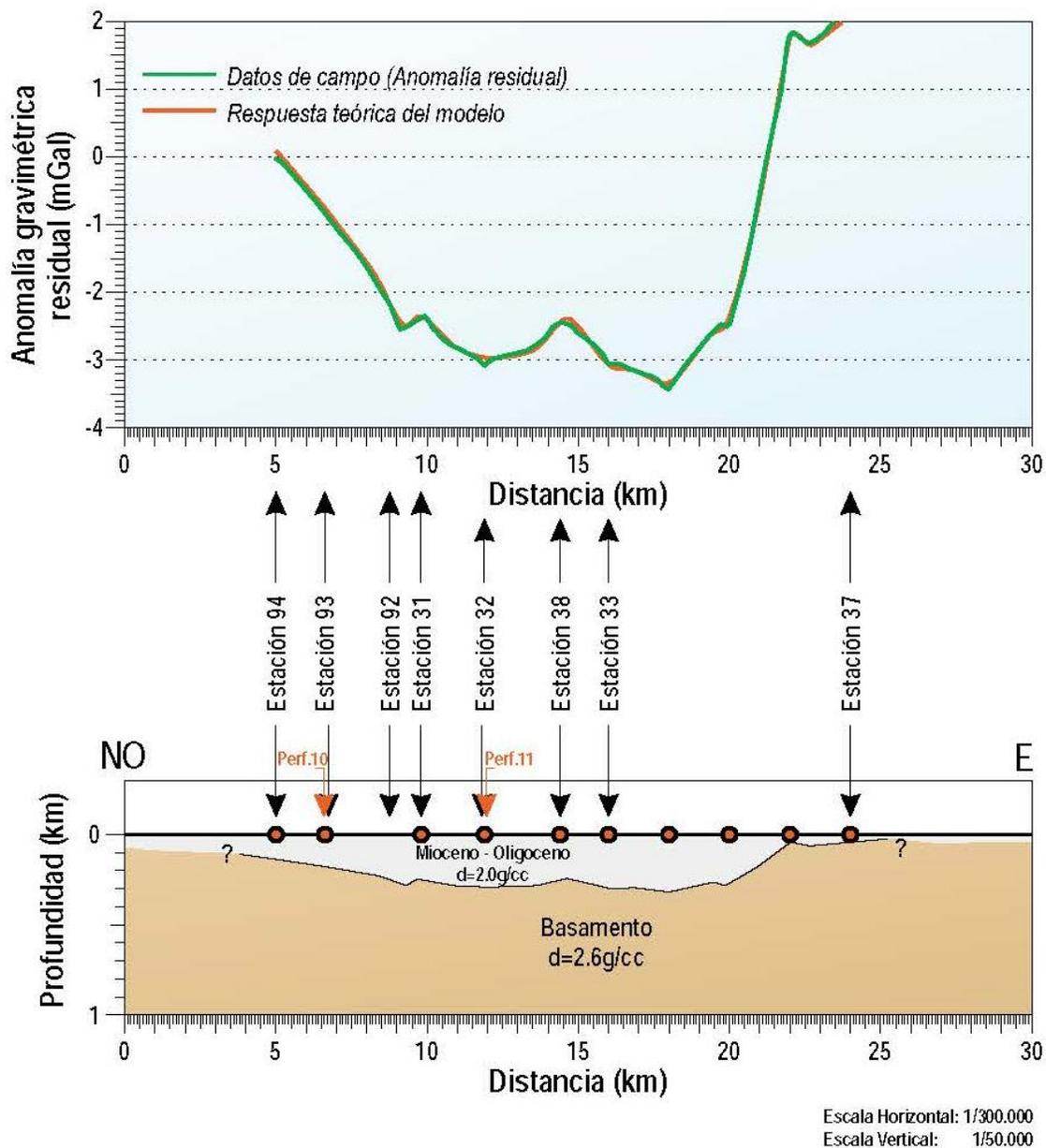


Figura 3-12. Perfil gravimétrico 3. Fuente: IGT S.L.

Perfil 4

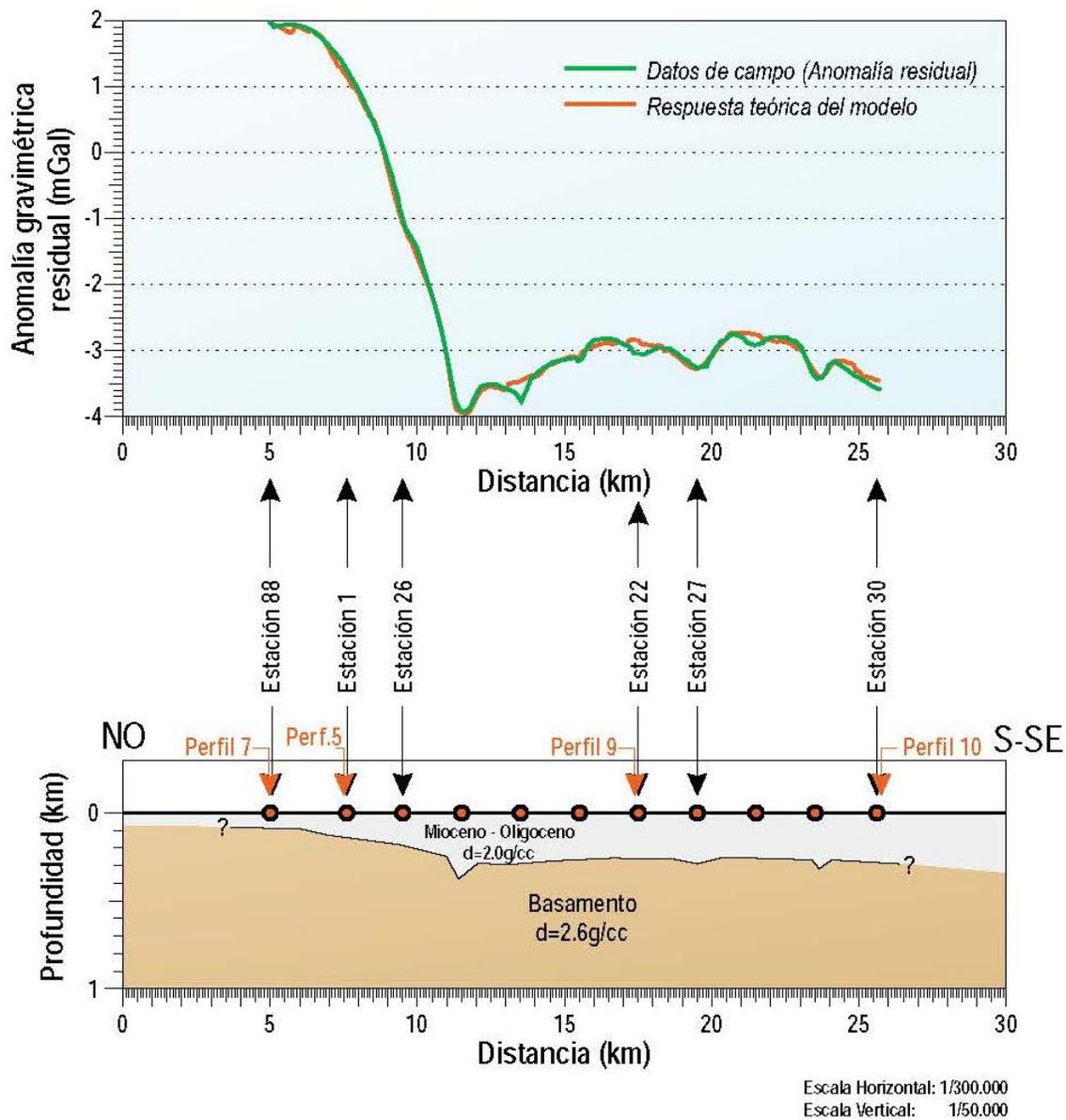


Figura 3-13. Perfil gravimétrico 4. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 5

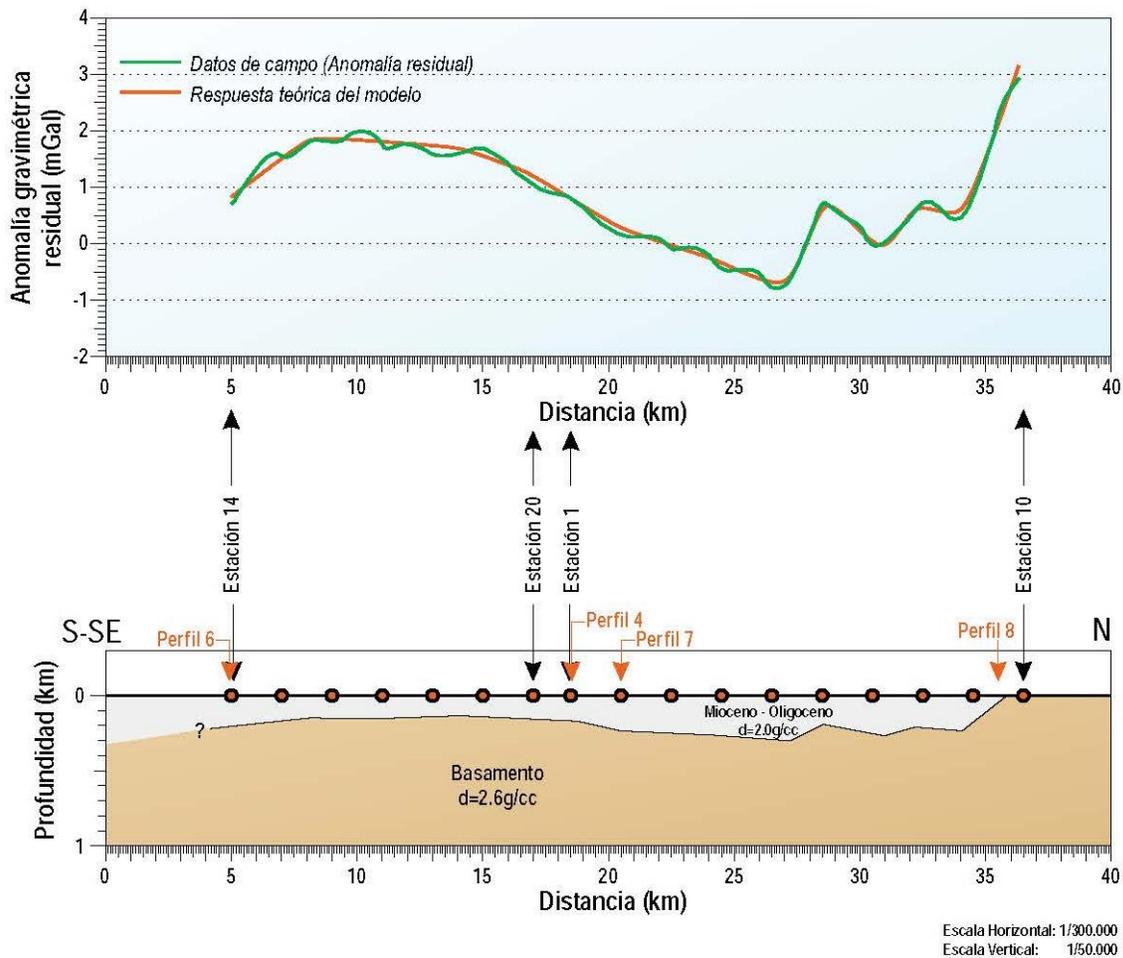


Figura 3-14. Perfil gravimétrico 5. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 6

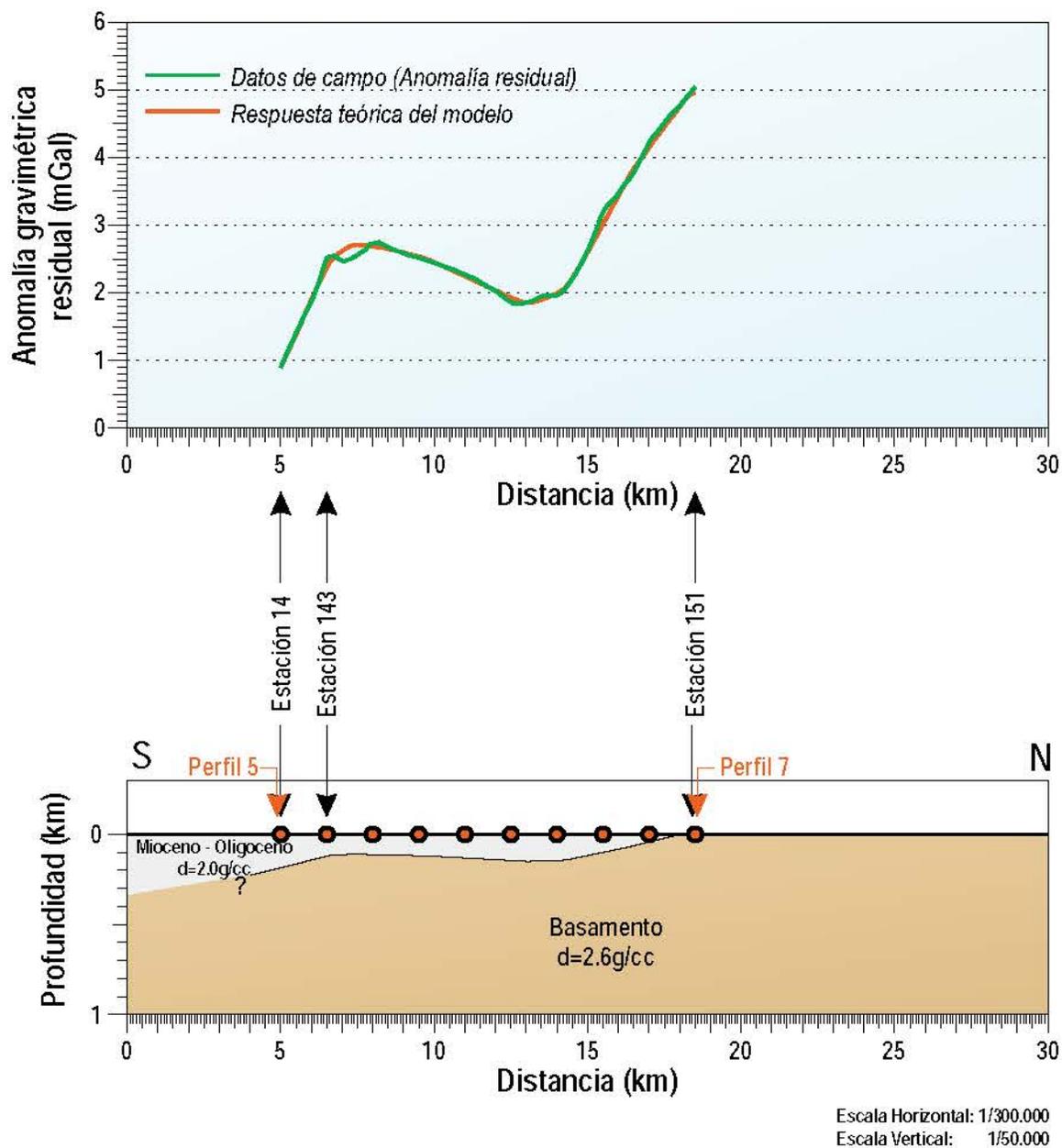


Figura 3-15. Perfil gravimétrico 6. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 7

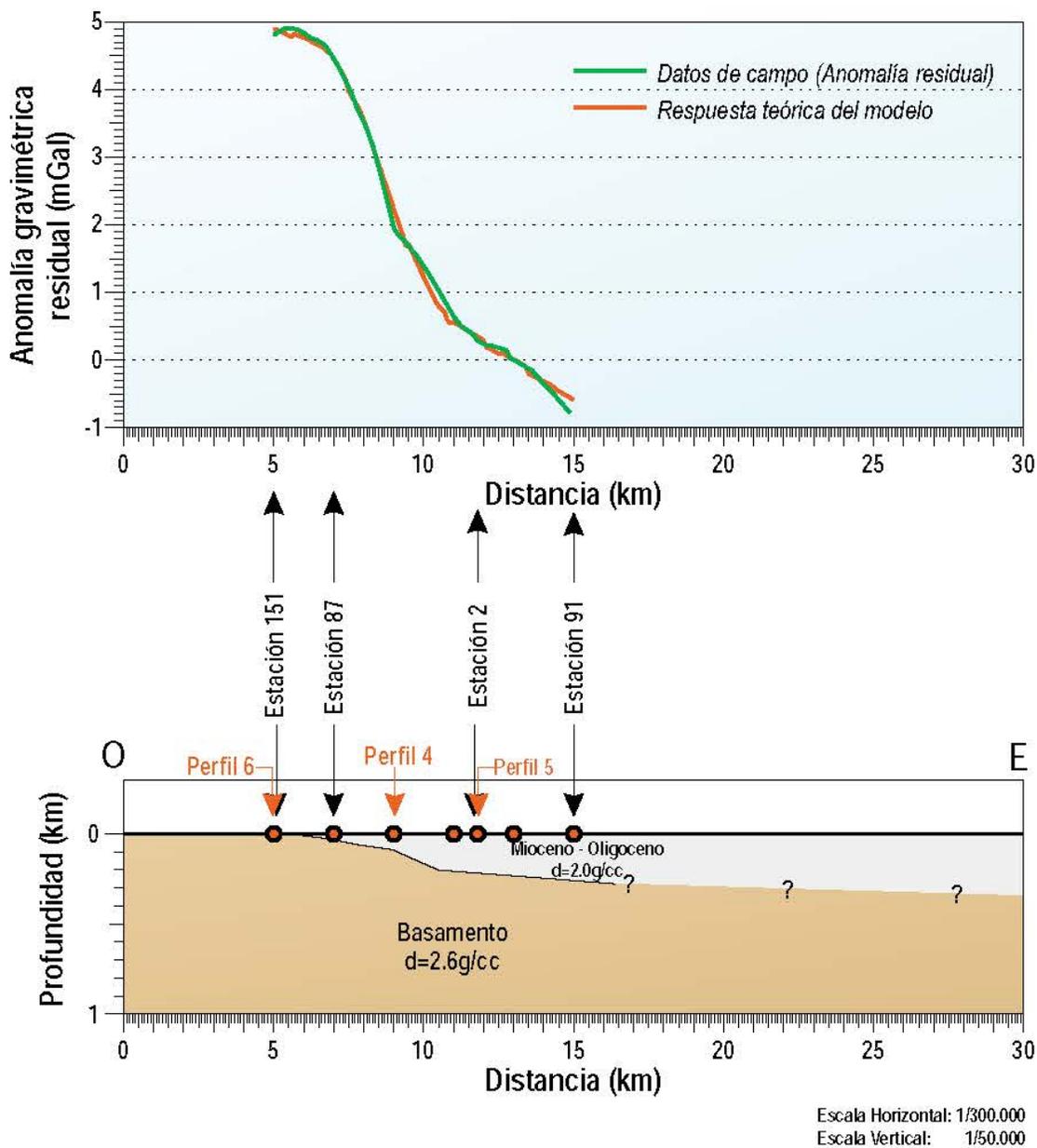


Figura 3-16. Perfil gravimétrico 7. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 8

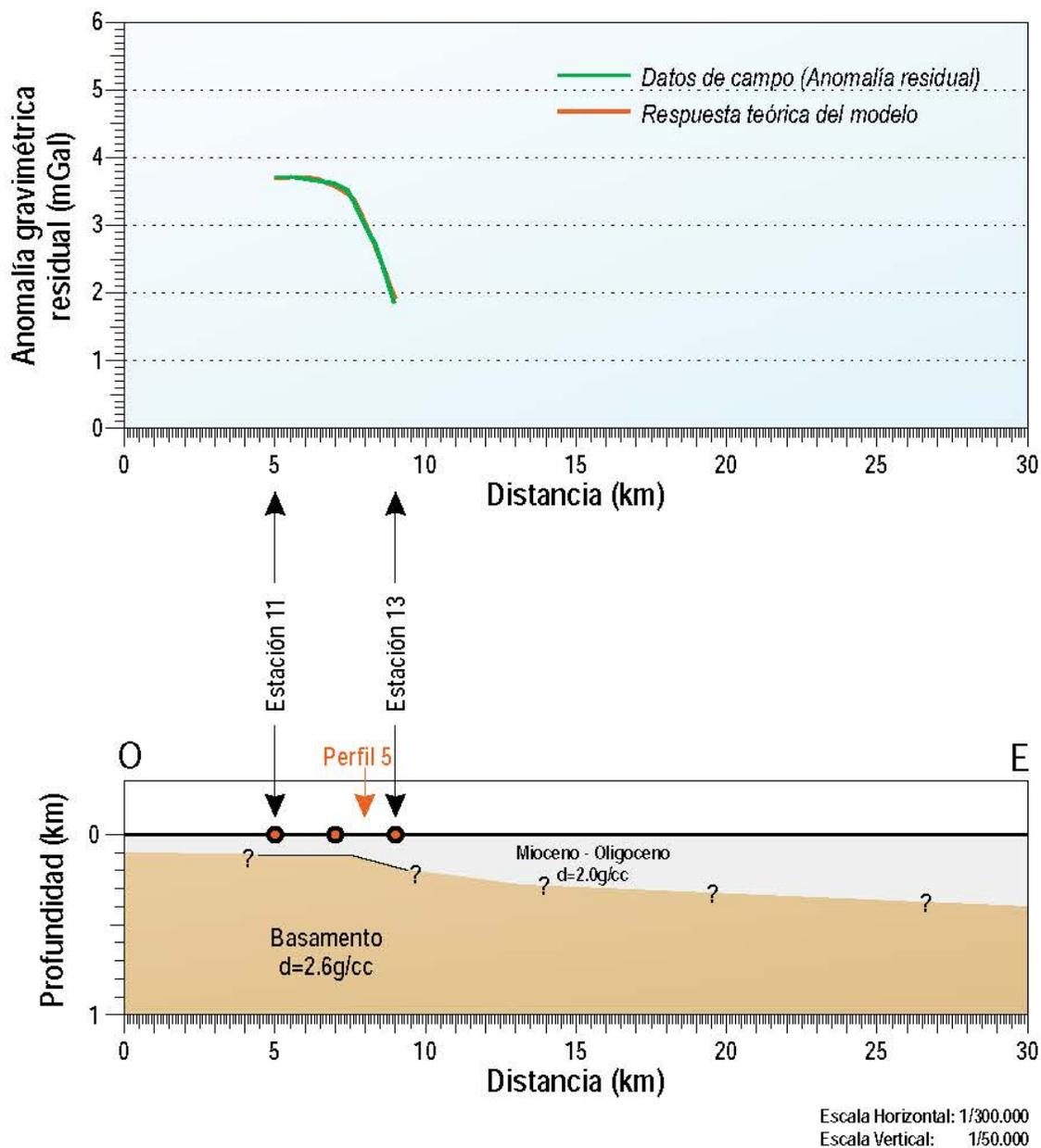


Figura 3-17. Perfil gravimétrico 8. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 9

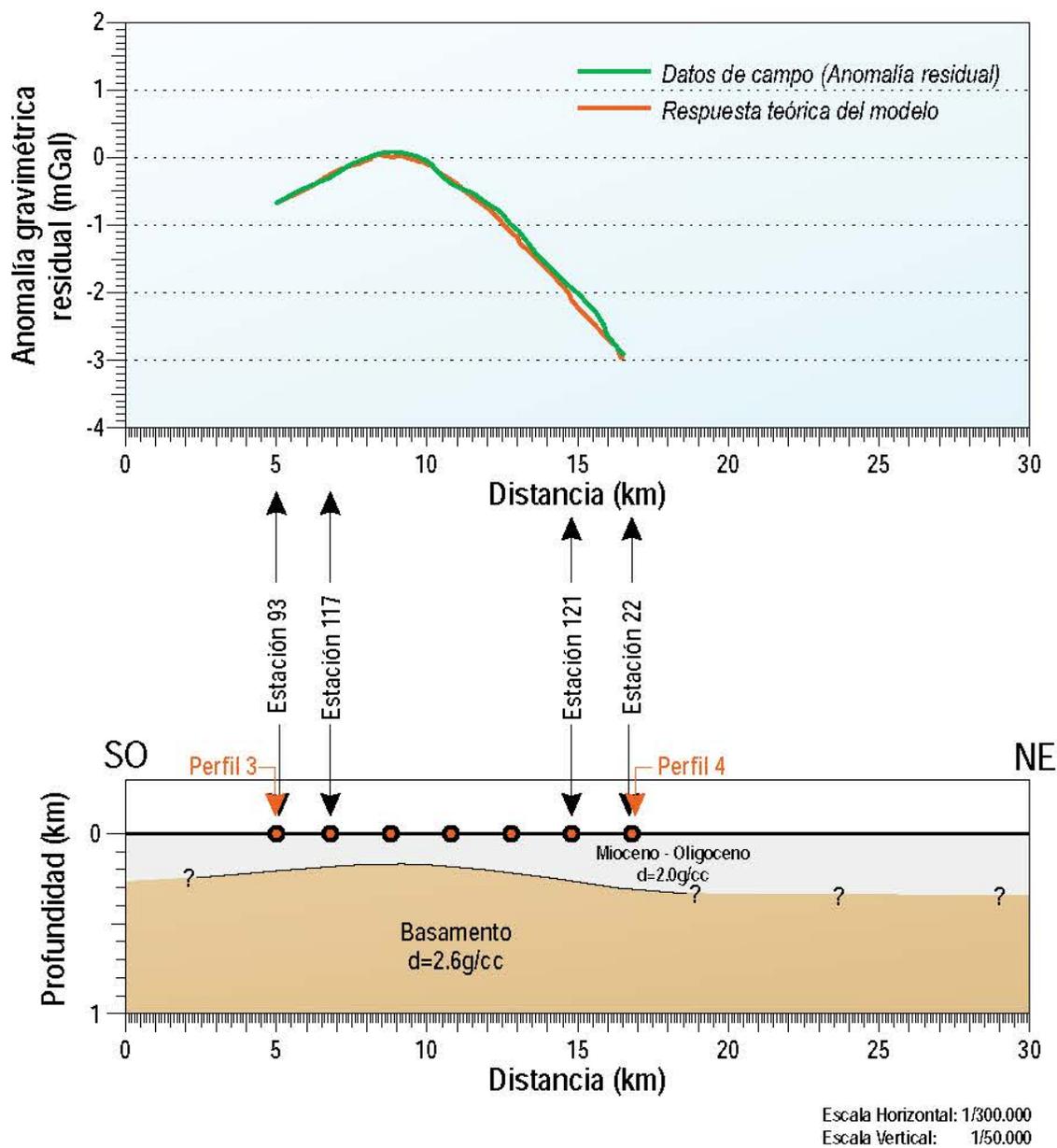


Figura 3-18. Perfil gravimétrico 9. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 10

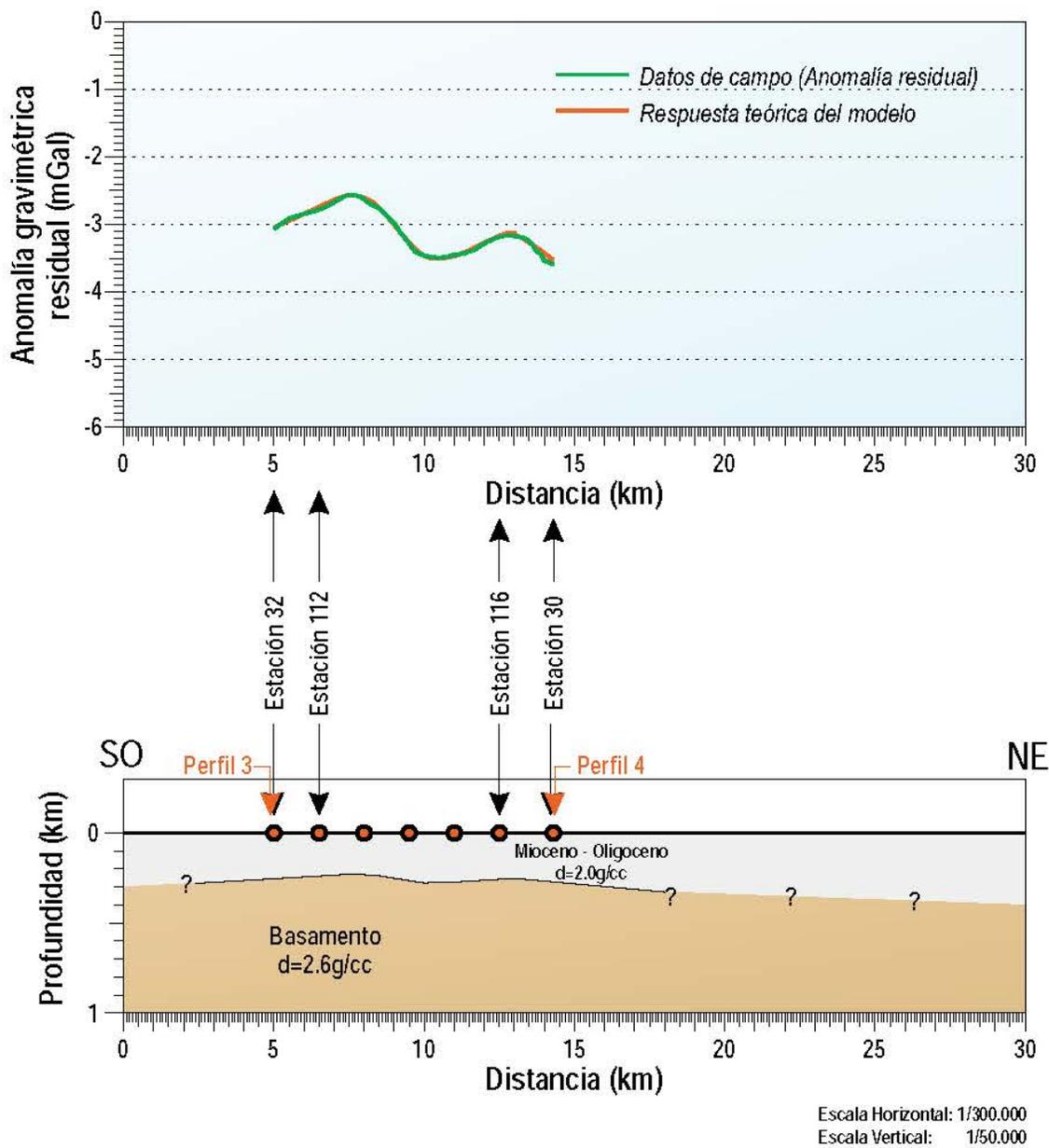


Figura 3-19. Perfil gravimétrico 10. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 11

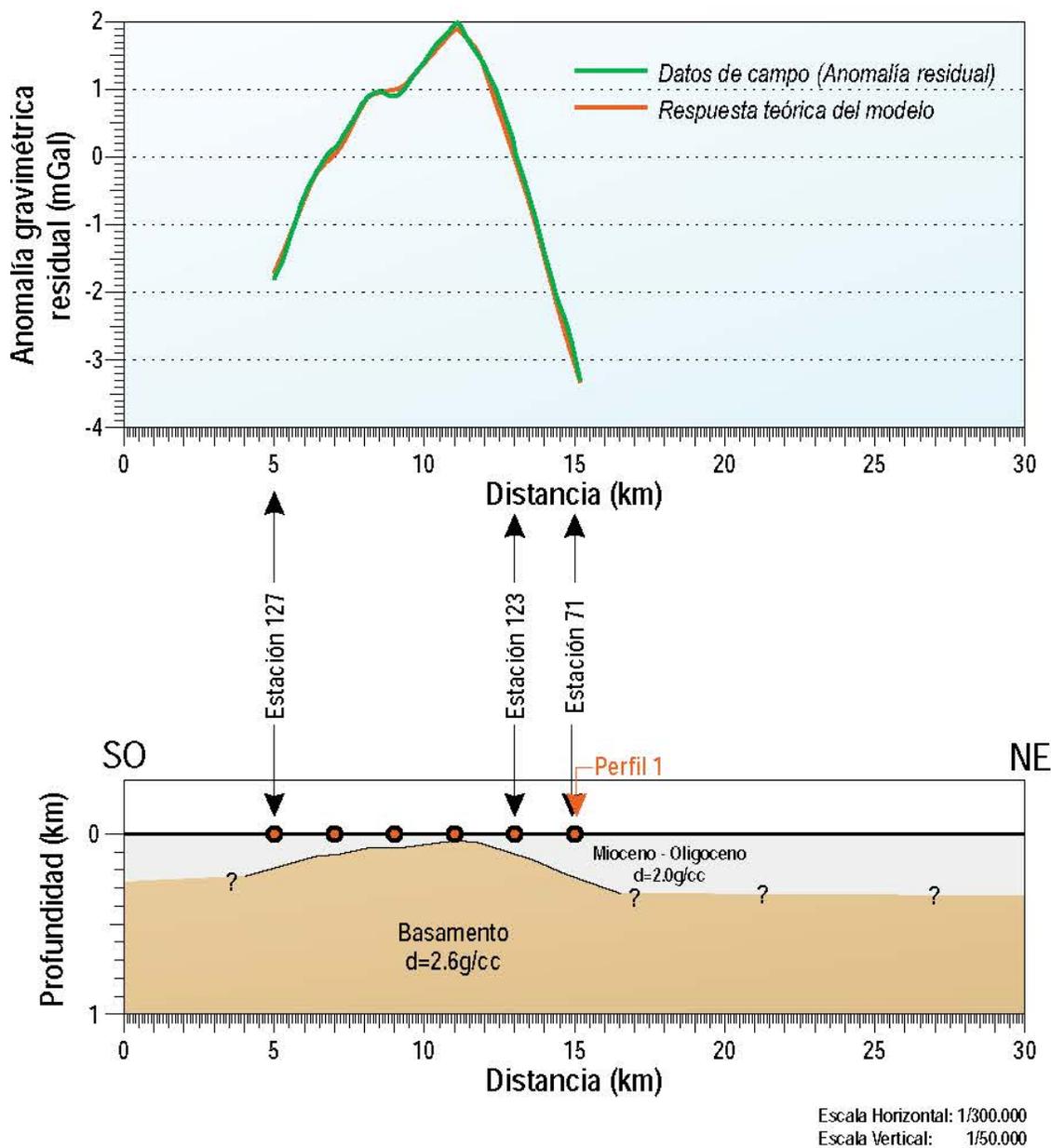


Figura 3-20. Perfil gravimétrico 11. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 12

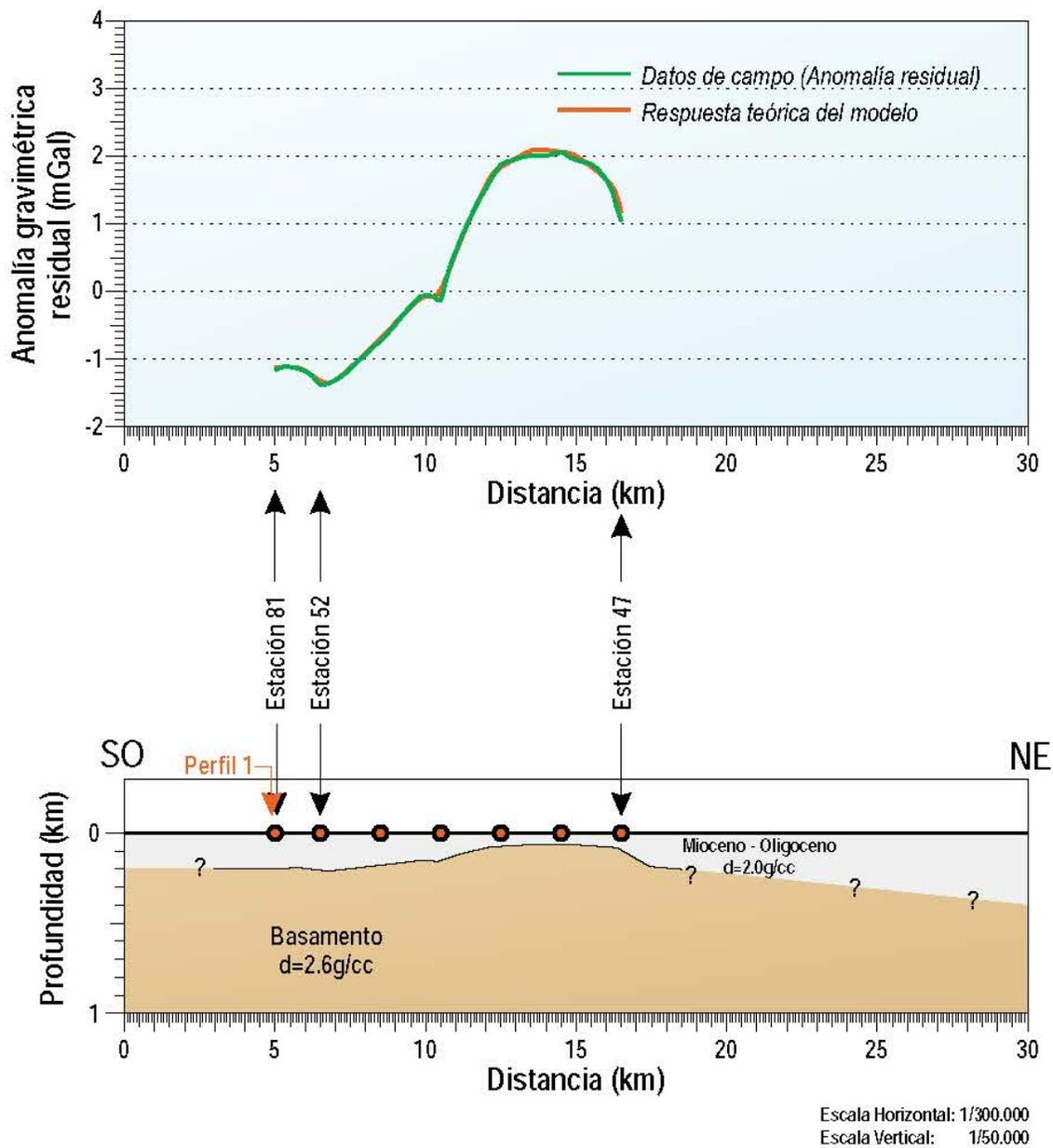


Figura 3-21. Perfil gravimétrico 12. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 13

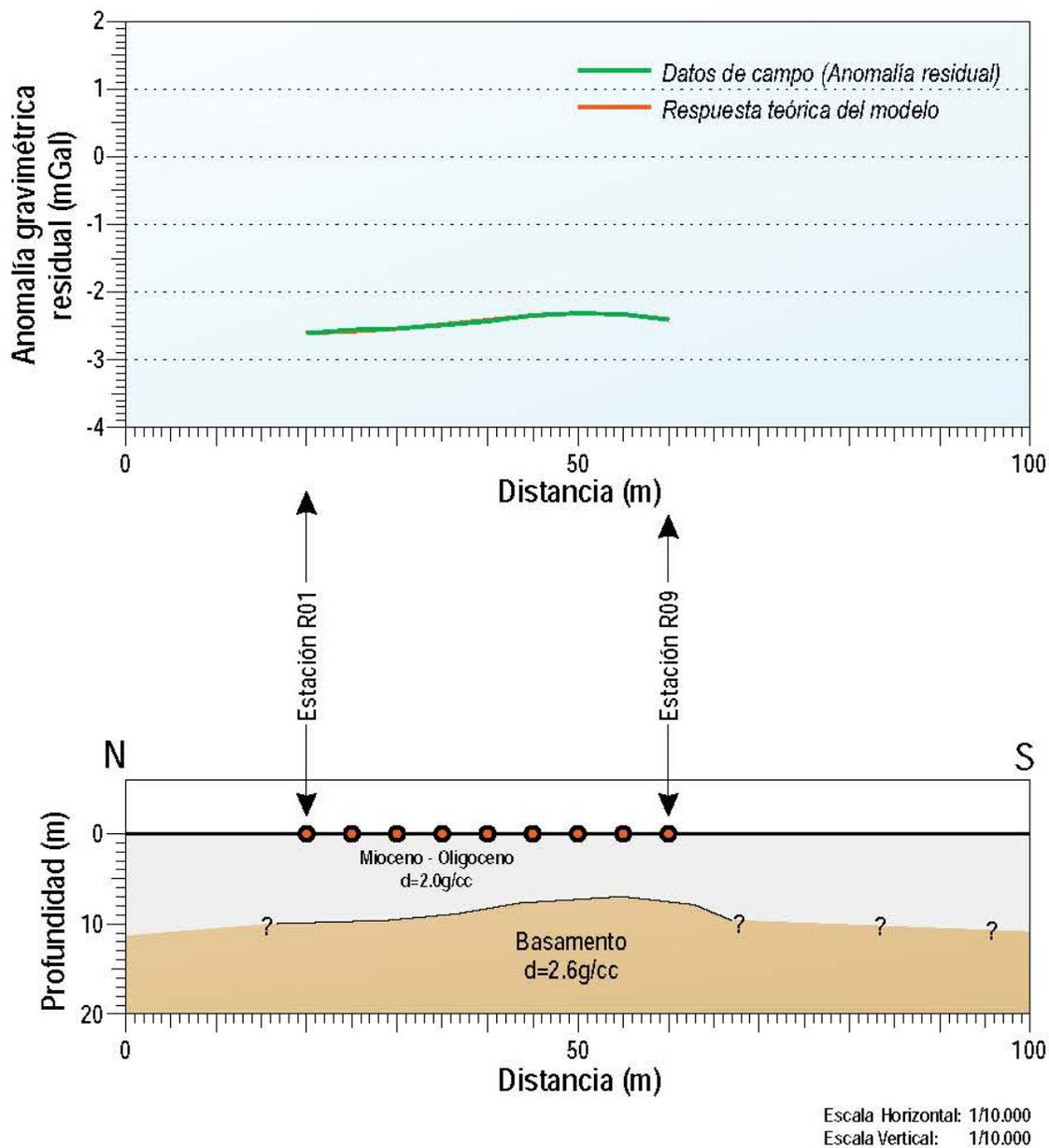


Figura 3-22. Perfil gravimétrico 13. (Fuente: IGT S.L.).

Perfil 14

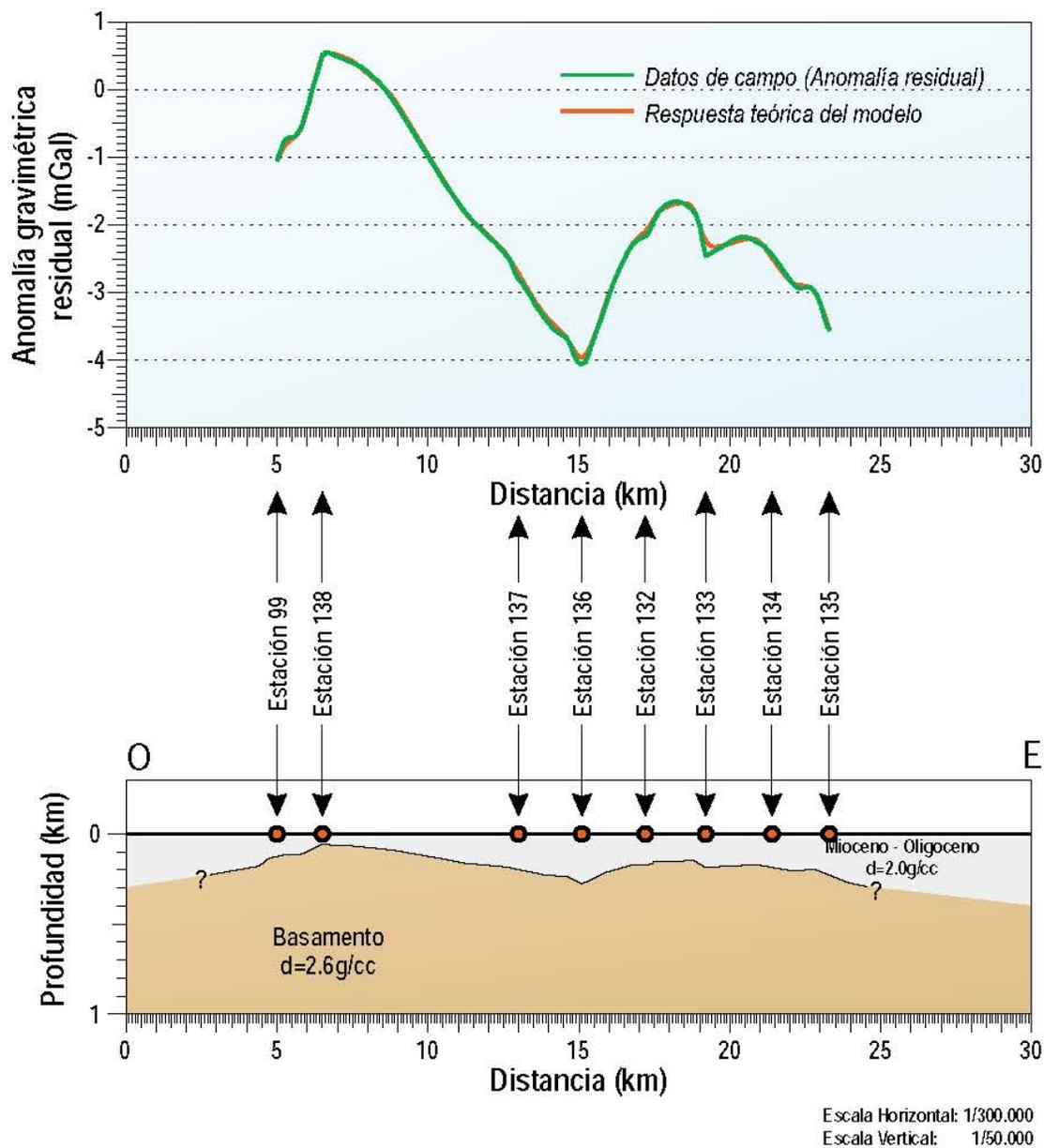


Figura 3-23. Perfil gravimétrico 14. (Fuente: IGT S.L.).

En la siguiente **Tabla 3-2** se muestran los resultados obtenidos en los 112 puntos, donde se pueden observar los valores de las coordenadas este y norte del Datum WGS 84, cota del terreno del punto de ensayo, perfil al que pertenece el punto y cota del basamento o sustrato rocoso.

Estación	X	Y	Cota Terreno(msnm)	Perfil	Cota basamento(msnm)
1	540955.18	7545818.51	2772.93	4	2618.93
2	541926.97	7547554.24	2824.32	5	2597.52
3	541793	7549617.91	2865.55	5	2615.35
4	541795.93	7551615.28	2899.39	5	2631.39
5	541794.26	7553619.02	2941.19	5	2648.64
6	541797.99	7555620.17	2964.51	5	2768.91
7	541795.2	7557618.55	2993.51	5	2740.56
8	541825.93	7559631.21	3012.46	5	2798.81
9	541828.99	7561636.8	3024.16	5	2846.76
10	541744.86	7563551.37	3039.98	5	3039.98
11	538846.92	7562949.34	3016.29	8	2904.49
12	540849	7562872.41	3014.73	8	2898.73
13	542844.42	7562857.67	3068.3	8	2888.5
14	535328.71	7533669.19	2631.28	5	2431.28
15	536171.32	7535485.55	2654.04	5	2485.29
16	537015.09	7537297.36	2674.9	5	2524.35
17	537856.45	7539112.78	2693.88	5	2541.68
18	538704.22	7540919.64	2715.53	5	2575.28
19	539551.25	7542736.54	2737.99	5	2597.74
20	540392.47	7544547.37	2753.75	5	2597.3
22	546824.45	7537796.18	2699.46	4	2415.66
23	545641.14	7539409.84	2713.52	4	2448.02
24	544449.3	7541023.47	2725.18	4	2437.48
25	543266.62	7542630.17	2749.85	4	2387.85
26	542083.54	7544241.26	2766.44	4	2582.44
27	548009.65	7536186.01	2671.62	4	2382.37
28	548678.12	7534306.28	2636.27	4	2379.27
29	548908.95	7532510.39	2616.43	4	2329.13
30	550035.55	7530539.51	2613.16	4	2337.66
31	540024.77	7528277.81	2552.73	3	2302.83
32	541617.76	7527063.81	2574.47	3	2304.47
33	545079.09	7525293.61	2567.56	3	2267.56
34	547053.7	7524983.74	2586.92	3	2268.92

Estación	X	Y	Cota Terreno(msnm)	Perfil	Cota basamento(msnm)
35	549031.52	7524673.49	2616.9	3	2347.75
36	551011.95	7524412.76	2651.56	3	2609.56
37	552996.19	7524193.43	2691.33	3	2648.93
38	543548.16	7525517.95	2558.43	3	2306.58
47	544927.05	7507692.14	2709.01	12	2614.66
48	544566.36	7505722.95	2718.37	12	2654.82
49	544208.28	7503758.25	2734.95	12	2662.25
50	543842.92	7501791.56	2755.16	12	2602.96
51	543482.88	7499821.28	2761.36	12	2583.96
52	543121.43	7497858.07	2778.1	12	2572.45
53	536002.95	7523373.89	2529.14	2	1946.44
54	537716.64	7522288.73	2557.26	2	1901.41
55	539259.96	7521075.15	2544.24	2	1966.24
56	541033.89	7520202.75	2533.55	2	1987.8
57	542849.3	7519350.57	2540.89	2	2054.14
58	544648.71	7518486.43	2555.29	2	1968.24
59	546504.79	7517751.47	2594.26	2	1960.56
60	548377.16	7517048.16	2634.48	2	1907.78
61	550253.42	7516345.18	2678.34	2	1918.44
62	552124.05	7515646.49	2739.41	2	2252.31
71	530196.55	7512266.61	2489.36	1	2249.21
72	531455.92	7510753.6	2502.42	1	2302.17
73	532711.63	7509194.2	2517.83	1	2417.93
74	533957.86	7507639.74	2534.54	1	2450.84
75	535208.48	7506079.47	2556.12	1	2498.77
76	536467.57	7504514.09	2584.54	1	2518.94
77	537714.38	7502952.04	2616.38	1	2550.78
78	538968.97	7501397.37	2650.82	1	2580.22
79	540219.89	7499830.43	2692.49	1	2608.24
80	541462.55	7498267.93	2735.74	1	2610.39
81	542961.86	7496414.88	2792.4	1	2611.7
87	537142.61	7547565.85	2800.42	7	2767.57
88	539140.67	7547557.79	2789.48	7	2704.28
89	541144.13	7547554.94	2809.71	7	2602.51

Estación	X	Y	Cota Terreno(msnm)	Perfil	Cota basamento(msnm)
90	543137.78	7547540.08	2845.1	7	2613.35
91	545138.76	7547516.58	2880.04	7	2621.09
93	537902.61	7530705.47	2538.3	9	2332.15
94	536370.42	7531374.49	2565.66	3	2428.51
99	483725.45	7509892.34	1860.28	14	1733.48
112	543025.06	7527643.05	2569.16	10	2330.56
113	544421.84	7528222.4	2567.89	10	2335.59
114	545826.17	7528799.25	2580.47	10	2316.37
115	547228.06	7529384.04	2581.78	10	2309.68
116	548632.86	7529957.84	2591.85	10	2335.35
117	539390.22	7531387.49	2560.56	9	2377.21
118	540877.6	7532672.4	2590.13	9	2420.83
119	542368.95	7533963.8	2625.94	9	2442.64
120	543849.14	7535233.14	2651.56	9	2432.21
121	545340.82	7536521.49	2682.12	9	2419.52
123	529337.73	7510462.46	2499.08	11	2387.78
124	528479.7	7508658.12	2510.94	11	2475.34
125	527609.92	7506852.46	2529.81	11	2453.06
126	526751.36	7505045.76	2561	11	2447.3
127	525887.6	7503241.02	2609.84	11	2420.69
132	495692.98	7511584.78	2131.32	14	1963.67
133	497505.88	7512286.38	2164.15	14	1978.85
134	499236.53	7513692.58	2197.81	14	2012.51
135	500880.29	7514568.08	2222.64	14	1994.39
136	493739	7510619.46	2084.42	14	1809.97
137	491646.78	7510604.23	2042.15	14	1837.65
138	485205.03	7509999.01	1895.83	14	1837.38
143	535307.95	7535173.08	2648.05	6	2526.95
144	535286.8	7536670.65	2662.83	6	2550.83
145	535262.67	7538176.46	2672.58	6	2553.93
146	535243.15	7539675.77	2686.63	6	2555.68
147	535227.92	7541179.4	2702.37	6	2557.57

Estación	X	Y	Cota Terreno(msnm)	Perfil	Cota basamento(msnm)
148	535206.93	7542671.37	2718.92	6	2574.12
149	535186.19	7544178.98	2735.03	6	2635.43
150	535167.81	7545677	2772.71	6	2730.31
151	535134.98	7547160.11	2837.14	6	2837.14
R01	545474.19	7529912.58	2558.01	13	2548.14
R02	545444.74	7529948.41	2557.36	13	2547.65
R03	545418.86	7529979.9	2556.9	13	2547.4
R04	545391.09	7530013.84	2556.45	13	2547.46
R05	545361.8	7530047.56	2556.05	13	2547.77
R06	545332.04	7530086.85	2556.12	13	2548.53
R07	545303.11	7530113.34	2555.21	13	2547.94
R08	545275.45	7530146.33	2555.64	13	2548.68
R09	545234.51	7530177.19	2562.08	13	2554.51

Tabla 3-2. Resultados de los ensayos gravimétricos.

3.3 Definición de modelo geológico

3.3.1 Gestión de la información

La delimitación del modelo geológico se ha realizado teniendo en cuenta la morfología de la cuenca con un encaje en planta que define una altura y anchura máxima de aproximadamente 80 Km x 70 Km, como se puede apreciar en **la Figura 3-24**. El área del modelo está limitado al Norte por Sierra del Medio y al Sur por la Sierra Limón Verde y atravesada por los Ríos Salado, Loa y San Salvador. El río Loa, nace en la falda norte del volcán Miño y recorre una larga distancia hasta la localidad de Tocopilla, donde se junta por su ribera derecha con el río San Salvador para dirigirse posteriormente hacia el mar. El río Salado es un río tributario del Río Loa.

El desarrollo del modelo geológico considera una gran cantidad de datos, con origen en diversos estudios e informes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona. En particular la información utilizada es:

- Sondeos disponibles de la zona de estudio obtenidos de trabajos anteriores. En resumen se ha contado con 165 sondeos con información litológica sobre unos 262, en los que si bien no existía información litológica de detalle, sí que añaden información sobre los límites y espesores de las diferentes unidades a considerar en el modelo. En la **Figura 3-24** se puede visualizar la distribución de los sondeos utilizados para la definición del modelo geológico. En el **Anexo A.4** se puede ver la localización y la información de partida para cada punto.
- Mapas geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos procedentes de diversos estudios previos.
- Mapa geológico del Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile. Información de geología georeferenciada. Formato digital. Escala 1:1.000.000 (**Anexo A.3**).
- Campaña de campo geofísica realizada en el marco del presente proyecto.
- Modelos geológicos previos tales como el del Tesoro y el de Tranque Talabre obtenidos de los informes "Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa. Calama, Chile" realizado por Montgomery and Associates 2009 y "Modelamiento hidráulico del Tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales" realizado por la empresa Knight Piésold consulting para CODELCO en 2010.

Esta gran cantidad de datos necesita ser homogeneizada, armonizada y digitalizada de una manera coherente y lógica para poder ser gestionada adecuadamente en el proceso de creación de un modelo geológico. Es por ello por lo que la mayoría de los datos disponibles se han introducido en la base de datos geoespacial diseñada para este proyecto (ver **Capítulo VII**). El almacenamiento de los datos en una base de datos de estas características nos permite acceder a ellos de forma unívoca y nos permitirá actualizar el modelo a medida que vayamos disponiendo de nueva información. Además, la visualización conjunta de estos datos en un entorno SIG, nos ha permitido extraer información adicional.

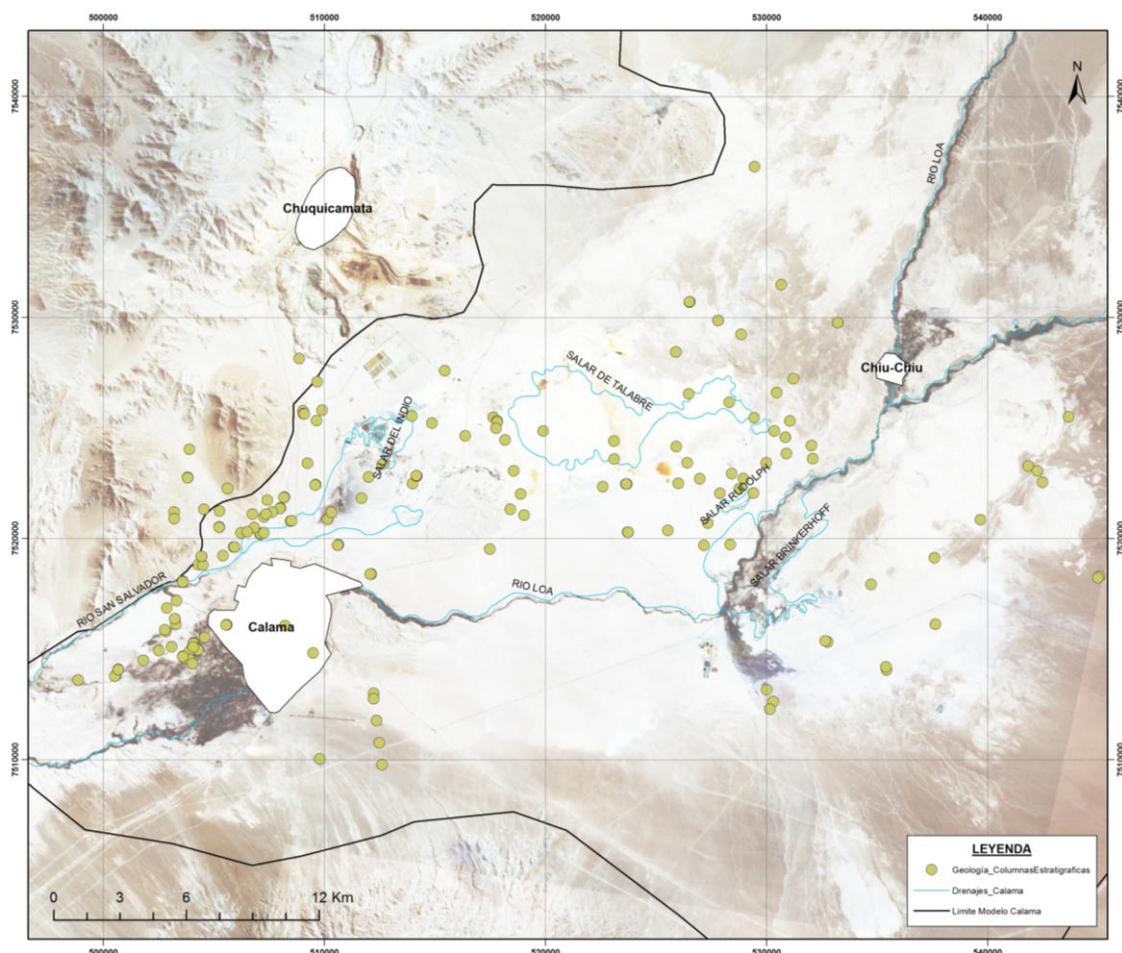


Figura 3-24. Puntos con información geológica y litológica disponible. Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Modelo geológico 3D

El análisis e interpretación del modelo geológico 3D se realiza con herramientas de gestión geológica para ArcGIS (ESRI) desarrollado el grupo de hidrología subterránea (UPC-CSIC).

Estas herramientas, permiten proceder a la creación del modelo geológico de detalle, gestionar y visualizar la información necesaria y obtener interpretaciones de la geometría, en términos geológicos, de la cuenca.

En base a la información proporcionada por los sondeos y otra información relevante en el análisis geológico e hidrogeológico de información existente, se establecen las siguientes unidades a modelar:

- Acuífero superficial
- Acuitardo
- Acuífero profundo
- Basamento.

La correlación de estas unidades con las diversas unidades geológicas definidas en el capítulo anterior, así como sus propiedades se puede ver con mayor detalle en el **Capítulo IV** del presente documento.

Una interpretación previa de dichas unidades ha sido definida para cada uno de los sondeos que contaba con descripción litológica y ha sido introducida en la base de datos, junto con otras interpretaciones aportadas por los antecedentes basadas en la misma clasificación (**Figura 3-26 y Tabla 3-3**).

En la **Tabla 3-3** se presenta un resumen cuantitativo de los diferentes puntos usados en la realización del modelo geológico con la información cualitativa general obtenida. En el **Anexo A6** se presentan las características en detalle de los sondeos así como la profundidad de la base de las diferentes unidades aportadas de cada uno de ellos, obtenidas tanto por estudios anteriores como por análisis previos a la realización del modelo realizados en el marco de este proyecto.

Puntos Totales	Puntos con información de la Base Acuífero Superficial	Puntos con información de la Base del Acuitardo	Puntos con información de la Base del Acuífero Profundo	Puntos con información del Basamento
419	347	367	304	137

Tabla 3-3. Resumen de los puntos con información geológica y/o litológica en la cuenca de estudio. (Fuente:Elaboración propia)

3.3.3 Desarrollo de perfiles estratigráficos

Se han realizado 6 cortes longitudinales y 9 cortes transversales, tal y como se observa en la **Figura 3-25** que cubren toda la zona con información disponible. Además se han realizado 4 perfiles auxiliares en los que se ha usado la información aportada por el mapa geológico y por los datos de gravimetría.

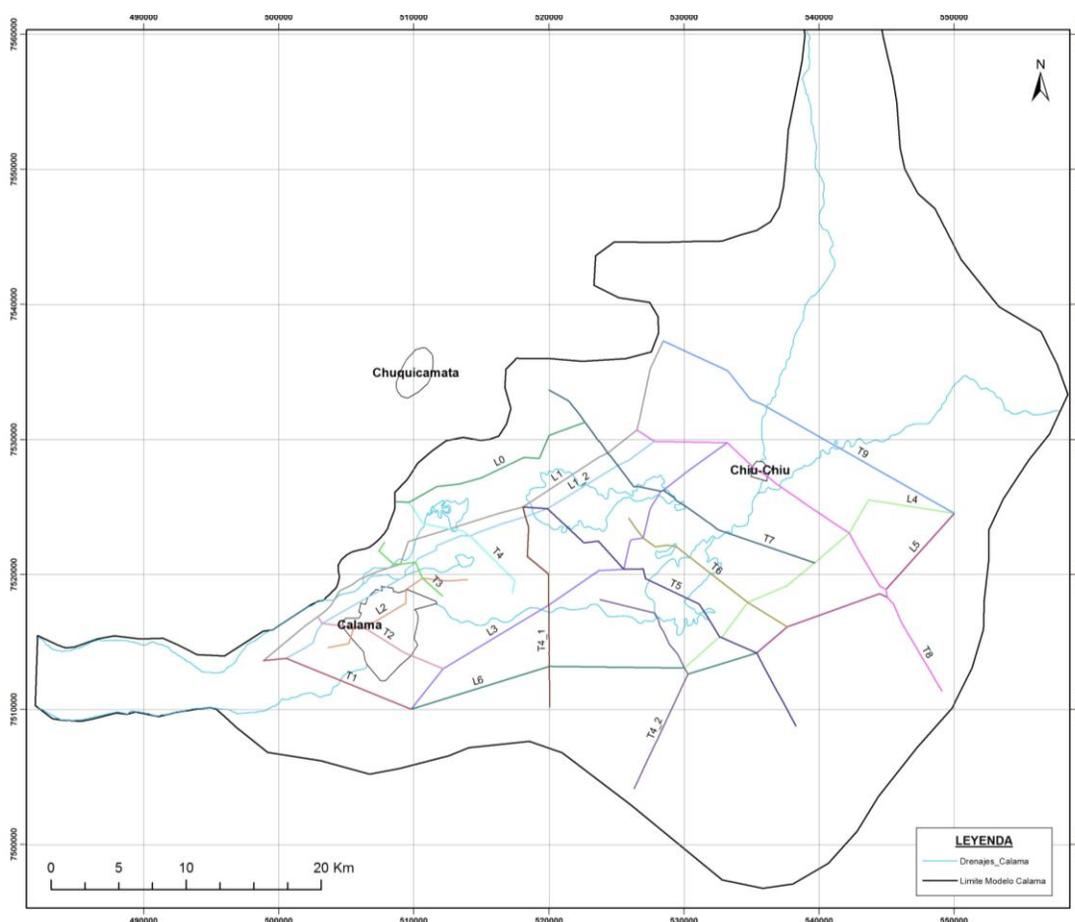


Figura 3-25. Distribución de los cortes geológicos. Fuente: elaboración propia.

En los perfiles se puede visualizar las diversas columnas estratigráficas, así como la interpretación previa de los mismos. Información adicional como la superficie topográfica,

los afloramientos y la distancia real entre los sondeos también puede ser visualizada. Finalmente también ha sido incluida en los perfiles la superficie del basamento inferida a partir de los estudios gravimétricos de la campaña gravimétrica desarrollada durante el presente proyecto, y los datos aportados por los modelos del Tesoro y Tanque Talabre.

En los perfiles se han correlacionado los límites de las diferentes unidades geológicas (geometrías/limites) entre cada uno de los sondeos incluidos en el modelo. En la **Figura 3-27** se puede ver un ejemplo de perfil en el que se visualizan las diferentes unidades definidas en el modelo. En el **Anexo A.2** y en el **Anexo A.6** se puede ver con más detalle cada uno de los perfiles interpretados para el modelo geológico.

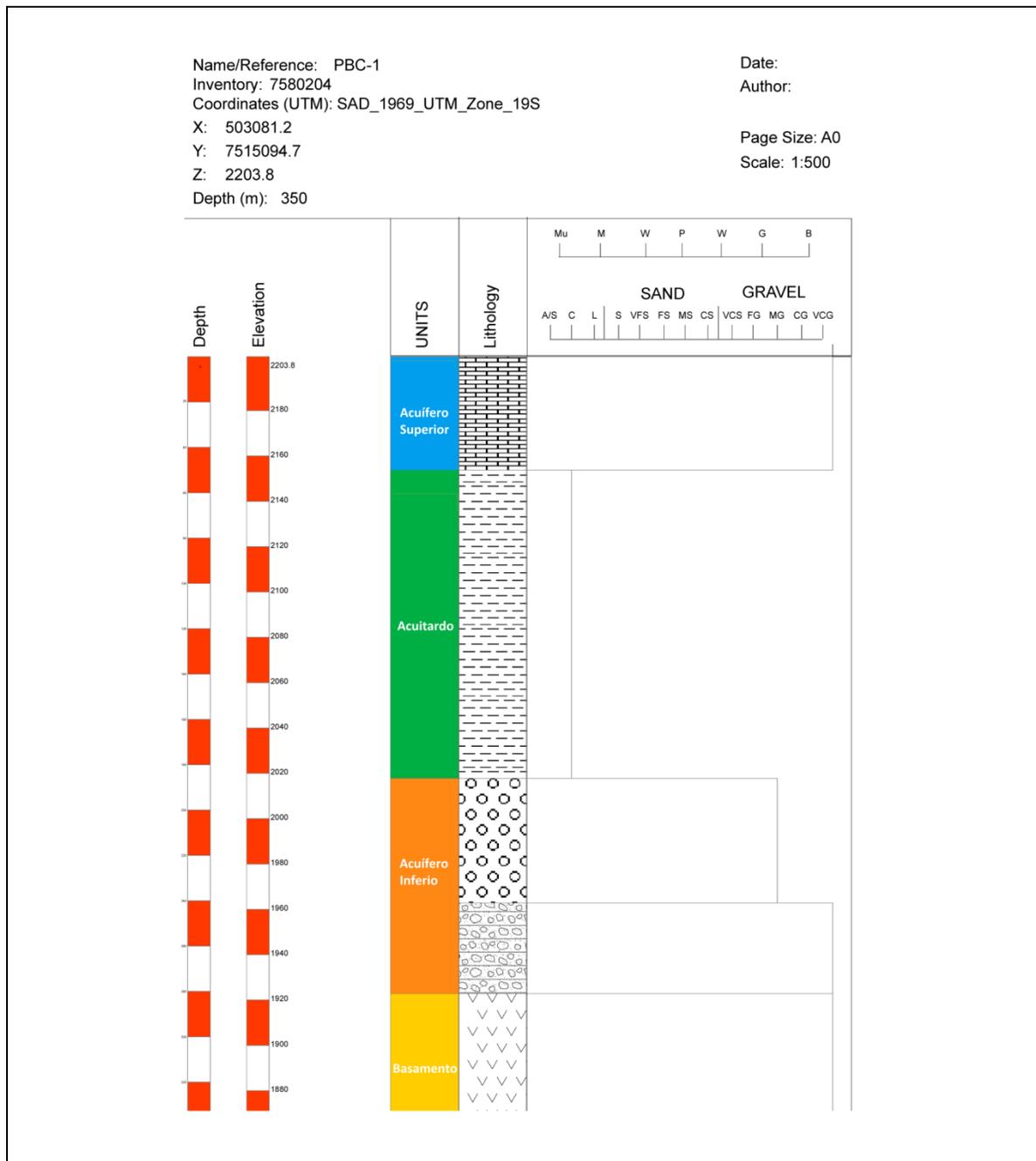


Figura 3-26. Columna estratigráfica simplificada obtenida mediante la herramienta de gestión de datos geológicos en ArcGIS en la que se puede visualizar las cuatro unidades descritas en el modelo geológico. Fuente: Elaboración propia.

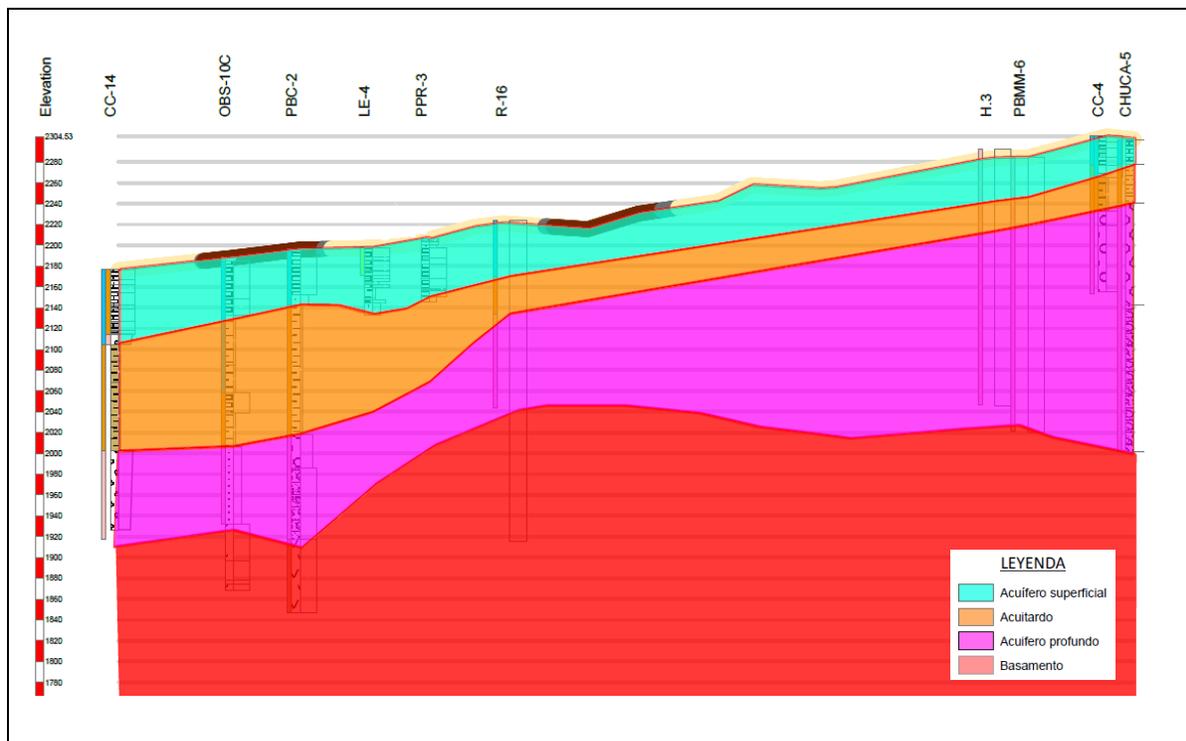


Figura 3-27. Ejemplo de perfil geológico obtenido con las herramientas de gestión geológica para ArcGIS (ESRI) e interpretado para la realización del modelo geológico. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Generación del modelo 3D.

A partir de la digitalización de las superficies de correlación en los perfiles generados con las herramientas, se podrán obtener las superficies completas 3D del techo o de la base de cada una de las unidades definidas en el modelo haciendo uso de técnicas de interpolación incluidas en el programa ArcGIS (ESRI)(ej TIN).

La **Figura 3-28** muestra las diferentes superficies correspondientes con el techo de cada una de las unidades visualizadas en el módulo de visualización 3D ArcScene (ArcGIS;ESRI).

Estas superficies tridimensionales podrán ser exportadas con facilidad al programa de modelación MODFLOW para la realización del modelo hidrogeológico

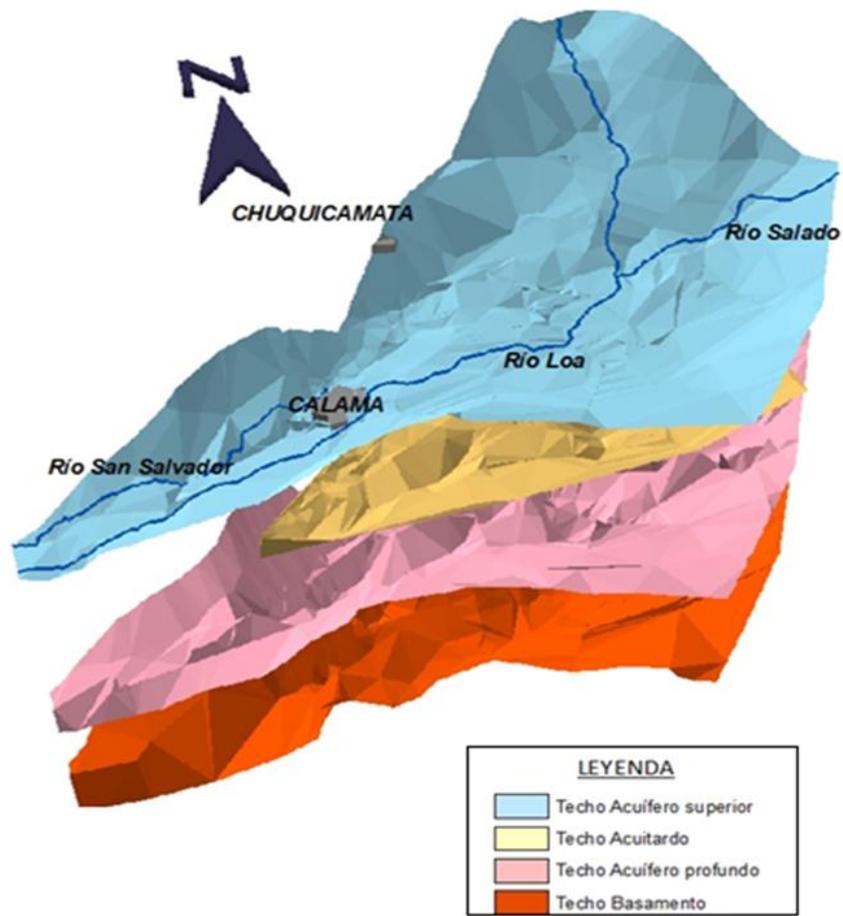


Figura 3-28. Superficies completas 3D del techo de cada una de las unidades definidas en el modelo geológico (Visualizadas en ArcScene; ArcGIS). Fuente: Elaboración propia.

3.4 Conclusiones del modelo geológico 3D

A partir de la correlación de las diversas unidades a lo largo y ancho de la zona de estudio se ha establecido la geometría y la conectividad de las unidades consideradas.

La Unidad Acuífero Superior tiene un espesor que normalmente está comprendido entre los 30 y los 70 m, aunque hay zonas en las que dicho espesor aumenta pudiendo superar los 100m. Esta unidad ocupa en general toda la zona de estudio y en el área central del modelo sobreyace al acuitardo y este a su vez al acuífero Inferior.

La unidad Acuitardo solo se presenta en la parte central del modelo y su espesor varía normalmente entre los 80 y los 100 m. Si bien esta unidad puede alcanzar valores superiores a los 200 m en algunas zonas del modelo sobre todo si nos basamos en interpretaciones proporcionadas por estudios anteriores (véase **perfil L2** y **perfil T4_2**).

La unidad Acuífero Inferior está presente en toda la zona del modelo y alcanza normalmente potencias entre los 30 y los 100 m, pero puede superar los 300 m de profundidad sobre todo en zonas de la parte central. Además basándonos en datos proporcionados por estudios anteriores y por estudios de geofísica, se interpreta que existen zonas donde el acuífero profundo puede alcanzar hasta los 400 m de profundidad. Generalmente esta unidad se dispone entre la unidad Acuitardo y Basamento, aunque hacia los bordes de la zona del modelo, se dispone entre la unidad Acuífero Superior y Basamento. Además y tal como se puede visualizar en el perfil T4, en esta zona del modelo el Acuífero Superior tiene potencia nula o casi nula por lo que el Acuífero Inferior afloraría.

El nivel de detalle que se ha alcanzado con el modelo ha venido determinado por los objetivos del presente proyecto, si bien el presente modelo integra de una manera efectiva la información disponible convirtiéndose de este modo en un marco óptimo para el desarrollo de futuros modelos y actualizaciones.

4. Descripción hidrogeológica

En este capítulo se realiza una descripción desde el punto de vista hidrogeológico de las unidades subsuperficiales, incluyendo la compilación de los datos piezométricos y de los parámetros hidráulicos que gobiernan los sistemas acuíferos de la cuenca de Calama. En cada uno de los subapartados se realiza un resumen de la información existente con mención a las fuentes de procedencia de la información.

4.1 Unidades hidrogeológicas

Entre los materiales detríticos depositados en la cuenca directamente sobre el basamento, se pueden identificar 3 unidades acuíferas principales.

Se define un primer acuífero superior anidado en calizas y areniscas con un espesor variable (30 a 60 metros), separado por una formación de arcilla y limos de potencia variable (entre 80 y 150 metros) definiendo un acuitardo situado por encima de un acuífero inferior, el cual se encuentra anidado en gravas y con una potencia de entre 30 y 130 metros.

Esta descripción hidrogeológica general ha sido extraída de 3 fuentes principales, el "*Estudio de modelamiento hidrogeológico de la subcuenca Cluster Toqui para el Proyecto Quetena*" realizado por la empresa Aquaconsult para CODELCO en 2011, el informe "*Modelamiento hidráulico del Tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales*" realizado por la empresa Knight Piésold consulting para CODELCO en 2010 y el informe "*Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa. Calama, Chile*" realizado por Montgomery & Asociados en 2009.

Las 3 unidades acuíferas principales descritas se componen en realidad de 6 unidades hidrogeológicas de entre las que se han definido dentro de la extensa zona de estudio. A continuación se exponen las diferentes características de éstas:

- UH-1 Depósitos aluvio-evaporíticos Plio-Pleistocenos.

Esta unidad está formada por una subunidad de depósitos parcialmente saturados compuesta por depósitos no consolidados de gravas, arenas y depósitos limo-

arenosos (UH-1a) y por una segunda subunidad constituida por la formación Chiu Chiu y por rellenos clásticos-salinos de salares (UH-1b).

En el sector Quetena, esta unidad hidrogeológica no presenta saturación continua; sin embargo, localmente permite flujos pasantes de recarga.

- UH-2 Acuífero Superior kárstico-detritico El Loa.

Formado por tres subunidades, la UH-2a, formada por rocas kárstico-arenosas de permeabilidad media-alta, la subunidad UH-2b, constituida por depósitos limo-arcillosos de permeabilidad baja y la unidad UH-2c formada por depósitos de arenas negras de permeabilidad alta.

En la subunidad UH-2a la secuencia está formada por rocas carbonatadas y detriticas pertenecientes principalmente a la Formación Opache, pero también a la parte superior de la Formación Jalquinche y éstas constituyen un acuífero predominantemente libre y de permeabilidad muy variable.

La unidad UH-2b tiene una presencia muy inferior a la subunidad predominante UH-2a y corresponde a depósitos finos. Éstos han sido interceptados durante la construcción de los pozos situados en los sectores noreste y sureste del Tranque Talabre. Los depósitos que constituyen esta subunidad hidrogeológica también afloran en el área sudeste del Tranque y aparentemente se vincula con la subunidad geológica UG-6a (secuencia inferior clástica-fina) de la Formación Opache.

Finalmente la unidad UH-2c corresponde a depósitos detriticos, con una presencia importante en la fracción arenosa.

La potencia de la subunidad UH-2a ha sido verificada entre los 30 m y los 130 m, siendo el rango más habitual 30-70 m. Se trata de una subunidad relativamente homogénea. En el sector inmediatamente al poniente del muro oeste del Tranque Talabre, varios pozos registran espesores de sólo 10 m.

En aquellos sectores donde se describe la subunidad UH-2b, se registra una columna de acuífero superior de hasta 200 metros. Hacia el sureste del Tranque Talabre se produce un aumento de carácter regional del espesor de la unidad, desde un promedio de 40 metros a más de 100 metros.

- UH-3 Acuitardo ignimbrítico

Por su cercanía, el acuitardo ignimbrítico definido para la cuenca se correlaciona con la unidad geológica correspondiente a las ignimbritas Artola, que se disponen sobre los depósitos limo-arcillosos del acuitardo detrítico del Loa.

Esta unidad hidrogeológica se extiende ampliamente en el sector Quetena y su potencia (verificada en los pozos de la campaña de 2011) varía entre los 1 m y los más de 50 m en algunas zonas. Dependiendo de su disposición estratigráfica, se interpreta que su presencia puede generar una condición de confinamiento a semiconfinamiento en el acuífero inferior.

- UH-4 Acuitardo detrítico El Loa.

Unidad formada esencialmente por estratos limo-arcillosos. Está conformada por tres subunidades definidas como UH-4a, depósitos limo-arcillosos de baja permeabilidad. La UH-4b, compuesta por depósitos arenosos de permeabilidad media-alta y la UH-4c, compuesta por lavas volcánicas de baja permeabilidad. Probablemente esta unidad se relaciona con las formaciones Jalquinche, Lasana, Chiquinaputo y posiblemente con una sección inferior de la formación Opache, también compuesta por una secuencia de limos y arcillas.

Esta unidad hidrogeológica posee una extensa presencia en la cuenca de Calama, con espesores que varían entre los 50 y los 100 m, y puntualmente de hasta 300 m. Hidráulicamente, se trata de una capa confinante respecto al acuífero subyacente.

- UH-5 Acuífero Inferior de gravas.

Corresponde a una unidad hidrogeológica saturada, constituida por la formación Calama y secundariamente por depósitos no consolidados pertenecientes a gravas aluviales antiguas de origen exógeno, depósitos de piedemonte y depósitos aluviales (UH-5a). Paralelamente también existe la subunidad UH-5b formada por depósitos limo-arcillosos. Se dispone en su mayor parte bajo los acuitardos ignimbrítico y detrítico, presentando un comportamiento hidráulico entre semiconfinado y confinado. Sin embargo, en la sección alta de la Hoya Quetena se presenta libre de confinamiento debido a la ausencia de ambos acuitardos; esto ocurre en el área del proyecto Rajo Quetena. La potencia de este acuífero varía

entre los 0 y 200 metros, y localmente se han registrado potencias de hasta 300 metros.

- UH-6 Basamento.

Es una unidad formada por rocas pertenecientes a la unidad geológica UG-1, constituida tanto por rocas intrusivas y metamórficas como, en menor medida, por rocas volcánicas y sedimentarias.

El flujo subterráneo general a través de esta unidad es considerado como despreciable debido a su baja conductividad hidráulica promedio. Sin embargo, sectores del macizo de rocas pertenecientes al basamento pueden presentar conductividades hidráulicas importantes, provocadas por procesos de fracturamiento y alteración de las rocas, modificando sus condiciones primarias.

En la **Figura 4-1** se observa la correlación existente entre las diferentes unidades geológicas e hidrogeológicas:

		Edad (Ma)	Unidad geológica	Unidad hidrogeológica	Comportamiento hidráulico
Plioceno	PI	5	Fm. Chiu-Chiu (UG-7)	UH-1a UH-1b	Cobertura cuaternaria
	BA		Fm. Opache (UG-6)	UH-2a UH-2b/UH-2c	Acuífero superficial
Mioceno	A	10	Fm. Chiquinaputo (UG-5)	UH-3	Acuitardo ignimbrítico
	M		Fm. Jalquinche (UG-3)	UH-2a UH-2	Acuitardo
	B		Fm. Lassana (UG-4)	UH-4b UH-4a	
Oligoceno	A	25	Fm. Calama (UG-2)	UH-5a	Acuífero profundo
	M			UH-5b	
	M			UH-5	
Eoceno	A	45	Fm. Calama (UG-2)	UH-4c	Acuitardo
	M			UH-4	
Pre-Terciario	B	50		UH-6	Basamento

Figura 4-1. Correlación entre las unidades geológicas e hidrogeológicas (Fuente: elaboración propia a partir del informe de Knight Piésold, 2010).

Ésta correlación en términos hidrogeológicos, y para el general de la cuenca, se ha realizado fruto del análisis previo de la información existente referente a las diferentes descripciones en detalle de las unidades geológicas e hidrogeológicas de la zona, procedente de los informes de Knight Piésold, 2010 (Modelamiento hidráulico del Tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales) y Aquaconsult, 2011 (Modelamiento hidrogeológico Subcuenca Cluster Toki para Proyecto Quetena). En ella se relacionan las formaciones geológicas con las diferentes unidades hidrogeológicas producto de un ejercicio para facilitar la comprensión de las descripciones en texto.

Cada unidad hidrogeológica definida anteriormente, tiene unas características hidráulicas particulares, y éstas están definidas por los parámetros hidráulicos que son

característicos de cada unidad. En el sub-capítulo siguiente, se describen de forma cuantitativa y cualitativa, estos parámetros característicos.

4.2 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas definidas anteriormente surgen de los trabajos realizados en campañas de perforaciones y ensayos durante los años 2008 y 2009 y previas a 2008 realizados por Knight Piésold y Aguas Yalqui, y la recopilación bibliográfica en este estudio de los trabajos de CPH Consultores (2005), División CODELCO Norte (2005), Ingeorec (2004) y GP Consultores (2006) y Nazca (2002). Paralelamente también se han obtenido parámetros hidráulicos del estudio "*Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos*" realizado por Dictuc en 2005, el informe "*Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa. Calama, Chile*" realizado por Montgomery & Asociados en 2009 y el "*Estudio de modelamiento hidrogeológico de la subcuenca Cluster Toqui para el Proyecto Quetena*" realizado por la empresa Aquaconsult para CODELCO en 2011.

En el conjunto de estos estudios se han obteniendo los valores de K (conductividad hidráulica) y S (coeficiente de almacenamiento). Los resultados de los diferentes ensayos se encuentran en el **Anexo B1**, que correspondiente a la recopilación de los parámetros hidráulicos obtenidos en diferentes puntos de observación, extraído del conjunto de estudios referenciados.

4.2.1 Conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica surgen a partir de diferentes ensayos realizados, correspondientes a 86 ensayos de bombeo, 44 ensayos de recuperación, 37 ensayos Lefranc, 23 ensayos Slug y 15 ensayos Packer.

En resumen, se dispone de datos de K (conductividad hidráulica) para 115 pozos habilitados en el acuífero superior, 5 pozos habilitados en el acuitardo y 85 pozos en el acuífero inferior, sumando un total de 205 pozos. Los rangos de los valores de K (conductividad hidráulica) de los acuíferos principales son para el acuífero inferior de 0.01 a 120 m/día y para el acuífero superior de 0.0015 a 309 m/día. (**Tabla 4-1**).

Unidades hidrogeológicas		Permeabilidad	
		Cuantitativa (m/d)	Cualitativa
Acuífero superior	Cobertura aluvial (UH-1a)	$1 \times 10^{+02}$ a 1×10^{-01}	Alta a media
	Cobertura detrítico-evaporítica (UH-1b)	$1 \times 10^{+02}$ a 1×10^{-03}	Alta a baja
	Calizas (UH-2a)	$1 \times 10^{+01}$ a 1×10^{-02}	Alta a media
	Depósitos limo-arcillosos (UH-2b)	1×10^{-01} a 1×10^{-03}	Media a baja
	Depósitos de arenas negras (UH-2c)	$3 \times 10^{+02}$ a 1×10^{-02}	Alta a media
Acuitardo	Acuitardo ignimbrítico (UH-3)	1×10^{-06}	Muy baja
	Acuitardo detrítico (UH-4)	$< 5 \times 10^{-03}$	Baja
Acuífero inferior	Depósitos de gravas (UH-5a)	$1 \times 10^{+02}$ a 5×10^{-02}	Alta a media
	Depósitos limo-arcillosos (UH-5b)	1×10^{-03} a 1×10^{-05}	Baja a muy baja
Basamento	Basamento (UH-6)	1×10^{-05} a 1×10^{-09}	Muy baja

Tabla 4-1. Valores cuantitativos y cualitativos de permeabilidad en las unidades hidrogeológicas.

4.2.2 Coeficiente de almacenamiento

Los valores de coeficiente de almacenamiento (S) fueron recopilados por los estudios citados anteriormente, aunque el número de datos es sustancialmente inferior a los obtenidos para la permeabilidad hidráulica.

Se han resumido los valores de S para cada una de las unidades hidrogeológicas definidas como acuíferos. Se han recopilado un total de 35 datos, de los cuales 21 pertenecen al acuífero inferior y 14 al acuífero superior, y se resumen la **Tabla 4-2**.

En el caso del acuífero superior (UH-1a-UH-1b-UH-2a-UH-2b-UH-2c), los 14 datos registrados se encuentran en el rango de $1,2 \times 10^{-4}$ a $1,6 \times 10^{-2}$. Aunque hay valores característicos de un alto grado de confinamiento, en general éstos son mayores que los del acuífero inferior.

En el caso del acuífero inferior (UH-5a-UH5b), de los 21 pozos de los cuales se ha obtenido éste parámetro, éstos presentan unos valores que van desde los 3×10^{-5} a $6,9 \times 10^{-1}$. De total de los valores, 16 de ellos se sitúan en el orden de 10^{-5} a 10^{-3} , los cuales son característicos de condiciones hidráulicas de marcado confinamiento. Por el otro lado, los 5 puntos restantes presentan valores de 10^{-2} a 10^{-1} , que representan valores característicos de poco confinamiento.

Unidades hidrogeológicas	Coeficiente de almacenamiento	
	Cuantitativa	Cualitativa
Acuífero superior	$1,2 \times 10^{-04}$ a $1,6 \times 10^{-02}$	Alto a moderado confinamiento
Acuífero inferior	3×10^{-05} a 3×10^{-01}	Alto a nulo confinamiento

Tabla 4-2. Valores cuantitativos y cualitativos de almacenamiento en las unidades hidrogeológicas.

4.3 Piezometría representativa del sistema

La dirección y velocidad de los flujos de agua en el terreno está fuertemente controlados por el gradiente de los niveles hidráulicos entre los puntos. En función de la separación entre isopiezas se calcula el gradiente hidráulico, entendido como la diferencia de nivel piezométrico entre dos puntos de un acuífero relacionada con la distancia entre ambos. Las velocidades de los flujos determinarán la interacción entre el agua y el medio poroso que atraviesa, tiempos de residencia y con ello, la calidad química de la misma.

Hay que tener en cuenta que los mapas de piezometría representan el estado de las cargas hidráulicas en un determinado espacio de tiempo. A lo largo del tiempo, los niveles pueden llegar a variar varios metros dependiendo de la época del año, de las condiciones de explotación, y de episodios climatológicos relevantes entre otros. De esta forma, la huella de episodios especialmente lluviosos o secos se propaga en el acuífero en función de las características del mismo (longitud, estructura, parámetros hidráulicos...).

Para definir una piezometría representativa de una zona son necesarios gran cantidad de puntos donde se conozca el nivel de las aguas en el acuífero. La mayoría de las veces no se dispone de suficientes puntos de medida directa de los niveles. Para disminuir esta incertidumbre y definir el mapa piezométrico más parecido posible a la realidad se tienen que usar todas las informaciones disponibles que nos permitan deducir a que profundidad se encuentran los niveles. A parte de la profundidad del agua medida en pozos y piezómetros se han utilizado otros recursos indirectos como son la información geológica de las formaciones que integran el acuífero, la estructura de estos, la topografía de superficie, las coordenadas y cotas de lugares donde el acuífero corta esta topografía (nacimiento de ríos y arroyos, lagos alimentados con agua subterránea,...) los puntos con

extracciones continuas y controladas y la información referente a parámetros hidroquímicos.

En la **Figura 4-2** y la **Figura 4-4** se presentan los mapas piezométricos del acuífero superficial y del acuífero profundo situados dentro de la zona de estudio para una ventana de tiempo anual. Los niveles de los pozos que se han tenido en cuenta para la realización de ambas piezometrías se han sacado de la bibliografía disponible en los archivos de antecedentes.

En el presente informe no se dispone de suficiente información para la descripción de estos niveles en un periodo de tiempo relativamente corto. Por este motivo, durante la ejecución de la piezometría se han utilizado los registros de todos los pozos del año 2009 debido a que es el período del que se dispone de información más extensamente repartida a lo largo de la zona de estudio. En este sentido, para los pozos que tenían varias mediciones durante ese año, se ha optado por la media aritmética de cada uno de los pozos con más de un dato. De este modo, la piezometría presentada incluye el papel de las eventuales variaciones estacionales.

Se ha obtenido suficiente información referente a los niveles de la zona central del modelo hacia la parte norte, en cambio, en el resto de área hay una ausencia importante de información. La documentación que hace referencia a esta última zona no ha sido de utilidad para el desarrollo de este apartado debido a la ausencia de pozos y de piezómetros ya que está basada en informes basados en reportes de geofísica y geología de superficie. Por este motivo, estas áreas con ausencia de datos pueden ser interpretadas pero difícilmente definidas con certeza.

Acuífero superior

La **Figura 4-2** representa el mapa piezométrico del acuífero superior. Se ha realizado a partir del nivel medio de 61 pozos diferentes, la cota de algunos surgimientos naturales, la cota de los ríos y la relación conocida en determinados sectores entre estos últimos y el acuífero (río perdedor o ganador).

El valor máximo de cota piezométrica varía entre 2600 msnm (metros sobre el nivel del mar) hasta llegar a un valor mínimo de 2150 msnm. En la zona central las isopiezas están más separadas y por lo tanto los gradientes hidráulicos son menores (0,6%). Esta es la zona de los salares centrales, y es muy probable que el mayor distanciamiento de las

líneas piezométricas se deba a un aumento considerable de la sección de paso, producto de una mayor profundización del basamento impermeable producto de la extensión tectónica de la cuenca. Por otro lado, la zona oeste presenta concentración en las líneas piezométricas, con gradientes hidráulicos próximos al 2%. Esto último, produce porque en la zona oeste, hacia la salida de la cuenca, la sección de paso disminuye su tamaño considerablemente.

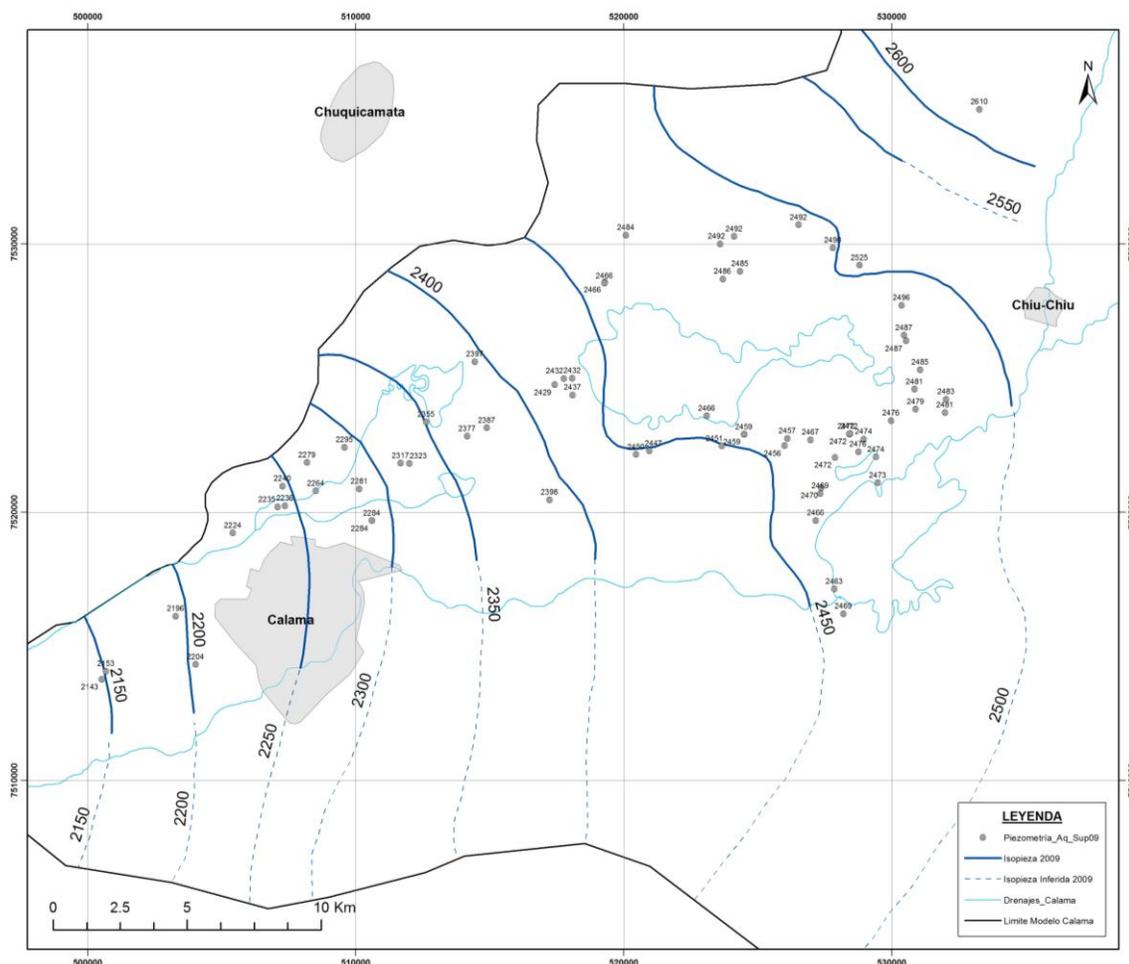


Figura 4-2. Superficie piezométrica del acuífero superior definida a partir de los niveles medios medidos en los pozos los años 2008 y 2009. (Fuente: Elaboración propia).

Teniendo en cuenta que la dirección de flujo es perpendicular a las isopiezas, mediante la disposición de las isopiezas se puede determinar las direcciones del flujo principal. Así, el flujo subterráneo principal del acuífero superior iría desde el nor-este asur-oeste, fluyendo desde las zonas topográficas más altas de la cuenca hacia zonas con menor

elevación hasta drenarse por completo en la zona de las vertientes, al sur-oeste de Calama.

En la zona del Salar de Talabre se observa una situación interesante, delineada por la isopieza de 2450 msnm. En el borde sur del salar la línea piezométrica cambia de orientación dirigiendo el flujo principal en sentido de norte a sur, como si el flujo subterránea tratase de esquivar un obstáculo de menor transmisividad. Se menciona esta situación porque luego en el capítulo de hidroquímica se vuelve a observar esta situación desde otra perspectiva. Se postula aquí, que en la zona del Salar Del Indio y su entorno directo existiría una reducción sustantiva de la capacidad de trasmisión de agua subterránea en los materiales sedimentarios del acuífero superior.

Luego de que el flujo principal dibuja este cambio de dirección en el Salar de Talabre, al continuar su trayectoria aguas abajo hacia la salida de la cuenca reorienta su dirección, dirigiéndose desde este a oeste hasta la salida. Esta interpretación de los datos piezométricos es coherente con el lineamiento que dibuja la quebrada principal de la vertiente Ojos de Opache, que es el punto de descarga y drenaje principal del acuífero superior, ver **Figura 4-3**.

La interpretación de la piezometría del acuífero superior presentada aquí, permite explicar todos los valores de los pozos que describen el acuífero superior, y es coherente con las variaciones espaciales de los gradientes hidráulicos, así como con los rasgos geomorfológicos más recientes en la zona de descarga del acuífero superior. Más aun, ilumina una zona de flujo más lento en torno al área que ocupa el Salar Del Indio. Esta zona de flujo más lento se describe a su vez en el Capítulo de Hidroquímica como una zona con valores elevados de conductividad eléctrica, señal de largos tiempos de residencia y lentitud en el flujo.

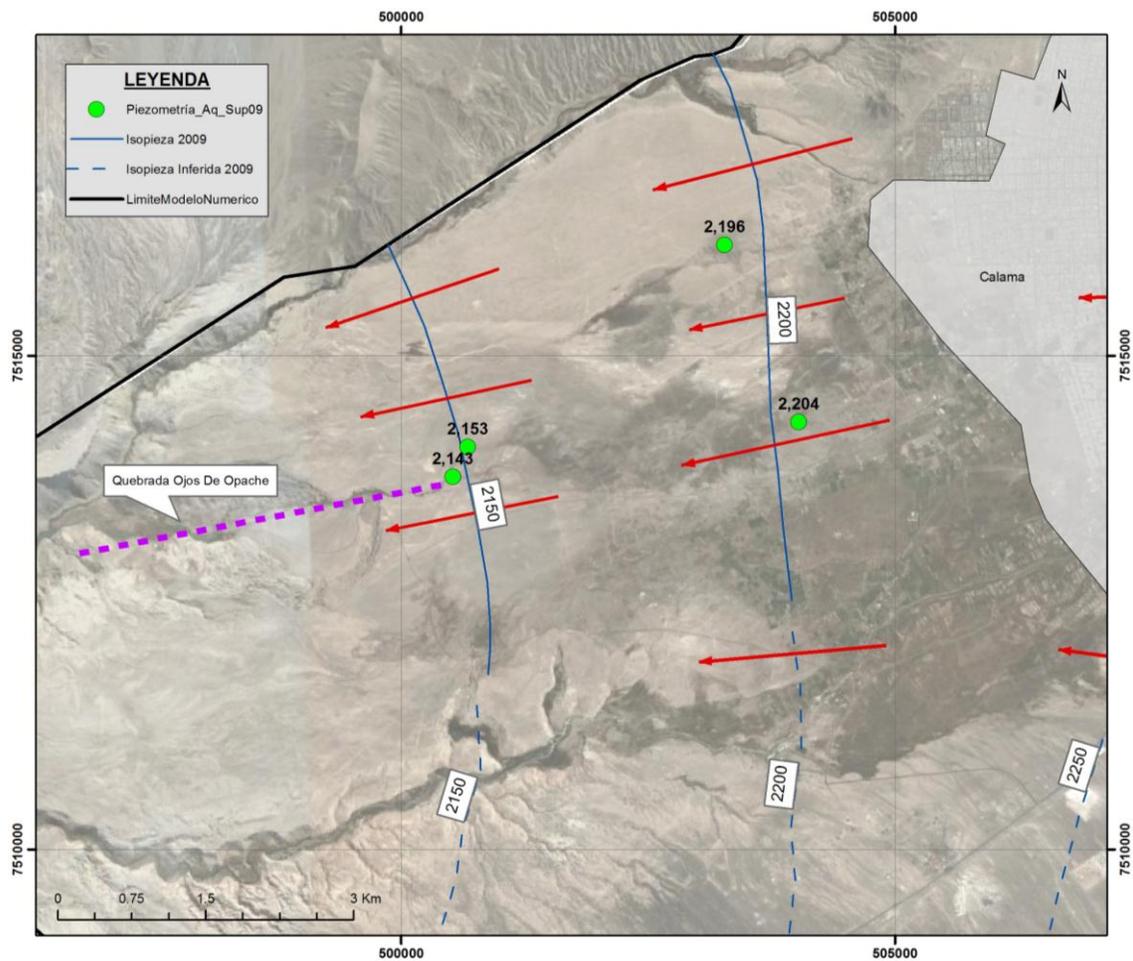


Figura 4-3. Dirección de la quebrada de la vertiente Ojos de Opache, y dirección de salida del flujo del agua subterránea del acuífero superior.

Numero	Id_point	Nivel(msnm)	Numero	Id_point	Nivel(msnm)
1	7580192	2476	33	7580306	2459
2	7580193	2466	34	7580301	2398
3	7580191	2472	35	7580029	2279
4	7580189	2284	36	7580305	2524
5	7580315	2469	37	7580274	2466
6	7580321	2467	38	7580028	2295
7	7580185	2490	39	7580036	2264
8	7580190	2355	40	7580034	2284
9	7580180	2456	41	7580308	2472
10	7580183	2377	42	7580023	2196
11	7580178	2492	43	7580025	2145
12	7580175	2451	44	7580032	2282
13	7580186	2481	45	7580248	2484
14	7580316	2485	46	7580331	2486
15	7580326	2240	47	7580244	2323
16	7580317	2472	48	7580266	2225
17	7580324	2432	49	7580202	2204
18	7580318	2474	50	7580313	2486
19	7580325	2317	51	7580289	2387
20	7580327	2479	52	7580333	2492
21	7580319	2474	53	7580283	2470
22	7580328	2469	54	7580282	2457
23	7580323	2483	55	7580286	2472
24	7580322	2466	56	7580279	2459
25	7580320	2487	57	7580284	2463
26	7580246	2429	58	7580287	2437
27	7580243	2397	59	7580285	2473
28	7580314	2610	60	7580278	2446
29	7580027	2236	61	7580167	2153
30	7580311	2449	62	7580218	2224
31	7580300	2481	63	7580001	2181
32	7580309	2466	64	7580006	2197

Tabla 4-3. Valores de nivel utilizados para hacer la piezometria del acuífero superior.

Acuífero inferior

La **Figura 4-4** representa el mapa piezométrico del acuífero inferior. Para su definición se han utilizado los niveles medios calculados en 55 puntos diferentes, información de extracciones y de parámetros químicos del agua.

El rango de isopiezas cubre desde 2100 a 2600 m.s.n.m. En cuanto a la distancia en planta entre las isopiezas observadas, igual que ocurre en el acuífero superficial, en la figura se observa como éstas están más separadas en la parte central. Esta situación se repite en ambos acuíferos, y el área coincide con los sondeos que indican una mayor profundidad del basamento. Se postula aquí que esta zona central corresponde al bloque hundido del sistema estructural, que ha estado en régimen de extensión durante los periodos de depositación de ambos acuíferos, permitiendo de esta forma una mayor espesor de los sedimento y, por lo tanto, una mayor área de paso para el agua subterráneas de ambos acuíferos. Esta hipótesis permite explicar razonablemente la mayor amplitud entre las curvas piezométricas, con gradientes hidráulicos menores de 0,4%. Luego, la zona al oeste vuelve a presentar gradientes hidráulicos mayores con valores parecidos a los del acuífero superior alcanzando un 5%.

La dirección de flujo principal en las zonas altas de la cuenca se orienta desde el noroeste hacia el sur-este. Cuando el flujo subterráneo llega a la zona del Salar de Talabre, cambia su dirección hacia norte-sur y luego retoma en dirección este-oeste, muy similar a lo que ocurriría con el acuífero superior. Esta configuración muestra que en torno al Salar Del Indio puede existir un elemento que ralentice el paso del agua subterránea, una zona de menor trasmisividad. Este patrón de flujo, también se observa en los datos de conductividad eléctrica que se presentan en el capítulo de hidroquímica.

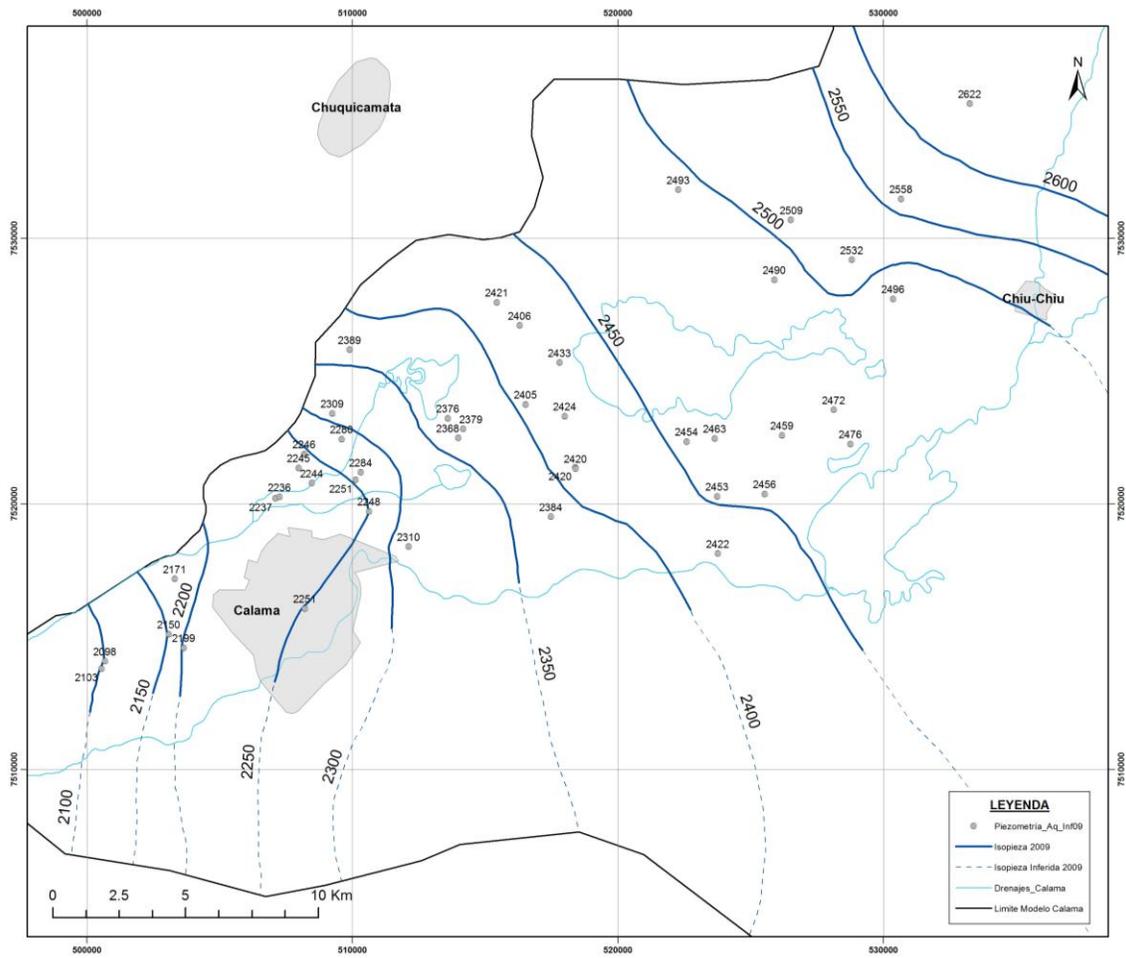


Figura 4-4. Superficie piezométrica del acuífero profundo definida a partir de los niveles medios medidos en los pozos los años 2008 y 2009. Fuente: Elaboración propia.

Numero	Id_point	Nivel(msnm)	Numero	Id_point	Nivel(msnm)
1	7580263	2617	29	7580035	2244
2	7580259	2599	30	7580021	2310
3	7580265	2398	31	7580310	2493
4	7580235	2399	32	7580277	2489
5	7580233	2396	33	7580273	2433
6	7580268	2401	34	7580033	2247
7	7580262	2557	35	7580020	2246
8	7580208	2318	36	7580296	2420
9	7580013	2368	37	7580024	2101
10	7580238	2406	38	7580291	2453
11	7580209	2323	39	7580307	2424
12	7580176	2509	40	7580031	2251
13	7580187	2456	41	7580298	2472
14	7580173	2462	42	7580264	2376
15	7580188	2384	43	7580055	2244
16	7580181	2379	44	7580288	2404
17	7580385	2421	45	7580195	2168
18	7580207	2309	46	7580204	1968
19	7580068	2170	47	7580166	1975
20	7580042	2389	48	7580217	2234
21	7580252	2235	49	7580219	2236
22	7580056	2250	50	7580221	2231
23	7580053	2284	51	7580231	2453
24	7580276	2622	52	7580292	2533
25	7580299	2422	53	7580293	2476
26	7580026	2279	54	7580295	2433
27	7580030	2236	55	7580304	2453
28	7580290	2459			

Tabla 4-4. Valores de nivel utilizados para hacer la piezometría del acuífero inferior.

A nivel de resumen, en ambos acuíferos en las zonas altas de la cuenca el flujo tiene un componente mayoritariamente nor-este a sur-oeste. Cuando los flujos subterráneos llegan a la zona del salar de Talabre sufren un desvío en la dirección de flujo que se reorienta en dirección norte-sur. A continuación, y una vez pasada la zona de salares centrales el flujo principal vuelve a reorientarse en dirección aproximada este-oeste. En el caso del acuífero superior, este se drena por completo al oeste en el sector de las vertientes, siendo Ojos de Opache el canal principal de este drenaje. Por otro lado, la

dirección de flujo principal del acuífero inferior continuaría camino al oeste y terminaría saliendo del dominio modelado de forma subterránea por el oeste.

Los niveles de agua de los dos mapas presentan un valor y forma similares, si bien se traten de acuíferos separados en la mayor parte de la cuenca por un acuitardo. La principal diferencia entre los dos mapas se observa en las proximidades de Calama, donde el acuífero profundo sufre una fuerte caída del nivel respecto a los niveles del superior. Esta situación incide en los flujos verticales que se producen entre ambos acuíferos y a través del acuitardo. Un análisis detallado de la zona permitiría determinar los flujos verticales comparando ambos mapas piezométricos y las permeabilidades verticales de las diferentes formaciones.

5. Análisis hidroquímico

Durante el desarrollo del presente proyecto, se han recibido múltiples fuentes de información desde DGA y usuarios de la cuenca. La información se fue recibiendo en distintos momentos a lo largo de este proyecto, lo que ha requerido de un gran esfuerzo en la etapa de compilación, y unificación de criterios para conseguir coherencia en la información. En este sentido, la información que presentamos aquí reúne la gran mayoría de los datos disponibles. Sin embargo, a la fecha de este informe aún es posible que existan análisis hidroquímicos que puedan ser incorporados a la base de datos y terminar de completar así los datos y análisis desarrollados.

Producto de la extensión espacial de la cuenca y las investigaciones históricas realizadas por los usuarios, se ha logrado compilar un gran volumen de datos hidroquímicos. Entre los datos presentados en este capítulo se encuentran parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica (CE), pH y sólidos disueltos totales (TDS), análisis de elementos mayores, y algunos ensayos con isótopos y trazadores. Esta información está disponible en distinta medida para aguas superficiales, acuífero superior, acuitardo, acuífero inferior y basamento.

En la **Figura 5-1** se muestra la distribución espacial de los puntos con análisis químicos separados por fuente de información. En total, se cuenta con 163 puntos de información analizados, provenientes de 3 fuentes diferentes como se resume en la **Tabla 5-1**. A su vez, los 163 puntos se pueden subdividir de acuerdo a los tipos de análisis disponibles, entre análisis de elementos mayoritarios, isótopos y trazadores, tal como se muestra en la **Tabla 5-2**. El rango temporal para todos los datos disponibles comienza en el año 2003 y se extiende hasta el año 2012.

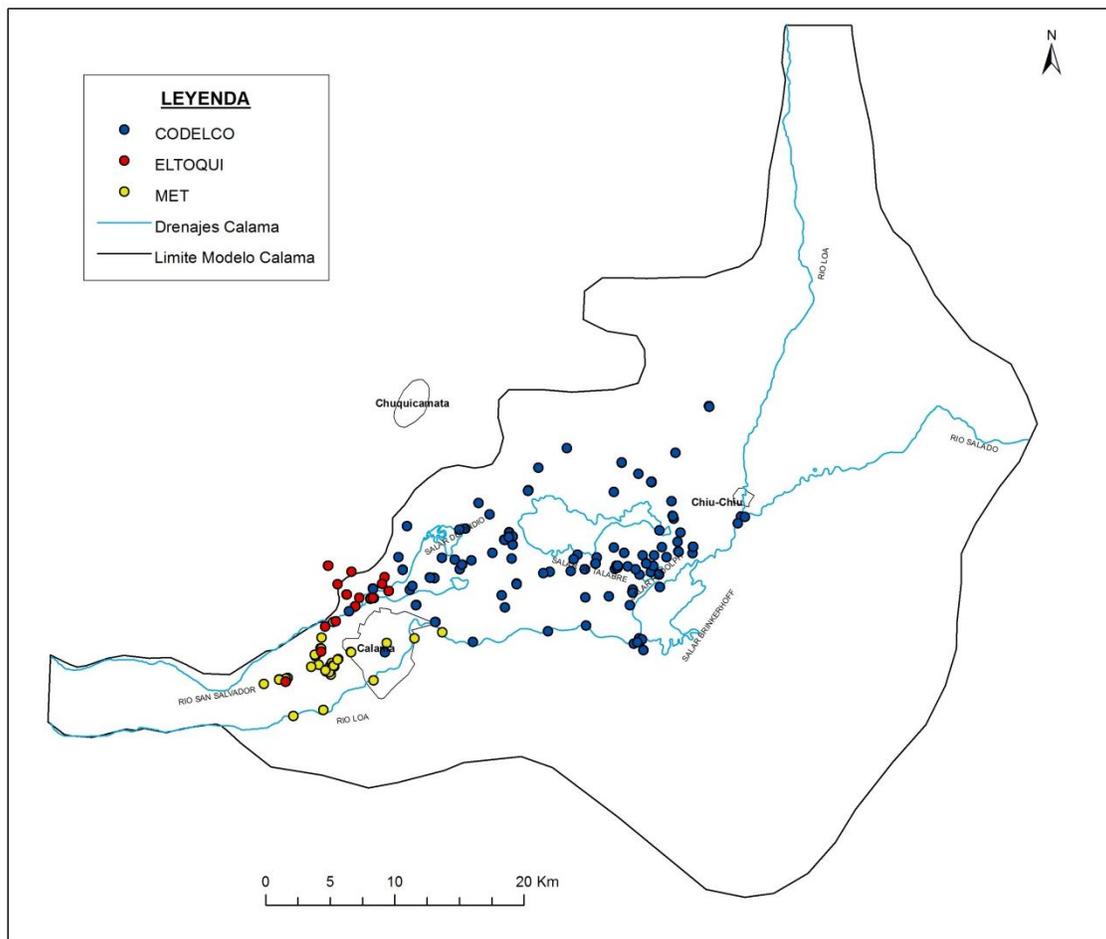


Figura 5-1. Puntos con análisis hidroquímicos disponibles. Fuente: Elaboración propia.

PROYECTO	Puntos totales	Análisis totales
Codelco Norte (Codelco)	123	8937
Minera El Tesoro (MET)	17	75
El Toqui	23	23
TOTAL	163	9035

Tabla 5-1. Puntos de agua analizados por cada uno de los entes presentes en la zona de estudio

PROYECTO	Mayoritarios		Isótopos		Trazadores	
	Puntos	Análisis	Puntos	Análisis	Puntos	Análisis
CODELCO	123	8905	19	19	13	13
MET	17	17	36	58	0	0
El Toqui	23	23	0	0	0	0

Tabla 5-2. Tipos de análisis disponibles.

Como se desprende de la **Figura 5-1**, los 163 puntos disponibles con información hidroquímica pertenecen principalmente a los sectores de la Hoya Quetena (El Toqui), el sector de explotación de Minera El Tesoro (al Oeste de la ciudad de Calama) y al sector del Tranque de Talabre (al Este de la ciudad de Calama). De estos 163 puntos disponibles, algunos proyectos utilizan los mismos puntos para muestreos químicos (hay traslape de puntos entre proyectos, por lo que la cantidad de puntos-captaciones totales es de 151).

En términos de la representatividad de los datos, y a partir de la extensa recopilación de antecedentes, se ha podido hacer una primera subdivisión de acuerdo al tipo de información, es decir, si los datos son representativos del acuífero superior, acuitardo, acuífero inferior o basamento, o una mezcla. Lo mismo se ha hecho con las fuentes de aguas superficiales. Esta información se resume en la **Tabla 5-3**. Para realizar esta división se utilizó la información encontrada en informes de construcción de pozos e informes que contenían breves descripciones sobre la representatividad de las captaciones. Si bien este primer acercamiento es suficiente para el presente trabajo, se recomienda una segunda fase de investigación en la que se pueda profundizar en la revisión de las posiciones de los cribados de cada captación.

De esta forma, se desprende que 134 puntos corresponden a fuentes de aguas subterráneas y 17 a puntos de aguas superficiales. En la **Figura 5-2** se presenta la distribución espacial de los puntos de acuerdo al tipo de unidad hidrogeológica que representan. En relación con las aguas superficiales, se cuenta con datos a lo largo del río Loa además de dos puntos en el río Salado (afluente que se une al Loa a la altura de Chiu-Chiu). La información disponible del acuitardo corresponde únicamente al sector aguas abajo del Tranque de Talabre, en el sector Sur-Oeste. En general, la información más abundante corresponde a los acuíferos superior e inferior, sin embargo su distribución se circunscribe a un área bien delimitada al centro y sur-oeste de la cuenca.

Como consecuencia, el sector al sur y este del río Loa se encuentran sin información disponible.

Resumen Puntos Hidroquímica	
Aguas Superficiales	11
Manantiales	6
Acuífero Superior	71
Acuitardo	5
Acuífero Inferior	55
Acuífero Mixto	1
Basamento	2
TOTAL	151

Tabla 5-3. Clasificación de puntos muestreados en la cuenca de Calama en función de su representatividad hidrogeológica.

5.1 Distribución de la información

5.1.1 Aguas superficiales

Existen 16 puntos con información hidroquímica, con información de los parámetros físico-químicos (CE, pH y TDS), además de algunas analíticas de mayores en algunos puntos. En la **Figura 5-3** resume la distribución espacial de los puntos de agua superficial con información hidroquímica disponible. Asimismo, la **Tabla 5-4** resume los puntos de aguas superficiales disponibles de acuerdo a su fuente y tipo.

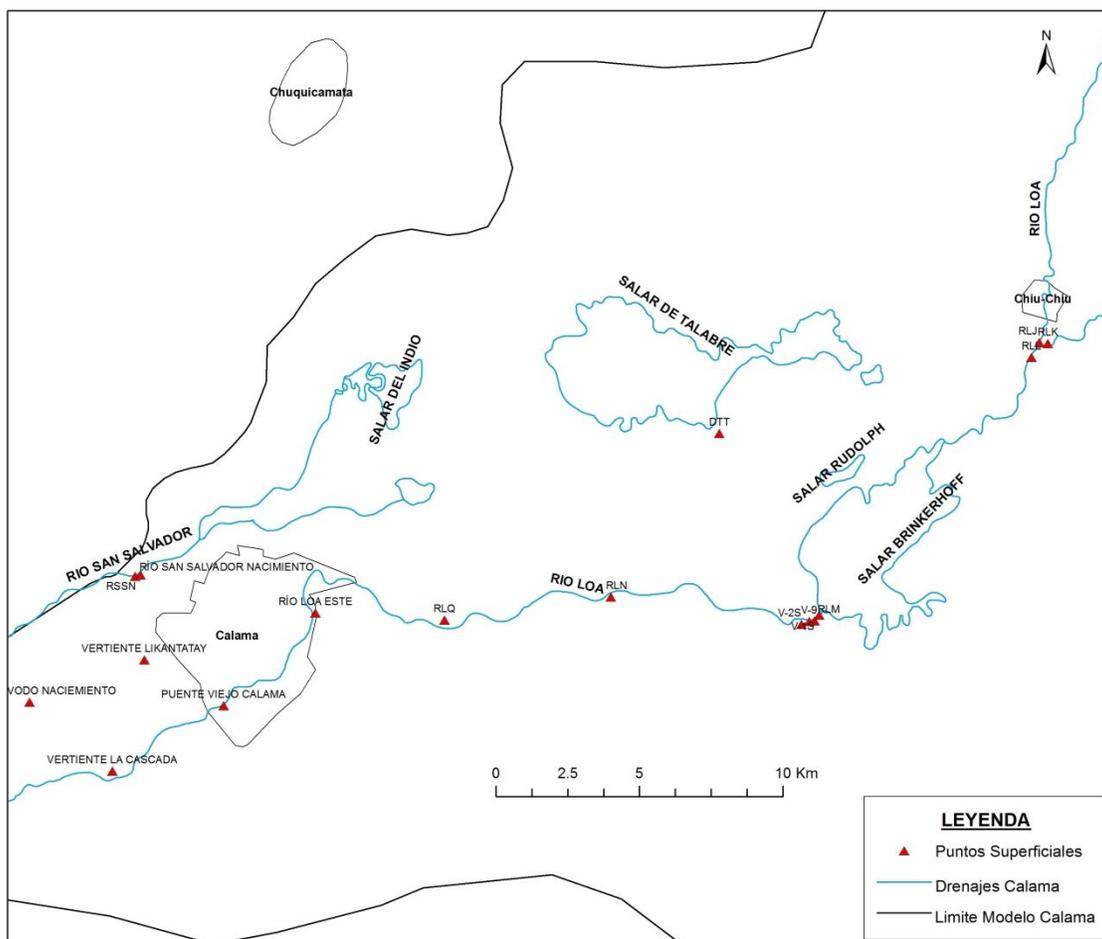


Figura 5-3. Distribución espacial de los puntos de aguas superficiales con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.

PROYECTOS	TIPO	PUNTOS	ANALÍTICAS TOTALES
MET	VERTIENTES	3	3
	RÍOS	3	3
ELTOQUI	RÍOS	1	0
CODELCO	VERTIENTES	3	21
	RÍOS	6	640

Tabla 5-4. Resumen de los puntos de aguas superficiales por proyecto y tipo.

5.1.2 Acuífero superior

El acuífero superior cuenta con 66 puntos con información hidroquímica disponible, los que se disponen espacialmente en la **Figura 5-4**, y se resumen en la **Tabla 5-5**.

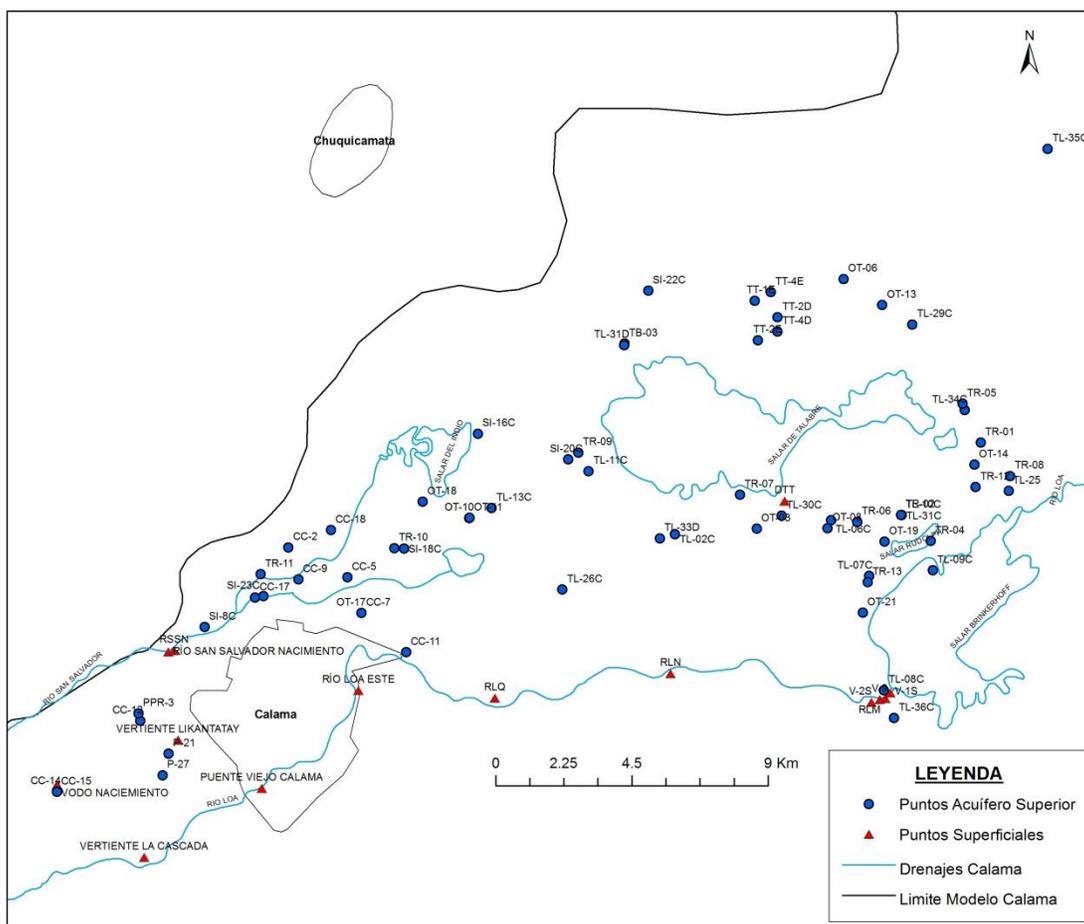


Figura 5-4. Distribución espacial de los puntos del acuífero superior con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.

<u>Nombre</u>	<u>Este m</u>	<u>Norte m</u>	<u>Nombre</u>	<u>Este m</u>	<u>Norte m</u>	<u>Nombre</u>	<u>Este m</u>	<u>Norte m</u>
CC-12	503276	7516125	SI-8C	505408	7519228	TR-10	511676	7521833
CC-14	500545	7513794	TB-03	519285	7528597	TR-11	507258	7520975
CC-15	500524	7513775	TL-02C	520951	7522287	TR-12	530888	7523847
CC-17	507079	7520201	TL-06C	526106	7522753	TR-13	527328	7520704
CC-18	509584	7522425	TL-07C	527374	7520918	TT-1E	523588	7530009
CC-2	508173	7521856	TL-08C	527855	7517137	TT-2D	524344	7529461
CC-5	510123	7520871	TL-09C	529470	7521100	TT-2E	523691	7528703
CC-7	510591	7519688	TL-10C	528422	7522926	TT-4D	524343	7528991
CC-9	508504	7520800	TL-11C	518095	7524378	TT-4E	524119	7530290
OT-03	523655	7522476	TL-13C	514891	7523153			
OT-06	526520	7530725	TL-25	531980	7523722			
OT-08	525996	7522493	TL-26C	517231	7520467			
OT-10	514146	7522827	TL-29C	528795	7529222			
OT-11	514158	7522838	TL-30C	524483	7522902			
OT-13	527801	7529867	TL-31C	528442	7522928			
OT-14	530846	7524590	TL-31D	519274	7528539			
OT-17	510595	7519691	TL-33D	520449	7522158			
OT-18	512618	7523366	TL-34C	530530	7526397			
OT-19	527878	7522051	TL-35C	533271	7535029			
OT-21	527158	7519697	TL-36C	528193	7516217			
P-21	504219	7515039	TR-01	531054	7525318			
P-27	504023	7514329	TR-02	528420	7522933			
PPR-3	503224	7516369	TR-04	529406	7522066			
SI-16C	514436	7525614	TR-05	530458	7526606			
SI-18C	512003	7521816	TR-06	526970	7522700			
SI-20C	517427	7524761	TR-07	523102	7523596			
SI-22C	520073	7530335	TR-08	532026	7524216			
SI-23C	507350	7520244	TR-09	517761	7524990			

Tabla 5-5. Puntos del acuífero superior con información hidroquímica

5.1.3 Acuífero inferior

El acuífero inferior cuenta con 53 puntos con información hidroquímica disponible, los que se disponen espacialmente en la **Figura 5-5**, y se resumen en la **Tabla 5-6**.

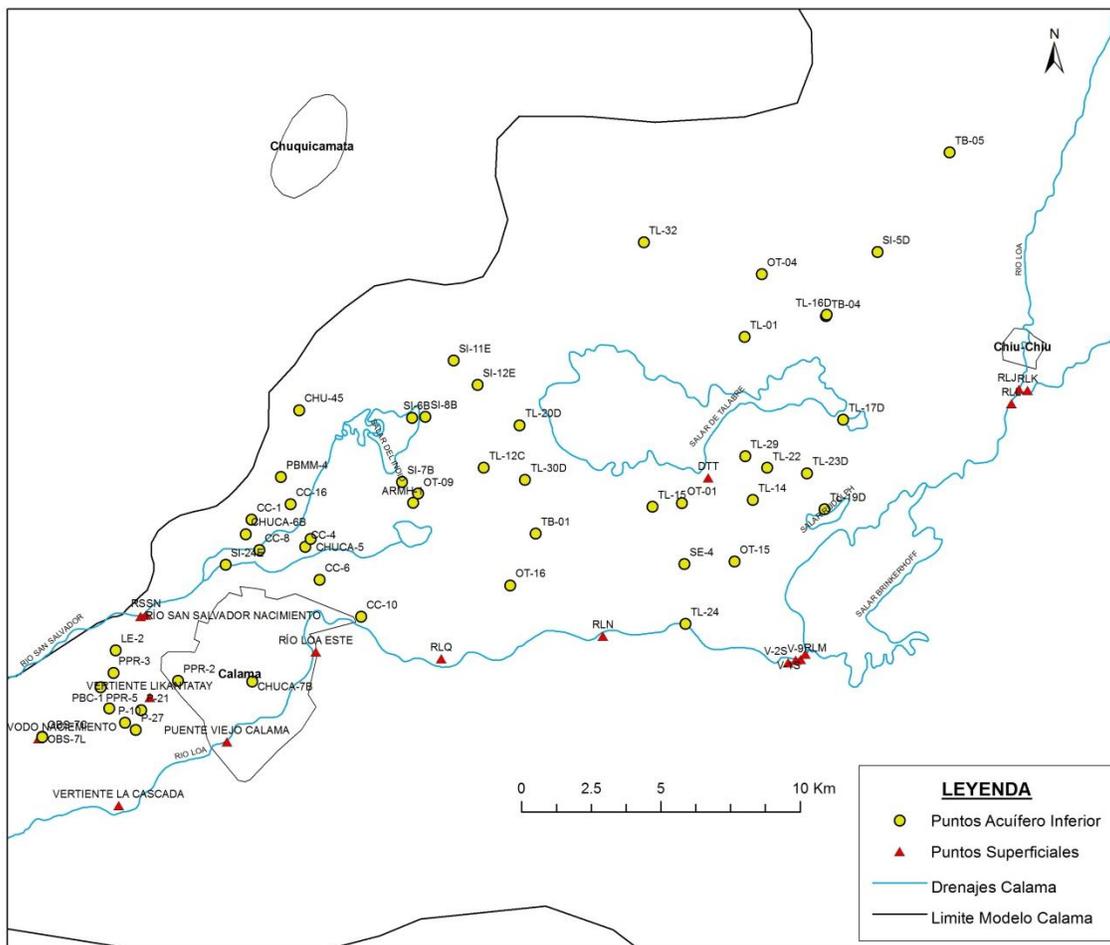


Figura 5-5. Distribución espacial de los puntos del acuífero inferior con información hidroquímica disponible. Fuente: Elaboración propia.

<u>Nombre</u>	<u>Este m</u>	<u>Norte m</u>	<u>Nombre</u>	<u>Este m</u>	<u>Norte m</u>
ARMH-1	513985	7522483	PPR-5	502771	7515862
CC-1	508184	7521875	SE-4	523734	7520285
CC-10	512120	7518395	SI-11E	515438	7527593
CC-16	509586	7522437	SI-12E	516297	7526720
CC-4	510118	7520903	SI-24E	507256	7520264
CC-6	510624	7519719	SI-5D	530660	7531488
CC-8	508465	7520786	SI-6B	513943	7525541
CHU-45	509896	7525810	SI-7B	513587	7523227
CHUCA-5	510309	7521189	SI-8B	514420	7525567
CHUCA-6B	507976	7521358	TB-01	518383	7521374
CHUCA-7B	508205	7516058	TB-04	528812	7529193
LE-2	503305	7517179	TB-05	533249	7535073
OBS-11C	498849	7513604	TL-01	525895	7528443
OBS-7C	500670	7514080	TL-12C	516520	7523747
OBS-7L	500675	7514075	TL-14	526186	7522584
OT-01	523639	7522467	TL-15	522584	7522345
OT-04	526511	7530699	TL-16D	528837	7529237
OT-09	514170	7522826	TL-17D	529427	7525469
OT-15	525525	7520372	TL-19D	528758	7522255
OT-16	517469	7519519	TL-20D	517809	7525269
P-10	503644	7514580	TL-22	526704	7523741
P-21	504219	7515038	TL-23D	528125	7523545
P-27	504023	7514329	TL-24	523766	7518135
PBC-1	503081	7515094	TL-29	525911	7524158
PBMM-4	509239	7523406	TL-30D	518002	7523302
PPR-2	505545	7516089	TL-32	522267	7531835
PPR-3	503223	7516368			

Tabla 5-6. Puntos del acuífero inferior con información hidroquímica

5.2 Análisis hidroquímico – Elementos Mayores

En base a las concentraciones de los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-) mayores, el agua puede ser clasificada en distintos tipos mediante el diagrama de Piper. Este diagrama no representa las concentraciones absolutas del agua sino sus concentraciones relativas. El diagrama de Piper representa, la composición aniónica (HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-) y catiónica (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) del agua cuyos porcentajes se calcularon a partir de las concentraciones de estos iones expresadas en miligramos equivalentes por litro (meq/l). El diagrama también presenta un campo central romboidal en el que se proyectan las composiciones del agua calculadas a partir de los aniones y cationes.

5.2.1 Aguas superficiales

En la **Figura 5-6** se presenta un diagrama Piper, donde se muestra la composición de cada punto de aguas superficial. La composición de los puntos permiten agruparlos en una facie hidroquímica principal: aguas cloruradas sódicas. En términos de los aguas superficiales, existen dos aportes principales: el río Loa proveniente del embalse Conchi y el río Salado. Ambas fuentes se juntan en las cercanías del poblado de Chiu-Chiu. Lo que muestra el diagrama Piper es que todas las muestras aguas debajo de la junta en Chiu-Chiu muestran un facie más parecida a la huella hidroquímica que traía originalmente el río Salado. Si bien el río Loa antes de la junta en Chiu-Chiu también tiene una facie clorurada sódica, se encuentra más cercana hacia el extremo magnésico que las aguas del Salado y que las aguas de la mezcla posterior.

Ríos (Junio 2012)

PIPER DIAGRAM

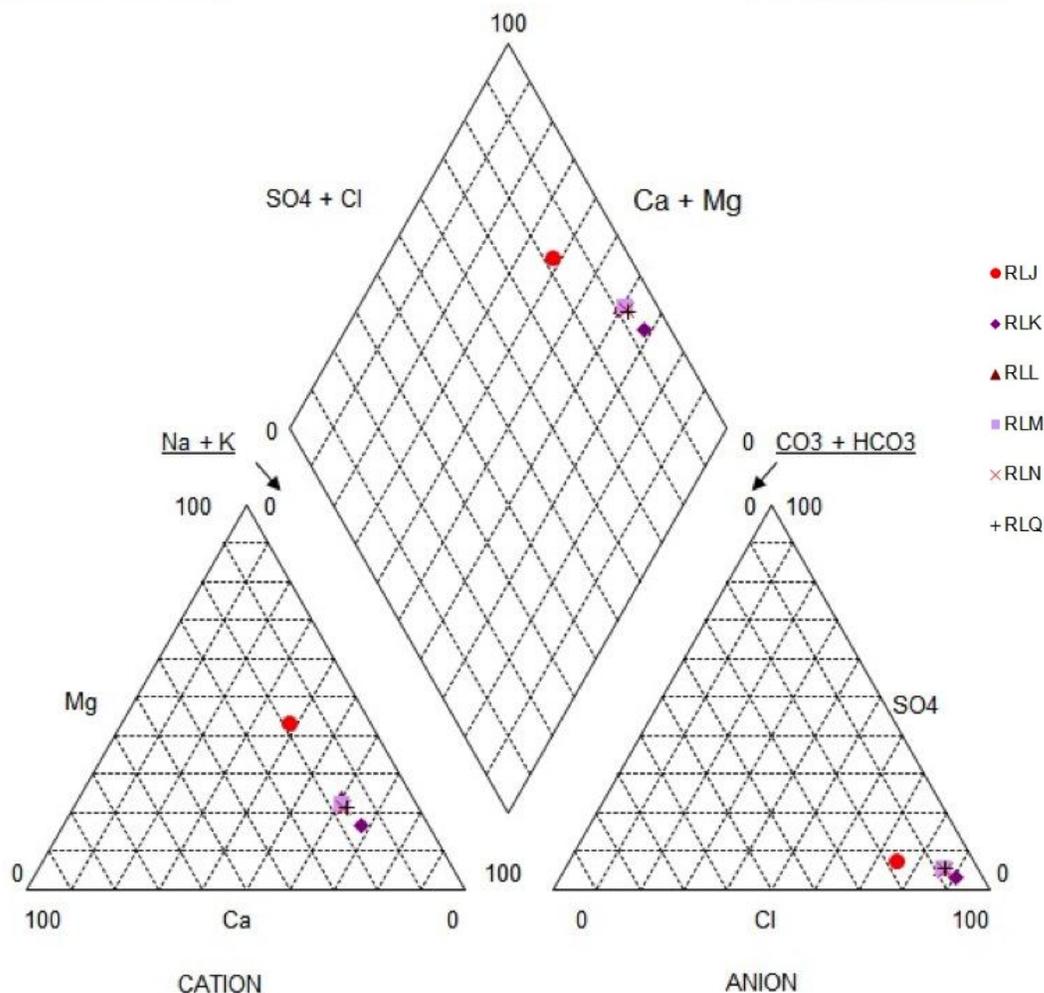


Figura 5-6. Diagrama Piper de las muestras de agua superficial. (Fuente: Elaboración propia).

5.2.2 Acuífero superior

En la **Figura 5-7** se presenta un diagrama Piper, donde se muestra la composición de cada pozo. La composición de los puntos de muestreo permiten agrupar las muestras en una facies hidroquímica principal: aguas cloruradas sódicas. Sin embargo hay un grupo menor que se acerca a la zona de las aguas cloruradas magnésicas.

Una característica interesante, se refleja en que los pozos que registran los mínimos valores de calcio son los mismo que muestran valores muy elevados de CE (más adelante en este capítulo): OT-18, CC-18 y TL-13C.

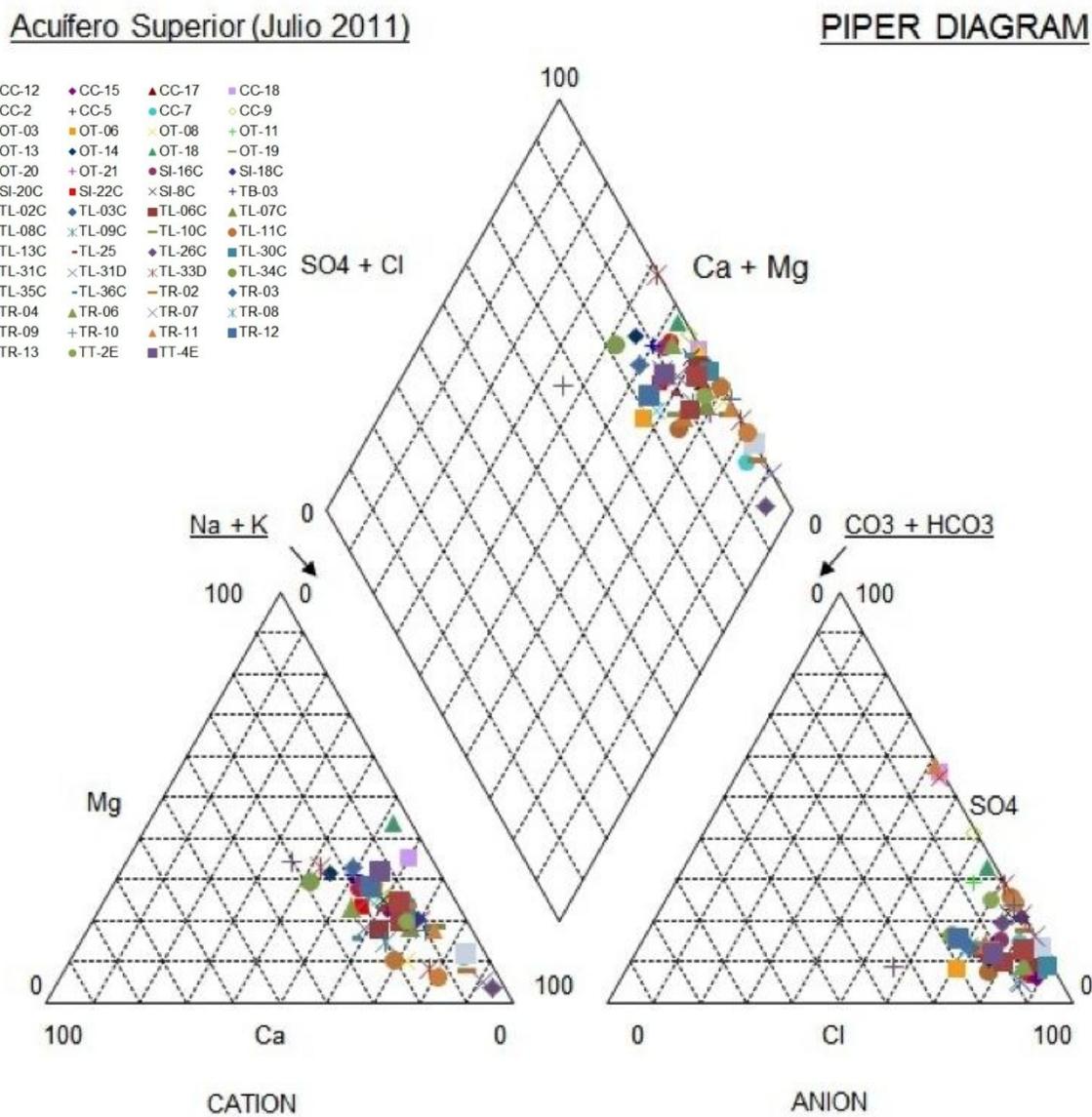


Figura 5-7. Diagrama Piper de las muestras del acuífero superior. (Fuente: Elaboración propia).

5.2.3 Acuífero inferior

En la **Figura 5-8** se presenta un diagrama Piper, donde se muestra la composición de cada pozo. Un aspecto interesante que resalta de comparar las mismas fechas entre ambos acuíferos es que el acuífero inferior no tiene muestras en el extremo sódico a diferencia de lo que ocurría con el acuífero superior: la diferencia en sodio se gana en calcio, en este caso.

La composición de los puntos de muestreo permiten agrupar las muestras en 2 facies hidroquímicas: aguas cloruradas sódicas y cloruradas magnésico-cálcicas.

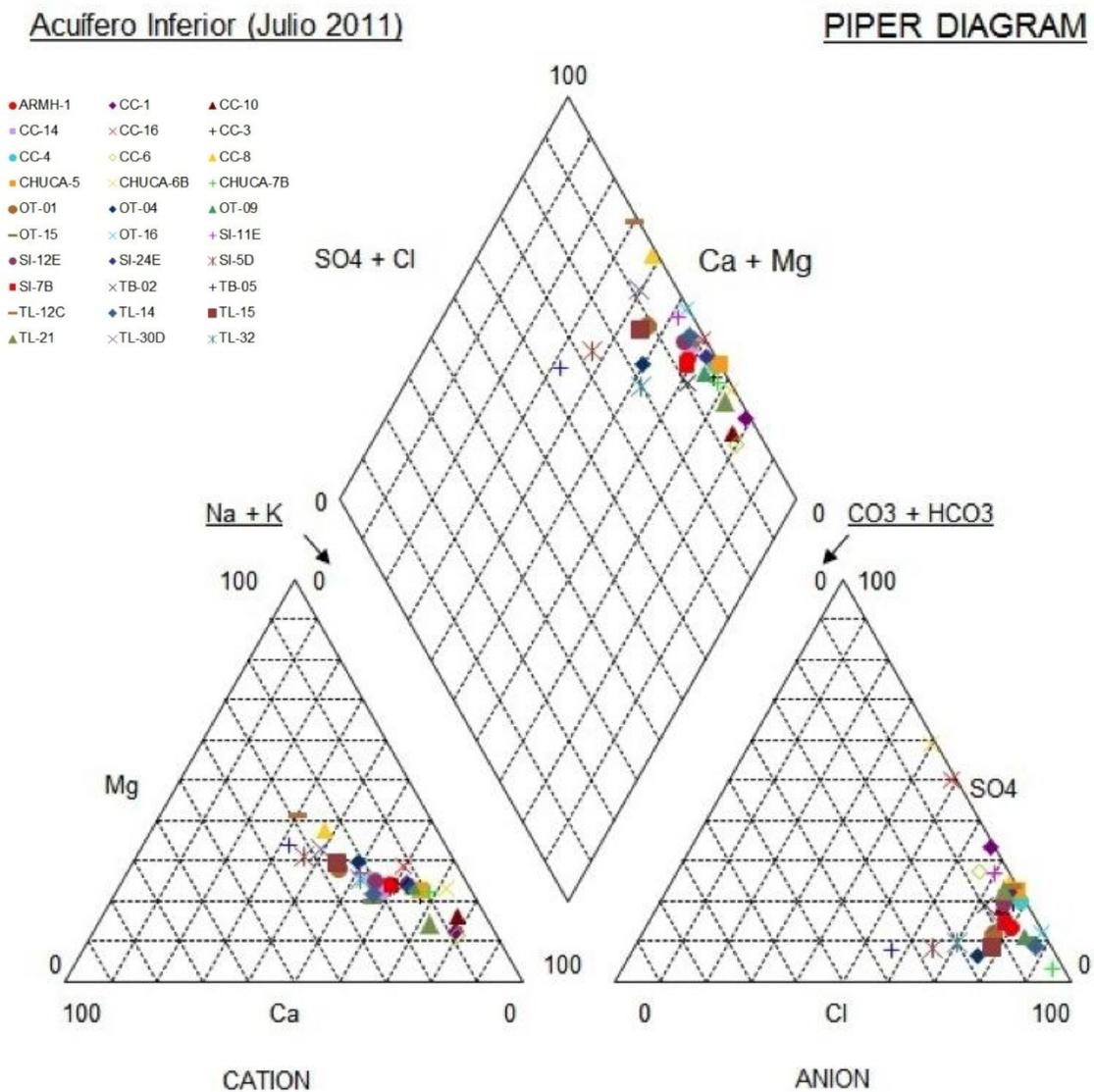


Figura 5-8. Diagrama Piper de las muestras del acuífero inferior. Elaboración propia

5.3 Análisis hidroquímico - Conductividad Eléctrica (CE)

Una de las ventajas que tiene el análisis hidroquímico del parámetro de conductividad eléctrica es que resume de forma indirecta la carga de solutos que contiene la muestra de agua, y por lo tanto resulta una buena medida de cuán cargada se encuentra el agua. En este sentido, el agua proveniente directamente de la precipitación correspondería a un agua poco cargada o liviana. Una muestra de agua destilada representaría un agua en extremo liviana o con una carga de solutos mínima. Por otra parte, una muestra de un agua que lleva mucho tiempo en contacto con los sedimentos ha tenido mucho tiempo para equilibrarse con el medio, y por lo tanto en el proceso se ha cargado con solutos y su conductividad eléctrica será elevada. La medida de esa carga tendrá una relación directa con el tipo de suelo que está en contacto y con el tiempo de duración del contacto. Por ejemplo, en un extremo de agua súper cargada se encontraría un acuífero fósil o las aguas subterráneas de un salar relicto.

De esta forma, en una gran hoya geográfica como la gran cuenca de Calama en donde el agua de recarga puede recorrer subterráneamente más de 60 km, podemos esperar que las aguas subterráneas posean conductividades eléctricas más livianas cerca de las áreas de recarga, y que en la medida que nos alejamos de esas áreas, las aguas se vayan cargando de solutos de forma progresiva en la dirección de flujo piezométrica. Este patrón de enriquecimiento progresivo en el que el sistema evoluciona desde aguas livianas hacia aguas más cargadas, en su desarrollo espacial y geométrico está relacionado a su vez con la homogeneidad de los sedimentos y la conductividad hidráulica. En las zonas del acuífero en que las aguas subterránea se mueven más rápido tendrán mayor renovación, y por lo tanto el agua no tendrá tanto tiempo para cargarse con solutos como puede ocurrir con aquellas zonas del acuífero en donde la conductividad hidráulica es menor y que sí tienen mucho tiempo para equilibrarse con el medio sedimentario.

Una de las ventajas de contar con un mapa de conductividades eléctricas para cada unidad acuífera, es que producto de la relación con la conductividad hidráulica, se puede observar indirectamente las zonas de recarga que aportan las aguas más livianas, cuáles son las zonas que tiene mayor renovación y por lo tanto dónde se presume que el agua fluiría más rápido. Esto se traduce en una observación indirecta de la red de flujo piezométrica. A su vez, permite determinar cuáles son las zonas más cargadas de solutos

y, por lo tanto, en donde el agua se mueve más lento o con una renovación relativamente inferior.

En el caso de la gran cuenca de Calama, y producto de la abundancia de información en amplios sectores, ha sido posible realizar este tipo de análisis. La mayoría de los puntos con información de CE contiene un registro histórico de medidas, en la mayoría de los casos con una frecuencia mensual y de varios años. La metodología utilizada considera la obtención de "promedios representativos" de estos registros históricos. Estos promedios representativos en algunos casos considera la selección de subconjuntos más fiables de datos, para evitar utilizar datos erróneos, limpieza de periodos de estabilización al comienzo de la construcción de los pozos entre otros. Como resultado de esta manipulación de información, y para facilitar la comprensión de los cifras representativas, se han dispuesto cifras redondas y cerradas como representativas de los rangos de conductividad eléctrica al que pertenecen los puntos. Por ejemplo, si un pozo promediaba $8.436 \mu\text{S/cm}$, se ha filtrado simplemente como $8.400 \mu\text{S/cm}$.

Para la representación gráfica de la información se han dispuesto estos promedios representativos de las conductividades eléctricas para capa punto, captación subterránea o punto de agua superficial en el análisis de que se presenta a continuación.

5.3.1 Acuífero superior

En la **Figura 5-9** se muestra la distribución espacial de los puntos del acuífero superior con CE, junto a sus valores representativos y una interpretación gráfica de lo que proponemos corresponde a 3 áreas de diferente velocidad de renovación de las aguas subterráneas. Los valores utilizados como representativos se disponen junto al listado de puntos en la **Tabla 5-7**.

En una descripción general del patrón de valores representativos de CE, se pueden observar algunos elementos interesantes: la zona aguas arriba del salar/tranque Talabre se compone de los valores más bajos de todos los disponibles en la cuenca; inmediatamente al norte de la ciudad de Calama y sobre el sal Del Indio se observa una zona con los valores más altos de CE, con un valor máximo que supera los $80.000 \mu\text{S/cm}$; una segunda zona de valores elevados (sobre $9.000 \mu\text{S/cm}$) se insinúa ligeramente al oeste y sobre el curso río Loa, aunque la disponibilidad de datos no termina de ilustrar completamente esta hipótesis; y, existiría una canal central orientado de noreste a suroeste a lo largo del cual se produce un aumento progresivo de los valores de CE desde

las zonas altas, con un rango aproximado que va desde los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y hasta los 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La zona de valores elevados al norte de Calama y salar Del Indio, se extiende como una pluma hasta el borde sur del salar/tranque de Talabre. Asimismo el borde sur y oeste del salar de Salar de Brinkerhoff registra valores elevados de CE. Estas dos zonas de mayor CE pueden tener su origen en su pertenencia como aguas de salar, infiltración desde las actividades mineras y por lo tanto con un mayor enriquecimiento de solutos y/o producto de menores permeabilidades en los sedimentos de esas zonas.

En este contexto, el modelo hidroquímico conceptual propuesto para el acuífero superior considera que las aguas de recarga más "frescas" o livianas se componen de valores promedio de CE entre 1.500 - 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta agua de recarga alimentan el acuífero superior desde el sector nor-este (hoyas del río Loa-norte y río Salado) a través de un canal central que al llegar a la zona de los salares de Talabre y Salar de Brinkerhoff sufren un proceso de mezcla. Este canal central está limitado por el norte por una pluma de alta CE. Esta pluma se encuentra relativamente bien delimitada con los datos existentes. Adicionalmente, se estima que el canal central tendría igualmente un límite sur, asociado en la zona al sur y este del río Loa incluido el salar de Salar de Brinkerhoff, en donde se aprecia un aumento de los valores de CE. El volumen de datos que apoyan esta zona es escaso e incluyen de sur-oeste a norte-este a los pozos p-27, CC-11, TL-36C, OT-21 y TR-13, por lo que no se puede ser conclusivo con esta hipótesis sin mayor información que lo sustente.

La situación geográfica de la zona de mezcla ubicada entre ambos salares es bastante interesante puesto que puede tener al menos tres explicaciones posibles: puede ser que originalmente esta zona haya tenido en sub-superficie sedimentos de menor permeabilidad, lo que hubiese provocado un contraste en la velocidad de viaje del agua subterránea, con el consiguiente peralte y eventual afloramiento de las aguas subterráneas, lo que en consecuencia explicaría la existencia y presencia de ambos salares; la segunda hipótesis plantea la presencia original de los salares producto de barreras topográficas sobre las aguas de avenidas, y que la subsecuente y constante evaporación de aquellas aguas sea la responsable del enriquecimiento en solutos de las aguas subterráneas de esos sectores. Por último, y complementado a las dos ideas planteadas, las infiltraciones producidas por las actividades mineras también pueden ser

las responsables de los valores observados en este sector. Con el conocimiento actual, estas hipótesis al igual que una combinación de ellas, podrían ser válidas.

Adicionalmente al proceso de mezcla, el recorrido y desplazamiento de las aguas subterráneas del acuífero superior a través del canal central en sentido sur-oeste enriquece su contenido de solutos. De esta forma los puntos en la salida, al sur-oeste de Calama muestran valores cercanos a 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En esta zona, producto de una fuerte caída de la topografía, el acuífero superior termina aflorando en distintas vertientes hasta drenarse por completo e incorporando sus caudales a los cursos superficiales de los ríos Loa y San Salvador. La vertiente que posee el mayor caudal de drenaje más importante corresponde a la Vertiente Ojos de Opache, que se puede reconocer en la **Figura 5-9** como VODO Nacimiento.

En términos de la delimitación de estas 3 áreas descritas como áreas con velocidad de renovación diferentes, se podría concluir que bajo las hipótesis planteadas el llamado canal central sería la zona con una velocidad de renovación más alta y por lo tanto el área por el que el agua fluye más rápidamente en la cuenca. En contraste, la llamada pluma de altos valores de CE al norte de la ciudad de Calama, correspondería a la zona de la cuenca con una menor velocidad de renovación y por lo tanto en donde el agua se mueve más lento. Los valores puntuales más elevados permitirían hablar incluso de acuífero fósil en esta zona. Finalmente, la zona al sur del canal central, es la que menos datos tiene y por lo tanto no se puede concluir. Sin embargo, se estima que la renovación de las aguas subterráneas en esta área es inferior a lo que ocurre al interior del canal central en donde el agua fluiría a una velocidad mayor.

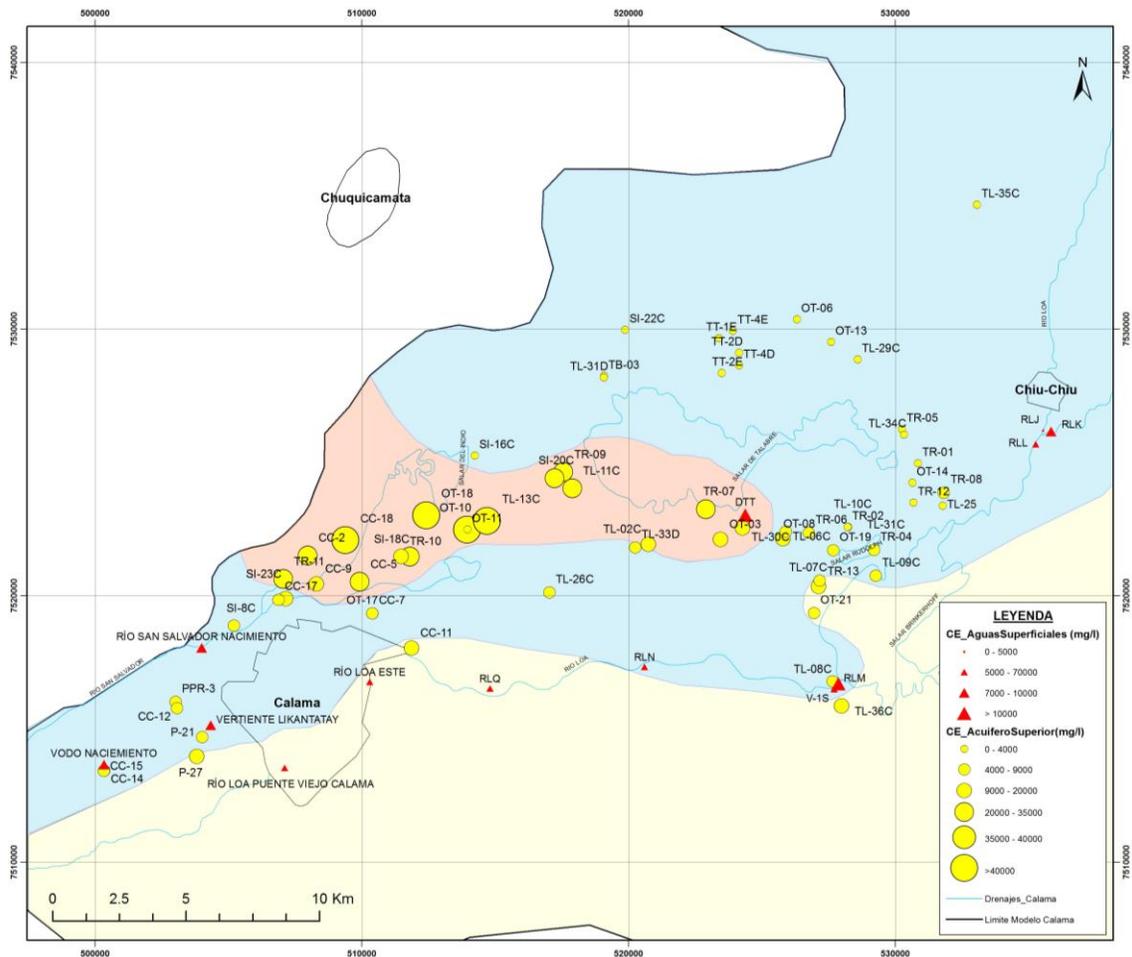


Figura 5-9. Mapa de puntos con conductividad eléctrica representativa para el acuífero superior y representación de su modelo hidroquímico conceptual. (Fuente: Elaboración propia)

Nombre	CE ($\mu\text{S/cm}$)						
CC-11	14200	OT-17	4700	TL-08C	6500	TR-04	5400
CC-12	4700	OT-18	65000	TL-09C	7600	TR-05	2500
CC-14	8600	OT-19	8000	TL-10C	2900	TR-06	6600
CC-15	7500	OT-21	9000	TL-11C	22000	TR-07	32000
CC-17	5100	P-21	7800	TL-13C	80000	TR-08	6600
CC-18	49000	P-27	4200	TL-25	3900	TR-09	25000
CC-2	27500	PPR-3	6200	TL-26C	6900	TR-10	14000
CC-5	26000	SI-16C	40000	TL-29C	2300	TR-11	27000
CC-7	4700	SI-18C	24000	TL-30C	14000	TR-12	2100
CC-9	11400	SI-20C	23000	TL-31C	2500	TR-13	9100
OT-03	15000	SI-22C	2900	TL-31D	2700	TT-1E	2500
OT-06	2100	SI-23C	10000	TL-33D	8300	TT-2D	1900
OT-08	16000	SI-8C	7200	TL-34C	2300	TT-2E	2900
OT-10	80000	TB-03	2700	TL-35C	2100	TT-4D	1800
OT-11	3300	TL-02C	12000	TL-36C	12600	TT-4E	2200
OT-13	2900	TL-06C	6500	TR-01	1900		
OT-14	2600	TL-07C	7700	TR-02	2400		

Tabla 5-7. Listado de puntos con los valores de conductividad eléctrica utilizados como representativos para el acuífero superior.

5.3.2 Acuífero inferior

En el caso del acuífero inferior los procesos de infiltración de la recarga requieren de un trayecto más largo puesto que estos sedimentos se encuentran a mayor profundidad. En el caso hipotético de que la recarga del acuífero inferior se comporte principalmente como un flujo tipo pistón, adicionalmente a la mayor profundidad de infiltración, la recarga ha debido transportarse una distancia horizontal mayor que en el caso del acuífero superior. Sin embargo, el tiempo de transporte y contacto no es el único factor determinante, y hay que tener en cuenta que el tipo de material sedimentario aluvial que es atravesado por el flujo de aguas subterráneas más profundo no es igual que los sedimentos más calcáreos del acuífero superior.

En la **Figura 5-10** se muestra la distribución espacial de los puntos del acuífero inferior con CE, junto a sus valores representativos y una interpretación gráfica de lo que proponemos corresponde a 3 áreas de diferente velocidad de renovación de las aguas

subterráneas. Los valores utilizados como representativos se disponen junto al listado de puntos en la **Tabla 5-8**.

La descripción general del patrón de valores representativos de CE permite destacar que inmediatamente al norte de la ciudad de Calama y salar Del Indio se observa una zona con los valores más altos de CE, con un valor máximo que alcanza los 45.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A diferencia de lo que ocurre con el acuífero superior, esta zona no se extiende hacia el Salar de Talabre. Esto último permite en lo alto de la cuenca observar un patrón de enriquecimiento progresivo de la CE que comienza en el extremo nor-este **Figura 5-10**, con valores de 2.000 – 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hacia aguas abajo, y por un canal central al igual que con el acuífero superior, el agua subterránea del acuífero inferior se va enriqueciendo progresivamente con rangos de entre 3.000 – 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ inmediatamente al sur del salar de Talabre. Al continuar aguas abajo, en el entorno de la ciudad de Calama el rango se encuentran entre 4.500 – 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el extremo sur-oeste de la cuenca en el sector de las vertientes, la CE aumenta progresivamente hasta alcanzar los 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el último punto muestreado, pozo OBS-11C. La tercera zona estaría limitando el canal central por el sur. Sin embargo, los datos que sustentan la presencia de esta tercera zona son escasos y sólo se cuenta con los pozos OT-15, TL-14 y TL-24.

La pluma de valores elevados que se encuentra al norte de Calama y bajo el salar Del Indio y el área cercana al salar de Salar de Brinkerhoff pueden tener su origen como aguas de salar relicto, considerando que se encuentran separados de los salares superficiales actuales por una capa de acuitardo, y con diferencias en sus cargas hidráulicas lo que indicaría un nivel de desconexión hidráulica.

De esta forma, para el acuífero inferior el modelo hidroquímico propone una fuente de aguas de recarga más “frescas” o livianas compuestas de valores promedio de CE entre 2.000 – 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el extremo nor-este. Esta agua de recarga se movería desde el sector nor-este (hoyas del río Loa-norte y río Salado) a través de un canal central, recorriendo toda la extensión de la cuenca hasta salir de forma subterránea por el extremo sur-oeste. Durante su trayecto de unos 30 km, el flujo subterráneo profundo se irá cargando progresivamente en solutos hasta alcanzar los 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el último punto con datos, pozo OBS-11C. La ausencia de información al sur-oeste del pozo OBS-11C impide extender de forma conclusiva la modelación hacia el extremo sur-oeste de la cuenca. Sin embargo, se estima que el flujo subterráneo del acuífero inferior no debiese aflorar en el entorno inmediato a la zona de modelación, puesto que la carga hidráulica

confinada que muestra el pozo OBS-11C ubica el techo del acuífero inferior recién a partir de 130 m de profundidad sobre el lecho de la quebrada que conduce las aguas de la Vertiente Ojos de Opache.

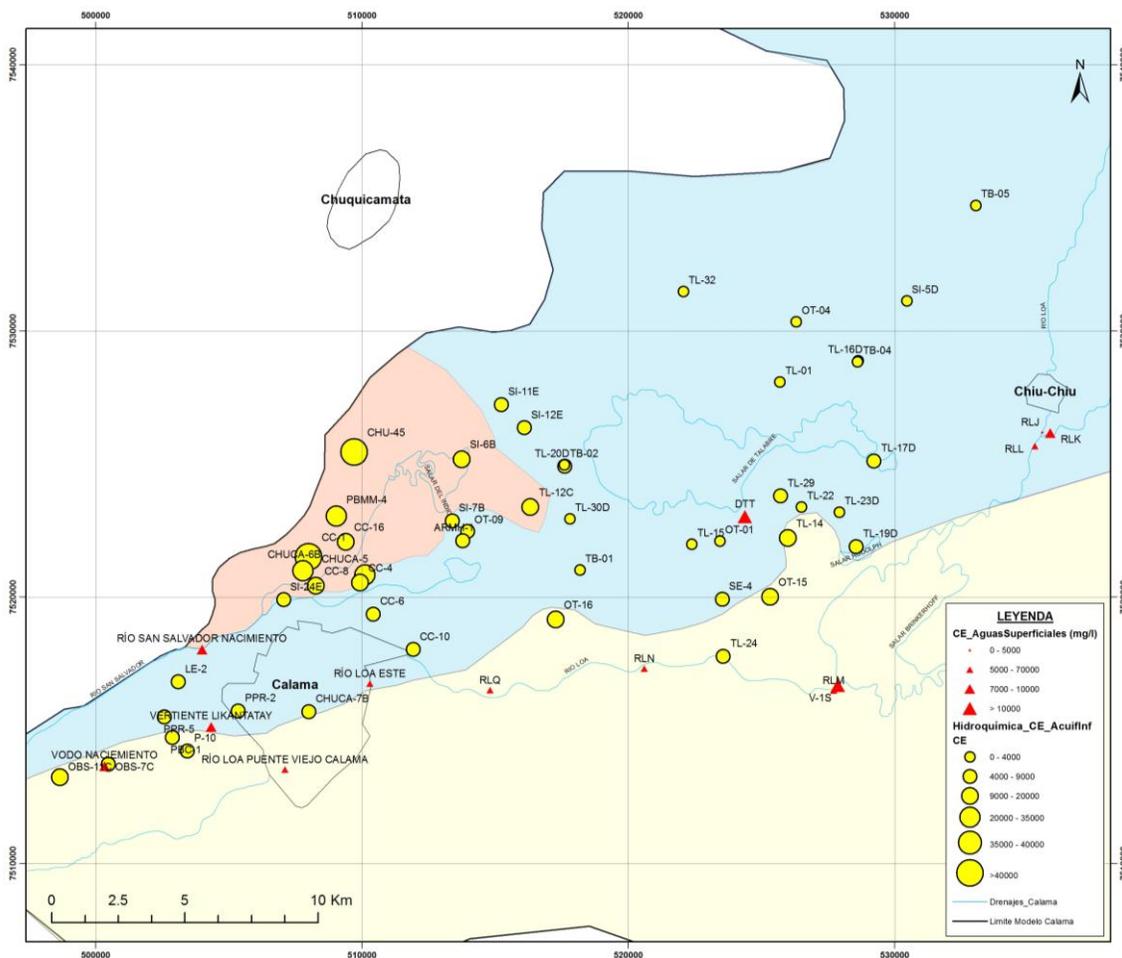


Figura 5-10. Mapa de puntos con conductividad eléctrica representativa para el acuífero inferior y representación de su modelo hidroquímico conceptual. (Fuente: Elaboración propia)

<u>Nombre</u>	<u>CE (μS/cm)</u>	<u>Nombre</u>	<u>CE(μS/cm)</u>	<u>Nombre</u>	<u>CE (μS/cm)</u>
ARMH-1	4100	TB-02	3200	TL-14	12200
CC-1	45000	P-10	8500	TL-15	3200
CC-10	4300	PBC-1	7400	TL-16D	2400
CC-16	20000	PBMM-4	22300	TL-17D	6000
CC-4	14000	PPR-2	4300	TL-19D	5800
CC-6	4500	PPR-5	6000	TL-20D	8000
CC-8	16000	SE-4	5200	TL-22	3000
CHU-45	45000	SI-11E	6500	TL-23D	2800
CHUCA-5	25000	SI-12E	6400	TL-24	8000
CHUCA-6B	26000	SI-24E	8000	TL-29	4300
CHUCA-7B	6500	SI-5D	2200	TL-30D	3800
LE-2	5100	SI-6B	17800	TL-32	2800
OBS-11C	10100	SI-7B	4200	TB-02	3200
OBS-7C	9000	TB-01	3400		
OT-01	4000	TB-04	2000		
OT-04	2200	TB-05	2100		
OT-09	5300	TL-01	2200		
OT-15	14000	TL-12C	12600		

Tabla 5-8. Listado de puntos con los valores de conductividad eléctrica utilizados como representativos para el acuífero inferior.

5.4 Análisis hidroquímico - Sulfatos (SO_4)

El análisis de las concentraciones del sulfato en la zona permite usarlo como parámetro indicador de las infiltraciones desde los tranques de relaves sobre las aguas subterráneas, tratándose de un parámetro estable cuya concentración en las aguas claras de relave es superior a las concentraciones presentes en las aguas superficiales y subterráneas de la zona.

Las aguas claras de los tranques de relaves son aguas muy cargadas en sulfatos debido al proceso industrial minero del cual proceden. Por contra, una muestra de agua destilada representaría un agua en extremo liviana o con una carga de sulfatos mínima y en aguas subterráneas, los niveles iniciales de las concentraciones de los sulfatos son normalmente bajos.

Por lo anterior, la medida de la concentración de sulfatos tiene una relación directa con la mezcla de aguas provenientes del tranque de relaves y con el tiempo de duración del contacto entre estas. Por ejemplo, un extremo de agua subterránea muy cargada en sulfatos significaría encontrarse en una zona muy cercana a una hipotética pluma de infiltración de un tranque de relaves.

De esta forma, el análisis químico de la evolución y estado de los sulfatos en la cuenca de Calama en la cual existe un tranque de relaves de dimensiones importantes, permite obtener la relación entre éste y las aguas subterráneas, donde se puede esperar que las aguas subterráneas posean concentraciones de sulfatos más livianas en áreas alejadas del tranque, y a medida que se acercan a esas áreas, las aguas se vayan cargando de sulfatos de forma progresiva en la dirección piezométrica de flujo. Además, este patrón de enriquecimiento progresivo desde aguas livianas hacia aguas más cargadas, está relacionado a su vez con la homogeneidad de los sedimentos y la conductividad hidráulica del medio. En las zonas del acuífero en que las aguas subterráneas se mueven más rápido tendrán mayor renovación, y por lo tanto, el agua no tendrá tanto tiempo para cargarse con solutos como puede ocurrir con aquellas zonas del acuífero donde la conductividad hidráulica es menor y que sí tienen mucho tiempo para equilibrarse con el medio sedimentario.

Una de las ventajas de contar con un mapa de sulfatos para cada unidad acuífera, es que producto de la relación con la conductividad hidráulica, se puede observar indirectamente las zonas de mezcla y observar cuáles son las zonas que tienen menor afección y por lo

tanto, dónde se presume que el agua fluiría más rápido. Esto se traduce en una observación indirecta de la red piezométrica de flujo y a su vez, permite determinar cuáles son las zonas más cargadas de sulfatos y, por lo tanto, dónde el agua se mueve más lento o con una renovación relativamente inferior.

En el caso de la gran cuenca de Calama, y producto de la abundancia de información en amplios sectores, ha sido posible realizar este tipo de análisis.

La metodología utilizada considera la obtención de "promedios representativos" de los registros históricos de medida de concentración de sulfatos. Estos promedios representativos se consideran en algunos casos la selección de subconjuntos más fiables de datos, para evitar utilizar datos erróneos, limpieza de periodos de estabilización al comienzo de la construcción de los pozos entre otros. Como resultado de esta manipulación de información, y para facilitar la comprensión de las cifras representativas, se han dispuesto cifras redondas y cerradas como representativas de los rangos de concentración de sulfatos al que pertenecen los puntos. Por ejemplo, si un pozo promediaba 2.436 mg/l, se ha filtrado simplemente como 2.400 mg/l.

Para la representación gráfica de la información se han dispuesto estos promedios representativos de las concentraciones de sulfatos para capa punto, captación subterránea o punto de agua superficial en el análisis de que se presenta a continuación.

5.4.1 Acuífero superior

En la **Figura 5-11** se muestra la distribución espacial de los puntos del acuífero superior con datos de concentración de sulfatos para cada punto muestreado en la cuenca de Calama, junto a sus valores representativos y la interpretación gráfica de las zonas de conductividad eléctrica propuestas en el apartado anterior **Figura 5-9**. Los valores utilizados como representativos se disponen junto al listado de puntos en la **Tabla 5-9**.

En una descripción general del patrón de valores representativos de sulfatos se pueden observar como la zona aguas arriba del salar de Talabre se compone de los valores más bajos de sulfatos en la cuenca, siendo un rango entre 100 y 500 mg/l; inmediatamente al norte de la ciudad de Calama y sobre el salar del Indio se observa una zona con los valores más altos de sulfatos, con un rango de concentraciones situado entre 1000 - >5000 mg/l; y al oeste de la zona de estudio, en la zona de salida un rango de valores entre 280 - 1300 mg/l.

La zona de valores elevados al norte de Calama y salar del Indio, se extiende como una pluma hasta el borde sur del salar de Talabre. Asimismo, el borde sur y oeste del salar de Salar de Brinkerhoff registra valores moderados de sulfatos. Esta zona de valores más altos de sulfatos pueden tener su origen en su pertenencia como aguas de salar, infiltración desde las actividades mineras y por lo tanto con un mayor enriquecimiento de solutos y/o producto de menores permeabilidades en los sedimentos de esas zonas.

En este contexto, el modelo hidroquímico conceptual basado en la CE (**Figura 5-11**) propuesto en la sección 5.3.1 para el acuífero superior, coinciden la zonificación de valores altos de CE con la zona alta de valores de sulfatos, pudiendo delimitar bastante bien esta pluma con los datos existentes.

La situación geográfica de la zona de mezcla definida en el modelo hidroquímico de la CE y ubicada entre el tranque Talabre y el salar del Indio coincide con una zona de mezcla de aguas con diferente carga de sulfatos, por lo que es coherente con la definición de una zona con sedimentos de menor permeabilidad y con una relación directa con las infiltraciones producidas por el tranque Talabre. Con el conocimiento actual, estas hipótesis al igual que una combinación de ellas, podrían ser válidas.

Adicionalmente, los puntos localizados al sur-oeste de Calama, en general muestran un rango de valores entre 280 - 500 mg/l, valores muy parecidos a los valores de las aguas superficiales como la de la vertiente de ojos de Opache. Como ya se comentó

anteriormente, en esta zona existe una fuerte caída de la topografía produciendo que el acuífero superior termine aflorando en distintas vertientes hasta drenarse por completo e incorporando sus caudales a los cursos superficiales de los ríos Loa y San Salvador. La vertiente que posee el mayor caudal de drenaje y más importante corresponde a la Vertiente Ojos de Opache, que se puede reconocer en la **Figura 5-11** como VODO Nacimiento, donde se encuentran los puntos CC-14 y CC-15. En estos puntos se aprecia el valor en concentración de sulfatos del pozo CC-14 el cual supera los 1000 mg/l, en cambio, en el CC-15 el valor no pasa de los 300 mg/l. El CC-14 es el único punto en el que se da esta concentración casi difiriendo en un orden de magnitud de las concentraciones de los puntos de alrededor. Los valores de sulfatos en este punto podría asociarse a una fuente de sulfatos local y no regional.

En conclusión, en el acuífero superior se han podido definir tres zonas en función de los valores de la concentración de los sulfatos; una zona alta dónde las concentraciones no superan los 500 mg/l, una zona de mezcla o zona del Indio-Talabre dónde los valores de sulfatos se mueven en un rango entre 1000 - >5000 mg/l y la zona de salida dónde por lo general los valores no superan los 300 mg/l. En contraste, la llamada pluma de altos valores de sulfatos al norte de la ciudad de Calama, correspondería a la zona de la cuenca con una menor velocidad de renovación y por lo tanto en donde el agua se mueve más lento y en las otras zonas, el agua tendría un tiempo de residencia mayor y por lo tanto se movería a mayor velocidad.

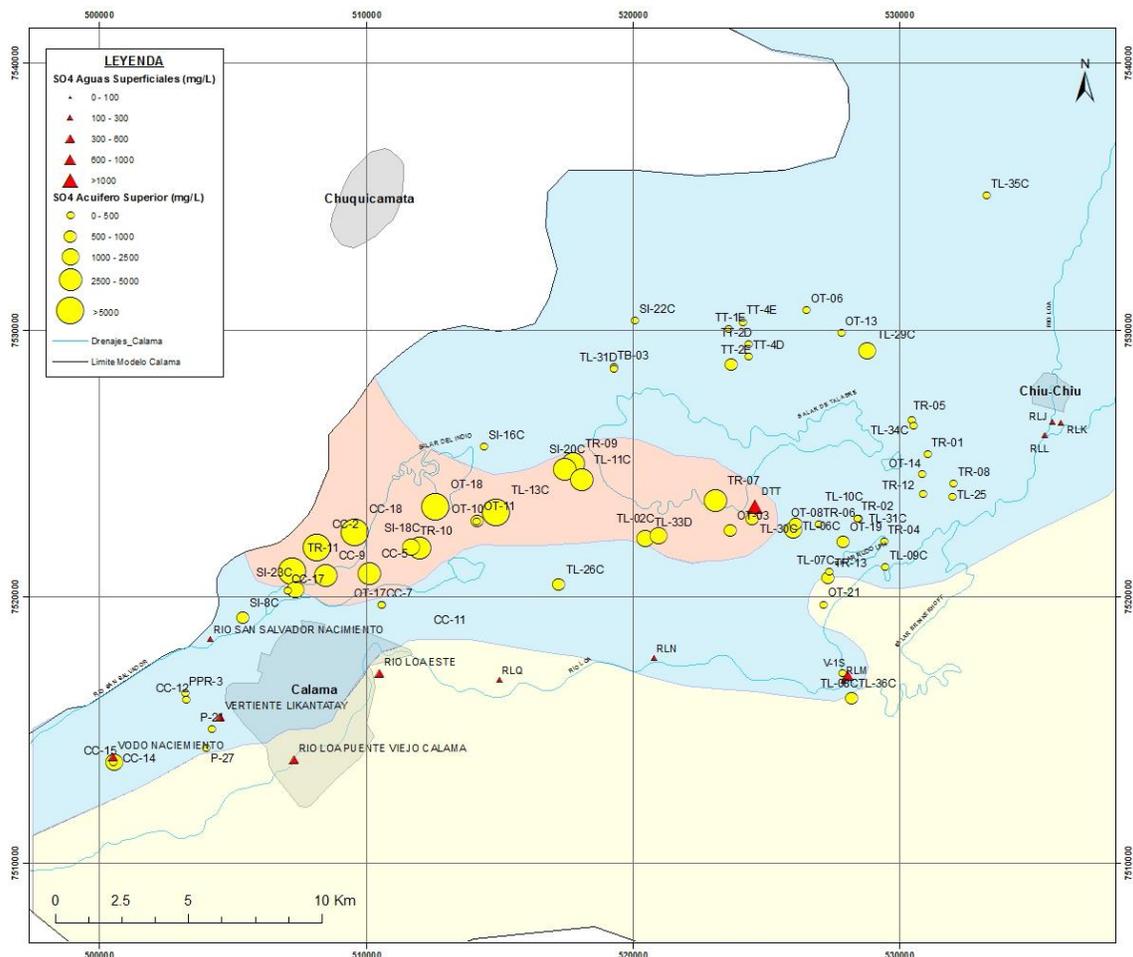


Figura 5-11. Mapa de puntos con concentración de sulfatos representativos para el acuífero superior con la representación del modelo hidroquímico conceptual de la conductividad. (Fuente: Elaboración propia)

Nombre	SO₄ [mg/l]						
CC-11	2900	OT-14	170	TL-07C	450	TR-02	180
CC-12	180	OT-17	427	TL-08C	190	TR-04	325
CC-14	1300	OT-18	17000	TL-09C	350	TR-05	190
CC-15	280	OT-19	700	TL-10C	175	TR-06	375
CC-17	370	OT-21	475	TL-11C	3200	TR-07	3000
CC-18	17000	P-21	314	TL-13C	8000	TR-08	190
CC-2	8000	P-27	355	TL-25	260	TR-09	4000
CC-3	700	PPR-3	299	TL-26C	750	TR-10	1900
CC-5	4000	SI-16C	300	TL-29C	2300	TR-11	9000
CC-7	400	SI-18C	3500	TL-30C	700	TR-12	200
CC-9	4500	SI-20C	3500	TL-31C	180	TR-13	800
OT-03	800	SI-22C	220	TL-31D	190	TT-1E	115
OT-06	100	SI-23C	2000	TL-33D	1800	TT-2D	150
OT-08	1400	SI-8C	900	TL-34C	170	TT-2E	600
OT-10	380	TB-03	200	TL-35C	90	TT-4D	170
OT-11	600	TL-02C	1100	TL-36C	600	TT-4E	125
OT-13	125	TL-06C	1000	TR-01	170		

Tabla 5-9. Listado de puntos con los valores de concentración de sulfatos utilizados como representativos para el acuífero superior.

5.4.2 Acuífero inferior

En el caso del acuífero inferior, el análisis de los datos de concentraciones de sulfatos está relacionada con la infiltración de la recarga la cual requiere de un trayecto más largo puesto que estos sedimentos se encuentran a mayor profundidad. Además, hay que tener en cuenta que el tipo de material sedimentario aluvial que es atravesado por el flujo de aguas subterráneas más profundo no es igual que los sedimentos más calcáreos del acuífero superior y por lo tanto el tiempo de residencia será mayor.

En la **Figura 5-12** se muestra la distribución espacial de los puntos del acuífero inferior con concentraciones de sulfatos, junto a sus valores representativos y una interpretación gráfica del modelo hidroquímico de la CE. Los valores utilizados como representativos se disponen junto al listado de puntos en la **Tabla 5-10**.

La descripción general del patrón de valores representativos de concentración de sulfatos permite destacar que inmediatamente al norte de la ciudad de Calama y salar Del Indio se observa una zona con los valores más altos de sulfatos, con un valor máximo que alcanza los 10000 mg/l. A diferencia de lo que ocurre con el acuífero superior, esta zona no se extiende hacia el Salar de Talabre, se acota completamente al oeste del salar del Indio y no se define una zona de mezcla entre ambos sectores, como en el caso del acuífero superficial. Adicionalmente, en lo alto de la cuenca, se observa un patrón de enriquecimiento progresivo en la concentración de sulfatos que comienza en el extremo nor-este **Figura 5-12**, con valores localizados en un rango entre 60 – 300 mg/l. Hacia aguas abajo, y por un canal central al igual que con el acuífero superior y consistente con el modelo hidroquímico de la CE, el agua subterránea del acuífero inferior se va enriqueciendo progresivamente con rangos de entre 300 – 1000 mg/l inmediatamente después de su paso entre el sur del salar de Talabre y el oeste del salar de Brinkerhoff. En el extremo sur-oeste de la cuenca en el sector de las vertientes, la concentración de sulfatos aumenta hasta alcanzar los 1300 mg/l en el último punto muestreado, pozo OBS-11C. Además, la tercera zona estaría limitando el canal central por el sur, sin embargo, los datos que sustentan la presencia de esta tercera zona son escasos y sólo se cuenta con los pozos SE-4, CC-10 y TL-24.

La pluma de valores elevados que se encuentra al norte de Calama y bajo el salar Del Indio pueden tener su origen como aguas de salar relictos, considerando que se encuentran separados de los salares superficiales actuales por una capa de acuitardo y que el tiempo de residencia y tiempo de transporte son mayores por lo que el aumenta el

tiempo de adquisición de solutos. Además, existe una zona inmediatamente al norte del salar de Talabre, con un rango de concentración de sulfatos entre 800 – 2500 mg/l pudiendo estos tener un comportamiento idéntico con el salar de Talabre que las muestras del salar del Indio.

De esta forma, para el acuífero inferior el modelo hidroquímico basado en los sulfatos propone una fuente de aguas de recarga más “frescas” o livianas compuestas de valores promedio entre 60 – 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el extremo nor-este. Esta agua de recarga se movería desde el sector nor-este (hoyas del río Loa-norte y río Salado) a través de un canal central, recorriendo toda la extensión de la cuenca hasta salir de forma subterránea por el extremo sur-oeste. Durante su trayecto de unos 30 km, el flujo subterráneo profundo se irá cargando progresivamente en solutos hasta alcanzar los 1300 mg/l en el último punto con datos, pozo OBS-11C. La ausencia de información al sur-oeste del pozo OBS-11C impide extender de forma conclusiva la modelación hacia el extremo sur-oeste de la cuenca. Sin embargo, se estima que el flujo subterráneo del acuífero inferior no debiese aflorar en el entorno inmediato a la zona de modelación, puesto que la carga hidráulica confinada que muestra el pozo OBS-11C ubica el techo del acuífero inferior recién a partir de 130 m de profundidad sobre el lecho de la quebrada que conduce las aguas de la Vertiente Ojos de Opache.

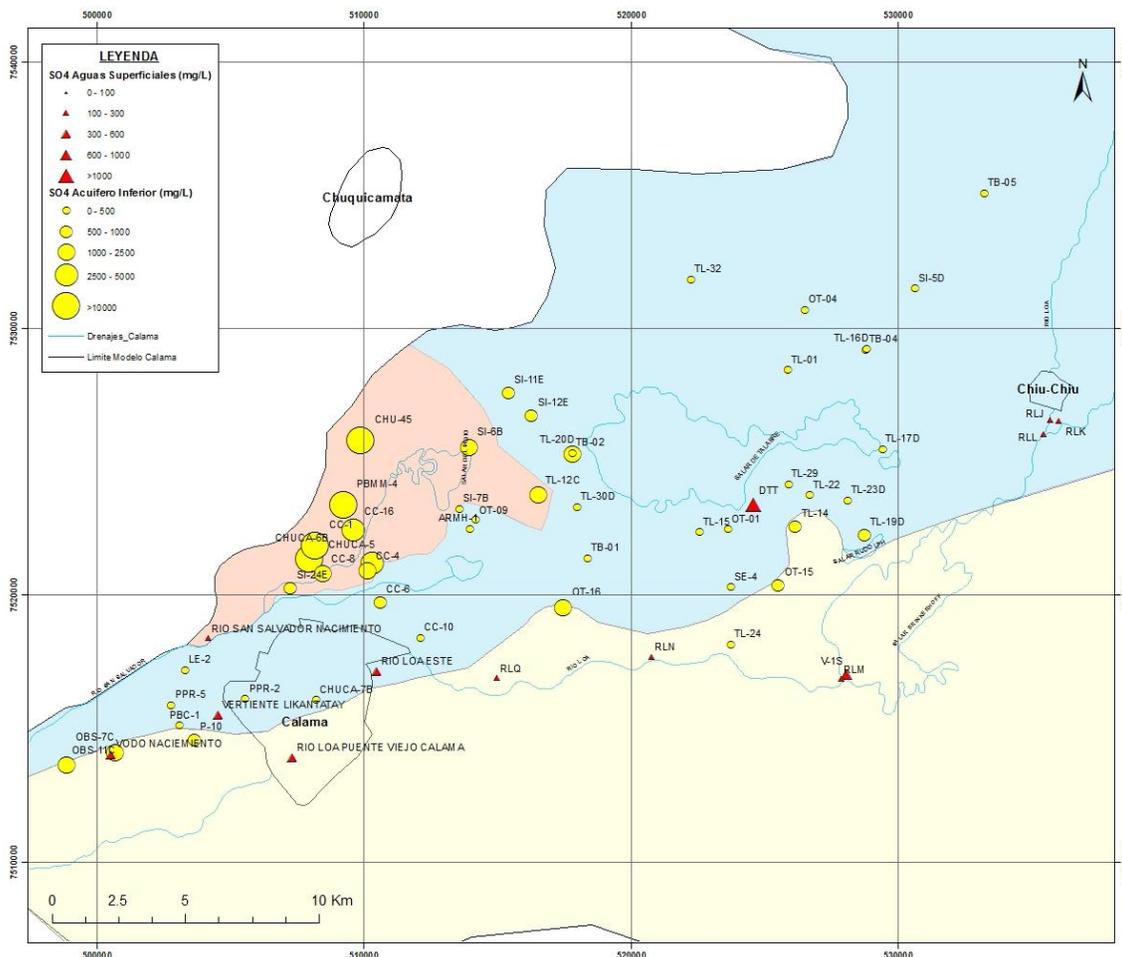


Figura 5-12. Mapa de puntos con concentración de sulfatos representativos para el acuífero inferior con la representación del modelo hidroquímico conceptual de la conductividad. (Fuente: Elaboración propia)

<u>Nombre</u>	<u>SO₄ [mg/l]</u>	<u>Nombre</u>	<u>SO₄ [mg/l]</u>	<u>Nombre</u>	<u>SO₄ [mg/l]</u>
ARMH-1	350	OT-16	1500	TL-14	700
CC-1	5100	P-10	904	TL-15	150
CC-10	350	PBC-1	375	TL-16D	75
CC-16	4000	PBMM-4	7000	TL-17D	300
CC-4	1500	PPR-2	222	TL-19D	1000
CC-6	700	PPR-5	372	TL-20D	2300
CC-8	2000	SE-4	350	TL-22	160
CHU-45	10000	SI-11E	1000	TL-23D	150
CHUCA-5	3500	SI-12E	800	TL-24	450
CHUCA-6B	9000	SI-24E	900	TL-29	200
CHUCA-7B	150	SI-5D	75	TL-30D	300
LE-2	197	SI-6B	2300	TL-32	150
OBS-11C	1826	SI-7B	350	TB-02	300
OBS-7C	1230	TB-01	300		
OT-01	300	TB-04	75		
OT-04	150	TB-05	75		
OT-09	350	TL-01	60		
OT-15	1000	TL-12C	1800		

Tabla 5-10. Listado de puntos con los valores de concentración de sulfatos utilizados como representativos para el acuífero inferior.

6. Modelo Conceptual

La modelación conceptual consiste en una integración de toda la información y antecedentes sobre la geología, hidrología e hidrogeología. Estos tres aspectos han sido abordados en detalle en los capítulos precedentes, a excepción de la hidrología que se incluye aquí. Esta integración nos permite desarrollar un modelo sobre la geometría acuífera, las unidades hidrogeológicas que la componen y la distribución de sus parámetros elásticos como transmisividad y almacenamiento, además de las condiciones de borde o contorno, las relaciones de las cargas hidráulicas de cada nivel acuífero y cuantificación de las componentes del balance.

La modelación conceptual es la pieza más importante en un estudio hidrogeológico, puesto que es un reflejo del conocimiento integrado de todos los demás aspectos de la cuenca. En este sentido, representa la base sobre la que se cimienta una posterior modelación numérica. De esta forma, la calidad y representatividad de todo modelo numérico reside en la solidez del modelo conceptual.

En el desarrollo del modelo conceptual para la gran cuenca de Calama se han considerado una serie de sub-etapas básicas. Cada una de ellas aborda una parte de los objetivos específicos de la modelación y puede ser actualizada de acuerdo al avance en las investigaciones y conocimiento hidrogeológico. A continuación se describen aquellas relevantes y consideradas en nuestra modelación:

- Dominio y geometría de modelación: A partir de la información geológica, geomorfológica e hidrogeológica, se define un dominio y extensión de modelación. Asimismo, y en función de los antecedentes disponibles se establecen las unidades hidrogeológicas a incluir en el modelo. Como consecuencia de la definición de dominio y extensión, en esta sección también se define la geometría final adoptada en el proceso de modelización numérica.
- Contexto hidrológico: Se describen y desarrollan los principales aspectos climáticos, hidrológicos y topográficos de la zona, que controlan y modelan el sistema de recursos hídricos en la gran cuenca de Calama.
- Contexto hidrogeológico: Recopilación de los valores de conductividad hidráulica (K) y almacenamiento específico (S_s) de toda la cuenca. Esta recopilación permite determinar las condiciones de flujo al interior de la cuenca, identificar las zonas que

trasmite los recursos y aquellas en que el flujo es muy lento o prácticamente inexistente. Asimismo, se observa en términos cualitativos la elasticidad hidráulica o las zonas que responderán más rápido/lento a cambios naturales o antrópicos. También se identifican las zonas que se mantienen veladas debido a la falta de datos.

- Balance hídrico: Identificación y cuantificación de las entradas y salidas de agua en el sistema. Se valora si el sistema en su conjunto se encuentra en equilibrio o bien está cediendo o acumulando agua desde el almacenamiento.

6.1 Dominio y geometría de modelación

En la gran cuenca de Calama desde el punto de vista geomorfológico se distinguen tres unidades morfo-estructurales de este a oeste: el macizo de Los Andes, la depresión intermedia constituida por sierras y pampas y la Cordillera de la Costa. Los límites al norte corresponden a la Sierra del Medio, y por el sur a la Sierra Limón Verde.

Los límites de la modelación, propuestos aquí, han sido delimitados utilizando criterios geomorfológicos, sedimentológicos y la existencia de antecedentes como perforaciones o geofísica. En relación con las unidades acuíferas, el alcance de este trabajo considera sólo unidades acuíferas de origen sedimentario. La conexión con unidades acuíferas en roca fracturada ha sido dejada explícitamente fuera del dominio y alcance de modelación puesto que excede los objetivos principalmente recopilatorios y compilatorios del proyecto trazados por DGA. Sin embargo, a partir del trabajo realizado y de las condiciones existentes observadas en la cuenca, para sucesivos estudios se recomienda considerar el aporte y conexión con las unidades volcánicas superficiales y subsuperficiales que se disponen en las partes más altas de la cuenca en donde se produce la infiltración de la recarga.

De esta forma, se define la extensión en planta del sistema a modelar en la **Figura 6-1**, dejando fuera del modelo las zonas distales en las que se estima o se ignora si existen materiales detríticos/acuíferos en profundidad. Las dimensiones de la zona a modelar se extienden aproximadamente en 80 Km en sentido este-oeste, y 70 Km en sentido norte-sur, con más de 5.000 Km² de área total.

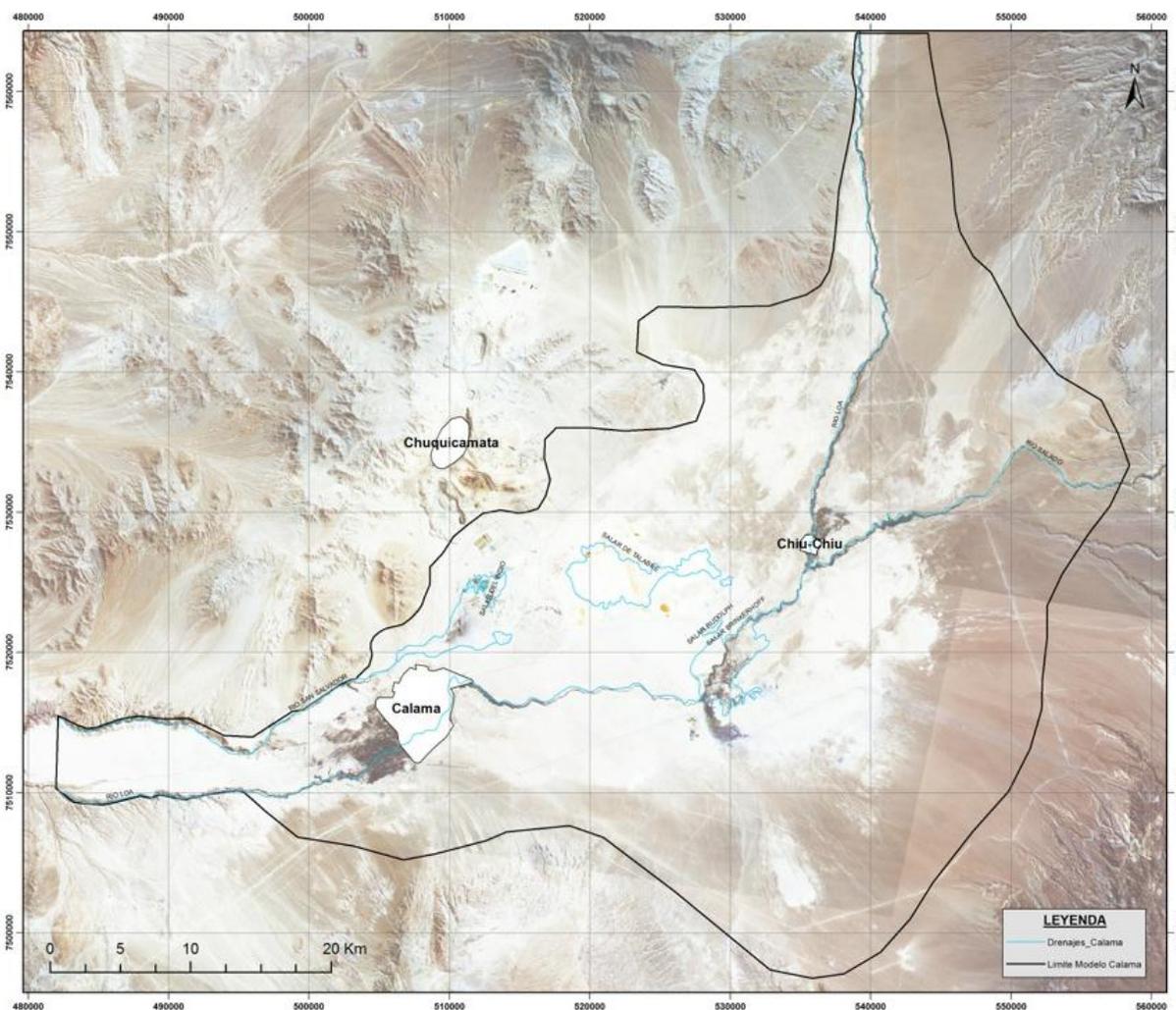


Figura 6-1. Ubicación en planta del contorno del modelo conceptual. Fuente: elaboración propia.

6.1.1 Modelos conceptuales existentes

Tal como ha sido descrito en el Capítulo I, existen 3 trabajos previos que han modelado conceptual y numéricamente algunas áreas al interior del modelo propuesto aquí. Estos 3 modelos corresponden a los trabajos desarrollados por Codelco, Minera El Tesoro y El Toqui. La extensión de las áreas de modelación de cada uno de estos 3 trabajos, se restringen a las zonas de interés y disponibilidad de información que tiene cada empresa, de forma que algunas zonas se solapan entre ellas pero ninguna las contiene a todas. Hasta ahora, los modelos existentes no han tenido como objetivo considerar el sistema de

recursos hídricos en su conjunto y, por lo tanto extender los límites de la modelación para abordar la gran cuenca de Calama completa, como se puede observar en la **Figura 6-2**.

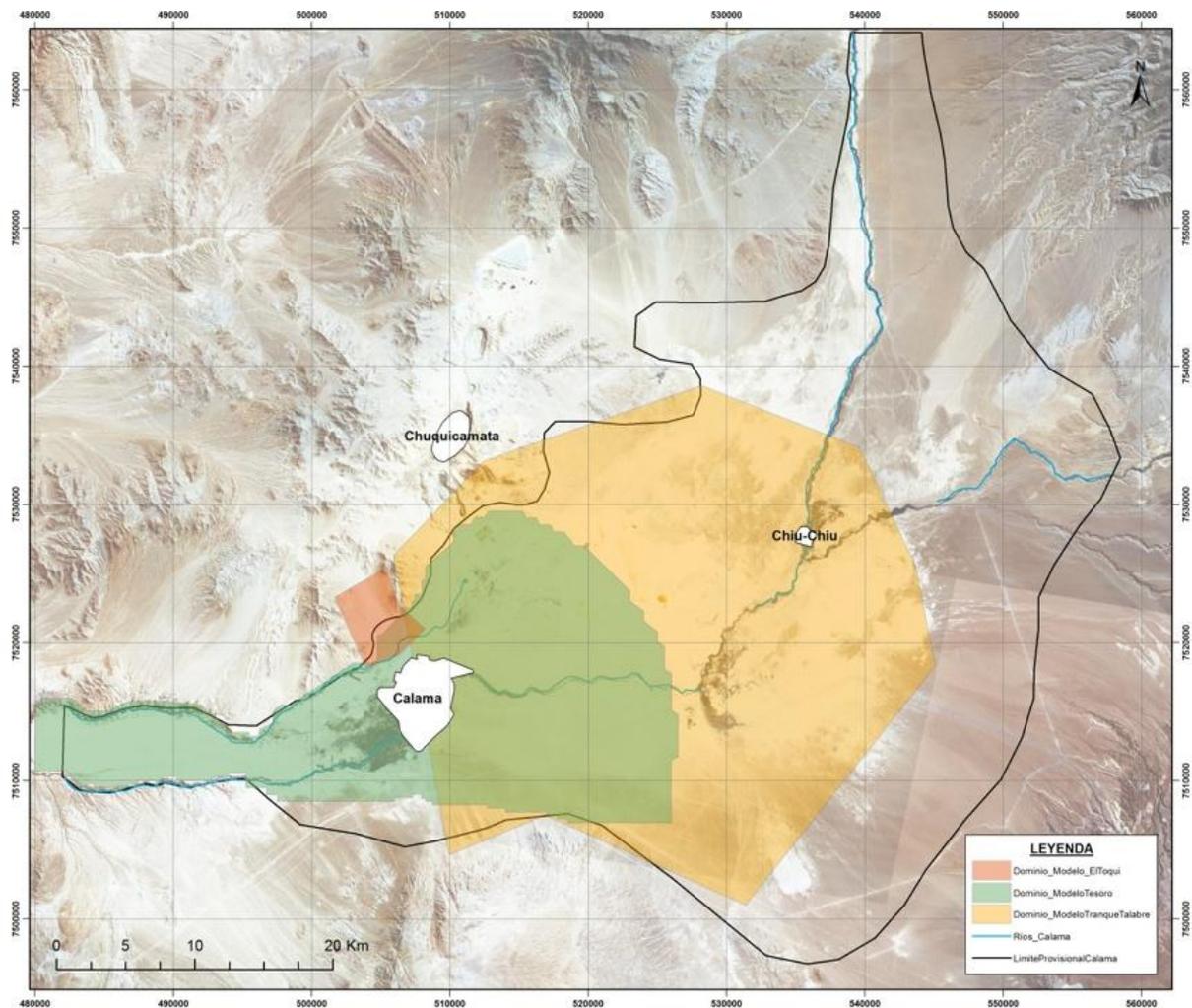


Figura 6-2. Ubicación del contorno objeto de estudio con los contornos de los modelos del Tesoro, Tranque Talabre y Toqui. Fuente: elaboración propia.

6.2 Hidrología

6.2.1 Cursos de agua superficial

El principal río que discurre por la cuenca de Calama es el río Loa, que nace en la falda norte del volcán Miño y recorre una larga distancia hasta la localidad de Chacance (fuera del área de modelación), donde se junta por su ribera derecha con el río San Salvador para dirigirse posteriormente hacia el mar.

En la zona modelada el curso del río Loa (que ingresa desde el norte) recibe el aporte del río Salado cerca del poblado de San Francisco de Chiu-Chiu. Luego de la junta con el Salado y siguiendo su trayectoria hacia el sur atraviesa el Salar de Rudolph y Brinkerhoff. En el extremo sur de estos salares, el rumbo del Loa cambia abruptamente, tomando dirección este-oeste y dirigiéndose en dirección hacia la costa camino a la ciudad de Calama. Al llegar a Calama, el río Loa vuelve a cambiar bruscamente el curso y se orienta hacia el sur-oeste. En el segmento final (al interior del área de modelación), vuelve a reorientarse en dirección este-oeste hasta salir del dominio por el extremo oeste.

Un tributario importante del río Loa es el río Salado, y que desemboca en el Loa a 3 Km aguas abajo de la población de Chiu Chiu. El río Salado tiene su origen en más de 30 vertientes frías y termales surgentes, además de recibir los aportes de la precipitación y deshielos. Las aguas del río Salado están en contacto con sistemas hídricos de origen hidrotermal que afectan su composición química. El estudio y relación geotérmica del río Salado escapan del alcance del presente estudio, sin embargo se mencionan aquí para explicar parte de las consideraciones desarrolladas en el capítulo de hidroquímica sobre las distintas huellas hidroquímicas y zonas de recarga.

Al sur-oeste de la ciudad de Calama, se produce el afloramiento natural de aguas subterráneas que luego se convierte en el río San Salvador. Este afloramiento se genera por la intersección de la superficie piezométrica con la topografía que en aquellos sectores desciende abruptamente hacia el oeste. El San Salvador discurre semi-paralelo al curso del río Loa y separado entre 3 y 5 Km de distancia, muy encajonado y a una profundidad del lecho muy parecida a la del río Loa.

Todos los ríos se consideran en su relación con el modelo conceptual producto de la interconexión existente con los niveles acuíferos. Los distintos ríos se consideran conectados con el acuífero superior, mientras que el acuífero inferior no se relacionaría mayormente con los cauces de aguas superficiales.

El catastro de cursos superficiales de la cuenca se completa con la caracterización de los manantiales, considerados como afloramientos (descarga directa) del acuífero superior. Estos manantiales se localizan en cuatro vertientes principales: Likantatay, la Cascada, Ojos de Apache en Enaex y Ojos de Apache en el nacimiento. Su cuantificación se presentará posteriormente en este informe.

6.2.2 Presencia de salares

Al interior del área de modelación, han sido descritos 3 unidades de salares independientes. El de mayor importancia espacial se ubica en el centro de la cuenca y corresponde al Salar de Talabre. En la actualidad, sobre este salar se dispone la construcción de un tranque de relaves para alojar los depósitos provenientes de las actividades minero-metalúrgicas de Codelco. Al sur-este de Talabre, se ubica el sistema de Salar Rudolph y Brinkerhoff, el cual es atravesado por el curso del río Loa. Y por último, proyectando lo que sería las cabeceras relictas del río San Salvador, inmediatamente al norte de la ciudad de Calama, se encuentra el Salar Del Indio. El estudio y análisis de las condiciones hidrogeológicas en que se encuentran estos cuerpos salares escapan del presente estudio. Sin embargo, a partir de los antecedentes compilados y relación que tienen estas unidades con la hidráulica e hidroquímica de la cuenca, se recomienda que su influencia y relación con los acuíferos sea abordada en próximos estudios.

6.2.3 Hidrometeorología

Topográficamente, la zona de estudio está comprendida entre los 1750 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la parte inferior de la cuenca situada al extremo occidental, y los aproximadamente 3000 msnm en la zona más oriental. En términos de su orografía, la zona de estudio se halla rodeada por diferentes cimas montañosas que tienen altitudes que se sitúan alrededor de los 4000 msnm (**Figura 6-3**).

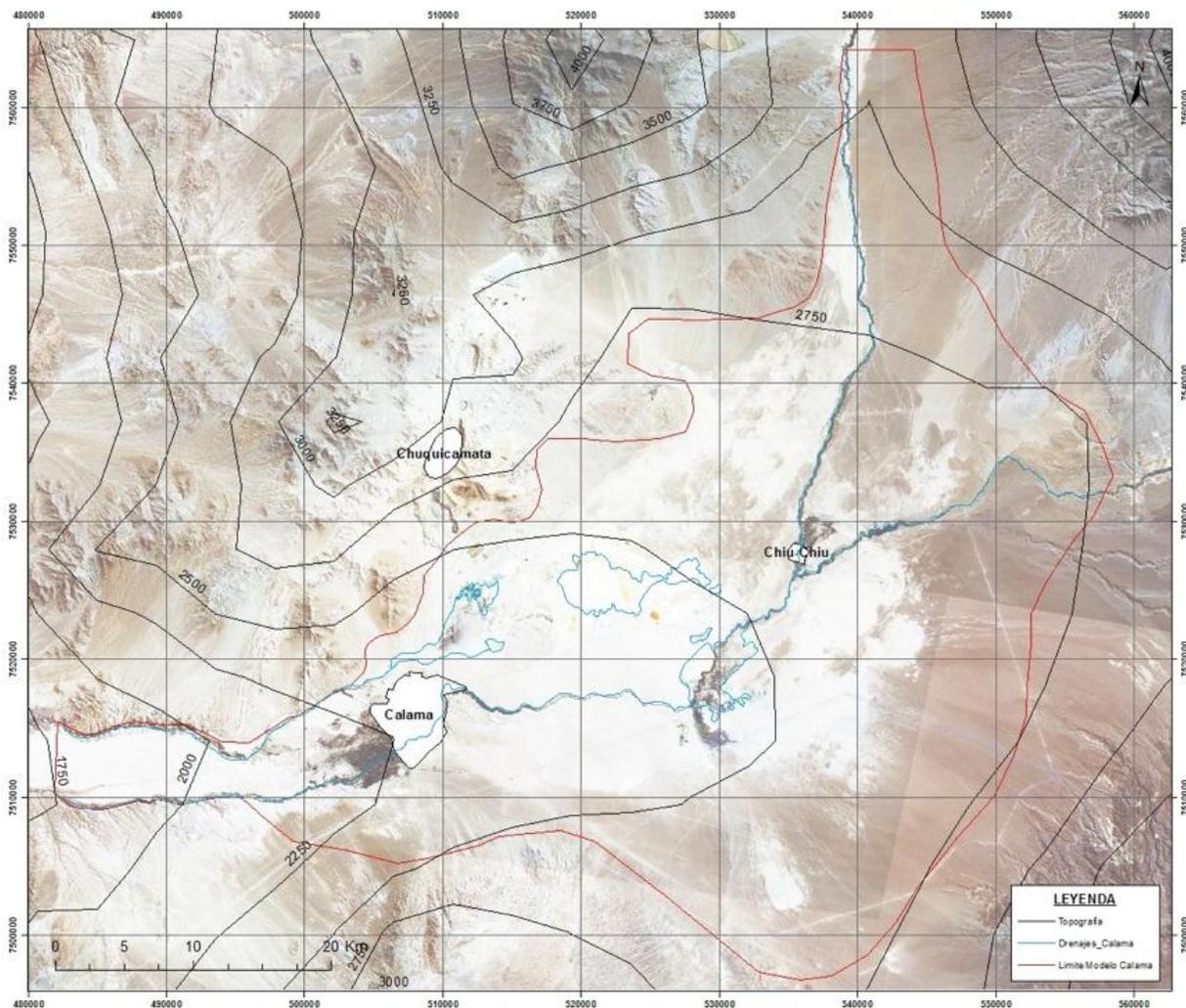


Figura 6-3. Ubicación del área de estudio con la topografía (Fuente: elaboración propia).

En términos climáticos, la topografía marca ciertos límites considerando tres regímenes climáticos:

- Clima desértico interior: se localiza en la pampa, sobre los 1000 msnm y sin influencia oceánica costera. Se considera un clima extremadamente árido, donde las precipitaciones anuales son de 0 mm y las temperaturas medias alcanzan los 18 °C.
- Clima desértico marginal de altura: se localiza en zonas por encima de los 2000 msnm, y debido a ello las temperaturas son moderadas, situándose el promedio anual entorno a los 10°C. En este subtipo climático aparecen algunas precipitaciones que fluctúan entre los 50 y 100 mm anuales, las cuales tienen lugar en los meses de verano producto del invierno altiplánico.

- Clima de estepa de altura: predomina en el sector altiplánico de la cuenca por encima de los 3000 msnm. Su principal característica es unas precipitaciones que pueden llegar a alcanzar valores de 300 mm anuales.

Existe, por tanto, una correlación entre la altura y la pluviometría. Esta correlación se observa en la **Figura 6-4**. Aunque en este gráfico se observa dispersión en los datos, se pueden considerar dos rectas que limitan la estadística de precipitación media anual con la altura:

- La superior, que representa el comportamiento de las estaciones que se ubican en una vertiente con exposición predominantemente al este.
- La inferior, que representa el comportamiento de estaciones ubicadas en una vertiente de exposición predominantemente oeste, o en sombras convectivas.

La recta superior representa el comportamiento de las cuencas del Salado, Pampa Llalqui, Calama y Salar de Llamara, mientras que la recta inferior representa la cuenca de San Pedro.

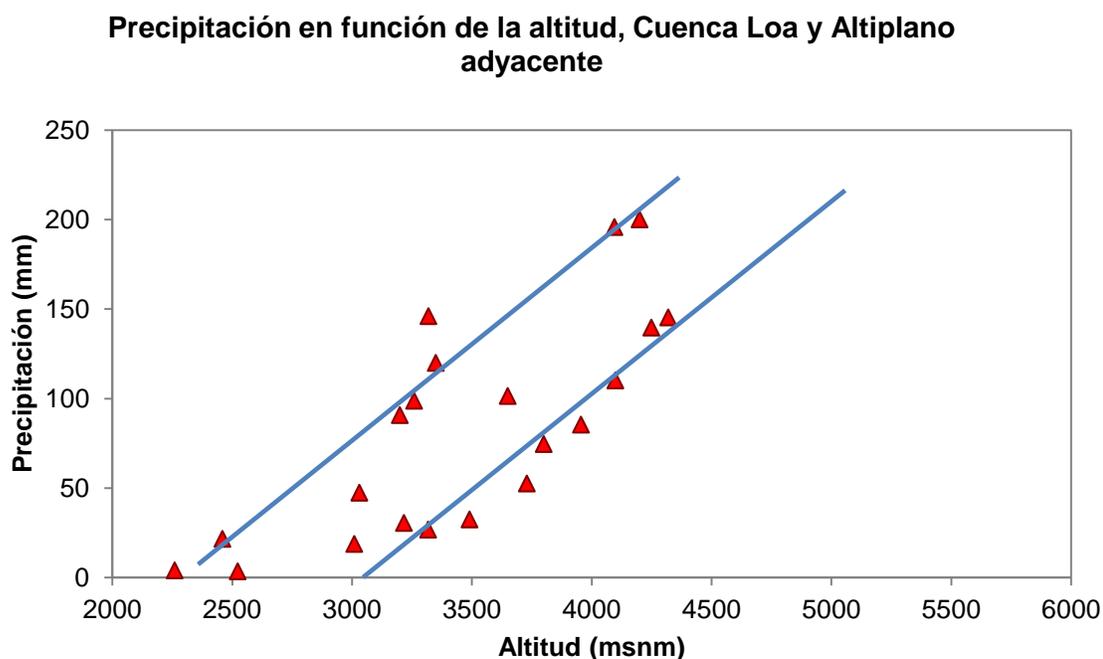


Figura 6-4. Valores de pluviometría anual en función de la altitud en los distintas estaciones meteorológicas del entorno de la zona de estudio (cuenca del río Loa y altiplano adyacente). Las dos líneas oblicuas marcan la región admisible de valores precipitación-altitud. (Fuente: Elaboración propia)

La cuenca del río Loa, tanto en su cuenca alta (sobre Lequena), como media (Lasana-Chiu Chiu), presenta un comportamiento mixto, el cual podría atribuirse a que esta cuenca presenta dos tipos de vertientes de exposición este y oeste. Por este motivo, se ha asumido para la cuenca del Loa un comportamiento intermedio entre ambas rectas.

El área definida entre las dos rectas incluye el conjunto de valores admisibles de precipitación-altitud para la zona. Ambas rectas tienen una pendiente de 0.11, indicando un gradiente de precipitaciones con la altitud que se puede evaluar en promedio en 110 mm de aumento de precipitación anual por cada 1000 m de incremento de elevación.

Para desarrollar el cálculo de la pluviometría en el área del modelo, se ha tenido en cuenta la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas de Calama y Chiu-Chiu para el período comprendido entre 1994 y 2009 (**Figura 6-5**).

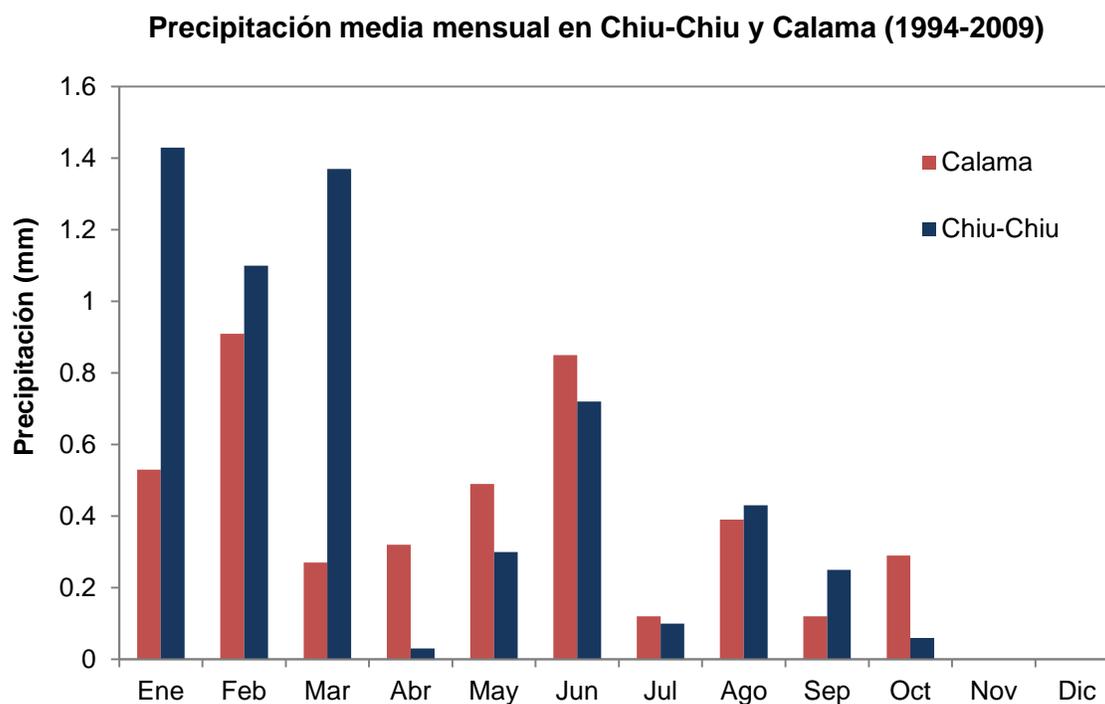


Figura 6-5. Precipitación media mensual para las estaciones de Calama y Chiu Chiu (Fuente: Aquaconsult, 2011).

6.3 Hidrogeología

6.3.1 Unidades acuíferas

A partir de la extensa revisión de antecedentes y del análisis realizado, en términos generales los materiales detríticos se pueden organizar en 3 unidades hidrogeológicas significativas (**Figura 6-6**). De techo a base, encontramos

- Acuífero Superior: Formado por calizas y areniscas, con un espesor variable (30 a 130 metros). Correspondería a la unidad UH-2, perteneciente a las formaciones Opache y Jalquinche. Desde el punto de vista de su comportamiento hidráulico, este acuífero tiene un carácter libre y es de permeabilidad muy variable.
- Acuitardo: Compuesto por arcillas y limos de potencia variable, perteneciente a la Formación El Loa (unidad UH-4) y cuyo comportamiento hidráulico se puede asociar a un acuitardo. El rango de potencias en la zona modelada se sitúa entre los 80 y los 100 metros, pudiendo llegar a tener espesores de hasta 200 metros.

La extensión de este acuitardo no abarca toda la zona de estudio, sino que se ubica en la parte central del contorno, tal y como se puede observar en la **Figura 6-7**.

- Acuífero Inferior: Formado por los depósitos de gravas aluviales y de piedemonte, pertenecientes a la unidad UH-5. En la zona modelada muestra una potencia variable promedio de entre 30 y 150 metros, y en algunas zonas particulares puede incluso superar los 400 metros de profundidad, según se ha podido determinar con la información disponible. Dada la distribución de capas el acuífero inferior se comporta hidráulicamente como un acuífero semiconfinado.

Debido a la condición de confinamiento impuesta por el acuitardo, las cargas hidráulicas entre los acuíferos superior e inferior pueden ser diferentes en extensas zonas de la cuenca. Esta situación se traduce en una semi-desconexión hidráulica, pero que requiere ser evaluada en mayor detalle para determinar el grado de desconexión y cuantificación de los flujos verticales por zonas. El alcance del proyecto no permite un análisis detallado del grado de conexión hidráulica entre los acuíferos, sin embargo si es posible identificar que en las zonas más altas de la cuenca, en donde no se observa la presencia del acuitardo (**Figura 6-7**), ambos acuíferos se encuentran en contacto directo y por tanto las cargas hidráulicas se pueden presuponer similares. Son estas zonas más altas en donde los acuíferos reciben sus recargas subterráneas.

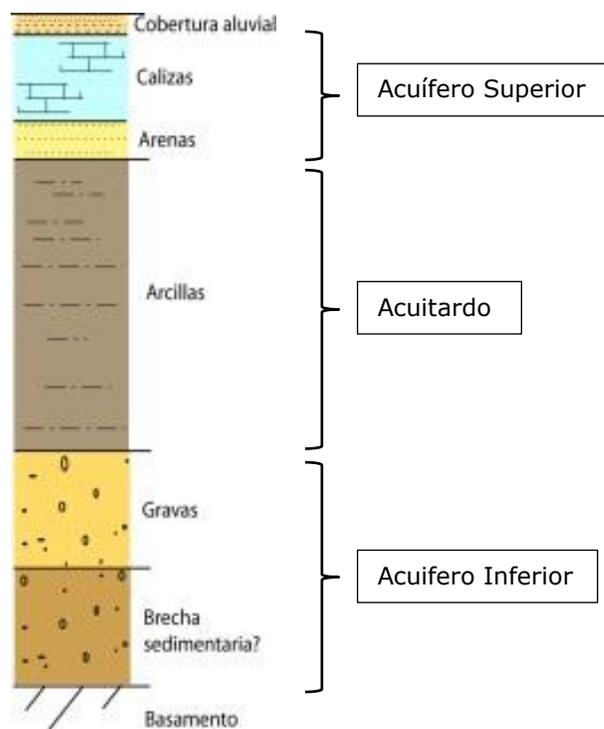


Figura 6-6. Columna estratigráfica tipo de la zona (Fuente: Montgomery & Associates, 2007)

infiltraciones producidas por la actividad minera en el borde nor-oeste y eventuales aportes de recarga del sector sur-este (sector Yalqui).

Los cálculos de balance hídrico subterráneo consideran aproximaciones en la estimación de cada una de sus componentes. Con frecuencia, los resultados de un balance son sujetos de ardua discusión y debate, especialmente cuando se trata de cuencas regionales en donde existen variadas componentes de entradas y salidas. Y especialmente cuando existen usuarios con intereses diversos sobre el uso de los recursos. En estos casos, la recomendación técnica sería presentar la estimación de cada componente junto con alguna medida de la dispersión de los cálculos y aproximaciones, mediante rangos que den cabida a las incertezas inherentes al proceso.

De esta forma, se presenta a continuación un listado de las componentes de entradas y salidas del sistema de aguas subterráneas, listadas por orden de importancia dentro del balance global.

En términos generales, las entradas al sistema corresponden a:

- Entradas laterales subterráneas desde los contornos norte y este, tanto para el acuífero superior como para el inferior.
- Infiltración desde el sistema de distribución de aguas urbanas.
- Recarga por infiltración de las aguas de regadío agrícolas
- Recarga por infiltración desde el Tranque de Talabre.
- Infiltración desde el sistema de distribución de aguas industriales mineras
- Recarga por infiltración de la precipitación
- Eventual entradas lateral subterránea desde los contornos sur-este (sector Yalqui).
- Infiltración desde los cursos de agua superficiales.

Las descargas corresponden a:

- Aporte de los acuíferos al curso de agua superficial del Río Loa.
- Descarga desde las vertientes y manantiales naturales hacia los cursos de agua superficial.
- Salidas producto de las extracciones por bombeo.

- Salidas laterales subterráneas por el contorno oeste, desde el acuífero inferior.
- Descarga por evaporación desde el suelo y cuerpos de agua libre.

De todos los componentes mencionados, en la **Figura 6-8** se presenta un esquema de aquellos componentes que han sido considerados en el cálculo del balance, y luego una descripción detallada de cada uno de los componentes.

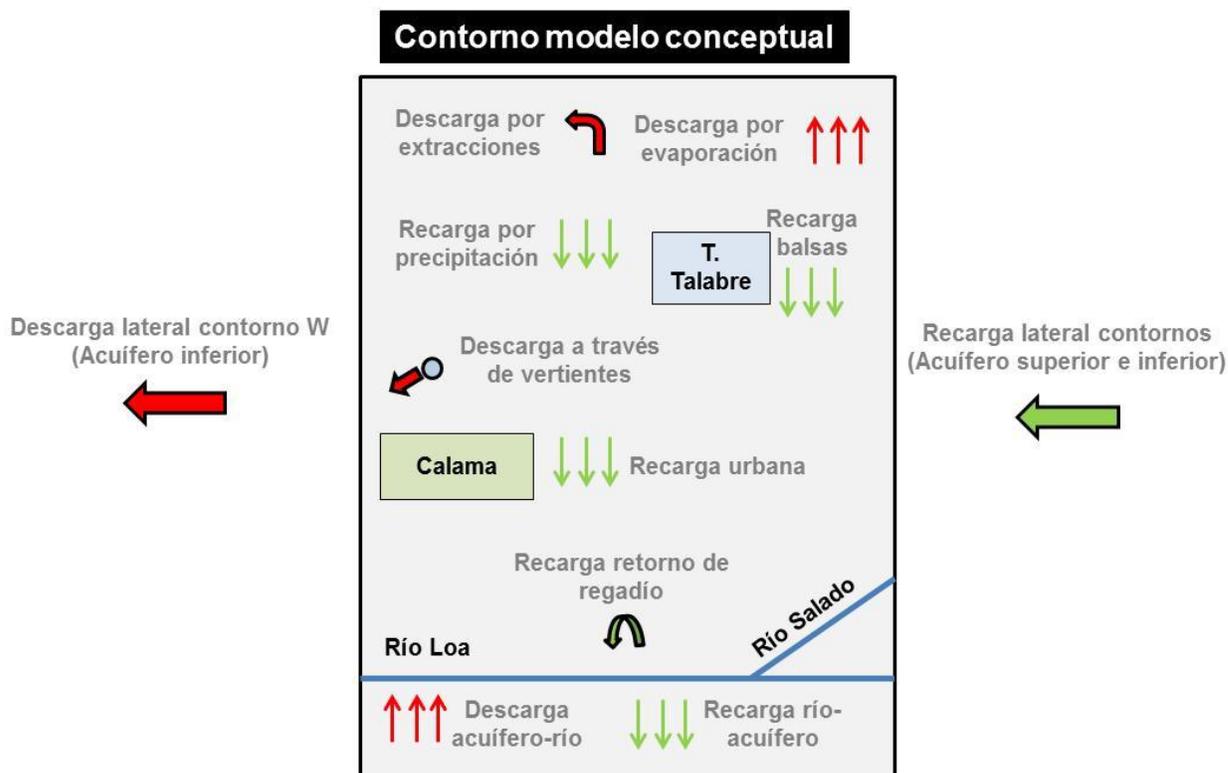


Figura 6-8. Balance hídrico conceptual de la zona (Fuente: elaboración propia.)

6.4.1 Entradas

Recarga subterránea a través de los contornos: Constituye la entrada más importante al sistema y se compone de caudales aportados de forma subterránea desde las unidades hidrogeológicas situadas en los márgenes de la cuenca. En la **Figura 6-9** se delimitan los contornos N y E como aquellos donde se produce el mayor aporte subterráneo al sistema a través del acuífero superficial y el profundo. De acuerdo al estudio S.I.T. 85 (DGA, Depto. de estudios y Planificación, 2003), sólo por la entrada norte a la altura del embalse Conchi existiría una entrada subterránea de aproximadamente 1200 l/s. Según

el estudio Dictuc 2005 el flujo subterráneo desde los contornos serían de aproximadamente 700 l/s. En el estudio realizado por Montgomery & Associates el año 2011, las entradas por los contornos corresponden a 1430 l/s, de los cuales 1.190 l/s se producen por el acuífero superior y 240 l/s por el acuífero inferior.

En ninguno de los estudios mencionados, existe un desarrollo acabado de esta componente, y por lo tanto se trata de estimaciones indirectas que conllevan un nivel de incerteza que debe ser considerado. Más aun, a excepción de los trabajos realizados por M&A en los estudios revisados escasamente se hace una distinción entre los aportes individuales de cada nivel acuífero. Asimismo, se encuentra ausente una distinción de los aportes provenientes desde el Loa alto (arriba del embalse Conchi) y de la cuenca del río Salado.

De acuerdo con la revisión y análisis de los antecedentes existentes, en este trabajo se estima un rango de esorrentía subterránea lateral desde los bordes norte y este de entre 1000 l/s y 1500 l/s, sin embargo sin mayores antecedentes no es posible realizar una distinción sobre la distribución de estos recursos por nivel acuífero. Lo que sí es posible afirmar, a partir del análisis de elementos mayores y gráficas Piper presentados en el capítulo de hidroquímica, es que existiría una componente mayoritaria del sector este, proveniente de la cuenca del río Salado respecto del aporte de las cuencas al norte del embalse Conchi.

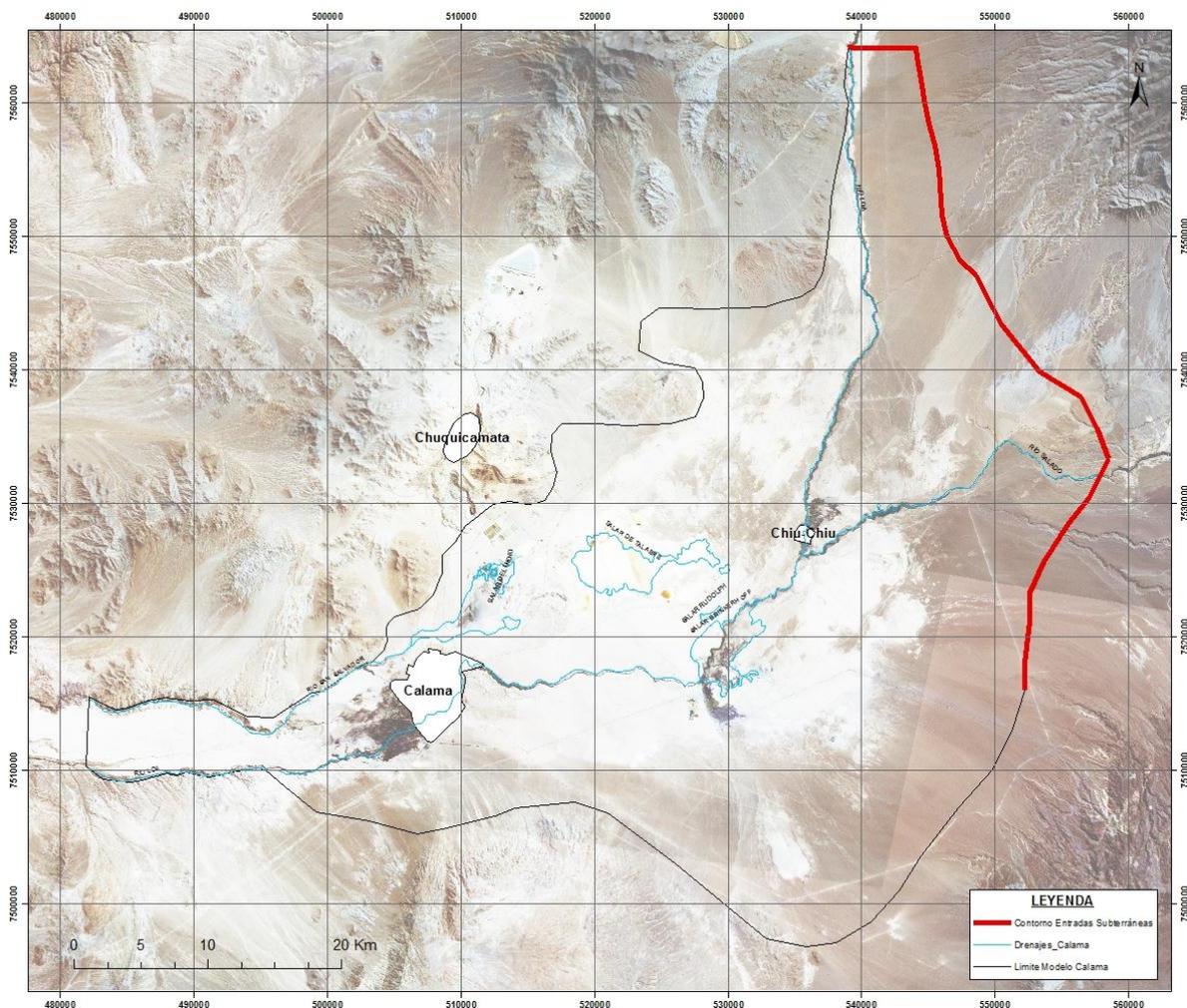


Figura 6-9. Zona del contorno dónde se producen las mayores entradas subterráneas al sistema. Fuente: elaboración propia.

Recarga urbana: Las áreas urbanas suponen generalmente una zona de recarga directa al acuífero superior debido a las infiltraciones en el terreno por pérdidas de los sistemas de abastecimiento urbano y alcantarillado. Esta recarga ha sido cuantificada por Montgomery & Associates (2011), a partir de un valor estimado medio de la suma de pérdidas en abastecimiento y alcantarillado igual a 0.0004 m/d. Aplicando este valor a una extensión de zona urbanizada de 1083 Ha resulta un valor aproximado de 50 l/s.

Por otro lado, también se puede estimar el caudal de recarga por pérdidas de la red urbana mediante un valor estándar internacional, como por ejemplo asumiendo que las pérdidas corresponderían a 30 L/hab/día (valor realista que se sitúa bastante por debajo de la media mundial), para una población próxima a los 140.000 habitantes también se

obtiene un caudal cercano a los 50 l/s. En la **Figura 6-10** se observa el área afectada por la recarga producto de las pérdidas de la red de distribución de aguas urbanas.

En resumen, la suma de los cálculos para la infiltración de agua desde la red urbana y la actividad agrícola totaliza un valor de 130 l/s. Ambos cálculos incluyen factores con incertezas que pueden hacer variar el número final, por esta razón se propone utilizar un rango entre 100 l/s y 200 l/s como suma total de ambas componentes hacia el acuífero superior, asumiendo que tanto la población de Calama como las áreas de regadío pueden variar y evolucionar con el tiempo.

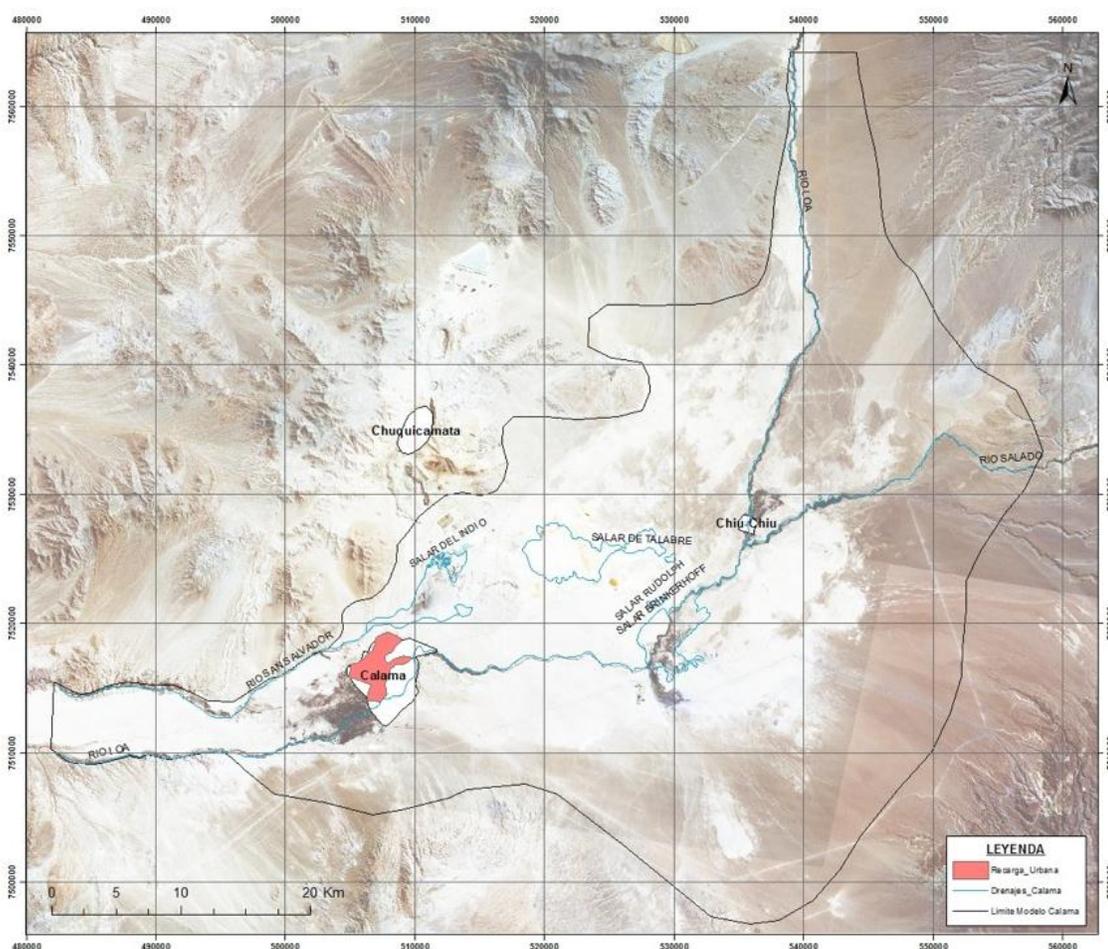


Figura 6-10. Superficie de la zona modelada en la que se considera el efecto de la recarga urbana y que se corresponde con la extensión de la ciudad de Calama (Fuente: elaboración propia).

Recarga por excedente de riegos: La presencia de regadíos en las zonas agrícolas produce una entrada de agua hacia el acuífero superior. El riego en la zona se realiza exclusivamente con aguas superficiales y el valor ha sido calculado a partir de los datos proporcionados por DGA en el año 2003, en función de las hectáreas efectivamente regadas y del uso efectivo del riego. Con un uso efectivo del riego de 0.5 L/s/Ha (DGA 2003) y una superficie de riego de 3.298 Ha que corresponde al sector Calama y al sector Chiu Chiu, el suministro de regadío aproximado de 1670 l/s. Asumiendo un 5% de excedentes, es decir que sólo un 5% del caudal de riego se transforma en recarga efectiva para el sistema de aguas subterráneas, el caudal total de recarga por excedentes de riego correspondería aproximadamente a 80 l/s. En la **Figura 6-11** se observan las superficies de regadío correspondientes a las áreas de Calama y Chiu-Chiu.

Las superficies de riego agrícola varían anualmente, al igual que algunos usos de suelo en los márgenes de la ciudad de Calama. En consecuencia, se recomienda utilizar un rango que oscile entre 50 l/s y 100 l/s.

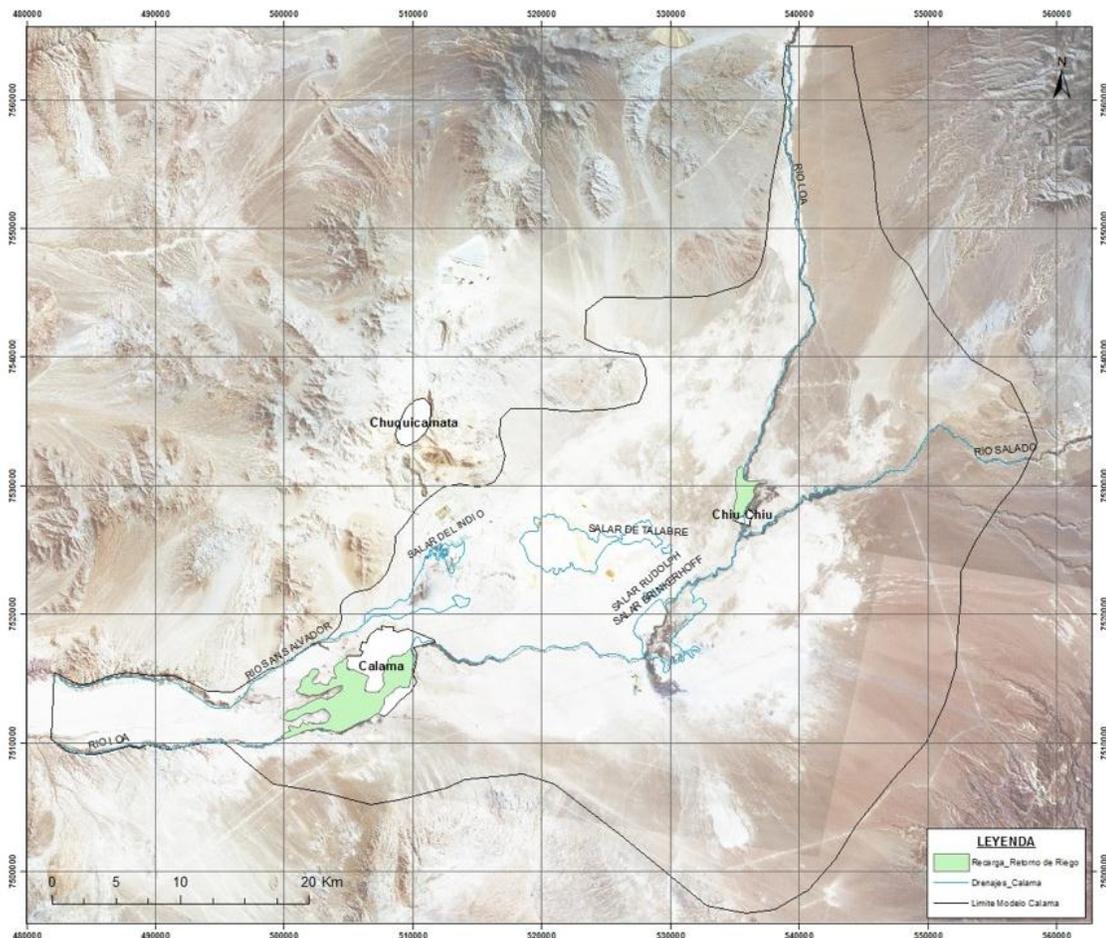


Figura 6-11. Superficies de recarga por retorno de regadío en las zonas de Calama y Chiu-Chiu (Fuente: elaboración propia).

Infiltración desde el Tranque Talabre: Las diferentes superficies de agua libre en el Tranque Talabre producen la infiltración directa de agua hacia el acuífero superior. Según la *"Modelación numérica del sistema acuífero Calama-Tranque Talabre. Construcción y calibración de modelo"* realizado por Knight Piésold en 2010, la recarga a través de las piscinas del Tranque Talabre evaluada mediante un modelo en régimen permanente corresponde a 21 l/s. En la **Figura 6-12** se observa la ubicación de las piscinas del Tranque Talabre.

En este trabajo, se utiliza el valor estimado Knight Piésold, sin embargo no ha sido posible validarlo ya que de nuestra revisión se ha detectado que es posible que el valor calculado de 21 l/s este subestimado. Si bien un cálculo detallado de la infiltración del tranque escapa del alcance del presente trabajo, de acuerdo a nuestros cálculos

preliminares es posible que la infiltración actual del tranque se encuentre dentro del rango de 50 l/s a 100 l/s.

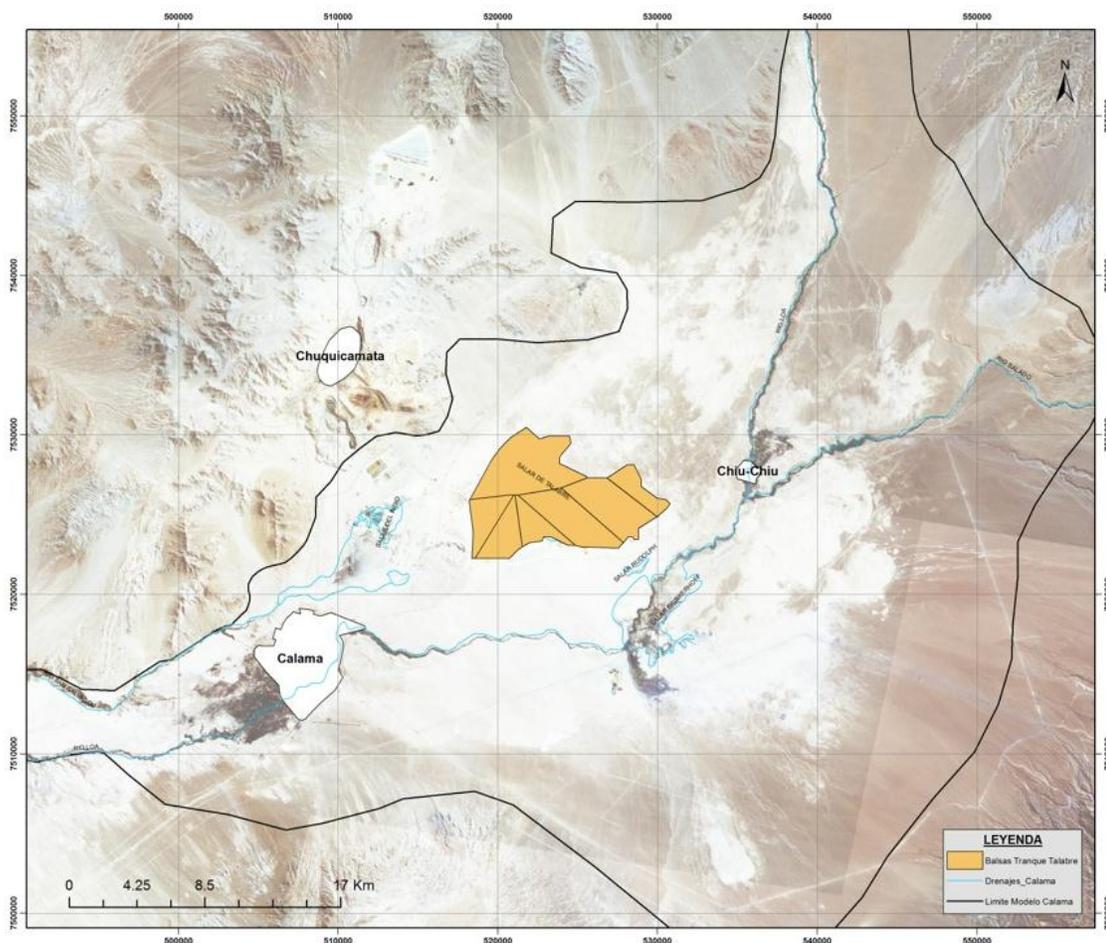


Figura 6-12. Ubicación de las balsas del Tranque Talabre donde se produce infiltración al acuífero superior (Fuente: elaboración propia).

Recarga por precipitación: El valor de la precipitación en la zona de estudio se obtiene a partir de los registros pluviométricos obtenidos en las estaciones meteorológicas de Calama y Chiu Chiu (**Figura 6-13**) por un periodo temporal comprendido entre 1994-2009 con registros mensuales. Puede observarse que casi la totalidad de las precipitaciones registradas ocurren en los meses estivales comprendidos entre enero y marzo, vinculadas con el invierno altiplánico.

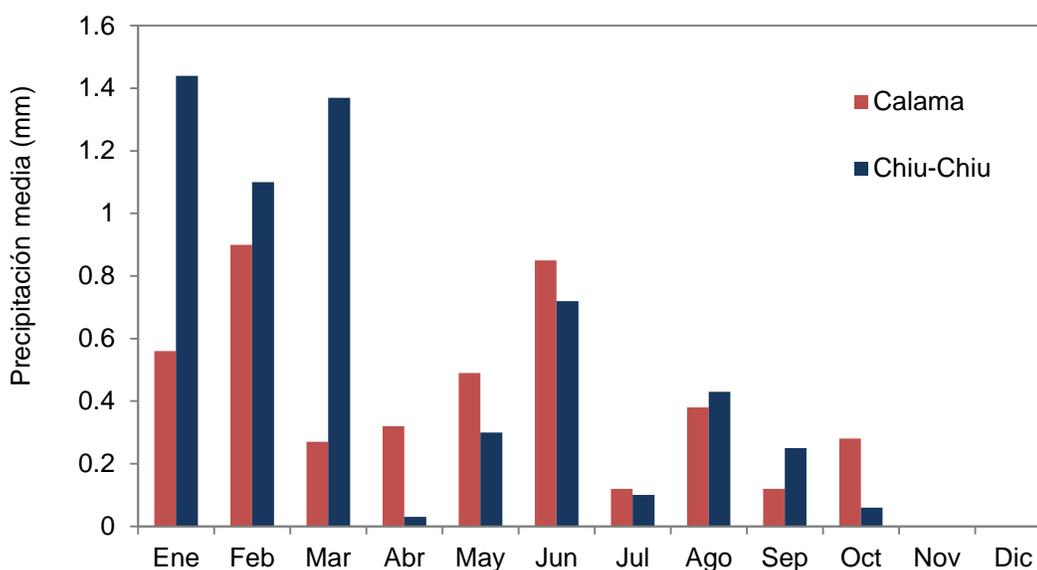


Figura 6-13. Precipitación media mensual para las estaciones de Chiu Chiu y Calama (Fuente: Aquaconsult, 2011)

La recarga por el acuífero superior por precipitaciones ha sido estimada por Knight Piésold (2010) a partir de los resultados calculados por el método SCS o Curva Número, el cual permite obtener, en función de los antecedentes pluviométricos y características del suelo de estudio, la escorrentía superficial, el almacenamiento inicial, la retención por almacenamiento del suelo que recibe la precipitación y, estableciendo un balance, la percolación efectiva hacia el acuífero. Este método es ampliamente empleado a nivel mundial a pesar de presentar algunas limitaciones desde el punto de vista de procesos físicos.

A partir de este método de cálculo se ha estimado la recarga producida en las dos estaciones meteorológicas en el periodo 1994-2009, restringido a los meses lluviosos (el resto de los meses puede asumirse una recarga nula). Los resultados se presentan en la **Tabla 6-1.**

RECARGA POR PRECIPITACIÓN						
Año	Calama			Chiu-Chiu		
	Ene	Feb	Mar	Ene	Feb	Mar
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1996	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
1997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	0.3	2.2	0.0	1.6	0.0	0.0
2001	0.0	0.1	0.0	0.7	0.0	1.6
2002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	0.0	0.1	0.0	0.0	0.7	0.0
2005	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
2006	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0
2007	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
2008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8

Tabla 6-1. Precipitación media mensual para las estaciones de Chiu Chiu y Calama (Fuente: Aquaconsult, 2011)

A partir de estos valores se estima una recarga media (necesaria para elaborar un modelo en régimen permanente), de 1 mm/año. Aplicando éste valor a la superficie correspondiente al área del modelo sin vegetación y descontada la zona urbana, se estima un valor de recarga por precipitación aproximada de 50 l/s. Esta recarga se aplica a toda la superficie del modelo y en principio se considera que es homogénea desde el punto de vista espacial.

De acuerdo a las condiciones climáticas existentes en la región, se recomienda el uso de un rango de recarga por precipitación directa que oscile entre 0 y 50 l/s.

Infiltración desde las instalaciones industriales mineras: Al igual que las infiltraciones desde la red urbana, la operación minera tiene larga data en el área e igualmente están sujetas al paso del tiempo, pérdidas desde sus redes de distribución y eventos de

derrames no controlados, tanto en su red de agua potable como con la red industrial. La minería en esta zona opera desde temprano el siglo XX y a pasear del largo tiempo de sus operaciones representan hoy en día una fuente de recarga no contabilizada oficialmente.

En el capítulo de hidroquímica se señala que este sector oeste cercano al Salar del Indio muestra elevadas concentraciones de solutos, lo que podría ser consecuencia de eventos de derrames e infiltración de aguas industriales. Si bien, no existen antecedentes oficiales que permitan cuantificar un caudal de recarga aproximado, a partir de las dimensiones de las operaciones mineras en el borce centro-oeste se propone utilizar un rango de infiltraciones de entre 0 – 100 l/s.

Entradas lateral subterránea eventual desde los contornos sur-este (sector Yalqui): Actualmente no existen estimaciones sobre potenciales entradas subterráneas laterales desde el sector sur-este de la cuenca de Calama. De la misma forma, no se ha contado con mayores antecedentes hidrogeológicos del sector de Yalqui, sin embargo se presupone la existencia de un acuífero producto de derechos de agua subterránea que han sido solicitados en el área. Se estima que los niveles acuíferos del sector de Yalqui deben ser alimentados desde alguna fuente de recarga aguas arriba. No existen aportes de agua superficial que alimenten esa zona al este del río Loa, por lo que es válido plantear una fuente que alimente el sector como aporte subterráneo lateral desde las zonas más altas. Sin embargo, no es posible estimar un valor o rango de caudales plausibles debido a que no tenemos ningún antecedente disponible más allá de los argumentos planteados aquí, y por lo tanto esta componente no estará reflejada en el balance presentado en este trabajo.

Infiltración desde los cursos de agua superficiales: El río Loa al interior de la cuenca muestra una estrecha relación con el sistema acuífero. De acuerdo al estudio de Ingeorec (2005) que menciona el trabajo de Knight Piésold (2010) existiría una relación variable de entradas y salidas al sistema de aguas subterráneas, pero que en el balance general realizado entre el río Loa antes de la confluencia con el río Salado y Río Loa en Yalquincha sería el acuífero quien entrega agua al río, y por lo tanto se trataría de una salida del sistema de aguas superficiales y no una entrada. Entonces esta componente será contabilizada en las salidas del balance.

6.4.2 Salidas

Descargas desde el acuífero hacia el río Loa: La zona de estudio se puede considerar compleja en sus interrelaciones entre cuerpos de agua superficiales y subterráneos. No es posible clasificar los ríos como un elemento único de entrada o salida en el balance hídrico general del modelo. En general, los ríos están conectado con el acuífero superior, mientras que el acuífero inferior no se relacionaría con los cauces de aguas superficiales.

Se han podido obtener diferentes mediciones para los caudales de los ríos en 13 secciones del río Loa, que abarcan desde la confluencia con el río Salado hasta la estación fluviométrica de la DGA en Yalquincha (**Figura 6-14**).

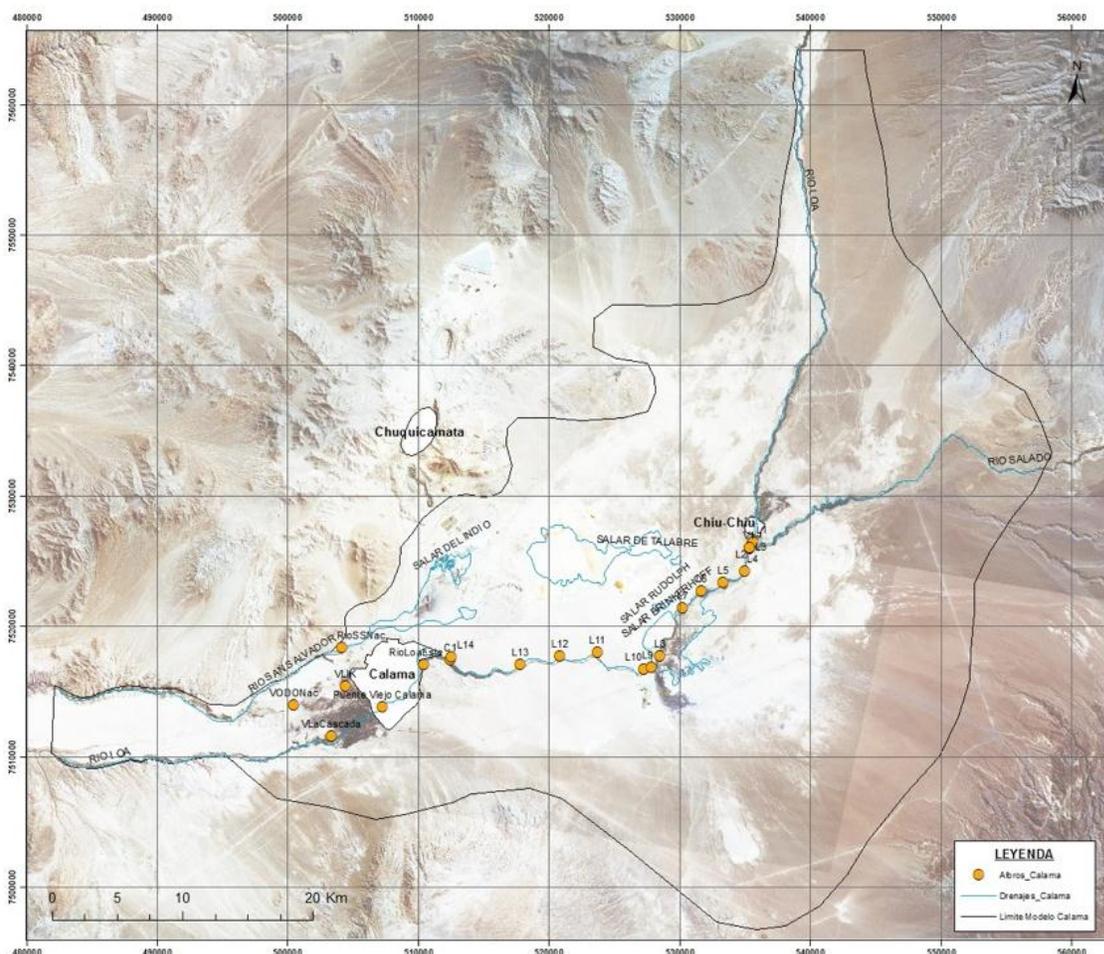


Figura 6-14. Ubicación de las secciones de aforo (Fuente: Knight Piésold, 2010).

De los estudios realizados por el departamento de estudios y planificación de la DGA (2003), junto con el estudio realizado por Ingeorec (2005) y reportado en Knight Piésold (2010) se puede considerar que en el tramo ubicado entre los aforos L7 y L9 (correspondiente al sector del Salar de Rudolph) existe un aporte desde el acuífero hacia el río de aproximadamente 700 l/s, mientras que en el tramo definido por L9 y L10 existen pérdidas del río que alcanzan los 260 l/s, cantidad que se ve mermada por el aporte de las vertientes de aproximadamente 100 l/s.

Además, se establece que desde la confluencia del río Loa con el río Salado hasta la sección de aforo L7, el escurrimiento del río se mantiene estable en términos generales. La misma situación se produce aguas abajo de la sección L10, donde el río se encajona hasta Yalquincha, tramo donde no se detectan mayores pérdidas, en términos globales.

No obstante lo anterior, algunos tramos específicos presentan aportes o pérdidas significativas que han de ser consideradas, como por ejemplo, las pérdidas en el tramo entre L11 y L12, que ascienden según este estudio realizado a 112 l/s.

En resumen, al hacer un balance del caudal del río Loa entre el punto inmediatamente después de la junta con el río Salado, L3, y río Loa en Yalquincha, L14, se puede desprender que el río ha recibido un aporte de aproximadamente 700 l/s, desde el acuífero superior. Este valor de 700 l/s representa el componente más importante de salida del sistema de aguas subterráneas en la cuenca. Para evaluar esta componente, y en función del análisis presentado en la sección 6.4.4 se recomienda utilizar un rango que oscile entre 300 l/s y 900 l/s.

Aguas abajo del punto L14 no existen medidas, sin embargo se puede suponer que aguas abajo del punto L14 comienza el sector en donde el acuífero superior aflora su caudal hacia las vertientes y manantiales naturales. Esta componente se describe a continuación.

Descargas hacia vertientes y manantiales: Otra de las salidas en el balance hídrico se produce en los vertientes y manantiales, que son aquellos puntos donde el nivel piezométrico intersecta la superficie topográfica, produciéndose una descarga directa del acuífero superior. Las principales descargas reconocidas se sitúan en cuatro vertientes principales, denominadas Ojos de Apache en Enaex y Ojos de Apache en el nacimiento, Likantatay y la Cascada con unos caudales medios registrados de alrededor de 367 l/s, 219 l/s, 15 l/s y 24 l/s, respectivamente. En la **Figura 6-15** se observa la ubicación de

las cuatro vertientes mencionadas. Los caudales medios han obtenido por aforos fluviométricos facilitados por la Dirección General del Agua, en la **Figura 6-16** se observa el registro histórico de caudales desde el año 1994 al año 2012.

En resumen, la salida a través de estos cuatro manantiales totaliza un valor promedio de 625 l/s. Para efectos del balance, se recomienda utilizar un rango que oscile entre 550 l/s y 700 l/s.

Tal como se desprende de la piezometría presentada en la **Figura 4-2** y **Figura 4-3** las descargas de estas vertientes drenan al acuífero superior por completo. Aguas abajo de la zona de descarga de estas vertientes, los materiales sedimentarios que conforman el acuífero superior se encuentran completamente secos, y se pueden observar en esa condición en los afloramientos de los cañones formados por los ríos Loa y San Salvador aguas abajo del sector de las vertientes.

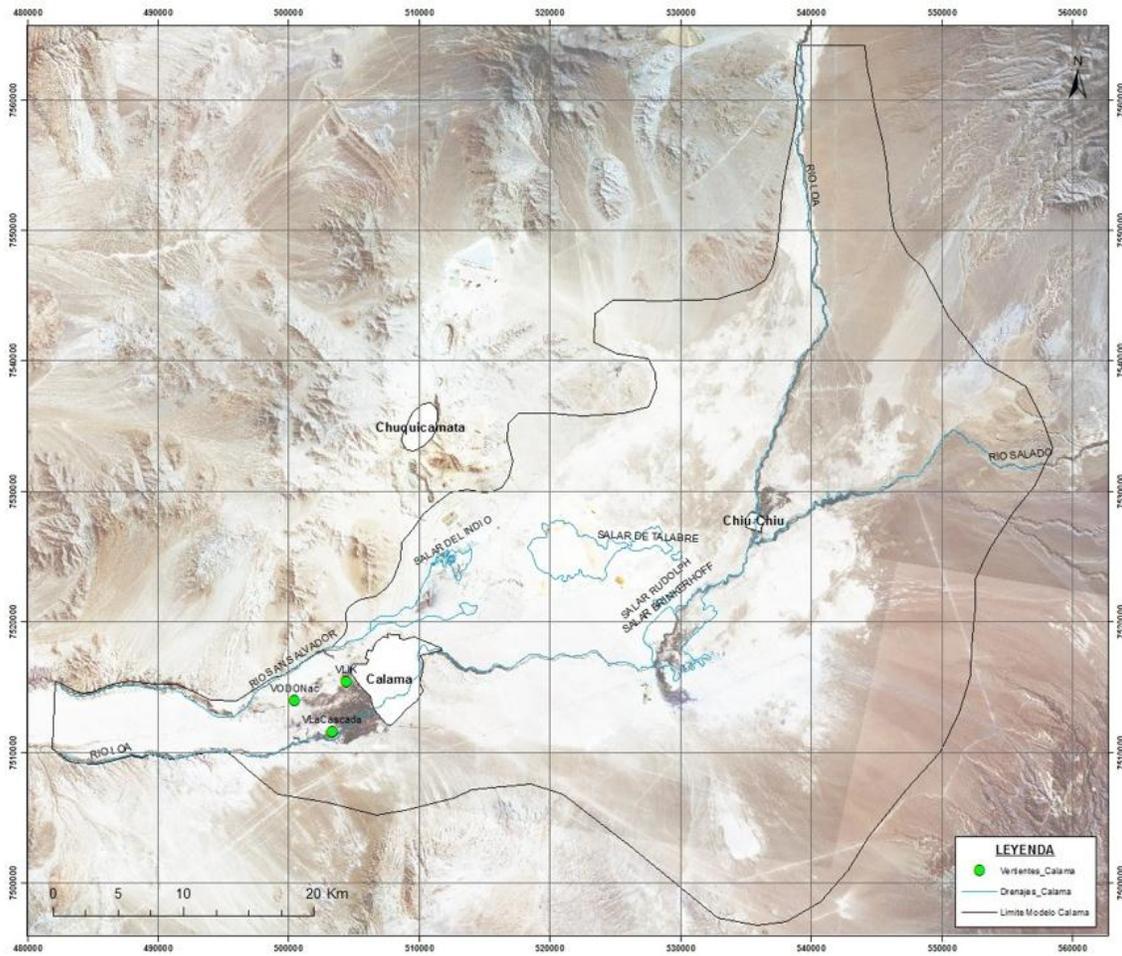


Figura 6-15. Ubicación de las vertientes de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).

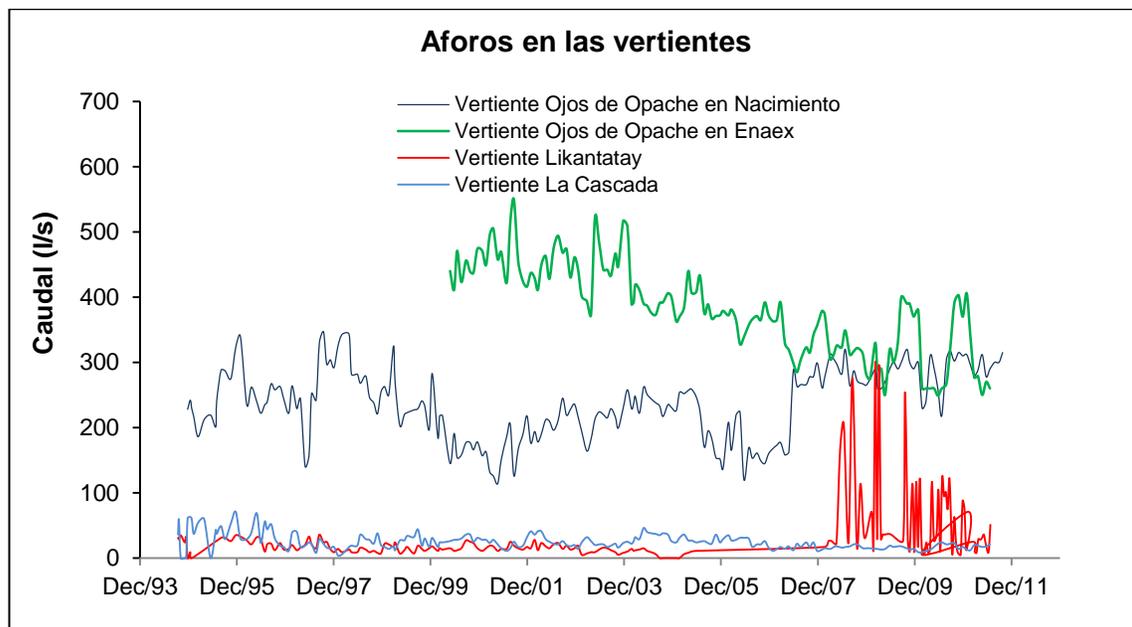


Figura 6-16. Caudal histórico en manantiales (Fuente: Minera El Tesoro)

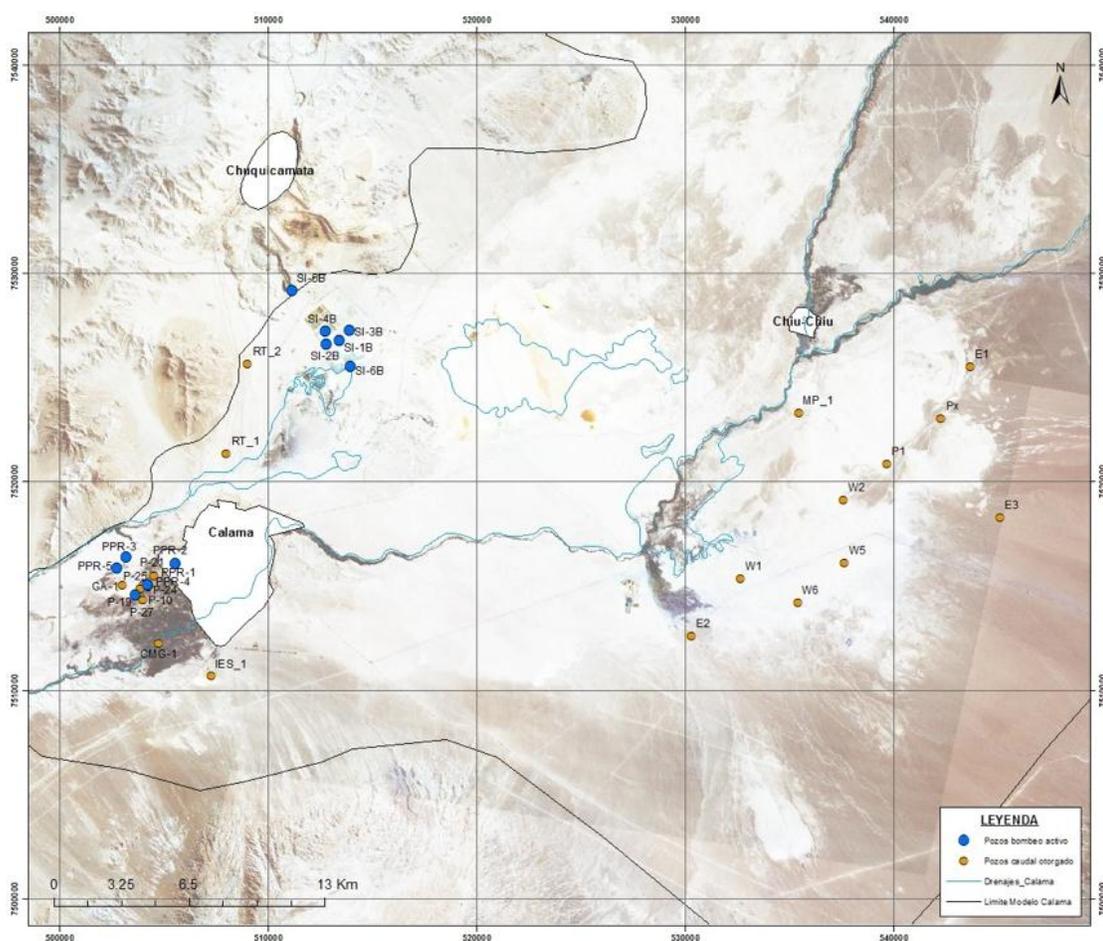
Descargas por bombeos: Los datos referentes a las extracciones subterráneas han sido obtenidos de los registros de las extracciones de los estudios realizados por DGA (2003), Minera El Tesoro (Montgomery & Associates, 2009), Codelco (Knight Piésold, 2010) y catastro de derechos de DGA (2012). De la revisión de estos antecedentes, se ha estimado que las extracciones totales por bombeo (promedio) sería aproximadamente de 160 l/s. Sin embargo, en términos de derechos otorgados la suma de todos las concesiones asciende a cerca de 1000 l/s.

En la **Figura 6-17** se observan los puntos de extracción divididos entre aquellas captaciones que tienen o han tenido bombeos en azul, de aquellas que se encuentran con derechos otorgados pero que no registran bombeos activos en marrón. La distribución espacial se concentrada en unos pocos lugares, asociados a la actividad industrial y minera de cada uno de los actores principales de la cuenca. En la **Tabla 6-2** se presentan los valores de cada captación.

De los bombeos operativos, el actor más importante corresponde a Minera El Tesoro con aproximadamente 100 l/s de bombeos desde ambos acuíferos en la zona sur-oeste de la ciudad de Calama. Le sigue en orden de importancia el bombeo registrado por Codelco en el periodo 2002 – 2008 con cerca de 60 l/s desde el Salar del Indio.

También se registran derechos de agua subterránea otorgados para Codelco, Tesoro, Lomas Bayas, Inversiones El Sauce, Aguas Yalqui Ltda y Compañía Minera Phoenix pero de acuerdo a la información proporcionada verbalmente por la DGA no se cuenta con un registro de su bombeo, por lo que se asume que la mayoría no estarían siendo utilizados. Más aun, DGA ha comunicado verbalmente que los pozos de Codelco del Salar del Indio tampoco estarían siendo bombeados en la actualidad.

En función de lo anterior, para las descargas por bombeo se recomienda el uso de un rango que oscile entre 100 l/s y 300 l/s



POZO	SOLICITANTE	EXTRACCIONES EFECTIVAS (l/s)	DERECHOS OTORGADOS (l/s)
	CODELCO	media 2002-2008	
SI-1B	DIVISIÓN NORTE	0.8	s/info
SI-2B	DIVISIÓN NORTE	25.7	s/info
SI-3B	DIVISIÓN NORTE	2.4	s/info
SI-4B	DIVISIÓN NORTE	12.2	s/info
SI-5B	DIVISIÓN NORTE	4.6	s/info
SI-6B	DIVISIÓN NORTE	11.8	s/info
RT*1 ¹	DIVISIÓN RT		30
RT*2 ¹	DIVISIÓN RT		2
SUB-TOTAL 1		57.4	32.0 (+57.4)=(89.4)
	MINERA EI TESORO	media 2002-2011	
PPR-2	CÍA. MINERA LEONOR	26.0	47
PPR-3	CÍA. MINERA LEONOR	19.3	45
PPR-5	CÍA. MINERA LEONOR	7.0	50
P-21	CÍA. MINERA LEONOR	28.2	65.8
P-10	CÍA. MINERA LEONOR	22.2	73.2
PPR-4	CÍA. MINERA LEONOR		0.7
PPR-1	CÍA. MINERA LEONOR		0.5
P-19	CÍA. MINERA LEONOR		65
P-24	CÍA. MINERA LEONOR		46.8
P-25	CÍA. MINERA LEONOR		70
P-27	CÍA. MINERA LEONOR		65
GA-1	INV. DON JUAN LTDA		16.5
SUB-TOTAL 2		102.7	545.5
CMG-1	CÍA. MINERA XSTR. LOMAS BAYAS		35
IES*1 ¹	INVERSIONES EL SAUCE S.A.		30
SUB-TOTAL 3		0	65
	PAMPA YALQUI		
P1	AGUAS YALQUI LTDA		34
E2	AGUAS YALQUI LTDA		30
E3	AGUAS YALQUI LTDA		50
Px	AGUAS YALQUI LTDA		40
E1	AGUAS YALQUI LTDA		40
W2	AGUAS YALQUI LTDA		20
W1	AGUAS YALQUI LTDA		50
W6	AGUAS YALQUI LTDA		35
W5	AGUAS YALQUI LTDA		20
MP*1 ¹	CÍA. MINERA PHOENIX		31
SUB-TOTAL 4		0	350
TOTAL		160.2	992.5 (1049.9)

¹Los nombres de los pozos RT*1, RT*2, IES*1 y MP*1 han sido inventados por ausencia de su nombre original.

Tabla 6-2. Resumen de extracciones promedio.

Descargas subterráneas: Incluye aquellas descargas de agua que se producen en el acuífero inferior a través del contorno del modelo. El acuífero superior no tiene descarga subterránea lateral, puesto que ha sido completamente drenado en la zona de las vertientes. La principal descarga de agua por contorno se produce a través del margen oeste marcado en la **Figura 6-18**. El caudal de descarga ha sido cuantificado por Montgomery & Associates (2009) en un valor de 240 l/s. Este valor ha sido contrastado y validado como plausible con el resultado de aplicar las fórmulas correspondientes a flujo paralelo utilizando como base la piezometría presentada en el Capítulo IV Hidrogeología.

Frente a la ausencia de mayores antecedentes, para el caudal subterráneo saliente por el contorno oeste de la cuenca se recomienda el uso de un rango que oscile entre 200 l/s y 300 l/s.

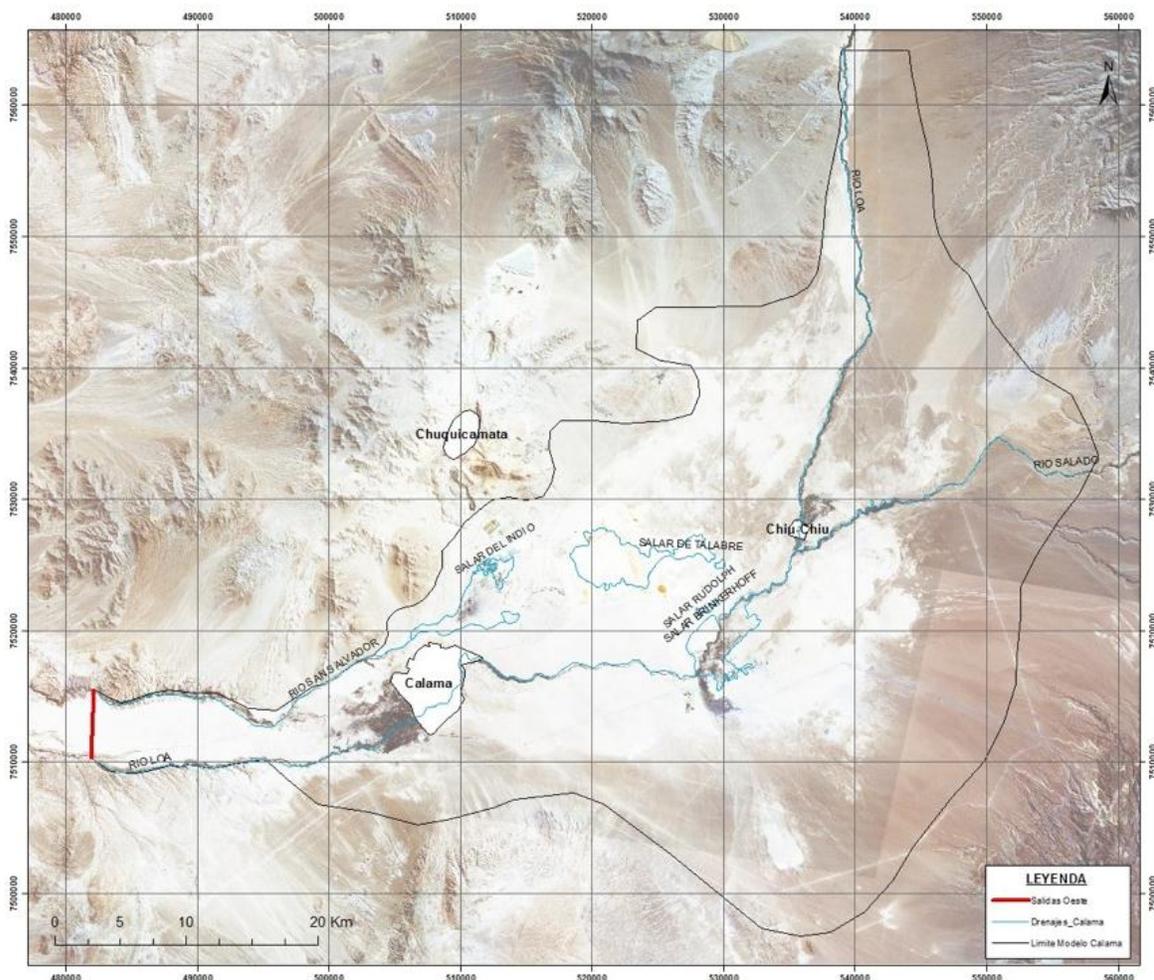


Figura 6-18. Salida subterránea a través del margen oeste del contorno del modelo. Fuente: elaboración propia.

Evaporación: El valor de evaporación de cuerpos superficiales de agua conectados al acuífero se ha cuantificado en función del estudio de Montgomery & Associates (2009), que se basa en la estadística obtenida de los datos registrados en la estación meteorológica del Tranque Talabre. El valor promedio de evaporación diaria se sitúa entre 6 y 10 mm y en este estudio se ha tomado el valor corresponde a 6.5 mm/día o 2.370 mm/año. Si se compara con los valores mostrados en el balance hídrico de Chile (DGA, 1987), se observa que la estación más cercana corresponde a la estación de Calama con una tasa de evaporación desde lámina libre de 3687 mm/año (o 10 mm/día).

El caudal de evaporación se ha calculado utilizando el valor de 6.5 mm/día, y aplicándolo al área donde hay cuerpos de agua en lámina libre (humedales y salares), en los cuales se produce evaporación directa. El valor final es de 45 l/s. La ubicación de las zonas en las que se produce evaporación directa se en la **Figura 6-19**. Para efectos del balance, se recomienda utilizar un rango que oscile entre 50 l/s y 100 l/s.

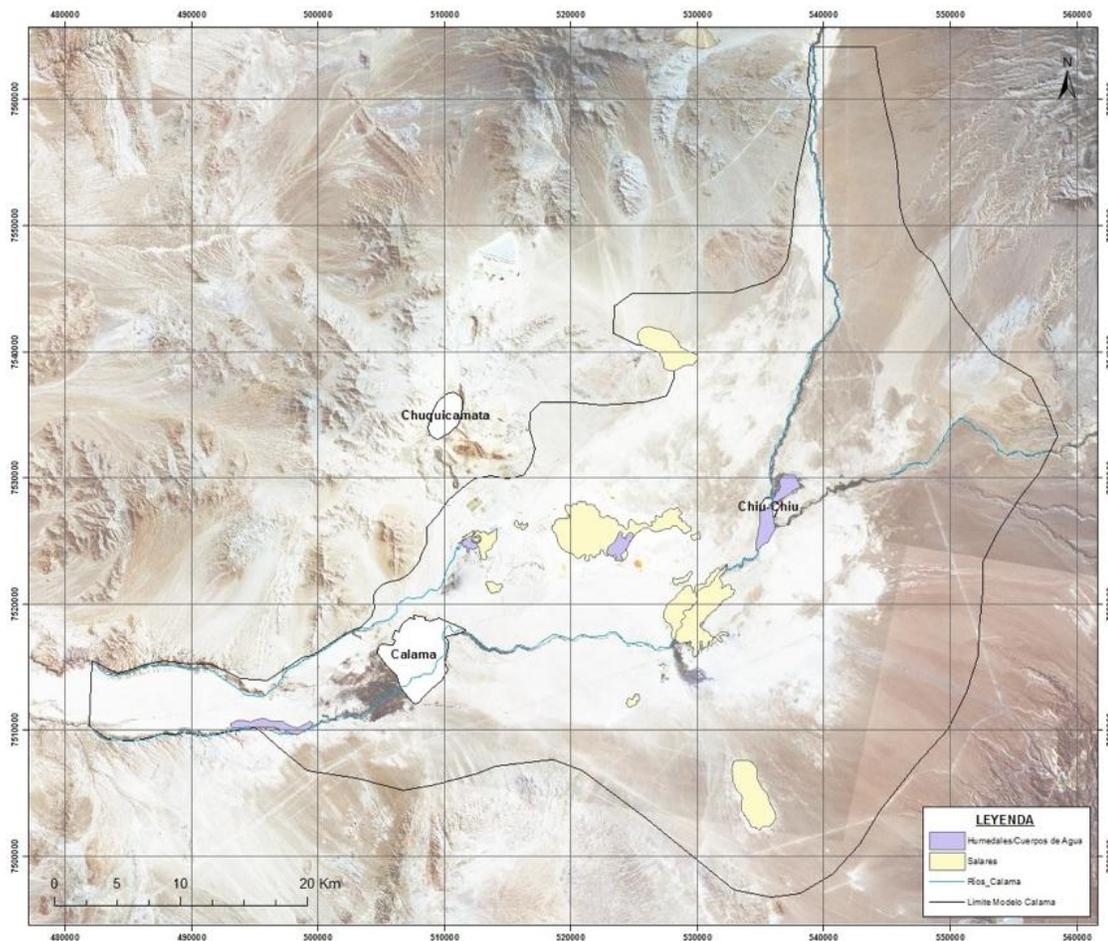


Figura 6-19. Ubicación de las principales zonas con cuerpos de agua lámina libre formados por humedales y salares (Fuente: elaboración propia).

6.4.3 Conexión y semi-desconexión entre acuíferos superior e inferior

En la gran mayoría del área modelada, los acuíferos superior e inferior se encuentran separados físicamente por la presencia de un acuitardo arcilloso. Esta situación provoca que existan una semi-desconexión hidráulica entre ellos de forma que las alturas de las cargas hidráulicas puedan ser diferentes. Esto no quiere decir necesariamente ausencia de una transferencia vertical de agua subterránea o total ausencia de respuesta en los niveles frente al bombeo, sino sólo quiere decir que esta filtración o “goteo” es lo suficientemente lenta como para mantener el desequilibrio en las alturas hidráulicas de ambas unidades. Siempre que exista una diferencia de cargas hidráulicas, existirá una transferencia de agua desde la unidad de mayor carga hidráulica hacia la de menor

hidráulica, y este caudal puede ser cuantificado mediante un cálculo que requiere de la permeabilidad vertical, sección de goteo considerada y gradiente hidráulico.

Para visualizar la situación en la cuenca de Calama, se han utilizado una serie de datos piezométricos para los acuíferos superior e inferior que coincidían espacialmente dentro de un radio, y se ha procedido a restar sus cargas hidráulicas, de forma que se pueda observar directamente (**Figura 6-20**) en qué zonas los datos muestran una diferencia hidráulica y por lo tanto una situación de semi-desconexión. Es decir, una diferencia positiva señala que la carga hidráulica en el acuífero superior es mayor, mientras que una diferencia negativa es indicativa de que la carga hidráulica en el acuífero inferior es mayor.

En términos generales, en los alrededores de la ciudad de Calama y hacia la salida oeste la carga hidráulica del acuífero superior es más alta que la del acuífero inferior, y por lo tanto teóricamente existiría un flujo vertical descendente. Sin embargo, hacia el sector del Tranque Talabre y aguas arriba de él esta relación se invierte y es el acuífero inferior el que posee una carga hidráulica más alta y por lo tanto la relación de goteo se produciría desde el acuífero inferior hacia el acuífero superior.

Esta distribución de cargas hidráulicas en la cuenca de Calama puede ser entendida mediante el siguiente modelo conceptual:

- De acuerdo al análisis expuesto en la hidroquímica, respecto de los flujos subterráneos laterales que recargan a la cuenca de Calama, para los niveles acuíferos superior e inferior, el acuífero superior se encuentra mayormente influenciado por la cuenca del río Salado, mientras que el acuífero inferior tiene una proporción relativa mayor de la cuenca de Loa Alto (aguas arriba de Conchi).
- De acuerdo a un estudio isotópico en ejecución realizado por Matraz, la altura de precipitación y recarga de la cuenca de San Pedro es superior en relación a la altura de precipitación y recarga respecto de la cuenca del río Salado.
- Bajo un modelo de flujo de cuenca tipo pistón, estas diferencias en las alturas de precipitación y recarga provocaría que la carga hidráulica en los contornos de (recarga lateral subterránea) de la cuenca de Calama fuesen observadas como una mayor altura en los pozos del acuífero inferior.

- Un modelo de cuenca con flujo tipo pistón favorece que los niveles más profundos mantengan una carga hidráulica mayor en toda la extensión de la cuenca. Sin embargo entre la ciudad de Calama y hacia la salida oeste esta situación es diferente.
- Este cambio en el esquema de cargas hidráulicas se explicaría por la presencia de fuentes de recarga adicional sobre el acuífero superior, la que provocaría un aumento de su nivel piezométrico y por lo tanto la inversión del esquema tradicional bajo un flujo tipo pistón entre los dos acuíferos.
- Estas fuentes de recarga adicional sobre el acuífero superior han sido señaladas en las componentes del balance: Tranque Talabre, infiltración de operaciones mineras, infiltración de red urbana de agua potable de Calama e infiltración de los excedentes de riego.

En el área del dominio modelado en la que no existe el acuitardo, ver **Figura 6-7**, los acuíferos superior e inferior se encuentran físicamente conectados y por lo tanto se puede suponer que las cargas hidráulicas de ambos tiendan a ser parecidos y que ambos acuíferos se comporten como unidades de acuíferos libres. Sin embargo, esta área no cuenta con información suficiente que permita validar totalmente esta hipótesis.

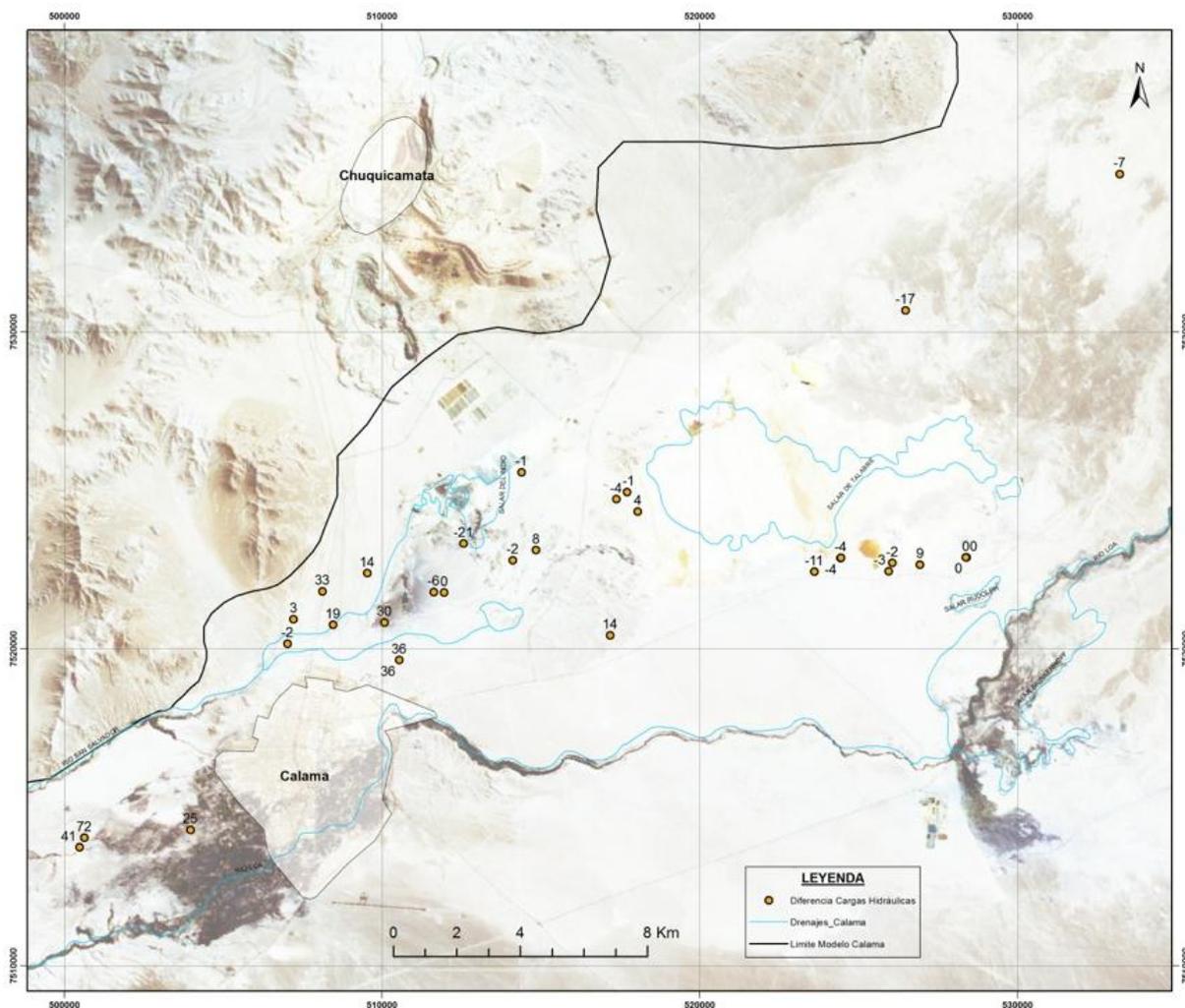


Figura 6-20. Diferencias piezométricas (en metros) entre el acuífero superior y el profundo. Fuente: elaboración propia.

6.4.4 Conexión del río Loa con el acuífero superior

Tal como se discutió anteriormente, existe una estrecha relación entre el río Loa y el acuífero superior. Esto se traduce en que el acuífero aporta y recibe recursos hídricos desde el Loa en función del gradiente hidráulico entre ambos. El gradiente hidráulico entre el acuífero superior y el río sufre variaciones a lo largo del recorrido del río Loa a través de la cuenca.

A partir de un estudio desarrollado por Ingeorec (2005) se estableció que el balance global entre los puntos de aforo L3 y L14 (ver **Figura 6-14**) daban como resultado un aporte desde el acuífero superior hacia el río Loa de aproximadamente 700 l/s. Dada la

magnitud que tiene este caudal, se concluye que corresponde al componente principal que regula las salidas de la cuenca y por lo tanto ejerce el papel de regulador principal de las salidas de la cuenca y de las descargas aguas abajo desde las vertientes.

Se ha realizado un análisis para profundizar el entendimiento de esta situación mediante la revisión de los aforos de las estaciones de agua superficial de la DGA llamadas Conchi, Salado y Escorial, ver ubicación de las estaciones en **Figura 6-21**. La estación Conchi mide el caudal del río Loa inmediatamente después del embalse Conchi; la estación Salado registra el caudal del río Salado justo antes de la junta con el Loa; y la estación Escorial mide el caudal del río Loa a la altura de la ciudad de Calama. Por lo tanto, el caudal registrado en el Escorial debiese ser igual a la suma de los caudales de las estaciones Conchi y Salado más los aportes y descargas que se produzcan en el medio. Los aportes serían afloramientos del acuífero vía vertientes, y las descargas corresponden a los desvíos para usos agrícolas u otros.

En la **Figura 6-22** se muestra el registro histórico de caudales para las 3 estaciones mencionadas. Los caudales han sido gráficos en el eje **y** en (l/s) en escala logarítmica para incluir aquellos caudales asociados a las crecidas. El tiempo se presenta en el eje **x** con divisiones cada dos años, para facilitar la observación de la ritmicidad de las estaciones y sus caudales de invierno y verano.

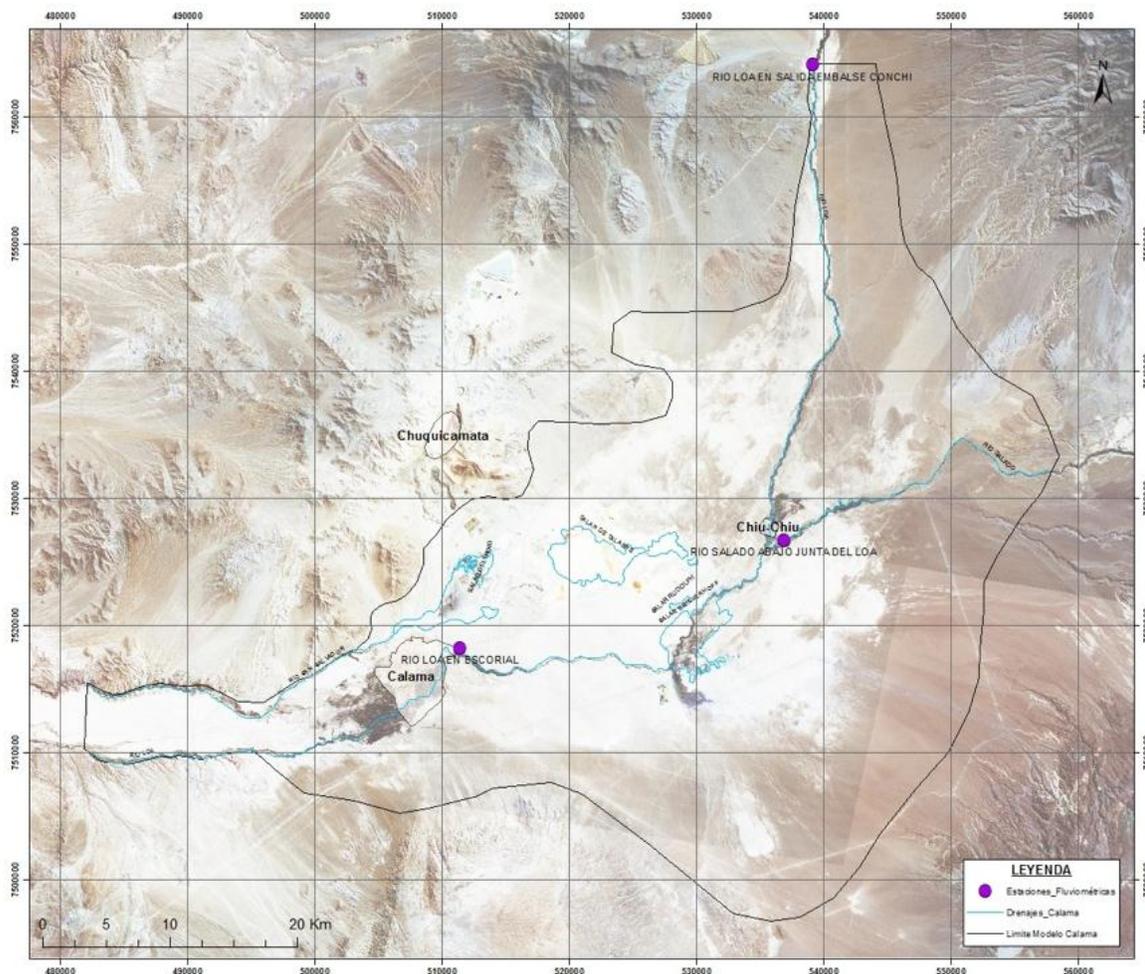


Figura 6-21. Ubicación de las estaciones de aforo de aguas superficiales Conchi, Salado y Escorial. Fuente: elaboración propia.

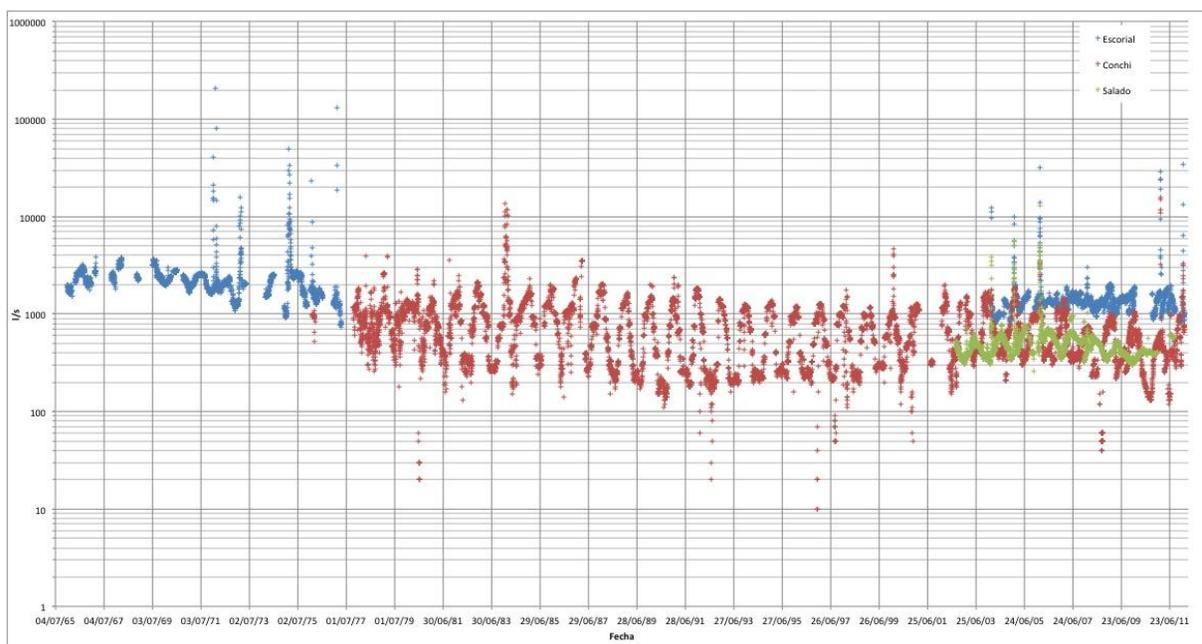


Figura 6-22. Registro histórico de caudales superficiales aforados en las estaciones Conchi, Salado y Escorial. Fuente: elaboración propia.

El análisis a continuación presenta los resultados de sustraer la suma de caudales de Conchi y Salado al caudal de Escorial, ver **Figura 6-23**. Siempre que esta sustracción arroje un valor positivo, ante la ausencia de otras fuentes de agua, se interpreta como aportes desde el acuífero superior. Estos aportes representan un valor mínimo, puesto que en este análisis no estarían contabilizadas las descargas para usos agrícolas que al contabilizarlas desfazarían todos los caudales hacia arriba. Cuando la sustracción da como resultado un número negativo, puede tratarse de aportes desde el río al acuífero y/o extracciones antrópicas del cauce superficial para riego u otros.

De esta forma, en el registro disponible desde el inviernos del año 2003 y hasta comienzos del 2012 se observa que la mayoría de los valores resultantes son positivos y por lo tanto pueden ser leídos como los caudales mínimos de aporte desde el acuífero superior al río Loa, y presentan un comportamiento que oscila de forma similar a la oscilación estacional que se observa en los caudales del río Loa en sus tres estaciones. Durante el periodo entre el año 2003 y 2006 existen tantos valores negativos como positivos, que en la media mantienen un equilibrio entre las entradas y salidas, sin embargo a partir del 2007 los resultados son prácticamente todos positivos con una media aproximada de 400 l/s, interpretada como aportes mínimos del acuífero superior al río y por lo tanto reflejan una descarga del sistema.

La importancia de este proceso, radica en que el balance anual de cada año puede variar ampliamente en función de este efecto. Los aportes mínimos del acuífero al río oscilarían por lo tanto entre 0 l/s y 1000 l/s con una importante variación estacional. De esta forma, siendo tan importante este proceso sobre el balance global, debe ser considerado en la conceptualización del modelo numérico de detalle.

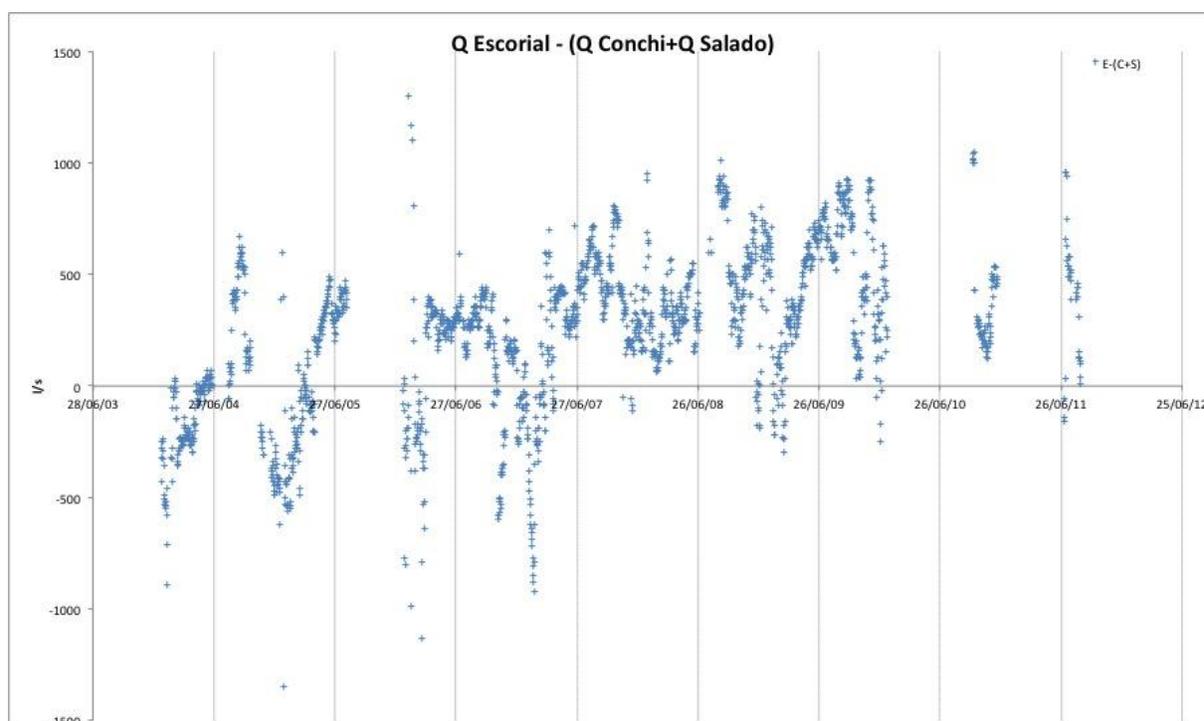


Figura 6-23. Resultado de sustraer la suma de caudales de las estaciones Conchi y Salado, al caudal de la estación Conchi. Fuente: elaboración propia.

6.4.5 Resumen balance global y discusión

A partir de las entradas y salidas en un año medio, el balance hídrico se recoge en la **Tabla 6-3**. En la vasta mayoría de los casos, los cálculos de balance simplifican la realidad en términos cuantitativos y en especial para sistemas regionales de grandes dimensiones como es el caso de la gran cuenca de Calama. Se resume los diferentes aportes del balance en rangos, que dan una medida de la magnitud de cada componente, expresada en unidades instantáneas como litros por segundo.

ENTRADAS	UNIDAD	L/S
Subterránea contornos norte y este	Ac. Superior y Ac. Inferior	1000 - 1500
Red de distribución urbana	Ac. Superior	100 - 200
Infiltración retornos riego agrícola	Ac. Superior	50 - 100
Infiltración desde Tranque Talabre	Ac. Inferior	50 - 100
Infiltración operación minera centro-oeste	Ac. Superior	0 - 100
SUB-TOTAL		1200 - 2000
SALIDAS	UNIDAD	L/S
Descargas hacia el río Loa	A. Superior	300 - 900
Afloramiento vertientes	Ac. Superior	550 - 700
Bombeos	Ac. Superior y Ac. Inferior	100 - 300
Contorno subterráneo oeste	Ac. Inferior	200 - 300
Evaporación	Ac. Superior	50 - 100
SUB-TOTAL		1200 - 2300
ENTRADAS-SALIDAS		[0 - 300]

Tabla 6-3. Balance anual promedio para la gran cuenca de Calama.

La suma de entradas al sistema oscilan en el rango de 1200 l/s – 2000 l/s, mientras que las salidas oscilan en el rango 1200 l/s – 2300 l/s. El estado del sistema es de desequilibrio con un déficit que oscila entre los 0 l/s – 300 l/s.

El aporte más importante al sistema procede de la entrada de agua por los contornos norte y este a través de los acuíferos superior e inferior. Mientras que las demás componentes del balance tienen un orden de magnitud menos, y la suma de todas ellas escasamente llegan al 25% del total.

En las salidas, la componente más importante corresponde a las descargas del acuífero superior hacia el cauce del río Loa, junto con las descargas del mismo acuífero hacia las 4 vertientes. Ambas descargas suponen cerca del 70% de las salidas totales del sistema. Las por bombeos, evaporación y salida subterránea oeste representan un componente minoritario dentro del balance general de la cuenca.

Sin embargo, si consideramos el total de derechos otorgados en la cuenca de aproximadamente 1000 l/s veremos que de ejecutarse el total de las concesiones se produciría una situación de relativa gravedad en el balance de la cuenca. Este número (derechos otorgados) es más importante si lo comparamos con la recarga del sistema, de

modo que si se ejecutaran todos los derechos otorgados, las extracciones por pozos supondrían un caudal equivalente en el rango 50% a 80% de la recarga total del sistema.

En conclusión, el balance es deficitario, con déficit actual en el rango de los 0 l/s a 300 l/s. La consecuencia de este déficit se observa en el descenso progresivo de los niveles piezométricos a cargo del volumen de agua almacenada en los acuíferos en gran parte del dominio, concentrado principalmente en las zonas de extracción.

En términos del estado de equilibrio y desequilibrio en el balance, es posible que la regulación principal sea ejercida por las diferencias de carga hidráulica entre el acuífero superior y el río Loa. En este sentido, con un río Loa más generoso en caudal y con mayor altura hidráulica, las descargas del acuífero serían menores. Por el contrario, cuando el río Loa lleva poco caudal, el gradiente hidráulico con el acuífero es mayor y por lo tanto recibe más agua de él.

De acuerdo a los aforos ejecutados por Ingeorec (2005), el tramo en donde el acuífero aporta un mayor caudal al río Loa corresponde al tramo entre los puntos L3 y L14 (ver **Figura 6-14**). Por lo tanto, los aportes entre los puntos L3 y L14 desde el acuífero hacia el río dejan de estar disponibles para las vertientes que se ubican aguas abajo de este segmento. De esta forma, toda variación en el nivel del río Loa afectará directamente el gradiente con el acuífero superior y por lo tanto afectará la descarga desde el acuífero al río. A su vez, una variación en la descarga del acuífero al río entre los puntos L3 y L14 afectará directamente la descarga registrada en las vertientes.

Quien regula el caudal y altura hidráulica del río Loa es el embalse Conchi, que vela por cuidar que los recursos superficiales embalsados estén disponibles para asegurar los recursos en tiempos de sequía. Así, en épocas secas el embalse cederá menos agua al Loa y en épocas húmedas cuando se encuentre lleno se verá obligado a dejar ir sus excedentes. Estas variaciones en el caudal del río Loa producto de la regulación hidráulica del río afectarán directamente las descargas desde el acuífero superior hacia el río, y en consecuencia afectará directamente los caudales que afloran en el sector de las vertientes.

Esta cadena de procesos conectados uno tras otro y los tiempos de respuesta, se encuentran modulados por el coeficiente de almacenamiento del acuífero superior. En términos simples, cuando el almacenamiento es elevado, la respuesta será más

amortiguada. En cambio cuando el almacenamiento es bajo, como puede ser el caso de porosidad secundaria por fracturamiento de calizas, la velocidad de respuesta debiese ser mayor.

En resumen, la altura del río Loa tiene un efecto directo sobre el balance de la cuenca y sobre los caudales aforados en las vertientes hacia la salida oeste de la cuenca. Y por lo tanto, debiésemos esperar que en la medida de que el río Loa disminuya su caudal, los aforos en las vertientes serán cada vez menores.

7. Modelo Numérico

7.1 Objetivos de la modelización

Sobre la base del modelo conceptual se han preparado los archivos para poder construir un modelo numérico en la plataforma Visual Modflow. En particular, se ha utilizado su nueva versión, conocida como Visual Modflow Flex 2012.1. Visual Modflow Flex se distingue de las versiones anteriores por tener incorporado un “modelo conceptual” como primer paso a la modelación. Dicho modelo conceptual tiene los mismos elementos que los que se presentan en el capítulo 6. Contiene toda la información conceptual necesaria para realizar un modelo: superficies del terreno, espesores de los horizontes, condiciones de contorno, recargas, pozos, ríos, zonas, etc. La construcción del modelo numérico parte directamente del modelo conceptual, mallando el sistema según las superficies dadas e incorporando los pozos y ríos en celdas apropiadas. La ventaja de ello es que un mismo modelo conceptual puede estar asociado a varios modelos numéricos con mallas totalmente distintas. Así pues, se entiende que dicha plataforma es la más flexible para temas de gestión de la cuenca de Calama.

El modelo deberá calibrarse en el futuro para conseguir un modelo de gestión del sistema. Así, representará adecuadamente las variables de interés hidrológico e hidrogeológicos, así como aquellas que se encuentran incluidas en los planes de monitoreo, seguimiento y control de las extracciones. Para ello, toda decisión que afecte el alcance de la modelación será adoptada con el acuerdo de la Inspección Fiscal.

Por el momento se presentan los trabajos de adecuación del modelo conceptual presentado en el capítulo anterior a un modelo numérico.

7.2 Modelo Hidrogeológico conceptual

El modelo numérico comprende únicamente los materiales detríticos. De acuerdo con el esquema conceptual, el modelo recoge tres unidades acuíferas. Por lo que respecta a la geometría del sistema, de techo a base encontramos

- Un primer acuífero superior, formado por calizas y areniscas, y que presenta un espesor variable (30 a 130 m).

- Un acuitardo intermedio, conformado por arcillas y limos de potencia variable, entre 80 y 100 m, y pudiendo llegar hasta los 200 m.
- Un acuífero inferior formado por depósitos de gravas aluviales y de piedemonte, con una potencia de entre 30 y 130 m que localmente alcanzan los 400 m.

La geometría se recoge en la **Figura 7-1**. Se aprecia la gran complejidad en la definición tridimensional de las distintas capas del modelo.

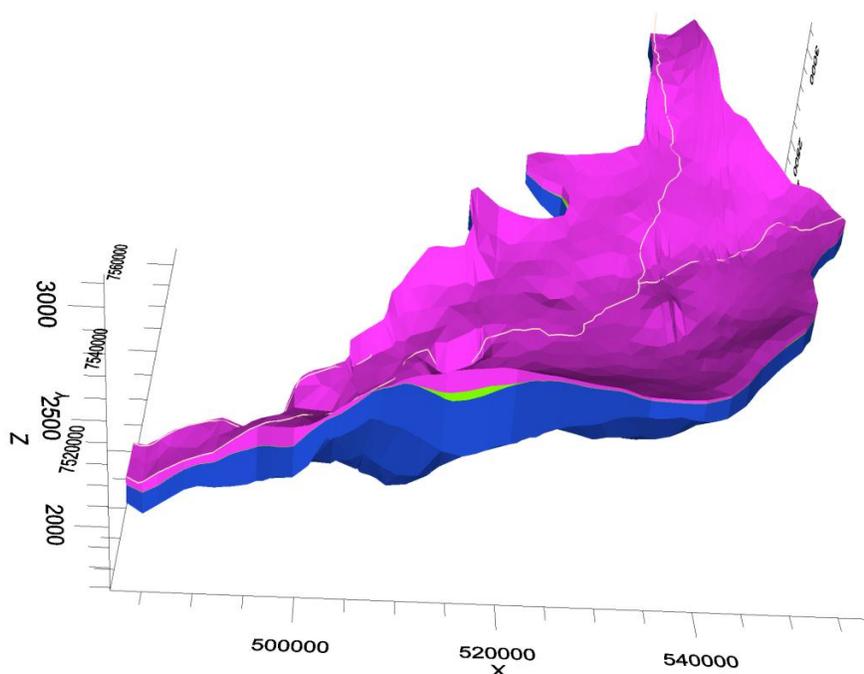


Figura 7-1. Visualización de las capas del modelo y de los ríos: Acuífero superior (rosa), acuitardo (verde), acuífero profundo (azul). Fuente: elaboración propia.

Respecto al comportamiento hidráulico, el acuífero superior tiene un carácter libre, mientras que el inferior sería semiconfinado, puesto que el acuitardo se comporta como una capa semiconfinante. Cabe remarcar que este acuitardo no presenta una continuidad espacial en toda la zona modelada, sino que se ubica en la parte central del contorno, tal y como se puede observar en la **Figura 7-2**. Fuera del dominio donde el acuitardo está presente, existe un único acuífero de carácter libre.

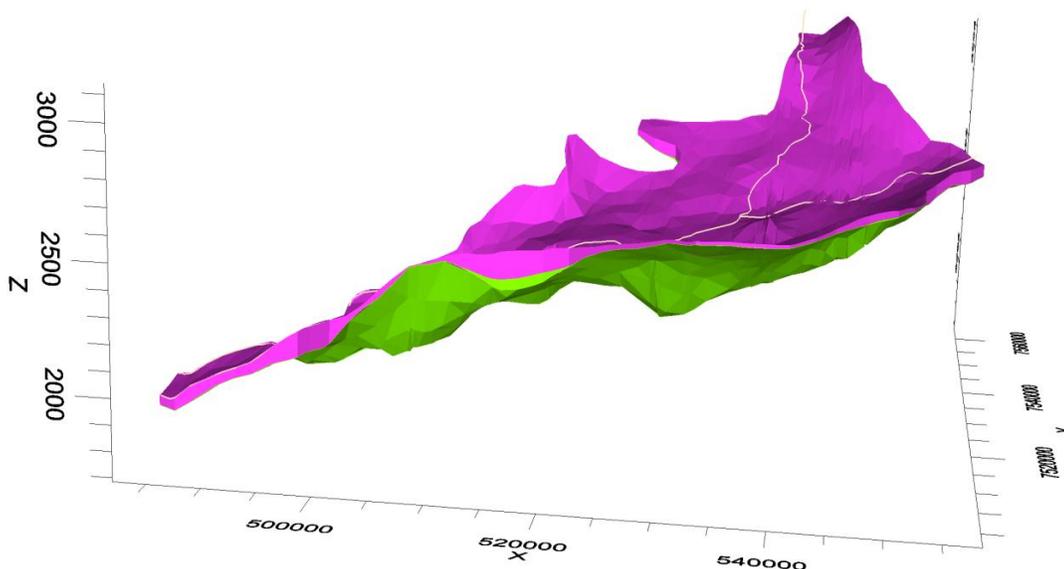


Figura 7-2. Visualización de la estructura y de la continuidad del acuitardo (verde) dentro de Visual Modflow. Fuente: elaboración propia.

7.3 Metodología

7.3.1 Discretización

La discretización es el primer paso en la construcción de un modelo numérico preliminar y se realiza una vez el modelo conceptual ha quedado completamente definido. Normalmente la estructura del modelo no es única ni segura, existen varias estructuras posibles. Una buena discretización es importante para asegurar una buena convergencia de la solución numérica y repercutirá en que el tiempo necesario para completar el proceso de modelación se reduzca de modo significativo. La discretización consiste en la división del medio en celdas que recubren, sin solaparse, toda la extensión modelada. La estructura del modelo discretizado tiene en cuenta las áreas y/o puntos de especial influencia en el comportamiento hidrogeológico del sistema, como son: pozos, ríos, zonas de recarga y descarga, zonas de transmisividad constante (coincidirá con zonas de materiales definidos utilizando criterios geológicos o hidrogeológicos), contornos, otros.

7.3.2 Zonación de parámetros

La parametrización es uno de los procesos clave dentro de la modelización. En principio, un modelo numérico requiere definir las propiedades hidrogeológicas así como términos fuente (recarga, ríos, pozos) en cada una de las celdas de la malla numérica. En este caso en un total de 136.200 celdas distintas. Puesto que no hay información suficiente para distinguir dichas propiedades celda-a-celda, se procede a parametrizar el sistema. En este trabajo se ha realizado una parametrización zonal que consiste en definir las propiedades hidrogeológicas y términos fuentes por zonas. Cada propiedad y término fuente tiene su zonación particular asignada que se define por capas y se describe en el Capítulo 6.

7.3.3 Evaluación del modelo numérico

El modelo numérico básico consistirá en una calibración en estado estacionario en el que se deben incluir los valores medios (o promediados) de recarga y de condiciones de contorno. Este modelo debe poder reproducir y validar o corregir el balance hídrico medio que se ha presentado en la sección correspondiente a modelo conceptual.

El modelo, una vez calibrado, debe permitir el estudio de escenarios concretos de evolución del sistema, los cuales podrían plantearse en régimen transitorio. Esto incluye la posibilidad de estudiar escenarios climáticos futuros o la posibilidad de estudiar el aumento, cese o cambio de localización de las explotaciones. Se propondrá a la DGA la evaluación de ciertos escenarios concretos, por ejemplo, la posible modelación del régimen permanente de un año representativo. La profundidad y el alcance de esta actividad será discutida por ambas partes.

7.4 Discretización espacial

El dominio modelado es un rectángulo de tamaño 82.855 x 73.000 m². El dominio se divide en planta en celdas cuadradas, de 365 m de lado. Se trata por tanto de una malla regular en planta, de 200 filas x 227 columnas. Esto supone 45.400 celdas en planta, con un número importante de las mismas que se declaran como inactivas puesto que están fuera del sistema. En vertical, el tamaño de las celdas es flexible para adaptarse a la geometría que se presenta en la **Figura 7-1**. Al tratarse de 3 celdas en vertical, se obtiene un total de 136.200 celdas en total.

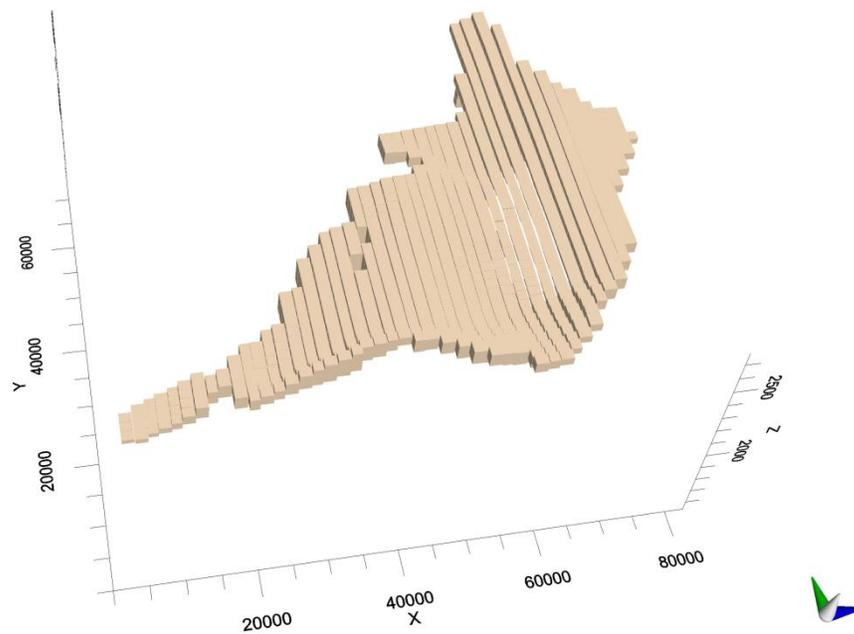


Figura 7-3. Visualización de la malla en tres dimensiones. Para poder visualizarse bien, la malla de la figura que se presenta es una malla virtual con menos celdas de las que tiene el modelo. Fuente: elaboración propia.

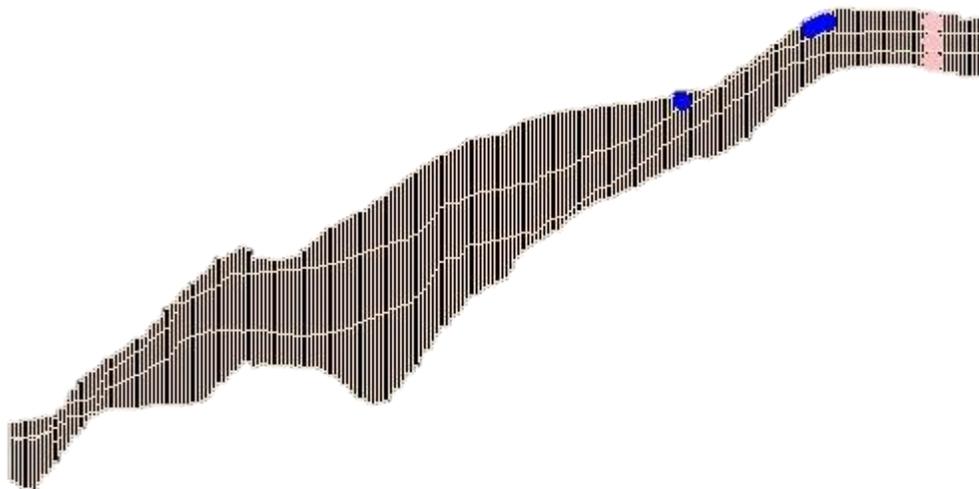


Figura 7-4. Visualización de un perfil vertical de la malla. Se pueden ver la localización de las tres capas. Fuente: Elaboración propia.

7.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se sintetizan en la **Figura 7-5**.

La base del acuífero se trata como borde impermeable. El techo del acuífero no se impone ninguna condición al tratarse de un acuífero libre. El resto de contornos se tratan con condiciones de tipo Neumann (equivalente a flujo prescrito) o como condiciones Cauchy (o de tipo mixto).

En concreto, los límites N, NE y SE se tratan como flujos prescritos, con los valores preliminares obtenidos de la **Tabla 6-3**, pero con valores a calibrar. También se considera flujo prescrito, en este caso fijado a un valor nulo, las entradas por los contornos NO y S, como puede verse en la Figura (líneas negras).

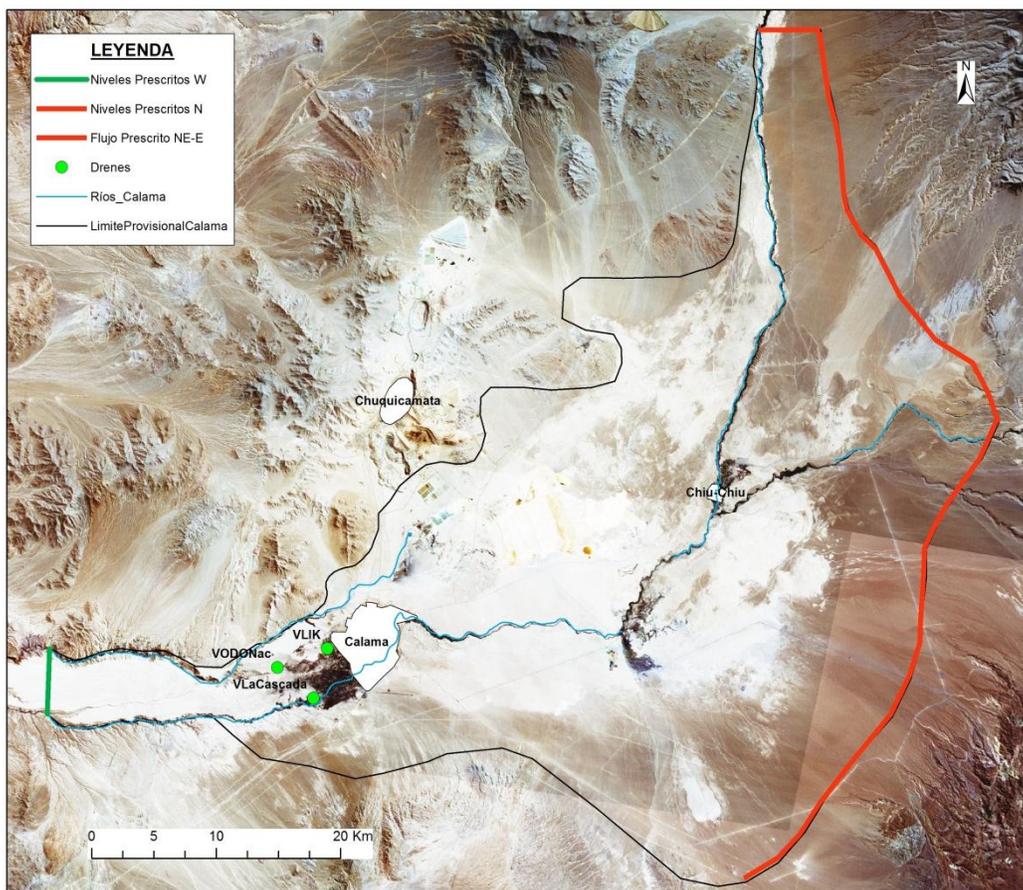


Figura 7-5. Condiciones de contorno utilizadas en el modelo numérico. Fuente: elaboración propia.

Los contornos mixtos incluyen, en primer lugar, el contorno O, en el que fija un nivel igual a 2100 m y un parámetro de goteo a calibrar. De modo equivalente se considera un punto situado en el contorno N, correspondiente a la entrada del río Loa al sistema, se trata de modo similar, con nivel fijo igual a 2800 m y un coeficiente de goteo a calibrar.

Se trata también como condición mixta (de tipo dren) los ríos Loa y San Salvador, así como los cuatro puntos en los que se produce descarga del sistema en forma de manantiales (en concreto, los correspondientes a las vertientes Likantatay, la Cascada, Ojos de Apache en Enaex y Ojos de Apache en el nacimiento). En todos los casos se asigna como niveles de agua los valores extrapolados de la topografía y con parámetros de goteo inciertos que deberán calibrarse. Esta condición se aplica sólo a la capa superior del modelo tridimensional, mientras que el acuitardo y el acuífero inferior no son sensibles a la presencia de ríos o manantiales.

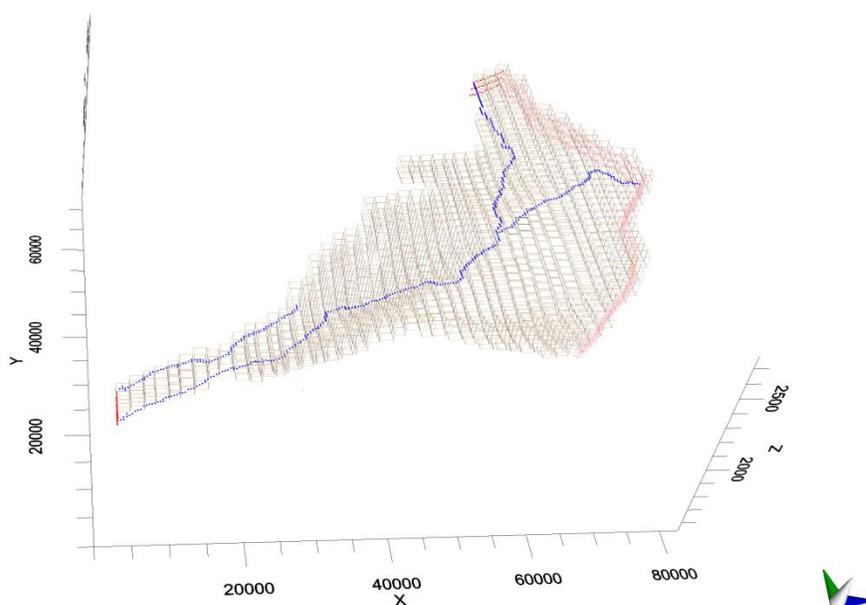


Figura 7-6. Visualización de las malla en tres dimensiones con las condiciones de contorno y los ríos. Niveles prescritos aparecen en color rojo; ríos en color azul. Fuente: elaboración propia.

7.6 Zonificación de parámetros

El tratamiento tridimensional del modelo implica la necesidad de definir en todo elemento de la malla los valores de conductividad hidráulica. Al tratarse de un modelo estacionario no es necesario introducir en el sistema los valores de almacenamiento específico.

Los valores adoptados en la modelación numérica parten de los datos compilados en el Capítulo 4 y que posteriormente se deberían variar durante el proceso de calibración en el futuro. Así, se asigna en principio para cada acuífero el valor correspondiente a la media geométrica de los datos de K compilados, lo que resulta en valores de 0.14 m/día para el acuífero superior y de 0.036 m/día para el acuífero inferior. El valor de la K correspondiente al acuitardo se toma igual a 0.007 m/día. La **Figura 7-7** representa la zonificación de la segunda capa donde se encuentra el acuitardo en su parte central.

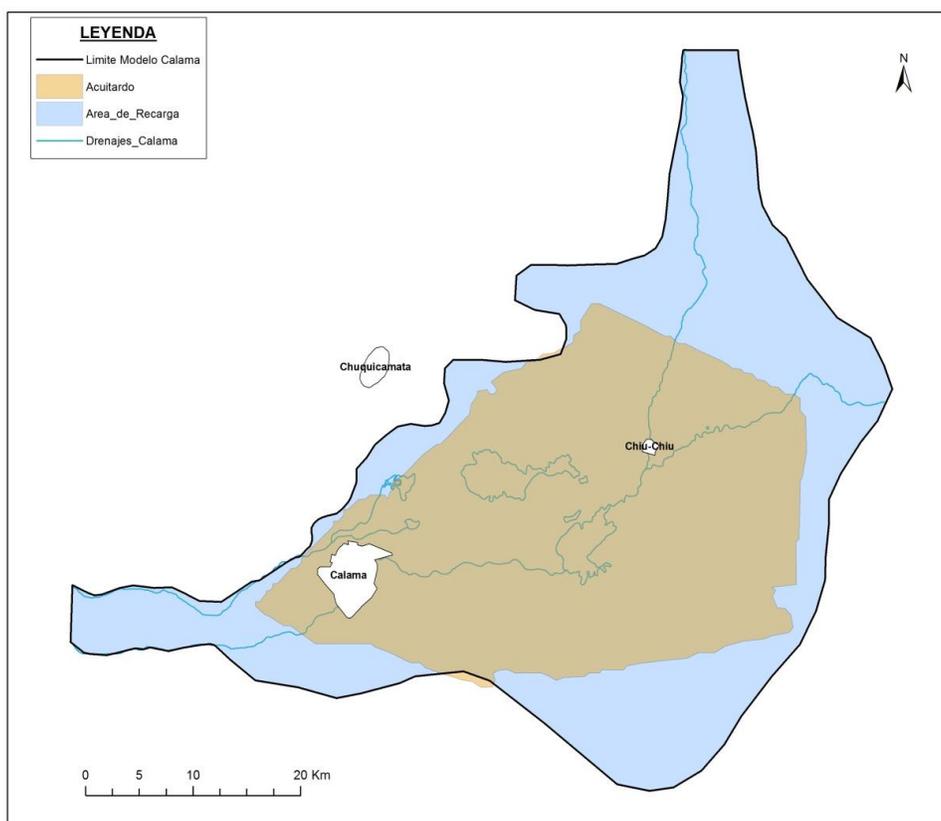


Figura 7-7. Visualización de las zonas de la segunda capa del modelo numérico. La parte central contiene el acuitardo y se representa mediante una zona de menor permeabilidad. Fuente: Elaboración propia.

El otro parámetro hidráulico que se debe incluir en el modelo es la recarga. Todos los elementos de recarga se aplican sólo a la capa superior del modelo (acuífero superior).

La recarga por precipitación se supone homogénea en toda la zona del modelo, y de valor 1mm/año. La recarga a través del Tranque Talabre se extiende en superficie de acuerdo a la **Figura 5-8**, y su valor se evalúa a priori en 1800 m³/día.

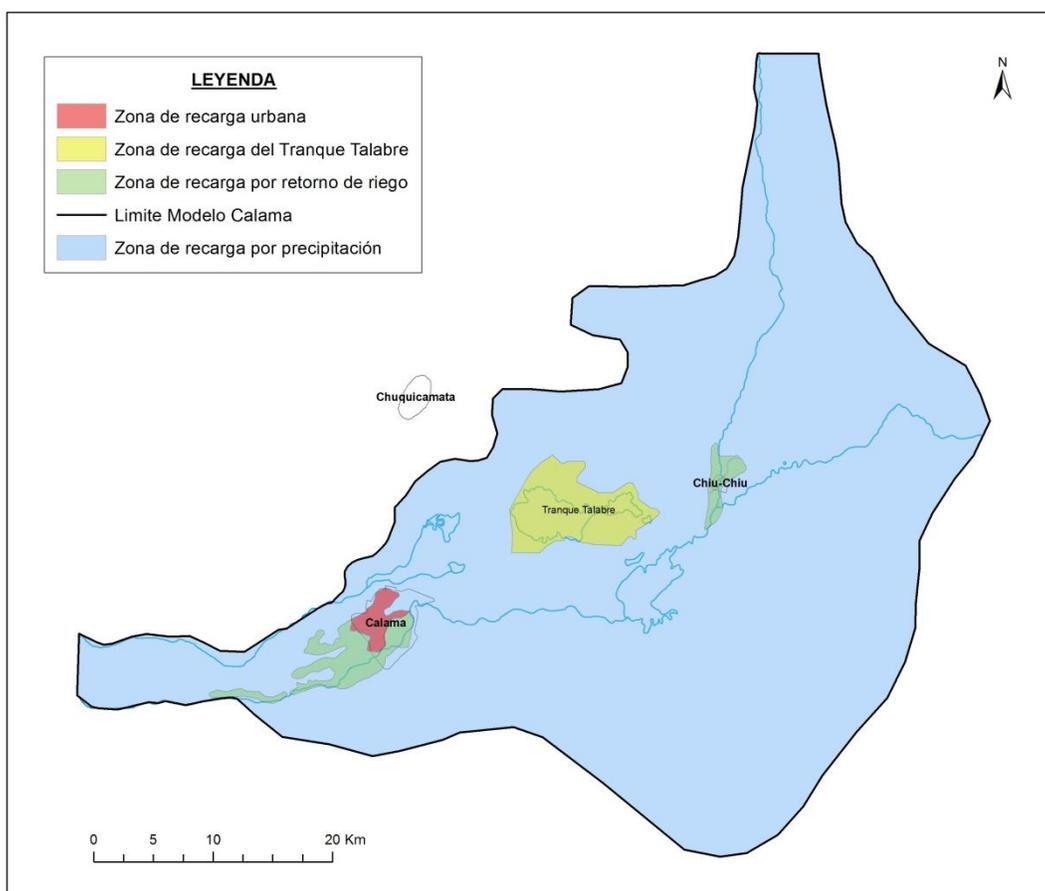


Figura 7-8. Zonificación de la recarga separando zonas de riego, zonas urbanas , Tranque Talabre y recarga por precipitación. Fuente: Elaboración propia.

La recarga en zonas urbanas incluye la superficie dibujada en la **Figura 5-13** y con los valores de la **Tabla 5-2**. Su representación en el modelo se detalla en la **Figura 7-8**.

La recarga correspondiente a excedentes de riego incluye la superficie dibujada en la **Figura 5-11** y con un caudal de recarga evaluado en 7000 m³/día. Fuente: elaboración propia.

7.7 Discusión de resultados.

A continuación se presentan los resultados del modelo numérico. La **Figura 7-9** presenta el mapa de piezometría del acuífero superior y la **Figura 7-10** el correspondiente al acuífero inferior. Puesto que el modelo no ha sido calibrado es de esperar diferencias importantes entre las observaciones y lo simulado. Aun así, importantes conclusiones sobre el comportamiento del sistema pueden observarse.

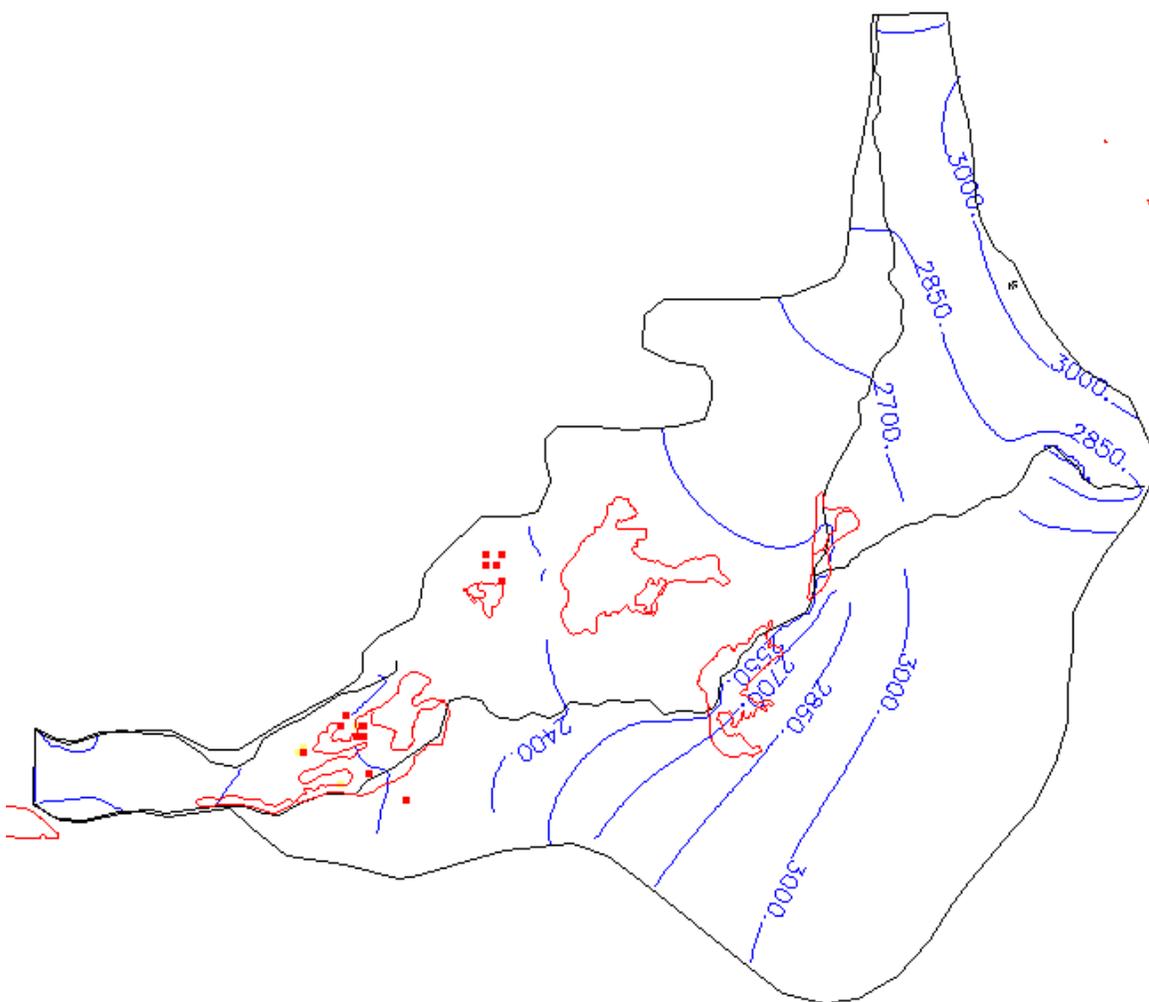


Figura 7-9. Mapa piezométrico simulado del acuífero superior (capa 1). Fuente: Elaboración propia.



Figura 7-10. Mapa piezométrico simulado del acuífero inferior (capa 3). Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento general del flujo es consistente con la piezometría presentada en el estudio hidrogeológico y realizado en base a las observaciones de niveles en sondeos. El agua subterránea fluye desde el contorno N, NE, SE hasta el contorno Oeste. Sorprendentemente por tratarse de un modelo sin calibrar, el mapa de piezometría simulado se compara bien con el observado en la zona norte del sistema con respecto al río Loa. Esta zona es la zona con mayor cantidad de información y por tanto la de menor incertidumbre. Este hecho nos indica que el modelo numérico es capaz de representar bien el sistema y sugiere que tanto el balance hídrico como el modelo conceptual presentado en el proyecto son consistentes con las observaciones. Para poder comparar

bien dicha piezometría con la presentada en el estudio hidrogeológico, la **Figura 7-11** vuelve a presentar la piezometría simulada en el acuífero superior pero ahora utilizando las mismas equipotenciales que las utilizadas en el estudio hidrogeológico. La zona Sur del sistema con respecto al río Loa tiene poca información y su conocimiento es escaso.

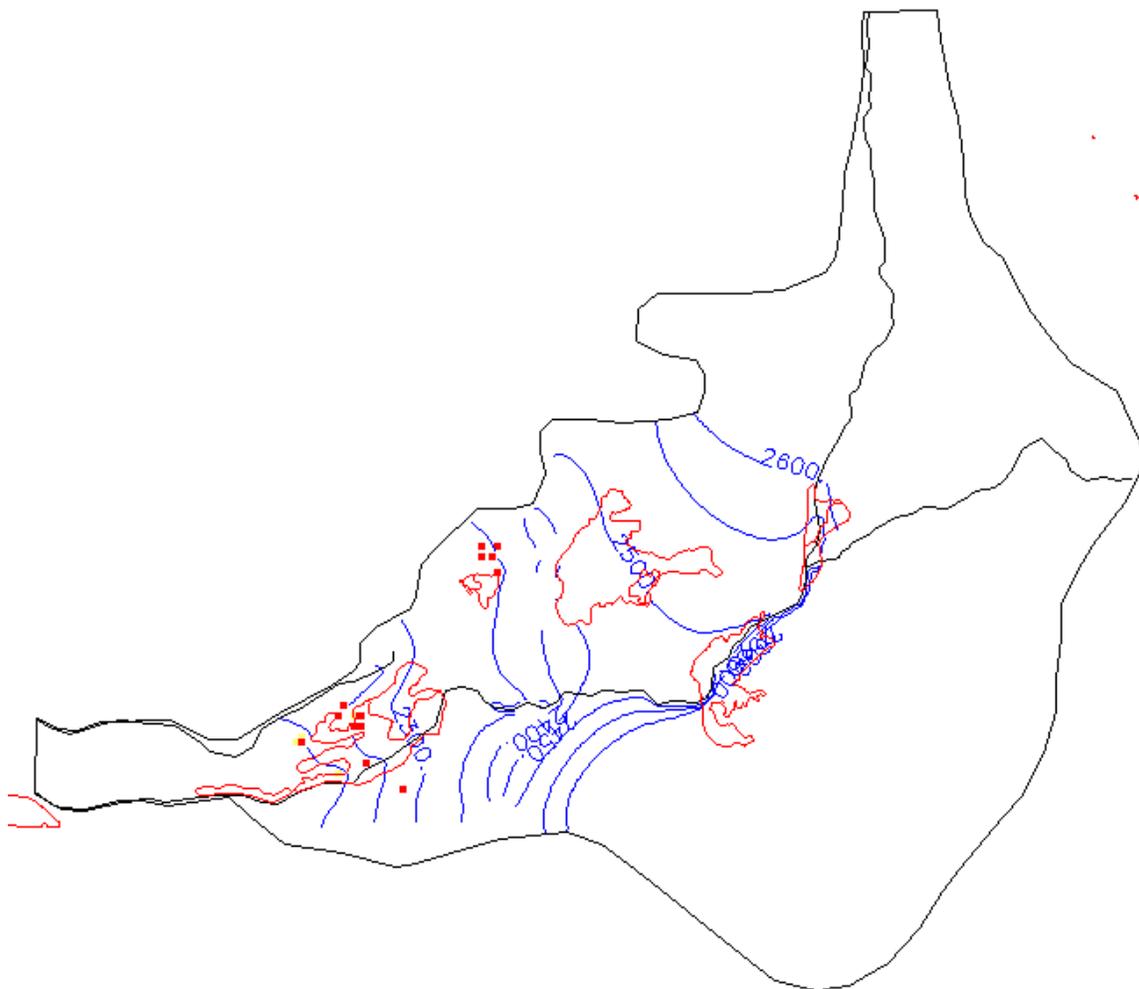


Figura 7-11. Mapa piezométrico simulado del acuífero superior (capa 1). Fuente: Elaboración propia.

El modelo numérico indica que el caudal entrante por el contorno NE, SE debería ser inferior al estimado o bien la permeabilidad del sistema es mayor que la estimada en esta zona. Este hecho hace que la piezometría no tenga valores físicamente posibles cerca del contorno NE y SE, puesto que los niveles piezométricos son mayores que la elevación topográfica del terreno. Esto es físicamente imposible en un acuífero libre.

Cuando se compara la piezometría del acuífero superior con la del acuífero inferior se observa que no existen diferencias importantes. Este hecho también se refleja en el mapa piezométrico resultante del estudio hidrogeológico. La piezometría está marcada por unas entradas laterales en el contorno N, NE, SE que son muy importantes. Puesto que no hay información sobre este hecho, dichas entradas se han considerado iguales para el acuífero superior e inferior. La transmisividad del acuífero superior es algo superior en esa zona a la del acuífero inferior y por tanto es de esperar que el caudal entrante sea más grande en el acuífero superior. Esto último debería de examinarse con más detalle durante la calibración del modelo en un futuro.

De la **Figura 7-9**, mapa piezométrico simulado del acuífero superior, se observa una zona al Sur del río Loa y cerca de la ciudad de Calama en la cual la piezometría no se ha dibujado. Esto no ocurre en el acuífero inferior y quiere indicar que en dicha zona los niveles son inferiores a la elevación de la base del acuífero superior y por tanto dichas celdas se han drenado (celdas secas). Este hecho es consistente con el modelo anterior de "El Tesoro" que también encontraba niveles bajos y celdas secas en esa zona. También es consistente con observaciones de niveles en esa zona.

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

La zona de estudio ha sido objeto de un número importante de estudios que han abordado ámbitos parciales del dominio y con objetivos diversos. El estudio presentado aquí ha logrado la integración de toda la información hidrogeológica disponible, desarrollando un modelo conceptual integrado del funcionamiento del sistema acuífero de la gran cuenca de Calama. Para conseguir esto, además de compilar un vasto volumen de información, ha sido necesario levantar nuevos datos en zonas en las que se disponía de un conocimiento prácticamente nulo del sistema acuífero. Esto se ha logrado mediante una campaña gravimétrica, ejecutada durante el desarrollo de este proyecto.

La definición de un dominio ampliado de modelación, como el presentado en este trabajo, considera el sistema de recursos hídricos como un sistema integrado a nivel de la gran cuenca de Calama, abarcando espacialmente todos los modelos hidrogeológicos construidos previamente.

Se ha conseguido el desarrollo de un modelo geológico tridimensional que utiliza toda la información de captaciones existentes, así como sucesivas campañas geofísicas y se reúne toda esta información en una sola base de datos unificada. Esta base de datos permite a su vez la actualización del modelo en función de la presencia de nuevos antecedentes.

Se ha realizado un análisis que cruza la información piezométrica de ambos acuíferos con los datos hidroquímicos. Este cruce de perspectivas ha permitido postular hipótesis que explican los patrones de flujo principales y la presencia de aguas con diferentes huellas hidroquímicas. Por ejemplo, se ha logrado establecer a través del análisis hidroquímico que la recarga de la gran cuenca de Calama proviene subterráneamente desde dos fuentes principales: la más importante provendría como aporte subterráneo desde la cuenca del río Salado, con una marcada huella clorurada sódica con influencias geotermales, y otra fuente importante provendría de forma subterránea desde aguas arriba del embalse Conchi con una marca de aguas tipo cloruradas más magnésico-cálcicas.

En términos generales, a partir de las piezometrías la dirección de flujo principal muestra un patrón de flujo que se orienta de nor-este a sur-oeste, para ambos acuíferos. Al realizar un análisis de detalle y observar los mapas de conductividad eléctrica para ambos acuíferos, se desprende la presencia de una zona en torno al Salar Del Indio en que el gradiente hidráulico es mayor, la permeabilidad se reduciría relativamente y el tiempo de residencia/renovación sería largo. En este sentido, al observar con mayor detalle el patrón de flujo se puede observar que el flujo de aguas subterráneas fluye de nor-este a sur-oeste hasta que llega al Salar de Talabre, en donde se ve "forzado" a cambiar de rumbo al toparse con una zona más lenta y reorientarse en sentido norte-sur. En términos hidroquímicos en esta zona se produce una mezcla de aguas más frescas (1000-2000 uS/cm) que vienen de aguas arriba con aguas más cargadas (>25.000 uS/cm) de la zona del Salar Del Indio. Esta zona en que se produce mezcla es bastante más marcada para el acuífero superior que para el acuífero inferior.

Una vez atravesada la zona de mezcla (central) la dirección de flujos principales se vuelve a reorientar en sentido casi este-oeste. Es interesante notar que en el caso del acuífero superior esta dirección de flujo coincide con el lineamiento que dibuja la quebrada de la vertiente Ojos de Opache, que opera como un dren que permite el afloramiento de gran parte del caudal del acuífero superior.

El uso de los mapas de conductividad eléctrica en conjunto con los mapas piezométricos ha resultado de gran utilidad para el análisis de la información. Se estima que existe el potencial para realizar análisis de mayor detalle en zonas específicas del dominio en función de este parámetro.

De acuerdo al análisis expuesto en la hidroquímica, respecto de los flujos subterráneos laterales que recargan a la cuenca de Calama, para los niveles acuíferos superior e inferior, el acuífero superior se encuentra mayormente influenciado por la cuenca del río Salado, mientras que el acuífero inferior tiene una proporción relativa mayor de la cuenca de Loa Alto (aguas arriba de Conchi).

En la gran mayoría del área modelada, los acuíferos superior e inferior se encuentran separados físicamente por la presencia de un acuitardo arcilloso. Esta situación provoca que existan una semi-desconexión hidráulica entre ellos de forma que las alturas de las cargas hidráulicas puedan ser diferentes. Esto no quiere decir necesariamente ausencia

de una transferencia vertical de agua subterránea o total ausencia de respuesta en los niveles frente al bombeo, sino sólo quiere decir que esta filtración o "goteo" es lo suficientemente lenta como para mantener el desequilibrio en las alturas hidráulicas de ambas unidades. Siempre que exista una diferencia de cargas hidráulicas, existirá una transferencia de agua desde la unidad de mayor carga hidráulica hacia la de menor hidráulica, y este caudal puede ser cuantificado mediante un cálculo que requiere de la permeabilidad vertical, sección de goteo considerada y gradiente hidráulico.

En términos generales, en los alrededores de la ciudad de Calama y hacia la salida oeste la carga hidráulica del acuífero superior es más alta que la del acuífero inferior, y por lo tanto teóricamente existiría un flujo vertical descendente. Sin embargo, hacia el sector del Tranque Talabre y aguas arriba de él esta relación se invierte y es el acuífero inferior el que posee una carga hidráulica más alta y por lo tanto la relación de goteo se produciría desde el acuífero inferior hacia el acuífero superior.

Un modelo de cuenca con flujo tipo pistón favorece que los niveles más profundos mantengan una carga hidráulica mayor en toda la extensión de la cuenca. Sin embargo entre la ciudad de Calama y hacia la salida oeste esta situación es diferente. Este cambio en el esquema de cargas hidráulicas se explicaría por la presencia de fuentes de recarga adicional sobre el acuífero superior, la que provocaría un aumento de su nivel piezométrico y por lo tanto la inversión del esquema estándar bajo un flujo tipo pistón entre los dos acuíferos. Estas fuentes de recarga adicional sobre el acuífero superior han sido señaladas en las componentes del balance: Tranque Talabre, infiltración de operaciones mineras, infiltración de red urbana de agua potable de Calama e infiltración de los excedentes de riego.

En el balance global de la cuenca de Calama, la suma de entradas al sistema oscilan en el rango de 1200 l/s – 2000 l/s, mientras que las salidas oscilan en el rango 1200 l/s – 2300 l/s. El estado del sistema es de desequilibrio con un déficit que oscila entre los 0 l/s – 300 l/s.

El aporte más importante al sistema procede de la entrada de agua por los contornos norte y este a través de los acuíferos superior e inferior. Mientras que las demás componentes del balance tienen un orden de magnitud menos, y la suma de todas ellas escasamente llegan al 25% del total.

En las salidas del balance global, la componente más importante corresponde a las descargas del acuífero superior hacia el cauce del río Loa, junto con las descargas del mismo acuífero hacia las vertientes. Ambas descargas suponen cerca del 70% de las salidas totales del sistema. Las descargas por bombeos, evaporación y salida subterránea representan un componente minoritario dentro del balance general de la cuenca.

En conclusión, el balance es deficitario, con déficit en el rango de 0 - 300 l/s. La consecuencia de este déficit se observa en el descenso progresivo de los niveles piezométricos a cargo del volumen de agua almacenada en los acuíferos en gran parte del dominio, concentrado principalmente en las zonas de extracción.

En términos del estado de equilibrio y desequilibrio en el balance, es posible que la regulación principal sea ejercida por las diferencias de carga hidráulica entre el acuífero superior y el río Loa. En este sentido, con un río Loa más generoso en caudal y con mayor altura hidráulica, las descargas del acuífero serían menores. Por el contrario, cuando el río Loa lleva poco caudal, el gradiente hidráulico con el acuífero es mayor y por lo tanto recibe más agua de él. Como el agua que se descarga por las vertientes proviene del acuífero superior, y este a su vez es drenado aguas arriba por la relación con el río, como consecuencia, la altura del río Loa tiene un efecto directo sobre el balance de la cuenca y sobre los caudales aforados en las vertientes hacia la salida oeste de la cuenca. Y por lo tanto, debiésemos esperar que en la medida de que el río Loa disminuya su caudal, los aforos en las vertientes serán cada vez menores.

El modelo conceptual descrito, debiese ser correctamente representado por la etapa de modelación numérica, y de esta forma lograr evaluar el comportamiento del sistema frente a sucesivos cambios en los regímenes de explotación y uso de la cuenca. Sin embargo, el alcance de la modelación numérica desarrollado en este trabajo es a nivel preliminar y por lo tanto no permite validar estas hipótesis. Una segunda etapa, dedicada a la modelación numérica en detalle debiese permitir observar estos patrones de flujo y la respuesta hidroquímica que muestran los datos compilados durante esta investigación.

De esta forma, el presente estudio y una modelación numérica de detalle se transforman en una herramienta de consulta y análisis para abordar los distintos planes de seguimiento, alerta, monitoreo y control de las extracciones existentes, con una perspectiva global del sistema de recursos hídricos de Calama.

8.2 Análisis de fortalezas

Las fortalezas del trabajo presentado aquí residen en:

- Integración y compilación de toda la información disponible provista por DGA.
- Desarrollo de una base de datos integrada de gran potencialidad, y desarrollo de un modelo geológico 3D a nivel regional.
- Generación de más de 200 Km de nuevos datos gravimétricos, que muestran señalan sobre la posición del basamento en zonas donde existía escasa o nula información sobre la geometría de la cuenca.
- Integración de la geología, hidrología e hidrogeología como 3 aspectos base en la metodología para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual integrado.
- Análisis de los datos hidroquímico y desarrollo de un modelo de flujo hidroquímico coherente con los datos de niveles, geología estructural, parámetros hidroquímicos generales y elementos mayores.
- Postulación de un modelo hidrogeológico conceptual integrado que integra la información de distinta índole y origen.
- Construcción de un modelo numérico de flujo preliminar que permite estimar las características y requerimientos técnicos de un modelo de estas dimensiones regionales, volumen de bases de datos necesarias y posibilidades para construir potenciales escenarios de simulación.

8.3 Análisis de debilidades

Los aspectos que requieren de mayor atención y cuidado son los siguientes:

- Existen áreas del dominio modelado con ausencia de información. Esta ausencia de información dice relación con la geometría de la cuenca y presencia de las unidades acuíferas, información de niveles y hidroquímica.
- El enorme volumen de información disponible requiere de un esfuerzo de revisión y análisis crítico de los datos para poder compilar todo en una única base y lenguaje común, especialmente cuando las fuentes que han generado la información provienen de una amplio abanico de empresas, competencias e intereses. Lo anterior obliga a mantener una revisión crítica permanente del origen

y calidad de los datos utilizados, puesto que una incorrecta gestión de la base de datos puede inducir a errores en el análisis posterior.

- Ausencia de análisis detallados sobre aspectos y zonas específicas de la cuenca que si requieren mayor atención.
- No se han desarrollado estudios hidrogeológicos en las sub-cuencas que alimentan a la gran cuenca de Calama, y por lo tanto parte del conocimiento que existe sobre las fuentes de alimentación de la hidrogeología de Calama se basan en supuestos e hipótesis que necesitan ser validados.

8.4 Recomendaciones

En relación con los planes de monitoreo y futuras investigaciones de la hidrogeología en la gran cuenca de Calama se puede señalar lo siguiente:

- La zona geográfica de mayor incidencia en los recursos de la sub-cuenca corresponde a la importante cuenca hidrográfica del río Salado y a las cuencas ubicadas aguas arriba del embalse Conchi. La sub-cuenca del río Salado posee una hidroquímica particular puesto que recibe sus aguas desde manantiales geotermales, descarga subterránea y aguas de precipitación y deshielos. Resulta altamente provechoso realizar un estudio dedicado de esta subcuenca, en donde se integre el conocimiento hidrogeológico con las condicionantes hidroquímicas y geotermales. Un modelo de estas características permitiría cuantificar los caudales de recarga que esta sub-cuenca vierte hacia la gran cuenca de Calama, y permitiría caracterizar en detalle la influencia hidroquímica que ejercen sus aguas sobre las zonas más bajas.
- De la misma forma que con la sub-cuenca del río Salado, sería provechoso contar con una modelación conceptual que integre la hidrogeología de la sub-cuenca del río Loa aguas arriba del embalse Conchi, debido a que esta sub-cuenca regula la otra fuente de recursos hídricos que alimentan la cuenca de Calama.
- En una amplia zona del borde este de todo el dominio modelado, existe incertezas sobre la presencia y extensión de los acuíferos así como de los tiempos de residencia del agua subterránea. Estas incertezas provocan que no sea posible valorar la recarga desde el borde este (al sur de la sub-cuenca del río Salado). Para resolver estas interrogantes, resulta necesario lograr medir niveles y medir conductividades eléctricas o sólidos totales disueltos.

- En la entrada norte del dominio, cerca del área del embalse Conchi es necesario cuantificar los caudales de entrada subterránea y la presencia o ausencia de los niveles acuíferos superior e inferior. Esto se lograría mediante sondajes, geofísica dedicada y muestras químicas de aguas subterráneas.
- La salida oeste del modelo, actualmente considera un caudal de 240 l/s a través del acuífero inferior. Este valor es una estimación gruesa recopilada de la bibliografía que fue obtenido a través de cálculos de secciones de Darcy. Este valor debiese ser precisado con un balance hídrico dedicado al acuífero inferior mediante las investigaciones propuestas para mejorar el conocimiento de las entradas, así como una geofísica dedicada para modelar con precisión la geometría de la sección de paso del borde oeste.
- En relación con los planes de monitoreo de niveles de ambos acuíferos, se recomienda mantener las frecuencias mensuales actuales para todas las captaciones disponibles, y mejorar la base de datos entregada en este proyecto mediante su actualización periódica.
- En relación con los planes de alerta temprana (PAT), se recomienda una revisión técnica que apunte a considerar el sistema de forma integrada y en su conjunto. En este sentido, la recomendación pasa por considerar que las medidas de gestión aguas arriba la gran mayoría de las veces inciden directamente aguas abajo y por tanto no es posible gestionar eficientemente las zonas de forma separada.
- Se recomienda investigar la relación que existe entre la altura de la superficie del río Loa y las descargas de las vertientes. El análisis de esta situación requiere determinar la existencia de una correlación entre las descargas del embalse Conchi con los niveles de aforo del río Loa (en distintas secciones de aforo) y las descargas históricas de las vertientes en la salida oeste de la cuenca.
- Se recomienda la revisión de los cálculos de almacenamiento en aquellas zonas sujetas a un bombeo intensivo. Producto de los caudales de bombeo, existen áreas sensibles en donde es posible que se produzcan cambios en los flujos verticales entre el acuífero superior e inferior.
- Se recomienda desarrollar un modelo numérico de flujo de detalle a partir del modelo hidrogeológico conceptual y modelo numérico preliminar desarrollado en este trabajo. Esta herramienta permitiría realizar una gestión integrada de los recursos de la cuenca y evaluar en su conjunto los impactos de distintos escenarios de simulación.

- La precipitación directa sobre la cuenca es una componente menor del balance global, y por lo tanto no incide sustancialmente en la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, las avenidas e inundaciones esporádicas producto de eventos meteorológicos de carácter torrencial si contienen un potencial importante como fuente de recarga de aguas subterráneas. Para poder hacer uso de estos recursos, se propone el estudio de la infiltración y almacenamiento subterráneo de eventos meteorológicos torrenciales en la zona.
- Se puede realizar un estudio de investigación e inversión, compartida con los privados y que les permita operar en el futuro a modo de cuenta de ahorro de los recursos hídricos infiltrados artificialmente. Sobre esto último existe experiencia en otras partes del mundo, como forma de revertir los descensos regionales sostenidos en la cuenca.

9. Referencias Bibliográficas

- AQUACONSULT. Estudio Geológico-Geofísico del Área de los Pozos MET de Calama. Santiago, Minera El Tesoro, Noviembre, 2006. 133 p.
- AQUACONSULT. Modelamiento hidrogeológico de la subcuenca Cluster Toqui para el proyecto Quetena. Anexo 2-1. Santiago, Codelco, Noviembre, 2011. 80 p.
- CADE-IDEPE CONSULTORES E INGENIERÍA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Santiago, DGA, Diciembre, 2004.
- CODELCO NORTE. Umbrales pozos control drenaje rajo MMH RCA 311/2.005. Presentación Powerpoint. Antofagasta, Codelco, Diciembre, 2009. 34 p.
- COX, S.J.D (2006). GeoSciML: a standards-based encoding for transfer of geoscience information from IUGS/CGI. En: Int. Assoc. for Mathematical Geology XIth International Congress. 2006.
- DICTUC INGENIERÍA. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudio de evaluación de recursos hídricos. Sector Calama-Pampa Llaqui, Mapa hidrogeológico. Santiago, DGA, Febrero, 2005. 34 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA. Evaluación de los recursos hídricos en los sectores Calama y Llaqui en la cuenca del río Loa. S.I.T. 85. Santiago, DGA, Mayo, 2005. 135 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico del sector campo de pozos minera el Tesoro. (Período: Julio-Septiembre 2011). Calama, Minera El Tesoro, Octubre, 2011.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Informe técnico: Resultados de la construcción del pozo OBS-11C. Calama, Minera el Tesoro, Noviembre, 2009. 69 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Informe técnico: Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa en Calama, Chile. Calama, Minera El Tesoro, Noviembre 2009. 117 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Informe trimestral de monitoreo hidrogeológico sector campo de pozos minera el tesoro. (Período: Octubre-Diciembre 2009). Calama, Minera El Tesoro, Enero, 2010. 246 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Informe trimestral del monitoreo hidrogeológico

- del sector campo de pozos de la Minera el Tesoro. Calama, Minera El Tesoro, Abril-Junio, 2011. 48 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES LTDA. Modelo hidrogeológico del sector Calama. Presentación Powerpoint. Calama, Minera El Tesoro, Octubre, 2007. 29 p.
- ERROL L. MONTGOMERY & ASSOCIATES. Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Loa en Calama, Chile, Noviembre, 2011. 117 p.
- GEOHIDROLOGÍA. Modelo de simulación hidrogeológica Radomiro Tomic. Proyecto Quetena. Santiago, Codelco, Junio, 2011. 20 p.
- GOGU, R.C; CARABIN, G.; HALLET, V; PETERS, V. and DASSARGUES, A. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. En: Hydrogeological Journal. 2001. p.9:555-569.
- HAUSER YUNG, ARTURO. Informe técnico: Hidrogeología segmento intermedio del río Loa, II Región. Santiago, SNGM, Junio, 1999. 23 p.
- KNIGHT PIÉSOLD. Modelamiento hidráulico del tranque Talabre y su relación con los acuíferos y cauces superficiales. Santiago, Codelco, Junio, 2010.
- LAKE, R. *The application of geography markup language (GML) to the geological sciences*, En: Computers & Geosciences. 2005. 31 p.
- MAIDMENT, D.R. ArcHydro:GIS for Water Resources. En: ESRI Press, Redlands, California. 2002.
- NCGIA. National Center for Geographic Information and Analysis. 1990.
- SEN M. & DUFFY. T. GeoSciML: Development of a generic GeoScience Markup Language. En: Computers & Geosciences. 2005. p. 31:1095–1103.
- STRASSBERG, G. A geographic data model for groundwater systems. PhD Thesis. The University of Texas at Austin. 2005.
- VELASCO.V, GOGU.R, VÁZQUEZ-SUÑÈ.E, GARRIGA.A, RAMOS.E, RIERA.J , ALCARAZ.M. The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment. **En: Environ Earth Sci**. 2012. DOI 10.1007/s12665-012-1898-2.
- VOGT, J. Guidance document on implementing the GIS elements of the WFD. Produced by WFD

Working Group GIS, Joint Research Centre, European Commission. Office for Official Publications of the European Communities. 2002. 166 p.